



ISSN 1001-5868
CODEN BAGUE5



在线投稿 阅读

半导体光电

SEMICONDUCTOR OPTOELECTRONICS

中文核心期刊

Scopus数据库来源期刊

RCCSE中国核心学术期刊(A)

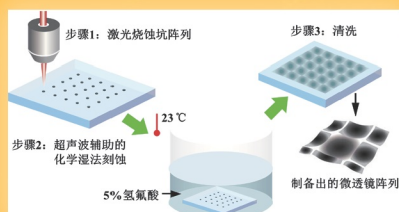
5

2020

第41卷

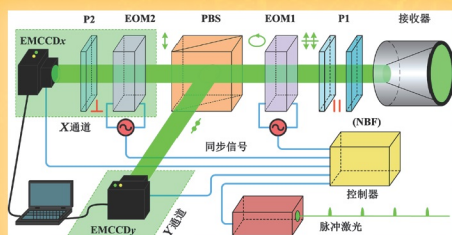
本期导读

- 视网膜OCT B-scan图像分割算法综述
- 低对比度光栅诱导的激光腔中准连续域束缚态研究
- 氧化石墨烯修饰的色散拐点长周期光纤光栅的折射率传感特性
- 一种面向大面阵焦平面阵列的低功耗多功能读出电路设计
- 三角形硅二聚体纳米天线及其荧光增强效应研究
- 光子计数激光雷达游走误差与时间抖动的研究
- 基于光纤陀螺的桥梁路面平整度检测研究



微透镜阵列的制作及其在光场成像中的应用研究进展

综述了微透镜阵列制备技术的最新研究进展,并将这些制备方法分为直接法和间接法进行了对比分析。介绍了微透镜在光场成像应用中的研究现状,指出目前该领域的研究重点是光场相机设计的新思路及提高分辨率的相应模型算法。



基于面阵三维成像激光雷达的目标点云分割技术

针对偏振三维成像系统的高效目标三维点云分割问题,提出一种多维信息融合的高效分割理念。系统采用高分辨率EMCCD相机作为面阵探测器,在一次成像过程中,可同时获得视场中的灰度图像以及三维点云数据。该方法将三维点云数据降维为二维图像处理,显著降低了计算复杂度。

ISSN 1001-5868



重庆光电技术研究所 主办

Chongqing Optoelectronics Research Institute

目次

※动态综述※

视网膜 OCT B-scan 图像分割算法综述	袁坤, 霍力(605)
微透镜阵列的制作及其在光场成像中应用的研究进展	乌李瑛, 瞿敏妮, 付学成, 等(611)
大功率半导体激光器抗腔面灾变性光学损伤技术综述	宋悦, 宁永强, 秦莉, 等(618)

※光电器件※

低对比度光栅诱导的激光腔中准连续域束缚态研究	范策, 王宇飞, 屈晋先, 等(627)
氧化石墨烯修饰的色散拐点长周期光纤光栅的折射率传感特性	赵明富, 王鑫, 罗彬彬, 等(632)
基于复合膜的双通道光纤表面等离子共振传感器	顾钦顺, 葛益炯, 张鹏, 等(638)
有机卤化物盐对钙钛矿太阳能电池器件性能的影响	冯晓娜, 李丹, 梁春军(644)
基于超材料的太赫兹超窄带吸收器设计及特性分析	沈涛, 潘武, 李颢, 等(648)
高灵敏度多模干涉-异质无芯光纤折射率传感器	杨宏艳, 刘孟银, 李叶柯, 等(652)
一种面向大面阵焦平面阵列的低功耗多功能读出电路设计	撒鹏花, 乔辉, 马丁, 等(658)
一种主动共存的增强型光束扩展器	张永棠(663)
载流子平衡方法提高量子点发光二极管效率的研究	杨媚, 郑力为, 孟琪, 等(667)
一种用于油气井持气率测量的高可靠性光纤探针	姜劲栋, 王蒙, 赵庆超, 等(673)
石墨烯压力传感器结构设计与压力敏感特性研究	王冬, 秦亚飞, 袁锐波, 等(676)

※材料、结构及工艺※

掩模版复印工艺图形畸变分析与改进	束名扬, 周文, 陈栋豪(681)
PERC 背钝化结构提升多晶硅太阳能电池的光电转换性能研究	吕文辉, 邱小永, 赵庆国, 等(685)
三角形硅二聚体纳米天线及其荧光增强效应研究	刘占锋, 曹文静, 孙非, 等(689)

※光电技术及应用※

光子计数激光雷达游走误差与时间抖动的研究	罗佳承, 刘博, 华康健(695)
基于光纤陀螺的桥梁路面平整度检测研究	杨丹丹, 王立新, 胡文彬, 等(700)
基于时间一致性约束的核互相关器目标跟踪	崔雄文, 刘传银, 周杨, 等(705)
光纤电流互感器用半导体激光器数字驱动电路设计	王硕, 王国臣, 高伟(711)
基于改进 DDPG 算法的中短期光伏发电功率预测	苏诗慧, 雷勇, 李永凯, 等(717)
基于任意场景的 CCD 相机电子学增益测试方法研究	胡明鹏, 成俊舟, 任王涛, 等(724)
相位共轭信号在无中继传输系统中的性能研究	陈芳, 刘军, 李伯中, 等(729)
基于能量守恒与光谱法的无创血糖检测技术	陈健, 王太宏, 段小川(734)
基于 CLAHE 和多尺度细节融合的静脉图像增强算法	马静云, 叶兵, 汪仕铭(738)
二值加权正交迭代相机位姿估计算法	陈紫强, 周秉毅, 刘庆华, 等(743)
基于面阵三维成像激光雷达的目标点云分割技术	王盛杰, 刘博, 李和平, 等(749)

CONTENTS

A Review of Retina OCT B-scan Image Segmentation Methods	YUAN Kun, HUO Li(605)
Fabrication of Microlens Array and Its Application Progresses in Light Field Imaging	WU Liying, QU Minni, FU Xuecheng, et al. (611)
Review on The Methods of Preventing Catastrophic Optical Mirror Damage in High-power Diode Lasers	SONG Yue, NING Yongqiang, QIN Li, et al. (618)
Low-Contrast Grating Induced Quasi Bound State in the Continuum of Laser Cavity	FAN Ce, WANG Yufei, QU Jinxian, et al. (627)
Refractive Index Sensing Characteristics of Dispersion-Turning-Point Long Period Fiber Grating Functionalized with Graphite Oxide	ZHAO Mingfu, WANG Xin, LUO Binbin, et al. (632)
A Dual-channel Optical Fiber Surface Plasmon Resonance Sensor Based on Composite Membrane	GU Qinshun, GE Yixian, ZHANG Peng, et al. (638)
Effects of Organic Halide Salt on the Performance of Perovskite Solar Cells	FENG Xiaona, LI Dan, LIANG Chunjun(644)
Design and Characteristics Analysis of Terahertz Ultra-narrow Band Absorber Based on Metamaterial	SHEN Tao, PAN Wu, LI Yi, et al. (648)
High Sensitivity Multi-mode Interference Heterojunction Coreless Optical Fiber Refractive Index Sensor	YANG Hongyan, LIU Mengyin, LI Yeke, et al. (652)
A Low Power Multi-Function Readout Circuit for Large Format Focal Plane Array	SA Penghua, QIAO Hui, MA Ding, et al. (658)
An Enhanced Beam Expander with Active Coexistence	ZHANG Yongtang(663)
Influence of Charge Carrier Balance on Efficiency of QD-LED	YANG Mei, ZHENG Liwei, MENG Qi, et al. (667)
A High-reliability Optical Fiber Probe for Void Fraction Measurement of Oil and Gas Wells	JIANG Shaodong, WANG Meng, ZHAO Qingchao, et al. (673)
Structural Design and Pressure Sensitivity of Graphene Pressure Sensors	WANG Dong, QIN Yafei, YUAN Ruibo, et al. (676)
Analysis and Improvement of the Graphic Distortion in Mask Copying Process	SHU Mingyang, ZHOU Wen, CHEN Donghao(681)
Enhanced Power Conversion Performance of Multi-crystalline Silicon Solar Cells with PERC Structure	LV Wenhui, QIU Xiaoyong, ZHAO Qingguo, et al. (685)
Research on Triangular Silicon Dimer Nano-antenna and Its Fluorescence Enhancement Effect	LIU Zhanfeng, CAO Wenjing, SUN Fei, et al. (689)
Research on Range Walk Error and Timing Jitter of Photon Counting Lidar	LUO Jiacheng, LIU Bo, HUA Kangjian(695)
Detection of Bridge Pavement Evenness Based on Fiber Optic Gyro	YANG Dandan, WANG Lixin, HU Wenbin, et al. (700)
Object Tracking with Kernel Cross-correlator Based on Temporal Consistent Constraint	CUI Xiongwen, LIU Chuanyin, ZHOU Yang, et al. (705)
Design of All Digital Drive Circuit of Semiconductor Lasers for Fiber Optical Current Transformer	WANG Shuo, WANG Guochen, GAO Wei(711)
Study on Short-to-Medium-Term Photovoltaic Power Generation Forecasting Model Based on Improved Deep Deterministic Policy Gradient	SU Shihui, LEI Yong, LI Yongkai, et al. (717)
Test Methods of CCD Cameras' Electronic Gain Based on Arbitrary Scene	HU Mingpeng, CHENG Junzhou, REN Wangtao, et al. (724)
Study on the Performance of Phase-conjugated Signal for Unrepeated Transmission System	CHEN Fang, LIU Jun, LI Bozhong, et al. (729)
Noninvasive Detection of Blood Glucose Based on Conservation of Energy Metabolism and Spectroscopy	CHEN Jian, WANG Taihong, DUAN Xiaochuan(734)
Vein Image Enhancement Based on CLAHE and Multi-scale Detail Fusion	MA Jingyun, YE Bing, WANG Shiming(738)
A Binary Weighted Orthogonal Iterative Camera Pose Estimation Algorithm	CHEN Ziqiang, ZHOU Bingyi, LIU Qinghua, et al. (743)
Point Cloud Segmentation Method Based on Planar Array 3D Imaging Lidar System	WANG Shengjie, LIU Bo, LI Heping, et al. (749)

视网膜 OCT B-scan 图像分割算法综述

袁 坤^{*}, 霍 力

(清华大学 电子工程系 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 依靠光学相干层析(OCT)技术能够获得清晰的视网膜结构图,对于视网膜病变的诊断具有重要的意义。文章回顾了既往研究中典型的视网膜 OCT B-scan 图像分割算法,根据算法的输出特征,将其分为视网膜边界提取法和视网膜层提取法两类,旨在明确不同的方法获取信息的差异性,为视网膜病变诊断提供参考。

关键词: 光学相干层析; 视网膜; 分割算法

中图分类号: TP301.6 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0605-06

A Review of Retina OCT B-scan Image Segmentation Methods

YUAN Kun, HUO Li

(State Key Lab. on Integrated Optoelectron. , Dept. of Electron. Engin. , Tsinghua University, Beijing 100084, CHN)

Abstract: As an imaging technique, optical coherence tomography (OCT) is widely adopted in the field of biomedicine. The clear structure of retina can be obtained by OCT, which is important for the diagnosis of retinopathy. In this paper, reviewed are some excellent methods to retina OCT B-scan image segmentation. The OCT segmentation approaches are classified into two distinct groups according to the output-style of segmentation algorithm, which are layer-edge method and layer-self method. The differences among methods are analyzed to provide references to retinal diagnosis and algorithm researches.

Key words: optical coherence tomography(OCT); retina; segmentation algorithm

0 引言

光学相干层析 (Optical Coherence Tomography, OCT) 是近年来在生物医疗领域应用非常广泛的一种成像技术,它通过光的相干原理来获取生物组织内部结构,并根据不同的组织反射率对其进行区分,最终通过扫描得到 3D 结构图像。早期的 OCT 系统为时域 OCT(TD-OCT),主要依靠参考臂的机械扫描来实现光程差的变化,从而获得不同深度的结构特征^[1]。频域 OCT(SD-OCT)于 1995 年被提出,它突破了 TD-OCT 依靠机械运动成像的限制,通过接收不同频率的反射光来获得

深度方向的信息,显著提高了成像速度和成像质量^[2]。随着半导体行业的兴起,扫频 OCT(SS-OCT)得到发展,它利用点探测器分时记录宽带扫频光源的低相干干涉光谱信号,通过傅里叶变换实现样品内部纵向信息的并行获取,进一步提高了成像效率。

OCT 技术在生物医疗领域应用非常广泛,特别是在视网膜疾病的诊断上表现极为突出。利用 OCT 可以获得清晰的视网膜结构图。可以从 OCT 图像中完整地分割出视网膜层以及病变组织,这对于辅助医疗具有重大意义。

视网膜分割任务是指对视网膜图像中的指定层或病变组织进行提取划分,形成视觉上的独立区域。从 20 世纪初至今,人们始终没有停止对该任务的探索,也因此产生了很多种分割算法。然而,目前并没有一种典型的图像分割方法能够普遍适用于所有的

收稿日期:2020-04-21.

基金项目:国家自然科学基金项目(61575107).

^{*} 通信作者:袁 坤

E-mail: yk17@mails. tsinghua. edu. cn

场景和任务^[3-4],视网膜 OCT 图像分割任务还面临着严峻的挑战:其一是由数据集规模所引起的鲁棒性不足。无论是传统的图搜索方法还是深度学习方法,算法在设计时只能应对有限的情况,即在数据集已包含的情况下达到最优。但是当算法应用于临床时会出现多种特殊案例无法拟合的情况,例如对病变信息的错误判断。经验表明,增大数据集规模可以应对这个挑战,通过数据增强的方式也可以间接扩大数据集规模。此外,复杂的模型容易在小规模数据集上过拟合,因此降低模型复杂度也有一定的必要性。其二是选择合理的算法对病变区域进行分割。健康的视网膜层是平整、均匀的,因而易于分割。但是对存在病变的视网膜进行分割是困难的。这是由于一方面视网膜层会被病变区域破坏,丢失其原本特性,另一方面病变区域的不规则性也对算法本身机制和鲁棒性提出挑战。以往的研究已经在视网膜 OCT 图像自动分割上做了大量工作,推动了该领域的快速发展。

本文对现有的视网膜 OCT B-scan 图像分割算法做了简要总结,依据视网膜 OCT 图像分割方法的输出类型将其分为两类:视网膜边界提取法以及视网膜层提取法,并分别选取两类方法中的代表性算法进行介绍,最后总结了两类方法的特点,以期为相关算法研究和医疗诊断提供参考。

1 OCT 成像原理简介

OCT 主要依靠低相干光源的干涉和物体不同深度组织的反射率不一致的原理进行工作,其原理如图 1 所示^[2]。低相干光源发射的光束分别到达样品臂和参考臂,并分别经样品和反射镜反射后汇集发生干涉,此干涉信号可表示为式(1):

$$I_D(k) = \frac{\rho}{4}[S(k)(R_R + R_{S_1} + R_{S_2} + \cdots)] + \frac{\rho}{4}[S(k) \cdot \sum_{n=1}^N \sqrt{R_R R_{S_n}} \cdot (e^{i2k(z_R - z_{S_n})} + e^{-i2k(z_R - z_{S_n})})] + \frac{\rho}{4}[S(k) \cdot \sum_{n \neq m-1}^N \sqrt{R_{S_m} R_{S_n}} \cdot (e^{i2k(z_{S_n} - z_{S_m})} + e^{-i2k(z_{S_n} - z_{S_m})})]$$

(1)

式中, ρ 为探测器响应频率, $S(k)$ 为不同波长下的入射光信号强度, R_R 为参考臂的反射率, $R_{S_1} \sim R_{S_n}$ 为不同深度下的样品反射率。式(1)中的第一项为直流项,将会在平衡探测器中滤除;第二项为目标信号,它由参考臂和样品臂的两个反射信号共同得到,这两个信号因光程差的存在产生了干涉条纹。此

外,由于样品不同深度的组织所产生的反射信号频率不同,反射信号在各个频率分量的强度也不同;第三项是系统中存在以及样品所带来的噪声。

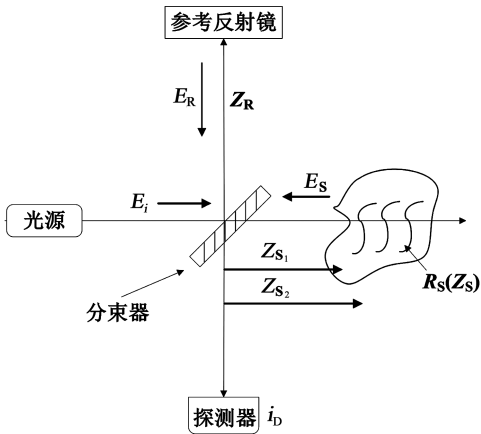


图 1 OCT 工作原理图

如何获得超高分辨率是 OCT 早期研究的难点和重点。OCT 可以独立于光斑尺寸而实现轴向的高分辨率。光的回波时间延迟的测量分辨率直接决定了其轴向分辨率。在低相关测量中,轴向分辨率与光源的带宽成反比,可以由场的自相关函数宽度来确定。对于高斯型光谱,轴向分辨率可以表示为

$$\Delta z = \frac{2 \ln 2}{\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda}$$

(2)

式中, λ 为光源的中心波长。自相关函数的半高全宽由 Δz 表示,功率谱的半高全宽由 $\Delta \lambda$ 表示。可以看出,轴向分辨率与光源的带宽成反比,这意味着实现高轴向分辨率的 OCT 需要更宽带宽的光源。OCT 成像的横向分辨率由聚焦光束的衍射限制光板尺寸决定,如式(3):

$$\Delta x = \frac{4 \lambda}{\pi} \cdot \frac{f}{d}$$

(3)

式中, λ 为波长, d 表示物镜上入射光束大小, f 为焦距。可以看出,衍射极限光斑尺寸与波长成正比,与光束的数值孔径或聚焦角度成反比。

为了改善时域 OCT 机械结构的限制,SD-OCT 于 1995 年被提出。SD-OCT 采用傅里叶变换将信号从时域变换到频域,通过频域采样获取样本信息,在探测时可以同时接收多个深度的探测信号,因此成像速度有了很大的提升,信噪比也有很大的改善^[5-9],其原理图如图 2 所示^[2]。由于工艺等原因,用作探测器的 CCD 或 CMOS 阵列成为了限制 SD-OCT 性能的主要因素。此外,光谱仪的分辨率也对其成像深度存在一定限制。随着半导体工业技术的

提高,SS-OCT 得到迅速发展,其理论基础与 SD-OCT 几乎完全相同,主要的区别体现在采用的光源不同。SS-OCT 采用波长随时间周期变化的扫频光源,最高可以实现数兆赫兹的纵向往扫描速度,极大地提高了成像速率。

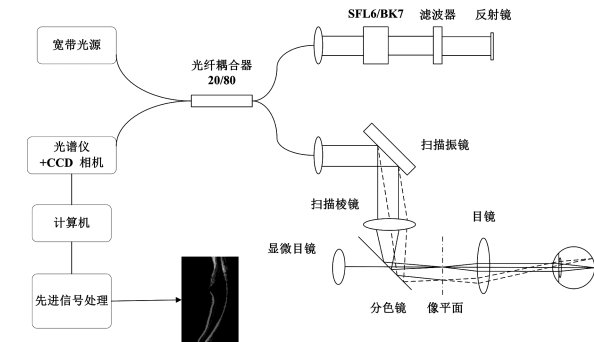


图 2 频域 OCT 原理图^[2]

2 视网膜 OCT 图像分割方法

2.1 视网膜层

视网膜是位于眼球壁内侧的一种轻薄组织,能够灵敏感受光的强度和颜色,是人类视觉系统中的“感光器”。视网膜是一种多层结构,它将接收到的光能转换为神经信号,供大脑进一步处理,其结构如图 3 所示^[4]。

视网膜中包含多种细胞组织,根据各种细胞的分布及其组织密度,可将视网膜分为 10 层^[10],分别是:

- (1)Reginal Pigment Epithelium (RPE):由单层 pigmented hexagonal 细胞构成;
- (2)Photoreceptor Layer:包含 rod 和 cone 的外部 and 内段;
- (3)Outer Limiting Membrane (OLM):包括 photoreceptor 细胞以及 photoreceptor 细胞和 Muller 细胞之间的组织;
- (4)Outer Nuclear Layer (ONL):由 rod 和 cone 细胞体构成;
- (5)Outer Plexiform Layer (OPL):photoreceptor 细胞与内核细胞直接的突触;
- (6)Inner Nuclear Layer (INL):包括 bipolar 细胞胞体、horizontal 细胞、amacrine 细胞、interplexiform 神经元、Muller 细胞以及置换的神经细胞;
- (7)Inner Plexiform Layer (IPL):bipolar 细胞轴突和 ganglion 细胞树突之间的突触连接;

- (8)Ganglion Cell Layer (GCL):主要由 ganglion 细胞体构成;
- (9)Nerve Fiber Layer (NFL):由 ganglion 细胞轴突构成;
- (10)Internal Limiting Membrane (ILM):视网膜的最内层,将视网膜与玻璃体分隔。

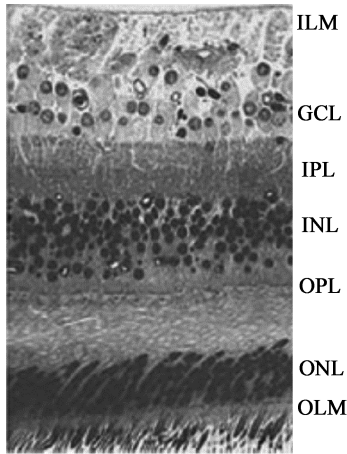


图 3 视网膜层次结构图

值得一提的是,将视网膜分为以上 10 层是最理想的情况,由于部分组织的密度过于相近等原因,目前从视网膜 OCT B-scan 图像中并不能精确地获得每一层的边界信息,对于视网膜层的标注更多依靠与文献中高分辨率 O-CT 图像对比而得到^[11],因此绝大多数算法会选择其中的 5~8 层进行分割。

2.2 视网膜 OCT 图像分割算法

视网膜 OCT B-scan 图像是 2D 视网膜的截面图,从该图像中能够清晰地观察出视网膜不同层的分布以及清晰的边界。视网膜分割是指在 OCT 图像中对视网膜的指定层进行提取划分,形成视觉上独立的区域。

本部分将简要介绍一些具有代表性的用于视网膜 OCT B-scan 图像分割的方法。根据算法对图像分割得到的结果类型,将算法分为两类:第一类算法得到的是视网膜层的边界的掩码表示或边界坐标;第二类算法得到的是视网膜层的整体分布信息,即将每一层单独作为一个整体标记出来。

两类算法的效果对比如图 4 所示。图(a)为原始的视网膜 OCT B-scan 图像;图(b)为使用视网膜边界提取算法得到的结果,此处得到六条边界,能够划分出 5 个视网膜层;图(c)为使用视网膜层提取算法得到的结果,此处共分割出 7 个视网膜层和病变组织(fluid)。对于一个视网膜层来说,使用边界提

取法能够得到其对应的上边界和下边界,两个边界之间的部分就是这一层视网膜。理想情况下,使用边界提取法经二次处理后能够达到视网膜层提取法的效果,但这个过程一般不可逆。

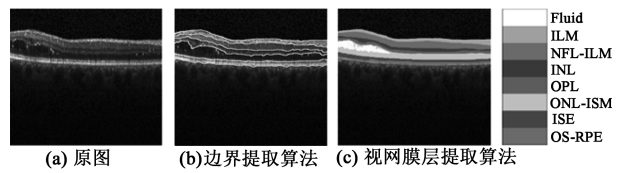


图4 两类算法分割结果对比

2.2.1 视网膜边界提取算法

这一类算法的目标是对视网膜层边界进行拟合,通常情况下得到的是一条或多条(取决于要分割的目标层数)由图像左边延伸到右边的曲线,该曲线以二元掩码的形式表示或以坐标的形式进行输出。

Fernandez 等^[12] 在 2004 年使用主动轮廓法 (Snake) 提取老年黄斑变性 (AMD) 患者视网膜结构中的积液区域。主动轮廓法的主要原理是通过最小化能量函数的方式使轮廓曲线逐渐向待检测物体的边缘逼近,最终分割出目标。虽然这种方法并没有对视网膜层进行分割,但是却提供了一种针对更加困难的病变组织分割任务的良好方法。

Baroni 等^[13] 于 2007 年引入似然函数,用边界的似然函数最大化来检测边界。首先,这种方法通过在 A-scan(B-scan 图像中的一列像素)上使用中值滤波器来消除噪声的影响。这是一种温和的图像平滑操作,能够降低异常值的影响,并能够最大程度上保留细节信息;然后将处理后的图像逐行求和,从而获得纵向灰度直方图,在此灰度直方图上进行峰值检测能够近似地划分视网膜区域;将整个图像视为重叠的条状区域,宽为 10 个像素,在每个区域上取平均值以获得截面灰度轮廓,并使用高斯滤波器平滑处理,处理后的图像经峰值检测器检测最值,当值大于平均值时认为其有意义,即边界点。这种方法的弊端是在处理图像时认为整个图像是水平的,没有歪曲,导致其对于具有一定旋转角度的图像和具有一定弧度的视网膜图像的鲁棒性较差。

2008 年 Tan 等^[14] 使用动态规划 2D 梯度信息来提取信息,并揭示了视网膜内层厚度与青光眼患病率的关系。2010 年 Kajic 等^[15] 使用 Dual-tree Complex Wavelet(DTCW) 去噪算法对 OCT 图像进行处理,并且实现了一个基于纹理和形状的静态模型,该模型能够捕获训练数据的差异,并将视网膜

分割为 8 层。该算法流程图如图 5 所示。



图5 静态模型算法流程图

同样在 2010 年,Mayer 等^[16] 使用 72 张青光眼患者和 132 张健康人的 OCT 图像,通过最小化由梯度和局部平滑项组成的能量函数逼近边界,从而提取信息。

Chiu 等^[17] 提出了一种图搜索的方法,整个算法流程如图 7 所示。该算法将 OCT 图像视为一张图,每个像素代表一个节点,通过归一化的梯度信息经计算得到每个节点的权重,使得边界处的权重较小,而视网膜层内节点权重较大。然后以图像的左上角为起点、右下角为终点进行最小路径搜索,得到视网膜层的边界信息。每次搜索后得到一条视网膜边界,并利用该边界更新搜索空间的权重(限制搜索空间),反复迭代得到多条边界的分割结果。如图 7 所示,使用该方法可以得到 8 层分割,效果较为稳定。

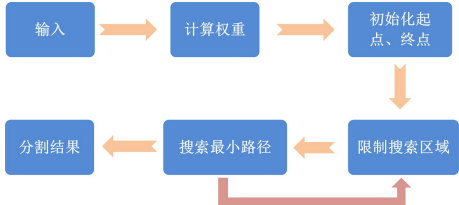


图6 图搜索法流程图

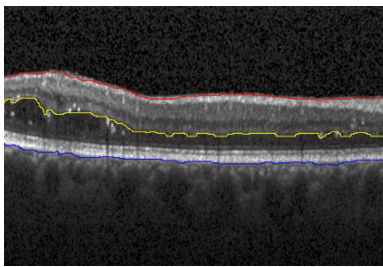


图7 最小路径分割法结果示意

2011 年,Ghorble 等^[18] 提出了一种基于全局的、使用动态轮廓和马尔科夫随机场的分割算法,其流程如图 8 所示。此外该文还设计了一个卡尔曼滤波器,以对感光段之间的近似平行度建模,从而对其进行检测。

随着深度学习的兴起,卷积神经网络(CNN)也

被用来拟合视网膜边界。2017 年,McDonough 等^[19]提出使用 CNN 和图搜索的方式进行分割,该方法主要分为两步:首先使用 CNN 确定分割的候选区域;然后使用图搜索的方式进行分割。2018 年 Shah 等^[20]使用卷积网络直接预测了视网膜层边界的坐标,再通过坐标映射将图片分割。这种方法提高了分割的速度,但是对严重不规则的视网膜图片无法保证坐标的准确性和连续性。

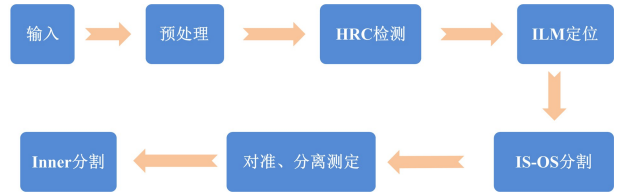


图 8 全局分割算法流程图

以上对一部分具有代表意义的边界提取算法进行了简要回顾。边界提取算法是视网膜 OCT 图像分割任务的主要方式,也是人们研究最多的方式,这种方法通常能够得到光滑的视网膜层边界,但也存在缺点,主要体现在以下两方面:一是时间复杂度较高,大多数算法需要反复运行多次从而获得不同视网膜层的边界信息;二是病变区域的不规则性导致大部分算法无法对其进行独立分割。

2.2.2 视网膜层提取算法

视网膜层提取算法大多基于分类的原理,是对分割问题的转化。近年来随着人工智能的兴起,使用神经网络等方法对样本进行分类得到了很好的发展。这种方法大多使用语义分割或支持向量机等方法对像素点进行分类,即将每一层视网膜所在的像素视为同一个类别,不同的视网膜层分属不同类别。

2012 年,Vermeer 等^[21]将多尺度梯度与灰度特征结合(在每个 A-scan 上进行特征结合),使用支持向量机(Support Vector Machine,SVM)进行分类,类别数由分割的层数确定。由于 SVM 本身机制的限制,这种方法在进行多分类时需要几个模型相互配合。

2015 年,Ronneberger 等^[22]提出了 U-Net 用于医疗图像分割,并取得了很好的效果。相比于经典的编码-解码(Encoder-Decoder)结构,U-Net 在每个阶段都添加了由编码器直连到解码器的分支,这种方式能够补充在下采样过程中所丢失掉的细节特征,结构如图 9 所示。该网络已被验证同样适用于视网膜 OCT 图像分割,相比于 SVM,它能够一次

性地生成分割结果,且效果更好。

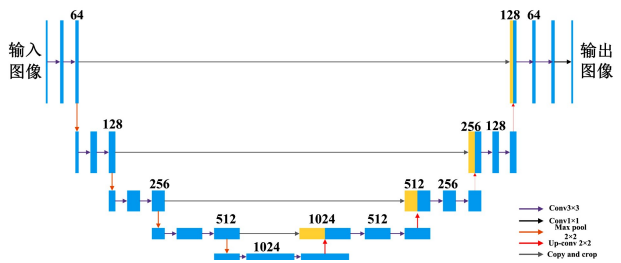


图 9 U-Net 结构图^[22]

同年,Roy 等^[23]在 U-Net 的基础上做了改进,提出 ReLayNet 专门用于视网膜 OCT 图像分割。相比于 U-Net,ReLayNet 具有更少的参数量和计算量,且同样取得了很好的分割结果,其分割效果如图 10。同年,McDonough 等^[24]使用神经网络对视网膜 OCT 图像中的每个像素点进行分类,对于每层来说,像素分为两类:属于该层的像素点和该层之外的像素点。而对于不同层,需要使用不同的神经网络进行分类。

依靠像素分类方法得到的结果具有更直观的可视化效果,能够对病变组织进行单独分割,而且这种分割方式能够使用明确的指标进行衡量,例如准确率、mIOU 等。但是这种方法也有缺点,即在训练的过程中存在着类别不均衡现象(由图像中背景和视网膜层面积差距决定),导致模型对频率弱勢的类别(例如病变组织)注意力降低,造成分类错误和逻辑混乱。

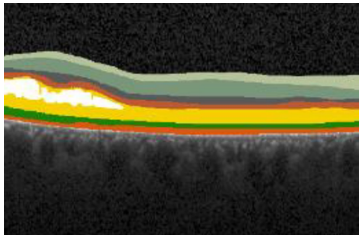


图 10 ReLayNet 分割着色结果

3 总结

本文简要回顾了用于视网膜 OCT B-scan 图像分割的两类算法:一类算法聚焦于视网膜层的边界,通过图搜索、随机场、深度学习等方法来确定边界像素点的位置;另一类算法将分割问题转化为分类问题,将每一层视为一个语义类别,得益于深度学习的发展,这类算法取得了很好的效果。对于病变组织的分割问题,使用分类方法能够更好地解决,而且具有较好的可视化效果,满足了日常医疗中辅助诊断

的需求,能够在一定程度上提高诊断效率。

参考文献:

- [1] Huang D, Swanson E A, Lin C P, et al. Optical coherence tomography[J]. Science, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- [2] Chang S, Mao Y, Flueraru C, et al. Optical coherence tomography: technology and applications[C]// Proc. 2008 Inter. Conf. on Optical Instruments and Technology: Optical Systems and Optoelectronic Instruments. Inter. Society for Optics and Photonics, 2009.
- [3] DeBuc D C. A review of algorithms for segmentation of retinal image data using optical coherence tomography[J]. Image Segmentation, 2011, 1: 15-54.
- [4] Kafieh R, Rabbani H, Kermani S. A review of algorithms for segmentation of optical coherence tomography from retina[J]. J. of Medical Signals and Sensors, 2013, 3(1): 45.
- [5] Mitsui T. Dynamic range of optical reflectometry with spectral interferometry[J]. Japanese J. of Appl. Phys., 1999, 38(10R): 6133.
- [6] Leitgeb R, Hitzenberger C K, Fercher A F. Performance of Fourier domain vs. time domain optical coherence tomography[J]. Opt. Express, 2003, 11(8): 889-894.
- [7] De Boer J F, Cense B, Park B H, et al. Improved signal-to-noise ratio in spectral-domain compared with time-domain optical coherence tomography[J]. Opt. Lett., 2003, 28(21): 2067-2069.
- [8] Wojtkowski M, Leitgeb R, Kowalczyk A, et al. In vivo human retinal imaging by Fourier domain optical coherence tomography[J]. J. of Biomedical Optics, 2002, 7(3): 457-463.
- [9] Cense B, Nassif N A, Chen T C, et al. Ultrahigh-resolution high-speed retinal imaging using spectral-domain optical coherence tomography[J]. Opt. Express, 2004, 12(11): 2435-2447.
- [10] Remington L A, Goodwin D. Clinical Anatomy of The Visual System E-Book[M]. UK: Elsevier Health Sciences, 2011.
- [11] Drexler W. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography[J]. J. of Biomedical Optics, 2004, 9(1): 47-75.
- [12] Fernandez D C, Villate N, Puliafito C A, et al. Comparing total macular volume changes measured by optical coherence tomography with retinal lesion volume estimated by active contours[J]. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 2004, 45(13): 3072-3072.
- [13] Baroni M, Fortunato P, La Torre A. Towards quantitative analysis of retinal features in optical coherence tomography[J]. Medical Engin. & Phys., 2007, 29(4): 432-441.
- [14] Tan O, Li G, Lu A T H, et al. Mapping of macular substructures with optical coherence tomography for glaucoma diagnosis[J]. Ophthalmology, 2008, 115(6): 949-956.
- [15] Kajic V, Povazay B, Hermann B, et al. Robust segmentation of intraretinal layers in the normal human fovea using a novel statistical model based on texture and shape analysis[J]. Opt. Express, 2010, 18(14): 14730-14744.
- [16] Mayer M A, Hornegger J, Mardin C Y, et al. Retinal nerve fiber layer segmentation on FD-OCT scans of normal subjects and glaucoma patients[J]. Biomedical Optics Express, 2010, 1(5): 1358-1383.
- [17] Chiu S J, Li X T, Nicholas P, et al. Automatic segmentation of seven retinal layers in SDOCT images congruent with expert manual segmentation[J]. Opt. Express, 2010, 18(18): 19413-19428.
- [18] Ghorbel I, Rossant F, Bloch I, et al. Automated segmentation of macular layers in OCT images and quantitative evaluation of performances [J]. Pattern Recognition, 2011, 44(8): 1590-1603.
- [19] McDonough K, Kolmanovsky I, Glybina I V. A neural network approach to retinal layer boundary identification from optical coherence tomography images[C]// Proc. 2015 IEEE Conf. on Computational Intelligence in Bioinformatics and Computational Biology (CIBCB), 2015: 1-8.
- [20] Shah A, Zhou L, Abramoff M D, et al. Multiple surface segmentation using convolution neural nets: application to retinal layer segmentation in OCT images[J]. Biomedical Optics Express, 2018, 9(9): 4509-4526.
- [21] Vermeer K A, Van der Schoot J, Lemij H G, et al. Automated segmentation by pixel classification of retinal layers in ophthalmic OCT images[J]. Biomedical Optics Express, 2011, 2(6): 1743-1756.
- [22] Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation[C]// Proc. Inter. Conf. on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, 2015: 234-241.
- [23] Roy A G, Conjeti S, Karri S P K, et al. ReLayNet: retinal layer and fluid segmentation of macular optical coherence tomography using fully convolutional networks [J]. Biomedical Optics Express, 2017, 8(8): 3627-3642.
- [24] McDonough K, Kolmanovsky I, Glybina I V. A neural network approach to retinal layer boundary identification from optical coherence tomography images[C]// Proc. 2015 IEEE Conf. on Computational Intelligence in Bioinformatics and Computational Biology (CIBCB), 2015: 1-8.

作者简介:

袁 坤(1994—),男,硕士生,主要研究方向为深度学习、目标检测及图像分割等。

微透镜阵列的制作及其在光场成像中应用的研究进展

乌李瑛*, 瞿敏妮, 付学成, 田苗, 刘民, 李进喜, 程秀兰

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院 先进电子材料与器件平台, 上海 200240)

摘要: 文章综述了微透镜阵列制备技术的最新研究进展,并将这些制备方法分为直接法和间接法进行了对比分析。回顾了微透镜在光场成像应用中的研究进展,指出目前该领域的研究重点是光场相机设计的新思路及提高分辨率的相应模型算法。

关键词: 微透镜阵列; 光场; 光场成像; 超精密机械加工; MEMS

中图分类号: TN256 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0611-07

Fabrication of Microlens Array and Its Application Progresses in Light Field Imaging

WU Liying, QU Minni, FU Xuecheng, TIAN Miao, LIU Min, LI Jinxi, CHENG Xiulan

(Center for Advanced Electronic Materials and Devices, School of Electronic

Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, CHN)

Abstract: The latest research progresses on the fabrication methods of microlens arrays are reviewed, and the fabrication methods are compared and analyzed in detail by categorizing them into direct and indirect ones. The research progresses of light field imaging based on microlens are reviewed, and it is indicated that the research focus is still on the new design of light field camera and corresponding model algorithms for improving the imaging resolution.

Key words: microlens array; light field; light field imaging; ultra-precision machining; MEMS

0 引言

三维成像是将客观世界的三维图像通过某种技术记录下来后进行处理、压缩和传输,从而再现客观世界的图像处理过程,被广泛应用于科研、娱乐、医疗、军事等各个领域。光场成像则是一种将成像与计算相结合的新型三维成像技术,有着较简单的光学系统、低成本的硬件设备和灵活的数据后期处理方式,因此受到研究人员的广泛关注。微透镜阵列是一种高集成度的相位调制光学元件,目前作为光场信息采集中的核心部件被绝大多数光场系统所采用。微透镜阵列的光学性能良好,具有大视场、低像

差和低形变、高时空分辨率以及无限大的景深^[1-2]等特点,是下一代三维成像系统的关键部件。

近年来微透镜和微透镜阵列(MLA)在多个应用领域发挥着重要的作用,如微光学传感器、数字显示单元、生物医学仪器、光通信等。随着制造技术的不断发展,基于微透镜阵列的器件由于其轻便、紧凑、高集成度以及良好的光学特性,展现出巨大的市场潜力。

本文从直接法和间接法两方面综述了微透镜阵列制造技术,概述了微透镜阵列在光场成像应用中的研究进展。

1 微透镜阵列的制备技术

光场的概念最早在 1939 年由俄国物理学家 Gershun 正式提出,用来表述光线在立体空间的辐射传输特征^[3]。与传统成像方式不同,光场成像是

收稿日期:2020-05-13.

基金项目:国家科技部“十三五”高性能计算重点研发计划项目子课题(2016YFB0200205);上海研发公共服务平台建设项目(18DZ2295400);上海交通大学决策咨询课题(JCZXSJB2019-005,JCZXSJB2018-022).

*通信作者:乌李瑛 E-mail: lynn_wu@sjtu.edu.cn

采集光场并将光场还原为图像的一种计算成像方式,采集到的光场信息需要经过数字算法才能变成图像,克服了传统成像方式在原理上的局限性,实现了成像从二维向三维的转变。

光场成像可分为光场采集和光场重构两个阶段,基于微透镜阵列的光场采集为单孔径相机采集,是通过改造单个相机完成的。通过在探测器前方引入光学调制原件(微透镜阵列),使得进入相机的光场信息分布在一个二维的探测器平面上,探测器平面与微透镜阵列平面成为记录四维光场方向信息的两个平面。采集得到光场信息后,进一步从空域和频域上对其进行分析,利用算法将光场还原为图像。

制作聚焦微透镜阵列的方法可以分为直接法和间接法。直接法不需要制作具有凹面三维结构的掩模或者模具,当材料处于热塑性状态或液体状态时,微透镜的形状通常基于表面张力效应形成,从而产生超光滑表面(粗糙度的算术均方 $R_a < 1\text{ nm}$)^[4]。更重要的是,直接法操作过程简单、成本低且效益高,是大规模工业生产所青睐的。然而,由于微透镜的几何尺寸仅由温度、湿度、压力和加工时间等有限的参数控制决定,因此微透镜的精度控制仍然十分困难。间接法则需要制作凹型微透镜阵列模具,然后通过复制技术生产最终的透镜,这些复制技术包括热压成型和注塑成型等。采用间接法可以很好地控制微透镜阵列的形状,但是过程相对复杂。

1.1 直接法

1.1.1 热回流法

透镜最早期的加工方式以机械加工法为主,但随着透镜尺寸的不断缩小,特别是对于紧密排布的微透镜阵列,早期的机械加工技术已无法满足要求。为了解决这个问题,科研工作者进行了大量的研究,其中热回流法是最先被提出来的。热回流法又被称为光刻胶热熔法,由 Popovic 在 1988 年提出^[5],在过去的几十年里,已经被广泛应用于微透镜生产^[6-8]。如图 1 所示^[8],首先对基片进行预处理,然后旋涂一定厚度的光刻胶,之后再以设计好的一定孔径和形状的掩模进行紫外曝光,显影后将掩模版上的图形转移至光刻胶,形成独立柱状结构。再对独立的柱状光刻胶进行热处理,在一定温度下,胶体发生流动,柱状光刻胶由于表面张力的作用,最终形成以设计的图形孔径为边界的球冠结构。利用这种方法,使用普通常用的微机电系统(MEMS)加工工艺即可制作微透镜阵列,操作较为简单,可重复性高

且成本低,对仪器的精度要求不高,因此被广泛使用。其缺点是接触角很难控制,因为它只受基材上光刻胶材料的浸润性和周围空气的影响,也就是说光刻胶对特定环境下材料的接触角是一定的,并不是所有孔径大小和高度的胶都能热熔成功,如果纵横比很大,失败率会比较高,微透镜的形状会产生塌陷。

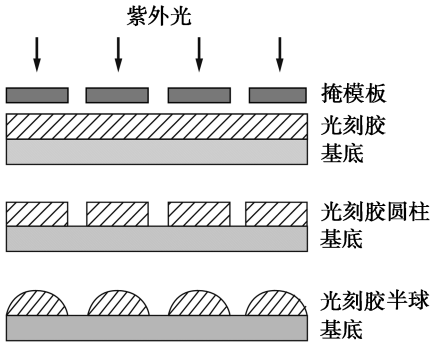


图 1 基于热回流法的微透镜阵列制作工艺

Albero 等^[9]改进了传统的热回流方法,在柱状微腔内成功制备了微透镜阵列结构,利用微腔大小可以控制微透镜的尺寸。其制备过程是在反应离子束刻蚀的硅衬底微腔结构上,直接将玻璃材料和硅衬底键合之后进行热熔,固态的玻璃材料会向微腔内部凹陷,之后将上表面抛光磨平就得到了平凸微透镜结构,流程图如图 2 所示。改进的热回流法能有效提升大孔径、大纵横比的微透镜制备的成功率。

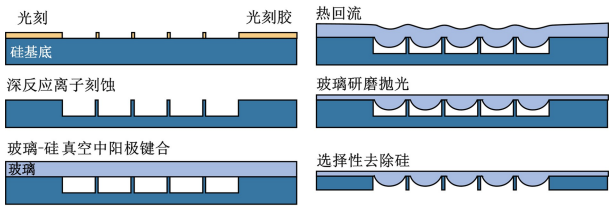


图 2 基于改进热回流法的微透镜阵列制作工艺

1.1.2 微滴喷射法

微滴喷射也称喷墨打印,是制造聚焦微透镜的另一种直接方法^[10-13]。该方法适用于大面积快速制作微透镜阵列,但是微透镜的一致性和尺寸很难控制。图 3 给出了该方法的工作原理^[12],紫外聚合物液滴从喷嘴喷射到基底,当液滴到达基底,它们会暴露在紫外光线下,并转化为具有超光滑形状的固态。有多个课题组成功地将聚合物滴印在疏水表面^[10-11]、聚合物台面或者微孔^[14-15]上,获得了具有较大接触角且高数值孔径(NA)的微透镜阵列。研究发现,为了获得 NA 大于 0.4 的微透镜,基底表面

可以经过特殊处理,如在水蒸气氛围中蒸发,得到一个羟基化表面后,再用氟化有机硅烷 FOTS 涂覆基底表面^[12]。相似的还有对基底表面纳米重构后使用氟代三氯硅烷(PFTS)或 C₄F₈ 涂覆处理^[10-12]。然而,对于想要进一步增加聚合物表面的接触角,仅进行表面处理很难降低表面能。大多数适用于喷墨打印的聚合物具有较低的表面张力,虽然可以利用形成聚合物微台面或微孔产生的边界约束来提高聚合物的接触角,但是,形成聚合物微台面及微孔阵列的制造都涉及复杂的光刻工艺和喷墨打印工艺,导致工艺重复性较差。

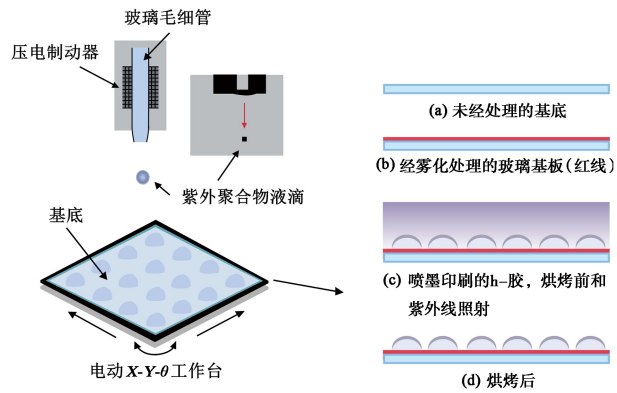


图 3 左:喷墨打印机的原理图,带有喷墨打印机产生的水滴的频闪图像。右:用于制造 m-镜头的工艺流程

1. 1. 3 微模直压法

微模直压法是一种低成本、高效率的技术,越来越多的研究者开始将其应用于微透镜阵列的制备^[4,16-18]。微模直压法使用部分填充工艺,不需要母模具有微透镜几何形状,从而减轻了模具与注入材料接触所引起的表面缺陷。

这种方法首先需要制作出一种圆形开口的母模(开口尺寸约为几百微米),制备方法如下:第一步,对表面为二氧化硅层的硅片进行清洗,然后在二氧化硅表面旋涂正型光刻胶。之后将涂好光刻胶的晶圆通过圆形开口阵列的掩模版进行紫外曝光后显影,得到圆形光刻胶柱阵列。第二步,通过反应离子刻蚀二氧化硅层来制作硅刻蚀掩模层,然后进行深硅反应离子蚀刻,以形成硅晶圆中微柱的形状。于是得到一种具有微柱阵列的硅母模。根据不同的压制方法,有时会用聚二甲基硅氧烷(PDMS)倒入硅母模复制得到 PDMS 的微孔阵列母模模具。

母模形成后,可以通过加热法压花或者紫外照射固化法来形成微透镜阵列。加热压花法如图 4 所

示,在加热板和硅母模之间放置聚合物基板。微透镜是通过在高于玻璃化转变点的高温下施加外部压力,在给定的时间内形成的。最后,通过尽可能慢地降低温度来降低新形成的微透镜的温度,以减少热应力和伴随的复制误差。温度相关的粘度和表面张力是制造过程中的关键因素,决定了微透镜的高度和半径。所施加的压力与微透镜的高度呈线性关系,但对微透镜的半径影响不大。

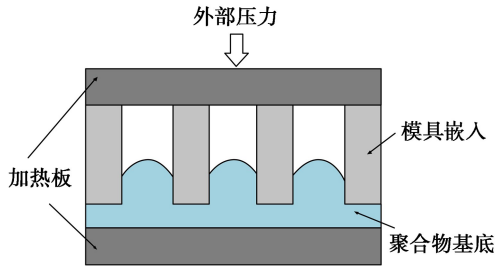


图 4 加热压花法的微透镜阵列制备工艺示意图

紫外固化法使用毛细微透镜紫外形成系统,如图 5 所示^[16]。该系统包含紫外透明的顶板和底板、电荷耦合(CCD)摄像机、紫外灯、快门和带有液压单元千分尺分辨率的 z 轴升降样品台。z 轴升降样品台通过控制模具和基板之间的距离来控制压力,系统通过快门的开关时长来控制紫外固化剂量,其值等于紫外光强度乘以固化时间。具体的工艺步骤为:将紫外可固化的环氧树脂涂在衬底上,再将微孔阵列 PDMS 母模与涂覆环氧树脂的基板共同置于毛细微透镜成形装置中,并施加适当的压力压制一段时间,由于液状的环氧树脂的填充和表面张力的作用,在 PDMS 模具的圆孔内可以形成一组液体凸透镜。然后,在室温下用紫外曝光固化环氧树脂。固化后将 PDMS 母模从基板上去除,得到表面带有微透镜阵列的塑料基板。在微模直压法中,无论采用加热压花法或者紫外固化法,其优点在于它是一步成型工艺,所形成的微透镜阵列不受模具表面质量的影响^[16]。

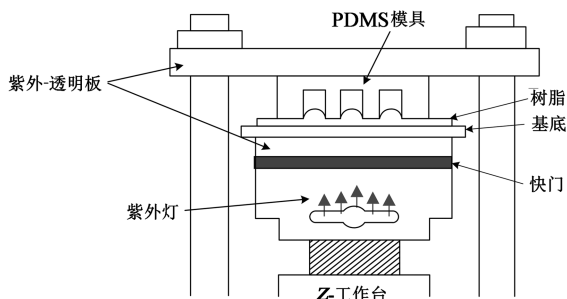


图 5 紫外固化法原理图

1.2 间接法

与直接法相反,间接法是先制备出带有凹面球面微透镜的模具。最后的微透镜阵列是通过注塑、热模压或 UV 塑形等复制成型技术生产的。间接法的关键是如何生成具有精确几何形状的凹透镜。间接法技术分为两类,即基于 MEMS 的非机械加工技术和超精密机械加工技术。

1.2.1 基于 MEMS 的非机械方法

传统的 MEMS 的方法是利用光刻技术在掩模层上产生图案,并通过化学反应将一定曲率的微透镜蚀刻到基板上^[19-21],这种技术是基于硅材料在酸中的各向同性的腐蚀性。其原理如图 6 所示^[19],首先,在基板上涂覆 SiO₂、Si₃N₄ 和 NiCr 的保护层。然后,通过光刻、反应离子刻蚀(RIE)和氢氟酸溶液一步一步地生成图形。接着将晶片浸泡在各向同性的蚀刻液中,得到凹面微透镜。最后,去除掩模层,模具完成。该方法具有表面光洁度好、均匀度高、重复性好等优点,可实现大范围的透镜几何形状和透镜阵列。然而,这种方法需要昂贵的设备和复杂的程序来生产晶圆上的掩模。另外,为了满足透镜微型化的要求,必须提高掩模制作工艺的控制精度。

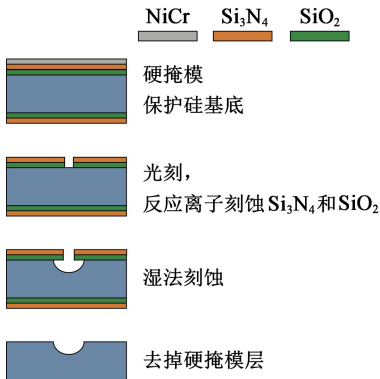


图 6 传统 MEMS 加工微透镜方法示意图

为了解决这些问题,研究人员开发出了激光直写技术^[22-24],其制作过程如图 7 所示^[23]:首先将飞秒激光通过凸透镜聚焦于石英玻璃表面,再用 HF、硝酸(HNO₃)和醋酸(CH₃COOH)按一定比例混合后的溶液,对激光照射后的石英玻璃表面进行化学刻蚀。在混合酸中,经过激光改性的区域比未经激光辐照区具有更高的选择性蚀刻速率,因此在激光改性区域形成矩形或六角形排列的圆形凹面结构。圆形的凹面结构在腐蚀过程中变得光滑,并逐渐扩大,直到相邻的结构相互重叠,形成的微透镜的形状为矩形或六边形,最后完全填充其表面。用去离子

水洗涤后吹干,就得到了填充系数高的凹面微透镜玻璃。该方法具有表面光洁度好、均匀度高、重复性好等优点,可实现大范围的透镜几何形状和透镜阵列。通过控制曝光点的布局,可以得到不同设计的凹面微透镜。与传统的光刻技术相比,该方法无掩模、成本低。

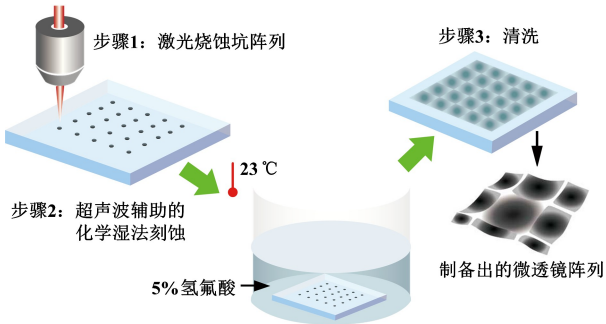


图 7 激光直写技术的 MEMS 加工微透镜工艺

通过 MEMS 工艺得到凹面微透镜玻璃后,以凹面微透镜石英玻璃为模具,再通过注塑、热模压或 UV 塑形等复制成型工艺在聚二甲基硅氧烷(PDMS)薄膜上获得相应的凸面微透镜阵列。其他的直写技术制备凹透镜阵列模具的例子还包括聚焦离子束直写^[25-26]和电子束直写^[27-28]等。

1.2.2 超精密机械加工法

实际上,透镜最初的加工方式以切削和研磨等机械加工方式为主,但随着透镜尺度的越来越小,早期的机械加工技术难以完成微透镜的制作。随着超精密车削、超精密铣削等超精密切削加工技术的不断发展,使得微米甚至纳米尺度的微结构制造成为了可能。机械加工方法又重新回到科研人员的视野。超精密机械加工技术可实现复杂面型的光学原件的加工,在光学元件加工中应用十分广泛。

超精密机械加工,是通过刀具伺服系统实现工件表面的切削。有效的超精密机械加工方法有金刚石微铣削和单点金刚石车削,都可以大范围地制备均匀性良好的微观结构和纳米结构^[29-30]。这种超精密技术被集成到大规模制造微透镜阵列的工艺中。

金刚石微铣削技术将球头微铣刀固定在高速转轴上,通过刀具自转实现表面的切削,加工效率高,成本低^[29-30]。该技术通常采用半弧单晶金刚石刀具去除金属材料^[29-30]。金属材料如铜合金(COFHC-Cu)、三镁化铝(AlMg₃)、磷化镍(NiP)等均可加工,且获得的表面粗糙度(R_a)可低至 5 nm。但是这种方法需要对微透镜逐一进行加工,严重延长了操作

时间,增加了成本。

在金刚石微铣削制作金属凹型微透镜阵列的过程中,每个凹型微透镜阵列底部都会受到刀刃顶部和旋转主轴对准误差的影响。针对这一点,研究人员改进研发出了单点金刚石车削方法,这种方法建立在主轴反馈的基础上,通过控制刀具实时跟踪工件面型的变化,以实现复杂面型零件的精密高效加工。图 8 为单点金刚石车削示意图,其主要通过慢速刀具伺服(STS)^[31]或快速刀具伺服(FTS)^[32-34]来生产高质量的微透镜阵列。其中,慢刀伺服系统可实现大矢高差面型的高质量加工,而快刀伺服系统则适合于加工矢高差较小、面型更为复杂的微透镜阵列。

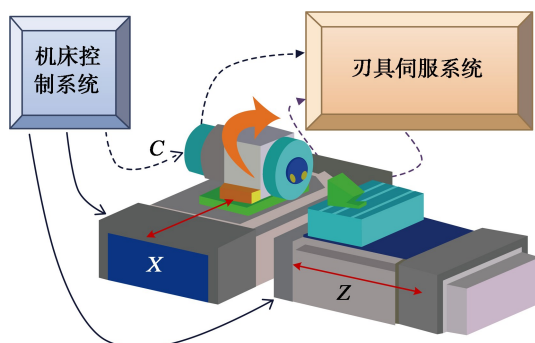


图 8 超精密车床布局示意图

上述微透镜阵列的各种制作方法,热回流法、微模直压法、微液滴喷射法等直接法的技术简单、成本低,适合大规模工业化生产,但制备出的微透镜形状精度很难控制。间接法则可以有效控制微透镜形状精度,但需对工艺精度进行严格控制。与基于 MEMS 的非机械加工技术相比,超精密机械加工技术更适合制作大面积的、均匀性良好的微透镜阵列。

2 微透镜光场成像应用研究进展

微透镜阵列作为一种高集成度的相位调制光学元件,目前被绝大多数光场系统所采用,作为光场信息采集的核心部件,微透镜阵列单元的面型和微透镜间的一致性直接影响光场成像结果。

光场成像的一个重要应用就是光场相机,或称为全光相机,其发展可以追溯到一个多世纪以前。最早期的设计是通过在胶片前面放置一个飞眼透镜阵列或狭缝板^[35-36]来进行光场采集。随着光场分析理论和光场处理理论研究的发展,这一课题重新受到研究人员的重视,许多设计和原型陆续被提出。

1992 年麻省理工的 Adelson 等^[37]首先提出全

光相机的概念,通过在图像传感器阵列前方放置一个小透镜或者是微透镜阵列来实现。图像传感器和主镜头的光瞳关于微透镜阵列共轭,主镜头的出射光线经过每个微透镜后投射到图像传感器上。进入相机的光场信息分布在一个二维的图像传感器平面上,传感器平面与微透镜阵列平面成为记录四维光场方向信息的两个平面。采集得到光场信息后,进一步从空域和频域上分析,利用算法将光场还原为图像。这个全光相机中还包含了消除高于微透镜阵列采样频率成分的光学扩散片,以及将宏像素对齐至微透镜阵列所在位置的场镜。

2005 年,斯坦福大学的 Ng 等^[38-39]基于这种设计进行了改进,建立了便携式、小型化的全光相机的原型,并证明了改进的设计可适用于一些新的摄影应用,如数字重聚焦等。这种相机通过特殊的固件,直接将 1 600 万像素的图像传感器芯片与 296×296 微透镜阵列进行耦合,减少额外的中继镜头带来的复杂结构及渐晕效应。通过将光场原始图像中的各个像素重排,可以得到四维光场矩阵,再将思维光场信息重新投影至不同位置的虚拟面上,即可获得聚焦于不同深度的图像。但是,这种设计的一个明显的缺点是,它的分辨率受到微透镜阵列数量的限制,导致实际分辨率远低于传感器分辨率。

为了改善分辨率,Ng^[40]在 2006 年提出了一种广义光场相机,其设计通过降低微透镜阵列和传感器之间的分离,从而使得空间分辨率峰值和重聚焦深度范围是可调节的。同年,Ng 等^[41]又通过在数字显微镜的像面置入微透镜阵列实现了光场显微成像技术,这一显微系统利用光场成像的数字对焦特点,克服了之前显微成像景深小、需频繁调焦的问题。2011 年,Ng 等于硅谷创办了 Lytro 公司,推出了首台同名商业化光场相机。其最大的特点是“先拍照,后对焦”的大景深图像重构,对传统摄影产品相机产生了一定冲击。

2009 年,Lumsdaine 和 Georgiev^[42]提出了聚焦型光场相机的概念和一种超分辨率技术。然而相较于传统光场相机,聚焦型光场相机虽然能够获得更高的空间分辨率,但却以牺牲其角度分辨率为代价。所以在光场采集时,他们通过增加微透镜阵列和光敏传感器之间的分离,在设计上对空间和角度之间进行了十分慎重的取舍权衡,从而得到了适当的全光捕获和合理的空间分辨率,并提高了最终分辨率。同时他们提出了一种基于原始彩色图像数据的超分

辨算法,该算法是基于 CCD 或 CMOS 传感器的数字图像,实际上是由四个独立颜色通道的图像交织而成的。在普通算法的处理过程中,这些图像经过去噪处理,然后合并成一个单一的彩色图像。而他们的算法将超分辨率应用于多个微图像,分别处理每个颜色通道,这就提供了两个重要的好处:首先,避免了在典型的解码器中出现的插值计算,允许将超分辨率应用于采样稀疏的低分辨率图像;其次,生成的彩色平面彼此完美地套准,从而能够更直接地创建最终的彩色图像。通过将超分辨率与去噪相结合,它们能够将分辨率提高到普通算法的两倍。2012 年,Perwass 和 Wietzke^[43]则利用一个简化的模型,推导出了聚焦型光场相机的分辨率极限。

2012 年,Bishop 和 Favaro^[44]利用几何光学对基于微透镜的光场相机的成像过程建模,并将深度估计和图像先验相结合进行反褶积。同年,Wanner 和 Goldluecke^[45]使用深度估算和复合凸优化提高了空间分辨率和角度分辨率。2013 年,Shroff 和 Berkner^[46]利用波动光学推导出基于微透镜阵列的正演图像形成模型。他们的实验结果表明,各传感器具有独特的点扩展(point-spread)函数,并在仿真中进一步进行了反褶积,达到了恢复高分辨率图像的目的。Broxton 等^[47]也推导出了一种适用于光场显微镜的类似于 Shroff 等提出的 3D 反褶积模型。

2009 年,Nava 等^[48]发现,在基于微透镜阵列的传统场相机的设计中,如果直接将记录的光场样本投射到更细的分辨率网格上,该相机所感知到的分辨率可以高于微透镜阵列的分辨率。在聚焦光场相机^[49]和相机阵列中,同样可以观察到这种现象。Yu 等^[50]利用投影样本在二维空间中的分布,分析了分辨率增强因子,并提出了一种基于光场感知的 demosaic 算法模型来进行光场重构。2015 年,Liang 等^[51]使用几何光学得到一个类似 Yu 等的模型算法,使用此模型算法比较了不同的光场相机设计,并分析了其逆光传输过程中的稳定性。他更加全面地将前置滤波行为计算在内,基于深度信息分析了空间域渲染算法的性能和稳定性,得出光传输的一种模型框架来理解光场相机分辨率的基本限制。这些理论分析可以集成运用到未来的基于微透镜的光场设计或光场重构算法中。

3 结语

微透镜阵列可集成到光场相机中,实现“先拍

照,后对焦”的功能,可获得大视场及大光圈。目前光场相机主要有:斯坦福大学开发的相机阵列、Adobe 公司设计的集成镜头阵列、Lytro 公司开发的光场相机和显微镜、Raytrix 公司研发生产的 3D 光场相机和东芝公司开发的复眼相机模块。与基于相机阵列的装置相比,基于微透镜的装置由于其轻便紧凑的结构而更具有市场潜力,然而,其虽然可以获得三维图像,但是目前光场相机获得的图像分辨率较传统单镜头反光相机仍低很多。

本文综述了微透镜阵列的主要制备技术,分析了各种微透镜阵列制备技术的优缺点,对微透镜的生产及其工艺方面具有一定的借鉴意义。对基于微透镜的光场相机在光场成像方面应用的研究进展进行了回顾,以供后期的研究者参考。目前研究的重点仍是光场相机设计的新思路和相应地提高分辨率的数字对焦的最优模型算法。

参考文献:

- [1] Horridge G A. The separation of visual axes in apposition compound eyes[J]. Philosophical Trans. of the Royal Society of London B: Biological Sciences, 1978, 285(1003): 1-59.
- [2] Land M F. Variations in the structure and design of compound [J]. Facets of Vision, 1989, 3: 30-73.
- [3] Gershun A. The light field [J]. Studies in Appl. Mathematics, 1939, 18(1/4): 51-151.
- [4] Moore S, Gomez J, Lek D, et al. Experimental study of polymer microlens fabrication using partial-filling hot embossing technique[J]. Microelectronic Engin., 2016, 162: 57-62.
- [5] Popovic Z D, Sprague R A, Connell G N. Technique for monolithic fabrication of microlens arrays[J]. Appl. Opt., 1988, 27: 1281-1284.
- [6] Di S, Lin H, Du R. An artificial compound eyes imaging system based on MEMS technology[C]// Proc. 2009 IEEE Inter. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2009: 13-18.
- [7] Daly D, Stevens R, Hutley M, et al. The manufacture of microlenses by melting photoresist[J]. Measurement Science and Technol., 1990, 1(8): 759.
- [8] Audran S, Faure B, Mortini B, et al. Study of dynamical formation and shape of micro lenses formed by the reflow method[J]. Proc. SPIE, 2006: 61534D.
- [9] Alberio J, Perrin S, Bargiel, et al. Dense arrays of millimeter-sized glass lenses fabricated at wafer-level[J]. Optics Express, 2015, 23(9): 11702-11712.
- [10] Luo Y, Wang L, Ding Y, et al. Direct fabrication of microlens arrays with high numerical aperture by ink-jetting on nanotextured surface[J]. Appl. Surface Science, 2013,

- 279; 36-40.
- [11] Kim J Y, Brauer N B, Fakhouri V, et al. Hybrid polymer microlens arrays with high numerical apertures fabricated using simple ink-jet printing technique[J]. *Optical Materials Express*, 2011, 1(2): 259-269.
 - [12] Kim J Y, Pfeiffer K, Voigt A, et al. Directly fabricated multi-scale microlens arrays on a hydrophobic flat surface by a simple ink-jet printing technique [J]. *J. of Materials Chemistry*, 2012, 22(7): 3053-3058.
 - [13] Zhu X, Zhu L, Chen H, et al. Fabrication of high numerical aperture microlens array based on drop-on-demand generating of water-based molds[J]. *Optics & Laser Technol.*, 2015, 68: 23-27.
 - [14] Kim J Y, Martin O C, Baek N S, et al. Simple and easily controllable parabolic-shaped microlenses printed on polymeric mesas[J]. *J. Mater. Chem. : C*, 2013, 1(11): 2152-2157.
 - [15] Xia J, Qu D, Yang H, et al. Self assembly polymer microlens array for integral imaging[J]. *Displays*, 2010, 31(4/5): 186-190.
 - [16] Chang C Y, Yang S Y, Huang L S, et al. Fabrication of polymer microlens arrays using capillary forming with a soft mold of micro-holes array and UV-curable polymer[J]. *Opt. Express*, 2006, 14(13): 6253-6258.
 - [17] Pan C, Wu T, Chen M, et al. Hot embossing of micro-lens array on bulk metallic glass[J]. *Sensors and Actuators A: Phys.*, 2008, 141(2): 422-431.
 - [18] Yao D, Nagarajan P, Li L, et al. A two-station embossing process for rapid fabrication of surface microstructures on thermoplastic polymers [J]. *Polymer Engin. & Science*, 2007, 47(4): 530-539.
 - [19] Alberio J, Nieradko L, Gorecki C, et al. Fabrication of spherical microlenses by a combination of isotropic wet etching of silicon and molding techniques[J]. *Opt. Express*, 2009, 17(8): 6283-6292.
 - [20] Bitterli R, Scharf T, Herzig H-P, et al. Fabrication and characterization of linear diffusers based on concave micro lens arrays[J]. *Opt. Express*, 2010, 18(13): 14251-14261.
 - [21] Du G, Yang Q, Chen F, et al. Direct fabrication of seamless roller molds with gapless and shaped-controlled concave microlens arrays[J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(21): 4404-4406.
 - [22] Meng X, Chen F, Yang Q, et al. Simple fabrication of closed-packed IR microlens arrays on silicon by femtosecond laser wet etching[J]. *Appl. Phys. A*, 2015, 121(1): 157-162.
 - [23] Chen F, Liu H W, Yang Q, et al. Maskless fabrication of concave microlens arrays on silica glasses by a femtosecond-laser-enhanced local wet etching method[J]. *Opt. Express*, 2010, 18: 20334-20343.
 - [24] Hao B, Liu H, Chen F, et al. Versatile route to gapless microlens arrays using laser-tunable wet-etched curved surface[J]. *Opt. Express*, 2012, 20(12): 12939-12948.
 - [25] Yi X J, Zhang X Y, Li Y, et al. Microlens arrays formed by melting photoresist and ion beam milling[J]. *Proc. SPIE*, 1998: 249-253.
 - [26] Harriott L, Scotti R, Cummings K, et al. Micromachining of integrated optical structures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, 48(25): 1704-1706.
 - [27] Kley E B, Possner T, Goring R. Realization of micro-optic and integrated optic components by electron-beam-lithographic surface profiling and ion exchange in glass[J]. *Inter. J. of Optoelectron.*, 1993, 8: 513-513.
 - [28] Fujita T, Nishihara H, Koyama J. Fabrication of micro lenses using electronbeam lithography [J]. *Opt. Lett.*, 1981, 6(12): 613-615.
 - [29] Brinksmeier E, Autschbach L. Ball-end milling of free-form surfaces for optical mold inserts[C]// *Proc. of 19th Annual Meeting of American Society for Precision Engin. (ASPE)*, 2004: 88-91.
 - [30] Yan J, Zhang Z, Kuriyagawa T, et al. Fabricating micro-structured surface by using single-crystalline diamond endmill [J]. *The Inter. J. of Adv. Manufacturing Technol.*, 2010, 51(9): 957-964.
 - [31] Fang F, Zhang X, Hu X. Cylindrical coordinate machining of optical freeform surfaces[J]. *Opt. Express*, 2008, 16(10): 7323-7329.
 - [32] Zhou J, Li L, Naples N, et al. Fabrication of continuous diffractive optical elements using a fast tool servo diamond turning process[J]. *J. of Micromechanics and Microengin.*, 2013, 23(7): 075010.
 - [33] Chen F Z, Chen C H, Wu C H, et al. Development of a double-sided micro lens array for micro laser projector application[J]. *Opt. Rev.*, 2012, 19(4): 238-241.
 - [34] 聂雅慧. 麦克斯韦电机驱动的快速刀具伺服系统关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
 - Nie Yahui. Research on key technologies of fast tool servo driven by Maxwell-normal stress motor[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
 - [35] Lippmann M G. 1908. Epreuves reversible donnant la sensation du relief[J]. *J. Phys*, 7, 821-825.
 - [36] Ives F E. Parallax stereogram and process of making same [P]. US Patent 725, 567. <http://www.google.com/patents/US725567>.
 - [37] Adelson E H, Wang J Y A. Single lens stereo with a plenoptic camera[J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1992, 14(2): 99-106.
 - [38] Ng R. Fourier slice photography[C]// *Proc. of the Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'05)*, 2005: 735-744.

大功率半导体激光器抗腔面灾变性光学损伤技术综述

宋悦^{1,2}, 宁永强^{1,2*}, 秦莉^{1,2}, 陈泳屹^{1,2}, 张金龙^{1,2}, 张俊^{1,2}, 王立军^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 激光器腔面灾变性光学损伤对大功率半导体激光器的最大输出功率和可靠性有很大的负面影响,是激光器突然失效的主要机制。如何克服腔面灾变性光学损伤,从而获得高性能的大功率半导体激光器成为重要的研究课题。文章首先对腔面灾变性光学损伤的研究历程进行了简要介绍,随后论述了腔面灾变损伤的物理机制及热动力学过程,最后从技术原理、方法、优缺点、改进方法、研究进展及应用现状的角度,逐一对各种抑制腔面灾变损伤的方法进行了归纳和总结。

关键词: 大功率半导体激光器; 腔面灾变性光学损伤; 输出功率; 可靠性

中图分类号: TN248.4 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0618-09

Review on The Methods of Preventing Catastrophic Optical Mirror Damage in High-power Diode Lasers

SONG Yue^{1,2}, NING Yongqiang^{1,2}, QIN Li^{1,2}, CHEN Yongyi^{1,2},
ZHANG Jinlong^{1,2}, ZHANG Jun^{1,2}, WANG Lijun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, CHN; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: The catastrophic optical mirror damage has a significantly negative effect on the maximum output power and reliability of the high-power diode laser, which is the main mechanism of its sudden failure. How to overcome the catastrophic optical mirror damage of the cavity surface to obtain the high-performance diode lasers has become an important research topic at home and abroad. Firstly, the research process of catastrophic optical mirror damage is briefly introduced in this paper. Then the mechanisms and the thermal kinetics of the catastrophic optical mirror damage are discussed. Finally, various surface passivation technologies are summarized one by one from the perspectives of technical principles, methods, advantages and disadvantages and the improved methods, research progress and application status.

Key words: high-power diode lasers; catastrophic optical mirror damage; output power; reliability

0 引言

大功率半导体激光器具有体积小、重量轻、转换效率高、易于集成等优点,在军事国防、航天航空、工

业加工及通信等领域有着广泛的应用。较高的输出功率及较好的可靠性是大功率半导体激光器得以广泛应用的重要前提,尤其在军事、国防及航天领域,对半导体激光器的可靠性提出了更高的要求。

半导体激光器在高功率输出时,有源区量子阱中的功率密度可以达到 10^{10} W/cm³ 量级^[1],输入的电能不能完全转换成光能,一部分电能会转化为热能,使激光器局部过热,各项工作性能发生退化,

收稿日期: 2020-08-11.

基金项目: 国家重点研发专项项目(2017YFB0405100); 国家自然科学基金项目(61674148, 61904179).

* 通信作者: 宁永强 E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn

有时还会发生突然灾变性损伤,导致激光器失效。

腔面灾变性光学损伤(Catastrophic Optical Mirror Damage, COMD)是边发射半导体激光器突然失效的主要原因,长久以来一直限制着激光器的最大输出功率和可靠性。腔面 COMD 相关研究的每一步发展,都为半导体激光器带来了更大的应用市场。

早在半导体激光器刚问世不久,研究者们就发现了腔面 COMD 现象。1967 年, Kressel 等^[2]报道了在大电流密度、高输出功率时,激光器腔面处会形成凹坑或者凹槽。20 世纪 70 年代初, Eliseev 等^[3]用热“微爆炸”模型解释了腔面 COMD 现象,认为腔面局部过热是导致激光器灾变性光学损伤的主要原因。1979 年, Henry 等^[4]详尽地报道了 COMD 形成的根本原因及其动力学过程。然而,早期人们对 COMD 的认知大多局限于表面——局部温度过高引发热逃逸,最终导致“微爆炸”。直到 1991 年, Tang 等^[5]利用氩探针束流诱导加热的方法,首次得到了半导体激光器腔面发生热逃逸的临界温度(120~140 °C),这使人们对热逃逸过程的认知有了质的飞跃。此后,学者们发现表面复合过程及缺陷重构会在激光器腔面处形成强烈的光吸收,促使局部温度升高,诱导 COMD 的发生,进而烧毁激光器腔面^[6-7]。

针对如何抑制大功率半导体激光器腔面处发生 COMD,从而改善器件可靠性这一课题,研究者们进行了大量的探索与研究,发现提高激光器 COMD 阈值的关键在于减少腔面附近缺陷及界面态形成非辐射复合中心的密度;抑制光吸收过程以及降低腔面处的注入电流。

目前,常用的抗 COMD 方法主要有:腔面钝化处理技术(如腔面硫化处理技术、高真空解理镀膜技术)、腔面镀膜工艺(其中离子辅助镀膜技术为最常用的镀膜方法)、非吸收窗口技术、在腔面附近引入电流非注入区和电流阻挡层技术。

本文综述了上述方法的技术原理、优缺点和改进方法、研究进展及应用现状。

1 腔面灾变损伤机制

1.1 COMD 的定义

COMD 是指当辐射电磁波所建立的电场强度超过极限值(对应辐射功率密度超过 10^7 W/cm^2 时),电子散射使得材料表面吸收大量的光子,导致

腔面局部过热,高能量密度的光使腔面微区发生熔融甚至分解^[8]。

1.2 COMD 的物理机制

腔面温度过高是导致激光腔面发生灾变性光学损伤的直接原因^[9]。造成腔面温度过高的因素主要有两个:一是半导体激光器腔面处存在许多氧化物或杂质形成的表面态或界面态,这些表面态/界面态吸收激光器激射出的光,成为载流子的散射中心或非辐射复合中心,产生大量的热,导致腔面温度升高。另一个是激光器的出光面一般位于热沉边缘,散热较差,热积累使得出光腔面温度升高,导致腔面附近半导体材料带隙收缩,光子吸收系数增大,端面处非平衡载流子浓度升高,使得局部区域热量进一步增加,当腔面温度升高至激光器材料的熔点时,就会烧毁腔面,引发 COMD。

1.3 COMD 的热动力学过程

(1)热量累积过程。激光器腔面附近的非辐射复合中心(缺陷)增多,热量累积会促使局部温度升高。当温度达到极值($T = 120 \sim 160 \text{ °C}$)^[1,5]时,有源区量子阱形成强烈的光吸收。当热逃逸过程开始时,热量累积过程结束。

(2)热逃逸过程。热逃逸导致局部区域热熔融,热斑扩展。当激活能不足时,热逃逸过程结束。

(3)缺陷攀移过程。热逃逸使激光器腔面处形成大量缺陷及表面态,这些缺陷沿出光方向攀爬、滑移^[9],加速器件老化过程,导致灾变损伤的发生。

2 抑制腔面灾变性光学损伤的方法

从工艺设计的角度抑制腔面光学灾变损伤的方法主要有:

腔面钝化及镀膜工艺,即在半导体激光器腔面处沉积一层几纳米或几十纳米的钝化层,再在前后腔面上分别镀制增透和高反膜,以减少腔面附近的缺陷及表面态密度,抑制非辐射复合过程。腔面钝化技术主要包括腔面硫化处理技术及真空解理镀膜技术。

大光腔结构设计可降低腔面光功率密度,减少腔面处自由载流子的吸收;非吸收窗口结构可减少腔面附近的模态吸收和材料的增益特性,通过增大腔面附近材料的带隙结构,形成激励波长透明区,以减少光吸收;还可通过在应变量子阱激光器端面处引入张应变量子阱结构,补偿激光器内部双轴压应

变转变成单轴压应变时释放的应变,从而减小腔面处的光吸收。

腔面附近引入电流非注入区(如隔离沟槽工艺)及电流阻挡层,减少腔面处的注入电流密度和载流子浓度。

2.1 腔面硫化处理技术

2.1.1 技术原理

腔面硫化处理技术是指将半导体激光器解理腔面与含硫化合物进行反应,从而去除腔面处形成的自然氧化层,生成一种性质相对稳定的硫化物钝化层,这种方法可以抑制腔面氧化物的形成,减少腔面处的缺陷和表面态密度,降低非辐射复合速率,改善器件的输出功率和可靠性。

2.1.2 钝化方法

钝化方法总体上分为两大类:一是将解理后的激光器 bar 条直接浸泡到含硫溶液中,即湿法钝化,目前常用的钝化液多以 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 溶液、 Na_2S_x 溶液、 CH_3CSNH_2 溶液三种液体为基础配制而成。二是在某种含硫气氛下进行钝化,即干法钝化,主要使用的气体为 H_2S 。

2.1.3 钝化层需要满足的指标

在化学方面:钝化层应尽可能使激光器腔面处半导体表面悬挂键得到饱和,以防止表面化学性质发生改变;新生成的化学键须在大气压下及器件工作温度范围内具有热力学稳定性;厚度在纳米量级范围内,钝化层应有效阻止半导体表面原子与外界环境发生反应,尤其是对氧起到屏蔽作用。

在电学方面:要求能够减少和控制表面态密度,不再产生新的表面态,并且钝化材料的带隙宽度要尽可能大于半导体材料本身,以限制半导体中的载流子在器件工作过程中进入钝化层。

在机械方面:钝化层沉积时不能破坏腔面,因此,沉积能量必须足够低。沉积后,钝化层要与半导体材料晶格匹配或是无定形的,尽量避免应力的产生。

2.1.4 技术的优缺点及改进方法

硫化处理技术虽然能够改善激光器性能,但存在钝化时间长、稳定性差、有效时间短、在空气中易受氧侵蚀而失效的不足,通常需要和镀膜技术联合使用。可以通过调整钝化液酸碱度,在硫化物钝化层上再外延生长一层 ZnSe 钝化保护层,向含硫钝化液中加入与硫元素性质类似的元素(如硒元素 Se),待腔面钝化膜形成后,进行退火处理来改善钝

化膜的厚度及稳定性。

2.1.5 主要研究进展及现状

1987 年, Sandroff 等^[10]发明了腔面硫化处理技术,采用 $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 溶液将 $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ 异质结双极晶体管(HBTs)腔面钝化,经硫化处理后的 HBT 电流增益提高了 60 多倍。

1988 年, Carpenter 等^[11]首次提出了用 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 溶液替代 $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 溶液对 GaAs pn 结激光二极管的腔面进行钝化,改善了激光器的电流-电压特性。同年, Fan 等^[12]通过在 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 溶液中加入 6% 过量的硫将 GaAs 表面钝化,再用去离子水清洗,在氮气氛围中干燥,极大程度地减少了 GaAs 表面态密度。

1990 年, Kawanishi 等^[13]采用 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 硫化技术钝化了 780 nm AlGaAs 高功率半导体激光器的出光腔面,将器件输出功率从 120 mW 提高至 220 mW, 50 °C 下可稳定连续工作 2 000 h 以上,极大地提高了器件的可靠性。1991 年, Kamiyama 等^[14]利用 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 硫化技术将 AlGaInP 可见光半导体激光器的 COD 阈值提高了 70%。

虽然 Na_2S 溶液和 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 溶液形成的钝化膜能够减少腔面处的表面态密度,但暴露在空气中一段时间后,所形成的单层硫化物也容易被氧化而导致器件失效。

1996 年, 复旦大学的 Hou 等采用硫蒸气辉光放电技术,在 GaAs 表面形成了一层性能稳定的 GaS 钝化层^[15]。同年,中国科学院大学 Lu 等发明了利用硫乙酰胺(CH_3CSNH_2)溶液将 GaAs 表面硫化,再通过热退火,改进了 GaS 钝化层的稳定性^[16]。

2003 年,法国蒙彼利埃大学的 Salesse 等使用硫乙酰胺(CH_3CSNH_2)和硫化铵($(\text{NH}_4)_2\text{S}$)混合溶液($\text{pH}=2.4$)钝化激光器腔面,制备出了化学稳定性更好的钝化膜^[17]。

2014 年,长春理工大学的周路等配置了一种新型 $\text{Se}+(\text{NH}_4)_2\text{S}+\text{t-C}_4\text{H}_9\text{OH}$ 钝化液,验证了这种新型钝化液不但可以把 GaAs 表面氧玷污去除干净,而且钝化的稳定性也有所改善^[18]。

2.2 高真空解理镀膜技术

2.2.1 技术原理

高真空解理技术是指在高真空环境下($1.333\,224 \times 10^{-6}$ Pa),将外延片解理成 bar 条,然后,在解理面蒸镀或沉积一层钝化薄膜。整个工艺过程都在高真空下完成,可以有效避免腔面受到氧

或其他杂质的污染,抑制非辐射复合过程的发生。钝化后需对激光器前后腔面分别镀制增透和高反膜,从而获得具有高可靠性的半导体激光器。

2.2.2 钝化方法

20 世纪 90 年代,英国学者们发明了真空滚轮压解法:首先在待解理的芯片上划好刻印,并将其夹在两个柔性传送带中间,在真空室环境下,夹着芯片的传送带通过大直径滚轮的曲面,在瞬间的弯曲应力作用下,芯片在划痕处解理成 bar 条^[19]。

双层金属片热膨胀形变解理法:预先在芯片解理位置划好解理槽,用合适的装置将芯片水平固定,双层金属片组成的悬臂条作为解理工具,整个装置安装在真空室内,由于两层金属片热膨胀系数存在差异,经过加热,解理工具头向下移动接触芯片,产生一定的压力使芯片在解理槽裂解开^[20]。

目前,通常采用美国 SVT 公司生产的超高真空解理机将芯片解理,并把解理出的 Bar 条收集到样品托上,堆叠在一起,之后直接送入钝化室,进行钝化层沉积,整个过程无需暴露在大气中。

2.2.3 对钝化层的要求

钝化膜需要是非吸光材料,不与腔面发生反应,能够有效阻挡氧化物介质膜中的杂质向半导体激光器内部扩散。此外,钝化膜厚度不宜过厚(一般为纳米数量级),如果钝化层太厚,会形成量子化束缚态,使载流子扩散到钝化层中,最终形成非辐射复合中心,一般选用的材料有 ZnSe 或 Si, Ge, SiN_x, AlN。

2.2.4 技术的优缺点及改进方法

高真空解理技术能够有效减少腔面处的缺陷和表面态密度,但这种方法只能进行腔面钝化,镀膜工艺仍需在其它设备中进行,且设备本身结构复杂,工艺难度高,价格昂贵。

真空解理镀膜技术的关键在于如何在高真空中实现芯片解理。由于高真空解理设备价格昂贵,可以通过将解理机放置在真空手套箱内进行操作,或在充满干燥惰性气体(如 N₂)的环境下进行解理,先在高真空环境中干法刻蚀去除氧化层及表面态,再在腔面上生长一层氮化物钝化层^[21],最后镀制高反膜/增透膜,从而达到既降低技术成本,又得到高效稳定激光器的目的。

2.2.5 主要研究进展及现状

1992 年,瑞士伯恩大学的 BROOM 等发明了利用真空滚轮压解法,将激光器在真空中解理镀膜,避免了腔面的氧化和污染^[19]。

1996 年, Syrbu 等^[22]在蒸镀高反/增透膜前利用原位生长 ZnSe 技术,将 980 nm InGaAs 半导体激光器腔面钝化,使其连续输出功率提高了 50%。

1997 年, Mawst 等^[23]利用激光辅助化学气相沉积法在 InGaAs 双量子阱半导体激光器腔面处形成 ZnSe 钝化层,将器件 COD 阈值提高了 50%。

1998 年, Chand 等^[20]发明了双层金属热膨胀形变解理法,将半导体激光器真空解理,抑制腔面附近非辐射复合过程的发生。

2004 年, Ressel 等^[24]提出先采用氢束照射 808 nm GaAsP 脊型波导半导体激光器,再在腔面处外延生长一层 ZnSe 钝化层,激光器辐射功率达 500 mW 时,可连续工作数千小时。

2012 年, 长春理工大学的李再金等^[25]在 980 nm InGaAs/AlGaAs 半导体激光器前后腔面蒸镀 20 nm 的 ZnSe 钝化膜,其输出功率与蒸镀 Si 钝化膜和不蒸镀钝化膜的激光器相比分别提高了 11% 和 42%,失效电流比不蒸镀薄膜的激光器提升了 36%。

2014 年, 长春理工大学的芦鹏等在低温真空条件下解理大功率半导体激光器,并在腔面处沉积 SiN_x 钝化膜,与未镀钝化膜的器件相比,其最高输出功率提高了 65.7%,COD 阈值也有了明显的提高^[26]。同年,王鑫等在高真空条件下解理和钝化了 GaAs 基半导体激光器,优化了真空解理钝化工艺的钝化膜厚度,通过比较光致发光谱线(PL)和 X 射线电子能谱(XPS),发现其稳定性和可靠性与未经真空解理钝化的器件相比有很大的改善^[27]。

2015 年, 北京工业大学的凌小涵等^[28]采用大光腔结构、真空解理镀膜技术制备的 980 nm 单发条大功率半导体激光器连续输出功率为 12 W,将器件成品率提高到了 40%。

2.3 离子辅助镀膜技术

2.3.1 技术原理

离子辅助镀膜是指在空气中解理半导体激光器芯片后,利用低能离子束轰击腔面,去除腔面处形成的氧化膜和吸附的杂质,然后利用离子辅助蒸发或溅射法在激光器前后腔面上分别制备增透和高反介质保护膜。腔面镀膜不但可以预防灾变性光学损伤的发生,还能有效改善激光器的光学及机械性能。高反膜有利于降低阈值电流,而增透膜可以提高激光器的量子效率、电光转换效率和光功率密度。

2.3.2 技术方法

目前国外公司较为成熟的专利技术是:采用离子束研磨清洗腔面,先用 Ar 离子研磨去除激光器腔面上的氧化层及杂质, H_2 作为辅助气体,加快表面氧化物的去除,再对激光器腔面采用 N 离子研磨,减少 Ar 离子轰击对器件带来的损伤,经离子清洗后,在真空环境下沉积钝化膜,最后采用电子束蒸发法镀制高反和增透薄膜。

此外,介质保护膜的镀制方法主要有以下三种:(1)物理气相沉积(PVD)。根据成膜材料气化方式不同又分为溅射、离子镀、热蒸发及离子辅助镀膜技术。PVD 技术需要使用真空镀膜机,成本较高,但膜层强度好,厚度可精确控制,是目前应用最广泛的方法;(2)化学气相沉积(CVD)。这种方法需要较高的沉积温度,而且制备过程中会产生易燃易爆、有毒的副产物;(3)化学液相沉积(CLD)。这种方法工艺简单,成本低,但膜厚控制不精确,强度差,难以形成多层膜。

出光面增透膜通常选用的材料有 Ta_2O_5 , Al_2O_3 , ZrO_2 和 SiO_2 , 高反膜选用的材料有 SiO_2/TiO_2 。

2.3.3 技术的优缺点

离子辅助镀膜技术是目前应用最广泛的技术,该方法易于实现,能够有效降低阈值电流,提高激光器的微分量子效率、电光转换效率以及输出功率,对延长激光器的寿命也有重要的作用。

2.3.4 主要研究进展及现状

1977 年, Ladany 等^[29]发现在 AlGaAs 半导体激光器腔面处镀制半波长 Al_2O_3 光学薄膜能够防止腔面光学灾变损伤的发生,有效提高激光器的寿命。

1979 年, Kerps 等^[30]发现在激光器腔面上镀制 SiO_2 介质保护膜,能够改善激光器的输出功率。

1997 年, Tu 等^[31]利用真空解理镀膜技术在 870 nm GaAs 激光器腔面处外延生长 10 nm 厚的 Si 钝化层,再蒸镀宽带隙 Al_2O_3 介质膜,提高了激光器 COD 阈值。

2001 年, Lorch 等^[32]采用离子束溅射法镀制了反射率分别为 10% 和 90% 的腔面膜,改善了半导体激光器的性能。

2006 年, Gharache 等^[33]采用的腔面镀膜技术腔面连续功率密度可达 29.4 MW/cm^2 。

2007 年, 长春理工大学朱立岩等^[34]采用离子辅

助镀膜技术制作的 850 nm 高亮度半导体激光器输出功率与未镀膜器件相比提高了 215~311 倍。

2010 年, 吉林师范大学的刘春玲等^[35]采用离子辅助电子束蒸镀技术,在 808 nm 高功率半导体激光器后腔面处沉积性能良好的低损耗高反 H_4 介质膜,改善了激光器的输出特性, COD 阈值也有所提高。

2.4 非吸收窗口技术

2.4.1 技术原理

非吸收窗口技术是指在激光器腔面附近通过特殊处理,使该区域量子阱的带隙宽度增大,从而对激光波长透明,抑制腔面处的光吸收。非吸收窗口的制备方法主要有量子阱无序技术、二次外延生长技术和选择性外延生长技术。

2.4.2 技术方法

量子阱无序技术是指在生长好的外延片上通过量子阱混杂技术,使各组成元素之间发生互扩散,改变量子阱层和势垒层的组分,以增大腔面附近量子阱的带隙宽度,形成对输出光透明的窗口,以减少腔面处的光吸收。

二次外延生长技术是将激光器腔面附近的外延材料刻蚀掉,再生长一种宽带隙的材料。

选择性外延生长技术是在外延生长过程中,一部分区域被掩膜层遮蔽住,从而将材料生长限定在特定的方向上。利用掩膜生长不同的外延成分可以得到空间选择能隙变化,实现在无掩膜区域(窗口区)生长宽带隙半导体材料。

量子阱混杂技术又包括以下几种方法:

(1)无杂质空位扩散诱导量子阱混合。

利用不同的工艺手段(如电子束蒸发、等离子体化学气相沉积或磁控溅射等),在半导体外延片表面沉积一层比外延层热膨胀系数小的介质膜,然后对外延片进行高温快速热退火,使得外延片上表面的原子扩散到介质膜中产生点缺陷(空位),在高温退火的作用下,点缺陷向量子阱区域扩散,诱导量子阱/势垒材料互混杂,使带隙增大产生蓝移。量子阱混杂的效果主要取决于量子阱中的Ⅲ族原子或Ⅴ族原子在介质膜中的溶解度、扩散系数以及介质薄膜与接触层间的热膨胀系数差异,此外,还与退火温度及退火时间有关。

目前,所用介质膜的种类主要有: SiN_x , SrF_2 , P 掺杂 SiO_2 和 TiO_2 等。对 GaAs 系列材料而言,促进其量子阱混合的介质膜可选 SiO_2 , 抑制其混合过

程的介质膜可选 SiN_x , InP 系列材料则刚好相反。

无杂质空位扩散不会额外引入杂质,操作相对简单,因此得到了广泛的研究和应用,但这种方法横向离散较大,横向分辨率有待改善。

(2) 离子注入诱导量子阱混合。

以离子注入的形式向外延片中注入杂质,离子注入对晶体产生高能冲击,在外延层中形成大量点缺陷,从而加速热退火时量子阱中原子的扩散速率。

注入离子种类包括具有掺杂作用的 Si^+ , Zn^+ , Ge^+ , S^+ , Ga^+ , P^+ 等杂质及中性杂质 B^+ , F^+ 以及惰性气体。

这种方法重复性好,且掺杂浓度及深度可精确控制,但容易发生沟道效应,以致注入深度过大,对晶格造成损伤。

(3) 杂质扩散诱导量子阱混合。

通过高温扩散或注入的方式向量子阱中掺杂某种杂质元素(如 Si, Zn, P, S 等),改变其费米能级及缺陷浓度,加速高温退火过程中各组分的相互扩散速率,使量子阱混合。

然而,这种方法存在因掺入杂质而造成载流子光吸收的不足。

(4) 光吸收诱导量子阱混合。

通过连续输出激光对外延层选择区域辐照,依靠半导体外延层的带隙大小来选择辐射激光的波长,激光的功率密度需能够将外延片加热到量子阱混合的温度,加热的程度与有源区吸收的能量有关。

由于没有杂质和缺陷的引入,激光器电学性能不会有太大的退化。这种方法适合应用在热稳定性较差的材料体系(如 InGaAsP)中,但这种方法很难控制混合区域。

2.4.3 技术的优缺点及改进方法

量子阱无序技术操作相对简单,成本低,效果较明显,但该技术需要在高温下进行快速热退火,一般热退火温度超过芯片的外延生长温度,可能对器件造成损伤。二次外延生长技术工艺复杂,技术难度大,难以保证结合界面晶体质量,且成本高、重复性较差。选择性外延生长技术工艺复杂,需要重复使用昂贵的外延生长系统,提高了工艺成本。

为了降低高温退火对器件的损伤,可以在外延层设计时引入一层高缺陷层,缺陷层的缺陷密度大于 $1\,000\text{ 缺陷}/\text{cm}^2$ 或 $10^6\text{ 缺陷}/\text{cm}^3$,降低量子阱混合过程所需的温度^[36]。

2.4.4 主要研究进展及现状

1979 年, Yonezu 等^[37] 采用杂质扩散诱导量子阱无序化法(在腔面处 n 掺杂后,进行快速热退火)制备了 AlGaAs 异质结激光器。脉冲输出下,最大输出功率与传统结构激光器相比提高了至少一个数量级;连续输出时,减缓了器件的缓慢老化过程。

1984 年, Botez 等^[38] 利用选择性外延生长技术制备出镜面非吸收的 AlGaAs 大光腔激光器,脉冲输出(100 ns)时,峰值功率和发生 COD 的功率密度分别为 $1\sim 5\text{ W}$ 和 $(20\sim 30)\text{ MW}/\text{cm}^2$,输出功率是普通激光器的 2~3 倍。

1999 年, Philippe 等^[39] 利用无杂质空位扩散法,在激光器腔面处形成 42 meV 的蓝移量,制备出带有非吸收窗口的 AlGaAs 量子阱激光器,与无窗口激光器相比,抗 COMD 能力提高了 1.5 倍。

2000 年, Yamamura 等^[40] 采用杂质诱导量子阱无序法(腔面处注入 Si 离子后快速退火,再在窗口区顶部注入 H 离子)制备了具有高功率、高稳定性的窗口型 980 nm GaAs 基半导体激光器,极大程度地降低了器件失效率。

2002 年, Walker 等^[41] 利用溅射二氧化硅诱导量子阱混合技术,制备了具有非吸收窗口的 GaAs/AlGaAs 半导体激光器,抗 COD 阈值与普通激光器相比,提升了 2.6 倍。

2009 年, 西安理工大学的林涛等^[42] 采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术二次外延生长了大功率 657 nm 红光半导体激光器,通过闭管扩散 Zn 的方法在腔面附近制作了非吸收窗口,激光器连续工作的输出功率大于 100 mW,超过常规无窗口结构激光器最大输出功率的两倍,激光器的斜率效率提高了 23%。

2011 年, Tandoi 等^[43] 优化了带有非吸收窗口的碰撞脉冲锁模 GaAs/AlGaAs 量子阱激光器,具有非吸收镜面的激光器脉冲宽度变窄了 10%,抗 COD 能力提高了 40%。

2015 年, Naito 等^[44] 利用无杂质空位扩散法,制备了带隙差为 100 meV 的非吸收窗口, 915 nm 波段 InGaAs 宽条半导体激光器的连续输出功率为 20 W,可靠工作时间在 5 000 h 以上,最大功率转换效率超过 65%。

2016 年, Yun 等^[45] 发现在质子注入剂量为 $1\times 10^{16}\text{ cm}^{-2}$ 下,经 750 °C 10 min 快速退火后,可使 InGaAs/GaAs 量子阱蓝移 30 meV,证明质子束辐

照诱导量子阱无序是制备非吸收窗口的重要方法。

2.5 腔面附近引入非注入区及电流阻挡层技术

2.5.1 技术原理

腔面附近引入非注入区及电流阻挡技术是在半导体激光器前后腔面附近一段区域(大约 20%腔长)处,引入电流非注入区或电流阻挡层,限制电流注入腔面,以减少腔面附近载流子的浓度,抑制非辐射复合过程,使载流子感应带隙收缩减小,带隙相对增加,光吸收相对减少,降低腔面处产生的热量,从而提高器件的 COMD 阈值功率。

2.5.2 技术方法

引入非注入区或电流阻挡层的方法有:通过在腔面附近注入 He, H, O 等离子,提高腔面处电阻率;在腔面附近引入 SiO_2 , SiN_x 等绝缘性能良好的介质薄膜,形成电流非注入区;去除腔面附近的高掺杂层;采用电隔离沟槽工艺,在表面接触层上分别加电;通过在衬底上长 GaAs 电流阻挡层结合腔面处脊宽比器件内部窄的工艺设计。

2.5.3 技术的优缺点及改进方法

电流非注入区结合电流阻挡技术可以提高 COD 阈值功率,实施简单,可以与其他方式合用。但效果不明显。由于电流非注入区有一定的光吸收,会影响激光器的 $L-I$ 特性和输出功率, SiO_2 膜不能在半导体激光器的表层下面进行电流阻挡,电流仍然可以从电流注入区侧向流动到腔面区。此外, SiO_2 对热量的散发与传导有限制作用。离子注入会带来附加的晶格缺陷,如高位错密度和附加的应力等,配合适当的热退火可以在一定程度上消除产生的缺陷。因此,该种技术与杂质注入诱导无序技术联合使用,可以达到实用化的要求。

2.5.4 主要研究进展及现状

1987 年,Shibutani 等^[46]在 780 nm AlGaAs 半导体激光器腔面处引入电流阻挡区域,并将腔面处设计成窄脊结构,成功地将激光器 COD 功率密度提升了 1.4 倍,失效率仅为传统结构激光器的一半。

1992 年,Sagawa 等^[47]在 980 nm InGaAs/InGaP/GaAs 掩埋脊形激光器腔面处形成电流非注入区,将器件的最大输出功率提高到 466 mW。

2003 年,Rinner 等^[48]在 940 nm 单量子阱 InGaAs/AlGaAs 宽条半导体激光器前腔面处引入一个 30 μm 长的电流阻挡层,通过将该区域内的高掺杂盖层刻蚀掉,再生长一层 SiN_x ,从而限制了腔面附近的电流密度和载流子浓度,腔面温升比普通

激光器降低了 3~4 倍,抗 COMD 阈值也有一定提高。

同年,刘斌^[49]等采用质子注入技术,在距离前腔面 25 μm 的区域形成电流非注入区,将 980 nm 脊形波导激光器的平均 COD 阈值功率提高了 50%;应用 SiO_2 在腔面附近形成电流非注入区,制造的管芯平均 COD 阈值功率同常规工艺相比提高了 27.5%。

2009 年,中国电子科技集团公司第 13 所的张世祖等,通过腐蚀掉 GaAs 高掺杂层的方法,在 808 nm 半导体激光器的腔面处引入电流非注入区,制作的激光器最大输出功率达 3.7 W,比常规工艺制作的器件输出功率提高了近 20%^[50]。

2013 年,刘斌等^[51]通过氦离子注入结合热退火处理的方法,在 808 nm GaAs/AlGaAs 激光器二极管阵列的前后腔面处形成 25 μm 长的电流非注入区,显著地提高了器件的 COD 阈值和可靠性。

2014 年,北京工业大学的张松等通过腐蚀掉激光器高掺杂欧姆接触层的方法,在 976 nm 大功率单发射条半导体激光器腔面附近引入 25 μm 的电流非注入区,器件的 COD 阈值相比传统激光器提高了约 20%^[52]。

3 总结与展望

COMD 是大功率半导体激光器突然失效的主要原因,严重影响了半导体激光器的输出功率及使用寿命。本文对 COMD 形成机制和腔面处理技术进行了归纳、总结。在实际应用中,应当全面考虑各种方法对不同器件结构、材料系的影响,综合取舍,应采用多种方法相结合的方式,以达到减少腔面附近表面态密度,抑制光吸收过程和降低腔面处注入电流大小的目的,从而提高激光器的性能和可靠性。

参考文献:

- [1] Tomm J W, Ziegler M, Hempel M, et al. Mechanisms and fast kinetics of the catastrophic optical damage (COD) in GaAs-based diode lasers[J]. Laser Photonics Rev., 2011, 5 (3): 422-441.
- [2] Kressel H, Mierop H. Catastrophic degradation in GaAs injection lasers[J]. J. Appl. Phys., 1967, 38(13): 5419-5421.
- [3] Eliseev P G. Degradation of injection lasers[J]. J. Lumin., 1973, 7: 338-356.
- [4] Henry C H, Petroff P M, Logan R A, et al. Catastrophic

- damage of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ double-heterostructure laser material [J]. J. Appl. Phys., 1979, 50(5): 3721-3732.
- [5] Tang W C, Rosen H J, Vettiger P, et al. Raman microprobe study of the time development of AlGaAs single quantum well laser facet temperature on route to catastrophic breakdown [J]. Appl. Phys. Lett., 1991, 58(6): 557-559.
- [6] Chen G, Tien C L. Facet heating of quantum well lasers[J]. J. Appl. Phys., 1993, 74(4): 2167-2174.
- [7] Schatz R, Bethea C. Steady state model for facet heating to thermal runaway in semiconductor lasers[J]. J. Appl. Phys., 1994, 76(4): 2509-2521.
- [8] 江剑平. 半导体激光器[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000: 330-332.
- Jiang Jianping. Semiconductor Diode Lasers [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000: 330-332.
- [9] Tomm J W, Hempel M, Krakowski M, et al. Mechanisms and kinetics of the catastrophic optical damage (COD) of high-power semiconductor lasers[C]// Photonics Society Summer Topical Meeting Series. IEEE, 2012: 51-52.
- [10] Sandroff C J, Nottenburg R N, Bischoff J C, et al. Dramatic enhancement in the gain of a GaAs/AlGaAs heterostructure bipolar transistor by surface chemical passivation[J]. Appl. Phys. Lett., 1987, 51(1): 33-35.
- [11] Carpenter M S, Melloch M, Lundstrom M S, et al. Effect of Na_2S and $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ edge passivation treatments on the dark current-voltage characteristics of GaAs pn diodes[J]. Appl. Phys. Lett., 1988, 52(25): 2157-2159.
- [12] Fan J F, Oigawa H, Nannichi Y. The effect of $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ treatment on the interface characteristics of GaAs MIS structures[J]. Jpn. J. of Appl. Phys., 1988, 27(7): L1331-L1333.
- [13] Kawanishi H, Ohno H, Morimoto T, et al. Improvement of high-power characteristics of 780-nm AlGaAs laser diode by $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ facet treatment [C]// Proc. of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1990: 1219.
- [14] Kamiyama S, Mori Y, Takahashi Y, et al. Improvement of catastrophic optical damage level of AlGaInP visible laser diodes by sulfur treatment[J]. Appl. Phys. Lett., 1991, 58(23): 2595-2597.
- [15] Hou Xiaoyan, Chen Xiyang, Li Zheshen, et al. Passivation of GaAs surface by sulfur glow discharge[J]. Appl. Phys. Lett., 1996, 69(10): 1429-1431.
- [16] Lu E D, Zhang F P, Xu S H, et al. A sulfur passivation for GaAs surface by an organic molecular, CH_3CSNH_2 treatment [J]. Appl. Phys. Lett., 1996, 69(15): 2282-2284.
- [17] Salesse A, Joullie A, Calas P, et al. Surface passivation of GaInAsSb photodiodes with thioacetamide[J]. Phys. Stat. Sol. (C), 2003, 4(4): 1508-1512.
- [18] 周 路. 高功率半导体激光器抗 COD 关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014: 39-44.
- Zhou Lu. Research on anti catastrophic optical damage of high power semiconductor laser diodes[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014: 39-44.
- [19] Broom R F, Gasser M, Harder C S, et al. Method for batch cleaving semiconductor wafers and coating cleaved facet: United States Patent, 5171717[P]. 1992-12-15.
- [20] Chand N, Hamm R A. In-situ technique for cleaving crystals. United States Patent, 5773318[P]. 1998-06-30.
- [21] Lindstrom L, Karsten V, Blixt P N, et al. Method to obtain contamination free laser mirrors and passivation of these: United States Patent, 6812152[P]. 2005-07-14.
- [22] Syrbu A V, Yakovlev V P, Suruceanu G I, et al. ZnSe-facet-passivated InGaAs/InGaAsP/InGaP diode lasers of high CW power and ‘wallplug’ efficiency[C]// Proc. of IEEE Conf. on Lasers & Electro-optics, 1996, 32: 352-353.
- [23] Mawst L J, Bhattacharya A, Nesnidal M, et al. MOVPE-grown high CW power InGaAs/InGaAsP/InGaP diode lasers [J]. J. of Cryst. Growth, 1997, 170(1): 383-389.
- [24] Ressel P, Erbert G, Beister G, et al. Simple but effective passivation process for the mirror facets of high-power semiconductor diode lasers [C]//Proc. of IEEE Conf. on Lasers & Electro-optics Europe, 2004: 145.
- [25] 李再金, 李 特, 芦 鹏, 等. 980 nm 半导体激光器腔面膜钝化新技术[J]. 发光学报, 2012, 33(5): 525-528.
- Li Zaijin, Li Te, Lu Peng, et al. The novel passivation method for 980 nm semiconductor laser diode face coating[J]. Chinese J. of Luminescence, 2012, 33(5): 525-528.
- [26] 芦 鹏, 李再金, 曲 轶, 等. GaAs 基大功率半导体激光器无氧解理钝化技术研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2014, 5: 4-6.
- Lu Peng, Li Zaijin, Qu Yi, et al. Anaerobic cleaving passivation technology research on GaAs high power semiconductor laser[J]. J. of Changchun University of Science and Technol. (Natural Science Edi.), 2014, 5: 4-6.
- [27] 王 鑫, 曲 轶, 高 婷, 等. GaAs 基半导体激光器真空解理钝化工艺研究[J]. 半导体光电, 2014, 35(6): 1013-1015.
- Wang Xin, Qu Yi, Gao Ting, et al. Study on vacuum cleavage passivation technology of GaAs semiconductor laser [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(6): 1013-1015.
- [28] 凌小涵, 崔碧峰, 张 松, 等. 980 nm 大光腔单发光条大功率 LD 失效分析[J]. 激光与红外, 2015, 45(4): 369-372.
- Ling Xiaohan, Cui Bifeng, Zhang Song, et al. Failure analysis of 980 nm large-optical-cavity single light bar high-power LD [J]. Laser & Infrared, 2015, 45(4): 369-372.
- [29] Ladany I, Ettenberg M, Lockwood H F, et al. Al_2O_3 half-wave films for long-life CW lasers[J]. Appl. Phys. Lett., 1977, 30(2): 87-88.
- [30] Kerps D. Suppression of side lobes in the far field of AlGaAs DH stripe lasers by a Te facet coating[J]. Appl. Phys. Lett., 1979, 35(5): 372-373.
- [31] Tu L W, Schubert E F, Hong M, et al. In-vacuum cleaving and coating of semiconductor laser facets using thin silicon

- and a dielectric[J]. J. Appl. Phys., 1997, 80(11): 6448-6451.
- [32] Lorch S. Optimization of process parameters for low-absorbing optical coatings fabricated by reactive ion-beam sputter deposition[J]. Annual Report 2004, Optoelectronics Department, University of Ulm.
- [33] Charache G, Hostetler J, Jiang C L, et al. Laser facet passivation: United States Patent, 7687291[P]. 2006-03-27.
- [34] 朱立岩, 付秀华. 850 nm 高亮度半导体激光器腔面膜技术研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2007, 30(1): 18-20.
- Zhu Liyan, Fu Xiuhua. The technical development of the 850 nm high-luminance semiconductor laser's film[J]. J. of Changchun University of Science and Technol. (Natural Science Edi.), 2007, 30(1): 18-20.
- [35] 刘春玲, 王春武, 王广德, 等. 电子束蒸镀 H_4 膜工艺及其在 808 nm 激光器腔面膜上的应用[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 3140-3144.
- Liu Chunling, Wang Chunwu, Wang Guangde, et al. Process investigation of H_4 thin film prepared by electron beam evaporation and application on laser diodes cavity coatings[J]. Chinese J. of Lasers, 2010, 37(12): 3140-3144.
- [36] Najda S P. Quantum well intermixing in semiconductor photonic devices: PCT Patent, WO 2004/042801 A2[P]. 2003-10-30.
- [37] Yonezu H, Ueno M, Kamejima T, et al. An AlGaAs window structure laser[J]. IEEE J. Quantum Electron, 1979, 15(8): 775-781.
- [38] Botez D, Connolly J C. Nonabsorbing-mirror (NAM) CDH-LOC diode lasers[J]. Electron. Lett., 1984, 20(13): 530-532.
- [39] Philippe C, Julia A, Virginie M, et al. Non absorbing mirrors for AlGaAs quantum well lasers by impurity-free interdiffusion[J]. Proc. of SPIE-The Inter. Society for Optical Engineering, 1999, 3628: 260-266.
- [40] Yamamura S, Hanamaki Y, Kawasaki K, et al. A very low failure rate of COD free high power 0.98 μm laser diode with the window structure[C]// Proc. of IEEE Optical Fiber Communication Conf., 2000.
- [41] Walker C L, Bryce A C, Marsh J H. Improved catastrophic optical damage level from laser with nonabsorbing mirrors[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2002, 14(10): 1394-1396.
- [42] 林涛, 段玉鹏, 郑凯, 等. 带非吸收窗口的大功率 657 nm 半导体激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 104-109.
- Lin Tao, Duan Yupeng, Zheng Kai, et al. High power 657 nm laser diodes with nonabsorbing windows[J]. Chinese J. of Lasers, 2009, 36(1): 104-109.
- [43] Tandoi G, Ironside C N, Bryce A C. Nonabsorbing mirrors for quantum-well colliding pulse mode-locked lasers[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2011, 23(5): 293-295.
- [44] Naito H, Nagakura T, Torii K, et al. Long-term reliability of 915 nm broad-area laser diodes under 20 W CW operation[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2015, 27(15): 1041-1135.
- [45] Yun Y S, Kim S H, Ryu H Y, et al. InGaAs/GaAs quantum well intermixing using proton irradiation for non-absorbing mirror[J]. Curr. Appl. Phys., 2016, 16(9): 1005-1008.
- [46] Shibutani T, Kume M, Hamada K, et al. A novel high-power laser structure with current-blocked regions near cavity facets[J]. IEEE J. Quantum Electron., 2003, 23(6): 760-764.
- [47] Sagawa M, Hiramoto K. Advantages of InGaAsP separate confinement layer in 0.98 μm InGaAs/GaAs/InGaP strained DOW lasers for high power operation at high temperature[J]. Electron. Lett., 1992, 28(17): 1639-1640.
- [48] Rinner F, Rogg J, Kelemen M T, et al. Facet temperature reduction by a current blocking layer at the front facets of high-power InGaAs/AlGaAs lasers[J]. J. Appl. Phys., 2003, 93(3): 1848-1850.
- [49] 刘斌, 张敬明, 马晓宇, 等. 980 nm 脊型波导激光器腔面非注入区的研究[J]. 激光与红外, 2003, 33(2): 109-111.
- Liu Bin, Zhang Jingming, Ma Xiaoyu, et al. The investigation of 980 nm ridge waveguide lasers with current non-injection regions by proton implantation[J]. Laser & Infrared, 2003, 33(2): 109-111.
- [50] 张世祖, 杨红伟, 花吉珍, 等. 基于腔面非注入技术的大功率半导体激光器[J]. 微纳电子技术, 2009, 46(5): 270-273.
- Zhang Shizu, Yang Hongwei, Hua Jizhen, et al. High power laser diode with non-injection regions near the facet[J]. Micronanoelectronic Technology, 2009, 46(5): 270-273.
- [51] 刘斌, 刘媛媛. 腔面非注入区技术在 808 nm GaAs/AlGaAs 激光二极管阵列中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(11): 146-148.
- Liu Bin, Liu Yuanyuan. 808 nm GaAs/AlGaAs laser diode bar with current non-injection areas near the facets[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(11): 146-148.
- [52] 张松. 大功率半导体激光器非注入区窗口结构研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014: 37-52.
- Zhang Song. Research on structures of non-injection regions near cavity facets of high power laser diodes[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014: 37-52.

作者简介:

宋悦(1989—),女,吉林省松原市人,博士,助理研究员,主要研究方向为大功率半导体激光器;

宁永强(1965—),男,吉林省图们市人,博士,研究员,主要研究方向为大功率垂直腔面发射激光器。

低对比度光栅诱导的激光腔中准连续域束缚态研究

范 策^{1,3}, 王宇飞^{1,2}, 屈晋先¹, 郑婉华^{1,2,3,4*}

(1. 中国科学院半导体研究所 固态光电信息技术实验室, 北京 100083;

2. 中国科学院大学 未来技术学院, 北京 101408;

3. 中国科学院大学 材料科学与光电工程中心, 北京 100049;

4. 中国科学院半导体研究所 集成光电子国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 光子晶体等人工微结构中出现的连续域束缚态(BIC)处于光锥以上却不与背景泄漏模耦合,具有无限高的品质因数(Q 值),构建在 BIC 或准 BIC 工作的激光器具有低阈值的优点。而低对比度光栅常用于低成本激光器的模式调制和耦出。针对激光器简化三层平板结构,提出利用上盖层刻蚀低对比度光栅诱导出 Q 值高达 9.2×10^5 的准 BIC 模式,并发现激光腔中模式的 Q 值对有源层的厚度变化相比上盖层光栅刻蚀深度的变化更敏感,且下盖层的厚度变化使 Q 值被周期性增强,准 BIC 的 Q 值可以被增强到 9.66×10^6 。研究结果对光栅基的低阈值电注入面发射激光器的设计具有指导意义。

关键词: 激光器; 准连续域束缚态; 低对比度光栅; 品质因数; 阈值

中图分类号: TN243 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0627-05

Low-Contrast Grating Induced Quasi Bound State in the Continuum of Laser Cavity

FAN Ce^{1,3}, WANG Yufei^{1,2}, QU Jinxian¹, ZHENG Wanhua^{1,2,3,4}

(1. Laboratory of Solid-State Optoelectronics Information Technology, Institute of Semiconductors of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, CHN; 2. College of Future Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, CHN; 3. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN; 4. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, CHN)

Abstract: The bound state in the continuum (BIC) found in artificial microstructures such as photonic crystals is located above the light cone but not couples with the background leakage modes, and therefore it has an infinite Q factor, making lasers working at BICs or quasi-BICs have the advantage of low threshold. And low-contrast grating is often used in the mode modulation and out coupling of low-cost lasers. For the simplified three-layer slab structure of the lasers, it is proposed to induce a quasi-BIC with the Q factor of 9.2×10^5 by etching the low-contrast grating (LCG) in the top cladding layer. Besides, it is found the thickness of active layer is more sensitive to quasi-BIC lasers than the depth of etched LCG, and the Q factor can be maximized periodically up to 9.66×10^6 with the increase of the thickness of bottom cladding layer. The results are instructive to the design of grating-based low threshold electrically injected surface-emitting lasers.

Key words: lasers; quasi bound state in the continuum; low-contrast grating; Q factor; threshold

收稿日期: 2020-06-13.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0401804, 2016YFB0401003); 国家自然科学基金项目(91850206).

* 通信作者: 郑婉华 E-mail: whzheng@semi.ac.cn

0 引言

面发射激光器可广泛应用于成像、探测、传感、通信、原子钟等领域。其中传统的垂直腔面发射激光器(VCSEL)由于受到出光孔径和氧化孔径的限制,在单模工作下难以实现高功率输出^[1],且需要精确控制多对分布式布拉格反射镜(DBR)的材料生长,工艺复杂,限制了其应用。光子晶体面发射激光器最初源于日本的 Imada 组^[2],它依赖于带边模式的水平振荡垂直输出特性,输出功率较高,但由于需要用到晶片键合或二次外延方法制备,工艺也显复杂。郑婉华课题组^[3]曾提出一种侧向腔面发射激光器结构,采用小光子晶体区域的带边模共振辅之侧向的 FP 腔增强模式共振,也能达到较高的品质因数(Q 值),并获得了超低阈值电流密度激光。在工艺上可采用电子束曝光和 ICP 刻蚀或利用 FIB 技术在商用波导外延晶片上直接刻蚀光子晶体孔,相对降低了工艺复杂度和成本。传统激光器的发展趋于成熟,但是如何进一步简化工艺,降低器件阈值并提升性能仍需要探索新的途径。

连续域束缚态^[4](BIC)已经被证明可出现在光子晶体和谐振腔中,其虽处于光锥以上却不与泄漏模耦合,能完美局域。理想情况下 BIC 具有趋于无限高的 Q 值^[5],共振线宽几乎消失,已被用于非线性效应增强^[6]、传感^[7]和激光器^[8-9]中,是当前光场调控的一个研究热点。2017 年 UCSD 的 Kodigala 课题组^[8]报道了基于光泵柱状纳米共振器阵列的工作于 Γ 点处共振俘获态的 BIC 激光器。2018 年 Ha 等^[9]基于光泵有源介质纳米天线阵列,通过调整阵列一个维度上的周期打开辐射通道,实现了另一维度的对称保护 BIC 激射。BIC 天然的高 Q 值特性使得这些面发射激光器都获得了很小的激射阈值。

光栅是一种光子晶体结构,波导型光栅可以起到模式分布反馈的作用,可用于滤波和激光器选模。高对比度光栅(HCG)^[10-11]是一种与周围环境具有大折射率对比的一维平面光子晶体。而当光栅脊与折射率相同或相近的材料匹配,交界面不存在局部反射和相变时,则被称作低对比度光栅(LCG)^[12]。高对比度光栅和低对比度光栅均可提供较高的反射率,因此可用于在 VCSEL 中替代 DBR 对,或单独作为宽带反射器等。光栅基的 VCSEL 由于对角度更敏感,可以在较大的氧化孔径下实现单模工作,这是因为高阶模具有较大的横向角,反射系数比基模

要低^[13]。而低对比度光栅的模式选择性、稳定性则比高对比度光栅更好,因此可以实现更大的氧化孔径和输出功率^[14]。Sadrieva 等^[15]首次报道了基于 SOI(Silicon-on-Insulator)结构的高对比度 Si 光栅中支持的 BIC 会受到衬底 Si 的影响而转化为共振态。本文创新性地利用激光器简化三层平板结构中上盖层刻蚀低对比度光栅诱导出准 BIC,并首次发现下盖层的厚度变化可以显著增强其 Q 值,将有助于激光器阈值的降低,对设计低阈值的电注入面发射激光器具有指导意义。

1 刻蚀 LCG 的简化三层平板激光器结构

简化的三层平板激光器结构如图 1 所示,上盖层、有源层和下盖层的厚度分别为 t_1 , t_2 和 t_3 ,其中 $t_1=1.8\text{ }\mu\text{m}$,对应的折射率分别为 $n_1=3.152\text{ }9$, $n_2=3.282\text{ }7$ 和 $n_3=3.168\text{ }1$,上盖层刻蚀低对比度光栅的周期 $a=0.54\text{ }\mu\text{m}$,空气槽宽 $b=0.3\text{ }\mu\text{m}$,深度为 d 。一定电流注入下,有源区产生的光扩散至上下盖层,上盖层的光受到表面光栅的模式调制,而向下泄漏的光受到下盖层底部电极的反射。一定数量的光栅周期后,沿 x 方向的腔面将镀高反膜,以阻止光在水平面内的泄漏。

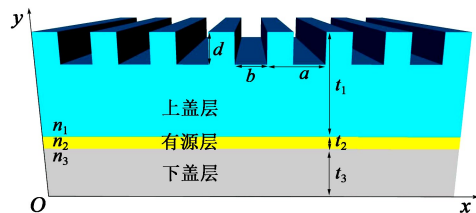


图 1 简化三层平板激光器结构

2 模拟与分析

对于上述结构,本着由简单到复杂、抓住主要因素的原则,在保持光自有源层以平面波形式向上入射以及上述具体参数不变的前提下,采用周期边界条件,利用时域有限差分(FDTD)方法进行计算,并依次从上盖层低对比度光栅刻蚀深度、有源层厚度以及下盖层厚度等变量来对器件进行设计和优化。

2.1 上盖层刻蚀低对比光栅诱导出准 BIC

在不包含有源层和下盖层且光垂直入射的情况下,对上盖层的低对比度光栅的刻蚀深度与透射谱关系进行了计算。如图 2 所示,黑色箭头所指的黑色圆圈所在的不随刻蚀深度变化的透射带为 0 级衍

射。考察刻蚀深度在 $0.30585\sim0.30705\text{ }\mu\text{m}$ 、波长在 $0.5655\sim0.5660\text{ }\mu\text{m}$ 范围内变化时结构透射率的变化。随着刻蚀深度逐渐增加 1.2 nm ，透射谱的变化。随着刻蚀深度逐渐增加 1.2 nm ，透射谱的 Fano 共振线型的对称性经历了由正到负的变化，中间有一个 Lorentz 线型的透射谷的过渡，如图 3 所示。对应刻蚀深度 $d=0.30645\text{ }\mu\text{m}$ 和波长 $\lambda=0.56576\text{ }\mu\text{m}$ 的共振谱计算得到的 Q 值为 9.2×10^5 ，高于这个刻蚀深度附近所有的 Fano 共振的 Q 值，虽没有达到理想 BIC 的无限 Q 值(主要是由于波导光栅垂直方向的非对称使得消逝场向衍射波或导波变换)，但随刻蚀深度变化符合 BIC 的 Q 值变化趋势，因此认为 Lorentz 线型的透射谷对应准 BIC^[16] 的定义范畴。

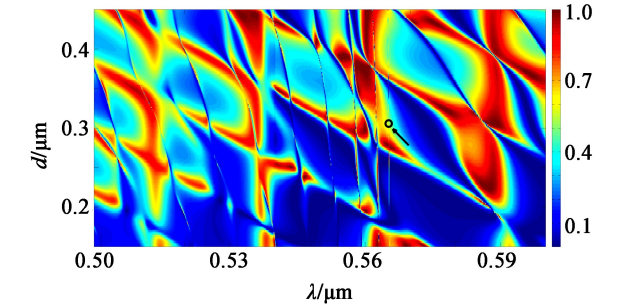


图 2 上盖层的低对比度光栅的刻蚀深度对透射谱的影响

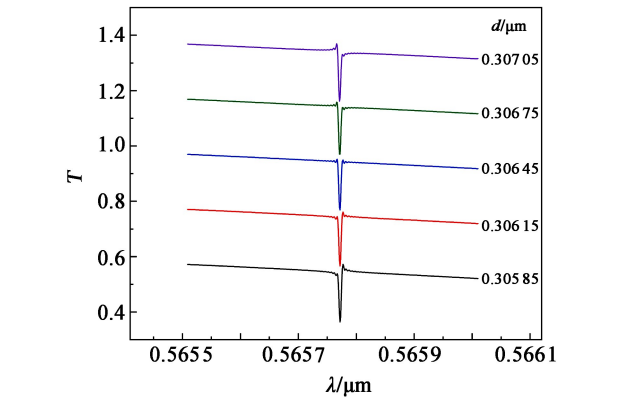


图 3 Fano 共振谱随图 2 标注处附近一系列 LCG 刻蚀深度的变化

图 4 给出了准 BIC 在上盖层中的模场分布，可见光的共振在结构中约束得很好，虽然有一定的本底泄漏(非完全干涉导致)，但是并不影响准 BIC 特性在结构中引起的场局域和增强效应。

同时给出了 LCG 刻蚀深度变化对模式 Q 值的影响，如图 5 所示。可以看出，在刻蚀深度 $0.30645\text{ }\mu\text{m}$ 附近仅变化 90 nm ， Q 值剧烈下降了一个数量级，模式由准 BIC 过渡到 Fano 共振模。在刻蚀深度 d 为 0.261 和 $0.351\text{ }\mu\text{m}$ 处，对应的 Q 值

分别仅为 22005.7 和 31212.5 。而在 1.5 nm 的刻蚀深度变化范围， Q 值也呈抛物线型的下降趋势，如图 6，但始终保持刻蚀深度 $0.30645\text{ }\mu\text{m}$ 对应的准 BIC 的 Q 值最高，即保持了 BIC 的高 Q 特性。

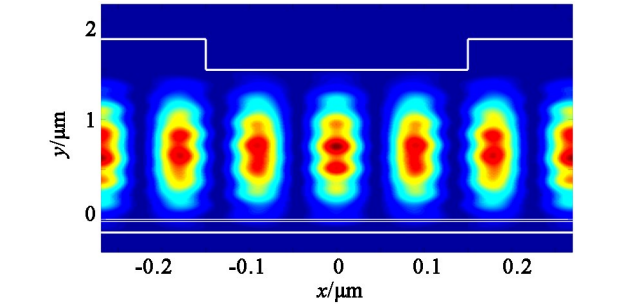


图 4 准 BIC 在上盖层中的模场分布，细线为光栅单元结构轮廓

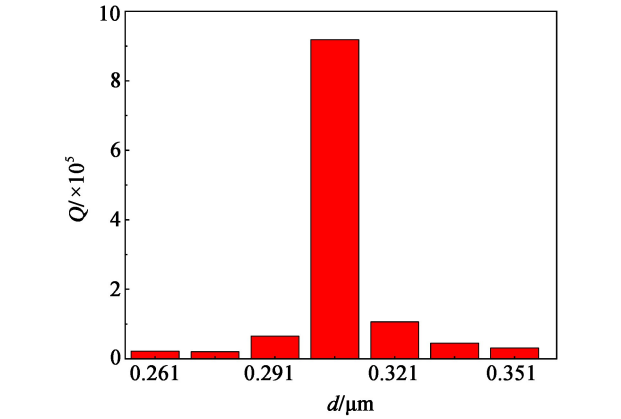


图 5 LCG 刻蚀深度变化 90 nm 对模式 Q 值的影响

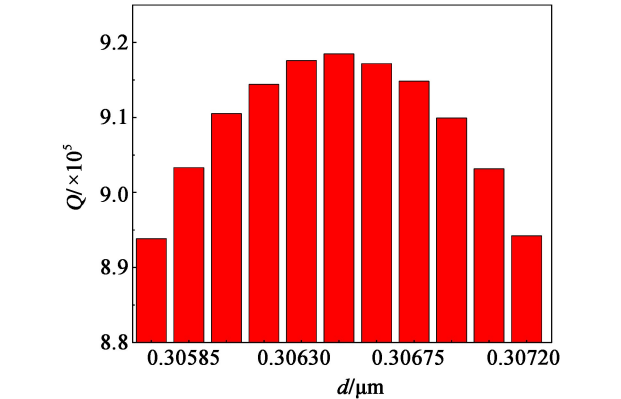


图 6 LCG 刻蚀深度变化 1.5 nm 对模式 Q 值的影响

2.2 中间有源层厚度设计和分析

进一步考察引入有源层后其厚度对模式 Q 值的影响。有源层的折射率高于上盖层，因此对模场的分布起到牵引作用，使得原来在上盖层中约束较好的准 BIC 能量向有源层扩散，逐渐转换为 Fano 共振，导致 Q 值下降。

由图 7 可以看出，有源层的引入导致的 Q 值下

降程度要比光栅的刻蚀深度引起的 Q 值下降程度大。有源层厚度增加到 18 nm 就使 Q 值下降到 12 789.6,而引起同样程度的变化需要的光栅刻蚀深度的变化则需要大于 45 nm。因此,相对于上盖层 LCG 的刻蚀深度,我们讨论的准 BIC 激光器对有源层的厚度更敏感,其厚度设计也显得更为重要。

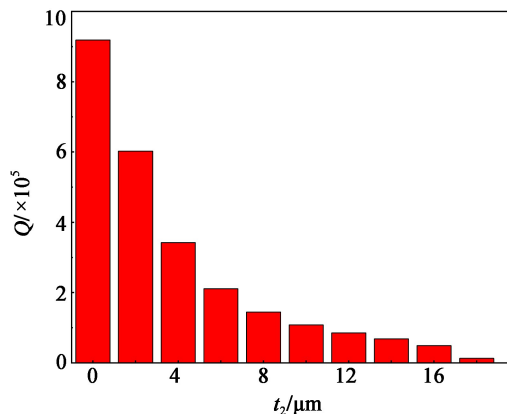


图 7 中间有源层厚度变化对模式 Q 值的影响

2.3 下盖层厚度的优化和分析

在引入中间有源层的基础上,进一步考察简化三层平板激光器结构的下盖层对准 BIC 的影响,下盖层底部可依靠电极提供光反射。有源区产生的光扩散至上下盖层,上盖层的光受到 LCG 的模式调制,而向下泄漏的光受到底部电极的反射,与上盖层调制的模式继续相互作用,水平和垂直方向的共振效应形成驻波场分布,当上表面因光的相干作用导致衍射通道关闭时,工作模式的 Q 值达到极大。

如图 8 所示,在特定的下盖层厚度下, Q 值会超出单独刻蚀低对比度光栅的上盖层的 Q 值以及引入有源层后的 Q 值,并被逐步增强。如在下盖层厚度为 0.11 μm 时准 BIC 的 Q 值 1 约达到 8×10^5 ,厚度增加 120 nm 后达到 0.23 μm 时准 BIC 的 Q 值 2 约达到 2.29×10^6 ,在厚度增加 115 nm~0.345 μm 后 Q 值出现另外一个峰值 3,继续上升到 6.94×10^6 ,厚度再增加 115 nm~0.46 μm 时, Q 值 4 达到下盖层厚度变化 480 μm 范围内的最大值 9.66×10^6 。下盖层厚度改变导致 Q 值出现周期性的极大值,并逐渐增加,周期约为 115 nm,由此可判断垂直方向的 FP 振荡随厚度变化引起的相位积累使得泄漏光进一步干涉相消。图 8 中插图四个下盖层厚度对应的高 Q 准 BIC 的电场强度分布,证实了垂直方向的 FP 振荡辅助增强了准 BIC 场。除了 Q 值外,图 9 显示下盖层厚度变化对模式波长 λ_p 的影

响,即使厚度增加到 480 μm ,波长变化仍小于 1.6 nm。

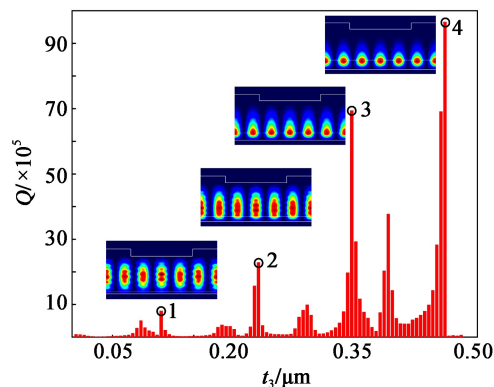


图 8 下盖层的厚度 t_3 变化对模式 Q 值的影响

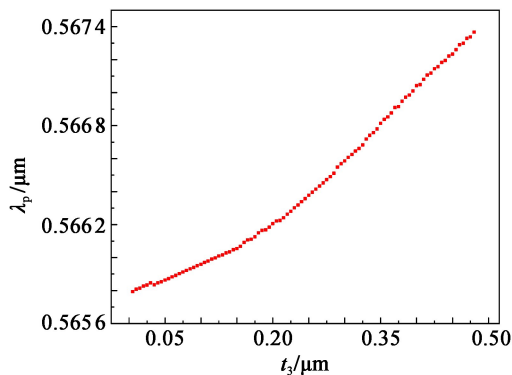


图 9 下盖层的厚度变化引起模式波长的移动

3 结论

利用激光器简化三层平板结构中上盖层刻蚀低对比度光栅诱导出了准 BIC,并发现了相对于上盖层 LCG 的刻蚀深度,本文讨论的准 BIC 激光器对有源层的厚度更敏感,且下盖层的厚度变化可以周期性地显著增强准 BIC 的 Q 值,这将有助于激光器阈值的降低。研究结果对低阈值电注入面发射激光器的设计具有指导意义。

参考文献:

- [1] Liu Anjin, Xing Mingxin, Qu Hongwei, et al. Reduced divergence angle of photonic crystal vertical-cavity surface-emitting laser[J]. Appl. Phys. Lett., 2009, 94(19): 13-15.
- [2] Imada M, Noda S, Chutinan A, et al. Coherent two-dimensional lasing action in surface-emitting laser with triangular-lattice photonic crystal structure[J]. Appl. Phys. Lett., 1999, 75(3): 316-318.
- [3] Zheng Wanhua, Zhou Wenjun, Wang Yufei, et al. Lateral cavity photonic crystal surface-emitting laser with ultralow threshold[J]. Opt. Lett., 2011, 36(21): 4140-4142.
- [4] Hsu C W, Zhen B, Stone A D, et al. Bound states in the

continuum[J]. Nature Reviews Materials, 2016, 1(9): 16048.

[5] Hsu C W, Zhen B, Lee J, et al. Observation of trapped light within the radiation continuum[C]// Frontiers in Optics 2013 Postdeadline, 2013; FW6B.7.

[6] Carletti L, Koshelev K, De Angelis C, et al. Giant nonlinear response at the nanoscale driven by bound states in the continuum[J]. Phys. Rev. Lett., 2018, 121(3): 033903.

[7] Liu Yonghao, Zhou Weidong, Sun Yuze. Optical refractive index sensing based on high-Q bound states in the continuum in free-space coupled photonic crystal slabs[J]. Sensors, 2017, 17(8): 1861.

[8] Kodigala A, Lepetit T, Gu Q, et al. Lasing action from photonic bound states in continuum[J]. Nature, 2017, 541(7636): 196-199.

[9] Ha S T, Fu Y H, Emani N K, et al. Directional lasing in resonant semiconductor nanoantenna arrays [J]. Nature Nanotechnol., 2018, 13(11): 1042-1047.

[10] Qiao Pengfei, Yang Weijian, Chang-Hasnain C J. Recent advances in high-contrast metastructures, metasurfaces and photonic crystals[J]. Advances in Optics and Photonics, 2018, 10(1): 180.

[11] Overvig A C, Shrestha S, Yu N F. Dimerized high contrast gratings[J]. Nanophotonics, 2018, 7(6): 1157-1168.

[12] Magnusson R. Wideband reflectors with zero-contrast gratings[J]. Opt. Lett., 2014, 39(15): 4337.

[13] Inoue S, Kashino J, Matsutani A, et al. Highly angular dependent high-contrast grating mirror and its application for transverse-mode control of VCSELs[J]. Jap. J. of Appl. Phys., 2014, 53(9): 090306.

[14] Liu Anjin, Zheng Wanhua, Bimberg D. Comparison between high- and zero-contrast gratings as VCSEL mirrors [J]. Optics Commun., 2017, 389: 35-41.

[15] Sadrieva Z F, Sinev I S, Koshelev K L, et al. Transition from optical bound states in the continuum to leaky resonances: Role of substrate and roughness [J]. ACS Photonics, 2017, 4(4): 723-727.

[16] Rybin M V, Koshelev K L, Sadrieva Z F, et al. High-Q supercavity modes in subwavelength dielectric resonators[J]. Phys. Rev. Lett., 2017, 119(24): 243901.

作者简介:

范 策(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为光子晶体无源器件及微纳结构光场调控;

郑婉华(1966—),女,研究员,博士生导师,主要研究方向包括光子晶体光量子调控,新型光子晶体有源、无源器件,基于光子晶体的光子集成芯片,以及新型光子超材料微腔激光器等。

=====

(上接第 617 页)

[39] Ng R, Levoy M, Bredif M, et al. Light field photography with a hand-held plenoptic camera [EB/OL]. <https://graphics.stanford.edu/papers/lfcamera/lfcamera-150dpi.pdf>.

[40] Ng R. Digital light field photography [D]. Stanford: Stanford University, 2006.

[41] Levoy M, Ng R, Adams A, et al. Light field microscopy [J]. ACM Trans. on Graphics (TOG), 2006, 25(3): 924-934.

[42] Lumsdaine A, Georgiev T. The focused plenoptic camera [C]//Proc. of the IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP'09), 2009: 1-8.

[43] Perwass C, Wietzke L. Single lens 3D-camera with extended depth-of-field [C]//Proc. of the SPIE Conference on Electronic Imaging (SPIE'12), 2012: 22-26.

[44] Bishop T E, Favaro P. The light field camera: Extended depth of field, aliasing and superresolution[J]. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 2012, 34(5): 972-986.

[45] Wanner S, Goldluecke B. Globally consistent depth labeling of 4D lightfields[C]//Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'12), 2012: 41-48.

[46] Shroff S A, Berkner K. Image formation analysis and high resolution image reconstruction for plenoptic imaging systems [J]. Appl. Opt., 2013, 52: D22-D31.

[47] Broxton M, Grosenick L, Yang S, et al. Wave optics theory and 3-D deconvolution for the light field microscope[J]. Opt. Express, 2013, 21(21): 25418-25439.

[48] Nava P F, Luke J P. Simultaneous estimation of superresolved depth and all-in-focus images from a plenoptic camera[C]//Proc. of the 3DTV Conference: The True Vision-Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV'09), 2009: 1-4.

[49] Georgiev T, Chunev G, Lumsdaine A. Superresolution with the focused plenoptic camera[C]//Proc. of the SPIE Conf. on Computational Imaging (SPIE'11), 2011, 7873: 1105-1117.

[50] Yu Z, Yu J, Lumsdaine A, et al. An analysis of color demosaicing in plenoptic cameras[C]//Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'12), 2012: 901-908.

[51] Liang Chia-Kai, Ramamoorthi R. A light transport framework for lenslet light field cameras[J]. ACM Trans. on Graphics, 2015, 34(2): article 16.

作者简介:

乌李瑛(1983—),女,2011 年获西安交通大学凝聚态物理专业理学博士学位,助理研究员,主要研究方向是薄膜生长技术和纳米器件。

氧化石墨烯修饰的色散拐点长周期 光纤光栅的折射率传感特性

赵明富¹, 王鑫¹, 罗彬彬^{1*}, 石胜辉¹, 刘志江¹, 聂青林¹, 巫涛江²

(1. 重庆理工大学 光纤传感与光电检测重庆市重点实验室, 重庆 400054; 2. 重庆能源职业学院, 重庆 402247)

摘要: 研究了氧化石墨烯(Graphene Oxide, GO)修饰的色散拐点长周期光纤光栅(Dispersion-Turning-Point Long Period Fiber Grating, DTP-LPFG)传感器, 分析了其光谱特性及对外部折射率的灵敏度特性。利用准连续 KrF 激光器在载氢单模石英光纤上制作周期约为 136 μm 的 DTP-LPFG, 采用氢键结合的方式将 GO 涂覆于光栅表面, 构成基于 GO 修饰的 DTP-LPFG 传感器。实验结果表明: 随着 GO 在 DTP-LPFG 表面的沉积, 其双谐振峰的左峰发生蓝移, 右峰发生红移, 双峰间距增大; 在 1.33~1.38 折射率范围内, 该传感器在涂覆 GO 后, 谐振双峰间距变化量的折射率灵敏度约为 831.89 nm/RIU, 较未修饰 GO 的 DTP-LPFG 提高了 1.05 倍。

关键词: 光纤传感; 色散拐点长周期光纤光栅; 氧化石墨烯; 折射率灵敏度

中图分类号: TN253 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0632-06

Refractive Index Sensing Characteristics of Dispersion-Turning-Point Long Period Fiber Grating Functionalized with Graphite Oxide

ZHAO Mingfu¹, WANG Xin¹, LUO Binbin¹, SHI Shenghui¹,

LIU Zhijiang¹, NIE Qinglin¹, WU Taojiang²

(1. Chongqing Key Laboratory Optical Fiber Sensor and Photoelectric Detection, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054; 2. Chongqing Energy College, Chongqing 402247, CHN)

Abstract: The optical sensor based on dispersion-turning-point long period fiber grating (DTP-LPFG) modified by graphene oxide (GO) was investigated, and its spectral characteristics and sensitivity to external refractive index (RI) were analyzed. The DTP-LPFG with a period of about 136 μm was fabricated by using a quasi-continuous KrF laser in a hydrogen loaded single-mode fiber. GO was fixed on the grating surface by hydrogen bonding to form a GO functionalized DTP-LPFG sensor. The experimental results show that there are a blue-shift and a red-shift of the resonant bands at the lower and higher wavelengths, respectively, and the wavelength separation between the dual peaks increases with the deposition of GO on the surface of the DTP-LPFG. The sensitivity of the resonance bimodal spacing variation of the GO coated DTP-LPFG sensor is about 831.89 nm/RIU in the RI range of 1.33~1.38, which is 1.05 times higher than that of the uncoated one.

Key words: optical fiber sensing; dispersion-turning-point long period fiber grating; graphene oxide; refractive index

收稿日期: 2020-02-20.

基金项目: 重庆市科委前沿与基础项目(cstc2019jcyj-msxmX0093); 重庆市教委科技重点项目(KJZD-K201905601); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201801121); 重庆理工大学研究生创新基金项目(ycx20192048, ycx20192046).

* 通信作者: 罗彬彬 E-mail: luobinbin@cqut.edu.cn

0 引言

长周期光纤光栅(Long-Period Fiber Grating, LPFG)由于其抗外部电磁干扰能力、对恶劣环境的良好抵抗能力和实时远程检测能力,已经在众多领域得到广泛研究与应用,如温度^[1]、应变^[2]、气体^[3]、生化检测^[4]等。LPFG 是一种光纤纤芯折射率受到轴向周期为数百微米调制而构成的无源光纤器件^[5],但是普通 LPFG 的折射率灵敏度较低,且存在较大的温度和应力的交叉敏感效应。目前主要通过减小包层直径^[6]、使 LPFG 工作在相位匹配转折点(PMTP)附近^[7]以及涂敷纳米薄膜^[8]等方式来提高其折射率灵敏度。

与普通 LPFG 相比,色散拐点长周期光纤光栅(Dispersion-Turning-Point Long Period Fiber Grating, DTP-LPFG)具有更高的灵敏度。DTP-LPFG 的色散拐点附近具有两个谐振峰,当外界参数发生改变时,双谐振峰会呈现相反的波长漂移特性。舒学文等^[9]最早通过研究 B/Ge 共掺杂的 LPFG 提出了色散特性的理论,并且研究了 LPFG 的基模和高阶包层模耦合的双峰谐振现象,对其折射率灵敏度响应进行了理论研究,发现随着蔗糖溶液浓度的增大(即外界折射率增加),DTP-LPFG 的两个谐振峰向相反方向移动,在折射率为 1.33~1.44 范围内,双峰间距变化量的灵敏度达到 2 081 nm/RIU,相对于基模与低阶包层模耦合的 LPFG 对外界环境折射率的响应,该灵敏度提高了两个数量级。Biswas 等^[10]通过调谐工作在 DTP 处的包层模耦合强度,获得了高灵敏度 DTP-LPFG 的折射率传感器,在 1.335~1.360 区间,其折射率灵敏度为 1 847 nm/RIU。通过在 DTP-LPFG 外涂覆高折射率纳米薄膜使其包层模式位于模式转换区,可以进一步提高其对外界环境折射率的灵敏度,同时也可以扩展 DTP-LPFG 的折射率传感范围,解决普通 LPFG 仅对环境折射率略低于包层折射率时才敏感的限制^[11]。氧化石墨烯(GO)作为石墨烯衍生物,不仅具有大比表面积、卓越的电学/光学性质和良好的生物相容性^[12],还含有包括羟基、羧基、羰基在内的多种含氧官能团。Jiang 等^[13]通过在大角度光纤光栅上涂覆 GO 获得了高性能相对湿度(RH)传感器,GO 沉积的大角度光纤光栅在 30%~80% RH 的范围内呈现出 18.5 pm/%RH 和 0.027 dB/%RH 的响应灵敏度,通过监视人的不

同频率呼吸,得出传感器约在 42 ms 内显示出超快响应。Arasu 等^[14]在已涂敷金纳米颗粒的光纤 Bragg 光栅(FBG)上涂敷 GO,其响应速度比未涂敷 GO 的光栅提高了 2.5 倍。Liu 等^[15]在普通 LPFG 上涂敷 GO,将其用作光学生物传感器来检测人类血红蛋白,灵敏度达 1.9 dB/(mg/mL)。

然而,目前国内外学者对基于氧化石墨烯修饰色散拐点长周期光纤光栅(GO-DTP-LPFG)的研究主要集中在应用方面,对其传感特性的研究和分析较少。本文针对 GO-DTP-LPFG 的光谱特性和折射率特性进行研究:首先从理论上分析 GO-DTP-LPFG 的折射率传感特性,使用氢氧化钠溶液对 DTP-LPFG 表面进行羟基化处理,与 GO 表面的羧基基团通过氢键稳定地固定在 DTP-LPFG 表面;然后通过场发射扫描电子显微镜对光纤的表面形貌进行表征,对 GO 涂敷 DTP-LPFG 传感器的光谱特性和折射率传感特性进行实验研究。

1 基本原理

LPFG 的结构使得纤芯基模耦合到多个同向传输传播包层模,包层模的衰减导致光纤传输光谱中出现一系列损耗峰,其基模与一阶 m 次包层模的耦合波长满足相位匹配条件^[16]:

$$\lambda_{\text{res}} = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})\Lambda \quad (1)$$

式中, λ_{res} 为谐振峰中心波长, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$, $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 分别为光纤纤芯基模和 m 次包层模的有效折射率, Λ 为 LPFG 周期。谐振波长与光栅周期的关系曲线称为相位匹配曲线,对于较大的光栅周期($\Lambda > 300 \mu\text{m}$),基模与低次包层模耦合;对于较小的光栅周期($80 \mu\text{m} < \Lambda < 300 \mu\text{m}$),基模与高次模耦合,且基模与某个高次包层模的耦合出现两个波长不同的谐振峰,该光栅被称为 DTP-LPFG^[17]。

在周围介质折射率发生变化的情况下,可以通过式(2)描述 LPFG 谐振波长的漂移^[18]:

$$\frac{d\lambda_{\text{res}}^m}{dn_{\text{sur}}} = -\lambda_{\text{res}}^m \cdot \frac{(d\lambda_{\text{res}}^m/d\Lambda)}{n_{\text{eff}}^{\text{cl},m} - n_{\text{eff}}^{\text{co}}} \cdot \frac{u_m^2 \lambda_{\text{res}}^m n_{\text{sur}}}{8\pi r_{\text{cl}}^3 (n_{\text{eff}}^{\text{cl},m} - n_{\text{eff}}^{\text{co}})(n_{\text{cl}}^2 - n_{\text{sur}}^2)^{3/2}} \quad (2)$$

其中, u_m 是第一类零阶贝塞尔函数的第 m 个根, n_{sur} 为周围介质折射率, r_{cl} 为 LPFG 包层半径。当 Λ 足够小时,由于相位匹配曲线中存在转折点,可在匹配曲线转折点两侧将两个不连续的谐振波长耦合

到相同的包层模式,从而导致出现双谐振峰^[18]。对于 DTP-LPFG,在 $\frac{d\lambda_{\text{res}}}{d\Lambda} > 0$ (即左谐振峰 λ_L) 区域,随着折射率的增加,DTP-LPFG 的左谐振峰会发生蓝移;在 $\frac{d\lambda_{\text{res}}}{d\Lambda} < 0$ (即右谐振峰 λ_R) 区域,随着折射率的增加,DTP-LPFG 的右谐振峰会发生红移;而当其处于色散拐点附近时, $\left| \frac{d\lambda_{\text{res}}^m}{d\Lambda} \right| \rightarrow \infty$,光栅对外部环境非常敏感^[19]。

2 实验与系统

2.1 DTP-LPFG 的制作和表面修饰

利用准连续 KrF 激光器(波长为 248 nm)和扫描掩模技术在石英单模光纤(SMF-28)内写入光栅。首先对光纤进行载氢处理,以增强掺锗纤芯的光敏性。来自准连续高重频 KrF 激光器的激光束由两个正交柱透镜聚焦。整个刻栅过程中,光纤位于连续移动线性位移平台,通过调整光开关的频率和电动位移台移动的速度来确定该 DTP-LPFG 的周期。DTP-LPFG 制作完成后,将其放置在 80 ℃ 的环境中进行约 24 h 退火处理,以确保 DTP-LPFG 具有稳定的光谱特性。所制得的 DTP-LPFG 周期约为 136 μm,长度约为 19 mm,其置于水中的光谱如图 1 所示。

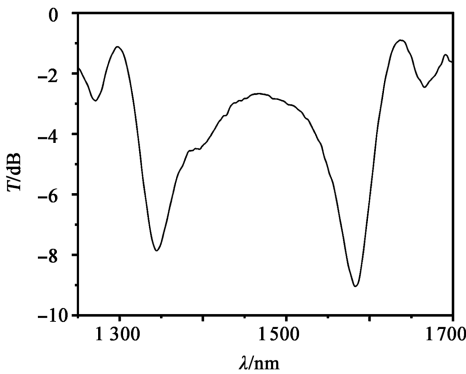


图1 DTP-LPFG 置于水中的光谱图

由图 1 可见,该 DTP-LPFG 的左右谐振峰分别位于约 1 344.21 和 1 582.057 5 nm 处,其损耗峰强度分别约为 7.896 1 和 9.055 8 dB,3 dB 带宽分别约为 25.57 和 46.69 nm,双峰间距约为 237.847 5 nm。

在光纤表面处理过程中,所用化学试剂均为分析纯,使用的工作液均通过灭菌的去离子水配制。氧化石墨烯溶液(浓度 2 mg/mL)购自南京先丰纳

米材料科技有限公司。其他试剂包括:氢氟酸溶液(浓度 40 %)、氢氧化钠溶液(NaOH,纯度 99 %)、稀硝酸溶液(HNO₃,浓度 5 %)、无水乙醇(C₂H₆O,纯度 99 %)等。

DTP-LPFG 的表面修饰过程如图 2 所示,具体步骤如下:首先,使用浓度为 5 % 的 HNO₃ 溶液浸泡光栅 2 h,再用超纯水和无水乙醇彻底清洗。然后,在 40 ℃ 的恒温箱内,将该 DTP-LPFG 浸入 0.2 M 的 NaOH 溶液约 3.5 h,再于室温下继续浸泡 0.5 h,以激活 DTP-LPFG 表面的一 OH 基团,用超纯水反复冲洗光栅表面,去除多余杂质,再置于 50 ℃ 的对流烘干机中干燥 10 min。最后,用浓度为 2 mg/mL 的 GO 溶液在室温下浸泡 DTP-LPFG 传感器 12 h 后,用超纯水和无水乙醇反复冲洗其表面,除去未结合的 GO,最终得到 GO-DTP-LPFG 传感器。

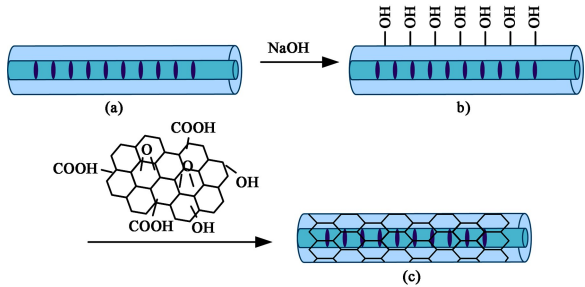


图2 DTP-LPFG 表面修饰过程

2.2 实验系统

图 3 是用于监测 GO-DTP-LPFG 传感器的传输光谱实验系统。光从超连续谱光源(SC-5,480 ~ 2 200 nm,总输出功率 800 mW)输出,并经过衰减器将光源能量衰减至输出功率的 80 %,这样既可以保证光谱的稳定性,同时也可以防止对光路的损坏。然后,光通过光纤隔离器后,传输至 GO-DTP-LPFG 传感器。最后,通过单模光纤连接到光谱仪(OSA,MS9740A,分辨率为 0.03 nm)记录光谱变化。实验过程中,必须要保持 GO-DTP-LPFG 的自由水平状态,实验室温度保持恒定(25 ℃),以避免应变和温度引起的传感器交叉敏感效应带来的折射率检测误差。

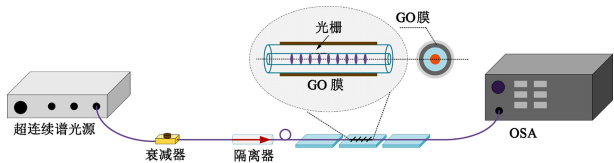


图3 实验系统图

3 结果与讨论

3.1 DTP-LPFG 表面的表征及光谱特性

利用场发射扫描电子显微镜 (FESEM, ZEISS SIGMA HD) 对 GO 修饰后的 DTP-LPFG 表面形貌进行表征,结果如图 4 所示。由图 4(a)可见,GO 薄膜能够比较均匀地沉积在光栅表面,但存在褶皱,从热力学的角度而言,褶皱的存在可降低 GO 材料的表面能,从而维持其附着在光栅表面的稳定性^[20]。图 4(b)为沉积 GO 后光纤表面的能谱图,可知光纤表面沉积 GO 后主要存在 C, O, Si 三种元素,其中 C 元素和部分 O 元素是来自光纤表面的 GO,而 Si 元素和部分 O 元素来自光纤包层的材料 SiO₂。这些结果均为 GO 在光纤表面的固定效果提供了较好的依据,同时也证明在 DTP-LPFG 表面已附着一层比较均匀的 GO 薄膜。

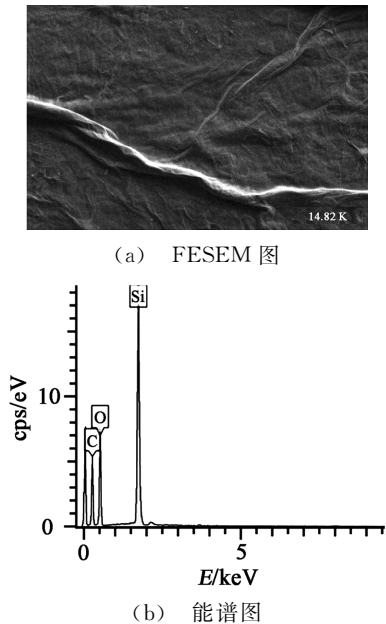


图 4 GO-DTP-LPFG 的表面形貌及能谱图

利用图 3 所示实验装置监测 DTP-LPFG 传感器表面修饰过程的光谱变化,并分析 DTP-LPFG 谐振双峰的间距变化量,结果如图 5 所示。由图 5(a)可知,GO 修饰后 DTP-LPFG 的谐振光谱发生漂移,左谐振峰发生蓝移,右谐振峰发生红移,谐振双峰的间距增加。经过羟基化和表面 GO 修饰等步骤,GO-DTP-LPFG 传感器双峰间距的变化量分别约为 2.502 5 和 5.967 5 nm,结果如图 5(b)所示。这是由于随着光栅表面修饰物层数的增加,DTP-LPFG 包层模的有效折射率将会增大,结合式(2)分

析可知,其双谐振峰的左峰会发生蓝移,而右峰会发生红移,从而导致谐振双峰之间的间距增加。此外,由图 5(a)可见,在光栅表面羟基化和修饰 GO 后,光谱的耦合强度将会增强。这是由于 GO 材料复折射率的虚部表示其对光的吸收特性^[20],在光栅表面修饰 GO 后,由于 GO 材料在可见-近红外波段有较强的消光特性^[21],增加了传输过程中的光损失,导致 DTP-LPFG 的传输损耗增加,谐振峰强度增强。综上可知,实验结果与理论预期一致。

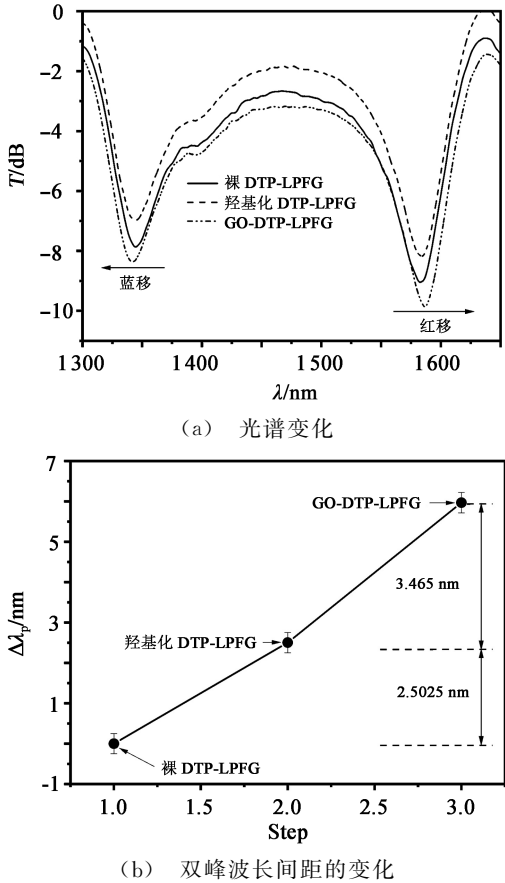


图 5 GO-DTP-LPFG 传感器表面修饰过程

3.2 GO-DTP-LPFG 的折射率响应特性

采用图 3 所示实验系统,将 GO 修饰之前和之后的 DTP-LPFG 于室温(25 ℃)下分别浸入不同折射率的 NaCl 溶液中,以光谱仪观测光栅的透射光谱变化,结果如图 6 所示。从图中可以看出,随着折射率的增加,DTP-LPFG 的左谐振峰发生蓝移,右谐振峰发生红移,谐振双峰的间距增加。这是因为当折射率增大,包层有效折射率随之增大,而纤芯基模的有效折射率基本保持不变,结合式(2)可知,在 DTP-LPFG 左谐振峰区域,DTP-LPFG 随折射率变化呈负相关,故其左谐振峰发生蓝移;同理可得,当

折射率增大,其右谐振峰将发生红移。因此,综合效果导致谐振双峰间距的增加。但是修饰 GO 后,DTP-LPFG 的谐振波长变化量较未修饰 GO 的光栅有所增大,这是因为 GO 沉积在光栅表面之后,增强了包层与周围介质之间的光-物质相互作用,从而提高了 GO-DTP-LPFG 谐振波长的折射率灵敏度。

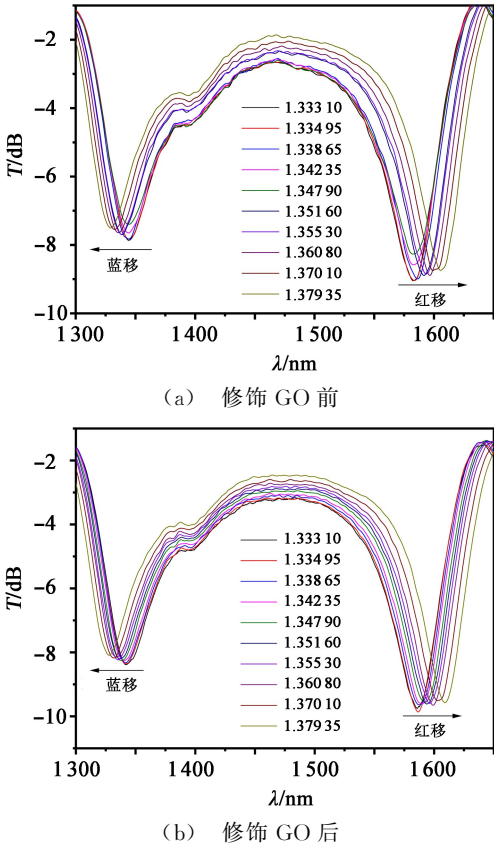


图 6 DTP-LPFG 修饰前后光谱随 NaCl 溶液折射率变化关系曲线

图 7 给出了 DTP-LPFG 表面采用 GO 修饰前后与图 6 对应的谐振双峰波长及间距随折射率的变化数据。通过分析和计算可得,在折射率为 1.33~1.38 的范围,未修饰 GO 的 DTP-LPFG 左谐振峰、右谐振峰和谐振双峰间距的波长变化量分别约为 13.997 5,22.907 5 和 36.905 nm,对应的谐振波长灵敏度分别为-306.77,489.25 和 796.02 nm/RIU;而修饰 GO 后,DTP-LPFG 左谐振峰、右谐振峰和谐振双峰间距的波长变化量分别约为 14.987 5,23.43 和 38.417 5 nm,其对应的谐振波长灵敏度分别约为-331.49,500.40 和 831.89 nm/RIU。较未修饰 GO 的 DTP-LPFG 谐振波长灵敏度分别提高了 1.08,1.02 和 1.05 倍,与普通 LPFG 的折射率灵敏度(约 20 nm/RIU^[22])相比,约提高了 40 倍。

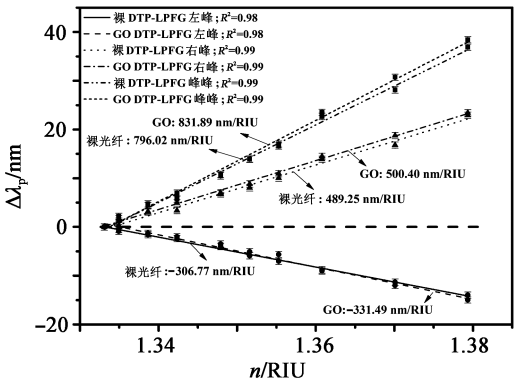


图 7 涂覆 GO 前后 DTP-LPFG 的折射率灵敏度变化

尽管表面修饰 GO 对 DTP-LPFG 的谐振波长折射率灵敏度提升效果并不明显,但由于 GO 材料本身的优势,即表面丰富的含氧官能团、优良的亲水性和生物相容性等,同时结合 DTP-LPFG 本身高折射率灵敏度的优良性能,使其成为光纤光栅生物化学传感研究的热点。

4 结论

本文实验研究了修饰 GO 的 DTP-LPFG 传感器的光谱特性和折射率灵敏度,并进行了相应的理论分析。结果表明,随着外界折射率的增加,DTP-LPFG 传感器的谐振峰向相反方向漂移,双峰间距增加。随着 GO 在 DTP-LPFG 表面的沉积,其双峰间距增大,折射率灵敏度进一步提高。在 1.33~1.38 折射率范围内,GO-DTP-LPFG 的折射率灵敏度为 831.89 nm/RIU,较未修饰 GO 的 DTP-LPFG 提高了 1.05 倍,与标准 LPFG 的折射率灵敏度(约 20 nm/RIU)相比,约提高了 40 倍。该 GO-DTP-LPFG 传感器具有良好的亲水性和生物相容性,同时表面含有丰富的含氧官能团,使其易于进行表面功能化,在生物化学传感领域具有较大的应用潜力。本文研究对于 GO-DTP-LPFG 的生物传感应用具有一定的指导意义。

参考文献:

[1] Subramanian R, Zhu C, Zhao H, et al. Torsion, strain and temperature sensor based on helical long-period fiber gratings [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2018, 30(4): 327-330.

[2] 石胜辉, 赵明富, 罗彬彬, 等. 扭转螺旋型力学微弯长周期光纤光栅光谱特性研究[J]. 光学精密工程, 2017, 25(7): 1771-1776.

Shi Shenghui, Zhao Mingfu, Luo Binbin. Spectral characteristics of helicoidal mechanically-induced long-period

- fiber grating[J]. Optics and Precision Engin. , 2017, 25(7): 1771-1776.
- [3] Chen H, Gu Z. Design of a gas sensor based on a cladding-reduced long period fiber grating coated with a sensitive film [J]. Optik-International J. for Light and Electron Opt. , 2013, 124(3): 219-224.
- [4] Chen X, Zhang L, Zhou K, et al. Real-time detection of DNA interactions with long-period fiber-grating-based biosensor[J]. Opt. Lett. , 2007, 32(17): 2541-2543.
- [5] 苗 飞, 张 玲, 冯德军, 等. 800 nm 应用飞秒激光制备长周期光纤光栅技术[J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 685-691. Miao Fei, Zhang Ling, Feng Dejun, et al. Inscription of long period fiber gratings using 800 nm femtosecond laser[J]. Optics and Precision Engin. , 2012, 20(4): 685-691.
- [6] 胡爱姿, 饶云江, 聂知理, 等. 腐蚀后的新型长周期光纤光栅特性研究[J]. 光子学报, 2004, 33(8): 916-919. Hu Aizi, Rao Yunjiang, Nie Zhili, et al. Characteristics of the etched long-period fiber gratings[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(8): 916-919.
- [7] Ling Q, Gu Z, Jiang X, et al. Design of long period fiber grating surrounding refractive index sensor based on mode transition near phase-matching turning point [J]. Optics Communications, 2019, 439: 187-192.
- [8] Piestrzynska M, Dominik M, Kosiel K, et al. Ultrasensitive tantalum oxide nano-coated long-period gratings for detection of various biological targets[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2019, 133: 8-15.
- [9] Shu X W, Zhu X, Jiang S, et al. High sensitivity of dual resonant peaks of long-period fibre grating to surrounding refractive index changes[J]. Electron. Lett. , 1999, 35(18): 1580.
- [10] Biswas P, Basunallick N, Bandyopadhyay S, et al. Sensitivity enhancement of turn-around-point long period gratings by tuning initial coupling condition[J]. IEEE Sensor J. , 2015, 15(2): 1240-1245.
- [11] 蒋秀丽, 顾 铮, 凌 强, 等. 镀膜双峰谐振长周期光纤光栅折射率传感的优化设计与实验[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 122-129. Jiang Xiuli, Gu Zheng, Ling Qiang, et al. La optimal design and experiments of coated dual-peak resonance long-period fiber grating refractive index sensing [J]. Chinese J. of Lasers, 2016, 43(5): 122-129.
- [12] Zhao Y, Li X, Zhou X, et al. Review on the graphene based optical fiber chemical and biological sensors[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 231(3): 324-340.
- [13] Jiang B, Bi Z, Hao Z, et al. Graphene oxide-deposited tilted fiber grating for ultrafast humidity sensing and human breath monitoring[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019, 293: 336-341.
- [14] Arasu P T, Noor A S M, Shabaneh A A, et al. Fiber Bragg grating assisted surface plasmon resonance sensor with graphene oxide sensing layer[J]. Optics Commun. , 2016, 380: 260-266.
- [15] Liu C, Xu B J, Zhou L, et al. Graphene oxide functionalized long period fiber grating for highly sensitive hemoglobin detection[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 261: 91-96.
- [16] Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B, et al. Long-period fiber gratings as band-rejection filters [J]. J. of Lightwave Technol. , 1996, 14(1): 58-65.
- [17] 蒋秀丽. 长周期光纤光栅化学传感器优化设计与实验[D]. 上海: 上海理工大学, 2016. Jiang Xiuli. Optimization design and experiment of long period fiber grating chemical sensor [D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2016.
- [18] Shu X, Huang D. Highly sensitive chemical sensor based on the measurement of the separation of dual resonant peaks in a 100- μ m-period fiber grating[J]. Opt. Commun. , 1999, 171(1-3): 65-69.
- [19] Smietana M, Bock W J, Mikulic P, et al. Detection of bacteria using bacteriophages as recognition elements immobilized on long-period fiber gratings[J]. Opt. Express, 2011, 19(9): 7971-7978.
- [20] 单 云, 张红琳, 张 凤. 氧化石墨烯水热还原前后的发光光谱[J]. 应用化学, 2015, 32(7): 837-842. Shan Yun, Zhang Honglin, Zhang Feng. Photoluminescence of graphene oxide and hydrothermally reduced graphene oxide[J]. Chinese J. of Appl. Chemistry, 2015, 32(7): 837-842.
- [21] 马德跃, 李晓霞, 郭宇翔, 等. 还原石墨烯光学波段复折射率及消光性能研究[J]. 光子学报, 2017, 46(12): 122-126. Ma Deyue, Li Xiaoxia, Guo Yuxiang, et al. Complex refractive index and extinction performance of reduced graphene oxide in optical bands[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(12): 122-126.
- [22] Chong J H, Shum P, Haryono H, et al. Measurements of refractive index sensitivity using long-period grating refractometer[J]. Opt. Commun. , 2004, 229(1/6): 65-69.

作者简介:

赵明富(1964—),男,重庆人,博士,教授,博士生导师,主要从事现代光电检测技术及仪器、生化信息获取与智能传感方面的研究;

罗彬彬(1981—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事光纤光栅传感器方面的研究。

基于复合膜的双通道光纤表面等离子共振传感器

顾钦顺¹, 葛益娴^{1,2*}, 张 鹏¹, 沈令闻¹, 郭志勇¹, 刘纯纯¹

(1. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 南京 210044;

2. 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044)

摘 要: 基于表面等离子共振的原理,设计了一种基于复合膜的双通道光纤表面等离子传感器。利用 FDTD Solutions 仿真软件分析了传感器的电场传输模式,比较了单层金属 Ag 膜与 Ag-ITO 复合膜的性能,并对比分析了单通道与双通道结构。结果表明:采用 Ag-ITO 与 Au-TiO₂ 复合膜的双通道结构在灵敏度和品质因数等各项性能上要明显优于传统单层金属膜与单通道结构。设计的传感器不仅可以通过两条传感通道共振偏移范围的高区分度来解决共振波长的串扰问题,而且双通道结构中一条传感通道也可以作为参考通道为传感器提供自补偿能力。

关键词: 光纤传感器; 表面等离子共振; 双通道; 复合膜; 共振波长串扰

中图分类号: TP212 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0638-06

A Dual-channel Optical Fiber Surface Plasmon Resonance Sensor Based on Composite Membrane

GU Qinshun¹, GE Yixian^{1,2}, ZHANG Peng¹, SHEN Lingwen¹, GUO Zhiyong¹, LIU Chunchun¹

(1. School of Electronics & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044,

CHN; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, CHN)

Abstract: Based on the principle of surface plasmon resonance (SPR), a dual-channel optical fiber surface plasmon resonance sensor based on composite membrane was designed. The simulation software of FDTD Solutions was used to simulate and analyze the electric field transmission mode of the sensor, the performance of the single-layer metal Ag film and Ag-ITO composite membrane was compared, and the structure of single channel and double channel was analyzed comparatively. The results show that the sensitivity and quality factors of the dual-channel structure with Ag-ITO and Au-TiO₂ composite membrane are obviously better than that of the traditional single-layer metal film and single-channel structure. The designed sensor can not only solve the crosstalk problem of resonance wavelength by the high differentiation of resonance drift range of the two sensor channels, but also one of the sensor channels in the dual-channel structure can be used as a reference channel to provide self-compensation capability for the sensor.

Key words: optical fiber sensor; surface plasma resonance; dual-channel; composite membrane; resonance wavelength crosstalk

0 引言

近年来,随着表面等离子共振 (SPR) 技术的大

量应用,将 SPR 技术与传感器技术相结合应用到化学、生物和医药等领域的研究越来越受到关注^[1-4]。利用光纤代替传统棱镜来激发 SPR 现象的光纤 SPR 技术得到了迅速的发展,而通过光纤 SPR 技术制成的光纤 SPR 传感器因其体积小、灵敏度高、抗电磁干扰性强等特点逐渐被广泛应用在各个传感测

收稿日期: 2020-07-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61307061); 江苏高校优势学科 III 期建设工程资助项目。

* 通信作者: 葛益娴 E-mail: gyx_nuist@163.com

量领域^[5-6]。在实际生活应用中,传感器需要同时监测各种指标,如浓度、折射率、温度和 pH 值,随着参数类型和目标样本的多样化,传统的单通道光纤 SPR 传感器早已不能满足实际检测的需要。因此,开发双通道光纤 SPR 传感器已十分紧迫。

双通道光纤 SPR 传感器主要采用波长调制^[7-8]。通常是在光纤上构造两个具有传感功能的区域,通过测量得到各个传感部分的共振波长,实现在同一检测结构上对多个位点的同时监测。双通道传感器通常有两种常用的制作方法,第一种方法是调整光束的入射角,在这种情况下,光纤通常被抛磨成锥形,因此不同的抛磨角度将产生不同的共振波长偏移范围,而这些传感器被抛磨成锥形后,角度都难以控制^[9-10]。另一种方法是在同一光纤上镀上不同的金属膜^[11],从而产生两个不同的表面等离子体共振现象,此种方法更多的是只考虑两个通道的可行性,却忽略了使用不同金属膜所产生的共振波长偏移范围重合的问题。另外还有利用光学光栅^[12]在单个光纤中制造多个通道的 SPR 传感器。然而,光学光栅的一个显著特点是其灵敏度很低。现有的新型光纤 SPR 结构多样,有双锥型^[13]、双 D 型^[14],这些结构有一个共同的特点就是所用光纤大多为特殊光纤,而且存在制作成本高、制作工艺复杂、结构稳定性差等问题。

本文提出了一种基于复合膜的双通道光纤折射率传感器,该传感器采用单模光纤侧边抛磨^[15]技术,并通过镀上两个不同的复合膜来产生两条不同的传感通道,利用双通道和复合膜相结合的结构不仅能达到传统单层膜及单通道结构传感器的各项性能,并且还能解决传统传感器无参考通道、共振波长偏移范围串扰等问题。

1 传感器理论分析

本文提出的双通道光纤 SPR 传感器结构示意图如图 1 所示。将一根纤芯直径约为 9 μm 的单模光纤经过侧边抛磨工艺加工形成上下两个长度为 L 的侧抛磨面,分别在侧抛磨面上镀上 Ag-ITO(银-

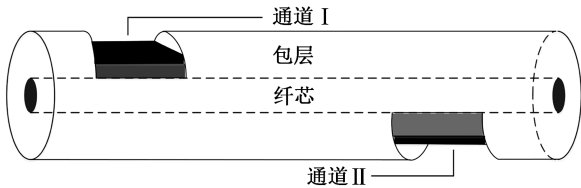


图 1 传感器结构图

氧化锡)复合膜和 Au-TiO₂(金-二氧化钛)复合膜。

利用 Krestschmann 棱镜多层膜理论模型分析此结构,传感通道 I 和 II 均为纤芯层、金属膜层、半导体膜层以及外部介质层的四层膜结构。如图 2 所示,当光源从该传感器的一端进入,光源经过光纤两侧时,由全反射产生的倏逝波激发复合膜表面的电子,沿着复合膜表面按光源传播方向形成表面等离子波^[16](SPW),当入射光波矢量与表面等离子波矢相匹配时,产生表面等离子体共振(SPR)现象。根据 Fresnel 公式^[17]得到传感器中通道 I 和通道 II 的 P 光(即 TM 模)的反射系数为

$$r_{\text{I}} = r_{\text{II}} = |r_{0123}|^2 = \left| \frac{r_{01} + r_{123} \exp(2ik_{1z}d_1)}{1 + r_{01}r_{123} \exp(2ik_{1z}d_1)} \right|^2 \tag{1}$$

式中,

$$\begin{cases} r_{01} = \frac{\epsilon_0 k_{1z} - \epsilon_1 k_{0z}}{\epsilon_0 k_{1z} + \epsilon_1 k_{0z}} \\ r_{12} = \frac{\epsilon_1 k_{2z} - \epsilon_2 k_{1z}}{\epsilon_1 k_{2z} + \epsilon_2 k_{1z}} \\ r_{23} = \frac{\epsilon_2 k_{3z} - \epsilon_3 k_{2z}}{\epsilon_2 k_{3z} + \epsilon_3 k_{2z}} \\ r_{123} = \frac{r_{12} + r_{23} \exp(2ik_{2z}d_2)}{1 + r_{12}r_{23} \exp(2ik_{2z}d_2)} \end{cases} \tag{2}$$

$$k_{iz} = \sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \epsilon_i - k_{0x}^2}, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots \tag{3}$$

其中, r_{01}, r_{12}, r_{23} 分别为光纤与金属膜之间的反射率,金属膜与半导体膜之间的反射率和半导体膜与环境介质之间的反射率; r_{123} 为金属膜、半导体膜、环境介质三层结构之间的反射率; r_{0123} 为光纤、金属膜、半导体膜、环境介质四层结构之间的反射率; d_1, d_2 分别为金属膜和半导体膜的厚度; $\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 分别代表光纤、金属膜、半导体膜、外界环境介质的介电常数; $k_{0z}, k_{1z}, k_{2z}, k_{3z}$ 分别为光纤、金属膜、半导体膜、外界环境介质中的光波波矢分量。

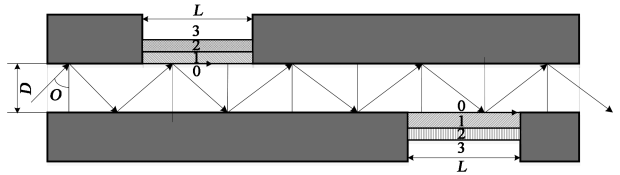


图 2 光源在本传感器中的传播图

最后可以得出通道 I 和通道 II 的光总反射系数分别为

$$R_{\text{I}} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M r_{\text{I}}^N \times I(\alpha) \tag{4}$$

$$R_{\text{II}} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M r_{\text{II}}^N \times I(\alpha) \tag{5}$$

双通道光纤 SPR 传感器总透射能量为

$$R_{\text{total}} = R_{\text{I}} \times R_{\text{II}} \tag{6}$$

式中, N 为传输光在光纤与金属膜界面的反射次数, M 为传播模式数, 传播模式数随传播角度的改变而改变, $I(\alpha)$ 为高斯能量分布^[18]。

以待测介质水为例($n=1.33$), 根据上述公式对本文所设计的基于复合膜结构的双通道光纤表面等离子共振传感器进行分析。如图 3 所示, 在 600 和 812 nm 两处透射能量出现明显下降, 即传感区域产生了共振吸收峰 a 和 b, 而两个通道的共振峰位置和复合膜材料有关, 根据对应的共振峰波长确定传感通道, 分别对应传感通道 I 和 II。而当外界环境折射率改变时, 这两条传感通道产生的共振吸收峰 a 和 b 的位置也会发生明显改变。

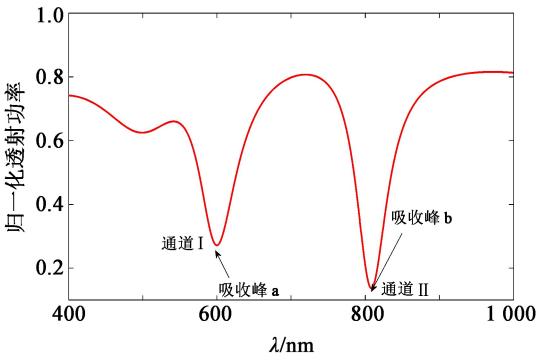
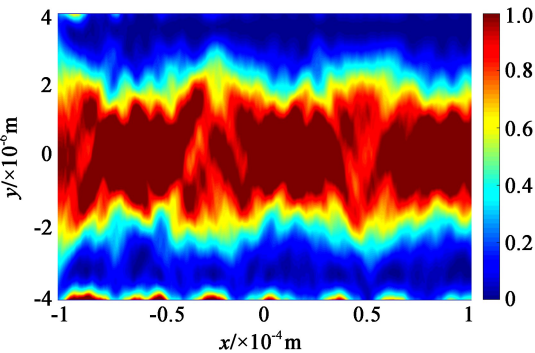


图 3 在折射率为 1.33 时传感器的理论透射谱图

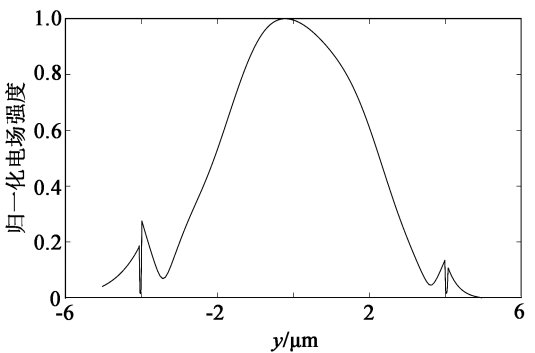
2 分析与讨论

上文利用多层膜理论分析了双通道光纤 SPR 传感器的工作原理, 下面利用时域有限差分软件 FDTD Solutions 对本文设计的传感器进行仿真分析与讨论。选择单模光纤纤芯折射率为 1.445 7, 金属膜(Au, Ag)厚度为 50 nm, ITO 膜厚度为 10 nm, TiO₂ 膜厚为 15 nm^[19]。考虑计算机内存容量, 传感区域 L 选择为 200 μm。光源采用高斯光, 设置为宽光谱, 波长范围为 520~1 200 nm。本文设计的双通道传感器传感区域的电场分布如图 4 所示, 图 4 (a)为传感器的传输模式电场分布图, 其中 x 轴即为传感区域 L 的轴向距离长度分布, y 轴为传感器相对纤芯的径向距离分布。从图中可以看出电场能量主要集中在纤芯内部, 而除了这部分能量外, 还有

部分能量存在于在光纤的两侧传感区域, 说明部分能量在传输过程中从纤芯中泄漏出来, 即产生了倏逝波并在传感区域内与复合膜激发了表面等离子共振现象, 而图中光纤下方出现的三处弧形强度较大的区域即为传感器通道 II 产生的共振现象。图 4 (b)为该传感器横截面归一化电场强度分布曲线, 其中横轴即为图 4(a)中 y 轴的分布, 为传感器相对纤芯的径向距离分布。在 $y = -4.05 \mu\text{m}$ 与 $y = 4.05 \mu\text{m}$ 处有两个高度不同的尖峰, 说明在这两处发生了电场能量的变化, 即传感器产生了两个明显不同的共振吸收峰, 可以得出本文基于复合膜的双通道传感器实现了不同通道的测量。



(a) 传感器的传输模式电场分布图



(b) 传感器横截面归一化电场曲线图

图 4 传感器传感区域电场分布图

本文设计的传感器两条传感通道均采用复合膜结构, 其在抗氧化性、机械硬度等化学稳定性上要远优于普通的单层金属膜。传感通道 I 采用的是 Ag-ITO 复合膜材料, 其介电常数为^[20]

$$\epsilon_{\text{m}}(\lambda) = 3.8 - \frac{\lambda_{\text{c}} \lambda^2}{\lambda_{\text{p}}^2 (\lambda_{\text{c}} + i\lambda)} \tag{7}$$

$$\begin{cases} \lambda_{\text{p}} = 5.649 \times 10^{-7} \\ \lambda_{\text{c}} = 1.1121 \times 10^{-5} \end{cases} \tag{8}$$

传感通道 II 采用的是 Au-TiO₂ 复合膜, 二氧化钛(TiO₂)的折射率与波长关系为^[21]

$$n^2=5.913+\frac{0.2441}{\lambda^2-0.0803}$$

(9)

图 5 为单层金属膜与复合膜分别作为传感通道的性能比较。通常灵敏度 (S)、半高全宽 (FWHM)、品质因数(Q)及共振峰深度是衡量传感器性能指标的四个重要参数,其中灵敏度与品质因数表达式为

$$S=\frac{\Delta\lambda}{\Delta n}$$

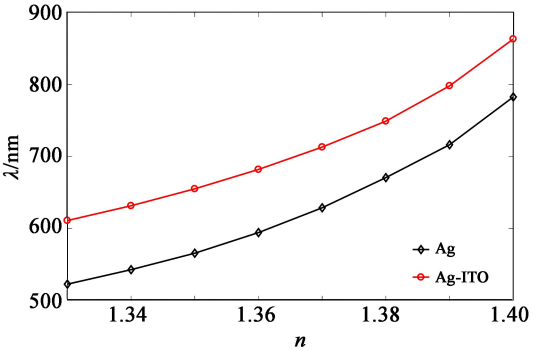
(10)

$$Q=\frac{S}{FWHM}$$

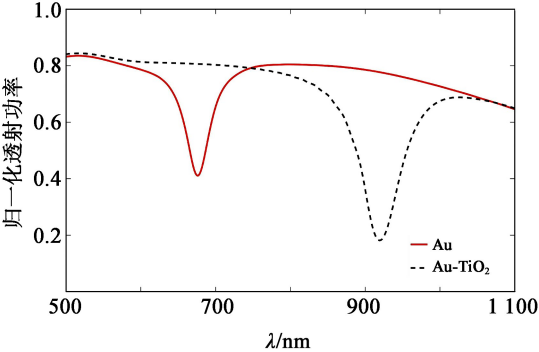
(11)

式中, $\Delta\lambda$ 为共振波长偏移量, Δn 为环境折射率差值。

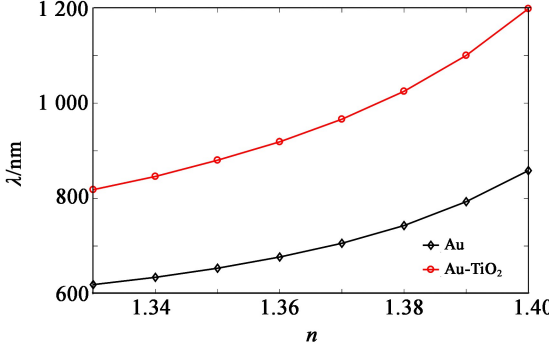
图 5(a)所示为以外界环境折射率为 1.36 为例,单层 Ag 膜与 Ag-ITO 复合膜分别作为传感通道的透射谱比较图。从图中明显看出 Ag-ITO 复合膜比单层 Ag 膜的半高全宽窄,共振峰深度要深,其品质因数远优于单层 Ag 膜。由图 5(b)可以看出,待测介质环境折射率从 1.33 变化到 1.40,Ag-ITO 复合膜的灵敏度与单层 Ag 膜的灵敏度相差不大,灵敏度约为 3 614 nm/RIU,并且单层 Ag 膜极易氧化的性质使其灵敏度和品质因数等各项性能随时间而急剧下降,导致测量准确性降低,无法保持传感器长时间的精确测量。而本文另一传感通道分别采用 Au-TiO₂ 复合膜与 Au 膜的透射谱比较图如图 5(c)所示,可以看出,Au-TiO₂ 复合膜不仅可以起到保护金膜的作用,而且在灵敏度、共振峰深度以及品质因数上也远优于单层金膜,使其在对外界环境测量时更为灵敏。由图 5(d)可以看出,Au-TiO₂ 复合膜最大的优势在于其较高的灵敏度,可达 5 696 nm/RIU 以上,而单层金膜的灵敏度仅为 3 419 nm/RIU。综上所述,本文设计的双通道传感器采用的复合膜结构,一方面复合膜的等效折射率对环境的敏感度高于单层金属膜,使传感区域的电场强度得



(b) 单层 Ag 膜与 Ag-ITO 复合膜折射率与波长关系曲线



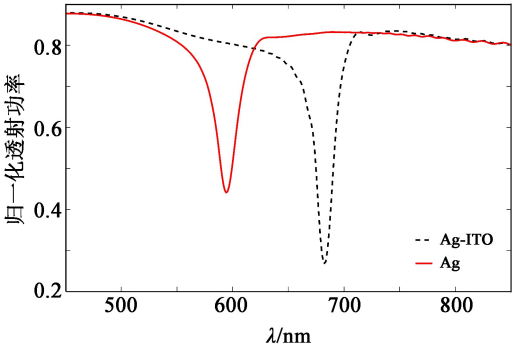
(c) 单层 Au 膜与 Au-TiO₂ 复合膜的传感透射谱



(d) 单层 Au 膜与 Au-TiO₂ 复合膜折射率与波长关系曲线
图 5 单层金属膜与复合膜分别作为传感通道的性能比较

到加强,从而使共振现象更明显,共振波长偏移量更大,所以复合膜作为传感通道在各项性能上都优于单层金属膜通道。另一方面,复合膜的化学稳定性也使本传感器的使用寿命以及测量精确度有了大幅度提升。

接下来,对采用复合膜结构的单双通道传感器进行比较,同样选择传感环境折射率为 1.36,图 6 所示单通道传感器在折射率为 1.36 时的共振波长 λ_a 为 681.879 nm,半高全宽约为 16.7 nm。而本文的双通道传感器的传感通道 I 的共振波长 λ_b 为 681.972 nm,半高全宽约为 17 nm。通过两者的比较可以得出,在相同条件下双通道结构并不会影响其共振波长,并且在达到单通道结构的灵敏度及品



(a) 单层 Ag 膜与 Ag-ITO 复合膜的传感透射谱

质因数等前提下,其共振峰深度也远优于单通道传感器,使其在测量时产生的共振峰更容易被观察。双通道结构在多条件传感环境下,其中一条传感通道在进行测量的同时,另一条传感通道可以作为参考通道来防止测量时外部因素的影响而产生误差。

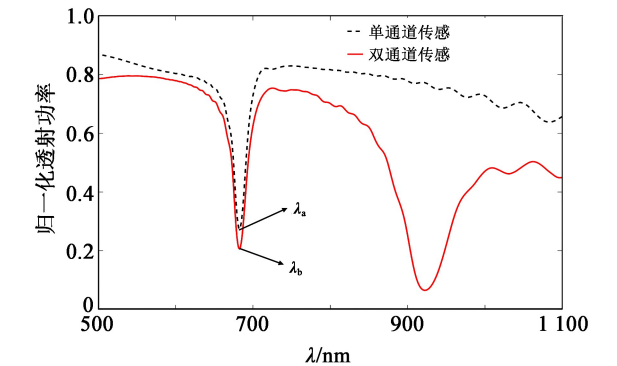
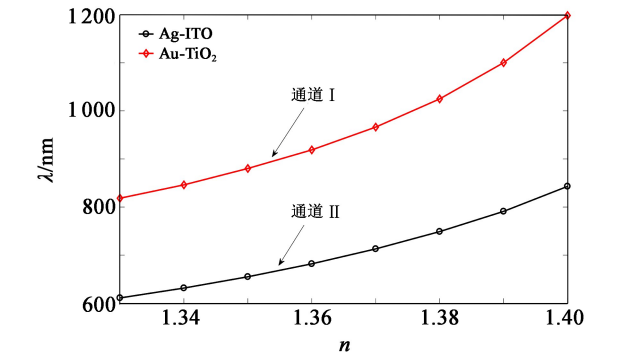
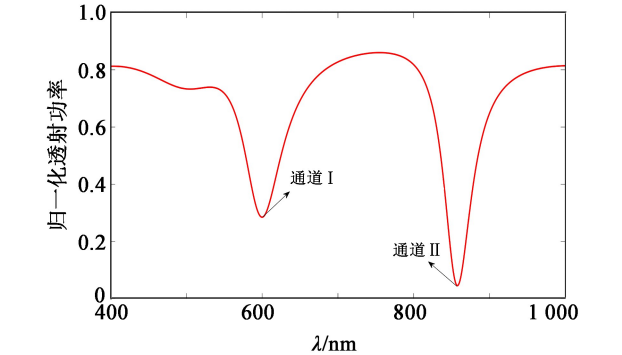


图6 传感环境为1.36时单通道传感与双通道传感透射谱对比图

本文设计的双通道传感器采用 Ag-ITO 和 Au-TiO₂ 复合膜,如图 7(a)所示,当环境折射率从 1.33 变化到 1.40 时,镀有 Ag-ITO 复合膜传感通道 I 的共振峰波长红移范围为 610.714~848.417 nm,镀有 Au-TiO₂ 复合膜通道 II 的共振峰波长红移范围为 818.352~1 198.28 nm。两条通道的共振波长红移范围有明显的区分度,大幅度提高了传感器两条通道的兼容性,很好地解决了其他双通道传感器在大折射率量程范围下存在的共振波长串扰问题。这样可以大大提高该传感器同时测量不同折射率环境的能力。图 7(b)所示为基于复合膜的双通道表面等离子共振传感器在不同传感环境下的透射谱图,可以看出图中存在两个很明显的共振吸收峰,根据两条传感通道的共振波长红移范围,可以分析出两个共振吸收峰分别为通道 I 在测量环境折射率为 1.33 与通道 II 在测量环境折射率为 1.36 时的结果。本文的双通道传感器通过两条通道的高区分度



(a) 两条传感通道的折射率与共振峰波长的关系曲线



(b) 本文传感器在不同传感环境下同时测量的透射谱图
图7 传感器共振波长串扰问题分析

共振波长红移范围,起到对不同传感环境同时测量时,不会因为共振波长串扰而受到影响,达到远超其他同类型传感器的性能。

3 结论

相较于传统单通道和单层金属膜结构的传感器,本文设计的基于复合膜的双通道光纤 SPR 折射率传感器拥有较大的优势,既保持了原有传统单通道传感器的灵敏度与品质因数等条件加强的共振峰深度,又增加了另一条传感通道,可实现其灵活可用性和自补偿能力。采用的 Ag-ITO 和 Au-TiO₂ 复合膜的灵敏度分别达到 3 614 和 5 696 nm/RIU,并且很好解决了传统传感器在一些易氧化和强酸等特殊环境下无法持续测量和精确测量的问题。本传感器选择的两种复合膜产生的共振峰波长偏移范围分别为 610.714~848.417 和 818.352~1 198.28 nm,很好地解决了其他多通道传感器共振波长的串扰问题,使其在被观察测量时可以更加直观,实现单通道无法同时测量多种折射率传感环境的能力。

参考文献:

[1] Ahn J H, Seong T Y, Kim W M, et al. Fiber-optic waveguide coupled surface plasmon resonance sensor[J]. Opt. Express, 2012, 20(19): 21729.

[2] Navarrete, Maria-Cruz, Diaz-Herrera, Natalia, et al. Surface plasmon resonance in the visible region in sensors based on tapered optical fibers[J]. Sensors & Actuators B: Chemical, 2014, 190: 881-885.

[3] 刘 海,白冰冰,张砚曾,等. 基于 SPR 效应的金-PDMS 涂覆光子晶体光纤高灵敏度温度测量[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0404003.

Liu Hai, Bai Bingbing, Zhang Yanzeng, et al. High-sensitivity temperature measurement based on SPR in gold-PDMS-coated photonic crystal fiber[J]. Chinese J. of Lasers, 2020, 47(4):

- 0404003.
- [4] Sharma A K, Kaur B. Chalcogenide fiber-optic SPR chemical sensor with MoS₂ monolayer, polymer clad and polythiophene layer in NIR using selective ray launching[J]. Optical Fiber Technol., 2018, 43(7): 163-168.
- [5] Kao T W, Taylor H F. High-sensitivity intrinsic fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor[J]. Opt. Lett., 1996, 21(8): 615-618.
- [6] 范振凯, 张子超, 王保柱, 等. 基于表面等离子体共振效应的光子晶体光纤折射率传感器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(7): 070004.
- Fan Zhenkai, Zhang Yuchao, Wang Baozhu, et al. Research progress of photonic crystal fiber refractive index sensors based on surface plasmon resonance effect[J]. Laser & Optoelectron. Progress, 2019, 56(7): 070004.
- [7] 付丽辉, 尹文庆, 戴峻峰. 基于薄膜光学理论的光纤表面等离子共振传感器研究[J]. 分析试验室, 2016, 35(10): 1171-1176.
- Fu Lihui, Yin Wenqing, Dai Junfeng. Investigation on SPR fiber-optic probes based on thin film optics[J]. Chinese J. of Analysis Laboratory, 2016, 35(10): 1171-1176.
- [8] 李峰杰, 郝 鹏, 吴一辉. 金纳米棒对 SPR 生物传感器灵敏度的增强效应[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(7): 27-30.
- Li Fengjie, Hao Peng, Wu Yihui. Sensitivity enhancement effect of gold nanorods on SPR biosensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 30(7): 27-30.
- [9] Liu Z, Liu L, Zhu Z, et al. Dual-channel surface plasmon resonance refractive index sensor based on modified hetero-core structure fiber[J]. Opt. Commun., 2017, 403: 290-295.
- [10] Liu Z, Wei Y, Zhang Y, et al. A multi-channel fiber SPR sensor based on TDM technology[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2015, 226: 326-331.
- [11] 李文超, 何家欢, 李志全, 等. 新型双通道可选择性 SPR 光纤传感器的研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(3): 133-139.
- Li Wenchao, He Jiahuan, Li Zhiquan, et al. Research on novel two-channel selective SPR optical fiber[J]. Sensor Infrared and Laser Engin., 2017, 46(3): 133-139.
- [12] Baiad M D, Kashyap R. Concatenation of surface plasmon resonance sensors in a single optical fiber using tilted fiber Bragg gratings[J]. Opt. Lett., 2015, 40(1): 115.
- [13] 曹雨晨, 孙 鹏. 基于 SPR 的双锥形光纤折射率传感特性研究[J]. 仪表技术与传感器, 2015(6): 11-13.
- Cao Yuchen, Sun Peng. Research on refractive index sensing properties of bionomical optical fiber based on SPR [J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(6): 11-13.
- [14] Li L, Liang Y, Liu Q, et al. Dual-channel fiber-optic biosensor for self-compensated refractive index measurement [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2016, 28(19): 2110-2113.
- [15] 赵 静, 王 英, 王义平. 氧化石墨烯增强型表面等离子体共振光纤传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(23): 230601.
- Zhao Jing, Wang Ying, Wang Yiping. Graphene-oxide-enhanced surface plasmon resonance fiber sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(23): 230601.
- [16] Barbora Pakova, Piliarik M, KvasniKa P, et al. Novel concept of multi-channel fiber optic surface plasmon resonance sensor[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2009, 139(1): 199-203.
- [17] Tabe Y, Yokoyama H. Fresnel formula for optically anisotropic Langmuir monolayers: an application to Brewster angle microscopy[J]. Langmuir, 1995, 11(3): 699-704.
- [18] 曹振新, 吴乐南, 王 兴, 等. 基于表面等离子体共振效应的信息获取和显示[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2004, 34(5): 582-584.
- Cao Zhenxin, Wu Lenan, Wang Xing, et al. Theoretical study on optical fiber surface plasmon resonance sensors[J]. J. of Southeast University (Nature Science Edition), 2004, 34(5): 582-584.
- [19] 刘纯纯, 葛益娴, 李 玲, 等. 基于表面等离子共振的光纤探针折射率传感器[J]. 光学技术, 2019, 45(5): 579-585.
- Liu Chunqun, Ge Yixian, Li Ling, et al. Fiber probe refractive index sensor based on surface plasmon resonance[J]. Optical Technique, 2019, 45(5): 579-585.
- [20] Wang Y J, Dong J L, Luo Y H, et al. Indium tin oxide coated two-mode fiber for enhanced SPR Sensor in near-infrared region [J]. IEEE Photonics J., 2017, 9(6): 4801309.
- [21] Tao W, Zhang M J, Liu K, et al. The effect of the TiO₂ film on the performance of the optical fiber SPR sensor[J]. Opt. Commun., 2019, 448.

作者简介:

顾钦顺(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感器;

葛益娴(1982—),女,博士,副教授,主要从事光纤传感与微纳技术方面的研究。

有机卤化物盐对钙钛矿太阳能电池器件性能的影响

冯晓娜^{1,2*}, 李 丹¹, 梁春军^{1,2}

(北京交通大学 1. 理学院; 2. 光电子研究所, 北京 100044)

摘 要: 有机无机杂化钙钛矿已被证明是优良的光吸收材料,可用于高效率光伏领域。增大钙钛矿薄膜的晶粒尺寸和对晶界缺陷的钝化是提高太阳能电池性能的重要途径。文章报道了一种简单的缺陷钝化技术,将有机卤化物盐 BAI 引入钙钛矿的混合阳离子中,以起到增大晶粒和钝化缺陷的作用,使钙钛矿太阳能电池的光电转换效率从 19.46% 提升至 21.56%。这种效率的提升是在不损失短路电流和填充因子的情况下,开路电压从 1.04 V 提高到 1.11 V 的结果。这种提升钙钛矿型太阳能电池开路电压的方法,为进一步提高钙钛矿型太阳能电池的光电性能提供了新的途径。

关键词: 钙钛矿太阳能电池; BAI; 开路电压; 高效率

中图分类号: TM914.4 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0644-04

Effects of Organic Halide Salt on the Performance of Perovskite Solar Cells

FENG Xiaona^{1,2}, LI Dan¹, LIANG Chunjun^{1,2}

(1. School of Sciences; 2. Institute of Optoelectronics Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, CHN)

Abstract: Organic-inorganic hybrid perovskites have been proven to be a kind of excellent light-absorbing materials for high-efficiency photovoltaic applications. At present, the ways to improve the efficiency of solar cells mainly focus on optimizing the grain morphology and interface modification of perovskite films. In this paper, a simple surface treatment technology is reported to increase the photoelectric conversion efficiency of perovskite solar cells from 19.46% to 21.56%. The improvement in efficiency is the result of increasing the open circuit voltage from 1.04 to 1.11 V without sacrificing short circuit current and filling factor. The method of increasing the open-circuit voltage provides a new way to further improve the reliability of perovskite solar cells.

Key words: perovskite solar cells; BAI; open-circuit voltage; high efficiency

0 引言

有机无机卤化物钙钛矿材料由于具有制备工艺简单、成本低、能隙合适、吸光系数很高、电子-空穴对结合能较低、载流子迁移率均衡,以及光致载流子寿命较长等优点,其光伏应用引起了研究人员的广泛关注^[1-4]。通过钙钛矿薄膜晶体生长控制^[3, 5-6]、界面工程^[7]、载流子传输层优化和表面钝化^[8-9]等几

种方法,钙钛矿太阳能电池的效率已从 3.8% 提高到 25.2%。在薄膜晶粒生长方面,人们采用热处理、溶剂退火或使用添加剂(如聚合物,离子液体和铵盐)等附加手段来改善钙钛矿的薄膜形貌,从而提高钙钛矿太阳能电池的性能。

在多晶材料中,特别是溶液处理的钙钛矿中,薄膜晶界和表面是缺陷存在的重要区域。钙钛矿太阳能电池性能的进一步提升将取决于如何抑制钙钛矿半导体中的缺陷密度。因此缺陷钝化是光伏领域的研究热点之一。研究人员已提出多种有效的缺陷钝化方法,例如,已有报道显示以碘化铅作为钙钛矿的组分,可以钝化钙钛矿吸收层^[10];另一种方法是在晶

收稿日期:2020-04-11.

基金项目:国家自然科学基金项目(61574014, 61874008, 11474017);北京市科委项目(Z181100004718004).

* 通信作者:冯晓娜 E-mail: 17121583@bjtu.edu.cn

格中引入少量的大分子胺,如苯乙胺、聚乙烯亚胺和三氟醚等,从而形成二维层状结构。结果表明,增加三维钙钛矿晶格中准二维结构的比例,可以提高薄膜的稳定性^[11]。二维材料含有疏水基团,因此对潮湿环境具有极大的耐受性。

本文尝试将二维材料有机卤化物盐 BAI 或 BACl 引入两步法钙钛矿材料中,此做法有望促进晶粒生长以及薄膜表面缺陷钝化^[12-14]。实验结果表明,有机卤化物盐 BAI 可以在不影响器件短路电流和填充因子的情况下明显提高器件的开路电压,从而提升器件性能。

1 实验

1.1 实验材料

氧化锡(SnO_2)溶液(在 H_2O 胶体分散液中占 15%)从 Alfa Aesar 购得,在使用之前用去离子水进行稀释。碘化铅(PbI_2 ,纯度 99.99%)、甲基溴化胺(MABr,99.5%)、甲基氯化胺(MACl,99.5%)和甲脒氢碘酸盐(FAI,99.5%)均购于 Tokyo Chemical Industry。丁基碘化胺 Butylammonium Iodide (BAI),丁基氯化胺 Butylammonium Chloride Synonym, 4-tert-butylpyridine (TBP,96%),lithium bis(trifluoromethylsulfonyl) imide (Li-TFSI,99%)和 PTAA($M_w=10,000\sim100,000$)购于西安宝莱特公司。

1.2 器件制备

对 ITO 玻璃基板依次采用洗涤剂、去离子水、丙酮和 IPA 进行超声波清洗。用紫外臭氧(UVO)将玻璃基板处理 20 min。将 SnO_2 溶液以 4 000 r/min 的速度旋涂在玻璃基板上。然后,将玻璃基板在 150 ℃ 的加热平台上退火 30 min。钙钛矿薄膜分两步制备:第一步,将 PbI_2 前体(DMF : DMSO=19 : 1)以 2 000 r/min 的速度旋涂在 SnO_2 基板上,然后立即在 70 ℃ 温度下退火 1 min。第二步,将 FAI : MABr : MACl : BAI(60 mg : 6 mg : 6 mg : 1 mg 溶于 1 mL IPA 中)混合溶液以 2 000 r/min 的速度旋涂在冷却至室温的 PbI_2 上。之后,将玻璃基板在环境空气(湿度 30%~40%)中于 150 ℃ 下退火 20 min。退火完成后将 10 mg/mL PTAA 溶液以 3 000 r/min 的速度旋涂在钙钛矿层的顶部。最后,使用真空镀膜设备蒸镀 100 nm 的 Au 膜作为薄膜电池的背电极。

2 实验结果与分析

本文研究以 SnO_2 为电子传输层的 n-i-p 平面结构钙钛矿太阳能电池。器件结构为 ITO/ SnO_2 /(FAPbI_3)_{0.97}(MAPbBr_3)_{0.03}/PTAA/Au。采用两步旋涂法制备钙钛矿层,采用 BAI 或 BACl 对钙钛矿进行钝化。

采用两步法制得的钙钛矿薄膜无针孔,且晶粒尺寸较大,但是存在晶粒叠层且晶粒大小不均匀的缺点,并且由于薄膜退火处理过程并非在真空环境下进行的,这可能会对器件稳定性有所影响。为了提升器件性能和稳定性,尝试在三维钙钛矿晶格中引入带有氨基基团的有机卤化物盐。在本工作中我们尝试在三维钙钛矿中引入少量的 BAI 或 BACl。图 1(a)和(b)分别为未引入和引入有机卤化物盐的器件制备流程。

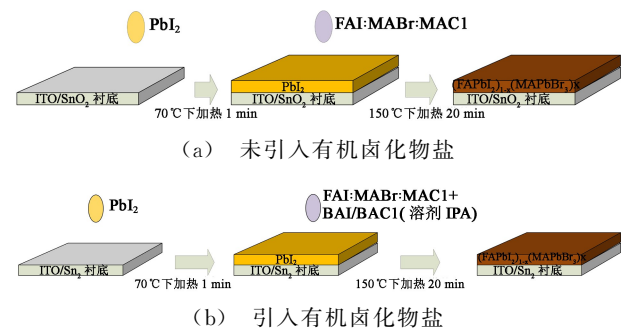
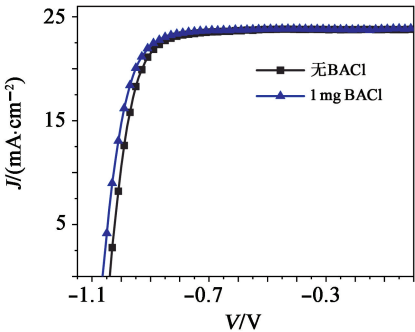


图 1 未引入和引入有机卤化物盐的器件制备流程

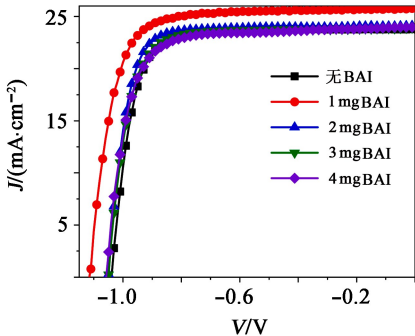
通过离子替换可以改变钙钛矿薄膜的光电性能。随着卤素离子半径的增大,钙钛矿薄膜的带隙逐渐减小,用不同的卤素取代或掺杂能够实现对光学带隙和荧光波长的连续调控。由图 2(a)可以看出,在引入 BACl 之后,器件转换效率(η)从 19.46%提升到了 19.99%。通过表 1 进一步对比发现,引入 BACl 后器件的填充因子(F_F)有稍许提升(由 78.57%提升至 79.05%)。BACl 与 BAI 同样具有氨基,并且带有卤素 I^- ,尝试引入 BAI 并且对比两种材料的引入效果。发现引入同等量的 BAI 时,器件的电流和开路电压明显高于引入 BACl 器件,结果是器件转换效率明显得到提升。

从图 2(b)所示 $J-V$ 曲线可以看出,在混合有机盐中掺杂 1 mg 的 BAI 时器件性能最佳,掺杂后的光伏器件光电转化效率相比未处理的光伏器件有很大提升,光电转换效率从 19.46%提升至 21.56%。从表 2 中可发现,加入 1 mg BAI 的光伏器件开路电

压(V_{oc})从 1.04 V 提升至 1.11 V,短路电流(J_{sc})从 $23.79\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 提升至 $25.75\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$,然而器件的填充因子(F_F)从 78.57%下降至 75.25%。器件效率这一性能的提升明显得益于器件开路电压的提高,可以初步推断开路电压的明显提升是因为新材料的引入改善了器件薄膜质量,降低了薄膜中的非辐射复合。



(a) 引入 BAI 的 J - V 曲线



(b) 引入不同量 BAI 的 J - V 曲线

图 2 掺杂两种化合物器件的 J - V 曲线

表 1 有无 BAI 的钙钛矿太阳能电池光伏参数对比

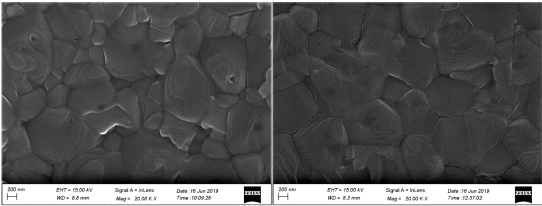
样品	V_{oc}/V	$J_{sc}/(\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$	$F_F/\%$	$\eta/\%$
无 BAI	1.04	23.79	78.57	19.46
1 mg BAI	1.06	23.84	79.05	19.99

表 2 不同量 BAI 的钙钛矿太阳能电池光伏参数对比

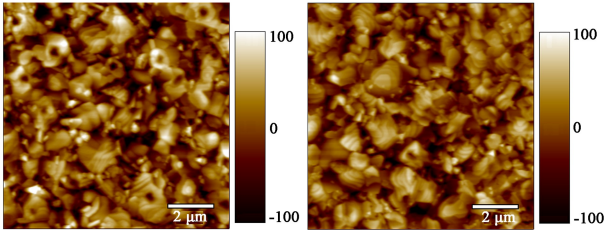
BAI 量	V_{oc}/V	$J_{sc}/(\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$	$F_F/\%$	$\eta/\%$
0 mg	1.04	23.79	78.57	19.46
1 mg	1.11	25.75	75.25	21.56
2 mg	1.05	24.05	80.67	20.37
3 mg	1.05	23.98	77.96	19.64
4 mg	1.06	23.91	76.08	19.29

使用扫描电子显微镜(SEM)对制备的钙钛矿薄膜表面形貌进行表征,如图 3(a)~(b)所示,从中可观察到晶粒尺寸和形态的显著变化。当引入 BAI 量为 1 mg 时,钙钛矿薄膜的晶粒最大。而且采用原

子力显微镜(AFM)对钙钛矿膜的表面粗糙度进行评估,如图 3(c)~(d)。图 4 所示为钙钛矿薄膜的晶粒尺寸分布。这些结果表明,引入 1 mg BAI 处理后钙钛矿晶粒的平均尺寸达到 820 nm,而未进行 BAI 处理的钙钛矿晶粒平均尺寸仅为 611 nm。研究表明,BAI 的引入可以使钙钛矿薄膜表面变得光滑。这种变化使空穴传输层与钙钛矿层更加亲和。这证明,引入 BAI 可使得晶粒尺寸变大,大小更均匀,表面更加光滑。薄膜表面光滑有利于薄膜表面与传输层的电荷传输。



(a) 无 BAI 的 SEM (b) 1 mg BAI 的 SEM



(c) 无 BAI 的 AFM (d) 1 mg BAI 的 AFM

图 3 制备的钙钛矿薄膜表面的 SEM 和 AFM 表征结果

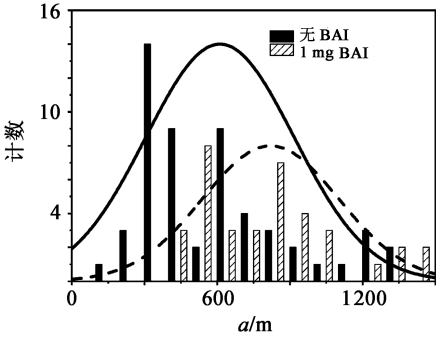
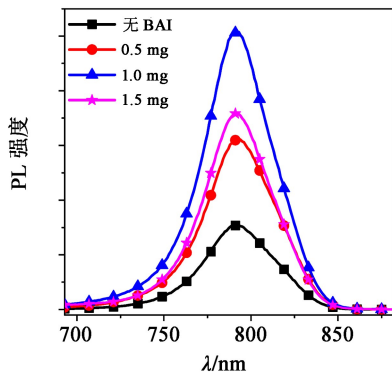
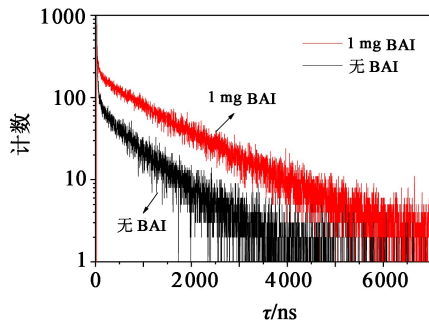


图 4 使用 Image-Pro 软件根据图像计算出的直方图

接下来研究 BAI 处理的钙钛矿薄膜的稳态光致发光谱(PL)(图 5(a))。在玻璃基板上测量钙钛矿膜的 PL 光谱(在 479 nm 的波长处激发)。结果表明,BAI 处理后钙钛矿膜的 PL 提高。随着 BAI 量的增加,发光强度先增加然后减小。引入 1 mg BAI 的钙钛矿薄膜的 PL 强度显着增加。该现象表明钙钛矿层中的非辐射复合被大大抑制。还测量钙钛矿膜的时间分辨 PL(TRPL)光谱以了解其物理机理,如图 5(b)所示。使用 479 nm 的半导体激光



(a) 稳态 PL



(b) 不引入和引入 BAI 制备的钙钛矿薄膜的 TRPL 光谱
图 5 不同条件下 BAI 处理的钙钛矿薄膜的稳态 PL 和 TRPL 光谱

器激发钙钛矿薄膜,并监测 795 nm 处的发射。引入 1 mg BAI 后,钙钛矿膜的 PL 衰减变慢,薄膜表面的非辐射复合减少。这些结果表明,引入 BAI 后载流子复合中心显著减少,证明了 BAI 的缺陷钝化作用。

3 结论

本文将 BAI 和 BACl 引入到两步法钙钛矿的混合阳离子中,探讨了两种材料对钙钛矿太阳能器件性能的影响。研究表明,引入 1 mg BACl 的钙钛矿太阳能电池器件的光电转化效率比未加入 BAI 的器件效率有稍许提高,主要改变了器件的填充因子。引入不同含量的 BAI,发现引入 1 mg BAI 对器件的提升最大。综合分析表面形貌和发光性能可知,引入带有氨基基团的有机卤化物盐可以增大薄膜晶粒尺寸,减少晶界间的缺陷,减少了薄膜表面的非辐射复合,从而使得器件开路电压获得改善。这一策略有望为制备高质量钙钛矿薄膜提供新的方向。

参考文献:

[1] Anaraki E H, Kermanpur A, Steier L, et al. Highly efficient

and stable planar perovskite solar cells by solution-processed tin oxide[J]. *Energy & Environmental Science*, 2016, 9(10): 3128-3134.

[2] Jiang Q, Zhao Y, Zhang X, et al. Author Correction: Surface passivation of perovskite film for efficient solar cells [J]. *Nature Photon.*, 2019, 13(7): 460-466.

[3] Xue J, Wang R, Wang K L, et al. Crystalline liquid-like behavior: Surface-induced secondary grain growth of photovoltaic perovskite thin film [J]. *J. of the American Chemical Society*, 2019, 141(35): 13948-13953.

[4] Priyanka R, Numeshwar K S, Sanjay T, et al. A review on perovskite solar cells: Evolution of architecture, fabrication techniques, commercialization issues and status [J]. *Solar Energy*, 2020, 198: 665-688.

[5] Yang M, Zhang T, Schulz P, et al. Facile fabrication of large-grain $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Br}_x$ films for high-efficiency solar cells via $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Br}$ -selective Ostwald ripening [J]. *Nature Commun.*, 2016, 7: 12305.

[6] Ummadisingu A, Steier L, Seo J Y, et al. The effect of illumination on the formation of metal halide perovskite films [J]. *Nature*, 2017, 545(7653): 208-212.

[7] Yang S, Dai J, Yu Z H, et al. Tailoring passivation molecular structures for extremely small open-circuit voltage loss in perovskite solar cells [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2019, 141(14): 5781-5787.

[8] Zheng X, Chen B, Dai J, et al. Defect passivation in hybrid perovskite solar cells using quaternary ammonium halide anions and cations [J]. *Nature Energy*, 2017, 2: 17102.

[9] Liu Y, Yang Z, Cui D, et al. Two-inch-sized perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ ($X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) crystals: growth and characterization [J]. *Adv. Mater.*, 2015, 27(35): 5176-5183.

[10] Zhao Y C, Zhou W K, Ma W, et al. Correlations between immobilizing ions and suppressing hysteresis in perovskite solar cells [J]. *ACS Energy Lett.*, 2016, 1(1): 266-272.

[11] Wang F, Geng W, Zhou Y, et al. Phenylalkylamine passivation of organolead halide perovskites enabling high-efficiency and air-stable photovoltaic cells [J]. *Adv. Mater.*, 2016, 28: 9986-9992.

[12] Fan Y Y, Fang J J, Chang X M, et al. Scalable ambient fabrication of high-performance CsPbI_2Br solar cells [J]. *Joule*, 2019, 3(10): 2485-2502.

[13] Bi D, Tress W, Dar M I, et al. Efficient luminescent solar cells based on tailored mixed-cation perovskites [J]. *Science Advances*, 2016, 2(1): e1501170.

[14] Shi D, Adinolfi V, Comin R, et al. Low trap-state density and long carrier diffusion in organolead trihalide perovskite single crystals [J]. *Science*, 2015, 347(6221): 519-522.

作者简介:

冯晓娜(1993—),女,山西临汾市人,硕士,主要从事光电子材料与器件方面的研究。

基于超材料的太赫兹超窄带吸收器设计及特性分析

沈 涛, 潘 武*, 李 燚, 张雪雯

(重庆邮电大学 光电工程学院, 重庆 400065)

摘 要: 提出了一种基于金属环结构的太赫兹超窄带吸收器,其结构单元为典型的金属-介质-金属结构,顶层金属图案由封闭金属环和四开口金属环组成,底层为连续金属板。对该吸收器的窄带吸收原理和吸收峰频率处吸收器结构的表面电流分布进行了研究。结果表明:该吸收器在 1.768 2 THz 处存在狭窄的吸收峰,吸收率为 99.8%,相对于该谐振频率的半高全宽为 0.51%,而且对 x 和 y 极化入射波具有极化不敏感。该吸收器具有结构简单、易于加工的优点,在生物传感、窄带热辐射和光电探测等领域有着重要的潜在应用价值。

关键词: 太赫兹; 超材料; 窄带吸收器

中图分类号: O441; TB34 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0648-04

Design and Characteristics Analysis of Terahertz Ultra-narrow Band Absorber Based on Metamaterial

SHEN Tao, PAN Wu, LI Yi, ZHANG Xuewen

(College of Photoelectric Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN)

Abstract: A terahertz ultra-narrow band absorber based on metal ring structure is proposed. The unit cell of the absorber adopts typical metal-dielectric-metal structure, the top metal pattern consists of closed metal ring and four-split metal ring, and the bottom layer is continuous metal plate. The narrow band absorption principle of the absorber and the surface current distribution of the absorber structure at the absorption peak frequency were studied. The research shows that the absorber possesses a narrow absorption peak at 1.768 2 THz, the absorption is 99.8%, the full width at half maximum relative to the resonance frequency is 0.51%, and it is polarization insensitive to the polarization of x and y incident waves. The absorber characterized by simple structure and easy processing has potential application value in bio-sensing, narrow band thermal radiation and photoelectric detection.

Key words: terahertz; metamaterial; narrow band absorber

0 引言

电磁超材料(Metamaterial)是一种具有非常规电磁特性的人工媒质,其结构一般由亚波长尺寸的阵列单元组合构成。超材料研究初期主要应用于微波和光波段器件,因其具有负折射率^[1]、类电磁诱导透明效应^[2]、电磁隐身^[3]等自然媒质不具备的奇异特性,引起国内外研究人员的广泛关注。随着太赫

收稿日期:2020-06-02.

* 通信作者:潘 武 E-mail: panwu@cqupt.edu.cn

兹技术的发展,超材料也被用于太赫兹功能器件的设计,如太赫兹吸收器^[4]、极化转换器^[5]和传感器^[6]等,而其中太赫兹吸收器因在太赫兹成像、光电探测和无损传感等方面具有重要应用,成为太赫兹领域的研究热点之一。

2015年,Riad Yahiaoui^[7]所在团队基于Mie谐振效应设计了一种双频段的太赫兹窄带吸收器,该吸收器在0.54和0.73 THz处的吸收率分别为77%和97%。2017年,Arnab Pattanayak^[8]所在团队基于圆环结构设计了一种太赫兹超材料窄带吸收

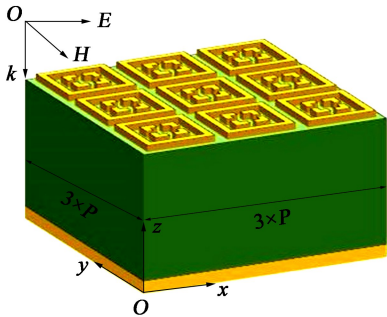
器,其由三个垂直堆叠且半径从上到下递增的金属圆环、介质材料和石英基底组成,在 0.657 THz 处存在吸收率为 95% 的吸收峰。2020 年,Min Zhong^[9]所在团队基于亮-亮模式耦合效应设计了一种太赫兹窄带吸收器,其在 3.42 THz 处的吸收率为 92%,相对于谐振频率的半高全宽(FWHM/ f_0)为 2.9%,品质因数为 34,其中 FWHM 为半高全宽(Full Width at Half Maximum,FWHM), f_0 为吸收器的谐振频率。

本文基于金属环结构提出一种极化不敏感的超材料太赫兹超窄带吸收器,其单元结构由顶层金属图案、中介质层和底层金属板组成。该吸收器在 1.768 2 THz 处的吸收率为 99.8%,吸收率大于 90% 的带宽为 0.003 THz,相对于谐振频率的半高全宽为 0.51%。

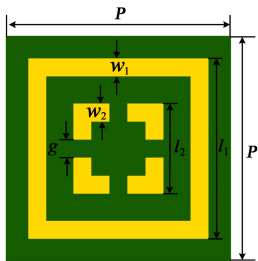
1 吸收器结构

本文设计的超材料太赫兹吸收器采用的是典型的金属-介质-金属结构,顶层结构由方环和开口方环金属薄片构成。顶层金属图案和底层金属板的材料为金(Au),电导率为 4.561×10^7 S/m,中介质层的材料为二氧化硅(SiO_2)。

吸收器的单元结构如图 1 所示,其周期为 $P=160.0\text{ }\mu\text{m}$,外金属方环的边长为 $l_1=120.0\text{ }\mu\text{m}$,内金属开口方环的边长为 $l_2=45.0\text{ }\mu\text{m}$,开口大小为



(a) 吸收器 3×3 阵列图



(b) 顶层结构



(c) 单元结构横截面示意图

图 1 超材料吸收器结构示意图

$g=10.0\text{ }\mu\text{m}$,金属环的宽度为 $w_1=w_2=10.0\text{ }\mu\text{m}$,顶层金属 Au 的厚度为 $t=0.2\text{ }\mu\text{m}$,介质层的厚度为 $h_1=60.0\text{ }\mu\text{m}$,底层金属板的厚度为 $h_2=0.2\text{ }\mu\text{m}$ 。

2 吸收特性分析

利用 CST Microwave Studio 2017 软件对该太赫兹吸收器的吸收特性进行数值仿真分析。网格剖分选择有限元法, x 和 y 方向设置为 unit cell 边界, z 方向为开放边界条件。 x 方向极化的太赫兹波沿 $-z$ 轴方向垂直入射到吸收器表面,如图 2 所示。其中 $E_{ix},E_{rx},E_{tx},E_{ry},E_{ty}$ 分别表示 x 方向极化的入射波、反射波、透射波和 y 方向极化的反射波与透射波。由于该吸收器利用的超材料结构存在一定的极化转换,所以这里考虑 E_{ry} 和 E_{ty} 。吸收器的吸收率可以表示为 $A(\omega)=1-R(\omega)-T(\omega)$,其中 $R(\omega)$ 表示反射率, $T(\omega)$ 表示透射率。当金属底板的厚度远大于其在太赫兹频带的趋肤深度时,吸收器的透射率几乎为 0,吸收率公式可以简化为 $A(\omega)\approx 1-R(\omega)$ ^[10]。

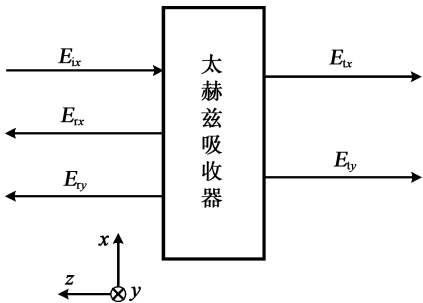


图 2 太赫兹波入射到吸收器表面示意图

从图 3 所示的仿真结果可以看出,当 x 方向极化太赫兹波沿 $-z$ 方向垂直入射到吸收器表面时,非谐振频率处的大部分电磁波能量被反射,并且反射波和透射波中的极化转换几乎不存在。谐振频率 1.768 2 THz 处的电磁波能量与吸收器相互作用,大部分的能量被吸收,只有很少的能量被反射,说明该吸收器对此频率的太赫兹波实现了较完美的吸收。谐振频率处吸收器的反射率很低的原因是吸收器的阻抗与自由空间的阻抗相匹配^[11]。

当 x 方向极化的太赫兹波垂直入射到吸收器表面时,吸收器的吸收率、反射率和透射率的仿真结果如图 4 所示。该吸收器在谐振频率 $f=1.768\text{ 2 THz}$ 处存在一个吸收率为 99.8% 的狭窄吸收峰,并且吸收率大于 90% 的带宽为 0.003 THz,相对于谐振频率的半高全宽为 0.51%,品质因数为 196。

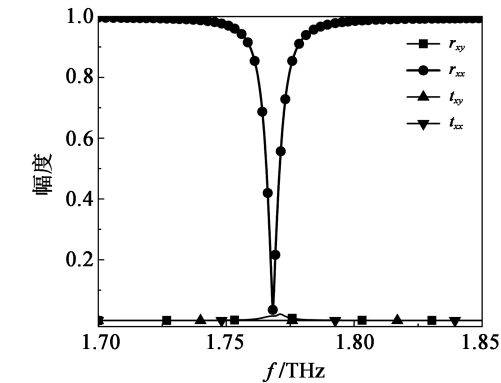


图3 吸收器的反射波和透射波幅度仿真结果

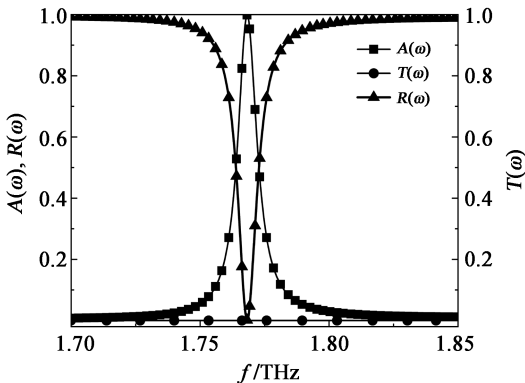


图4 吸收器的吸收率、反射率和透射率仿真结果

在设计太赫兹吸收器时,需要考虑入射波极化变化对太赫兹吸收器吸收特性的影响。仿真分析得到不同极化方向的太赫兹波垂直入射到该吸收器时的透/反射曲线,如图5所示,可以看出:入射太赫兹波分别为 x,y 两极化方向时,该吸收器的吸收率和谐振频率没有变化,这说明其对于 x 和 y 极化入射波具有极化不敏感特性。该吸收器极化不敏感源于单元结构的对称性^[12]。

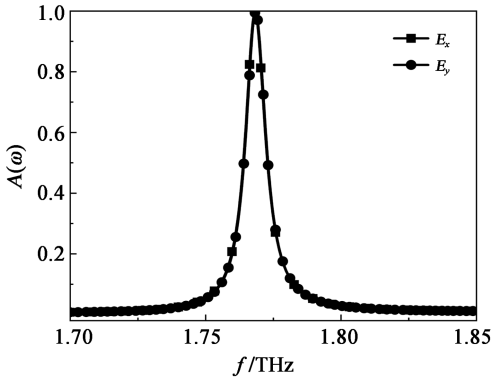
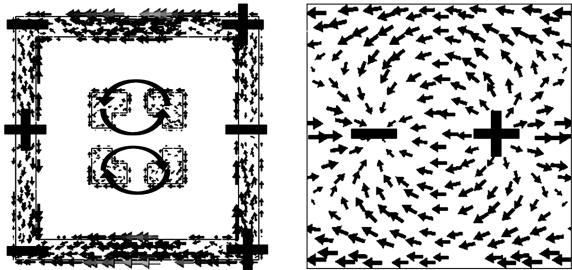


图5 不同极化方向的电磁波垂直入射吸收器的吸收率

可以通过分析谐振频率处该吸收器顶层表面和底层表面的电流分布来研究吸收器的窄带吸收工作机理。图6为CST软件仿真得到的该吸收器的表

面电流分布。当 x 方向极化的太赫兹波垂直入射到超材料吸收器表面时,金属图案被入射电场激励,外金属环产生电六极子^[13]谐振,其中沿着 x 轴方向的金属臂产生的谐振更强一些。内开口金属环的电流分布为两个方向相反的环形电流,内开口金属环在入射电场的激励下形成两个磁偶极子谐振,从而增强入射电磁波与介质的相互作用,最终增大了吸收器的吸收率。底层连续金属板与入射电场相互作用产生的感应电流如图6(b)所示,属于典型的电偶极子谐振。顶层金属图案中间位置可以看作是底层金属板电流方向相反的偶极子谐振,这将形成强烈的磁谐振,使入射的电磁波能量被损耗。入射电磁波与超材料吸收器之间相互作用产生的磁谐振致使吸收器的吸收率接近100%。



(a) 顶层金属图案电流分布 (b) 底层连续金属板电流分布
图6 $f=1.7682\text{ THz}$ 处吸收器的表面电流分布

3 结构参数变化对吸收性能的影响

3.1 介质层厚度 h_1 对吸收率影响

通过控制变量法,保持其他参数不变,只改变介质层厚度的方法来研究介质层厚度对吸收器吸收性能的影响。图7给出了不同介质层厚度下该吸收器的吸收率数值仿真结果,介质层的厚度 h_1 从 $59.0\text{ }\mu\text{m}$ 按照 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 的步长变化到 $61.0\text{ }\mu\text{m}$,吸收器的谐振频率出现红移,从最开始的 1.7774 THz

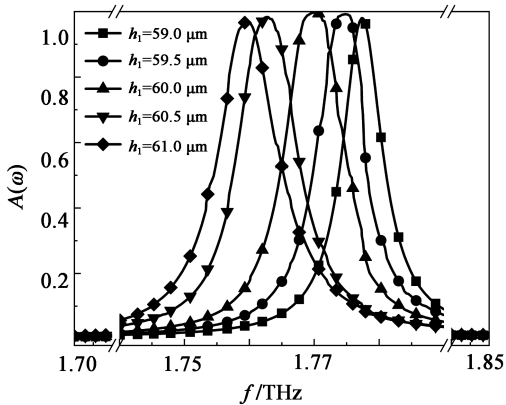


图7 不同介质层厚度情况下吸收率的仿真结果

变为 1.759 8 THz,吸收率变化很小,相对于谐振频率的半高全宽几乎不变。这是因为随着介质层厚度的变化,顶层金属图案与底层金属板之间的磁谐振发生变化,从而引起谐振频率的变化,可以看出介质层的厚度能够影响吸收器的谐振频率。

3.2 单元结构周期 P 对吸收率的影响

因为吸收器单元结构之间的间隙宽度会影响两个结构单元之间的耦合效应^[14],所以下面研究单元结构周期 P 的变化对吸收器性能的影响。在保持其他参数不变的条件下,将单元结构周期 P 从 158.0 μm 按照 1.0 μm 步长逐渐变化到 162.0 μm ,得到吸收器的吸收率曲线,如图 8 所示。随着单元结构周期逐渐变大,吸收器的吸收曲线出现一定程度的红移,谐振频率从 1.786 9 THz 变为 1.748 5 THz,吸收率出现轻微的浮动,相对于谐振频率的半高全宽存在很小的差异。这是由于 P 的变化会引起相邻单元结构金属臂之间的电容效应,从而导致吸收器的谐振频率发生变化。可以看出单元结构周期能够影响吸收器的谐振频率,与介质层的厚度对谐振频率的影响相比,单元结构周期的影响效果更显著。

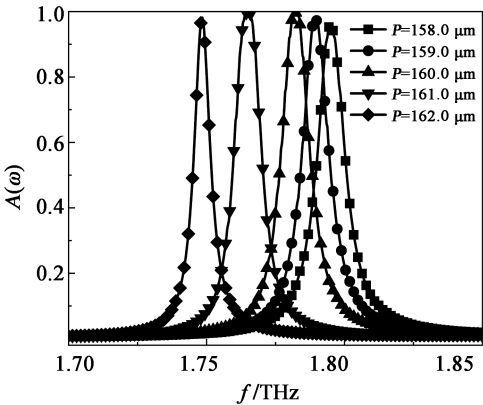


图 8 不同单元结构周期下吸收率的仿真结果

3.3 外金属环尺寸 l_1 吸收率的影响

改变吸收器外金属环的尺寸,使 l_1 由 118.0 μm 按照 1.0 μm 的步长变化到 122.0 μm ,得到吸收器的吸收曲线如图 9 所示。可以看出,随着外金属环尺寸 l_1 的逐渐增加,吸收器的吸收曲线出现蓝移现象,吸收率几乎没有改变,吸收曲线的半高全宽也没有明显变化,这说明外金属环的变化主要影响吸收器的谐振频率,因为随着外金属环尺寸的增加,金属结构之间的电容效应发生变化,从而引起吸收器的谐振频率变化。

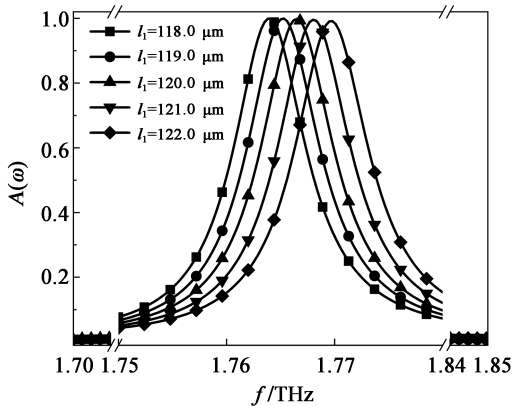


图 9 不同外金属环尺寸下吸收率的仿真结果

4 结论

本文基于封闭金属环和四开口金属环组合结构设计了一种太赫兹超窄带吸收器,其在太赫兹波段内对于 x 和 y 极化入射波具有极化不敏感特性。通过数值仿真可知,该吸收器在 1.768 2 THz 处存在一个狭窄的吸收峰,吸收率达到 99.8%,吸收率大于 90%的带宽为 0.003 THz,相对于谐振频率的半高全宽为 0.51%,品质因数为 196。通过分析吸收器在谐振频率处的表面电流分布,该吸收器的窄带吸收可归因于顶层外金属环和底层金属板在入射电场激励下形成的磁谐振与内金属四开口环磁偶极子谐振。与现有的窄带吸收器相比,本文的吸收器具有结构简单、易于加工的优点。该太赫兹窄带吸收器在高灵敏度传感和窄带热辐射领域具有重要应用前景。

参考文献:

[1] Wong Z J, Wang Y, O'Brien K, et al. Optical and acoustic metamaterials: superlens, negative refractive index and invisibility cloak[J]. J. Opt., 2017, 19(8): 084007.

[2] Diao J, Han B, Yin J, et al. Analogue of electromagnetically induced transparency in an S-shaped all-dielectric metasurface [J]. IEEE Photon. J., 2019, 11(3): 1-10.

[3] Zhao G, Bi S, Niu M, et al. A zero refraction metamaterial and its application in electromagnetic stealth cloak[J]. Mater. Today Commun., 2019, 21: 100603.

[4] Xu R, Liu X, Lin Y S. Tunable ultra-narrowband terahertz perfect absorber by using metal-insulator-metal microstructures[J]. Results in Phys., 2019, 13: 102176.

[5] Li C, Chang C C, Zhou Q, et al. Resonance coupling and polarization conversion in terahertz metasurfaces with twisted split-ring resonator pairs[J]. Opt. Express., 2017, 25(21): 25842-25852.

(下转第 657 页)

高灵敏度多模干涉-异质无芯光纤折射率传感器

杨宏艳^{1,2}, 刘孟银¹, 李叶柯¹, 陈昱澎¹, 肖功利^{3*},
邓洪昌¹, 刘厚权¹, 滕传新¹, 陈明¹, 徐荣辉¹, 苑立波¹

(桂林电子科技大学 1. 电子工程与自动化学院; 2. 广西自动检测技术与仪器重点实验室;
3. 广西精密导航技术与应用重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 基于多模干涉理论和自映像效应,设计了一种高灵敏度多模干涉-异质无芯(SNS)光纤折射率传感器。利用纤芯失配在包层激发的高阶模与无芯光纤中产生的基模耦合产生多模干涉来实现其对折射率的传感测量。应用波束传播法(BPM)数值模拟了传感器在不同折射率条件下光的透射谱,讨论了无芯光纤的长度及外部环境折射率等参数对传感器性能的影响。通过无芯光纤 SNS 结构传感器的样品制备,测试了多组不同浓度蔗糖溶液下的透射谱,实验结果与数值模拟结果一致。结果表明:在折射率 1.330~1.419 范围内,透射谷的波长灵敏度达到 189 nm/RIU,透射率灵敏度达到-40%/RIU。

关键词: 单模-多模-单模;多模干涉;无芯光纤;折射率传感器;光纤光学

中图分类号: TP212.9 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0652-06

High Sensitivity Multi-mode Interference Heterojunction Coreless Optical Fiber Refractive Index Sensor

YANG Hongyan^{1,2}, LIU Mengyin¹, LI Yeke¹, CHEN Yupeng¹, XIAO Gongli³, DENG Hongchang¹,
LIU Houquan¹, TENG Chuanxin¹, CHEN Ming¹, XU Ronghui¹, YUAN Libo¹

(Guilin University of Electronic Science and Technology 1. School of Electronic Engineering and Automation;
2. Guangxi Key Laboratory of Automatic Testing Technology and Instrument;
3. Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application, Guilin 541004, CHN)

Abstract: Based on the theory of multimode interference and self-imaging effect, a high sensitivity multimode interference-heterocoreless (SNS) fiber optic refractive index sensor was designed. The multimode interference is generated by the core mismatch between the cladding excited high order mode and the fundamental mode coupling in the coreless fiber to realize the sensing measurement of refractive index. The beam propagation method (BPM) was used to simulate the transmission spectrum of the sensor under different refractive index conditions, and the influence of the length of the coreless fiber and the refractive index of the external environment on the performance of the sensor was discussed. The transmission spectra of sucrose solution with different concentrations were measured by the preparation of a coreless fiber SNS

structure sensor, and the experimental results were consistent with the numerical simulation results. The results show that, in the range of refractive index of 1.330~1.419, the wavelength sensitivity of transmission valley reaches 189 nm/RIU, and its transmittance sensitivity

收稿日期:2020-04-19.

基金项目:国家自然科学基金项目(61765004,61827819, 61535004,61705050);广西自动检测技术与仪器重点实验室主任基金项目(YQ18110,YQ20115);广西自然科学基金项目(2016GXNSFAA380006,2017GXNSFAA198164).

*通信作者:肖功利 E-mail: xgl.hy@126.com

reaches $-40\%/RIU$.

Key words: single mode-multiple mode-single mode; multimode interference; no-core fiber; refractive index sensor; fiber optics

0 引言

传感技术是信息产业中与通信技术和计算机技术并重的三大支柱产业之一,广泛应用于国防安全、生物传感、医药化工、食品安全和环境监测等领域。自 20 世纪 70 年代以来,光纤传感器作为一种基于光导纤维的新型传感器件,因其体积小、重量轻、抗电磁干扰、耐高温高压及耐腐蚀等优点而引起广泛关注^[1-4]。光纤传感器是以光作为传递敏感信息的媒质,利用光波信号与媒质相互作用来感知自然界的不同物理量,如周围环境折射率、湿度、曲率、应力等传感参量的变化,以实现光源发出的输入信号的调制,使得光纤内传输光的特征参量,如强度、相位、波长和偏振态等物理量发生改变,通过探测器接收和处理分析调制信号的特征参量与被测物理量的关系,实现对光信号的解调,进而实现光纤传感。

自 1997 年 Donlagic 等^[5]提出将单模-多模-单模(SMS)光纤结构应用于传感的想法以来,对 SMS 结构传感器的研究大量涌现^[6-8]。SMS 结构基于多模干涉和自映像效应的异质芯熔接的传感器,因其结构简单,成本低,抗电磁干扰及灵敏度高等优点,近年来被广泛用于折射率、温度、应变等的传感测量。目前,基于多模干涉的异质无芯光纤折射率传感器逐渐成为光纤传感领域的研究热点。2004 年, Mohammed 等^[9]在 SMS 结构上写入光纤光栅,利用反射耦合到输出包层中的高阶模式,通过检测包层模式的布拉格波长漂移进行折射率传感。这种方法得到的折射率传感器灵敏度相对较低,只有 $7.33\text{ nm}/RIU$ 。2008 年 Wang 等^[10]通过腐蚀的方法将 SMS 结构中的包层腐蚀掉。但这种腐蚀方法不易操作且难以精确控制,既易导致光纤表面粗糙,又易降低光纤的机械强度,因而不利于后续熔接和实际应用。近年来对光纤传感的研究主要集中在以下几个领域:如通过制备新型结构的特种光纤或构造新颖的微结构光纤来进行 SPR 传感,以及利用常规的物理实验技术,如物理熔接、化学腐蚀、火焰拉锥、错位熔接等方式通过激发包层模来实现芯模-包层模的干涉,以实现光纤传感。已有报道的光纤折射率传感器包括以下几种^[11-16]: 光纤布拉格光栅

(FBG)、长周期光纤光栅(LPG)、表面等离子体共振(SPR)、微纳光纤传感器、法布里-珀罗干涉仪(F-P)和光子晶体光纤(PCF)传感器等。这些传感器在加工工艺、测量范围和灵敏度上各有优点,但是这些结构的传感器大都存在诸如在测量折射率范围为 $1.3\sim 1.4$ 的液体时灵敏度不理想、设备要求较高、加工结构复杂、成本过高、不利于大规模集成应用等缺点。基于以上分析,本文提出了基于多模干涉的异质结构传感器,采用无芯光纤代替多模光纤,可大大减少因化学腐蚀带来的各种问题,增加可重复性,并有效提高传感灵敏度、拓展其应用范围。利用多模干涉理论,结合大芯径无芯光纤替代传统多模光纤,采用光纤单模-无芯(NCF)-单模结构,通过激发单模光纤的包层模来实现芯模-包层模的多模干涉。该折射率传感器以外界环境介质作为包层,利用其对环境折射率的敏感特性,通过感知外界溶液折射率的变化所引起的多模干涉的改变,使得光波能量重新分配,从而实现对环境折射率的传感。

1 传感原理与数值仿真

1.1 传感器工作原理

光纤是圆柱状的介质光波导,当入射光在单模光纤中传输时,能量集中在纤芯部位,纤芯只在基模中传输。当光由单模传输到多模时,在其连接处激励起多个高阶模式沿着多模(无芯)光纤传输。由于各个模式具有不同的传输常数,因此在多模光纤内会产生多阶干涉,引起能量的重新分布,这就是多模干涉效应。在 SMS 结构中,由于多模干涉效应,多模光纤中的光场将沿轴线在传播方向上产生周期性变化。当多模光纤的长度和入射波长满足一定条件时,在某一特定位置会出现与入射光相位和振幅基本相同的光场分布,这种现象就是自映像效应。图 1 所示为本文提出的一种基于多模干涉和自映像效应的光纤折射率传感器。它是在一段半径为 $62.5\text{ }\mu\text{m}$ 的无芯光纤(NCF)两边各熔接一段纤芯为 $8.2\text{ }\mu\text{m}$ 的单模光纤(SMF),就构成了一个无芯光纤 SNS 结构的传感器。由于 SMF 和 NCF 结构参数不同,SMF 中的基模传输到 NCF 中时会激发出 NCF 中一系列的高阶模式,并在无芯光纤中传播,

进而发生干涉,引起能量的重新分布,产生周期性的光焦点,即自映像效应。在光纤结构参数不变的情况下,沿光纤传播方向上有特定的能量分布。当入射光波一定时,波长与能量之间存在一一对应关系,即特定的光透射谱。由于不同模式之间发生干涉,在特定波长处将出现能量的极大值或极小值,即在透射谱中表现出干涉波峰或波谷。

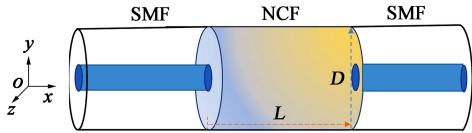


图1 无芯光纤 SNS 结构示意图

设 SMF 和 NCF 是同轴无偏心对接,由于 NCF 本身结构的中心对称性,NCF 中只有线偏振 LP_{0m} 模式被激发。设从 SMF 输入的光场为 $E(r,0)$,NCF 中第 m 阶模式的光场为 $F_m(r)$,根据电磁场的连续性条件,输入端 SMF 和 NCF 连接处满足:

$$\int_0^x |E(r,0)|^2 r dr = \int_0^x |E_m(r)|^2 r dr, m=1,2,\cdots$$

(1)

$$E(r,0) = \sum_{m=1}^N c_m F_m(r)$$

(2)

式中, N 为 NCF 中的总模式数, c_m 是 c 阶模式的激发系数,可由下式得到:

$$c_m = \frac{\int_0^\infty E(r,0) F_m(r) dr}{\int_0^\infty F_m(r) dr}$$

(3)

$$E(r,z) = \sum_{m=1}^N c_m F_m(r) \exp(j\beta_m z)$$

(4)

式中, β_m 为第 m 阶模式的纵向传播常数。

最后,光场从 NCF 耦合进入单模光纤后输出,其透射率可以由下式得到:

$$T = 10\lg \left\{ \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N c_m c_n^* E_m(r) E_n^*(r) \cdot \exp[j(\beta_m - \beta_n)z] \right\}$$

(5)

m 阶模和 n 阶模的纵向传播常数之差为

$$\beta_m - \beta_n = \frac{\mu_m^2 - \mu_n^2}{2k \cdot \alpha^2 \cdot n}$$

(6)

式中, α 是无芯光纤的半径, k 是波数, n 是无芯光纤基模的有效折射率, μ_m 和 μ_n 是归一化横波数。由于干涉条件可知当两波相位相差 2π 的整数倍时发生相长干涉,产生与入射光幅度相同的光场,即自映像

效应。在无芯光纤 SNS 结构中,周围介质相当于无芯光纤的包层。随着外界折射率的变化,基模的有效折射率发生变化,导致各基模的激励系数发生变化。最后,无芯光纤 SNS 结构形成的透射光谱会随着外界折射率的变化而变化。

透射光谱的峰值波长可以表示为

$$\lambda_{\text{peak}} = \frac{P \cdot n \cdot D^2}{L}$$

(7)

式中, P 为自映像周期数, L 为无芯纤芯长度, D 为其直径, n 为其折射率。可以看出,当 L , D 以及 n 发生改变时,无芯光纤内光场发生变化,自映像周期也发生变化。因此,在无芯光纤中,各阶传输导模的光传输损耗不同,输出的单模光纤的光波长也不同。

1.2 数值模拟

本文采用 Rsoft 软件中的光束传播模块 (BeamPROP)对无芯光纤 SNS 结构进行了数值仿真。模拟的基本参数如表 1 所示。对传感器的数值计算方法主要使用的是光束传播法(BPM)。

表 1 光纤参数

光纤	纤芯折射率	包层折射率	纤芯半径/ μm
SMF	1.468 2	1.462 8	8.2
NCF	1.444 0	1.330 0~1.418 5	62.5

图 2 所示为模拟出的光纤内部光场幅度分布和光纤中心区的功率,从内部光场图可以看到,当光在单模光纤中传输时,能量主要集中在纤芯内。当光传输到多模部分时,由于模场的不匹配,激发出多个模式,不同的模式在光纤内发生干涉,形成能量的叠加或削弱。在图中可以看到 3 个干涉的极值点和周期性传导现象,即自映像现象。3 个自映像周期的总长大约为 47.9 mm,自映像周期大约为 14.7 mm。为了研究传感器的输出特性,需要确定 NCF 的长度。一般情况下,为了使 SMF 中的光功率更有效地耦合到 NCF 中输出,通常选取自映像长度的整数倍作为 NCF 的长度。这里选取两倍的自映像周期长度作为 NCF 的长度。

图 3 给出了不同的外部环境条件下传感器的光透射谱理论模拟图。当外部环境的折射率 n 在 1.33~1.39 范围内变化时,由图 3 可知,随着折射率的增大,光透射谱的峰值波长向着长波方向线性地移动,这与理论推导的结果相一致。另外,光透射谱的峰透射率 T 有规则地逐渐减少。而且还可以看出,折射率越高的地方,相同折射率差值下峰值波长移动的距离增大,这表明折射率越大处,传感器的

灵敏度也会越高,如图 4 所示。

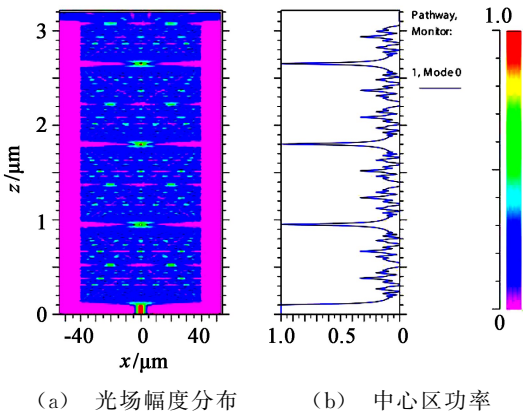


图 2 光纤内部光场幅度分布和光纤中心区的功率

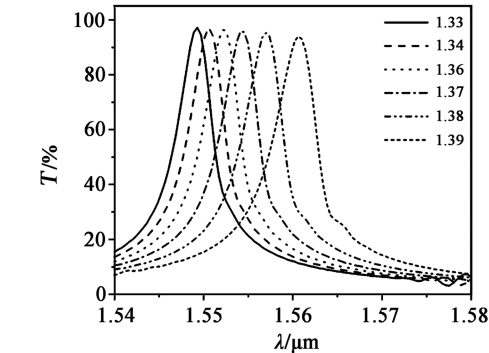


图 3 不同环境折射率下透射光谱理论模拟图

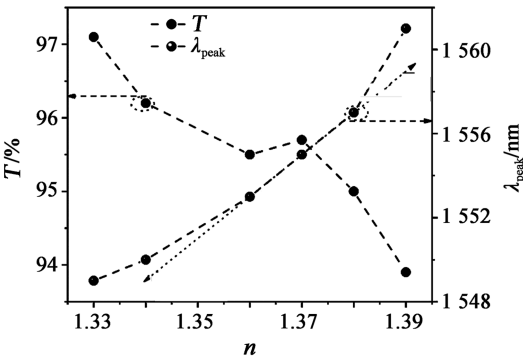


图 4 透射峰波长和透射率与环境折射率的关系

为分析不同无芯光纤长度对传感器性能的影响,

表 2 蔗糖浓度与折射率对应关系

蔗糖浓度/%	0	10	20	25	30	35	40	45	50
折射率	1.330	1.348	1.351	1.362	1.370	1.389	1.395	1.411	1.419

实验装置示意图如图 6 所示,传感器一端连接宽带光源,另一端连接光谱仪。实验采用的宽带光源为安扬激光生产的 SC-5-FC 超连续光谱激光。将制作好的传感器固定在载玻片上,接入光路时,将整个传感器绷直,以防止光纤弯曲对测量结果产生影响。打开超连续光谱光源和光谱仪,记录光谱仪在不同折射率溶液下的实验数据。

响,选择两个无芯光纤的长度分别为 3 与 6 cm 进行数值仿真,得到不同折射率与光透射峰波长变化关系,如图 5 所示。可以看出两个长度的折射率与峰波长变化趋势基本一致(斜率为 0.236 98),见黄色背景部分。由前面所述原理可知,无芯光纤中的自映像距离主要与光纤的有效折射率和直径有关。所以当只改变无芯光纤的长度而不改变其他参数时,在光波传输方向上自映像距离不变,传感器的灵敏度也基本保持不变。但随着光纤长度的变化,光场能量分布也不同,最终耦合进单模光纤的光强也会不同,因此可以选择合适的无芯光纤长度来获得理想的输出光能量。

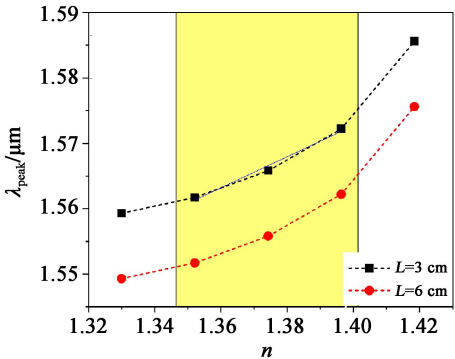


图 5 不同无芯光纤长度下透射峰波长与环境折射率的关系

2 实验结果与分析

2.1 无芯光纤 SNS 结构传感实验研究

为了验证基于无芯光纤 SNS 结构折射率传感器的传感性能,利用光纤熔接机在一段无芯光纤两端熔接了一段单模光纤来制备 SNS 结构。在常温下配置了不同浓度的蔗糖溶液,并利用阿贝折射仪对其折射率进行了标定,完成不同折射率的溶液配置。蔗糖浓度与折射率的对应关系如表 2 所示。

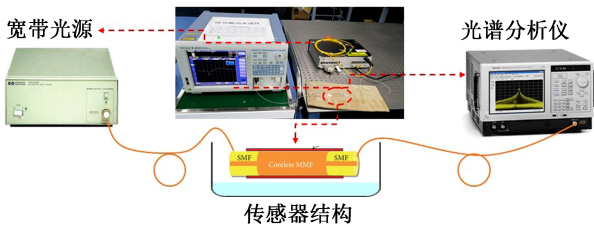


图 6 实验装置示意图

2.2 结果分析

图 7 给出了不同折射率条件下透射光谱实验测量图。从图中可以看出,随着外界蔗糖溶液折射率的增加,特征波长即透射谷向长波方向移动,这与前面仿真的结果相一致。另外,透射谷的透射率有规则地减少。本文采用透射谷的波长(λ_{dip})和透射率(T_{dip})与外部环境折射率变化(Δn_s)进行传感器灵敏度分析^[16],其相应的灵敏度单位分别为 nm/RIU 和 %/RIU。

$$S(\lambda)=\frac{\Delta\lambda_{\text{dip}}}{\Delta n_s}\tag{8}$$

$$S(T)=\frac{\Delta T_{\text{dip}}}{\Delta n_s}\tag{9}$$

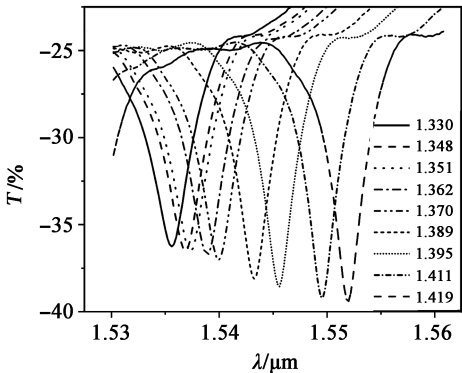


图 7 不同折射率条件下透射光谱实验测量图

图 8 为透射谷波长及其透射率与折射率关系图。从图中可以发现,当外部环境折射率在 1.330~1.419 范围逐渐变化时, λ_{dip} 和 T_{dip} 的值也会随之有规律地发生变化,本文对这两个参数进行线性拟合,拟合方程如下:

$$\begin{cases} \lambda_{\text{dip}}=189n_s-1283, & 1.330\leq n_s\leq 1.419 \\ T_{\text{dip}}=-40n_s+17, & 1.330\leq n_s\leq 1.419 \end{cases}\tag{10}$$

由拟合方程(10)可知,在折射率 1.330~1.419 的范围内,无芯光纤 SNS 结构传感器的谷波长灵敏度 $S(\lambda)$ 达到 189 nm/RIU,谷透射率灵敏度 $S(T)$ 达到 -40%/RIU。其调整后的 R^2 值分别达到 0.949 9 和 0.959 2,这也充分说明无芯光纤 SNS 结构传感器具有较高的灵敏度和较好的传感线性度。这是因为随着无芯光纤 SNS 结构倏逝波能量的非线性增强,环境折射率越接近无芯光纤的折射率,倏逝波的穿透深度越深,纤芯模式的有效折射率变化越大,相对应的灵敏度也越高。

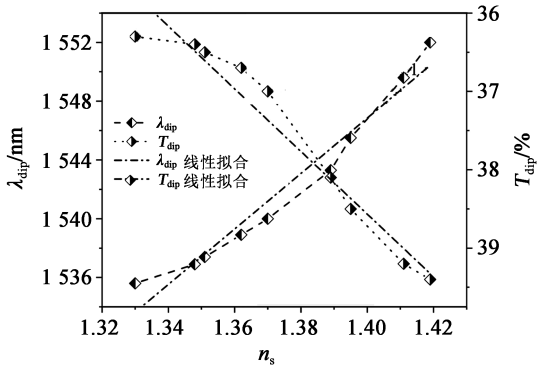


图 8 透射谷波长及其透射率与环境折射率的关系

3 结论

采用 Rsoft 仿真软件 Beamprop 模块对提出的多模干涉异质无芯光纤结构进行数值模拟,分析其内部光场幅度分布和光纤中心区的功率,讨论了无芯光纤的长度及外部环境折射率等参数对传感性能的影响。理论计算与实验证实了无芯光纤的长度不会影响传感器的灵敏度。根据理论分析与数值仿真,制备了基于无芯光纤 SNS 结构传感器样品,并测试了多组不同折射率的蔗糖溶液下的透射光谱。研究表明,当折射率在 1.330~1.419 范围内, $S(\lambda)$ 达到 189 nm/RIU, $S(T)$ 达到 -40%/RIU。该研究结果为丰富和发展高灵敏度无芯光纤折射率传感器提供了重要理论基础与实验依据。

参考文献:

[1] Hecht J, Long L. Understanding Fiber Optics[M]. 3rd Ed., New Jersey: Prentice Hall,1998.

[2] Davis C M. Fiber optic sensors: an overview[J]. Optical Engin., 1985, 24(2): 242347.

[3] Udd E. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists[M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1991.

[4] Dandridge A. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists[M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1991.

[5] Donlagic D, Zavrsnik M. Fiber-optic microbend sensor structure[J]. Opt. Lett., 1997, 22(11): 837-839.

[6] 刘 敏,冯德玖,冯文林. 基于无芯-多模-无芯光纤结构的硫化氢气体传感性质研究[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1-11.
Liu Min, Feng Dejiu, Feng Wenlin. Properties of hydrogen sulfide gas sensor based on no-core-multimode-no-core fiber structure[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1-11.

[7] 李 阳,刘 艳,刘志波,等. 基于单模-无芯-单模结构的光纤折射率传感器[J]. 光电子·激光, 2013, 24(7): 1279-1285.

Li Yang, Liu Yan, Liu Zhibo, et al. A refractive index sensor based on single-mode no-core single-mode fiber structure[J]. J. of Optoelectronics • Laser, 2013, 24(7): 1279-1285.

[8] 孙 浩, 忽满利, 乔学光, 等. 基于纤芯失配多模干涉的光纤折射率传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 104-108.

Sun Hao, Hu Manli, Qiao Xueguang, et al. Fiber refractive index sensor based on fiber core mismatch multimode interference[J]. Chinese J. of Lasers, 2012, 39(2): 104-108.

[9] Mohammed W S, Mehta A, Johnson E G. Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference[J]. J. of Lightwave Technol. , 2004, 22(2): 469-477.

[10] 许西宁, 陈雍君. 基于七芯光纤和少模光纤拼接结构的曲率传感测量[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 90-96.

Xu Xining, Chen Yongjun. Curvature sensing measurement based on seven-core fiber and few-mode fiber splicing structure [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 90-96.

[11] Handawi A K, et al. Strain based FBG sensor for real-time corrosion rate monitoring in pre-stressed structures [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 236: 276-285.

[12] 周兆帅, 董新永, 邵理阳. 错位熔接长周期光纤光栅横向压力传感器[J]. 中国计量学院学报, 2014, 25(3): 319-322.

Zhou Zhaoshuai, Dong Xinyong, Shao Liyang. Lateral force

sensor based on a core-offset long period fiber[J]. J. of China Jiliang University, 2014, 25(3): 319-322.

[13] Homola J. Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species[J]. Chemical Reviews, 2008, 108(2): 462-493.

[14] 黄晨辉, 秦 莉, 梁 浩, 等. 基于微纳光纤的布里渊折射率传感技术[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 1-11.

Huang Chenhui, Qin Li, Liang Hao, et al. Brillouin refractive index sensing technique based on micro-nano fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 1-11.

[15] Choi H Y, Park K S, Park S J, et al. Miniature fiber-optic high temperature sensor based on a hybrid structured Fabry-Perot interferometer[J]. Opt. Lett. , 2008, 33(21): 2455.

[16] W D K C, KuhlmeY B T, Eggleton B J. Ultrasensitive photonic crystal fiber refractive index sensor[J]. Opt. Lett. , 2009, 34(3): 322.

作者简介：

杨宏艳(1972—),女,博士,副研究员,主要研究方向为微纳光电子器件及光纤传感;

肖功利(1975—),男,博士,研究员,主要研究方向为纳米光子学及微纳光器件。

(上接第 651 页)

[6] Lee Y, Kim S J, Park H, et al. Metamaterials and metasurfaces for sensor applications[J]. Sensors, 2017, 17(8): 1726.

[7] Yahiaoui R, Hanai K, Takano K, et al. Trapping waves with terahertz metamaterial absorber based on isotropic Mie resonators[J]. Opt. Lett. , 2015, 40(13): 3197-3200.

[8] Pattanayak A, Roy S, Rana G, et al. Study of THz-plasmon hybridization of a loop Yagi-Uda absorber[J]. Sci. Rep. , 2017, 7(1): 16961.

[9] Zhong M, Jiang X, Zhu X, et al. Enhancement of a tunable single-band metamaterial absorber based on bright-bright modes coupling effect in terahertz range[J]. Phys. Scr. , 2020, 95: 035508.

[10] Huang M, Cheng Y, Cheng Z, et al. Based on graphene tunable dual-band terahertz metamaterial absorber with wide-angle[J]. Opt. Commun. , 2018, 415: 194-201.

[11] Wang J, Yang R, Xu J, et al. Polarization-controlled and flexible single-/penta-band metamaterial absorber [J].

Materials, 2018, 11(9): 1619.

[12] Li W, Cheng Y. Dual-band tunable terahertz perfect metamaterial absorber based on strontium titanate (STO) resonator structure [J]. Opt. Commun. , 2020, 462: 125265.

[13] Hu D, Wang H, Zhu Q. Design of six-band terahertz perfect absorber using a simple U-shaped closed ring resonator[J]. IEEE Photon. J. , 2016, 8(2): 1-8.

[14] Wang B X, He Y H, Lou P C, et al. Design of dual-band terahertz metamaterial absorber using two identical square patches for sensing application[J]. Nanoscale Adv. , 2020(1): C9NA00770A.

作者简介：

沈 涛(1996—),男,四川遂宁人,硕士生,研究方向为太赫兹超材料吸收器;

潘 武(1966—),男,四川大英人,博士,教授,主要从事太赫兹技术、超介质材料及应用研究。

一种面向大面阵焦平面阵列的低功耗多功能读出电路设计

撒鹏花^{1,2,3}, 乔辉^{1,2*}, 马丁^{1,2}, 谢晶^{1,2}, 李向阳^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;

3. 中国科学院大学 研究生院, 北京 100049)

摘要: 大面阵焦平面成像探测器需要具有随机开窗和反转读出功能,同时需要降低功耗。文章基于标准数字电路设计流程。设计了一种新型的基于格雷码编码规律的寻址计数器,用于对阵列的行地址和列地址进行寻址,提高了寻址的可靠性。对设计进行 RTL 级仿真,结果表明该设计能够实现任意开窗和反转读出功能。采用 TSMC90 工艺库对 1024×1024 阵列规模的 RTL 级设计进行分析计算,结果显示供电电压为 3.3 V 时,寻址计数器功耗仅为 $19.56 \mu\text{W}$,整体设计功耗仅为 $58.75 \mu\text{W}$,适用于大面阵焦平面读出电路的设计。

关键词: 格雷码; 任意开窗; 反转读出; 读出电路

中图分类号: TN215 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0658-05

A Low Power Multi-Function Readout Circuit for Large Format Focal Plane Array

SA Penghua^{1,2,3}, QIAO Hui^{1,2}, MA Ding^{1,2}, XIE Jing^{1,2}, LI Xiangyang^{1,2}

(1. State Key Lab. of Transducer Technol.; 2. Key Lab. of Infrared Imaging Materials and Detectors,

Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN;

3. Graduate School of University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: Dynamic windowing readout and image transposition are significant functions of large format focal plane imaging detector, and also it is necessary to realize low power consumption. Based on the standard digital circuit design process, a new counter based on Gray code was designed to access the row and column address. The RTL simulation results show that the proposed design can achieve the functions of dynamic windowing readout and dynamic image transposition. A TSMC 90-nm process with 3.3 V supply voltage was used to implement a 1024×1024 design, and it concluded that the power consumption of the addressing counter is only $19.56 \mu\text{W}$ and the overall design power is only $58.75 \mu\text{W}$. This design is suitable for the design of readout circuit of large format focal plane system.

Key words: Gray code; dynamic windowing readout; dynamic image transposition; ROIC

0 引言

随着图像处理技术的发展,大面阵图像传感器应运而生,面向大面阵焦平面应用的读出电路设计

收稿日期:2020-07-08.

基金项目:国家自然科学基金项目(61774162).

*通信作者:乔辉 E-mail: qiaohui@mail. sitp. ac. cn

面临新的挑战^[1-2]。任意开窗功能是提高读出电路帧频和检查坏点的有效方式,它使得用户能够按照需要选择性地读出阵列中的一片区域的信息。这种方式既允许高分辨率焦平面探测器全窗口工作,同时也能够按照要求只读出一部分区域的信息^[3]。反转读出功能也是受到关注的重要功能之一,反转读

出不仅可以减少片外系统的处理过程,而且可以满足各种不同光学系统的需求。由于光学系统的多样性,如果在读出一个窗口的像素信息时,按照常规的读出方式(从窗口最上面的行到最下面的行,从最左边的列到最右边的列),最终可能会得到一个反转了的图像。在片外系统中,如果对这个反转的图像进行处理,不可避免地要消耗大量的计算资源和存储资源。因此,需要在片内实现反转读出^[4-5]。

随着焦平面阵列规模越来越大,对任意开窗和反转读出功能的需求也越来越迫切。但是随着阵列规模的增加,实现这些功能的电路规模越来越大,复杂度也越来越高,功耗也随之增加,传统的从晶体管级设计读出电路数字模块变得越来越困难。标准数字电路设计流程是目前大规模数字电路设计常用的方法,其基本过程是将需要设计的抽象的算法或功能用寄存器传输级(RTL)语言描述,然后在指定工艺库下,由综合工具根据 RTL 级语言生成具有对应功能门级网表,并分析计算设计的面积和功耗,最后由版图工具将网表转换为可用于制造的 GDSII 文件。面向大面阵焦平面读出电路的应用,本文基于标准数字电路设计流程实现任意开窗和反转读出功能。

格雷码是一种可靠性编码,常被用于一些寻址的数字电路设计中,例如 FIFO。在常规的读出电路数字模块的设计中,寻址计数器按照二进制的形式递增或递减,地址值按照二进制转格雷码的规则,再转换成对应的格雷码地址,进而对焦平面阵列的行地址和列地址进行寻址^[6-7]。本文提出了按照格雷码编码规律递变的寻址计数器,将其应用于任意开窗和反转读出的设计中。该寻址计数器充分发挥了格雷码用于寻址时的可靠性,同时与二进制的寻址计数器相比,基于格雷码的计数器功耗降低一半,适用于大面阵阵列的读出电路设计。

1 基于格雷码的寻址计数器设计

在读出电路的数字模块的设计中,当行地址计数器计数到某一行且列地址计数器计数到某一列时,该行列地址线上的行选开关和列选开关同时打开,一个像元的信息被读出。例如当行计数器计数值为 M ,列计数器计数至 N ,位于 M 行 N 列的像元信息会被读出^[8],读出寻址的实质就是行地址计数器和列地址计数器在不断计数,因此寻址计数器是读出电路数字模块的主要功耗来源。

格雷码在递变时,相邻的编码中只有一位会发生递变,表 1 给出了四位格雷码编码和二进制编码的对比^[9]。

表 1 二进制和格雷码编码对比

十进制	二进制	格雷码	十进制	二进制	格雷码
0	0000	0000	8	1000	1100
1	0001	0001	9	1001	1101
2	0010	0011	10	1010	1111
3	0011	0010	11	1011	1110
4	0100	0110	12	1100	1010
5	0101	0111	13	1101	1011
6	0110	0101	14	1110	1001
7	0111	0100	15	1111	1000

对一个 16×16 规模的阵列进行寻址时,二进制计数器和基于格雷码的计数器都消耗四位寄存器资源。但当地址发生递变时,以从第 7 行递变到第 8 行为例,二进制的地址编码从 0111 递变到 1000,寄存器的四位都进行了跳变,实际的电路中有延时存在,四位不可能同时跳变,从 0111 递变到 1000 时,可能会递变到 1100,1111 等状态,这就使得寻址读出的像元顺序出错。因此本文采用格雷码对焦平面阵列的行地址和列地址进行编码,同时提出一种按照格雷码的编码规律递变的寻址计数器,以提高寻址的可靠性^[10]。

基于格雷码的寻址计数器由单时钟边沿触发,单时钟边沿触发使其能够与标准数字电路设计规则兼容,能够应用于更多的寻址电路中。该寻址计数器包括寻址加法器和寻址减法器,递增和递减都遵循格雷码的递变规律。以表 1 中 0~15 的格雷码编码为例,从 0000 依次递变 15 次到 1000,定义为递增;从 1000 依次递变 15 次到 0000,定义为递减。

假设一个 Y 位的基于格雷码规律递变的寻址计数器,按照格雷码的递变规律,实现的算法思路如下:(1)格雷码的第零位每隔一次取反,其余位在第零位不取反时有条件地取反;(2)对于加法器,在计数的第奇数次格雷码的第零位取反;对于减法器,在计数的第偶数次格雷码的第零位取反;(3)当格雷码的第零位不取反,且当格雷码第零位是 1 时,格雷码的第一位取反;(4)当格雷码的第零位不取反,格雷码的第 $X-1$ 位是 1,并且从格雷码的第 $X-2$ 位到第零位都是 0 时,格雷码的第 X 位取反($2\leq X\leq Y$)。

对以上抽象级的算法进行 RTL 级的实现,计数器反转由时钟控制,每个时钟周期进行一次计数。

为了实现每隔一次的取反条件,设置一个状态寄存器‘state’,状态寄存器在每个时钟周期翻转一次。对于寻址加法计数器,当状态寄存器是‘0’时,格雷码的最低位反转,否则格雷码的其他位中的其中一位按照反转条件反转;对于寻址减法计数器,当状态

表 2 寻址计数器 RTL 级实现的反转条件

加法计数器	反转条件	减法计数器	反转条件
num[0]	state=0	num[0]	state=1
num[1]	state=1&num[1]=1	num[1]	state=0&num[1]=1
num[2]	state=1&num[1:0]=10	num[2]	state=0&num[1:0]=10
•	•	•	•
•	•	•	•
•	•	•	•
num[N-1]	state=1&num[N-2:0]=10...0	num[N-1]	state=0&num[N-2:0]=10...0

五位的格雷码寻址计数器实现的仿真结果如图 1 所示;‘CLK’是触发递变的时钟;‘RESET’是系统的复位信号,低电平有效;‘mode’是计数器模式的标志位,当 mode 为‘1’时,计数器工作在加法器模式,当‘mode’为‘0’时,计数器工作在减法器模式;‘num[4:0]’是格雷码寻址计数器的计数值。可以看到,在每一个时钟周期,计数器均按照格雷码的递变规律递增或递减。

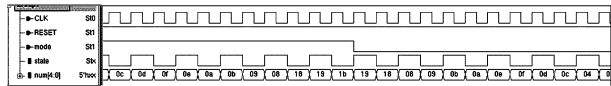


图 1 寻址计数器仿真结果

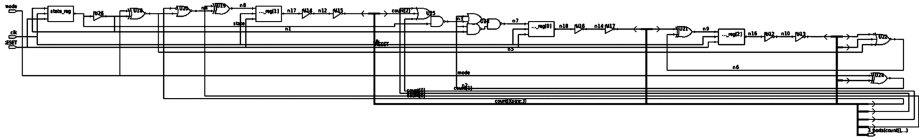


图 2 三位寻址计数器原理图

2 基于格雷码寻址计数器的任意开窗和反转读出的设计

一个 $M \times N$ 规模的阵列,同一行的像元由同一条行地址线相连,同一列的像元由同一条列地址线相连,每次都有一个行地址和一个列地址通过计数器同时被选中,这样这个地址对应的唯一的一个像元的信息就能够被读出。

实现随机开窗和读出顺序可控的系统框图如图 3 所示,首先由外部接口串行输入以二进制形式表示的窗口的信息,包括窗口行起始地址、行终止地址、列起始地址、列终止地址。接着继续串行输入反转控制字,有四种读出顺序,分别是行列都反转(即行从最下面行读到最上面行,列从最右边列读到最左边列)、行反转列不反转、行不反转列反转、行列都

寄存器是‘1’时,格雷码的最低位反转,否则格雷码其他位中的其中一位按照反转条件反转。反转条件的 RTL 级描述如表 2 所示,一个 N 位的计数器, num[0]是计数器第零位的 RTL 级描述, num[N-1]是最高位的 RTL 级描述。

使用综合工具 DesignComplier 对寻址计数器的 RTL 级设计进行分析计算,得到电路如图 2 所示,由于篇幅限制,仅展示一个三位寻址计数器的电路图。图中的三条粗线分别代表计数器的每一位信号,从图中可以看出,计数器的第零位仅由时钟的状态控制;计数器的第一位由时钟状态和计数器第零位的状态控制;计数器的第二位由时钟状态和计数器前两位的状态控制,电路符合在 RTL 级对计数器递变条件的描述。

不反转,这四种读出顺序由两个控制字控制。在串行读入的同时,通过串并转换模块将这些窗口地址信息和两位读出顺序控制字寄存。当所有的窗口地址信息寄存完成之后,通过二进制转格雷码逻辑电路,将窗口行列的起始地址和终止地址转换成以格雷码表示的地址。按照读出顺序控制字的设置,寻址计数器按照格雷码的递增或者递减,遍历窗口中的所有行地址和列地址。地址值经过行译码和列译码器打开相应行地址和列地址选择开关,窗口中的像元就能够按次序读出。

寻址计数器在其中的应用流程如图 4 所示。焦平面阵列的行和列各有一个格雷码寻址计数器来分别进行行寻址和列寻址。首先按照读进来的读出顺序控制字,判断是否需要反转。如果需要反转,则将终止地址作为计数的初始值,计数器工作在减法器

模式,不断递减直至计数到起始地址结束。如果不需要反转,则将起始地址作为计数的起始值,计数器

工作在加法器模式,不断递增直至计数到终止地址结束。

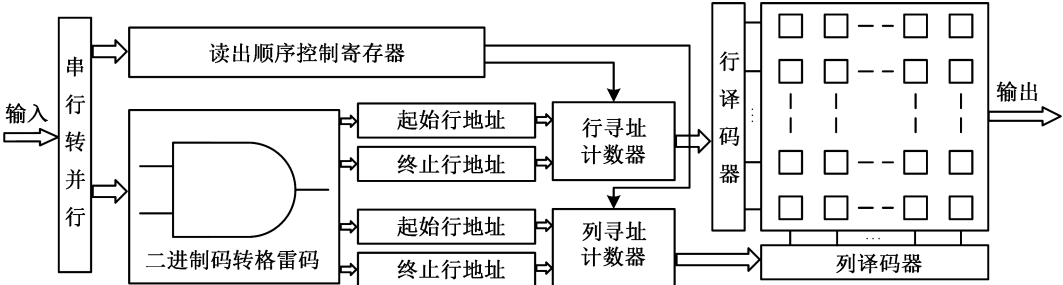


图 3 功能实现系统框图

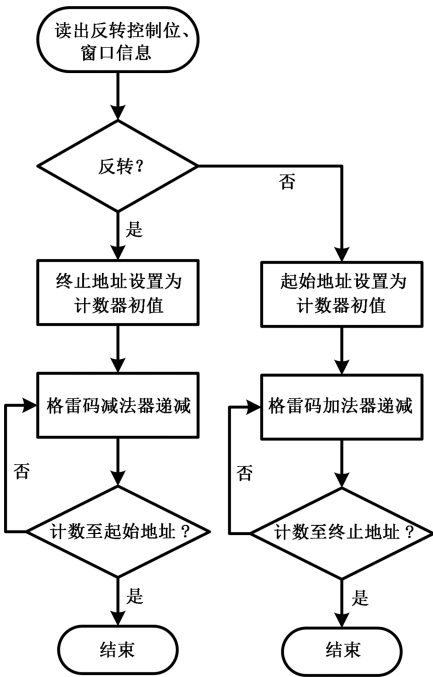


图 4 寻址计数器应用的流程图

3 驱动和仿真结果

设计的驱动信号如图 5 所示,当 RESET 无效时,在每一个时钟周期,系统从输入端口 IN 逐个读入窗口位置和读出顺序控制字。

本文给出对 16×16 阵列进行 RTL 级仿真的结果,输出一个起始行和起始列为 5,终止行和终止列为 11 的窗口信息,窗口大小为 11×11。如图 6、图 7 所示,col_temp 是列寻址计数器,按照格雷码的规律递变。col_s 为 7,是起始列为第五列的格雷码表示;col_e 为 9,是终止列为第 11 列的格雷码表示。不反转时 col_temp 递增,反转时 col_temp 递减。col_vert 是反转读出的控制字,当 col_vert 为 0 时,列反转;当 col_vert 为 1 时,列不反转。图 6 展示的

是开窗、行不反转列反转的情况,图 7 展示的是行不反转列也不反转的情况。行反转列不反转、行反转列反转的控制与图示两种情况类似,都是按照输入反转控制字的要求,由格雷码寻址计数器控制,逐行逐列地打开行地址线和列地址线的选择开关。

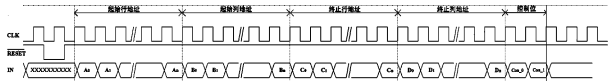


图 5 驱动信号

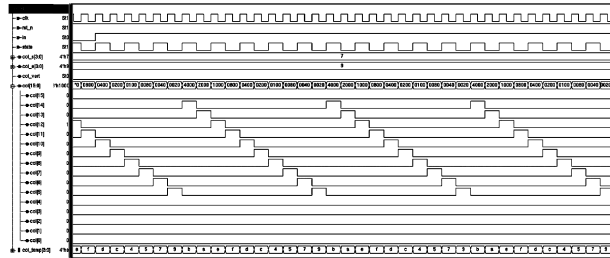


图 6 开窗、行不反转列反转

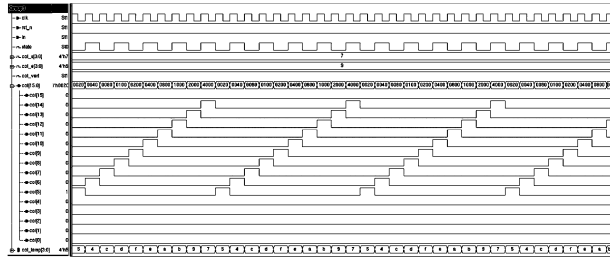


图 7 开窗、行不反转列不反转

在 TSMC 90 nm 工艺条件下,采用综合工具 DesignCompiler 对 1 024×1 024 阵列的整体设计进行功耗分析,供电电压为 3.3 V 时,总体设计功耗仅为 58.75 μW。基于格雷码的寻址计数器在每次递变的时候只有一位反转,因此与普通计数器相比,其具有较低的功耗,而使得整体设计的功耗降低。采用 DesignCompiler 来分析 16×16,256×256,512×512 和 1 024×1 024 阵列规模对应的寻址计数器功耗,得出二进制寻址计数器的功耗分别为:18.63,

33,36.96 和 40.79 μW ;基于格雷码的寻址计数器功耗分别为:6.02,10.46,15.75 和 19.56 μW 。结果表明,基于格雷码的寻址计数器功耗降低了50%~60%。图8、图9给出了1024 $\times$ 1024阵列规模的寻址计数器综合之后的功耗报告,对比之下可以得出,基于格雷码的寻址计数器与普通二进制寻址计数器相比,开关功耗(Net Switching Power)显著降低。这是因为基于格雷码的寻址计数器在每个时钟周期,编码只有一位发生反转,对应于电路中动态充放电单元减少,因此开关功耗降低。在焦平面阵列读出电路的设计中,数字部分功耗的主要来源是寻址计数器,并且一个阵列需要一个行寻址计数器和列寻址计数器,因此,降低寻址计数器的功耗就能显著降低读出电路设计中数字模块的功耗。

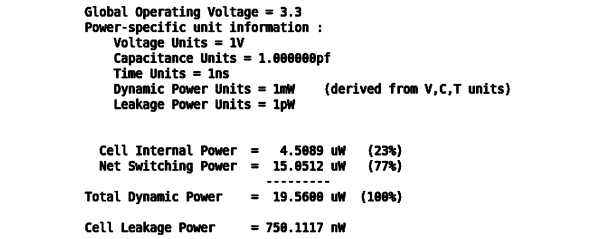


图8 基于格雷码的寻址计数器功耗分析报告

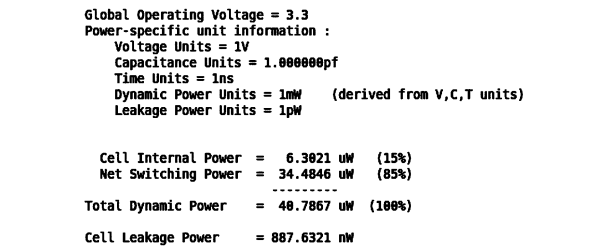


图9 二进制寻址计数器功耗分析报告

4 结论

本文从降低功耗和提高寻址稳定性两个方面提高读出电路的性能,提出了基于格雷码的寻址计数器,通过其实现任意开窗和反转读出的功能。采用格雷码对阵列编码并使用基于格雷码的寻址计数器寻址,提高了阵列读出的可靠性。与二进制计数器相比,基于格雷码的寻址计数器的功耗降低了50%~60%,适用于大面阵焦平面读出电路的设计。

参考文献:

[1] Scheffer D, Dierickx B, Meynants G. Random addressable

2048 $\times$ 2048 active pixel image sensor[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 1997, 44(10): 1716-1720.

[2] 刘琦. 256 $\times$ 320阵列多功能红外读出电路的设计[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.

Liu Qi. Design of 256 $\times$ 320 array multi-function infrared readout circuit[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommun., 2016.

[3] Jing Xie, Li Xiaojuan, Zhang Yan, et al. Design of ultra-low-power readout circuit for 1024 $\times$ 1024 UV AlGaIn focal plane arrays[J]. Infrared and Laser Engin., 2020, 49(5): 20190491.

[4] 王辅强. 640 $\times$ 512低功耗红外焦平面阵列读出电路设计[D]. 南京: 东南大学, 2018.

Wang Fuqiang. Design of 640 $\times$ 512 low power infrared focal plane array readout circuit[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.

[5] Zhao Hongliang, Zhao Yiqiang, Song Yiwei, et al. A low power cryogenic CMOS ROIC for 512 $\times$ 512 infrared focal plane array[C]// Proc. IEEE Inter. Conf. of Electron Devices and Solid-State Circuits, 2011: 1-2.

[6] Yao Libin. CMOS readout circuit design for infrared image sensors[J]. Proc. SPIE, 2009: 7384: 73841B-73841B-10.

[7] 李淑萍, 付凯, 王燕, 等. 一种大面阵红外焦平面阵列读出电路的设计方法[J]. 电子器件, 2018, 41(6): 1507-1511.

Li Shuping, Fu Kai, Wang Yan, et al. Design method of readout circuit for large format array IRFPA[J]. Electronic Devices, 2018, 41(6): 1507-1511.

[8] 李亮. 低噪声红外焦平面阵列读出电路的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.

Li Liang. Research on readout circuit of low noise for FPA[D]. Jilin: Jilin University, 2018.

[9] 祝晓笑, 刘昌举, 蒋永富. 格雷码在焦平面CMOS读出电路中的应用[J]. 半导体光电, 2009, 30(4): 506-508, 525.

Zhu Xiaoxiao, Liu Changju, Jiang Yongfu. Application of Gray code in CMOS ROIC for FPA[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(4): 506-508, 525.

[10] John Williams. Digital VLSI Design with Verilog: A Textbook from Silicon Valley Technical Institute[M]. Dordrecht: Springer Science+Business Media, 2008.

作者简介:

撒鹏花(1995—),女,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要从事读出电路设计相关方向的研究;

乔辉(1979—),男,山东莱阳人,研究员,博士生导师,主要从事光电材料与器件方向的研究。

一种主动共存的增强型光束扩展器

张永棠^{1,2*}

(1. 广东东软学院 计算机学院, 广东 佛山 528225;

2. 南昌工程学院 江西省协同感知与先进计算技术研究所, 南昌 330003)

摘要：提出了一种主动共存的增强型光束扩展器——ACEX-RE。该 ACEX-RE 由集成的一对混合光放大器(EDFA 和 SOA)和共存元件(CEX)模块组成,该模块与 OLT 系统一起安装在中央交换机(CO)上,分别作为下行和上行光信号的增强器和前置放大器。在下行波长和上行波长分别为 1 577 和 1 270 nm 的情况下,对 GPON 和 TWDM-PON 共存的 XGS-PON 系统进行性能测试。结果表明,提出的 ACEX-RE 能够支持多速率 XGS-PON 的最大运行距离为 35 km,分束比为 1 : 128,链路损耗为 44 dB。

关键词：光束扩展器; 主动共存; 下一代 PON 系统; XGS-PON; 光纤通信

中图分类号：TN929.11 **文章编号：**1001-5868(2020)05-0663-04

An Enhanced Beam Expander with Active Coexistence

ZHANG Yongtang^{1,2}

(1. School of Computer, Guangdong Neusoft Institute, Foshan 528225, CHN; 2. Institute of Cooperative Sensing and Advanced Computing Technology, Nanchang Technology Institute, Nanchang 330003, CHN)

Abstract: Proposed is an enhanced fiber expander with active coexistence (ACEX-RE), composed of a pair of integrated hybrid optical amplifiers (EDFA and SOA) and coexistence element (CEX) modules. The modules are installed on the central exchange (CO) together with the OLT system as the intensifier of downstream/upstream optical signals and the preamplifier respectively. Under the downstream and upstream wavelengths of 1 577 and 1 270 nm, the performance of the XGS-PON system consisted of GPON and TWDM-PON was tested. The results show that the proposed ACEX-RE can support multi-rate XGS-PON with a maximum operating distance of 35 km, a beam splitting ratio of 1 : 128, and a link loss of up to 44 dB.

Key words: beam expander; active coexistence; next generation PON system; XGS-PON; optical fiber communication

0 引言

近年来,受高带宽需求、高端应用和服务的推动,我国 IP 流量以 22% 的复合年增长率快速增长^[1]。利用无源光网络(PON)技术与下一代 PON 系统升级现有的光接入网,优化和部署光分配网(Optical Distribution Network, ODN)成为一种必

然趋势。

目前,世界上许多国家都广泛采用千兆 PON (Gigabit-Capable PON, G-PON) 技术来实现 B⁺ 级系统,通信距离可达 20 km,分裂率为 32,损耗预算为 28 dB^[2]。根据 ITU-T G. 987 和 IEE 802.3 标准的要求,可采用非对称传输(10 Gb/s, 2.5 Gb/s)来启动 XG-PON 和 10 G-EPON 以满足日益增长的业务需求^[3]。全业务接入网络社区已经提出了时间波分复用 PON(Time Wavelength Division Multiplexing-PON, TWDM-PON)作为下一代 PON 系统的发展

收稿日期:2020-04-14.

基金项目:国家自然科学基金项目(61663029); 广东省高校重点平台与特色创新项目(2017KTSCX200).

* 通信作者:张永棠

E-mail: gov211@163.com

方向,为每个光缆终端设备(Optical Line Terminal,OLT)端口分配多个波长,其动态波长和带宽分配用于其通信流控制^[4]。然而,由于可调谐光收发器成本过高,TWDM-PON的部署被暂停。作为一种过渡方案,研究人员引入了同时支持10 Gb/s双向传输和双速率传输^[5]的对称无源光网络(XGS-PON)。XGS-PON符合下一代PON系统的主要需求,可与当前部署的G-PON系统共存^[6]。

XGS-PON的最低要求是支持至少20 km的光纤通信距离和1:64的分束比。为了拥有更大的覆盖范围、更高的容量、更大的带宽和更多的用户,ITU-T提出使用更高功率的收发器。文献[7]提出了一种嵌入式光纤扩展器(Reach Extender,RE),它可以在混合PON系统中运行,最大通信距离为30 km,链路损耗预算为31 dB。文献[8]提出了一种基于G-PON扩展器的光放大器,并证明了分布损耗在28 dB以上可以实现无差错操作。文献[9]提出了一种选用光-电-光结构作为内联RE,该内联RE位于距OLT 80 km处,分裂率为128,链路损耗预算为59 dB。但是,目前的ODN没有电源供应,而内联RE方法将增加复杂性和成本。分布式拉曼放大可预防这类问题^[10],但是放大器对于1 270 nm波长的传输不是最佳的,并且宽放大频谱可能被干扰,因此不可能与其他PON系统共存。

本文提出一种多速率主动共存的增强型光束扩展器(RE),称之为ACEX-RE,并将该RE与光线路终端(OLT)系统一起安装在中心交换机(Central Switch,CS)上,实现主动共存。研究了XGS-PON与当前G-PON和TWDM-PON多速率系统在单个ODN设置中的性能,描述了ACEX-RE的增益和噪声指数,并分析了扩展XGS-PON系统在不同距离和分束比下的帧丢失和吞吐量性能。

1 实验装置

1.1 ACEX-RE PON 系统实验装置

该系统的实验配置如图1所示,由多速率的G-PON,XGS-PON和TWDM-PON OLT系统共存组成。XGS-PON系统利用1 577和1 270 nm波长分别实现10 Gb/s的对称下行和上行传输。

为了实现系统的共存,采用无源共存(Co-existence,CEX)单元将所有PON系统合并成同一光纤链路。同时,TWDM-PON系统需要一个波长多路复用器(Wavelength Multiplexer,WM)来叠加

四对波长,以支持下行40 Gb/s和上行10 Gb/s的总速率。每个PON系统还配备了RE,以支持更长的传输距离和更高的分裂率。针对XGS-PON,开发了用于下行传输的掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier,EDFA)^[11]和用于上行传输的半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifier,SOA)^[12]。集成所有的被动式CEX,WM和RE以形成ACEX-RE,如图1所示。

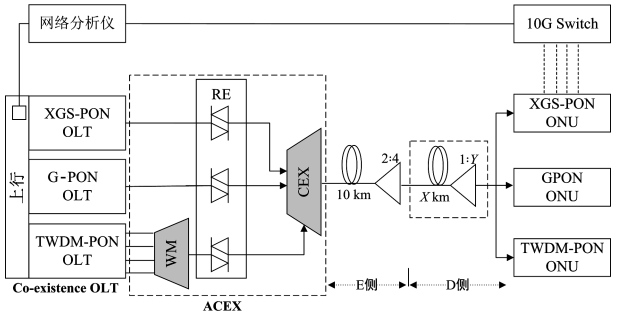


图1 ACEX-RE PON 系统实验装置图

还为ODN准备了一个试验台,该试验台由10 km的交换侧光缆和2×4光分束器组成(E侧)。在15~35 km范围内改变配电侧的光纤电缆距离,第二级分束器(D侧)从1×4到1×32,形成最大的分束比为1:128。

该ACEX-RE PON系统实验是基于以太网帧丢失和吞吐量分析,在帧长为1 518字节的对称10 Gb/s双向以太网业务上使用IXIA系统进行的。吞吐量测量受限于在光网络单元(Optical Network Unit,ONU)输出端口上的千兆以太网接口的四个RJ-45端口,可提供最大对称4 Gb/s的总吞吐量。

1.2 XGS-PON RE 设计

对于XGS-PON,开发了一个双向RE,使用一对多波分复用器(MWDM)来处理下行和上行的光信号,如图2所示。该下行扩展器由运行于1 577 nm的掺铒光纤放大器(EDFA)和用于上行传

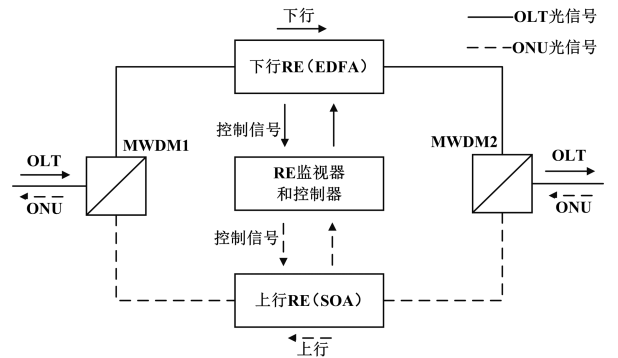


图2 XGS-PON RE 设计示意图

输的 1 270 nm 的半导体放大器(SOA)组成。该 RE 还配备了监视和控制器,以简化对该扩展程序的监视和配置。RE 与 OLT 一起放置,以维护无源光接入网,简化未来的维护。

2 结果和讨论

2.1 XGS-PON RE 的光学性能

系统的下行波长为 1 577 nm,上行波长为 1 270 nm。WM 四对输入信号的电流分别为 100, 120,160 和 220 mA;CEX 三路输入信号的电流分别

为 180,240 和 280 mA。对 XGS-PON RE 的光学性能进行仿真分析,结果如图 3 所示。

图 3 分别展示了下行光信号的输入功率 P_{in} 与输出功率 P_{out} 、增益 G 和噪声指数 α 的关系曲线。从图 3 可以看出,对于下行的光学性能,三路输入信号都被放大,达到了所有泵浦激光二极管(LD)电流设置的输出功率。以输入功率 0 dBm 为基准,输出功率达到了 10 dBm,增益为 10 dB,噪声指数为 8.2 dB,说明信号通过链路传输到接收端 ONU。

图 4 分别展示了上行光信号的输入功率与输出功率、增益和噪声指数的关系曲线。当 ACEX-RE 置于 CO 处时,所有性能参数的上行输入功率设置为 $-15\sim-40$ dBm,这是通过 ODN 从上行(ONU)到 OLT 输入功率的期望值范围,也取决于网络的设计。从图中可以看出,当输入功率为 -25 dBm,WM 输入电流为 100 mA 时,系统的输出功率和增益分别为 -20 dBm 和 10 dB。在相同输入功率下,随着输入电流的增加,系统的输出功率和增益均有明显增大。在相同输入电流下,系统的输入功率对输出功率的影响明显,但是对增益的影响可以忽略。

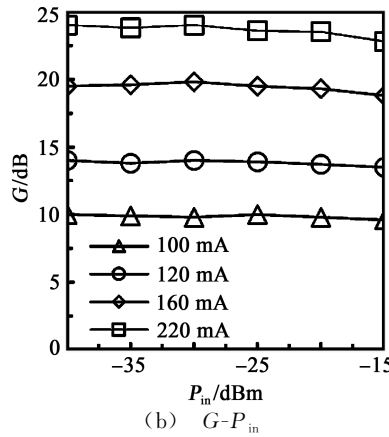
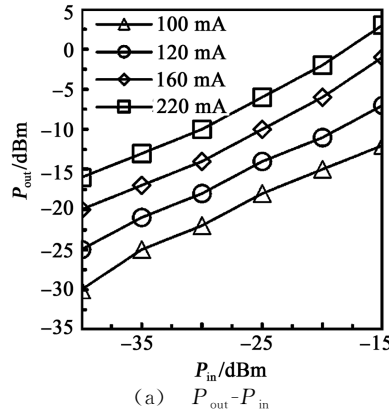
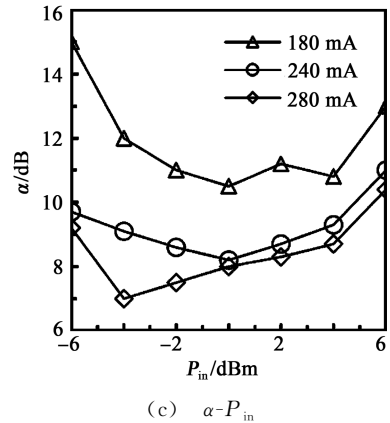
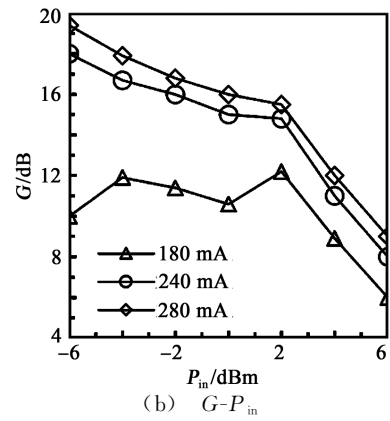
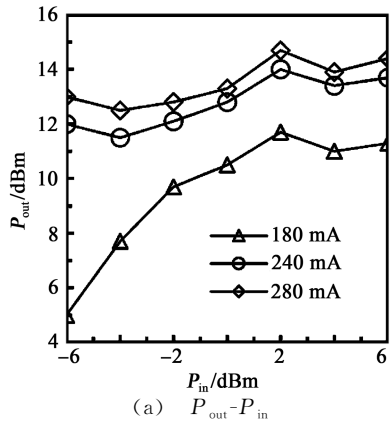


图 3 XGS-PON RE 下行信号的光学性能

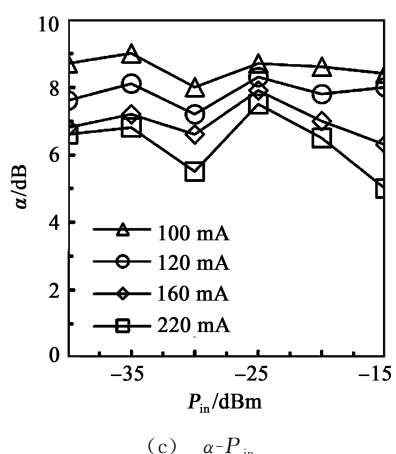


图4 XGS-PON RE 上行信号的光学性能

图5展示了所有网络设计的ODN损耗测量值。结果表明,ODN的损耗与分束比、分束距离成正比,这是由于分束器的插入损耗和光纤距离的差异造成的。在本文网络设计中,损耗由CEX、两个分束器、一段光纤距离和其他无源元件(连接器和适配器)组成的ODN造成。

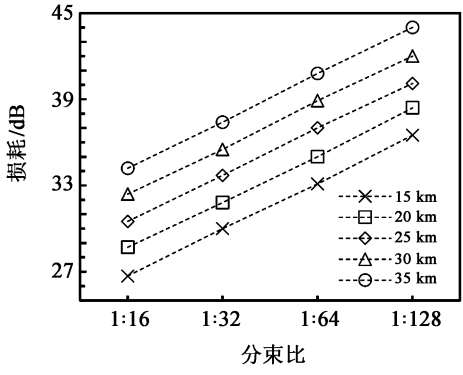


图5 分束比和光纤距离对链路损耗的影响

2.2 XGS-PON RE 的网络性能

通过上行和下行的吞吐量来评估 ACEX-RE 共存 PON 系统网络的系统性能。图6展示了下行吞吐量随光纤距离的变化关系。在第二阶段分束器(D侧)分束比受到影响,如图1所示。对于所有类型的分束比(1:16,1:32,1:64和1:128),在不同距离下,传输性能均达到900 Mb/s。可以看出,网络吞吐量受距离和分束比的影响,因为这些参数会导致网络的损耗。从图6可以看出,分束比为1:128、光纤距离大于25 km时的下行吞吐量几乎为0 Mb/s。距离最优为15 km,在分束比为1:128时,其链路损耗高达36.5 dB。

上行吞吐量性能如图7所示。最大吞吐量为900 Mb/s,最小吞吐量为876 Mb/s。对于所有分束

比为1:16的距离,网络吞吐量的最佳值为900 Mb/s。但可以看出,当分束比和距离增加时,上行吞吐量下降。如前所述,分束比和距离造成的衰减影响了ONU到OLT的信号传输,这与光学性能中ODN损耗是相符的。

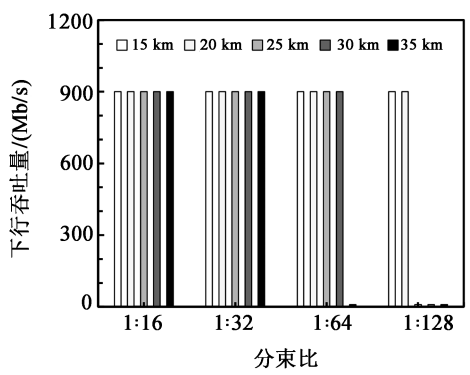


图6 分束比和光纤距离对下行吞吐量的影响

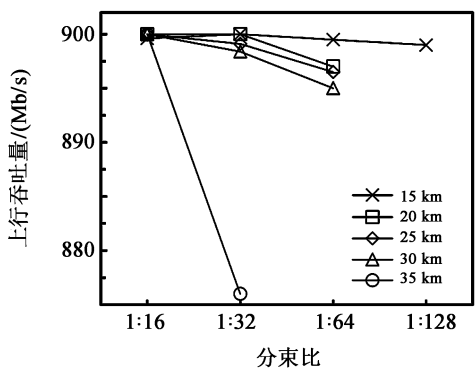


图7 分束比和光纤距离对上行吞吐量的影响

3 结论

本文提出了一种主动共存的增强型 ACEX-RE,并搭建了实验平台,验证了 XGS-PON 系统在 ACEX-RE 上的性能。从实验结果可以看出,在不同光纤长度和分束比下,下行吞吐率均达到100%。对于上行性能,在35 km距离处的吞吐量显示为97%,最大分束比为1:32。此外,在光纤距离为15 km、分束比为1:128的情况下,ACEX-RE 的吞吐量达到99%。链路损耗补偿高达44 dB,系统性能达到最优。该系统可作为下一代PON系统的可行解决方案。

参考文献:

[1] 周 威. 计算机网络发展的新动向——智能网络开发[J]. 电子技术, 2019, 43(12): 35-36.
Zhou Wei. The new trend of computer network development——intelligent network development [J]. Audio Engineering, 2019, 43(12): 35-36. (下转第728页)

载流子平衡方法提高量子点发光二极管效率的研究

杨 媚¹, 郑力为¹, 孟 琪¹, 王 鑫¹, 梁 培¹, 袁晓霖²,
唐 莹^{1,2}, Sergei I. Pavlov³, Pavel N. Brunkov³, 刘祖刚^{1*}

(1. 中国计量大学 光学与电子科技学院, 杭州 310018; 2. 中芯集成电路(宁波)有限公司, 浙江 宁波 315800;
3. Ioffe 物理技术研究所, 圣彼得堡 194021)

摘 要: 尝试采用三种方式来平衡载流子的浓度, 以提高量子点发光二极管(QLED)的外量子效率等性能: 在正装结构(ITO/HIL/HTL/QD/ETL/EIL/金属阴极)的 QLED 的发光层和电子传输层中间插入超薄聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)电子阻挡层; 在空穴注入和传输层方面, 通过使用更加优化的 HIL 等来提高空穴注入和传输几率; 在 QD 发光层方面, 用短链配体来置换量子点的长链配体以增加载流子向量子点发光层中的传输效率等。在进行量子点配体交换的同时带来了量子点在正交溶剂中的可溶性优势, 有利于 QLED 器件的全溶液法制备。

关键词: 量子点发光二极管; 电子阻挡层; 空穴注入层; 电荷平衡

中图分类号: TN27; TN312⁺.8 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0667-06

Influence of Charge Carrier Balance on Efficiency of QD-LED

YANG Mei¹, ZHENG Liwei¹, MENG Qi¹, WANG Xin¹, LIANG Pei¹, YUAN Xiaolin²,
TANG Ying^{1,2}, Sergei I. Pavlov³, Pavel N. Brunkov³, LIU Zugang¹

(1. College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, CHN;

2. Ningbo Semiconductor International Corporation, Ningbo 315800, CHN;

3. Ioffe Institute, 26 Politekhnikeskaya, St Petersburg 194021, Rus)

Abstract: Three approaches were performed to achieve the charge balance in normal structure QLEDs so as to improve their external quantum efficiency: by inserting an ultra-thin PMMA electronic barrier layer between the lighting emitting layer and electron transport layer of QLED with the structure of ITO/HIL/HTL/QD/ETL/EIL/metal cathode; by optimizing the hole injection layer in the hole side to improve the probability of hole injection and transport; replacing the long chain ligands of quantum dots with short chain ones to help the charge injection and transport into the emitting layer, so as to improve the device performance. Another benefit of the ligand exchange is the improved solubility of quantum dots in orthogonal solvents of charge transport layers, which is essential for full-solution processed QLEDs.

Key words: QLED; electronic barrier layer; hole injection layer; charge balance

0 引言

量子点发光二极管(QLED)因其窄的发光光

谱、可随所使用量子点尺寸而改变的发光波长以及能与更稳定的无机功能层配合而具有较高的稳定性等优点, 被誉为“21 世纪的平板显示器”^[1]。近 20 年来, 随着胶体量子点合成方法的改善、多层膜制备工艺的使用以及表面修饰工艺的提高等, QLED 器件性能取得了较快速的发展^[2-3]。

QLED 的器件结构与有机发光二极管(OLED)

收稿日期: 2020-05-17.

基金项目: 浙江省科技厅、宁波市科技局国际合作项目(2018D0007).

* 通信作者: 刘祖刚 E-mail: zgliu78@cjl.u.edu.cn

相似,为三明治结构。由夹在两个电极中间的空穴注入层(HIL)、空穴传输层(HTL)、量子点发光层(EML)、电子传输层(ETL)和电子注入层(ETL)组成。两个电极中的一个为透明导电材料,如钢和锡的复合氧化物(ITO),以利于光的发出。有正装和倒装两种器件结构^[4-5]。常见的正装 QLED 器件结构为 ITO/HIL/HTL/QD/ETL/Metal,其中常用的 HIL 是聚(亚乙基二氧噻吩)-聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS),HTL 为聚 N,N'-双(4-丁基苯基)-N,N'-二苯基联苯胺(poly-TPD)或聚乙烯咔唑(PVK),ETL 通用无机 ZnO 纳米颗粒。QLED 器件的外量子效率(η_{ext})一般由式(1)表示:

$$\eta_{\text{ext}} = \chi E_{\text{pl}} \eta_r \eta_e \tag{1}$$

式中, E_{pl} 为发光材料量子点的光致发光效率,目前可以达到 90%以上; η_e 是器件发出光子逃逸出器件发光面的几率,一般在 25%左右; χ 是电子空穴对复合后产生荧光的比例,根据三重态的利用与否,分别为 25%和 100%; η_r 是载流子复合几率,在电子和空穴的比例平衡时达到最大,可以通过调控载流子平衡,使其达到接近 100%。

其他三项都与发光材料和器件的基本结构相关,在确定量子点发光材料和器件基本结构的情况下,都是确定的。所以提高 QLED 器件中载流子的平衡是提高器件效率的主要方式,而 QLED 器件中的载流子是不平衡的。在空穴方面,因发光层(EML)与空穴注入层(HIL)以及空穴传输层(HTL)之间存在较大的能级差距而存在较大的空穴注入势垒。而在电子注入传输层方面,因为使用的 ZnO 有较高的电子迁移率,导致发光层中的载流子注入不平衡,降低了器件效率^[6-8]。一方面,一般根据电荷输运层的最高占据分子轨道(HOMO)和最低空轨道(LUMO)的相对能级位置选择电子输运层(ETL)和空穴传输层(HTL),以尽量实现载流子平衡^[9]。此外,常用的 HIL 材料 PEDOT:PSS 还容易与阳极 ITO 反应,导致金属离子在外加电场中扩散^[10],所以使用更稳定的无机材料代替 PEDOT:PSS 能有效提高器件性能^[3]。另一方面,为保证量子点在溶剂中的有效分散和稳定性,在量子点合成过程中引入的配体通常是长脂链族化合物,如三辛基氧化膦(TOPO)等,其绝缘性使电荷在量子点中的传输受到一定的影响^[11],像 TOPO 这类疏水性配体也限制了量子点在生物医学中的应用^[12]。因此,对量子点的表面进行改性也能提高器

件的发光性能,其中配体交换是最简单有效的方法。本文以实现 QLED 器件电荷平衡为研究目标,使用三种方式来探究电荷载流子平衡的改善对 QLED 器件的发光性能的影响:(1)引入不同厚度的聚甲基丙烯酸甲脂(PMMA)电子阻挡层,以减少电子注入;(2)使用 NiO 和 NiO:Mg 为 HIL 材料,以提高空穴的注入效率;(3)利用 3-巯基丙酸等杂化双功能配体对量子点进行表面改性,以提高量子点发光材料的载流子传输性能。

1 实验

1.1 实验材料

实验所用的 PEDOT:PSS, Poly-TPD, PMMA 和银购自西安聚光科技有限公司;氧化镍(NiO, 0.05 mL/mL)、NiO:Mg(15 mg/mL, 15%)、氧化锌(ZnO, 50 mg/mL)和 CdSe/CdS/ZnS 核壳量子点(QD, 10 mg/mL)均由广东普加福科技有限公司提供;分析级乙醇、丙酮、异丙醇均购自杭州双林化学试剂有限公司;11-巯基十一酸(MUA)、二甲基亚砜(DMSO)、五水合氢氧化甲基胺(TMAH)、巯基丙酸(MPA)、正辛烷等购自阿拉丁。

1.2 器件制备

1.2.1 基板清洗

将 ITO 玻璃基板在去离子水、乙醇、丙酮和异丙醇中依次进行 15 min 的超声波清洗,在使用前再在氧气等离子清洁器中干洗 15 min。

1.2.2 含 PMMA 电子阻挡层的 QLED 制备

在空气中,以 4 000 r/min 的速度在清洗过的 ITO 玻璃基板上旋涂 PEDOT:PSS 溶液,旋涂时间为 40 s,然后在 150 ℃高温下干燥退火 20 min。将基板转移到充氮的手套箱中,再以 2 000 r/min 的速度逐层旋涂 poly-TPD(10 mg/mL 氯苯溶液)、量子点(10 mg/mL 甲苯溶液)、PMMA(丙酮溶液)、氧化锌纳米晶体(30 mg/mL 乙醇溶液),各层膜的旋涂时间均为 40 s,分别在 120, 150, 110 和 90 ℃下退火 20, 5, 10 和 10 min。最后在 5×10^{-4} Pa 的高真空度下,使用金属掩模在蒸发设备中沉积银电极。制备出的具有 PMMA 电子阻挡层的 QLED 器件结构为:ITO/PEDOT:PSS/Poly-TPD/QD/ZnO/Ag。在氮气气氛的手套箱中用紫外线固化树脂将器件封装待测。

1.2.3 以 NiO, NiO : Mg 为 HIL 材料的 QLED 器件制备

在按上述方法清洁过的 ITO 玻璃基板上,依次旋涂 30 nm 的 NiO(或 NiO : Mg)层、30 nm 的 poly-TPD 层、18 nm 的 QD 层和 30 nm 的 ZnO 层。分别在 270,120,150 和 90 ℃ 下退火 30,20,10 和 5 min。然后用金属掩模在热蒸发器中沉积银电极,制备结构为 ITO/NiO/poly-TPD/QD/ZnO/Ag 的器件。同样在氮气气氛的手套箱中用紫外线固化树脂将器件封装待测。

1.2.4 以 3-巯基丙酸(MPA)和 11-磺酰癸烯酸(MUA)做配体的量子点 QLED 器件制备

(1)配体交换:将 100 mg 五水合氢氧化甲基胺(TMAH)与 50 μl 巯基丙酸(MPA)或 20 mg 巯基十一酸(MUA)在 1 ml 正辛烷中充分混合。15 min 后,在正辛烷下方形成无色透明水层;将两相溶液剧烈摇晃使其充分混合,静置 1 h。将上层含有 MPA(MUA)的有机相溶液转移到试管中,加入原配体为 TOPO 和油酸的 CdSe/CdS/ZnS 量子点溶液,搅拌 1 h,最终在试管中加入 1 ml 的 DMSO 溶液,在 DMSO 中实现量子点的 MPA(MUA)配体交换。

(2)QLED 器件制备:使用配体交换后的 QD,按前述方式制备 QLED 器件。

2 讨论与分析

2.1 PMMA 电子阻挡层对 QLED 器件的影响

含有 PMMA 以及不含 PMMA 的 QLED 的电致发光光谱、电流密度-电压(J - V)曲线、亮度-电压(L - V)曲线和外量子效率(η_{ext})曲线分别如图 1(a),(b),(c)和(d)所示。从图 1(a)可以看出,PMMA 的引入没有改变器件的电致发光光谱,其发光峰的中心位于 628 nm,半峰宽(FWHM)为 30 nm。当 PMMA 层厚度从 0 增加到 4 nm 时,启亮电压逐步从 1.7 V 增加到 1.9 V,而电流密度逐步降低(如图 1(b)),虽然亮度也逐步降低(如图 1(c)),但 η_{ext} 则有所提高(如图 1(d))。含 2 nm PMMA 层器件的最大外量子效率达到了 12.4%。可见,具有 2 nm PMMA 层的器件具有最好的发光性能。

一般认为,过量的电子注入会影响 QLED 中的电荷平衡,降低器件性能^[13-14]。在没有 PMMA 层的器件中,有大量的电子在量子点层和 ZnO 层上累积,量子点上的电荷会导致 QLED 器件光致发光衰

减。本研究再次证实了引入 PMMA 层有效地阻止了电子进入量子点层,减少了电子积累,从而优化 CdSe/CdS/ZnS 量子点器件的发光性能。

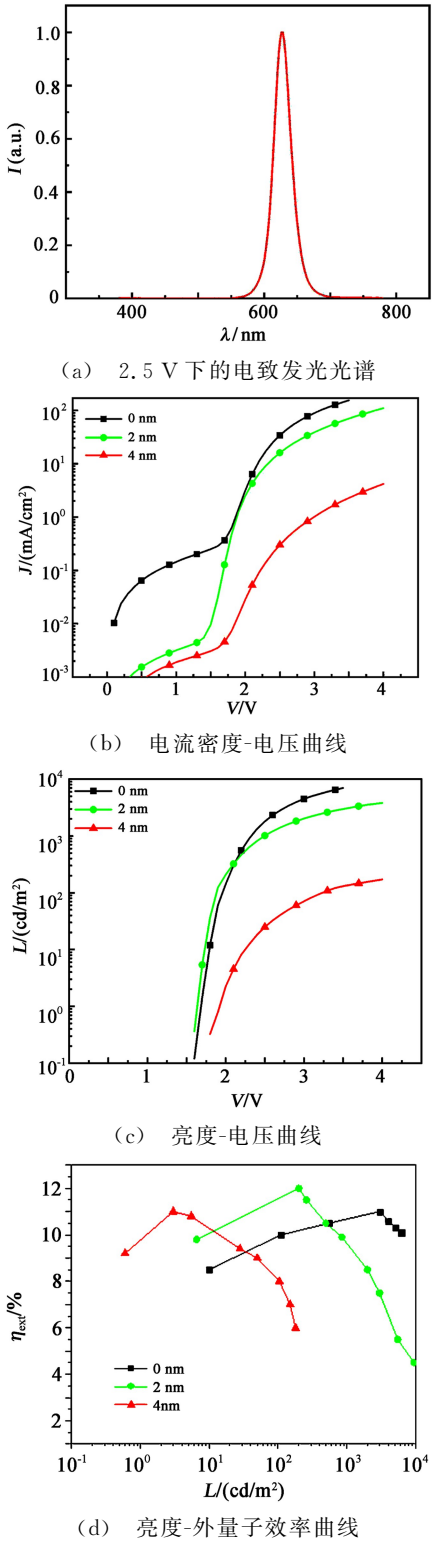


图 1 不同 PMMA 电子阻挡层厚度器件的电致发光光谱及三种特性曲线

2.2 NiO,NiO : Mg 作为 HIL 材料对 QLED 器件的影响

含 NiO 的 QLED 器件的能带结构、电致发光光谱、 J - V - L 曲线和 η_{ext} - L 曲线如图 2 所示。从图 2 (a)可以看出,在用 NiO 作为 HIL 的 QLED 器件中,空穴的注入势垒较低,空穴更容易注入^[15]。图 2 (b)为不同 HIL 材料的 QLED 器件电致发光光谱,可以看出,改变 HIL 没有改变发光光谱,其发光峰的中心都位于 628 nm,半峰宽为 30 nm。两种器件的电流密度和亮度如图 2(c)所示,可以看出,使用 NiO 的器件的开启电压从 2.2 V 降低至 1.8 V,发光亮度有较大的提高。图 2(d)为两种 QLED 器件

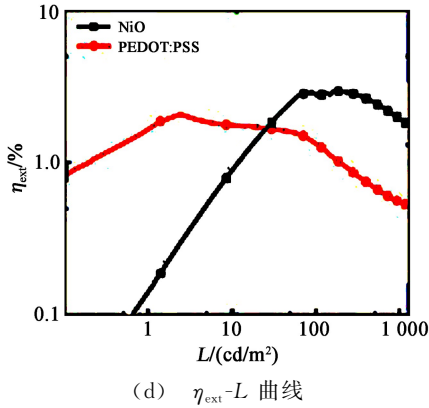


图 2 含 NiO 层 QLED 器件的能级结构、电致发光光谱、 J - V - L 曲线和 η_{ext} - L 曲线

的外量子效率与亮度的关系,可以看出采用 NiO 为 HIL 的器件的最大外量子效率从 2% 增加到了 2.81%。这是因为在外加电场的作用下,NiO 层没有离子扩散到 EML 层中,有效减少了激子猝灭效应。同时,NiO-HIL 阻止了 ITO 表面与 PEDOT : PSS 中的酸产生刻蚀反应。

当用于 HIL 材料的 NiO 中掺杂 Mg 时,QLED 器件的性能得到进一步改善,其外量子效率和电流效率如图 3 所示。结果表明,采用 Mg 掺杂的 NiO (NiO : Mg) 做 HIL 的器件的外量子效率提高到 7.1%,电流效率(η_i)也提高到 5.5 cd/A,其原因是 Mg 的掺杂提高了空穴的注入和迁移率。

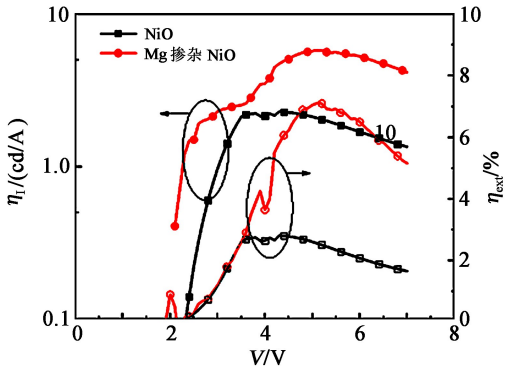
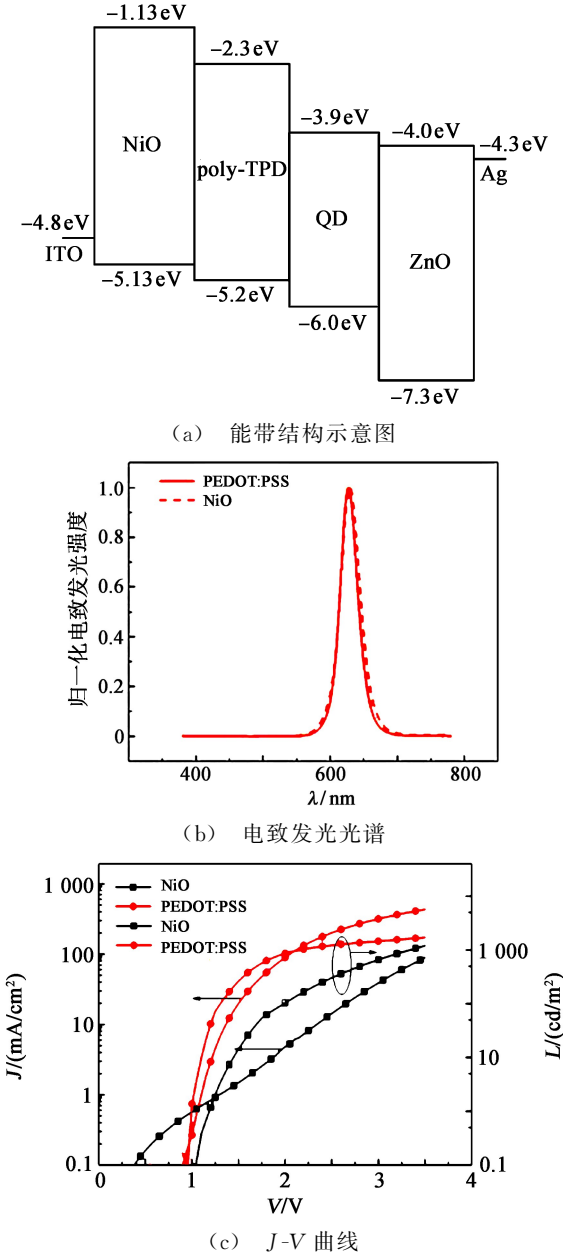


图 3 NiO 和掺杂 Mg 的 NiO 作为 HIL 时器件的电流效率、外量子效率与驱动电压的关系

2.3 量子点材料改性的新尝试——巯基酸功能配体交换

图 4 示出量子点的配体交换反应(照片拍摄于波长为 365 nm 的紫外光下)。可见,在没有发光的情况下,上层的正辛烷溶液几乎是透明的,说明量子点是从正辛烷转移到 DMSO 中的,这表明配体交换可以将量子点溶解在正交溶剂中,有利于全溶液法



制备 QLED 器件。

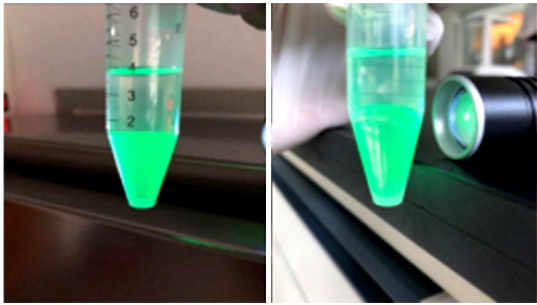


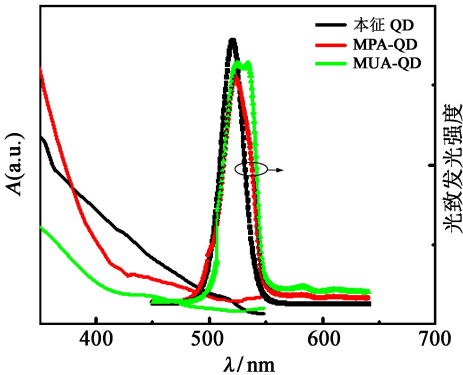
图 4 在紫外光(365 nm)下观察到的 MPA(左)和 MUA(右)的配体交换反应

本征量子点(QD)、MPA 配体交换量子点(MPA-QD)和 MUA 配体交换量子点(MUA-QD)的光学性质如图 5(a)所示,可以看出,该配体交换过程没有导致量子点发射光谱的较大变化,但发光效率有所降低。本征 QD,MPA-QD 和 MUA-QD 的发射波长分别为 522,523 和 525 nm。在室温下,MPA-QD 和 MUA-QD 的光致发光量子产率分别下降至本征量子点的 70%和 54%。

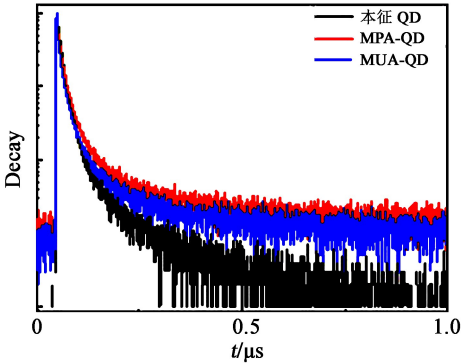
量子点的荧光衰减轨迹如图 5(b)所示。从上到下依次为 MPA 配体交换量子点、MUA 配体交换量子点和本征量子点。通过指数拟合,并根据平均荧光寿命公式:

$$t_{av} = \frac{A_1 t_1^2 + A_2 t_2^2}{A_1 t_1 + A_2 t_2} \tag{2}$$

计算得到配体交换后,MPA 修饰的量子点平均荧光寿命由原来的 17 ns 变为 48 ns,MUA 修饰的量子点的平均荧光寿命由原来的 17 ns 变为 17.8 ns。这可能是由于配体交换后,表面缺陷增多,非辐射复合增加,导致平均荧光寿命增加,量子产率降低。



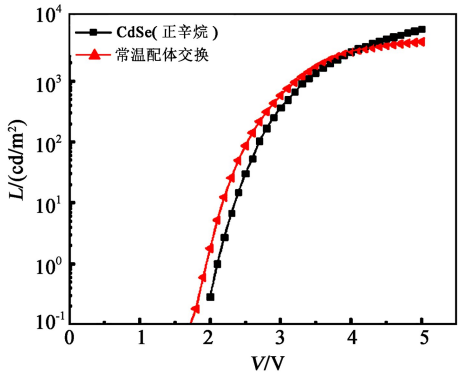
(a) 本征 QD、MPA-QD 和 MUA-QD 在室温下的吸收和发射光谱



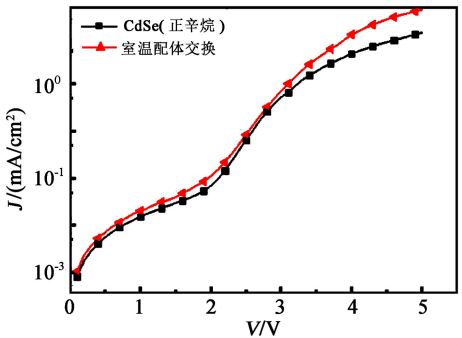
(b) 激发波长为 265 nm 的本征量子点和配体交换量子点的荧光衰减轨迹

图 5 三种量子点在室温下的吸收和发射光谱及激发波长为 265 nm 下的荧光衰减轨迹

初步验证了配体交换后 QLED 的器件特性,如图 6 所示。虽然配体交换后量子点的光致发光量子产率有所降低,但因为短链配体改善了载流子的传输性能,器件的电流密度、发光亮度和外量子效率都有所提高。从图 6(a),(b)可以看出,配体交换后的量子点器件发热亮度和电流密度都略高于交换前的量子点器件。图 6(c)表明当电流密度为 25.363 mA/cm² 时,配体交换后器件的最大外量子效率达到 2.7%,稍高于交换前。配体交换的优化和配体交换后的器件优化工作还在继续进行中。



(a) L-V 曲线



(b) J-V 曲线

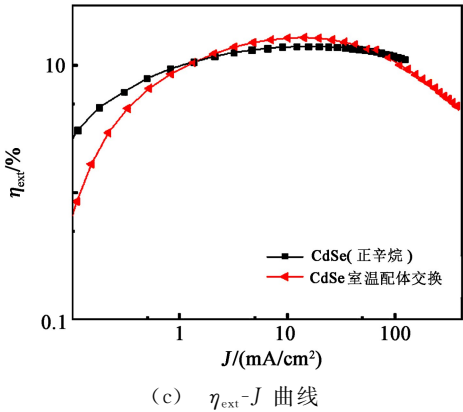


图 6 配体交换前后 QLED 的器件特性

3 结论

本文分别制备了引入不同厚度 PMMA 电子阻挡层、使用 NiO 和 NiO : Mg 代替 PEDOT : PSS 作为 HIL 材料的 QLED 器件,并分析了它们的发光性能。实验结果表明:PMMA 电子阻挡层促进了载流子的平衡,NiO-HIL 避免了 PEDOT : PSS 和 ITO 之间产生刻蚀反应,提高了器件的发光效率。优化绝缘层厚度和在作为 HIL 的 NiO 中掺杂 Mg 还可以进一步提高 QLED 器件的发光性能。同时,还对量子点材料的表面改性做了新的尝试,量子点和巯基酸功能配体 MPA,MUA 的配体交换实验成功地将量子点溶解在正交溶剂中,MPA 量子点和 MUA 量子点的光致发光量子产率虽然分别降低到本征量子点的 70%和 54%,但量子点配体交换后 QLED 器件的电流密度、发光亮度和外量子效率均有所提高。巯基配体使 QD 能在正交溶剂中溶解,使全溶液法制备 QLED 器件成为可能。

参考文献:

[1] Yang Zhengyu, Voznyy O, Liu Mengxia, et al. All-quantum-dot infrared light-emitting diodes[J]. ACS Nano, 2015, 9 (12): 12327-12333.

[2] Colvin V L, Schlamp M C, Alivisatos A P. Light-emitting diodes made from cadmium selenide nanocrystals and a semiconducting polymer[J]. Nature, 1994, 370(6488): 354-357.

[3] Cao Fan, Wang Haoran, Shen Piaoyang, et al. High-efficiency and stable quantum dot light-emitting diodes enabled by a solution-processed metal-doped nickel oxide hole injection interfacial layer[J]. Adv. Functional Materials, 2017, 27 (42): 104-122.

[4] Yang Yixing, Zheng Ying, Cao Weira, et al. High-efficiency

light-emitting devices based on quantum dots with tailored nanostructures[J]. Nature Photon. , 2015, 9(4): 259-266.

[5] Hermann S, Shallcross R C, Meerholz K. Simple fabrication of an organic laser by microcontact molding of a distributed feedback grating[J]. Adv. Mater. , 2014, 26 (34): 6019-6024.

[6] Zhou Xiang, Blochwitz J, Pfeiffer M, et al. Enhanced hole injection into amorphous hole-transport layers of organic light-emitting diodes using controlled p-type doping [J]. Adv. Functional Materials, 2001, 11(4): 310-314.

[7] Mashford B S, Stevenson M, Popovic Z, et al. High-efficiency quantum-dot light-emitting devices with enhanced charge injection[J]. Nature Photon. , 2013, 7(5): 407-412.

[8] Jin Xiao, Chang Chun, Zhao Weifeng, et al. Balancing the electron and hole transfer for efficient quantum dot light-emitting diodes by employing a versatile organic electron blocking layer[J]. ACS Appl. Materials & Interfaces, 2018, 10(18): 15803-15811.

[9] Heon Lee, Hoon K, Lee J, et al. Highly efficient, color-pure, color-stable blue quantum dot light-emitting device[J]. ACS Nano, 2013, 7(8): 295-302.

[10] Scholz S, Kondakov D, Lussem B, et al. Degradation mechanisms and reactions in organic light-emitting devices [J]. Chemical Rev. , 2015, 115(16): 8449-8503.

[11] Prachi R, Francisco P, Mirko P, et al. Enhancing the performance of CdSe/CdS dot-in-rod light-emitting diodes via surface ligand modification [J]. ACS Appl. Materials & Interfaces, 2018, 10: 5665-5672.

[12] Zhang Pengfei, Liu Shuhui, Gao Duyang, et al. Click-functionalized compact quantum dots protected by multidentate-imidazole ligands: Conjugation-ready nanotags for living-virus labeling and imaging[J]. J. of the American Chemical Society, 2012, 134(20): 8388-8391.

[13] Javaux C. Thermal activation of non-radiative auger recombination in charged colloidal nanocrystals[J]. Nature Nanotechnol. , 2013, 8(3): 206-212.

[14] Bae W K. Controlling the influence of auger recombination on the performance of quantum-dot light-emitting diodes[J]. Nature, 2013, 4: 2661.

[15] Manfredi G, Lova P, Krahne R, et al. Directional fluorescence spectral narrowing in all-polymer microcavities doped with CdSe/CdS dot-in-rod nanocrystals [J]. ACS Photon. , 2017, 4(7): 1761-1769.

作者简介:

杨 媚(1994—),女,四川德阳人,硕士生,主要从事光电材料及器件方面的研究;

刘祖刚(1961—),男,博士,教授,主要从事印刷光电子材料与器件的研究。

一种用于油气井持气率测量的高可靠性光纤探针

姜劭栋^{*}, 王 蒙, 赵庆超, 张发祥, 陈 玉, 王 昌

(齐鲁工业大学(山东省科学院) 山东省科学院激光研究所, 济南 250000)

摘 要: 针对油气井下油气水三相流的持气率测量,设计开发了一种高可靠性的光纤探针。探针敏感探头采用锥形蓝宝石结构,蓝宝石敏感探头与过渡管,以及过渡管与保护套管间均采用金基焊料焊接密封。对研制的光纤探针进行了可靠性实验和油气水三相流持气率测试,结果表明,该光纤探针可以承受高温(150 ℃)、高压(100 MPa)环境,具有较高可靠性。管柱内的油气水三相流呈段塞流型,持气率为 46%。该研究验证了光纤探针应用于油气井持气率测量的可行性,为后续的工程应用推广提供了理论依据和实际指导。

关键词: 光纤探针; 持气率; 三相流; 油气井

中图分类号: TP212.14 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0673-03

A High-reliability Optical Fiber Probe for Void Fraction Measurement of Oil and Gas Wells

JIANG Shaodong, WANG Meng, ZHAO Qingchao, ZHANG Faxiang, CHEN Yu, WANG Chang

(Laser Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250000, CHN)

Abstract: A high-reliability optical fiber probe was designed and developed for the void fraction measurement of the oil-gas-water three-phase flow in oil and gas wells, for which, a conical sapphire structure was used as the sensitive tip of the probe. The gold-based solder was exploited in order to seal the sensitive tip and the transition tube, as well as the transition tube and the protective tube. Experiments were carried out to test the reliability and void fraction, and the results show that the designed optical fiber probe is able to withstand high temperature (150 ℃) and high pressure (100 MPa) with a high reliability. In the pipe string, the void fraction of the three-phase slug flow is 46%. The research results not only verify the feasibility of using optical fiber probes to measure void fraction of oil and gas wells, but also provide theoretical basis and practical guidance for the follow-up engineering application.

Key words: optical fiber probe; void fraction; three-phase flow; oil and gas wells

0 引言

多相流是一种复杂且普遍存在的流动形态,在生物、化工、能源等行业有广泛涉及^[1-4]。油气水三相流作为多相流的一种形态,贯穿油气开采的整个过程。持气率是油气水三相流研究的重要内容,同

时也是油气井动态监测的必要参数^[5-6]。光纤探针具有体积小、响应快、灵敏度高、耐电磁干扰等优点^[7-8],近年来,其在油气井动态监测领域的应用得到国内外研究人员的关注。Cartellier 等^[9]实验研究了光纤探针测量泡状流持气率的准确性,Gaulap 等^[10]利用双光纤探针对油气两相流的持气率、速度以及局部浓度等参数进行了测量。法国 GH7 公司、美国 Schlumberger 公司以及荷兰 Openfield 公司均开展了光纤探针在油气井三相流持气率测量方面的应用研究^[11-13],并取得了一定进展。国内方面,李英伟等^[14-15]针对油气水三相流持气率测量设计开

收稿日期:2020-04-27.

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0405505);山东泰山学者工程项目(tsqn20161061);山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010113);山东省重点研发计划项目(2018GGX101042,2019GGX104054).

^{*}通信作者:姜劭栋 E-mail: shdjiang@qlu.edu.cn

发了光纤探针传感器,并对传感器进行了光学仿真、结构优化以及模拟实验。杭天渊等^[16]对光纤探针传感器的研制工艺和传光测试展开了研究。

光纤探针用于油气井持气率测量,必须要克服井下高温、高压等恶劣环境。本文首先设计了一种耐高温、高压的光纤探针,然后对封装后的光纤探针进行了高温、高压试验,验证光纤探针的可靠性。最后利用气泡发生装置进行了光纤探针持气率测量试验。本文的研究为光纤探针的油气井持气率测量提供了理论依据和实际指导。

1 传感原理及结构设计

光纤探针基于光的全反射原理进行持气率测量,如图 1 所示。由于气相折射率较小,当光由敏感探头进入气相时,在界面处发生全反射,绝大多数光返回探针,光电探测器输出高电平。由于液相折射率较大,当光到达界面处时,大部分光散射进入液相中,光电探测器输出低电平。假设每一段高电平的持续时间为 $\tau_i (i=1,2,3,\dots)$,则油气水三相流持气率可写为

$$\alpha = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\sum \tau_i}{t} \tag{1}$$

图 1 光纤探针持气率测量原理示意图

蓝宝石硬度高、透光性好、耐高温高压、耐腐蚀,是光纤探针敏感探头的优选材料。本文设计的光纤探针如图 2 所示,蓝宝石敏感探头与过渡管,以及过渡管与保护套管均通过金基焊料焊接密封。使用焊料焊接的可靠性要远高于各类胶粘剂,并且能够抵抗油气井下的高温、高压以及腐蚀环境。过渡管选用 TA18 材质,用来释放焊接过程中产生的应力。保护套管选用 Inconel718 材质,相比于 316 不锈钢,

具有更高的强度、耐腐蚀性能以及良好的焊接性能。

光电模块通过 Y 型光纤耦合器与蓝宝石敏感探头连通,光电模块内的激光光源、光电探测器以及 Y 型光纤耦合器,均选用高温器件,能够在 150 ℃ 下正常工作。光电模块不需要承压设计,光纤探针工作时,后端光电模块置于密封舱中,前端敏感探头、过渡管以及部分保护套管置于井液中。利用金属卡套,实现保护套管与密封舱的密封与固定。金属卡套的密封方式可耐压 100 MPa 以上。

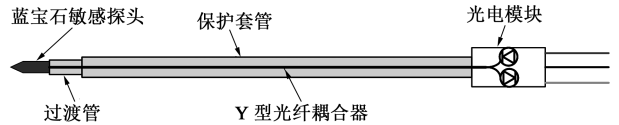


图 2 光纤探针结构示意图

2 可靠性实验

封装后的光纤探针如图 3 所示,对探针进行高温、高压可靠性实验,实验装置示意图如图 4 所示。探针前端的敏感探头、过渡管以及部分保护套管置于加压筒内部,并通过金属卡套固定密封于加压筒端部,整个加压筒置于高温烘箱内部。加压筒、压力表、针阀、活塞压力计通过高压管线依次连接。

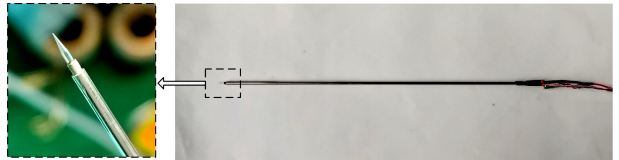


图 3 封装后的光纤探针

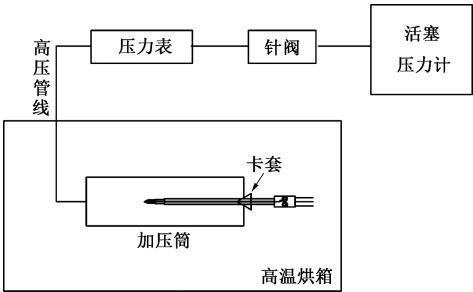


图 4 光纤探针可靠性实验装置示意图

实验装置连接完成,进行试压,确保各接头处无泄漏后开始实验。首先设置烘箱温度为 155 ℃,针阀处于打开状态。然后使用活塞压力计给加压筒打压 110 MPa,待压力稳定后关闭针阀,并记录压力表读数为 108.5 MPa。连续进行 24 h 测试,记录压力表读数为 105.7 MPa,观察金属卡套处以及探针保护套管后端无液压油泄漏。

实验结果表明,本文设计的光纤探针可以承受

高温(150 ℃)、高压(100 MPa)环境,具有较高可靠性。经过 24 h 测试,压力表数值由 108.5 MPa 降为 105.7 MPa。分析其原因,认为是由于实验装置含有 6 个高压接头以及 1 个针阀,在接头以及针阀处发生轻微漏压现象。

3 持气率测试实验

在实验室搭建了简易持气率测试实验装置,如图 5 所示。在管柱底部设置吐泡器,按照 1 : 10 的体积比将白油和水加入管柱,形成油水混合物。通过固定支架将光纤探针竖直插入油水混合物中,通过高速采集卡和上位机采集并记录探针信号。

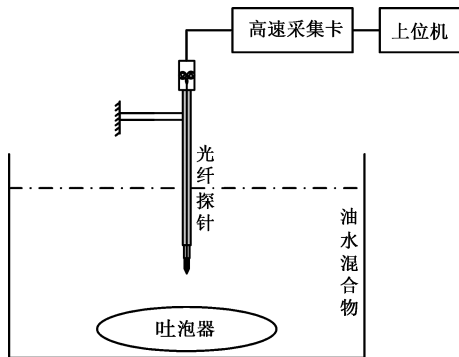


图 5 持气率测试实验装置示意图

实验结果如图 6 所示,实验采集光纤探针 5 s 的输出信号,大约在 1.7 s 时,吐泡器开始工作。此时探针输出信号出现大片连续稠密区域,表示油气水三相流呈段塞流型,油水混合物中出现塞状大气泡。根据式(1),计算得到这段时间内的持气率为 46%。通过此实验,验证了所研制的光纤探针进行油气水三相流持气率测试的可行性。

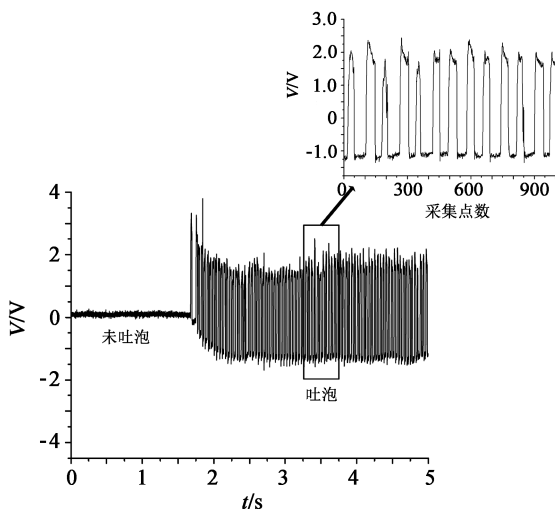


图 6 持气率测试实验结果

4 结论

本文设计制作了一种用于油气井下油气水三相流持气率测量的光纤探针,其中蓝宝石敏感探头与过渡管,以及过渡管与保护套管间均采用金基焊料焊接密封,以保证探针的高压可靠性。探针光电模块以及 Y 型光纤耦合器,能够在 150 ℃下正常工作,保证其高温可靠性。

搭建了探针可靠性实验装置,实验结果表明,本文设计的光纤探针可以承受高温(150 ℃)、高压(100 MPa)环境,具有较高可靠性。对光纤探针进行了油气水三相流持气率测试,管柱内的油气水三相流呈段塞流型,持气率为 46%。本文的研究验证了光纤探针应用于油气井持气率测量的可行性,为后续的工程应用推广提供了理论依据和实际指导。

参考文献:

- [1] Barrau E, Riviere N, Poupot C, et al. Single and double optical probes in air-water two-phase flows : real time signal processing and sensor performance[J]. Inter. J. of Multiphase Flow, 1999, 25(2): 229-256.
- [2] Yazdian F, Shojaosadati S, Nosrati M, et al. Study of geometry and operational conditions on mixing time, gas hold up, mass transfer, flow regime and biomass production from natural gas in a horizontal tubular loop bioreactor [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(3): 540-547.
- [3] Boden S, Bieberle M, Hampel U, et al. Quantitative measurement of gas hold-up distribution in a stirred chemical reactor using X-ray cone-beam computed tomography [J]. Chemical Engineering J., 2008, 139(2): 351-362.
- [4] Kosugi S, Niwa K, Saito T, et al. Design factors in gas-lift advanced dissolution (GLAD) system for CO₂ sequestration into the ocean[J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56 (21): 6205-6210.
- [5] 于莉娜,杜胜雪,李英伟,等. 基于蓝宝石光纤探针的油气水三相流含气率测量方法[J]. 测井技术, 2014, 38(2): 139-143.
Yu L N, Du S X, Li Y W, et al. Study on measurement method of gas holdup of oil-gas-water three phase flow based on sapphire optical fiber probe[J]. Well Logging Technol., 2014, 38(2): 139-143.
- [6] 张 勇,李英伟,刘兴斌,等. 持气率测量光纤探针敏感头仿真及形状优化[J]. 石油管材与仪器, 2015, 1(2): 82-84, 88.
Zhang Y, Li Y W, Liu X B, et al. Optimized measurement of gas holdup of the optical fiber probe sensitive head structure [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2015, 1(2): 82-84, 88.

(下转第 723 页)

石墨烯压力传感器结构设计与压力敏感特性研究

王 冬, 秦亚飞*, 袁锐波, 杨友朋

(昆明理工大学 机电工程学院, 昆明 650504)

摘 要: 以石墨烯作为压力传感器敏感材料, Si 为基底材料, 氮化硼(PN)为石墨烯保护材料, 惠斯通测量电桥作为力电变换测量电路, 构建了硅基石墨烯压力传感器。通过鼓泡实验法建立传感器的理论模型, 分析了传感器的压力与中心形变位移之间的关系, 并结合 ANSYS 软件静力学非线性分析单元, 针对所述石墨烯薄膜的挠度形变特性进行了数值解析与有限元仿真。结果表明, 石墨烯薄膜压力与挠度形变的理论分析与仿真结果相吻合, 这为石墨烯压力传感器提供了结构设计理论与模型基础。

关键词: 石墨烯; 压力传感器; 最大应力; 中心形变位移; 压敏电阻

中图分类号: TB321 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0676-05

Structural Design and Pressure Sensitivity of Graphene Pressure Sensors

WANG Dong, QIN Yafei, YUAN Ruibo, YANG Youpeng

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, CHN)

Abstract: Taking graphene as the sensitive material of the pressure sensor, Si as the base material, PN as the graphene protection material and Wheatstone bridge as the force-electric transformation measurement circuit, a new structure of silicon-based graphene pressure sensor was constructed. Based on the established theoretical model of the sensor with the foam experimental method, the relationship between the pressure of the sensor and the central change displacement was analyzed. And by combining with the ANSYS software static nonlinear analysis unit, the value analysis and finite element simulation were carried out to analyze the characteristics of deflection deformation of the graphene film. The results show that the theoretical analysis results of graphene film pressure and deflection deformation are consistent with the simulation ones.

Key words: graphene; pressure sensors; maximum stress; central deformation shift; pressure-sensitive resistors

0 引言

石墨烯具有原子厚度、电子迁移率高、杨氏模量高和载流子迁移率高^[1]等优点, 是非常适用于制造未来更快更节能的纳米电子器件和光子器件的材料。单层石墨烯晶格结构完整, 具有比较低的缺陷

收稿日期: 2020-07-01.

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(51325503); 昆明理工大学省级人才培养项目(KKSY201801003).

* 通信作者: 秦亚飞

E-mail: qinyafei_kmust@foxmail.com

密度和有非常高的电导率。单层石墨烯的单原子厚度仅约为 0.335 nm, 其杨氏模量高达 1 TPa, 最大可承受约 25% 的应变^[2]。在应用方面, 石墨烯优异的电输运特性、光学特性和热学特性, 使其成为场效应管^[3]、传感器^[4]及光电器件^[5]的热门材料之一。实验表明, 石墨烯还具有良好的压阻效应^[6]等特性, 这使得石墨烯有望成为传感器中的敏感材料, 在高灵敏度、大量程压力传感器领域具有广阔的应用前景。石墨烯经过沉积或转移到硅片后, 其器件集成能够与传统硅基结构半导体工艺兼容。基于石墨烯

的硅基半导体器件可以大幅度提高半导体器件的综合性能。随着石墨烯制备工艺的成熟和转移技术的优化,硅基石墨烯器件有着潜在的、巨大的实际应用价值,发挥不可估量的作用。随着半导体器件尺寸的微型化、纳米化,器件发热快、能耗高等问题逐渐成为硅基器件集成发展面临的瓶颈问题,石墨烯材料的出现为这些问题的解决提供了一种可能的方案。

压力传感器是工业实践、仪器仪表控制中最常用的一种传感器,并被广泛应用于各种工业自动控制中。压力传感器主要包括电容式及压阻式两种。电容式压力传感器由不可动下极板和可动上极板弹性膜片组成,膜片受力时,传感器的电容产生与压力呈近似线性关系的变化。压阻式压力传感器利用四个压敏电阻构成的开环或者闭环惠斯通电桥,在感压薄膜受外力发生形变时,产生与压力近似线性的电压输出,从而实现压力测量。对压力传感器进行评价的指标包括灵敏度、线性度、量程、制造成本等,航空航天、工业汽车、智能家居等各种应用场合对传感器均有不同要求。

2012 年,瑞典皇家理工学院 Smith 等完成了第一款悬浮式石墨烯压力传感器的设计与制作^[7]。通过气相沉积法在 Si 基底上生长了厚度为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的绝缘层,然后通过离子刻蚀工艺刻蚀 SiO_2 层,分别形成压力腔体($6\text{ }\mu\text{m}\times 64\text{ }\mu\text{m}$)和埋线沟槽,然后通过磁控溅射完成电极制作,最后通过转移工艺将石墨烯薄膜转移到压力空腔上,完成制备。2013 年,荷兰代尔夫特科技大学的 Zhu 等设计制备了一种压感薄膜面积为 $280\text{ }\mu\text{m}\times 280\text{ }\mu\text{m}$ 的压阻式石墨烯压力传感器^[8],用 CVD 法制备石墨烯薄膜后,将石墨烯作为敏感材料转移到 SiN 薄膜表面,当外界压力作用于 SiN 薄膜时,薄膜发生弹性形变,石墨烯也发生形变,其阻值也相应改变。2016 年,中国科学院 Lou 课题组报道了一种灵敏度高、响应快的石墨烯压力传感器^[9]。该压力传感器采用一种类似三明治结构,即两 $500\text{ }\mu\text{m}$ PDMS 膜夹着石墨烯薄膜,器件的长度、宽度和高度分别为 1.4 cm 、 0.7 cm 和 1.3 mm 。这些研究表明,石墨烯作为压力传感器的敏感薄膜是可行的,石墨烯具有比硅更高的灵敏度,可用于微压力的测量。因此,研究压力传感器的结构模型与敏感特性,设计新型石墨烯压力传感器结构,优化传感器的灵敏系数、监测范围、抗复杂环境能力等,以满足压力传感器的应用需求,在理论和应

用层面都具有重要的研究意义。目前,对石墨烯薄膜的压力敏感特性并无有效的理论模型与分析研究,本文提出了一种新型的硅基石墨烯压力传感器的结构设计,通过构建硅基石墨烯压力传感器理论模型,并结合 ANSYS 仿真软件对石墨烯薄膜的压力敏感特性进行分析研究。

1 石墨烯压力传感器的结构设计

图 1 所示为本文提出的一种新型石墨烯压力传感器的结构,Si 基底上覆盖 SiO_2 绝缘层,用氮化硼(PN)材料作石墨烯敏感薄膜的保护层,压力腔设计为棱台型,空腔上方为正方形。新型硅基石墨烯压力传感器与传统 MEMS 压力传感器的主要区别在于敏感薄膜与氮化硼材料保护层。在硅衬底表面沉积一层二氧化硅作为绝缘层,以隔绝石墨烯与硅基底的电连接。氮化硼具有类似于石墨的层状结构,且化学和热稳定性良好^[10]。氮化硼成键的离子性打破了其电子态的对称性,这在能带结构中打开了一个特别大的带隙,因此氮化硼也具有优异的绝缘性^[11]。氮化硼粘结在石墨烯薄膜上,在不影响传感器信号检测的前提下,可以避免石墨烯薄膜受到高温腐蚀等外界环境破坏,对石墨烯薄膜起到良好的隔离与防护作用。此外,作为封装保护层时,氮化硼要有一定厚度,以有效地屏蔽外界杂质散射。当石墨烯薄膜受到外界的压力时,压力直接作用在石墨烯薄膜的前表面,使薄膜产生微小的形变,薄膜电阻印刷在石墨烯薄膜的背面,连接成一个惠斯通电桥,由于压敏电阻的压阻效应,四个电阻应变片的电阻值会发生变化,破坏最初惠斯通电桥的电路平衡状态,使电桥产生一个与压力成正比的高线性度,且与激励电压成正比的电压信号。此外,在石墨烯薄膜的边缘处,应变产生的形变最大,如图 2 所示,通过扩散工艺将电阻布置在薄膜的边缘处。惠斯通电桥一般可分为单桥、半桥和全桥结构,它们的测量量程由大到小依次为全桥、半桥和单桥。本文选择全桥结构,因为全桥结构还有一个明显的优势,即线性度

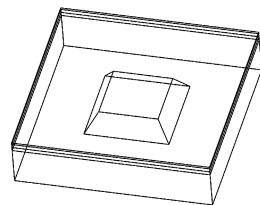
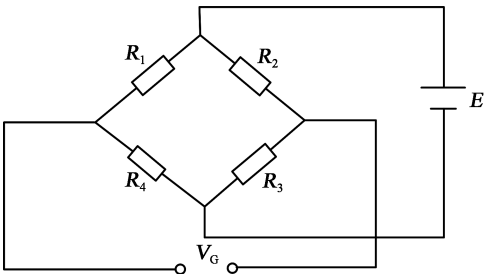
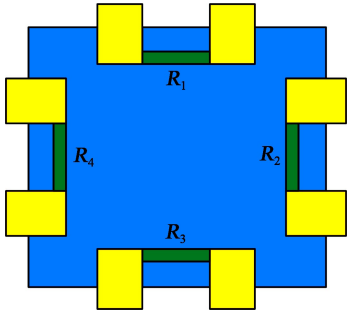


图 1 石墨烯压力传感器结构



(a) 惠斯通电桥



(b) 电阻分布

图2 惠斯通电桥及电阻位置布置

较好,这能够保证压力传感器在压力呈线性变化时保持很好的线性输出,相对误差小。

2 石墨烯压力传感器理论模型

由于石墨烯对 SiO₂ 基底具有强吸附性,建模时可认为石墨烯与 SiO₂ 基底接触部分固支。鼓泡试验法^[12]是一种建立薄膜力学模型的方法,常用于分析材料力学性能。可将受力形变的薄膜看作薄壁球壳进行应力分析,材料的杨氏模量和泊松比已知,根据材料的受力情况,可求出材料的形变量。考虑到薄膜受力是面压力,压强在各点处大小相等,故将面压力产生的压强称作压力^[13-14]。

2.1 石墨烯压力传感器理论模型

图3为石墨烯薄膜受力后发生形变的示意图。设定 p 为石墨烯薄膜受到的压力差, a 为腔体的长, σ_1 为 x 向薄膜的应力, ω 为垂直于薄膜的位移分量, u 为薄膜平面 x 方向的位移分量, ν 为石墨烯的泊松比, E 为石墨烯材料的杨氏模量, ϵ_1 为薄膜 x

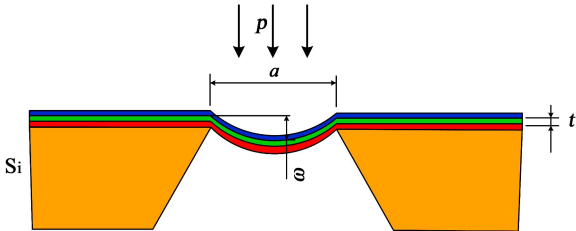


图3 石墨烯薄膜受力后发生形变示意图

方向的应变,根据弹性理论相关知识,对于薄膜材料,在考虑残余应力的情况下,压力与中心形变位移的关系为

$$p\left[1+\left(\frac{d\omega}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}=\sigma_1t\frac{d^2\omega}{dx^2}\tag{1}$$

$$\frac{d\sigma_1}{dx}=0\tag{2}$$

其中, p 为石墨烯薄膜受到的压力差, a 为石墨烯薄膜的边长, σ_1 为 x 向薄膜的应力, ω 为垂直于石墨烯薄膜的位移分量, t 为石墨烯薄膜的厚度。

由平面的应变条件可知, ω 为垂直于薄膜的位移分量, u 为薄膜平面 x 方向的位移分量, ω 和 u 为 x 的函数,即

$$\omega=f(x)\tag{3}$$

$$u=g(x)$$

根据薄膜的边界条件,抗弯刚度可以忽略,可知

$$u(\pm a)=0$$

$$u(0)=0\tag{4}$$

$$\omega(\pm a)=0$$

ϵ_1 为薄膜 x 方向的应变,由材料力学中应变的计算公式可推导:

$$\epsilon_1=\frac{1-\nu^2}{E}\sigma_0+\frac{du}{dx}+\frac{1}{2}\left(\frac{d\omega}{dx}\right)^2=\frac{1-\nu^2}{E}\sigma_1\tag{5}$$

当薄膜挠度比薄膜宽度小得多时,可以忽略式(1)中的一阶导数,很容易地积分式(1)。考虑到式(2~4),可以推导出:

$$\omega=\frac{p}{2t}\sigma_1(a^2-x^2)\tag{6}$$

利用 ω 的表达式,可以对式(5)积分得到 u ,考虑到 $u(0)=0$,可以得到:

$$u=\frac{1-\nu^2}{E}(\sigma_1-\sigma_0)x-\frac{1}{6}\frac{p^2a^2}{(t\sigma_1)^2}\tag{7}$$

通过式 $u(\pm a)=0$, 可以确定 ϵ_1 的值为

$$\sigma_1^3-\sigma_0\sigma_1^2=\frac{Ep^2a^2}{6t^2(1-\nu^2)}\tag{8}$$

设 ω_0 为沿着薄膜中心的偏转,由式(6)可得:

$$\omega_0=\frac{pa^2}{2t\sigma_1}\tag{9}$$

由式(8)和(9),可推导出压力差 p 与中心形变位移 ω_0 的关系式为

$$p=\frac{2t\sigma_0}{a^2}\omega_0+\frac{8Et}{6a^4(1-\nu^2)}\omega_0^3\tag{10}$$

根据上述压力与中心形变位移的关系式,首先,设定方形石墨烯薄膜的边长 $a=8\text{ }\mu\text{m}$,用 Matlab 软件在坐标系下绘制出压力与中心形变位移的关系曲线,如图 4。从图中可看到,当压力大于 2 MPa 后,石墨烯薄膜的压力与中心形变位移曲线变化趋于平稳,近似呈线性关系。其次,分别设定 a 为 8,16,24 和 32 μm ,从不同尺寸方腔的压力与中心形变位移的关系进行对比分析,从图 5 可看到,在相同压力下,石墨烯薄膜的尺寸越大,相应的中心形变位移越大,对压力的传感越灵敏。在相同的中心形变位移下,石墨烯薄膜的尺寸越小,需要施加在石墨烯薄膜上的压力越大,即传感器的量程越大。

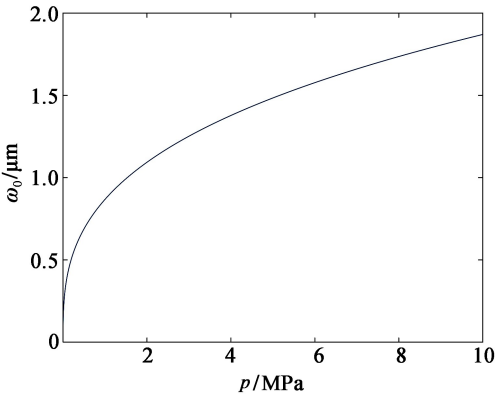


图 4 8 μm 石墨烯薄膜压力与中心形变位移关系

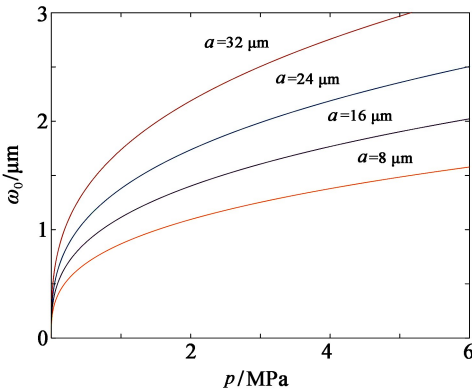


图 5 不同尺寸石墨烯薄膜压力与中心形变位移关系

2.2 石墨烯薄膜压力敏感特性有限元建模与仿真

如上文所述,本研究在 Si 基底表面生长了一层 SiO₂ 膜,在进行理论建模研究后,必须对该传感器的石墨烯薄膜压力敏感特性进行仿真分析。对石墨烯薄膜的厚度等特性进行研究,以确保在石墨烯薄膜上施加压力时,传感器有比较大的量程和良好的灵敏度。为此,利用 ANSYS 仿真软件进行力学仿真研究。由于 ANSYS 软件中自带的材料库未包含石墨烯材料,故需先对石墨烯材料参数进行定义。

建模过程中,根据相关文献[15-16],取石墨烯、Si 基底、SiO₂ 和 PN 的相关力学参数值,如表 1 所示。设定尺寸参数, SiO₂、石墨烯膜和 PN 的长宽为 68 $\mu\text{m}\times 68\text{ }\mu\text{m}$, Si 的厚度为 6 μm , SiO₂ 膜的厚度为 1 μm ,石墨烯薄膜的厚度为 20 nm, Si 下底固定约束,石墨烯薄膜及 PN 膜顶面受到垂直向下的 0.5 MPa 的压力。图 6~7 分别为 ANSYS 仿真软件在三维物理场中的仿真应变、应力云图。从云图可看出石墨烯薄膜发生应力、中心形变位移变化。所以在下述对石墨烯薄膜的厚度研究中,可将模型简化,将石墨烯薄膜周边固定,直接用二维的壳模型来模拟传感器不同结构参数下的力学性能,这样也同时保证了石墨烯薄膜压力敏感特性的准确性。

表 1 各材料的力学参数

材料	E/GPa	ν	$\rho/(10^3\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3})$
Si	190	0.278	2.3
SiO ₂	72.7	0.17	2.3
石墨烯	1 000	0.197	2.3
PN	776	0.225	2.27

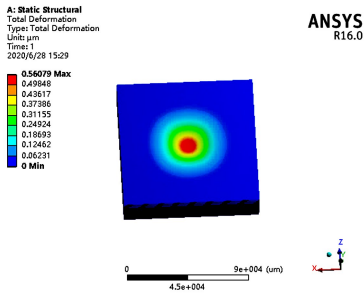


图 6 石墨烯薄膜受压中心形变位移云图

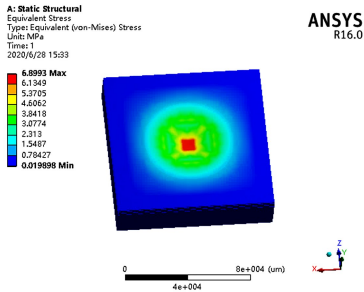


图 7 石墨烯薄膜受压应力云图

通过以上对比可知,采用 ANSYS 有限元建模仿真方法得到的结果与模型计算结果比较接近。模型计算结果与实测结果存在差别的可能原因是实际石墨烯薄膜并不是单层结构。

2.3 石墨烯薄膜厚度的仿真分析

石墨烯薄膜的厚度会影响传感器的灵敏度等性

能,石墨烯薄膜过厚容易导致其灵敏度快速降低,而如果减小到一定值,传感器灵敏度非线性增加,工艺上也更难以控制,均匀性和平整性差,影响成品率。当石墨烯薄膜受到外界压力作用时,要保证其应变与外加压力的关系具有良好的线性。

随着石墨烯厚度的增加,石墨烯表面会出现屈曲结构^[17],且石墨烯薄膜越厚,屈曲结构越容易产生。屈曲结构的出现,相当于让石墨烯形成了一定程度的初始弯曲。在受压过程中,弯曲部分会通过展平以释放应变能。因此,在形变较小时,由于屈曲结构的存在,厚层石墨烯导电通路几乎不变,灵敏度较低。因此,石墨烯的厚度对传感性能的影响是不可忽略的。利用 ANSYS 软件分别取少层、多层石墨烯进行仿真分析,石墨烯薄膜边缘设置为固定约束,并设定上述初始预应力为 0.1 N/m。此外,石墨烯的厚度远小于其受压力所产生的形变量,故需要考虑形变时的几何非线性,否则仿真出的结果会出现很大偏差。本文采取二维壳单元模型,可以有效避免几何非线性,实现准确的仿真分析。分别设置 5 组不同的石墨烯薄膜厚度,用 ANSYS 软件仿真得出石墨烯厚度与最大应力和最大中心形变位移的结果,如表 2 所示。并用 Matlab 绘制出关系结果图,如图 8 所示。

表 2 不同厚度石墨烯薄膜应力与中心形变位移

t/nm	σ/MPa	$\omega_0/\mu\text{m}$
2	0.266 0	0.015 34
4	0.237 4	0.009 62
6	0.206 4	0.004 36
8	0.183 6	0.002 18
10	0.172 7	0.001 86

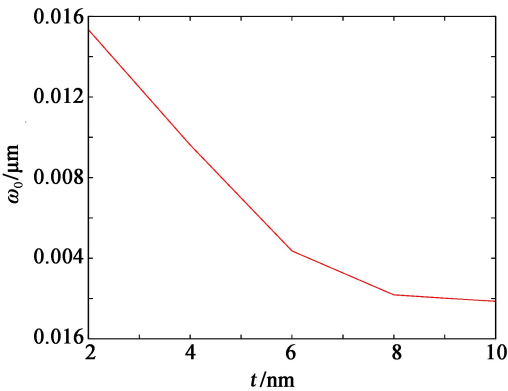


图 8 石墨烯薄膜厚度与中心形变位移关系图

从图 8 可看出,石墨烯薄膜厚度在 6 nm 前中心

形变位移随石墨烯薄膜厚度的增加而迅速减小,减小幅度很大;相比 6 nm 之前的变化,当石墨烯薄膜厚在 6~10 nm 变化时,中心形变位移变化相对较平缓。图 9 显示了石墨烯薄膜厚度在 2~10 nm 时最大应力的变化情况。可以看出,相比中心形变位移变化情况,最大应力一直大幅度下降。膜厚为 2 nm 时最大位移是 10 nm 时的 1.5 倍。因此,在做石墨烯压力传感器实品时,用单层及少层石墨烯薄膜灵敏度最高,可应用在纳米级、高灵敏、精密测量的领域。

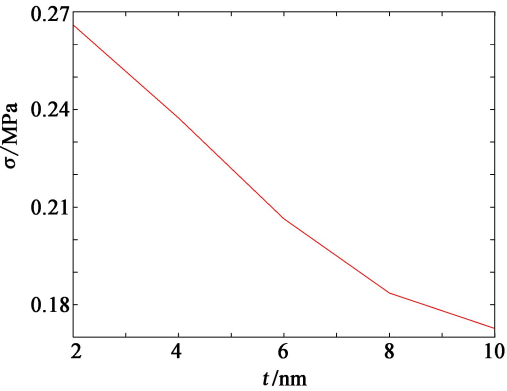


图 9 石墨烯薄膜厚度与最大应力关系图

3 结束语

本文设计了一种新型的石墨烯压力传感器结构,通过对结构进行理论建模,分析了石墨烯敏感薄膜厚度与中心形变位移和应力之间的关系。发现,当压力大于 2 MPa 后,石墨烯薄膜的压力与中心形变位移曲线变化趋于平稳,近似呈线性关系;当石墨烯薄膜厚度增加时,传感器的灵敏度随之下降。通过 ANSYS 软件仿真验证了上述关系,仿真结果与理论分析比较吻合,这为石墨烯压力传感器的结构设计 with 压力敏感特性研究提供了一定的基础。

参考文献:

[1] Bolotin K, Sikes K J, Jiang Z, et al. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene [J]. Solid State Communications, 2008, 146(9): 351-355.

[2] Morozov S V, Novoselov K S, Katsnelson M I, et al. Giant intrinsic carrier mobilities in graphene and its bilayer [J]. Phys. Rev. Lett., 2008, 100(1): 016602.

[3] Miao F, Bao W, Zhang H, et al. Premature switching in graphene Josephson transistors [J]. Solid State Communications, 2009, 149(27): 1046-1049.

(下转第 716 页)

掩模版复印工艺图形畸变分析与改进

束名扬*, 周 文, 陈栋豪

(中国电子科技集团公司第五十五研究所, 南京 211100)

摘 要: 批量化、低成本的掩模版复印工艺常被用于 LED 领域。在微米级图形的掩模版复印工艺中,受玻璃基板平面度的影响,光学衍射效应会导致图形发生畸变。为消弭复印工艺中的图形畸变,从光学衍射理论展开分析,提出通过调整光刻曝光剂量和光刻胶层厚度来提升掩模版复印工艺水平的方法。实验实现了 $4\text{ }\mu\text{m}$ 圆形图形掩模版的复印制作,结果表明该方法可以显著提升微米级图形的掩模版复印工艺水平,降低掩模版的制作成本。

关键词: 掩模版; 复印工艺; 图形畸变; 衍射; 光刻

中图分类号: TN389 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0681-04

Analysis and Improvement of the Graphic Distortion in Mask Copying Process

SHU Mingyang, ZHOU Wen, CHEN Donghao

(The 55th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 211100, CHN)

Abstract: Mask copying process is often used in the LED industry since it can be produced in large quantities with low cost. Influenced by the flatness of the glass substrate, the optical diffraction effect will cause the distortion of the micron-level graphics in the mask copying process. Aiming at eliminating the graphic distortion in the mask copying process, a method was proposed by adjusting the lithography process and resist thickness. The experiment realized the mask copying process for circular graph with the size of $4\text{ }\mu\text{m}$. The experimental result shows that this method can improve the process of mask copying for micron-level graphics and reduce the cost significantly.

Key words: mask; copying process; graphic distortion; diffraction; lithography

0 引言

掩模版在半导体光刻工艺中的作用类似于模具,通常的制作工艺是利用激光束或电子束对版材上均匀涂布的光刻胶进行曝光,再通过显影、蚀刻工艺在基板铬层上得到设计图形^[1-5]。利用激光束或电子束光刻工艺制作的掩模版精度较高,但制作效率低、价格昂贵。在分立器件以及 LED 行业中,常常批量化使用掩模版,为降低成本,一般采用掩模版复印工艺,即将利用激光束制作的掩模版作为母掩模版来批量复制子掩模版。

随着 LED 行业向蓝光以及 UV 光方向发展,图形特征尺寸越来越小,目前相应的掩模版图形特征尺寸已达到微米级,例如 GaN 基 LED 通过图形化蓝宝石衬底(PSS)技术来减小 LED 内部的位错并提高光析出率^[6-8]。光学衍射现象的存在,导致微米级图形掩模版复印光刻工艺中发生图形畸变。

本文从光学衍射理论展开图形畸变分析,提出了一种调整曝光剂量、光刻胶层厚度并配合显影工艺的方式,在满足图形关键尺寸(Critical Dimension, CD)需求的前提下消弭光衍射对子版铬层图形的影响,利用本单位掩模版复印光刻机实现了直径为 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的圆形图形的复印,显著改进了微米级图形掩模版的复印工艺。

收稿日期: 2020-04-08.

* 通信作者: 束名扬

E-mail: smy7151@126.com

1 图形畸变分析

1.1 掩模版复印工艺

掩模版复印工艺使用的基板材质一般为苏打玻璃,在玻璃基板上溅射厚度为 100 nm 的铬层并涂布一层光刻胶(铬层与光刻胶之间还有一层氧化铬作为抗反射层)。利用接触式曝光,并通过显影、蚀刻工艺将母掩模版铬层上的图形转移到子掩模版铬层上,以此来实现掩模版批量化制作。其制作工艺原理如图 1 所示。

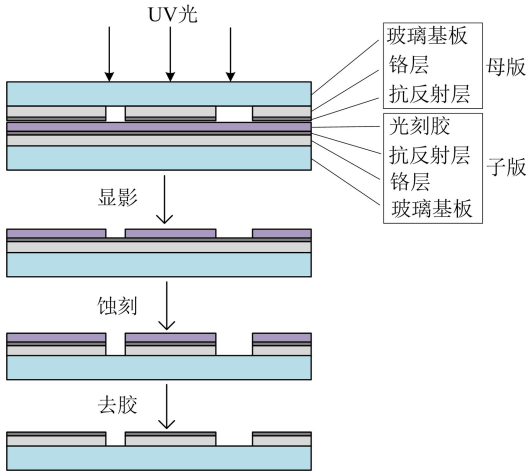
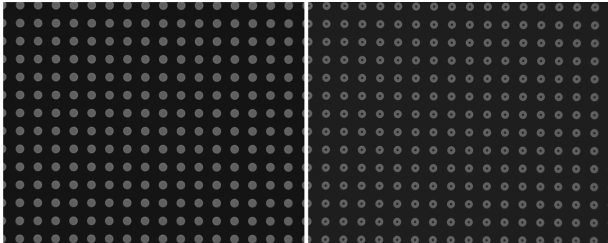


图 1 掩模版复印工艺原理示意图

受玻璃研磨加工工艺水平限制,5009 规格(长为 5 inch,厚度为 0.09 inch,1 inch=2.54 cm)苏打玻璃掩模版的表面平面度一般在 5 μm 左右。在复印工艺中,掩模版之间会存在微米级间隙。对于微米级的特征图形,紫外光在穿过母掩模版时,将在图形的边缘产生衍射,导致子掩模版上光刻胶的曝光量发生变化,衍射现象会通过后续的显影、蚀刻工艺表现为子掩模版图形发生畸变,其中最为典型的畸变现象为圆形图形子掩模版的中心位置出现针孔。图 2 为标准测试母版 5 μm 圆形图形阵列在正常复印工艺下制作掩模版的光学影像。



(a) 母版 (b) 子版

图 2 衍射效应下的图形畸变

1.2 图形畸变分析

复印光刻中衍射现象的发生将导致子版光刻胶上的光强分布发生变化。根据菲涅耳-基尔霍夫衍射理论^[9],光刻机 UV 光垂直入射到母版上时,设母掩模版铬面上光波场的振幅和相位分布函数为 $u(x',y')$,则子掩模版光刻胶上的复振幅分布可以表示为

$$E(x,y)=\frac{i}{2\lambda}\times\iint u(x',y')\times\frac{e^{-ik\rho}}{\rho}\times(1+\cos\theta)ds\tag{1}$$

式中, $k=2\pi/\lambda$ 为波矢量的模, ρ 为点 (x',y') 与点 (x,y) 之间的距离, θ 为点 (x',y') 和点 (x,y) 的连线与母版铬面点 (x',y') 处法线的夹角, ds 为母版铬面上点 (x',y') 处的面积元。则子掩模版光刻胶上点 (x,y) 的光强为

$$I(x,y)=E(x,y)\cdot\bar{E}(x,y)\tag{2}$$

根据上式,利用 MATLAB 仿真计算光刻胶上各点的光强,结合掩模版复印光刻机的实际设备参数,设置波长为 365 nm,光刻机光功率 P 为 10 mW/cm²,则子版光刻胶上的光强分布如图 3 所示。

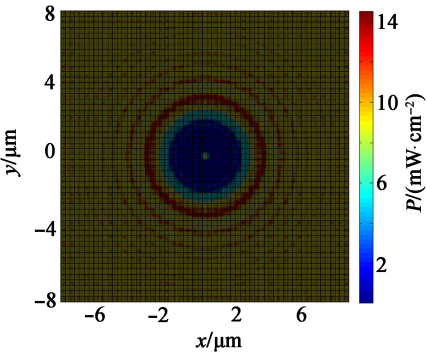


图 3 复印工艺光强分布

根据图 3 的光强分布可知,光衍射效应的最大干涉峰值出现在图形中心位置,与图 2 中出现的针孔畸变现象吻合。根据衍射理论,光在子版光刻胶面的光强分布与图形尺寸、波长以及子母版之间的间隙有关,光刻机光源波长及光功率可以认为是相对稳定的。结合实际苏打玻璃基板平面度以及复印工艺需求,从图形尺寸以及子母版之间的间隙尺寸两个方面对衍射光强进行分析。图 4 为 4 μm 圆形图形分别在 2,5 以及 8 μm 间隙下的光强分布。

根据图 4 的衍射光强分析可知,中心衍射峰幅值与子母版之间的间隙呈正相关关系,且中心衍射峰的宽度随间隙的增大而增大。考虑到图形尺寸对

衍射光强的影响,以 5 μm 间隙为参考,分析图形尺寸 ϕ 分别为 4,5 以及 6 μm 对衍射光强分布的影响,如图 5 所示。

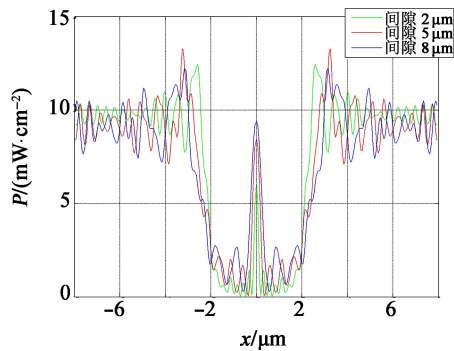


图 4 4 μm 圆形图形在不同间隙下的光强分布

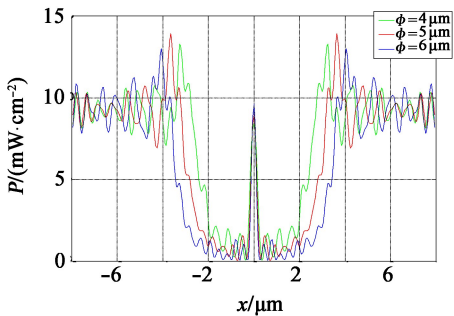


图 5 不同尺寸图形在 5 μm 间隙下的光强分布

由图 5 可知,图形中心衍射峰的宽度与图形尺寸呈负相关关系。根据上述分析,可以得出图形畸变程度随图形尺寸的变小、掩模版之间间隙的变大而愈加明显,这与实际工艺现象基本一致。

1.3 工艺改进

应用于掩模版复印工艺的光刻胶一般使用 AZ1500 系列正性胶。其主要成分为聚合物材料酚醛树脂酯、感光材料(Photo Active Compound)二氮萘醌以及辅助溶剂^[10],显影液一般为强碱性溶液,典型的显影液如 TMAH,KOH 或 NaOH 溶液。二氮萘醌在曝光之前对显影液呈现不溶性,降低了光刻胶的总溶解速度。曝光时,二氮萘醌分子将发生 Wolff 重排列,其 N₂ 化学键被打断后产生的烯酮分子在水溶液中转变为羟基酸从而易溶于典型显影液,曝光剂量越高,光刻胶的显影速度越快。

结合上述衍射光强分布分析以及光刻、显影工艺可知,图形中心衍射区域光刻胶完成显影、蚀刻并出现针孔畸变需要满足两个条件:(1)衍射区域曝光剂量超过光刻胶的光阻值;(2)衍射区域大小超过光刻胶的分辨率。

据此分析,可以通过调整曝光剂量或者降低光

刻胶的分辨率来消弭光衍射对铬层的影响。通常使用的苏打玻璃掩模版胶层厚度一般为 500 nm,光阻值约为 20 mJ/cm²,通过严格控制曝光剂量可以使衍射中心大部分区域的曝光剂量低于光阻值。查询 AZ1500 系列光刻胶数据资料可知,对于普通胶厚为 500 nm 的掩模版,其光刻分辨率约为 600 nm,且分辨率随着胶厚的增加而降低,可以通过适当增加胶层厚度来降低分辨率。

2 实验分析

作为对比试验,选用与图 2 相同的一片标准测试母版、同规格基板(5009 苏打玻璃基板,平面度 5 μm)的版材复制制作子掩模版,光刻胶厚度分别为 500 和 1 000 nm,其中 500 nm 版材复印光刻时间调低至 2 s,通过调整显影时间控制图形 CD 尺寸,如图 6 所示。

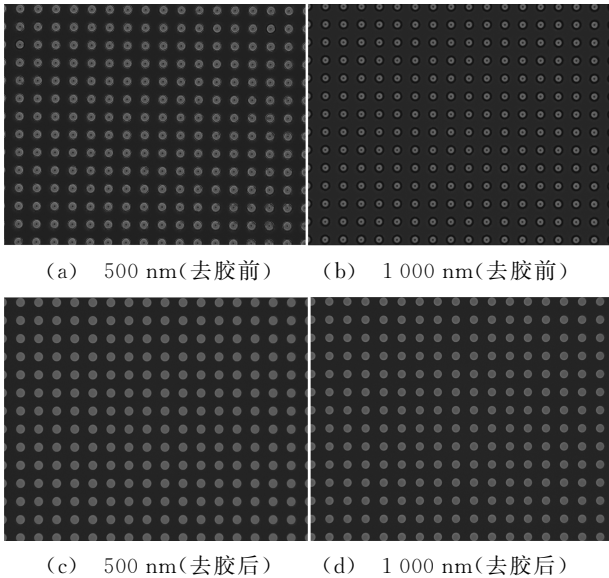


图 6 不同胶层厚度下标准版 5 μm 图形测试结果

分别检测两片子掩模版上 9 $\times$ 9 阵列排布的 81 组测试图形,可以看出,去胶前图形胶层中心存在不同程度的显影,去胶后铬层均无蚀刻现象,5 点量测 CD 一致性偏差小于 0.3 μm 。与图 2 对比,调整光刻工艺中曝光剂量与胶层厚度两种方式均可以在满足工艺需求的前提下避免光学衍射对铬层的影响。

进一步,针对当前客户需求的 4 μm 圆形图形进行测试,光刻胶厚度仍然分别采用 500 和 1 000 nm 两种。光刻时间、显影工艺与上述实验一致,测试结果如图 7 所示。

由测试结果可知,检测 100 mm $\times$ 100 mm 区域

内阵列分布的 4 μm 图形,经过显影、蚀刻工艺后图形胶层中心均存在孔洞现象,但去胶后图形中心铬层均未被蚀刻,在 4 μm 图形复印制版工艺中避免了光衍射对铬层图形造成畸变影响。

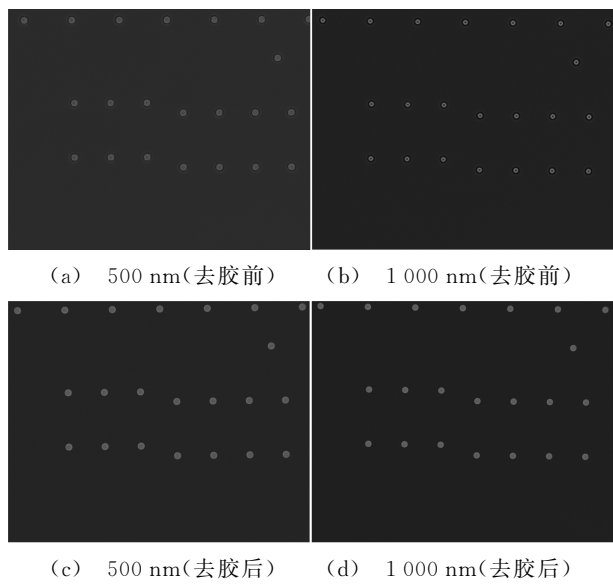


图 7 不同胶层厚度下 4 μm 图形测试结果

3 结论

针对掩模版复印工艺中圆形图形发生畸变的现象,本文从光学衍射的角度对畸变原理进行了分析。在当前玻璃基板加工工艺水平提升有限的情况下,结合光刻、显影工艺,从曝光剂量、光刻胶厚度等角度提出一种消弭光衍射现象的工艺方法。目前该方法可以在保证 CD 精度的前提下实现特征尺寸 4 μm 及以上图形的复印制版工艺,较好地满足了 LED、分立器件行业对复印掩模版的需求,通过复印工艺替代了部分掩模版的激光束制作工艺,显著降低了该类掩模版的制作成本,提高了良品率。

受当前光刻机光源波长限制,本文尚未就光源波长对图形的畸变影响展开分析,在后续研究中可进一步展开对光源波长的分析,为特征尺寸 4 μm 以下图形的复印工艺寻求改进措施。

参考文献:

[1] 张士健. 45 纳米掩模版缺陷的可成像性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008: 1-9.
Zhang Shijian. 45 nm mask defect printability test [D].

Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008: 1-9.
[2] 陈明. 掩模版光刻工艺研究[D]. 上海: 复旦大学, 2011: 2-10.
Chen Ming. Research on mask lithography technology [D]. Shanghai: Fudan University, 2011: 2-10.
[3] Jackson C, Buck P, Cohen S. DUV laser lithography for photomask fabrication [C]// Proc. 23th Annual BACUS Symp. on Photomask Technol., 2003, 5256: 30-41.
[4] Jackson C, Kiefer R, Buck P. Print characterization of photomasks from next-generation deep-ultra-violet laser pattern generator [C]// Proc. Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology X. , 2005, 5853: 387-397.
[5] Pang Linyong, Shamma N, Rissman P. Laser and E-beam mask-to-silicon with inverse lithography technology [C]// Proc. 25th Annual BACUS Symp. on Photomask Technol., 2005, 599221: 1-10.
[6] 王安生. AlGaIn 基深紫外倒装 LED 光提取效率的研究[D]. 南京: 南京大学, 2019: 2-4.
Wang Ansheng. Study on light extraction efficiency in AlGaIn-based deep-ultraviolet light-emitting diodes with flip-chip structure[D]. Nanjing: Nanjing University, 2019: 2-4.
[7] 管婕. GaN 基蓝光 LED 结构和光电性能的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016: 3-4.
Guan Jie. Research on the structure and the electrical and optical performances of GaN-based blue LEDs [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016: 3-4.
[8] 周仕忠. 图形化蓝宝石衬底上 LED 外延的形核机理及衬底图案设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2015: 6-18.
Zhou Shizhong. Detailed study of nucleation mechanism and pattern design on patterned sapphire substrates for GaN-based LEDs[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015: 6-18.
[9] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工程出版社, 2011: 380-384.
Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 380-384.
[10] 吴敏. 0.18 μm 光刻制程中显影工艺的优化[D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 5-7.
Wu Min. Optimization of developer technic in 0.18 μm lithography process [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013: 5-7.

作者简介:

束名扬(1990—),男,安徽芜湖人,硕士,工程师,从事掩模版工艺技术研究。

PERC 背钝化结构提升多晶硅太阳能电池的光电转换性能研究

吕文辉^{1,3*}, 邱小永^{1,2}, 赵庆国^{1,2}, 姚春梅^{1,2}, 何一峰¹, 高拥刚², 陆波¹

(1. 浙江贝盛光伏股份有限公司, 浙江 湖州 313008; 2. 浙江创盛光能源有限公司, 浙江 湖州 313008;

3. 湖州师范学院 应用物理系, 浙江 湖州 313000)

摘要: 在工业产线上制备了 PERC 结构的多晶硅太阳能电池, 并研究了在电池背表面引入 PERC 背钝化结构对其光电转换性能的影响。结果表明: PERC 背钝化结构能够提升电池的短路电流和开路电压, 光电转换效率超过了 20%。结合光学仿真及分析电池的关键光电参数知, 其光电转换性能改善的原因可归结为 PERC 背钝化结构降低了长波太阳光子在背铝电极的寄生吸收损失和光生载流子的背表面复合损失。PERC 背钝化结构能够提升多晶硅太阳能电池的光电转换效率, 并且其制备工艺与传统产线兼容, 是一种优选的产业电池结构。

关键词: 多晶硅太阳能电池; PERC 背钝化结构; 光电转换效率

中图分类号: TN40 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0685-04

Enhanced Power Conversion Performance of Multi-crystalline Silicon Solar Cells with PERC Structure

LV Wenhui^{1,3}, QIU Xiaoyong^{1,2}, ZHAO Qingguo^{1,2},

YAO Chunmei^{1,2}, HE Yifeng¹, GAO Yonggang², LU Bo¹

(1. Zhejiang Beyondsun PV Co. Ltd., Huzhou 313008, CHN; 2. Zhejiang Trunsun Solar Co. Ltd., Huzhou 313008, CHN;

3. Department of Applied Physics, Huzhou Normal University, Huzhou 313000, CHN)

Abstract: Multi-crystalline silicon (mc-Si) solar cells with passivated emitter and rear cell (PERC) structure were successfully fabricated on an industrial production line, and the effects of PERC structure on the power conversion performance of the solar cells were studied. The results indicate that, the PERC mc-Si solar cells exhibit an enhanced short-circuit current and open-circuit voltage, resulting in high power conversion efficiency of up to 20.14%. The enhanced optoelectronic conversion can be attributed to the reduced parasitic absorption loss of long wavelength photons and reduced recombination of charge carriers on the rear surface of PERC mc-Si solar cells. The PERC structure can improve the conversion efficiency of mc-Si solar cells, and can be compatible with traditional process, thus it can be regarded as an optimal cell structure.

Key words: multi-crystalline silicon solar cells; PERC structure; power conversion efficiency

收稿日期: 2020-05-31.

基金项目: 浙江省重点技术创新项目; 湖州市科技计划项目 (2019ZD2012, 2018ZD2009, 2019KT31); 南太湖创新团队项目.

* 通信作者: 吕文辉

E-mail: whlv2016@189.cn

0 引言

多晶硅太阳能电池的前后表面光电结构及其制备工艺是决定器件性能的重要因素。针对传统铝背场(Al-BSF)多晶硅太阳能电池,其前表面通过集成纳米绒面陷光技术^[1-2]、浅结高方阻技术、多层氮化硅减反钝化技术^[3]及多主栅密细栅二次印刷技术^[4],有效地降低了电池前表面的光电损失,批量制造电池产品的产线均值光电转换效率超过了19%。可是,Al-BSF多晶硅太阳能电池背表面光电损失成为限制其器件性能进一步提升的瓶颈问题。主要原因包括:(1)长波太阳光子(950~1 200 nm)的吸收系数低^[5],180 μm厚的晶体硅不能完全吸收长波太阳光子,导致其随后被电池的背铝电极寄生吸收;(2)电池背表面晶硅与背铝电极直接接触,载流子在接触界面复合速率高,复合电流密度高达550 fA/cm²^[6],造成严重的载流子复合损失。

原子层淀积法(ALD)制备的氧化铝(AlO_x)超薄膜中具有较高密度的固定负电荷,能够有效在场钝化p型晶体硅,使晶体硅表面的复合电流密度低至10 fA/cm²^[7]。因此,在多晶硅太阳能电池背表面与背铝电极之间引入ALD制备的超薄AlO_x介质层,可有效地降低电池背表面的载流子复合损失。进一步,采用等离子增强化学气相淀积法(PECVD)可制备氮化硅(SiN_x)薄膜,与AlO_x形成叠层,能够干涉耦合长波太阳光,增强其背表面内部反射利用,降低背铝电极寄生光吸收损失。最后,通过对AlO_x/SiN_x双层薄膜激光开孔及印刷、烧结背铝电极可形成局域Al-BSF结构,用于收集载流子。这种光电结构被称为PERC背钝化结构,是一种替代传统Al-BSF电池的产业升级结构,可提升多晶硅太阳能电池产品的性能。

本研究在标准工业产线上制备了PERC多晶硅太阳能电池片,探究和证实PERC背钝化结构提升多晶硅太阳能电池的光电转换性能。结合光学仿真及电池片的关键光电参数,对比研究了在电池背表面引入PERC背钝化结构对其光电转换性能的影响,分析了光电转换效率提升的原因。

1 实验

以157 mm×157 mm p型金刚线切割太阳能级多晶硅片为原料,采用标准晶硅太阳能电池产线工艺分别制备了Al-BSF和PERC多晶硅太阳能电池(各

1 000片),对比研究其光电转换性能,并探究在多晶硅太阳能电池背表面引入PERC背钝化结构对其光电转换性能的影响及原因。电池片制备的产线工艺流程如图1所示,PERC结构相对于Al-BSF结构的多晶硅太阳能电池增加了ALD制备的超薄AlO_x介质层、PECVD制备的SiN_x介质层,以及AlO_x/SiN_x双层介质薄膜激光开孔工艺。通过优化,将AlO_x介质层厚度控制在2~3 nm, SiN_x介质层厚度控制在110~120 nm。激光开圆孔的面积占电池背表面面积的2%~3%,从而有效地避免局域Al-BSF区域的寄生光吸收损失和背表面载流子复合损失。

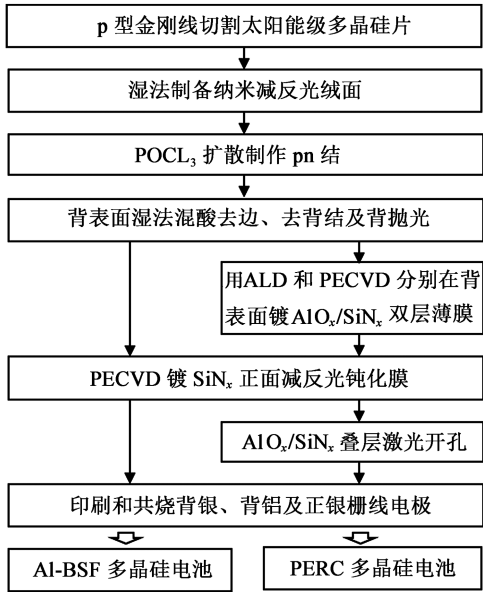


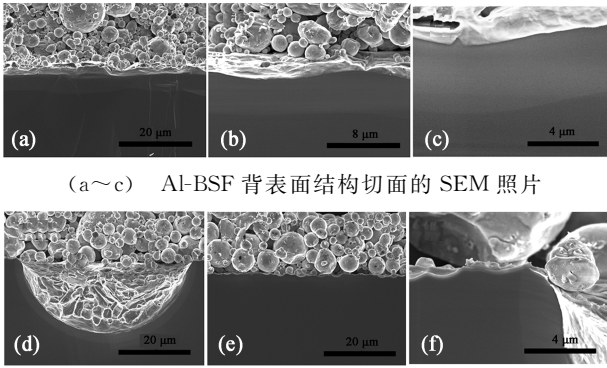
图1 Al-BSF和PERC多晶硅太阳能电池制备流程

采用扫描电子显微镜表征多晶硅太阳能电池背表面的Al-BSF结构和PERC背钝化结构。在AM1.5G模拟太阳光照下测试两组电池片的光电转换性能,光照强度为100 mW/cm²,获得关键光电参数,以表征电池片的光电转换性能。

2 结果与讨论

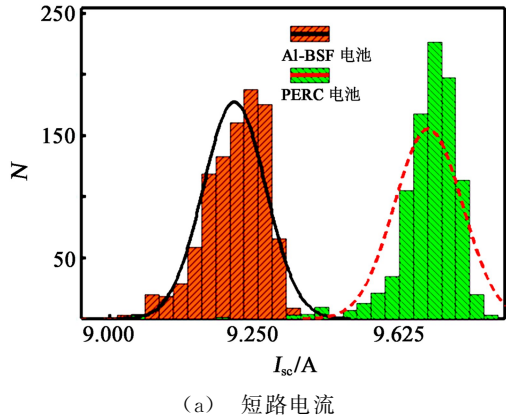
图2(a)、(b)和(c)为Al-BSF结构的切面SEM照片。图中显示,Al-BSF结构由四层结构组成,自外向内依次为:铝浆电极、硅铝合金层、铝重掺杂晶体硅层以及p型晶体硅基极。其中,铝重掺杂晶体硅层厚度约为4 μm。上述四层结构组成的Al-BSF结构能够排斥电子,降低载流子背表面复合,并形成欧姆接触,收集空穴。图2(d)、(e)和(f)为PERC背钝化结构的切面SEM照片。图中显示PERC背

钝化结构分两个区域。一个区域为半圆形,如图 2 (d)所示,由印刷铝电极、硅铝合金层、铝重掺杂晶体硅层以及 p 型晶体硅基极四层结构组成,形成局域 Al-BSF 结构。另一个区域较为平整,如图 2(e)所示,由印刷铝电极、介质层以及 p 型晶体硅基极三层组成,形成背钝化结构。局域 Al-BSF 结构占电池背表面面积的 2%~3%,用来收集空穴;背钝化结构占电池背表面面积的 97%~98%,用于钝化 p 型晶体硅背表面及干涉耦合长波太阳光子,降低背表面载流子复合及增强长波太阳光子内部反射利用。

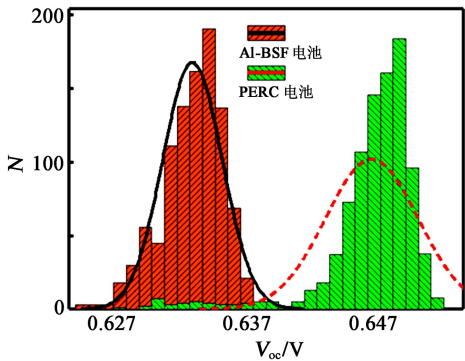


(a~c) Al-BSF 背表面结构切面的 SEM 照片
(d~f) PERC 背钝化结构切面的 SEM 照片
图 2 不同放大倍率下两种结构切面的 SEM 照片

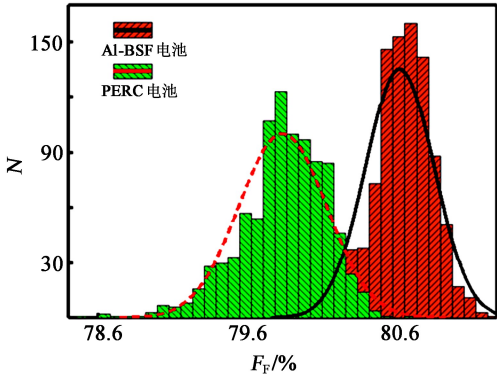
图 3(a)~(d)分别为 Al-BSF 和 PERC 背钝化结构的多晶硅太阳电池的短路电流、开路电压、填充因子和光电转换效率的统计分布,图中纵坐标 N 为芯片数量。图中显示 PERC 背钝化结构的多晶硅太阳电池的均值短路电流和开路电压明显高于 Al-BSF 结构的多晶硅太阳电池,可是,前者的均值填充因子却略低于后者。综合短路电流 I_{sc} 、开路电压 V_{oc} 、填充因子 F_F 三个因素,PERC 背钝化结构的均值光电转换效率 η 明显高于 Al-BSF 结构的多晶硅太阳电池。该结果证实了 PERC 背钝化结构能够有效地提升多晶硅太阳电池的光电转换性能。



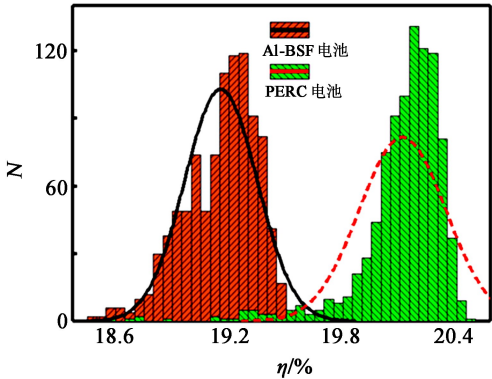
(a) 短路电流



(b) 开路电压



(c) 填充因子



(d) 光电转换效率

图 3 两组多晶硅太阳电池四个光电参数的分布

表 1 统计了两种结构的多晶硅太阳电池的均值光电参数。相对于 Al-BSF 结构,PERC 背钝化结构的多晶硅太阳电池的均值短路电流和开路电压均有所提升,分别提高了 0.343 A 和 0.014 1 V,提升比率分别为 3.72%和 2.22%。但 PERC 背钝化结构的多晶硅太阳电池的均值填充因子绝对降低 0.80%,降低比率为 0.99%。上述短路电流和开路电压的提升比高于填充因子的降低比,最终使得 PERC 背钝化结构相对于 Al-BSF 结构的多晶硅太阳电池的均值光电转换效率绝对增加 0.96%,超过了 20%。

表 1 两组多晶硅太阳电池的均值光电参数对比

电池结构	V_{oc}/V	I_{sc}/A	$F_F/\%$	$\eta/\%$
Al-BSF 电池	0.633 7	9.221	80.65	19.18
PERC 电池	0.647 8	9.564	79.85	20.14
提升值	0.014 1	0.343	-0.80	0.96
提升比率/%	2.22	3.72	-0.99	5.01

根据理想因子为 1 的单二极管模型,晶硅太阳电池的开路电压 V_{oc} 可表示为

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_{ob} + I_{oe}} + 1 \right) \approx \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_{ob} + I_{oe}} \right)$$

(1)

其中, $kT/q = 0.025\ 85\ V$ 为热电势, I_{sc} 为短路电流, I_{ob} 为基极饱和电流, I_{oe} 为发射极饱和电流。结合式(1)与实验获得两组多晶硅太阳电池片的均值开路电压及均值短路电流,计算得出 Al-BSF 结构和 PERC 结构电池的总饱和电流分别为 2.081×10^{-10} 和 $1.251 \times 10^{-10}\ A$ 。两种电池前表面工艺完全一致,发射极饱和电流相同,从而证实 PERC 结构电池相对于 Al-BSF 结构电池具有更低的基极饱和电流。另外两种电池所用硅材料相同,因此二者饱和电流的差异来源于电池背表面的 Al-BSF 结构和 PERC 结构,即 PERC 背钝化结构使多晶硅太阳电池具有更低的基极饱和电流和背表面载流子复合损失,从而使得电池获得更高的开路电压。

为了理解 PERC 背钝化结构提升多晶硅太阳电池短路电流的物理机制,基于光线追踪法及晶体硅^[5]、氮化硅^[8]、氧化铝^[9]及金属铝^[10]的光学常数,仿真计算了 950~1 200 nm 长波太阳光子在金字塔绒面的晶硅太阳电池背表面的光吸收。该光吸收不参与光电转换,被称为寄生吸收损失。计算结果如图 4 所示,可以看出,PERC 结构相对于 Al-BSF 结构的多晶硅太阳电池对长波太阳光子具有

更低的寄生吸收损失,相应基极将能够吸收更多的长波光光子,能够提升电池的短路电流。同时,叠加 PERC 多晶硅太阳电池背表面光生载流子复合损失小、收集效率高,从而使 PERC 结构多晶硅太阳电池具有较高的短路电流。

考虑到串联电阻效应,晶硅太阳电池的填充因子 F_F 可表示为^[11]

$$F_F = F_{F0} (1 - r_s) = F_{F0} \left(1 - \frac{R_s}{R_{ch}} \right)$$

(2)

其中, F_{F0} 为不计串联电阻影响的填充因子, R_{ch} 为电池片最大功率点的电阻, R_s 为电池片的串联电阻。多晶硅太阳电池的电性能测试结果表明, Al-BSF 和 PERC 两种电池的均值串联电阻分别为 1.21 和 1.94 mΩ。结合式(2),PERC 多晶硅太阳电池片填充因子低的原因可归结为其背钝化结构中局域导电通道面积小、串联电阻大。

上述实验结果证实,产线制备的 PERC 相对于传统 Al-BSF 多晶硅太阳电池,光电转换效率得到提升,其物理原因可归结为 PERC 背钝化结构降低了长波太阳光子在背铝电极的寄生吸收损失和光生载流子的背表面复合损失。

3 结论

在多晶硅太阳电池产线上制备了工业尺寸的 PERC 多晶硅太阳电池,实验证实了其具有改善的光电转换性能。相对传统 Al-BSF 结构,PERC 结构的多晶硅太阳电池的光电转换效率超过了 20%,绝对提升接近 1%。光电转换性能改善的物理原因归结为 PERC 背钝化结构降低了长波太阳光子在背铝电极的寄生吸收损失和光生载流子的背表面复合损失。PERC 背钝化结构能够提升多晶硅太阳电池的光电转换效率,制备工艺与传统产线兼容,是一种优选的产业电池结构。

参考文献:

[1]

Oh J, Yuan H C, Branz H M. An 18.2%-efficient black-silicon solar cell achieved through control of carrier recombination in nanostructures[J]. Nat. Nanotech., 2012, 7 (11): 743-748.

[2]

Lu W H, Qiu X Y, Zhao Q G, et al. Enhanced optoelectronic conversion in diamond-wire sawing multi-crystalline silicon solar cells through nanotexture-induced photon management [J]. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 2018, 185: 439-444.

(下转第 694 页)

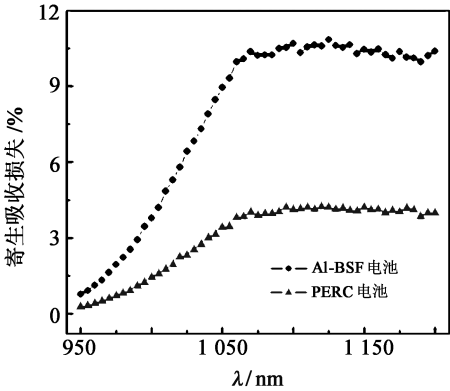


图 4 Al-BSF 和 PERC 结构的多晶硅太阳电池背表面对 950~1 200 nm 长波光子的寄生吸收损失

三角形硅二聚体纳米天线及其荧光增强效应研究

刘占锋^{1,2}, 曹文静^{1,2}, 孙 非^{1,2}, 陈智辉^{1,2*}

(太原理工大学 1. 新型传感器与智能控制教育部/山西省重点实验室; 2. 物理与光电工程学院, 太原 030024)

摘 要: 提出了一种三角形硅二聚体纳米天线结构,该结构可以从激发和发射过程同时提高荧光物质的荧光发光效率,并且实现荧光的远场定向发射增强。利用时域有限差分法详细研究了不同组合方式的三角形二聚体、不同三角形直角边长以及不同二聚体底角间距对荧光发射增强效果的影响,并进行了结构参数的优化,研究了该结构对荧光激发过程的影响。结果表明,三角形硅二聚体纳米天线结构的直角边长为 300 nm,二聚体底角间距为 0 nm 是纳米天线的最优参数。相对于裸光源,硅二聚体纳米天线使点光源的荧光发射增强了 7 倍,实现了远场定向发射。而且,在 405 nm 波长光的激发下,荧光激发过程也得到了增强。

关键词: 荧光传感; 纳米天线; 米氏共振; 定向发射

中图分类号: O436 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0689-06

Research on Triangular Silicon Dimer Nano-antenna and Its Fluorescence Enhancement Effect

LIU Zhanfeng^{1,2}, CAO Wenjing^{1,2}, SUN Fei^{1,2}, CHEN Zhihui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Advanced Transducer and Intelligent Control System of the Ministry of Education and Shanxi Province;

2. College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, CHN)

Abstract: In this work, a triangular silicon dimer nano-antenna structure was proposed, which can improve the fluorescence emission efficiency of the dipole source in the excitation and emission process at the same time, and realize the enhancement of far-field directional emission. The effects of the combination of the dimer, the size of the triangle's right-angle side, and the spacing of the dimer on the enhancement effect of fluorescence emission were studied by using the finite difference time domain method, and the structural parameters were optimized. Finally the effect of the structure on the fluorescence excitation process was studied. The results show that the triangular silicon dimer nano-antenna structure with the right-angle side length of 300 nm and the dimer spacing of 0 nm are the optimal parameters of the nano-antenna. Compared with the bare light source, the fluorescence emission intensity of silicon dimer nano-antenna is increased by 7 times, and the far-field directional emission is realized. Moreover, under the excitation of 405 nm wavelength light, fluorescence excitation enhancement can be achieved.

Key words: fluorescence sensing; nano antenna; Mie resonance; directional emission

0 引言

荧光是辐射跃迁的一种,是发光物质从激发态

退激发到低能状态时所释放的辐射。通过监测荧光强度、偏振等光学信息的变化可以检测出物质的多种特性,如浓度、种类、温度等,以及生化反应的过程,进而被应用于各类传感领域。荧光传感技术在生命科学、食品安全^[1-4]等众多领域已有广泛应用。随着社会信息化、智能化的发展,人们对荧光传感灵敏度的要求越来越高,而荧光发光效率及远场定向

收稿日期:2020-05-01.

基金项目:国家自然科学基金项目(11674239, 61575139, 61575138);山西省青年拔尖人才支持计划项目;三晋英才支持计划项目.

* 通信作者:陈智辉

E-mail: huixu@126.com

发射对荧光传感的灵敏度至关重要。但是,荧光物质的量子产率和发光强度低^[5]以及荧光发射定向性差等因素导致荧光传感的灵敏度降低,进而使荧光传感技术的应用范围受到制约。目前,已经有多种方法可以提高荧光发光效率,其中在荧光光源周围引入光学纳米天线的方法引起了广泛关注^[6-8]。

纳米天线是一种重要的光学器件,能在纳米尺度上实现对光的操纵和控制。纳米级的光子发射源,如量子点和有机染料分子,其发光强度低,且具有全方向发射特性,因此需要利用纳米天线来对荧光分子的发射强度和方向进行调控^[9]。一方面,纳米天线可以把入射的激发光限制在热点区域,使局域电磁场增强几个数量级,从而增强荧光的激发过程。另一方面,纳米天线的共振模式改变了光学态的局部密度,相比自由空间,产生了更多的衰减通道。因此纳米天线可以显著改善荧光的辐射衰减率以及远场辐射强度。常见的纳米天线有金属纳米天线、电介质纳米天线等。金、银等贵金属纳米天线常被用来增强荧光^[10]。由于金属表面的电子会产生集体振荡,即产生表面等离子体共振^[11],金属纳米天线可以将电磁波有效地限制在亚波长区域,在纳米天线的近场区域产生很强的局域场增强效应,进而提高荧光的激发效率。然而,基于表面等离子体增强荧光的纳米天线,只能在天线间隙几十纳米的范围内实现局域场增强。例如,2015年Zhang等^[13]提出的金纳米棒二聚体结构,其间隙宽为6.1 nm时荧光增强了470倍,但仅限于几十纳米间隙实现荧光增强,而且荧光发射的定向性较差。不仅如此,由于贵金属固有的非辐射衰变、欧姆损耗以及容易发生荧光淬灭^[12]等不利因素的影响,金属纳米天线增强荧光的应用范围受到限制。

为了避免金属高损耗等缺点的限制,高折射率电介质材料,如硅、锗、砷化镓等被用来替代金属去增强荧光^[14-15]。高折射率材料的光学结构具有非常低的光学损耗,许多电介质材料与半导体器件技术相兼容。高折射率电介质纳米结构与电磁波发生米氏共振^[16],电偶极子和磁偶极子模式同时存在,产生独特的光学共振,进而可以实现近场局域增强,提高荧光激发效率,同时一定程度上提高荧光发射的定向性。例如,2016年,Regmi等^[17]提出用基于硅二聚体的全电介质纳米天线来增强单分子的荧光检测特性,硅二聚体纳米天线在20 nm间隙的近场区域实现荧光增强。但是只有荧光分子在特定的间

隙位置处,才得到有效的荧光增强,而且荧光发射的远场定向性不佳,不利于实际生物荧光传感的应用。为了进一步增强荧光信号的远场收集效率,本文提出一种三角形硅二聚体纳米天线。一方面,该结构可以增强荧光激发过程;另一方面,该结构中高折射率的硅二聚体与荧光发生米氏共振,可以实现荧光远场定向发射增强。与裸光源相比,使用本文提出的纳米天线结构可以使荧光发射强度增强7倍。该二聚体纳米天线对提高荧光成像分辨率和单光子探测灵敏度等具有重要的现实意义。

1 模型与方法

本文提出了由两个等腰直角三角形硅组成的二聚体纳米天线结构,其结构示意图如图1所示,三角形直角边长设为 l ,二聚体底角间的距离设为 d 。本文分别研究了不同组合方式的三角形二聚体、不同三角形直角边长以及不同二聚体底角间距对荧光发射的影响,最后研究二聚体纳米天线对荧光激发过程的影响。本文采用时域有限差分法进行数值计算。硅的材料参数来自Palik手册^[18]。仿真区间为 $(x, y) = (-1 : 1, -1, 3) \mu\text{m}$, x 和 y 方向的网格均设置为5 nm。在发射过程, x 和 y 方向均采用完美匹配层(PML)作为边界条件,在边界处完全吸收光。模拟中使用位于 $(0, 0, 1) \mu\text{m}$ 处的电偶极子作为点光源来模拟荧光分子发光。在 $(0, 2) \mu\text{m}$ 处设置功率监视器,用来计算点光源的远场发射总功率。同时,设置电场监视器来计算特定波长下点光源的电场分布。在激发过程中,仿真区间不变, x 方向采用布洛赫边界条件, y 方向采用完美匹配层边界条件。在结构上方 $y = 1 \mu\text{m}$ 处设置波长为405 nm的平面波来模拟405 nm激发光,沿着一 y 轴方向照射纳米天线结构。在 $(0, 0, 1) \mu\text{m}$ 处设置一个电场 E 的监测器,从时域和频域对纳米天线内电场 E 进行分析。通过对有无二聚体纳米天线时点光源的发射总功率以及电场强度进行比较,得出二聚体纳米天线对荧光激发和发射过程的影响。

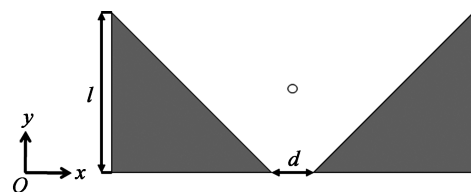


图1 三角形硅二聚体纳米天线截面示意图

2 结果分析

2.1 三角形硅二聚体纳米天线增强荧光远场定向发光

2.1.1 三角形硅二聚体纳米天线对不同偏振态荧光发射的影响

初步选取三角形直角边长 $l=200\text{ nm}$ ，二聚体在竖直方向呈轴对称，二聚体底角的间距 $d=0\text{ nm}$ 。研究纳米天线对 x, y, z 三个偏振态荧光发射的影响，点光源的远场发射总功率如图 2 所示。发现：相对 x 和 y 偏振态，在 z 偏振态下点光源的荧光发射总功率最大。这是因为三角形二聚体具有独特的结构特性，在 782 nm 波长处，高折射率的硅二聚体与荧光发生米氏共振， z 偏振态的荧光产生复杂干涉和散射，形成光耦合增强，最终实现远场辐射增强。因此，本文主要研究三角形硅二聚体纳米天线对 z 偏振态荧光发射的影响。

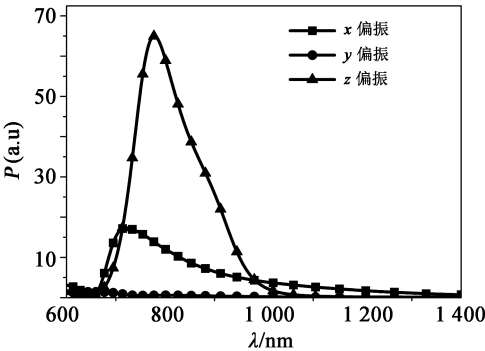


图 2 三角形硅二聚体对不同偏振态下点光源的远场发射总功率的影响

2.1.2 不同组合方式的三角形硅二聚体纳米天线对荧光发射的影响

接着选择三种组合方式的二聚体纳米天线，如图 3 所示，分析其对荧光发射的影响。三种天线的三角形直角边长 l 均为 200 nm ，组合 3 的二聚体纳米天线的间隙距离为 200 nm ，仿真条件均相同，点光源均放置在 $(0, 0.1)\text{ }\mu\text{m}$ 处。计算三种不同组合的纳米天线中点光源的远场发射总功率，并与无三角形结构时裸光源的发射功率作对比，结果如图 4 所示。从图中可以看出，对于组合 1 的二聚体纳米天线，在中心波长 782 nm 处，点光源的发射总功率最大，意味着该组合方式的纳米天线对荧光远场发射增强效果最好。而其他两种组合的纳米天线未实现荧光远场发射增强，甚至产生了抑制效果。为了更清楚地了解纳米天线增强荧光发射的物理机制，

计算了波长为 782 nm 的点光源在三种组合的纳米天线中的电场分布，如图 5(a)~(c) 所示。可以发现，组合 1 的硅二聚体纳米天线实现了荧光发射增强。这主要是因为组合 1 的纳米天线与点光源的光耦合作用更加强烈，发生了米氏共振，在纳米天线中同时激发的电偶极子和磁偶极子的共同作用，促使

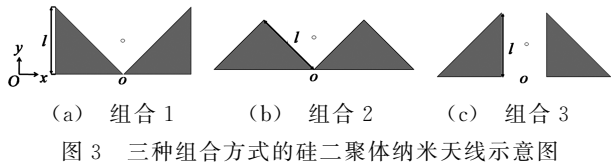


图 3 三种组合方式的硅二聚体纳米天线示意图

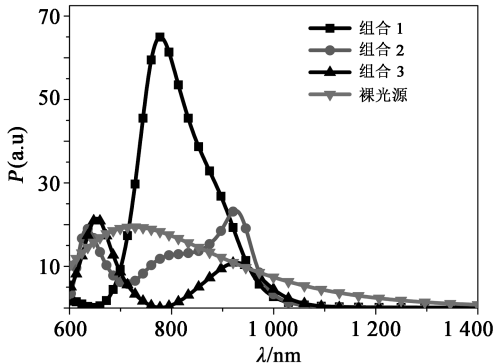


图 4 不同组合纳米天线结构下点光源的荧光远场发射总功率

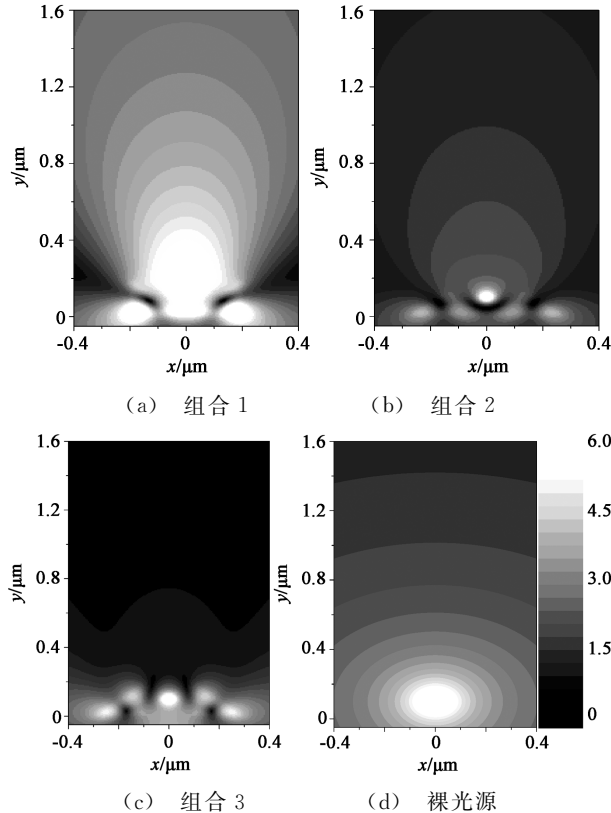


图 5 不同组合的硅二聚体纳米天线和无三角形结构下点光源在 782 nm 时的电场分布

荧光发生强烈的定向散射^[19],有利于荧光远场辐射。基于以上讨论,选择组合 1 的纳米天线进行后续研究。

2.1.3 不同直角边长的三角形硅二聚体纳米天线对荧光发射的影响

微纳光学结构的尺寸对荧光发光效率的影响很大,这里取三角形结构的直角边长 l 依次为 200, 300, 400 和 500 nm,并计算在不同直角边长的纳米天线点光源的远场发射总功率,结果如图 6 所示。我们发现,在 600~1 400 nm 宽发射波段下,对于不同直角边长的三角形硅二聚体纳米天线,在不同波长处点光源的荧光发射总功率均出现峰值。其中,当 $l=300$ nm 时,点光源的荧光发射总功率在 758 nm 处达到峰值。当 $l=400$ nm 时,点光源的荧光发射总功率在 980 nm 处达到峰值。而当 $l=500$ nm 时,点光源的荧光发射总功率出现了多个峰值。由于微纳光学结构尺寸不同,荧光与纳米天线光耦合对应的波长也不同,所以会出现荧光发射总功率峰值对应的波长随三角形直角边长的变化而变化,而且荧光发射会在特定波长处增强的情况。由于三角形硅二聚体纳米天线的直角边长 $l=300$ nm 时,其对荧光发射增强效果最好,下文选 $l=300$ nm 进行研究。

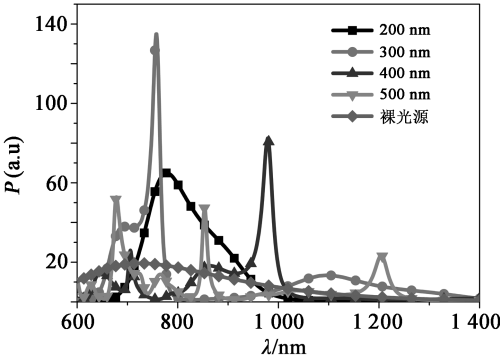


图 6 不同直角边长的点光源远场发射总功率

2.1.4 三角形硅二聚体纳米天线的底角间距对荧光发射的影响

随后分析三角形二聚体的底角间距 d 对荧光发射的影响。依次取 d 的值为 40, 80, 120 和 160 nm,然后计算在不同底角间距的二聚体纳米天线点光源的远场发射总功率,结果如图 7 所示。可以发现,随着二聚体底角间距 d 增大,点光源的远场发射总功率下降,这主要是由于随着底角间距 d 的增大,纳米天线对荧光的干涉增强效果降低、光耦合效应减弱。

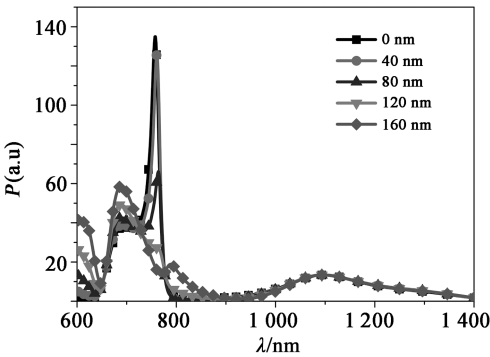
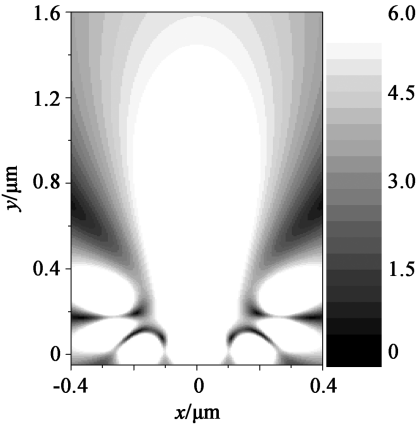
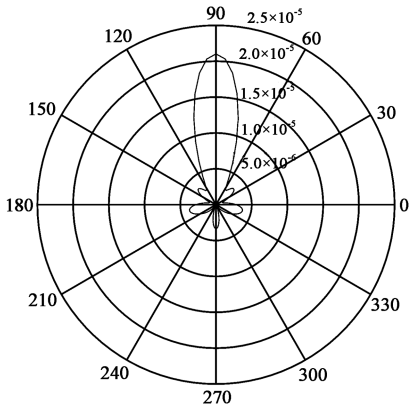


图 7 不同二聚体底角间距 d 点光源的远场发射总功率

最终得到三角形硅二聚体纳米天线荧光增强远场发射的最优结构参数为:直角边长 $l=300$ nm,二聚体底角间距 $d=0$ nm。相对于裸光源,在 z 偏振态中心波长 758 nm 处,最优结构参数的三角形硅二聚体纳米天线使点光源荧光发射增强了 7 倍。从图 8(a)电场分布以及图 8(b)远场辐射图可以分析纳米天线调控荧光发射的物理机理,硅纳米天线中电偶极子和磁偶极子共振的相干激发和相关散射场的干涉,使荧光实现了远场定向发射,使其更容易被



(a) 电场分布



(b) 远场辐射图

图 8 波长为 758 nm 的点光源在参数优化后的纳米天线周围产生的电场分布以及远场辐射图

荧光收集系统收集,从而提高了荧光传感、成像的灵敏度。

2.2 三角形硅二聚体纳米天线对荧光激发过程的影响

证实了三角形硅二聚体纳米天线可以增强荧光远场定向发射特性后,接着研究三角形硅二聚体纳米天线对荧光分子激发过程的影响。选择 405 nm 平面波作为激发光源,分别研究了纳米天线在 TE 和 TM 模式下的激发效果,TE 模式定义为电场方向与纸面 x 轴平行,TM 模式为电场方向与纸面垂直。设置一个电场监视器,从时域和频域对纳米天线内电场 E 进行分析,同时,设置电场监视器的位置 $(x,y)=(-0.4:0.4,-0.05:0.4)\mu\text{m}$,计算激发过程的电场分布,并且与裸光源下的激发电场进

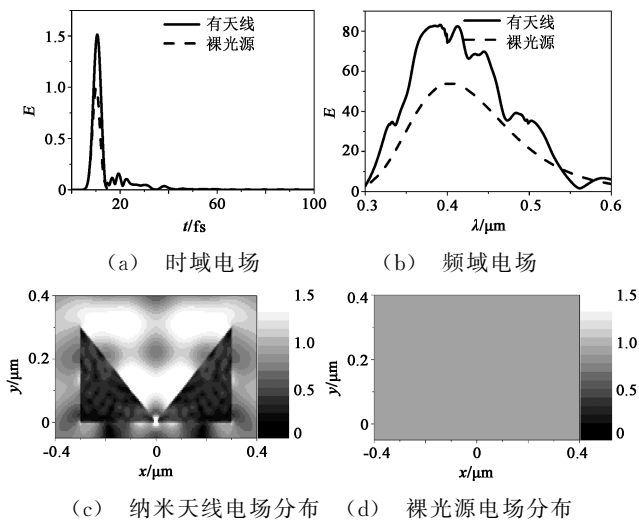


图 9 TE 模式 405 nm 激发光下有无二聚体纳米天线结构的时域、频域电场分析及电场分布

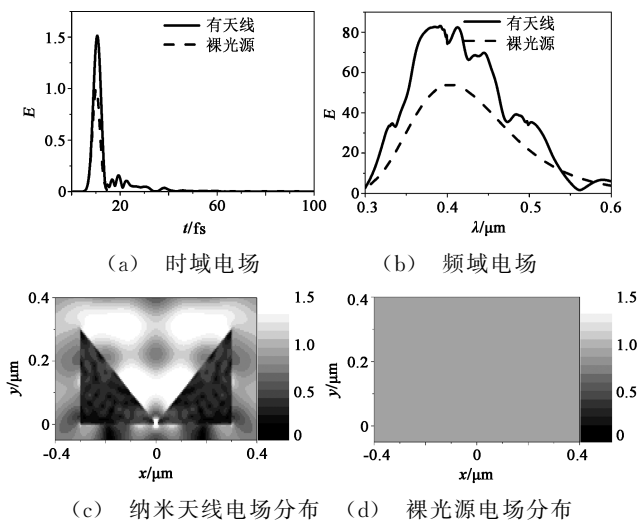


图 10 TM 模式 405 nm 激发光下有无二聚体纳米天线结构的时域、频域电场分析及电场分布

行对比,结果如图 9,10 所示。我们发现,相对裸光源,在波长为 405 nm 的光激发下,三角形硅二聚体纳米天线对两种偏振模式的激发均出现电场增强效果。当激发光照射到硅二聚体纳米天线时产生米氏共振,使得纳米天线 V 型区域内的局域电场增强。从图 9(c),图 10(c)电场分布可以看到,激发电场的增强区域都在二聚体纳米天线中间分布,这与上文研究的荧光物质所在区域相吻合,意味着三角形硅二聚体纳米天线可以同时从激发和发射两个过程增强荧光发射。

3 结论

本文提出了一种三角形硅二聚体纳米天线结构,该结构可以从激发和发射两个过程同时增强荧光物质的荧光发光效率,并且可以实现荧光远场定向发射增强。发现硅二聚体纳米天线对 z 偏振态的荧光发射增强效果明显,并且实现了远场定向发射增强。首先分析了其物理机制:硅属于高折射率电介质材料,三角形硅二聚体与 z 偏振下的荧光发生米氏共振,而且三角形二聚体独特的结构特性会使 z 偏振态的荧光发生较强的干涉和散射,在特定波长处实现光耦合增强。然后,分析了纳米天线的组合方式、三角形直角边长的尺寸以及二聚体底角的间距对荧光发射增强效果的影响,并进行了结构参数的优化。相对于裸光源,硅二聚体纳米天线使点光源荧光发射增强了 7 倍,且能实现远场定向发射。最后,研究了三角形硅二聚体纳米天线对荧光激发过程的影响。选用 405 nm 的平面波进行激发,从时域和频域对激发电场进行分析。当激发光照射到硅二聚体纳米天线时产生米氏共振,使得纳米天线 V 型区域内的电场增强,实现荧光激发增强。所以,本文提出的三角形硅二聚体纳米天线不仅能够实现荧光远场定向发射增强,而且实现了激发过程增强。总之,该三角形硅二聚体纳米天线对于提高单光子发射效率、生物荧光成像分辨率以及荧光生物传感器的灵敏度等具有重要意义。

参考文献:

- [1] Guo Z, Chen G, Zeng G, et al. Fluorescence chemosensors for hydrogen sulfide detection in biological systems [J]. Analyst, 2015, 140(6): 1772-1786.
- [2] Chowdhury S, Rooj B, Dutta A, et al. Review on recent advances in metal ions sensing using different fluorescent probes[J]. J. of Fluorescence, 2018, 28(4): 999-1021.

[3] Fan X, White I M, Shopova S I, et al. Sensitive optical biosensors for unlabeled targets: A review [J]. Analytica Chimica Acta, 2008, 620(1): 8-26.

[4] Kuswandi B, Nuriman, Huskens J, et al. Optical sensing systems for microfluidic devices: A review [J]. Analytica Chimica Acta, 2007, 601(2): 141-155.

[5] Fothergill S M, Joyce C, Xie F. Metal enhanced fluorescence biosensing: from ultra-violet towards second near-infrared window[J]. Nanoscale, 2018, 10(45): 20914-20929.

[6] Flauraud V, Regmi R, Winkler P M, et al. In-plane plasmonic antenna arrays with surface nanogaps for giant fluorescence enhancement[J]. Nano Lett., 2017, 17(3): 1703-1710.

[7] Taminiau T H, Stefani F D, Segerink F B, et al. Optical antennas direct single-molecule emission [J]. Nature Photonics, 2008, 2(4): 234-237.

[8] Andersen S K H, Bogdanov S, Makarova O, et al. Hybrid plasmonic bullseye antennas for efficient photon collection[J]. ACS Photonics, 2018, 5(3): 692-698.

[9] Crozier K B, Sundaramurthy A, Kino G S, et al. Optical antennas: Resonators for local field enhancement[J]. J. of Appl. Phys., 2003, 94(7): 4632-4642.

[10] Aslan K, Gryczynski I, Malicka J, et al. Metal-enhanced fluorescence: an emerging tool in biotechnology[J]. Curr. Opin. Biotechnol., 2005, 16(1): 55-62.

[11] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. Nature, 2003, 6950: 824-830.

[12] Sun S, Wu L, Bai P, et al. Fluorescence enhancement in visible light: dielectric or noble metal? [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2016, 18(28): 19324-19335.

[13] Zhang T, Gao N, Li S, et al. Single-particle spectroscopic study on fluorescence enhancement by plasmon coupled gold nanorod dimers assembled on DNA origami [J]. J. of Physical Chemistry Lett., 2015, 6(11): 2043-2049.

[14] Krasnok A, Caldarola M, Bonod N, et al. Spectroscopy and biosensing with optically resonant dielectric nanostructures [J]. Adv. Optical Mater., 2018, 6(5): 1701094.

[15] 全宏升, 曹文静, 陈智辉. 基于全电介质复合纳米天线荧光传感器的研究[J]. 半导体光电, 2019, 40(5): 631-636.

Quan Hongsheng, Cao Wenjing, Chen Zhihui. Research on fluorescence sensor based on all-dielectric hybrid nano-antenna [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(5): 631-636.

[16] Albella P, Poyli M A, Schmidt M K, et al. Low-loss electric and magnetic field-enhanced spectroscopy with subwavelength silicon dimers[J]. The J. of Phys. Chemistry C, 2013, 117(26): 13573-13584.

[17] Regmi R, Berthelot J, Winkler P M, et al. All-dielectric silicon nanogap antennas to enhance the fluorescence of single molecules[J]. Nano Lett., 2016, 16(8): 5143-5151.

[18] Palik E D. Handbook of Optical Constants of Solids[M]. Burlington: Academic Press, 1997: xvii-xviii.

[19] Kuznetsov A I, Miroshnichenko A E, Brongersma M L, et al. Optically resonant dielectric nanostructures[J]. Science, 2016, 354(6314): aag2472.

作者简介:

刘占锋(1992—),男,山西朔州人,硕士研究生,主要从事微纳光电子学方面的研究;

陈智辉(1984—),男,山西太原人,博士,教授,博士生导师,主要从事微纳光电子学方面的研究。

(上接第 688 页)

[3] 吕文辉,何一峰,龚 熠,等. 双层氮化硅减反、钝化结构对多晶硅太阳能电池性能的影响[J]. 半导体光电, 2016, 37(15): 707-711.

Lv W H, He Y F, Gong Y, et al. Effect of double-layer SiN_x antireflection/passivation coating on performance of multi-crystalline silicon solar cells [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(15): 707-711.

[4] Brauna S, Hahna G, Nissler R, et al. Multi-busbar solar cells and modules: high efficiencies and low silver consumption[J]. Energy Procedia, 2013, 38: 334-339.

[5] Green M A. Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300 K including temperature coefficients[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2015, 92(11): 1305-1310.

[6] Brendel R, Dullweber T, Peibst R, et al. Breakdown of the efficiency gap to 29% based on experimental input data and modeling [J]. Prog. Photovolt.: Res. Appl., 2016, 24: 1475-1486.

[7] Veith B, Werner F, Zielke D, et al. Comparison of the thermal stability of single Al₂O₃ layers and Al₂O₃/SiN_x stacks for the surface passivation of silicon[J]. Energy Procedia, 2011, 8: 307-312.

[8] Baker-Finch S C, McIntosh K R. Reflection of normally incident light from silicon solar cells with pyramidal texture [J]. Prog. Photovolt.: Res. Appl., 2011, 19: 406-416.

[9] Kumar P, Wiedmann M K, Winter C H, et al. Optical properties of Al₂O₃ thin films grown by atomic layer deposition[J]. Appl. Optics, 2009, 48(28): 5407.

[10] Palik E. Handbook of Optical Constants of Solids[M]. New York: Academic Press, 1985: 397-400.

[11] Khanna A, Mueller T, Stangl R A, et al. A fill factor loss analysis method for silicon wafer solar cells[J]. IEEE J. Photovolt., 2013, 3: 1170-1177.

作者简介:

吕文辉(1981—),男,博士,教授,主要从事晶硅太阳能电池材料、物理及高效器件研究。

光子计数激光雷达游走误差与时间抖动的研究

罗佳承^{1,2,3}, 刘 博^{1,2*}, 华康健^{1,2,3}

(1. 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209; 2. 中国科学院空间光电精密测量
技术重点实验室, 成都 610209; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 光子计数激光雷达具有灵敏度高、体积小等特点, 是未来远距离探测激光雷达的发展方向。光子计数激光雷达在探测时会产生游走误差, 从而影响系统的测距精度。文章就游走误差与探测器时间抖动之间的关系进行了理论分析与实验验证。首先, 基于激光雷达方程、单光子探测器时间抖动与光子计数探测的概率统计特性, 建立了激光回波信号与探测器时间抖动的数学模型; 然后使用该模型进一步推导了探测器时间抖动与游走误差之间的关系, 计算分析与仿真实验都表明: 系统的游走误差与探测器时间抖动呈正相关关系。最后, 使用拥有不同时间抖动的单光子探测器进行了实验, 实验结果表明: 当探测器时间抖动标准差分别为 15, 350 和 1 152 ps 时, 游走误差分别为 0.88, 2.55 和 12.56 cm。

关键词: 光子计数激光雷达; 时间抖动; 游走误差; 泊松分布

中图分类号: TN958.98 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0695-05

Research on Range Walk Error and Timing Jitter of Photon Counting Lidar

LUO Jiacheng^{1,2,3}, LIU Bo^{1,2}, HUA Kangjian^{1,2,3}

(1. Institute of Optics and Electronics of the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN;
2. Key Laboratory of Science and Technology on Space Optoelectronic Precision Measurement, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: With the characteristics of high sensitivity and small volume, photon counting radar represents the future development trend of long-range detection radar. But photon counting radar in the detection will produce range walk error, thus affecting the ranging accuracy of the system. In this paper, the relationship between the range walk error and the detector's timing jitter is theoretically analyzed and experimentally verified. First, based on the lidar equation, timing jitter of single-photon detector and probabilistic statistical properties of photon counting detection, a mathematical model of the echo signal and detector timing jitter was established. Then the model was used to further derive the detector's timing jitter and range walk error. Computational analysis and simulation experiments show that the range walk error of the system is positively correlated with the timing jitter of the detector. Finally, experiments were conducted using single-photon detectors with different timing jitter, and the results show that when the standard deviation of the detector time jitter is 15, 350 and 1 152 ps, the walk error is 0.88, 2.55 and 12.56 cm, respectively.

Key words: photon counting radar; timing jitter; range walk error; poisson distribution

收稿日期: 2020-07-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61805249); 中国科学院
青年创新促进会基金项目(2019369).

* 通信作者: 刘 博 E-mail: boliu@ioe.ac.cn

0 引言

激光雷达作为一种主动式探测技术,能够快速、准确地获取目标的空间三维信息,在自动驾驶、空间交会对接、目标识别等民用、航空航天以及军用领域有着广泛的用途^[1-4]。同时,随着激光雷达应用场景的不断拓展,人们对激光雷达探测的距离要求也愈来愈高,这也直接催生了能够探测极弱信号的光子计数激光雷达。光子计数激光雷达是采用光电倍增管(PMT)、工作在盖革模式下的雪崩光电二极管(Geiger-mode Avalanche Photodiode, GM-APD)等具有单光子灵敏度的探测器作为接收器件的激光雷达,其探测灵敏度较传统激光雷达高 2~3 个数量级,具有极大的技术优势和应用前景。距离测量是激光雷达的核心功能,为了获取更远的探测距离,系统通常采用飞行时间法(Timing of Flight, TOF)并使用 GM-APD 探测器进行测量^[5],这也是本文所讨论的光子计数激光雷达系统。飞行时间法即脉冲法,通过鉴别发射与接收脉冲之间的时间差来计算目标与系统之间的距离。盖格模式就是雪崩光电二极管两端的偏置电压超过了其击穿电压,工作在此状态下的 APD 只要接收到一个光子就会发生雪崩现象使电流达到最大值^[6],因此,光子计数激光雷达拥有极高的灵敏度。近年来,光子计数激光雷达发展迅速,美国国家航空航天局(NASA)于 2018 发射的 ICESat-2 卫星便使用了光子计数激光雷达作为测高方式,其测高精度为 0.1 m^[7]。

对于光子计数激光雷达系统来说,测距精度是衡量其性能的重要指标。相较于传统的线性探测器,使用飞行时间法的光子计数激光雷达并不能记录波形的振幅,而只能探测到信号的有无,它通过记录所探测的光子事件的时间标签,输出符合特定概率密度函数分布的点云,再经过统计理论等方法才能提取出目标的距离信息,其测距精度受到回波强度、探测器时间抖动等多种因素的影响。2003 年, Fouché^[8]分析了单脉冲探测光子计数激光雷达的探测概率,首次理论研究了光子计数激光雷达的探测性能。2010 年, Oh 等^[9]使用光子计数探测模型分析了游走误差(Range Walk Error, RWE)与回波脉冲的关系。2018 年, Ye 等^[10]分析了游走误差与回波脉冲之间的关系。本文从单光子探测器的时间抖动切入,推导并建立了激光回波信号与探测器时间抖动的数学模型,进而得出了距离游走误差与探

测器时间抖动之间的关系。在仿真的基础上,使用拥有不同时间抖动的单光子探测器对所推导的模型进行了验证。

1 理论原理与模型

光子计数激光雷达的探测过程:首先激光器发射脉冲,同时产生一路时间同步信号,接着激光信号穿过介质照射在目标上并返回,然后单光子探测器接收到激光回波产生的响应信号,最后通过比较同步信号与探测器响应信号的时间差来获取测距信息。显然,上述原理包含了两个过程:激光脉冲的辐射传播过程和单光子探测器的光子探测过程。

1.1 辐射传播过程

激光脉冲的辐射传播可以用雷达方程进行描述^[11]。记发射脉冲为 $P_{\text{emit}}(t)$,光斑照射在 R 远处的拓展目标上并返回,则回波脉冲可表示为

$$P_{\text{return}} = \alpha \cdot P_{\text{emit}}(t - \tau_{\text{target}}) \quad (1)$$

$$\tau_{\text{target}} = 2R/c \quad (2)$$

式中, α 表示调制系数,受到接收系统的视场角、激光的发散角、目标的反射率、激光发射方向与目标的夹角、系统的有效接收面积和大气传输系数等多种因素影响, τ_{target} 则表示发射激光往返时间, c 表示光速。上述两式表明,在时域上,回波信号仅是发射信号的一个时间上的延迟,在幅度上,回波信号为发射信号的一个衰减。

当系统接收到回波信号之后, GM-APD 产生响应信号,可表示为速率方程:

$$S_{\text{PE}}(t) = \frac{\eta}{h\nu} \int_{\tau_{\text{target}} + \tau_{\text{delay}}}^{\infty} P_{\text{return}}(\tau - T_{\text{delay}}) \times J(t - \tau) d\tau \quad (3)$$

式中, η 代表探测器的量子效率, h 为普朗克常数, ν 为光的频率, T_{delay} 为系统的固定时间延迟, $J(t)$ 是 GM-APD 时间抖动概率密度函数, $J(t)$ 可归一化为服从均值为 0, 方差为 σ^2 的正态分布,即 $J \sim N(0, \sigma^2)$, 其中, σ 为时间抖动的标准差,本文所提的时间抖动均指标准差。上述速率方程代表着回波脉冲经 GM-APD 响应后产生的初始电子数的概率分布。

由于 GM-APD 极其灵敏,噪声电子对其影响不可忽略。假定噪声为连续分布,记为 N_{PE} :

$$N_{\text{PE}} = \eta N_{\text{BG}} + f_{\text{dark}} \quad (4)$$

式中, N_{BG} 代表背景辐射所产生的光子, f_{dark} 为 GM-APD 自身的暗计数率。

1.2 GM-APD 探测过程

光子计数激光雷达进行探测时,回波信号通常极弱,其单脉冲能量往往只有几个光子的量级,此时信号光更多地表现出量子特性。根据 Gatt 等的分析^[12],在回波光子数较少时,使用泊松分布可以较好地描述 GM-APD 的探测过程。在进行探测的过程中,GM-APD 仅能响应光子的有无,经过时间相关单光子计数系统(TCSPC)才能产生带有时间标签的单光子事件,因此时间域会被 TCSPC 划分为时间格,每个时间格的大小由其分辨率 τ_{bin} 决定。因此,第 i 格的探测概率 $P_{\text{D_bin}}(i)$ 为

$$P_{\text{D_bin}}(i) = \exp\left[-N_{\text{PE}}\tau_{\text{bin}}(i-1) - \int_0^{\tau_{\text{bin}}(i-1)} S_{\text{PE}}(t)dt\right] \times \left\{1 - \exp\left[-N_{\text{PE}} - \int_{\tau_{\text{bin}}(i-1)}^{\tau_{\text{bin}}(i)} S_{\text{PE}}(t)dt\right]\right\} \quad (5)$$

式中, $\exp[-N_{\text{PE}}\tau_{\text{bin}}(i-1) - \int_0^{\tau_{\text{bin}}(i-1)} S_{\text{PE}}(t)dt]$ 表示前面 $i-1$ 格没有探测到光子的概率,后面一部分则表示在第 i 格探测到光子的概率,即 GM-APD 在当前时刻被触发的概率等于前面时间段内没有被触发的概率与当前时间段被触发的概率的乘积,这是光子计数激光雷达探测的特点之一。

1.3 游走误差

游走误差是由 GM-APD 对回波脉冲响应的概率密度分布所造成的。记游走误差为 ΔR :

$$\Delta R = \frac{c}{2} \cdot (\tau_{\text{mean}} - \tau_{\text{tof}}) \quad (6)$$

$$\tau_{\text{mean}} = \frac{\sum_{\text{Target bin}} P_{\text{D_bins}}(i)\tau(i)}{\sum_{\text{Target bin}} P_{\text{D_bins}}(i)} \quad (7)$$

其中, τ_{mean} 表示所测量的飞行时间的期望, τ_{tof} 表示实际的飞行时间。通过式(1)~(7)可以看出,光强的分布 $S_{\text{PE}}(t)$ 是造成距离游走误差的直接原因,而 $S_{\text{PE}}(t)$ 是由 GM-APD 的时间抖动、光强起伏、激光脉冲宽度决定的,本文将在光强起伏和激光脉冲宽度一定的情况下分析 GM-APD 时间抖动与距离游走误差之间的关系。

2 实验结果及分析

2.1 理论模型仿真分析

以式(1)~(7)为理论基础,在发射激光脉宽为 2 ns、回波光子数为 5.7 的情况下,仿真不同时间抖动 σ 造成的距离游走误差。

回波光电子数曲线与探测概率曲线之间的偏移

即为距离游走误差^[13]。图 1 为从仿真中选取的三组代表数据,其时间抖动与后文实验所采用的三组 GM-APD 一致。从图中可以看出,随着时间抖动的减小,两条曲线之间的偏移也在减小,即距离游走误差在不断减小,使用质心算法分别计算多组仿真结果下的距离游走误差,结果如图 2。

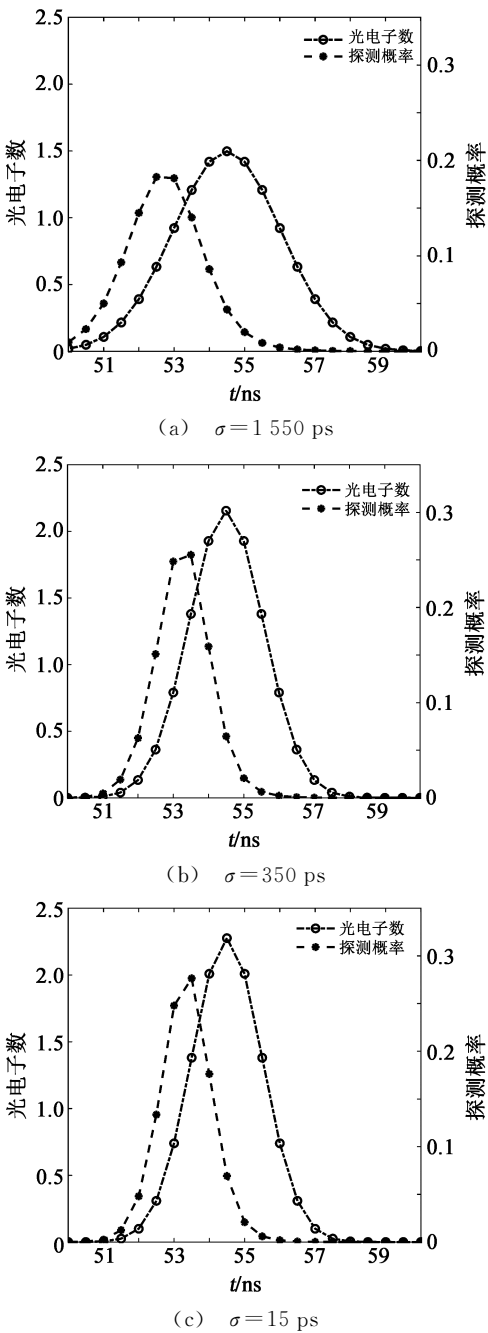


图1 不同时间抖动下的回波光电子数与探测概率

从图 2 中可以看出,随着 σ 的不断增大,距离游走误差也随之增加,在激光脉宽和回波光子数起伏一定时, σ 与距离游走误差呈正相关关系,即:

值为 11.68 cm。

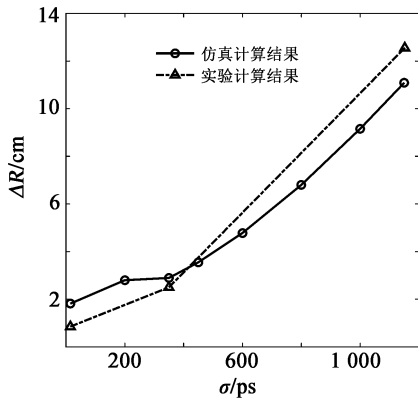


图 5 实验结果与仿真结果的对比

3 结论

本文建立了光子计数激光雷达游走误差与单光子探测器时间抖动的数学模型,该模型可以普遍应用于光子计数激光雷达探测器所造成的游走误差的评估。该模型表明游走误差与时间抖动有直接关联,利用仿真方法对模型进行分析,结果显示,游走误差与时间抖动呈正相关关系。接着使用三款具有不同时间抖动的 GM-APD 进行了实验测量。实验结果与仿真分析具有较好的一致性,当探测器时间抖动标准差分别为 15,350 和 1 152 ps 时,游走误差分别为 0.88,2.55 和 12.56 cm;当探测器时间抖动标准差相差 335 和 802 ps 时,游走误差差值分别为 1.67 和 10.01 cm,在标准差最大相差 1 137 ps 的情况下,游走误差差值为 11.68 cm,使用具有较小时间抖动标准差的探测器能够较大地提升光子计数激光雷达的测距精度。

参考文献：

[1] Schwarz B. Lidar: Mapping the world in 3D[J]. Nature Photon. , 2010, 4(7): 429-430.

[2] Repasi E, Lutzmann P, Steinvall O, et al. Advanced short-wavelength infrared range-gated imaging for ground applications in monostatic and bistatic configurations [J]. Appl. Opt. , 2009, 48(31): 5956-5969.

[3] Albota M A, Aull B F, Fouché D G, et al. Three-dimensional imaging laser radars with Geiger-mode avalanche photodiode arrays[J]. Lincoln Laboratory J. , 2002, 13(2): 351-370.

[4] Nobili S, Dominguez-Quijada S, Garcia G, et al. 16 channels velodyne versus planar LiDARs based perception system for

large scale 2D-SLAM[C]// Proc. 7th Workshop on Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles, 2015: 131-136.

[5] Cho P, Anderson H, Hatch R, et al. Real-time 3D lidar imaging[C]// Proc. 35th IEEE Applied Imagery and Pattern Recognition Workshop (AIPR'06), 2006: 5-5.

[6] 尹 文, 许金通, 张惠鹰, 等. 基于盖革模式雪崩光电二极管紫外计数系统[J]. 半导体光电, 2019, 40(4): 571-574, 580.

Yin Wen, Xu Jintong, Zhang Huiying, et al. Ultraviolet counting system based on avalanche photodiode in Geiger mode [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(4): 571-574, 580.

[7] Neuenschwander A, Pitts K. The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 mission [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 221: 247-259.

[8] Fouché D G. Detection and false-alarm probabilities for laser radars that use Geiger-mode detectors[J]. Appl. Opt. , 2003, 42(27): 5388-5398.

[9] Oh M S, Kong H J, Kim T H, et al. Reduction of range walk error in direct detection laser radar using a Geiger mode avalanche photodiode[J]. Opt. Commun. , 2010, 283(2): 304-308.

[10] Ye L, Gu G, He W, et al. A real-time restraint method for range walk error in 3-D imaging lidar via dual detection[J]. IEEE Photonics J. , 2018, 10(2): 1-9.

[11] 刘 博, 于 洋, 姜 朔. 激光雷达探测及三维成像研究进展[J]. 光电工程, 2019, 46(7): 190167.

Liu B, Yu Y, Jiang S. Review of advances in LiDAR detection and 3D imaging [J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(7): 190167.

[12] Gatt P, Johnson S, Nichols T. Geiger-mode avalanche photodiode lidar receiver performance characteristics and detection statistics[J]. Appl. Opt. , 2009, 48(17): 3261-3276.

[13] Xu L, Zhang Y, Zhang Y, et al. Restraint of range walk error in a Geiger-mode avalanche photodiode lidar to acquire high-precision depth and intensity information [J]. Appl. Opt. , 2016, 55(7): 1683-1687.

[14] Hua K, Liu B, Fang L, et al. Detection efficiency for underwater coaxial photon-counting lidar[J]. Appl. Opt. , 2020, 59(9): 2797-2809.

作者简介：

罗佳承(1995—),男,四川成都人,硕士生,主要研究方向为激光雷达探测;

刘 博(1979—),男,博士,研究员,博士生导师,中科院“百人计划”、四川省“千人计划”特聘专家,主要研究方向为激光雷达探测与激光通信。

基于光纤陀螺的桥梁路面平整度检测研究

杨丹丹, 王立新, 胡文彬, 李 盛, 甘维兵*

(武汉理工大学 光纤传感技术国家工程实验室, 武汉 430070)

摘 要: 光纤陀螺线形检测系统是一种测量路面线形曲线的检测方法。结合光纤陀螺线形检测原理以及常用的路面平整度指标,研究了一种基于光纤陀螺的路面平整度指标获取方法。实验分析和应用结果证明,线形测量过程中所采集的光纤陀螺角速度概率分布和标准差与路面平整度具有较强的关联性。通过提取光纤陀螺检测桥梁线形的高程标准差,可得到路面平整度系数。本方法可反映路面的宏观平整度以及路面传递至车辆的行车舒适性,并且可实现桥梁线形和平整度的同时测量,具有方便高效准确的优点和较大的应用推广价值。

关键词: 光纤陀螺; 桥梁线形; 概率密度; 路面平整度; 高程标准差; 国际平整度指数

中图分类号: TN25 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0700-05

Detection of Bridge Pavement Evenness Based on Fiber Optic Gyro

YANG Dandan, WANG Lixin, HU Wenbin, LI Sheng, GAN Weibing

(National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, CHN)

Abstract: Fiber optic gyro curve mode detection system is a method for measuring the pavement curve mode. By combining the detection principle of fiber optic gyro and the pavement evenness index, a method for obtaining pavement evenness is proposed. The experimental analysis and application results show that the probability distribution and standard deviation of the angular velocity collected by FOG in the process of curve measurement have a strong relevance with the pavement evenness. By extracting the bridge curve height standard deviation detected by FOG, the pavement evenness coefficient can be obtained. This method can reflect the macro evenness of the pavement surface and the driving comfort transferred from the pavement to the vehicle. It also can realize the simultaneous measurement of the bridge curve and evenness, which presents the advantages of convenient, efficient and accurate, and great application and promotion value.

Key words: fiber optic gyro; bridge curve; probability density; pavement evenness; standard deviation; international roughness index

0 引言

路面平整度作为衡量路面质量的主要技术指标,在路面工程领域有着重要的作用,该指标不仅关系到行车的安全舒适,还反映了路面的安全性和使

用期限^[1]。世界各国的道路工作者建立了相应的规范标准,研制了各种仪器设备以对新建道路进行质量控制,对已投入使用的道路进行检测和评定。目前平整度的检测仪器主要有直接式检测和响应式检测两类,而响应式检测仪器一般需要借助直接式检测仪器进行标定,这意味着直接式检测仪器的测量准确性直接决定了平整度的准确获取。有时测量现场环境恶劣,检测条件有限,会给这些仪器的使用带来困难,比如3 m直尺法耗时费力;连续式平整度仪

收稿日期:2020-05-16.

基金项目:国家自然科学基金项目(61402345,61875515);湖北省自然科学基金项目(2015CFA016).

*通信作者:甘维兵

E-mail: ganweibing@whut.edu.cn

在路面颠簸、车辆行驶速度较快时,数据的再现性较差;激光平整度仪在雨天或路面有水时,激光会发生散射,导致测量不准确,此时路面平整度指标的采集效率大打折扣。

光纤陀螺(Fiber Optic Gyro, FOG)作为一种对角速度敏感的传感器,具有抗加速、灵敏度高、信号稳定等优点。将其置于汽车上,并结合汽车里程仪可实现路面的线形测量和平整度指标获取。本课题组自 2011 年开始探索以光纤陀螺为核心部件的线形检测方法^[2],并将其应用于大型工程结构测量。本文将在介绍光纤陀螺线形检测的基础上,结合目前常用的路面平整度指标,研究一种基于光纤陀螺的路面平整度指标获取方法,并分析实际工程应用结果。

1 光纤陀螺检测桥梁线形

1.1 光纤陀螺检测原理

在光纤陀螺内部,从光源发出的平行光被分束器分成两束,经微透镜聚焦在光纤环的两个入射端面上,在光纤环中分别沿顺时针和逆时针方向传播一周后,再次经过透镜扩束成平行光并返回。如图 1 所示,此时可以观察到一个干涉现象。理想情况下的干涉现象应该是一个明暗相间的圆形光斑,但如果两束光之间存在一定的角度,圆形光斑就会变为椭圆形或出现明暗相间的条纹^[3]。

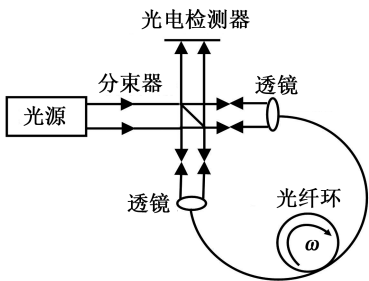


图 1 光纤陀螺基本结构

在光纤干涉仪沿其法线轴转动的过程中,由于 Sagnac 效应的作用,两束反向光会产生一个光程差 ΔL ,干涉条纹有明暗变化或产生移动,这种由旋转引起的相移 ϕ_s 与旋转角速率 Ω 存在式(1)的关系:

$$\phi_s = \frac{4\pi RL}{\lambda c} \cdot \Omega \tag{1}$$

其中, R 为光纤环的半径, L 为光纤长度, λ 为光源的平均波长, c 为真空中的光速。由此可见,光纤陀螺可以用来检测路面不平整引起的角度变化值,从

而反映路面平整情况。

1.2 线形检测系统硬件构架

在桥梁线形检测中,大多数桥梁可以被视为二维曲线,可使用汽车运行轨迹来代表待测桥梁的线形。将光纤陀螺应用于线形检测,需要多个工作单元来完成相关功能,因为线形检测的过程不是独立存在的,需要由多个参数经过一系列的计算和推演完成。

图 2 是光纤线形检测系统的基础构架,其中硬件部分主要由运载体、光纤陀螺和里程仪几个部分组成。对其中部分主要部件进行说明:

(1)运载体汽车。在实际的桥梁线形检测过程中,为了能够准确体现出待测桥梁的线形变化,运载体汽车需要紧密贴合待测表面,且自身不能发生较大的形变,否则会带来误差。另一方面,考虑到检测的工作量,运载体汽车需要具有运行平稳、测量速度快等特点。

(2)光纤陀螺。光纤陀螺作为线形检测系统的核心部件,直接影响线形检测的结果。桥梁结构线形检测要求光纤陀螺具有较高的精度,需要达到毫米级甚至更高^[4],加之连续快速的测量需求,还要求其采样频率较高。本文选用一种干涉型闭环光纤陀螺,型号为 TXD6-A2,采样频率为 300 Hz。

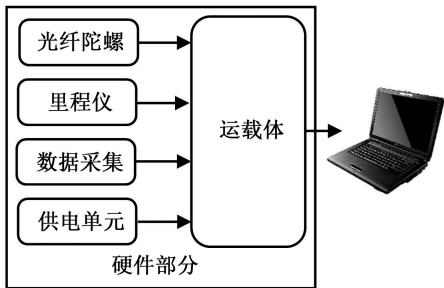


图 2 光纤陀螺线形检测系统的基础构架

1.3 线形解算原理

测量过程中,为了简化计算过程,一般将汽车的运动近似为质心运动,整个运动过程包含了汽车的平动,用里程仪来测量,以及绕质心发生的转动,用 FOG 来测量,二者融合解算出汽车的运行轨迹,即待测表面的线形。图 3 为线形检测的解算示意图。

图 3 中,装载 FOG 的汽车沿待测桥梁表面运行时,第 i 时刻运行至 $i(X_i, Y_i)$ 点,已知此时的线速度和角速度,当运载体到达 $i+1(X_{i+1}, Y_{i+1})$ 点时,运行的位移很小,可以近似认为是直线,表示为式(2)和(3),体现了运载体从某时刻的位置运行至

下一位置的数学过程。其中, ΔL 可通过汽车里程仪获取, $\Delta\theta$ 可通过光纤陀螺获取。

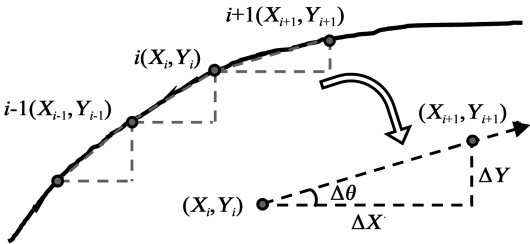


图3 线形检测解算示意图

$$X_{i+1}=X_i+\Delta X=X_i+\Delta L\cdot\cos(\theta_i+\Delta\theta)\quad(2)$$

$$Y_{i+1}=Y_i+\Delta Y=Y_i+\Delta L\cdot\sin(\theta_i+\Delta\theta)\quad(3)$$

其中,角运动参数往往由陀螺仪提供,在单位时间 Δt 内,对陀螺的角速度数据积分,可以获得运载体角度的变化值 $\Delta\theta$,此过程为积分运算,如式(4)所示:

$$\Delta\theta=\int_0^t\omega_t\,dt\quad(4)$$

线运动参数通常采用高精度加速度计来获取,在单位时间 Δt 内,对加速度计的测量值进行积分,可以得到运载体的线速度 v ,此过程为积分运算,如式(5)所示:

$$v=\int_0^ta_t\,dt\quad(5)$$

再对线速度 v 进行积分可以得到单位时间内运载体的位移 ΔL ,此过程依然为积分运算,如式(6):

$$\Delta L=\int_0^t\left(\int_0^ta_t\,dt\right)dt=\int_0^tv_t\,dt\quad(6)$$

结合上一节的数学过程,可以实现运载体的姿态测量,如式(7)和(8)所示:

$$X_{i+1}=X_i+\int_{t_i}^{t_{i+1}}\left(\int_{t_i}^{t_{i+1}}a_t\,dt\right)dt\cdot\cos\left(\theta_i+\int_{t_i}^{t_{i+1}}\omega_t\,dt\right)\quad(7)$$

$$Y_{i+1}=Y_i+\int_{t_i}^{t_{i+1}}\left(\int_{t_i}^{t_{i+1}}a_t\,dt\right)dt\cdot\sin\left(\theta_i+\int_{t_i}^{t_{i+1}}\omega_t\,dt\right)\quad(8)$$

上述过程在参考文献[5]中有更加详细的描述,通过累加计算每一个点的坐标,最终可呈现整个桥梁的结构线形。

2 桥梁路面平整度

2.1 角速度概率密度表示

光纤陀螺输出的角速度数据特征与所测量的路面平整程度有较强的关联性,使用概率密度函数(简

称概率密度)来统计光纤陀螺的角速度数据,进而分析角速度概率密度与路面平整度的关系。分别选取1#白沙洲大桥、2#航空路立交桥和3#嘉绍大桥三个实桥路面的光纤陀螺实测数据,对角速度进行概率密度统计,统计结果如图4~6所示。图中横坐标均为角速度,纵坐标均为当前角速度值占整体角速度的百分比。其中小图为光纤陀螺采集的角速度数据。

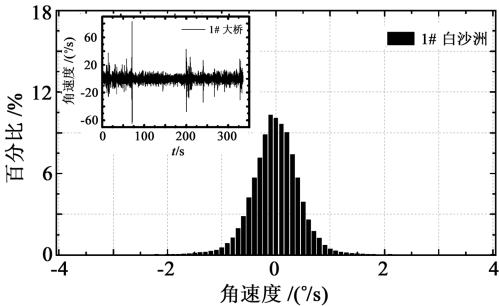


图4 1#大桥角速度概率密度统计

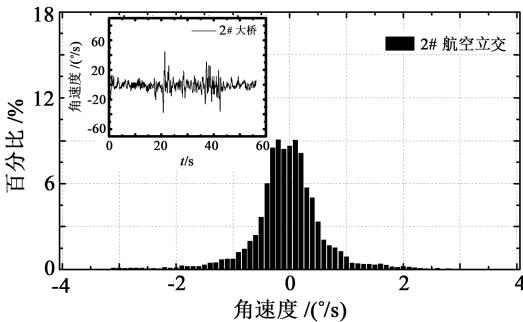


图5 2#大桥角速度概率密度统计

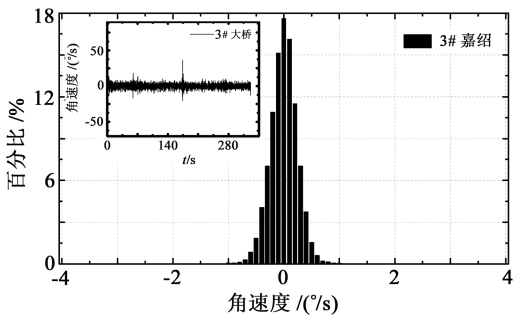


图6 3#大桥角速度概率密度统计

图4~6中,角速度数据通过概率密度函数来体现,数据特征更加直观形象。在数学中,连续型随机变量的概率密度函数是描述一个随机变量的输出值在某个确定取值点附近的可能性函数。分布密度图形宽度较窄,表示数据比较集中,数据幅值波动较小,路面较为平整;分布密度图形宽度较宽,表示数据比较分散,数据幅值波动较大,路面较粗糙。因此,通过对比三幅图可初步判断出:2#大桥的路面

平整程度较差,行车舒适性差,而 3#大桥的路面平整程度较好,行车舒适性也较好。

2.2 路面平整度指标表示

目前常用的路面平整度评价指标主要有两种:标准差 σ 和国际平整度指数^[6]。标准差 σ 作为表征路面平整度性能最具有实际和理论意义的统计性指标参数,是我国目前普遍采用的评价指标^[7]。国际平整度指数 IRI(International Roughness Index)是一种国际通用的路面平整度评价指标,可以与几乎所有的平整度检测仪测量指标进行换算或兼容^[8]。

各种道路的平整度指标 IRI 变化范围如表 1 所示,一般认为当 IRI 的值为零则绝对完美,对于其上

限并没有任何规定,但当 IRI 大于 8 m/km 时则不利于行驶,需要减速^[9]。

表 1 国际平整度指数 IRI

IRI/(m/km)	路面状况
0.25~1.75	机场跑道、高速公路
1.25~3.50	新路面
2.25~5.75	老旧路面
3.25~10.00	经常养护的无铺面道路
4.00~12.00	已有损坏的道路
大于 7.75	不平整的无铺面的道路

由表 1 可知,IRI 的值越小,路面的状况越好,行车舒适度更高。

3 实验分析

取 1#白沙洲大桥、2#航空路立交桥和 3#嘉绍大桥路面的实测数据,选取固定距离为一个区间,计算其解算后线形高程的标准差 σ 分布,计算结果分别展示在图 7~9 中,图中纵坐标均为标准差,横坐标均为区间数。其中,小图为光纤陀螺采集数据解算出的桥梁线形。

如图 7~9 所示,其中的每个圆点都代表当前区间的路面高程标准差的数值,标准差的数值越接近于 0 代表当前区间的路面越平整,圆点分布越离散,路面的平整程度越不稳定。通过初步观察可以发现,图 9 表示的 3#大桥的标准差的值相比于其他桥梁来说更接近于 0,可认为这座桥在三座桥的路面平整程度中较优。反之,图 8 表示的 2#大桥的标准差的值远离 0,因此这座桥在三座桥的路面平整程度中相对较差。由此可知,由光纤陀螺采集的数据所解算的线形高程,通过选取区间计算标准差可反映该区间路面的平整程度,反之,路面的平整状

况对这些数值的影响也非常显著,因此在获取路面平整信息时,需要在确保路面数据可信度高的前提下进行。

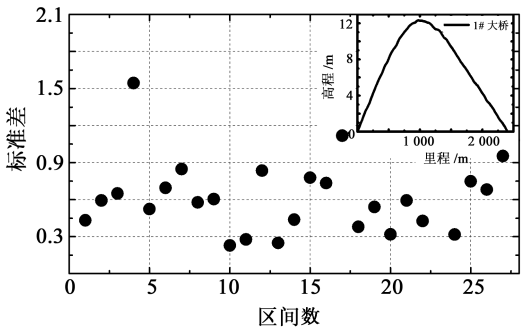


图 7 1#大桥高程标准差

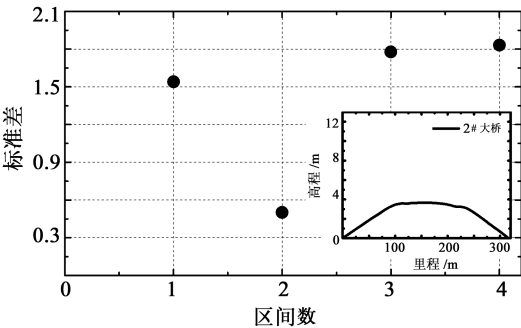


图 8 2#大桥高程标准差

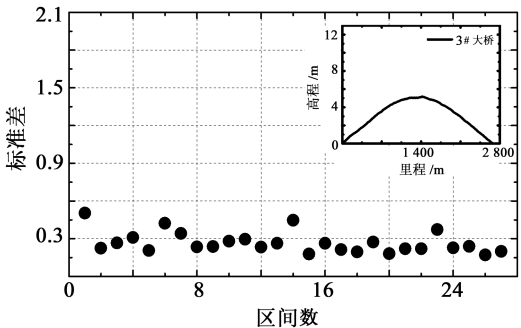


图 9 3#大桥高程标准差

为了使路面平整度结果更加直观,将这 3 座桥梁的路面高程标准差分布求取平均值进行总结,结合检测现场的实际路面状况,光纤陀螺线形检测系统输出数据解算的高程标准差 σ 与 IRI 值之间存在如式(9)的线性关系:

$$\sigma \approx 0.4IRI \tag{9}$$

式(9)中,线形高程标准差 σ 和 IRI 的转换公式可使用 0.4 作为回归系数。在此基础上,将 3 座桥梁标准差数据与国际平整度指数进行换算并初步评估路面状况,其高程标准差平均值、路面平整度指数、平整状况和路面分级均总结在表 2 中。

由表 2 可知,光纤陀螺线形检测系统用于桥梁

路面平整度的间接获取,在不使用其他平整度仪器的情况下,通过从线形检测结果中挖掘信息,可以得到路面高程标准差,通过与 IRI 的值建立线性关系可得到路面平整度的大致范围,进而可对路面进行分级,对于多个桥梁数据更能建立基于光纤陀螺线形检测系统的平整度数据库,方便数据归纳和对比,无需进行二次测量,更加快捷方便。

表 2 桥梁路面实测数据相关数值及路面状况

桥梁	标准差	IRI	平整状况	路面分级
1#	0.627 9	1.57	一般	B 级
2#	1.412 4	3.53	较差	C 级
3#	0.267 2	0.67	较优	A 级

综上所述,检测效率上,本方法测量简单,受环境影响较小,具有快速检测的优点,适合搜集大量的路面平整度资料;检测精度上,本方法对路面直接进行轮廓测量,准确性较高。同时除了反映路面的宏观平整度以及路面传递至车辆的行车舒适性以外,本方法还可以实现桥梁线形和平整度的同时测量。

4 结论

路面平整程度越差,光纤陀螺角速度概率分布越分散,标准差分布越离散。通过计算光纤陀螺检测桥梁线形的高程标准差,可与 IRI 值建立数学关系,一般可采用 0.4 作为回归系数,从而实现路面平整度指标的获取。在不使用其他平整度仪器的情况下,反映路面平整度和行车舒适性,效率和准确性较高,还可同时获取桥梁线形,为路面平整度的检测提供相关支持,具有较强的工程推广价值。

参考文献:

[1] 高博煜,商泽进,龚立平,等. 路面平整度的传统与智能化监测方法综述[J]. 筑路机械与施工机械化, 2018, 35(7): 21-26.

Gao B Y, Shang Z J, Gong Liping, et al. Review of traditional and intelligent monitoring methods for pavement roughness[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2018, 35(7): 21-26.

[2] 甘维兵,胡文彬,张 瑶,等. 基于光纤陀螺的桥梁微小形变检测技术[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24, 3: 415-420.

Gan W B, Hu W B, Zhang Y, et al. Detection technique for bridge's microdeformation based on FOG[J]. J. of Chinese Inertial Technology, 2016, 24, 3: 415-420.

[3] Lefevre H. The fiber-optic gyroscope: Challenges to become the ultimate rotation-sensing technology[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(6): 828-832.

[4] 吴 彬. GPS 辅助光纤陀螺桥梁线形检测研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.

Wu B. Study on GPS aided detection of bridge curve based on FOG[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.

[5] Li S, Hu W B. A novel bridge curve mode measurement technique based on FOG[J]. Optik, 2015, 126: 3442-3445.

[6] 王思卓,邹浙湘,李明扬. 基于 IRI 的路面平整度评价及计算方法的研究[J]. 考试周刊, 2012(14): 168-169.

Wang S Z, Zou Z X, Li Mingyang. Research on pavement evenness evaluation and calculation method based on IRI[J]. Weekly Examination, 2012(14): 168-169.

[7] 周晓青,孙立军,颜 利. 各国路面平整度验收规范[J]. 中外公路, 2006, 26(1): 52-56.

Zhou X Q, Sun L J, Yan Li. Acceptance specification of pavement evenness in various countries[J]. J. of China and Foreign Highway, 2006, 26(1): 52-56.

[8] 吴庆雄,陈宝春,奚灵智. 路面平整度 PSD 和 IRI 评价方法比较[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(1): 36-41.

Wu Q X, Chen B C, Xi Lingzhi. Comparison of PSD method and IRI method for road roughness evaluation[J]. J. of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(1): 36-41.

[9] 黄立葵,盛灿花. 车辆动荷系数与路面平整度的关系[J]. 公路交通科技, 2006, 23(3): 27-30.

Huang L K, Sheng C H. Relationship between vehicle dynamic amplification factor and pavement roughness[J]. J. of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(3): 27-30.

作者简介:

杨丹丹(1989—),女,甘肃省兰州市人,博士生,主要研究方向为光纤惯性传感技术;

甘维兵(1978—),男,湖北武汉人,博士,副高级研究员,主要研究方向为光纤传感技术。

基于时间一致性约束的核互相关器目标跟踪

崔雄文^{*}，刘传银，周 杨，黄 勇，冯冬阳，李剑鹏，万 潇，彭 晶
(四川长虹电器股份有限公司技术中心，成都 610041)

摘 要： 针对相关滤波器跟踪算法在目标快速运动、遮挡和表观变化时易发生跟踪漂移或者丢失的问题，提出一种基于时间一致性和核互相关器的目标跟踪算法。该算法通过引入对图像噪声和杂波更具鲁棒性的核互相关向量，能够更精确地预测目标的仿射变化。同时，在学习过程中引入时间一致性约束，以解决因核相关器时间退化导致的跟踪漂移问题。最后，采用主灰度分量逆映射来提升跟踪器应对目标部分遮挡的能力。在公开的 OTB100 标准目标跟踪数据集中与提供的基准算法和其他性能更加先进的相关滤波算法进行对比，该算法平均跟踪速度为 41 f/s，相对 fDSST 和 SAMF 算法，其跟踪精度分别提升 15.6% 和 6.4%，跟踪成功率分别提升 33.3% 和 6.1%。实验结果表明，该算法在目标快速运动、遮挡或表观变化时仍能精确地跟踪目标。

关键词： 目标跟踪；核互相关器；时间一致性约束；主灰度分量逆映射

中图分类号： TP391.4 **文章编号：** 1001—5868(2020)05—0705—06

Object Tracking with Kernel Cross-correlator Based on Temporal Consistent Constraint

CUI Xiongwen, LIU Chuanyin, ZHOU Yang, HUANG Yong, FENG Dongyang, LI Jianpeng, WAN Xiao, PENG Jing
(Technology Center, Sichuan Changhong Electric Co. Ltd., Chengdu 610041, CHN)

Abstract: For the problems of tracking drift or loss in the tracking algorithms of correlation filter, which is caused by fast motion, occlusion and appearance variation of objects, an object tracking algorithm with kernel cross-correlator based on temporal consistent constraint is proposed. A kernel cross-correlator vector, which is more robust to image noise and clutters, is introduced to predict affine transformation of object more precisely. Meanwhile, to solve the problem of tracking drift caused by temporal degradation of kernel cross-correlator, temporal consistent constraint is introduced during learning process. Finally, MGC (major gray component) anti-projection is utilized to improve the ability of the tracker to deal with occlusion of object. The proposed algorithm is compared with provided benchmark algorithms and other more advanced correlation filter based algorithms on public OTB100 standard object tracking datasets. The tracking speed of proposed algorithm precision reaches 41 f/s, and compared with fDSST and SAMF algorithm, its tracking precision is increased by 15.6% and 6.4%, and the success rate is increased by 33.3% and 6.1%, respectively. The experimental results demonstrate that the proposed algorithm is able to track objects precisely under the condition of fast motion, occlusion and appearance variation.

Key words: object tracking; kernel cross-correlator; temporal consistent constraint; MGC anti-projection

收稿日期:2020—03—04.
基金项目:四川省科技厅重大专项项目(2017SZDZX0022).
^{*}通信作者:崔雄文
E-mail: xiongwen.cui@changhong.com

0 引言

目标跟踪是计算机视觉领域最基本也是最重要的一个研究热点,在安防监控、智能交通、自动驾驶、人机交互、人机行为分析等领域有广泛的应用^[1]。

基于相关滤波的跟踪算法能够快速鲁棒地跟踪平移目标,其优异的性能引起了学者的关注。2010年,Bolme等首次将相关滤波应用于目标跟踪领域^[2]。2015年,Henriques等提出了核化相关滤波(KCF)算法,利用核函数技巧和循环矩阵对角化的思想,提高了相关滤波跟踪算法的准确性^[3]。2014年,Li等提出了SAMF算法,采用尺度金字塔和特征融合,提高了相关滤波跟踪算法对目标尺度变化的自适应能力^[4]。2017年Danelljan等在KCF算法的基础上提出了fDSST算法,采用单独的尺度滤波器来计算目标的尺度变化^[5]。2018年,Song等基于KCF算法提出了一种融合改进均方峰值旁瓣和客观相似性度量的高置信度跟踪算法^[6]。Ge等利用梯度方向直方图的特性,提出双步相关滤波目标跟踪框架^[7]。2019年,Zhang等引入多任务学习和粒子滤波,提出了一种对尺度变化鲁棒的相关滤波跟踪算法^[8]。Deng等结合融合梯度直方图特征和颜色提名特征并结合支持向量机来实现长时间跟踪^[9]。Zuo等利用循环矩阵改进支持向量机,提出了一种更有效的交替优化相关滤波跟踪算法^[10]。

以上基于KCF的相关滤波算法必须设计单独的滤波器或者采用图像金字塔来处理目标的尺度变化,使得跟踪速度下降;滤波器更新通常采用固定加权的更新方法,长时间跟踪时容易出现滤波器时间退化导致跟踪漂移或者失败;更新机制无法有效地区分遮挡和目标变化,无法自适应地对目标表观进行学习。本文基于KCF算法,提出了一种基于时间一致性约束的核互相关器目标跟踪算法,它通过引入核互相关向量,能够更有效快速地对仿射变化的目标进行跟踪;针对滤波器时间退化问题,采用时间一致性约束对滤波器的学习过程进行时间维正则化,防止对目标短暂变化过度拟合引起的跟踪漂移。此外,采用主灰度分量逆映射法判断目标变化和遮挡情况,目标变化时更新滤波器,目标被遮挡时则不更新,提高了算法对遮挡的鲁棒性。

1 本文算法

1.1 核互相关器

相关滤波理论最重要的就是可以在 $O(n \log n)$

的复杂度下预测目标的平移运动,其基本原理是先将数据转化到频率域,然后将空间域的矩阵的逆操作成功转化为频率域的逐元素相乘。KCF利用了循环矩阵对角化等性质,使得核化之后的计算更简单,但也使得KCF算法中所有训练样本必须互为循环移位,且所使用的核函数必须有循环不变性。

为克服KCF的以上限制,首先定义核向量:

$$\mathbf{\kappa}_z(\mathbf{x}) = [\mathbf{\kappa}(\mathbf{x}, \mathbf{z}_1), \dots, \mathbf{\kappa}(\mathbf{x}, \mathbf{z}_m)]^T \quad (1)$$

其中, $\mathbf{x}$ 为待测样本, $\mathbf{z}_i (i=1, 2, \dots, m)$ 由训练样本经过仿射变换得到, $\mathbf{\kappa}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ 为关于 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{y}$ 的核函数。核互相关器可以定义为

$$\hat{\mathbf{g}} = \hat{\mathbf{\kappa}}_z(\mathbf{x}) \odot \hat{\mathbf{h}}^* \quad (2)$$

其中, $\hat{\cdot}$ 表示快速傅里叶变换(FFT), $\odot$ 表示逐元素相乘, $*$ 表示共轭, $\mathbf{h}$ 为相关器。

通过在线学习相关器 $\mathbf{h}$ 能将训练样本的仿射变换信息编码到相关器中,从而能够预测目标的仿射变换。构造核向量时没有引用任何定理或者限制,所以理论上可以预测任意的仿射变换且应用任意的核函数。

为不失一般性,本文采用径向基单核函数

$$\mathbf{\kappa}(\mathbf{x}, \mathbf{z}_i) = h(\|\mathbf{x} - \mathbf{z}_i\|^2) \quad (3)$$

对目标进行平移变换,核向量为

$$\mathbf{\kappa}_z(\mathbf{x}) = [h(\|\mathbf{x} - \mathbf{z}_1\|^2), \dots, h(\|\mathbf{x} - \mathbf{z}_n\|^2)]^T = h(\|\mathbf{x}\|^2 + \|\mathbf{z}\|^2 - 2[\mathbf{x}^T \mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{x}^T \mathbf{z}_n]^T) \quad (4)$$

其中, n 为样本维数, $\mathbf{x}^T$ 表示 $\mathbf{x}$ 的转置, $\|\cdot\|^2$ 表示二阶范数。根据Parseval定理:

$$\mathbf{\kappa}_z(\mathbf{x}) = h\left(\frac{1}{n}\|\hat{\mathbf{x}}\|^2 + \frac{1}{n}\|\hat{\mathbf{z}}\|^2 - 2 \cdot F^{-1}(\hat{\mathbf{x}} \odot \hat{\mathbf{z}}^*)\right) \quad (5)$$

其中, F^{-1} 表示逆傅里叶变换。对目标尺度变换,核向量为

$$\mathbf{\kappa}_z(\mathbf{x}) = [\mathbf{\kappa}(\mathbf{x}, \mathbf{z}_1), \dots, \mathbf{\kappa}(\mathbf{x}, \mathbf{z}_m), 0, \dots, 0]^T \quad (6)$$

其中, m 为设定的尺度变换数目,对核向量补零是为了消除尺度变换的边界效应。

1.2 时间一致性约束

在目标跟踪中,模型学习是一个重要且困难的问题。为了及时准确地描述目标的表观变化,必须对模型进行在线学习;而模型的持续更新会积累单帧跟踪误差,从而引起跟踪漂移甚至丢失,为了解决该问题,本文在模型学习过程中引入时间一致性约束:

$$\min_{\hat{\mathbf{h}}} \sum_{i=1}^s \|\hat{\mathbf{k}}_{z_i}(\mathbf{z}_i) \odot \hat{\mathbf{h}}^* - \hat{\mathbf{g}}_i\|^2 + \lambda_1 \|\hat{\mathbf{h}}^*\|^2 +$$

$$\lambda_2 \|\hat{\mathbf{h}}^* - \hat{\mathbf{h}}_{\text{pre}}\|^2 \tag{7}$$
其中, s 为训练样本数量, $\mathbf{K}_{z_i}(\mathbf{z}_i)$ 和 $\mathbf{g}_i$ 分别为第 i 个训练样本对应核向量及相关器响应, $\mathbf{h}_{\text{pre}}$ 为前一帧相关器。

λ_1 和 λ_2 分别为正则系数和约束系数, 式中第二项为候选相关器 $\mathbf{h}$ 的正则项。对应相关器先验服从 Gaussian 分布的假设, 利用 Bayesian 准则最大后验估计可以防止相关器学习中出现过拟合。第三项为时间一致性约束项, 对应新的相关器位于以前一帧相关器为中心的局部空间内, 即前后帧之前相关器应尽可能一致, 这样可以有效缓解跟踪误差累积引起的跟踪漂移。

式(7)是一个凸优化问题, 因此有闭式最优解:

$$\hat{\mathbf{h}}^* = \frac{\sum_{i=1}^s \hat{\mathbf{g}}_i \odot \hat{\mathbf{k}}_{z_i}^*(\mathbf{z}_i) + \lambda_2 \hat{\mathbf{h}}_{\text{pre}}}{\sum_{i=1}^s \hat{\mathbf{k}}_{z_i}(\mathbf{z}_i) \odot \hat{\mathbf{k}}_{z_i}^*(\mathbf{z}_i) + \lambda_1 + \lambda_2} \tag{8}$$

1.3 主灰度分量逆映射

在目标跟踪过程中, 目标的仿射变化、光照变化、背景更替以及遮挡都会引起目标的表现变化, 在图像上表现为目标区域灰度值分布的陡变。为了稳定准确地跟踪目标, 采用基于灰度主分量逆映射的自适应模型更新策略: 在目标自身发生变化时(仿射变化、光照变化), 必须进行模型更新以更准确地描述目标的即时表现; 目标被遮挡时, 不能进行模型更新以防止将错误的背景像素引入目标模型中。

图 1(c) 为前一帧搜索区域, 红框区域为前景(目标)区域, 将当前帧前景区域(图(a)和图(b)中红框区域)的灰度值主分量逆映射到前一帧的搜索区域。若主分量主要分布在前一帧前景区域, 如图 1(a)



图 1 基于灰度主分量逆映射的自适应模型更新

对应的逆映射结果为图 1(d) 所示(白色像素对应主分量), 则判断目标未被遮挡, 进行模型更新; 若主分量主要分布在前一帧背景区域, 如图 1(b) 对应的逆映射结果为图 1(e) 所示, 则判断目标被遮挡, 不进行模型更新。从图中可以看出, 采用这种策略可以很好地判断目标是否被遮挡。

设当前帧前景区域灰度主分量逆映射到前一帧搜索区域和前景区域的像素数量分别为 A_s 和 A_f , 则模型更新策略为

$$R = A_f / A_s$$
$$\begin{cases} R \geq R_{th}, & \text{updating} \\ R < R_{th}, & \text{no updating} \end{cases} \tag{9}$$

其中, R_{th} 为设定的更新阈值。模型更新采用文献[1]中的加权更新策略。

综上, 本文提出的算法流程如表 1 所示。

表 1 本文算法流程
输入: 起始帧 I_{in} , 目标位置 Loc_{in}
后续帧:
步骤 1: 根据前一帧目标位置 Loc_{pre} 构造训练样本, 提取特征, 根据式(5)、(6) 计算核向量;
步骤 2: 根据式(8) 计算平移和尺度相关器;
步骤 3: 采用步骤 2 中得到的相关器计算目标当前帧的目标中心位置 C_{cur} 和尺度 S_{cur} ;
步骤 4: 根据式(9) 更新模型。
输出: 目标当前帧位置

2 实验

2.1 实验环境与参数设置

本文中实验的计算机平台为 Intel Core i5-8250U CPU, 主频为 1.8 GHz, 安装内存为 8.00 GB, 开发平台为 Matlab 2018b。实验中关键参数设置如下: 特征提取采用灰度特征和梯度方向直方图(HOG)加权融合的方式, 灰度权值为 0.3, HOG 权值为 0.7。尺度变换数目 m 为 11, 尺度间距为 1.03; 平移相关器和尺度相关器高斯热响应图方差为 1/16; 正则项系数 λ_1 和时间一致性约束

项系数 λ_2 分别设定为 0.001 和 12;自适应模型更新阈值 R_{th} 设定为 0.8。

2.2 数据集与评价指标

为了验证本文所提算法的有效性,在通用的 OTB100 数据集上将其与标准算法和其他性能更先进的相关滤波算法进行比较。

OTB100 数据集是 Wu 等^[11] 于 2015 年提出的目标跟踪通用数据集,共包含 98 段 59 040 帧各种场景下的图像序列,序列的长度最短为 71 帧,最长为 3 872 帧。其中,灰度序列占 25%。OTB100 数据集涵盖了光照变化、尺度变化、遮挡、杂波等 11 种困难场景。

评价指标采用文献[12]中提出的标准的精度图(Precision Plot)、成功率图(Success Plot)及跟踪帧频(Fps):

(1)精度图:算法得到的目标位置(Bounding Box)中心点与真值(Ground-Truth)中心点的距离小于给定阈值的帧数的百分比。不同的阈值,得到的百分比不一样,因此可以获得一条曲线;

(2)成功率图:首先定义重合率得分(Overlap Score,OS)、算法得到的位置(记为 A)与真值的位置(记为 B),重合率定义为

$$OS = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}$$

(10)

其中, $|\cdot|$ 表示区域的像素数目, $\cap$ 和 $\cup$ 分别表示交集和并集。当某一帧的 OS 大于设定的阈值时,则该帧被视为成功的(Success),成功帧占比即为成功率(Success Rate)。OS 的取值范围为 0~1,因此也可以获得一条曲线;

(3)跟踪帧频:算法每秒处理的帧数。

2.3 消融实验结果及分析

为了进一步验证本文所提算法的有效性,采用消融实验方法,实验结果如表 2 所示,其中“√”表示有相应策略,“×”表示没有相应策略。从表中可以看出,相同条件下,时间一致性约束和模型自适应更新均能提升算法的精度和成功率。其中,时间一致性约束提升效果更显著。

表 2 消融实验结果

实验结果	一致性约束	自适应更新	精度	成功率
Origin	×	×	0.773	0.681
Ablation1	×	√	0.781	0.689
Ablation2	√	×	0.796	0.701
Proposed	√	√	0.801	0.743

2.4 对比实验结果及分析

本文在 OTB100 数据集上,将本文算法与性能

较高的四种基准算法(SCM,TLD,CT,CSK)及其他四种性能先进的相关滤波算法进行对比(KCF,fDSST,SAMF 及 Staple),算法代码及参数采用文献公开的代码。

如图 2 所示,本文提出的算法跟踪精度相对于精度最高的基准算法 SCM 提高 51.7%,相对于 KCF 和 fDSST 算法提高 15.1%和 15.6%,相对于同样有多尺度处理的相关滤波算法 SAMF 提高 6.4%,比使用多尺度处理及额外色彩特征的 Staple 算法提高 2.3%;跟踪成功率相对于成功率最高的基准算法 SCM 提高 49.0%,相对于 KCF 和 fDSST 算法提高 29.2%和 33.3%,相对于 SAMF 和 Staple 提高 6.1%和 1.9%。

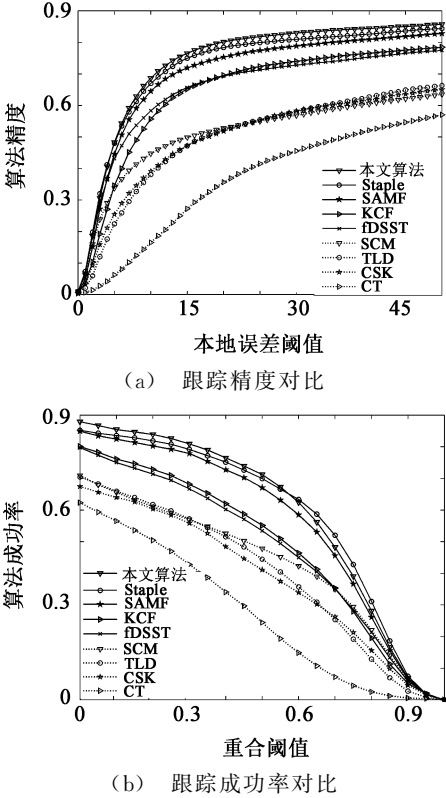
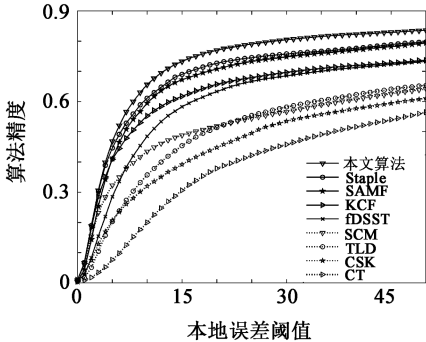


图 2 不同算法的跟踪精度及成功率对比

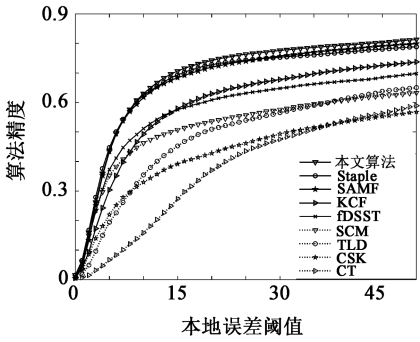
如图 3 所示,在目标发生尺度变化时,本文提出的算法精度相对于有多尺度处理的 fDSST 和 Staple 算法分别提升 17.1%和 5.9%,成功率分别提升 51.5%和 6.6%;在目标被遮挡时,本文提出的算法精度相对于 fDSST 和 Staple 算法分别提升 22.0%和 2.1%,成功率分别提升 45.5%和 3.8%。

图 4 为各种算法对典型序列的跟踪结果。在图 4(a)‘Box’序列中,目标发生外形变化和遮挡。本文算法采用了自适应模型更新策略,可以看到在遮

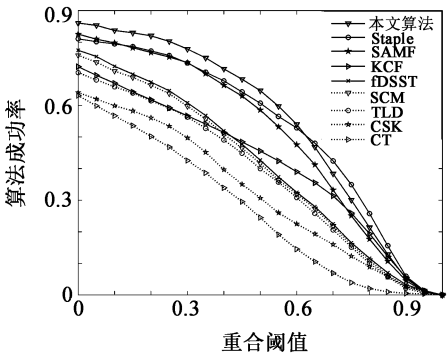
挡后第 566 帧时,Staple,fDSST,KCF,CT 算法已经丢失目标,TLD 算法出现跟踪漂移;在第 1 149 帧



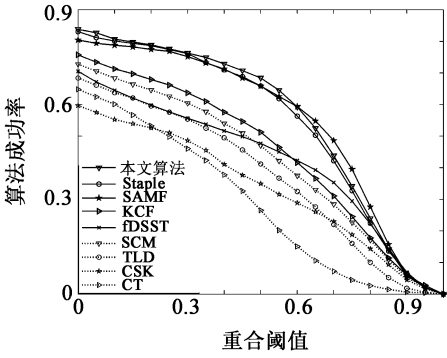
(a) 尺度变化下精度图



(b) 遮挡下精度图

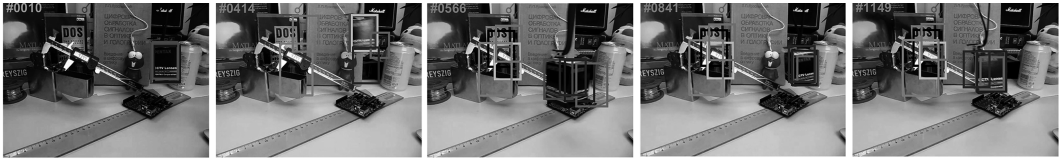


(c) 尺度变化下成功率图



(d) 遮挡下成功率图

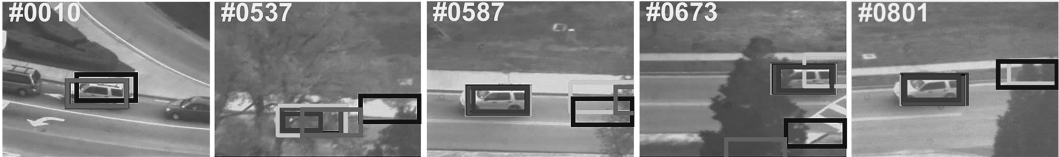
图 3 尺度变化和遮挡条件下各算法精度和成功率对比



(a) Box 序列跟踪结果(从左至右为第 10,414,566,841,1 149 帧)



(b) Panda 序列跟踪结果(从左至右为第 10,147,370,537,701 帧)



(c) Suv 序列跟踪结果(从左至右为第 10,537,587,673,801 帧)



(d) Woman 序列跟踪结果(从左至右为第 10,137,365,492,597 帧)

图 4 不同算法的部分跟踪结果图

时,仅有本文算法和 SAMF 算法能准确地全程跟踪上目标。

在图 4(b)‘Panda’序列中,目标发生外形变化、尺度变化以及运动。可以看到,在第 370 帧时,fDSST,KCF,TLD,CT 算法已经丢失目标;在第 701 帧时,仅有本文算法、CSK 和 TLD 算法准确地跟踪目标。这是因为本文算法采用了基于时间一致性约束的相关器学习策略,能消除时间退化引起的跟踪漂移。

在图 4(c)‘Suv’序列中,目标发生遮挡和尺度变化。可以看到,在第一次遮挡后第 587 帧时,SCM,CSK,CT 算法已经丢失目标,TLD 算法跟踪尺度也发生错误;第二次遮挡过程中更为明显。这是由于本文算法采用了自适应模型更新策略,能全程准确地跟踪目标。

在图 4(d)‘Woman’序列中,目标发生遮挡、尺

度变化和外形变化。可以看到,在第一次遮挡后第 365 帧时,CSK,CT 算法已经丢失目标,TLD 算法跟踪尺度也发生错误;第二次遮挡后第 492 帧时,SCM 算法目标跟踪丢失;第 597 帧时目标反转后仅有本文算法能准确跟踪目标,Staple 算法虽然能准确定位,但是跟踪尺度出现错误。这是因为本文算法采用自适应模型更新策略能处理遮挡,且设计了单独快速的尺度相关器,能准确计算目标尺度变化。

不同算法的平均跟踪速度如表 3 所示,其中,SCM 算法采用分块操作且采用迭代法求解稀疏方程,速度极慢;CSK 算法采用压缩感知进行特征降维,速度最快;KCF 算法采用循环矩阵且没有尺度处理,速度较快;fDSST 和 SAMF 算法在多个尺度上分别对每个尺度进行相关滤波,速度较慢;而本文提出的算法设计了专门的尺度相关器,跟踪速度较 fDSST 和 SAMF 算法有明显提高。

表 3 不同算法跟踪速度 (单位:f/s)

算法	CSK	CT	TLD	SCM	KCF	fDSST	SAMF	Staple	Proposed
跟踪速度	110	69	17	0.15	85	17	16	37	41

3 结论

针对相关滤波器在目标被遮挡、尺度变化、表观变化时跟踪漂移或者丢失的问题,本文提出了一种基于时间一致性和核互相关器的目标跟踪算法。采用核互相关器能快速准确地表征目标的平移和尺度变化,采用时间一致性约束能消除相关器时间退化的问题,采用自适应模型更新能有效地处理目标被遮挡的问题,实现目标的稳健跟踪。公开的跟踪数据集实验结果表明,对于不同场景下的不同目标,本文提出的算法具有较高的跟踪精度、成功率和跟踪速度。

在将来的工作中,结合稀疏表示学习更为简单精确的目标模型、结合深度学习得到更强的目标特征是进一步研究的方向。

参考文献:

[1] 崔盼果,周进,雷涛,等. 基于局部二值模式的改进时空上下文跟踪算法[J]. 半导体光电, 2018, 39(3): 444-449.
Cui Panguo, Zhou Jin, Lei Tao, et al. Improved object tracking via spatial-temporal context based on local binary pattern[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2018, 39(3): 444-449.

[2] Bolme D S, Beveridge J R, Draper B A, et al. Visual object tracking using adaptive correlation filters[C]// Proc. IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern

Recognition, 2010: 2544-2550.

[3] Henriques J F, Rui C, Martins P, et al. High speed tracking with kernelized correlation filters[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(1): 583-596.

[4] Li Y, Zhu J. A scale adaptive kernel correlation filter tracker with feature integration [C]//Proc. European Conf. on Computer Vision, 2014: 254-265.

[5] Danelljan M, Hager, Gustav, Khan F S, et al. Discriminative scale space tracking [J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(8): 1561-1575.

[6] 宋华军,于玮,王芮. 采用 PSR 和客观相似性的高精度跟踪[J]. 光学精密工程, 2018, 26(12): 3067-3078.
Song Huajun, Yu Wei, Wang Rui. High-confidence correlation tracking algorithm based on PSR and objective similarity[J]. Optics and Precision Engin., 2018, 26(12): 3067-3078.

[7] 葛宝义,左宪章,胡永江,等. 基于双步相关滤波的目标跟踪算法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 1226004.
Ge Baoyi, Zuo Xianzhang, Hu Yongjiang, et al. Object tracking algorithm based on two-step correlation filter [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12): 1226004.

[8] Zhang T Z, Xu C S, Yang M H. Learning multi-task correlation particle filters for visual tracking[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2019, 41(2): 365-378.

(下转第 733 页)

光纤电流互感器用半导体激光器数字驱动电路设计

王 硕, 王国臣*, 高 伟

(哈尔滨工业大学 仪器科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 半导体激光器的输出性能直接决定了光纤电流互感器的测量精度和长期运行稳定性。为提高光纤电流互感器的测量精度与稳定性,设计了一种高精度半导体激光器数字驱动电路。以STM32微控制器为控制核心,利用高精度电流源芯片ADN8810实现驱动电流的精密控制,同时采用集成温控芯片MAX1978通过控制半导体制冷片的工作电流实现对激光器温度的精确控制。经实验测试,其输出电流稳定度为0.028%,温度控制稳定度为0.18%,激光器输出光功率稳定度达到0.06%,输出波长稳定度为0.05 pm。该设计能够满足光纤电流互感器对光源输出性能的要求。

关键词: 半导体激光器; STM32; 恒流驱动; 温控电路; 光纤电流互感器

中图分类号: TN29 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0711-06

Design of All Digital Drive Circuit of Semiconductor Lasers for Fiber Optical Current Transformer

WANG Shuo, WANG Guochen, GAO Wei

(School of Instrumentation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, CHN)

Abstract: The output performance of semiconductor laser directly determines the measurement accuracy and long-term operation stability of the optical fiber current transformer. Thus in order to improve its measurement accuracy and stability, a high-precision digital driver circuit of semiconductor laser was designed. STM32 microcontroller was used as the main control chip, high-precision current source chip ADN8810 was used to control the driving current precisely. And integrated temperature control chip MAX1978 was adopted to control the working current of semiconductor coolers to realize the precise temperature control. The experimental results prove that the output current stability is 0.028% and the stability of temperature control is 0.18%. The optical power stability reaches 0.06%, and the wavelength stability reaches 0.05 pm. The design can meet the output performance requirements of light source of the optical fiber current transformer.

Key words: semiconductor laser; STM32; constant current driving; temperature control circuit; optical fiber current transformer

0 引言

相比于传统的电磁式电流互感器,光纤电流互

感器(Fiber Optical Current Transformer, FOCT)具有绝缘性好、可靠性高、动态范围大、频域宽和暂态特性良好等优点^[1-3],在电力系统、铝电解工业、托卡马克装置和舰船综合电力系统等领域都有广泛的应用^[4-6]。半导体激光器是一种单色光源,具有体积小、效率高、成本低、易调谐等优点,被广泛应用于光

收稿日期:2020-05-21.

基金项目:国家自然科学基金项目(51909048);近地面探测技术重点实验室预研基金项目(6142414190404).

*通信作者:王国臣 E-mail: wanggc@hit.edu.cn

纤传感与光通信领域^[7-8]。光源输出功率和波长的稳定性直接影响 FOCT 的测量精度和长时间运行稳定性^[9-10]。微小的驱动电流与环境温度变化都会引起半导体激光器的光功率和中心波长的改变。因此,为保证 FOCT 的检测精度与长期运行稳定性,设计一种高性能的半导体激光器数字驱动电路具有十分重要的意义。

为实现对半导体激光器的驱动电流与温度的精确控制,通过电流源芯片实现驱动电流控制,采用温控芯片改变驱动半导体制冷器(TEC)电流的大小和方向,以实现了对激光器管芯温度控制^[11-12]。STM32 微控制器作为整个数字驱动电路的控制核心,可根据 FOCT 实际设计需求,对半导体激光器驱动电流和温度进行调节,以满足 FOCT 实际工作中对光源输出光功率与中心波长稳定性的要求。

1 整体电路设计

本文选用 STM32F103VET6 微控制器作为数字控制核心,其片内集成 2 路 12 位 ADC 和 3 路 12 位 ADC,能够满足对半导体激光器的数字驱动控制要求。整个数字驱动电路原理框图如图 1 所示。

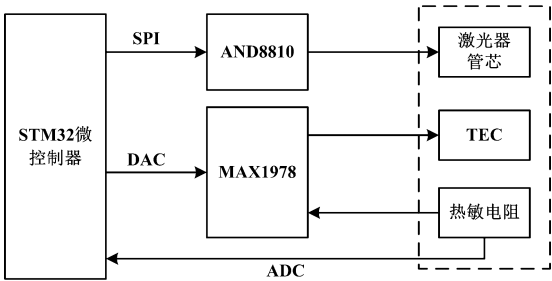


图 1 数字驱动电路原理框图

整个驱动电路主要包括 STM32 控制器电路、电流驱动电路和温控电路。STM32 微控制器接收来自 FOCT 系统反馈的光源控制量,根据反馈量分别设定、调节半导体激光器的驱动电流与温度。STM32 微控制器将设定驱动电流值对应的数字量发送给电流源芯片以实现驱动电流输出;通过内置 DAC 将温度设定值数字量转化为模拟控制电压输出,提供温度参考电压,达到对温度的调节控制。温控电路可根据半导体激光器内置热敏电阻的两端电压和设定的温度参考电压进行比较,结合模拟 PID 控制电路^[13],实现 TEC 的制冷和加热,控制半导体激光器的工作温度。STM32 微控制器内置 ADC 可将热敏电阻的两端电压转换为数字量,计算出对应

的实际温度值,实现对激光器管芯工作温度的实时监测^[14]。

2 数字恒流源电路设计

半导体激光器输出光功率与注入电流值直接相关,选用 ADI 公司的 12 位高精密度数字恒流源芯片 ADN8810,其满量程输出电流高达 300 mA,具有低噪声、低漂移等特点。图 2 所示为数字恒流源电路。

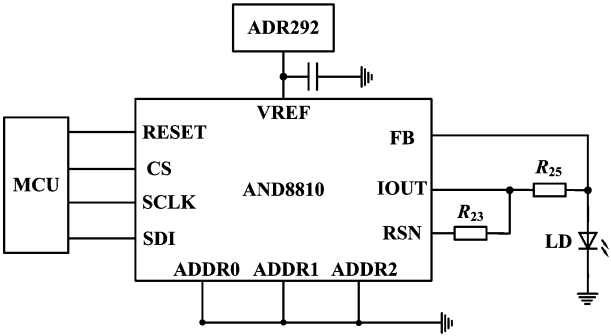


图 2 ADN8810 数字恒流源电路

采用低噪声精密基准源 ADR292 作为 ADN8810 内部模数转换模块所需 4.096 V 外部参考电压,通过 VREF 引脚输入。可通过设置 R_{23} 和 R_{25} 的阻值来限制 ADN8810 的最大输出电流,具体计算公式如下:

$$I_s = \frac{4.096}{10R_{SN}} \tag{1}$$

其中, $R_{SN} = R_{23} = R_{25}$ 。

ADN8810 的输出电流值由 STM32 微控制器通过串行外设接口(SPI)传输的一个 16 位数据帧进行控制。数据帧的高 4 位为芯片地址位,对应于逻辑电平引脚 ADDR2, ADDR1 和 ADDR0,低 12 位为输出电流值对应的数字量。具体的电流输出值与数字量的对应关系如式(2)所示:

$$I_{OUT} = \frac{CODE}{1\,000} \times \frac{1}{R_{SN}} \left(\frac{R_{SN}}{15\,000} + 0.1 \right) \tag{2}$$

其中, CODE 为可变数字量编码,取值为 0~4 095 的整数,代表 12 位量程范围,最小分辨率为 0.033 mA。 R_{SN} 需采用 0.5% 的高精密、低温漂电阻,阻值设为 1.6 Ω 。

半导体激光器的输出光功率随时间衰减会导致 FOCT 的输出比差和相差变大,长期稳定性变差。可以通过检测 FOCT 干涉信号的峰值来实现对光功率的检测,并根据检测值进行反馈控制,调整数字恒流源输出,以保证 FOCT 的精度和长时间运行稳

定性。

3 数字温控电路设计

半导体激光器在工作过程中会将一部分光能转化为热能,从而引起半导体激光器温度升高,导致其各项性能指标发生变化,无法保证激光器正常工作。所以必须在数字恒流源驱动电路的基础上设计数字温控电路,以保证激光器正常工作。选择美信公司的集成温控芯片 MAX1978 作为数字温控电路的控制核心。MAX1978 是一种高集成度、高精度、高安全性的热电温度控制器,其内部集成了自稳放大器、脉宽调制输出(PWM)、基准电压源、H 桥电路、TEC 电压电流限制等模块。MAX1978 的整个工作过程为:将热敏电阻两端的电压与设定参考温度对应的电压之间的差值作为自稳放大器的输入量,将其输出作为第一个积分放大器的反向输入端,并与第二个积分放大器、外围电阻和电容连接成为一个模拟的 PID 阻容控制网络,以自动调节 TEC 电流的大小和方向,实现制冷和加热,直至激光器内部工作温度与设定温度相同。

MAX1978 温控电路如图 3 所示,采用 5 V 电源供电,内部集成有 1.5 V 的高精度参考电压源 V_{ref} 。FREQ 引脚直接接地,设置其脉宽调制的开关频率为 500 kHz。

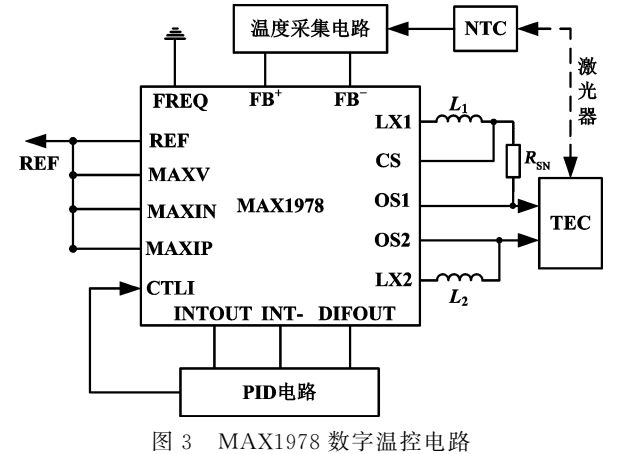


图 3 MAX1978 数字温控电路

可通过 MAXV 引脚设置 TEC 两端的最大差分电压,以保护 TEC。MAXIP 引脚和 MAXIN 引脚分别设置 TEC 最大正向和负向电流值。

温度变化引起的热敏电阻两端电压的变化十分微弱,不能直接接入 FB^+ 和 FB^- 引脚,还需通过惠斯通电桥将其与参考温度对应的电压值进行比较,放大。具体电路如图 4 所示。

其中, R_{11} 为半导体激光器内部集成的热敏电阻,其阻值会随激光器管芯温度变化而变化。SET 为参考温度电压设定点,接微控制器内部 DAC 输出端口。 $VR1.5$ 接参考电压 V_{ref} 。当激光器内部温度与参考温度不同时, R_{12} 与 R_{11} 两端存在一个电压差,压差从 MAX1978 的 FB^+ 和 FB^- 引脚输入,控制 TEC 驱动电流以实现激光器的制冷和加热,直至电桥平衡, FB^+ 和 FB^- 两端电压差为 0。此时,半导体激光器内部温度达到所设定的参考温度值,并维持稳定。利用 STM32 内置 ADC 采集热敏电阻两端电压,可实现对激光器内部实际温度的实时监测。

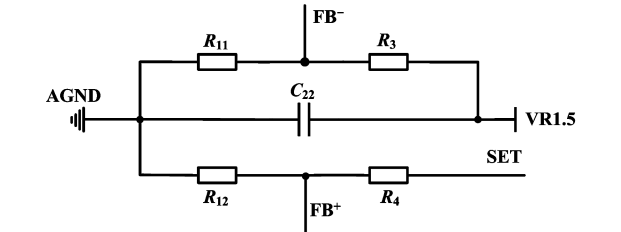


图 4 温度采集电路

MAX1978 温控电路的响应和控制精度主要取决于其 PID 温度补偿电路。如图 5 所示为模拟 PID 温度补偿控制电路,其中 OP1 为芯片内置运放,与外围的电阻和电容共同组成了整个模拟 PID 温度补偿电路。经过对模拟 PID 参数的不断优化,得到电路中各参数值为: $C_{17}=10\mu F$, $R_7=100k\Omega$, $C_{18}=0.47\mu F$, $R_{10}=1M\Omega$, $R_6=20k\Omega$, $C_{23}=0.047\mu F$ 。

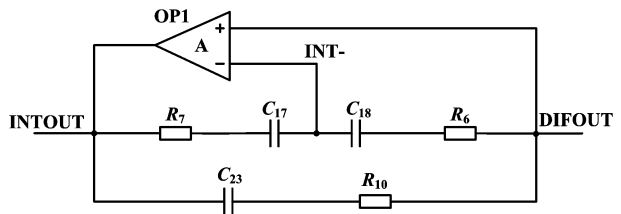


图 5 PID 温度控制电路

4 驱动电路性能测试

为验证半导体激光器数字驱动电路性能,需对数字驱动电路的性能进行实验测试。首先分别对数字恒流源电路和数字温控电路进行实验测试。最后对半导体激光器的输出光功率和输出波长的稳定性进行测试,以验证半导体激光器数字驱动电路的整体性能。

4.1 数字恒流源电路测试

由式(2)可知,ADN8810 的输出电流大小与电

阻 R_{SN} 的阻值、数字量 CODE 值有关,其中 R_{SN} 阻值已固定,所以输出电流直接由数字量 CODE 值确定。由式(1)可知,最大输出电流为 256 mA,设定数字量 CODE 值范围为 0~4 095,步进为 100,利用安捷伦 34410A 型 6 位半数字万用表直接测量实际输出电流值。对设定的数字量 CODE 值与实际测量电流值进行线性拟合,得到拟合曲线如图 6 所示。

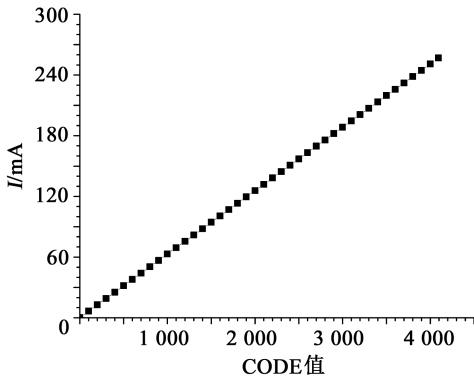


图 6 驱动电流拟合曲线

根据式(2)计算数字量 CODE 值对应的理论输出电流数据,并与实测电流数据进行比较,得到理论与实测最大差值为 0.073 mA,最大相对误差为 0.05%。线性度计算公式如下:

$$S_L = \frac{|\Delta I_{\max}|}{I_{FS}} \times 100\%$$

(3)

其中, $\Delta I_{\max}$ 为输出电流理论值与实测值的最大差值, I_{FS} 为满量程输出电流值。计算可得输出电流线性度为 0.4%。设定数字量 CODE 值与实际输出电流值之间具有较好的线性度。

设定数字量 CODE 值为 500 时,对应理论电流值为 36.283 mA。每隔 5 min 间隔记录实际输出电流值,连续测量 100 min。电流稳定性曲线如图 7 所示。

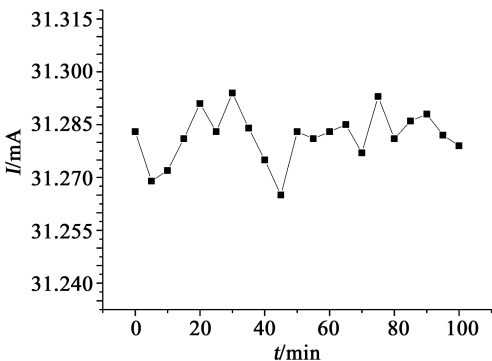


图 7 驱动电流稳定性曲线

由图 7 可知,100 min 时间内输出驱动电流最

大波动为 0.029 mA,计算可得输出驱动电流稳定度为 0.028%。

4.2 数字温控电路测试

通过 STM32 内置 ADC 模块检测其内部热敏电阻两端的实际电压值,计算出此时对应的半导体激光器内部实际温度值。首先进行温度控制精度测试,在室温条件下,设定输出驱动电流为 100 mA,设置温度从 20℃ 开始,以 1℃ 的温度调节间隔逐渐升至 30℃。对设定温度值和实测温度值进行记录。温度调节过程中设定值与实测值的最大误差为 0.03℃,最大相对误差为 0.11%。

仍然设置输出驱动电流为 100 mA,设定温度为 25℃,每隔 5 min 对采集实际温度值进行记录,连续测量 100 min。温度稳定性曲线如图 8 所示。

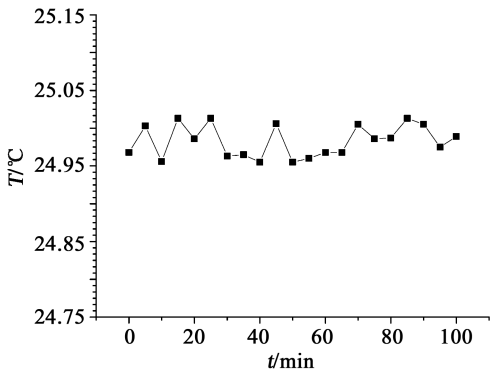


图 8 温度稳定性曲线

由图 8 可知,在 100 min 内最大温度误差值为 0.045℃。计算可得温控电路的温度稳定度为 0.18%。

4.3 激光器输出特性测试

在分别对数字恒流源电路和温控电路进行测试后,还需对半导体激光器输出光功率与输出波长进行稳定性测试。选用北京世维通科技生产的中心波长为 1 310 nm 的蝶形封装半导体激光器进行测试。

为验证数字驱动电路对半导体激光器输出光功率的控制效果,将温度设定为 25℃,设置数字量 CODE 值为 1 000。使用加拿大 EXFO 公司的 PM-1600 高速光功率计对激光器输出光功率进行测试,每隔 5 min 记录一次光功率值,连续测量 100 min。测得输出光功率稳定性曲线如图 9 所示。

由图 9 可以看出,输出光功率在 100 min 内的最大漂移量为 0.18 μW,输出光功率稳定度达到 0.06%。数字驱动电路对输出光功率控制效果较好。

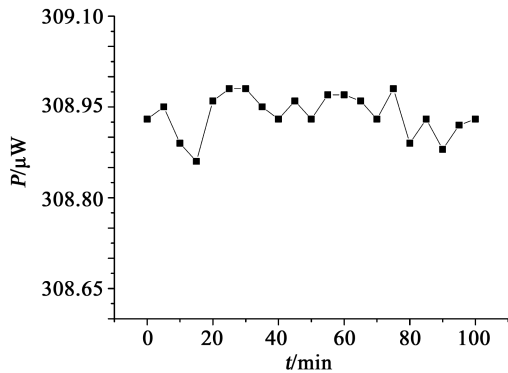


图 9 光功率稳定性曲线

为验证数字驱动电路对半导体激光器输出波长的控制效果,使用日本横河公司的 AQ3670C 型光谱分析仪对激光器输出波长进行测试。设定激光器驱动电流为 100 mA,温度为 25 ℃。每隔 5 min 对激光器的输出波长进行记录,连续测量 100 min,输出波长稳定性曲线如图 10 所示。

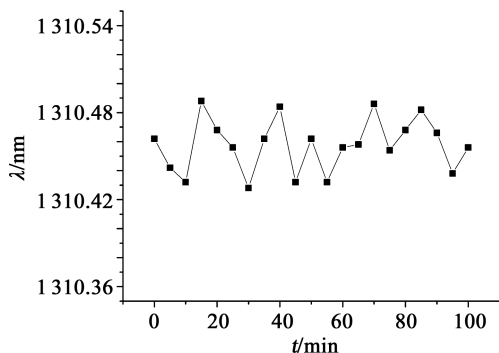


图 10 输出波长稳定性曲线

由图 10 可知,100 min 内输出波长的最大波动为 0.06 nm,波长稳定度为 0.05 pm,说明数字驱动电路对输出波长具有很高的控制精度。

5 结论

针对光纤电流互感器对半导体激光器高稳定性与可调节的设计需求,本文以 STM32 微控制器为核心,利用高精度电流源 ADN8810 与 MAX1978 温控芯片实现半导体激光器数字驱动电路设计。该电路具有全数字、集成度高、易调节和精度高等优点,实验测试结果表明,其输出电流稳定度为 0.028%,温度控制稳定度为 0.18%,激光器输出光功率稳定度达到 0.06%,输出波长稳定度为 0.05 pm。目前,该数字驱动电路已成功应用在实验室光纤电流互感器系统中。

参考文献:

- [1] 郭志忠. 电子式互感器评述[J]. 电力系统保护与控制, 2008 (15): 1-5.
Guo Zhizhong. Review of electronic instrument transformers [J]. Power System Protection and Control, 2008(15): 1-5.
- [2] 王 巍, 张志鑫, 杨仪松. 全光纤电流互感器技术及工程应用 [J]. 供用电, 2009, 26(1): 45-47.
Wang Wei, Zhang Zhixing, Yang Yisong. The fiber optical current transformer (FOCT) technology and Its engineering application [J]. Distribution & Utilization, 2009, 26(1): 45-47.
- [3] 张朝阳, 张春熹, 王夏霄, 等. 反射式光纤电流传感器频率特性计算和测试[J]. 光电工程, 2007(7): 88-92.
Zhang Chaoyang, Zhang Chunxi, Wang Xiaoxiao, et al. Frequency characteristics of reflecting fiber-optic current transducer [J]. Opto-Electronic Engineering, 2007(7): 88-92.
- [4] Bohnert K, Brandle H, Brunzel M G, et al. Highly accurate fiber-optic DC current sensor for the electrowinning industry [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2007, 43(1): 180-187.
- [5] 薛敏敏. EAST 托卡马克上光纤电流传感器的研制与实验应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
Xue Minmin. Development and application of fiber optic current sensor on EAST Tokamak [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [6] 孙旭冉. 舰船用全光纤电流互感器优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
Sun Xuran. Optimum design of fiber optic current transformer for ships [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [7] 张 鹏. 半导体激光器的物理特性分析及研究[J]. 激光杂志, 2018, 39(12): 106-110.
Zhang Peng. Analysis and study of the physical characteristics of a semiconductor laser [J]. Laser J., 2018, 39(12): 106-110.
- [8] 胡积宝, 李谋平. 光通信系统中新型可调谐半导体激光器的设计[J]. 激光技术, 2016, 40(2): 280-283.
Hu Jibao, Li Mouping. Design of novel tunable semiconductor lasers in optical fiber communication systems [J]. Laser Technology, 2016, 40(2): 280-283.
- [9] 张朝阳, 张春熹, 王夏霄, 等. 光源功率衰减对闭环光纤电流互感器变比影响研究[J]. 光子学报, 2008, 37(12): 2458-2461.
Zhang Chaoyang, Zhang Chunxi, Wang Xiaoxiao, et al. Influence of SLD's power attenuation on scale factor of closedloop fiber optic current transformer [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(12): 2458-2461.
- [10] 王夏霄, 冯志芳, 于 佳, 等. 光源功率对光纤电流互感器的性能影响研究[J]. 半导体光电, 2016, 37(3): 445-448, 454.
Wang Xiaoxiao, Feng Zhifang, Yu Jia, et al. Influence of SLD's power on performance of fiber optical current transformer [J].

Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(3): 445-448, 454.

[11] 罗 亮, 胡佳成, 王婵媛, 等. 高精度半导体激光器驱动电源及温控电路设计[J]. 激光技术, 2017, 41(2): 200-204.

Luo Liang, Hu Jiacheng, Wang Chanyuan, et al. Design of high-precision driving power and temperature control circuit for semiconductor laser[J]. Laser Technology, 2017, 41(2): 200-204.

[12] 曹延昌, 熊继军, 侯庆志. 基于 MAX1978 的半导体激光器温控系统设计[J]. 微型机与应用, 2014, 33(18): 70-72.

Cao Yanchang, Xiong Jijun, Hou Qingzhi. Design of temperature control system for semiconductor laser based on MAX1978[J]. Information Technology and Network Security, 2014, 33(18): 70-72.

[13] 黄戈里, 秦燕燕. PID 控制的激光器温度控制系统的设计与实现[J]. 激光杂志, 2016, 37(10): 142-145.



(上接第 680 页)

[4] 蒋圣伟, 师 帅, 袁娇娇, 等. 石墨烯压力传感器的研究进展[J]. 微纳电子技术, 2013, 50(7): 447-452, 457.

Jiang Shengwei, Shi Shuai, Yuan Jiaojiao, et al. Research progresses of graphene-based pressure sensors [J]. Micronanoelectronic Technology, 2013, 50(7): 447-452, 457.

[5] 尹伟红, 韩 勤, 杨晓红. 基于石墨烯的半导体光电器件研究进展[J]. 物理学报, 2012(24): 593-604.

Yin Weihong, Han Qin, Yang Xiaohong. The progress of semiconductor photoelectric devices based on graphene[J]. Acta Phys. Sin. , 2012(24): 593-604.

[6] Hosseinzadegan H, Todd C, Lal A, et al. Graphene has ultra high piezoresistive gauge factor[C]// Proc. Inter. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems, 2012: 611-614.

[7] Zhu S E, Krishna G M, Zhang C, et al. Graphene based piezoresistive sensors [J]. Appl. Phys. Lett. , 2013, 102 (16): 666-692.

[8] Smith A D, Vaziri S, Delin A, et al. Strain engineering in suspended graphene devices for pressure sensor applications [C]// Proc. Inter. Conf. on Ultimate Integration on Silicon, 2012: 21-24.

[9] Lou Z, Chen S, Wang L, et al. An ultra-sensitive and rapid response speed graphene pressure sensors for electronic skin and health monitoring[J]. Nano Energy, 2016, 23(23): 7-14.

[10] 陈令修, 王慧山, 姜程鑫, 等. 六方氮化硼表面石墨烯纳米带生长与物性研究[J]. 物理学报, 2019, 68(16): 91-103.

Chen Lingxiu, Wang Huishan, Jiang Chengxin, et al. Synthesis and characterization of graphene nanoribbons on hexagonal boron nitride[J]. Acta Phys. Sin. , 2019, 68(16): 91-103.

[11] Dean C, Young A, Meric I, et al. Boron nitride substrates

Huang Geli, Qin Yanyan. Design and realization of temperature control system of laser controlled by PID[J]. Laser J. , 2016, 37(10): 142-145.

[14] 黄 斐, 周 郑, 郭汉明. 基于 STM32 的半导体激光器驱动电路设计[J]. 电子测量技术, 2018, 41(1): 7-11.

Huang Fei, Zhou Zheng, Guo Hanming. Design of driver circuit for semiconductor laser based on STM32[J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(1): 7-11.

作者简介:

王 硕(1994—),男,江苏连云港人,硕士研究生,主要从事光纤电流传感技术方面的研究;

王国臣(1987—),男,陕西安康人,博士,助理研究员,主要从事光纤惯性测量技术方面的研究。

for high-quality graphene electronics [J]. Nature Nanotechnol. , 2010, 5(10): 722-726.

[12] Vlassak J J, Nix W D. A new bulge test technique for the determination of Young’s modulus and Poisson’s ratio of thin films[J]. J. of Materials Research, 1992, 7 (12): 3242-3249.

[13] Ma Y, Wang G, Chen Y, et al. Extended Hencky solution for the blister test of nanomembrane[J]. Extreme Mechanics Lett. , 2018: 69-78.

[14] 代 岳, 刘冠军, 邱 静, 等. 悬浮石墨烯薄膜的压力敏感性建模与仿真分析[J]. 测试技术学报, 2017, 31(1): 1-7.

Dai Yue, Liu Guanjun, Qiu Jing, et al. Modeling and simulation analysis on pressure-sensing characteristics of suspended graphene membranes [J]. J. of Test and Measurement Technol. , 2017, 31(1): 1-7.

[15] Lee C, Wei X, Kysar J W, et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene[J]. Science, 2008, 321(5887): 385-388.

[16] Jiang S, Wang X, Shi S, et al. Simulation of deflection and stress for MEMS pressure sensor based on graphene[C]// Proc. Inter. Conf. on Electronic Packaging Technology, 2013: 462-466.

[17] Vella D, Bico J, Boudaoud A, et al. The macroscopic delamination of thin films from elastic substrates[J]. Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(27): 10901-10906.

作者简介:

王 冬(1995—),男,甘肃泾川人,硕士生,主要从事高性能压力传感器的研究;

秦亚飞(1983—),男,博士,讲师,从事微纳传感器与精密测试方面的研究。

基于改进DDPG算法的中短期光伏发电功率预测

苏诗慧*, 雷 勇, 李永凯, 朱英伟

(四川大学 电气工程学院, 成都 610065)

摘 要: 针对传统仿生智能算法处理异构光伏发电功率预测精确建模问题时存在的线路多阻抗参数约束下方差波动、线损分析易陷入局部极值等不足,提出了一种基于改进深度确定性策略梯度(DDPG)的中短期光伏发电功率预测模型。首先,通过引入多智能体机制,视发电系统涉及到的发电过程参数为独立活性的智能体,构建出具有社会属性的面向发电过程参数信息共享的全局最优协同控制体系。然后,通过改进的DDPG算法实现蓄电池储能功率自主精确调节和发电网输出功率的自动最优预测。最后,基于Tensorflow开源框架在Gym torcs环境下进行模型效能仿真并以某示范性异构光伏发电网为效能评价载体,对模型进行了工程应用合理性验证。

关键词: 异构光伏发电网; 功率预测; 深度确定性策略梯度; 多智能体; 效能仿真验证

中图分类号: TM615 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0717-07

Study on Short-to-Medium-Term Photovoltaic Power Generation Forecasting Model Based on Improved Deep Deterministic Policy Gradient

SU Shihui, LEI Yong, LI Yongkai, ZHU Yingwei

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, CHN)

Abstract: Aiming at the congenital shortcomings of traditional multi-resistance intelligent algorithms to deal with the problems of accurate modeling of heterogeneous photovoltaic power forecasting, such as the line's multi-impedance parameter constraints, lower fluctuations, and line loss analysis easily falling into local extremes, a prediction model for short-to-medium-term photovoltaic power generation is proposed based on improved depth deterministic policy gradient (DDPG). Firstly, by introducing multi-agent mechanism and considering the parameters involved in the power generation system as independent active agents, constructed is a global optimal collaborative control system oriented to power generation process parameter information sharing with social attributes. Then, the battery energy storage power can be adjusted independently and accurately and the power grid output power can be automatically and optimally predicted by using the improved DDPG algorithm. Finally, based on the Tensorflow open source framework, the model efficiency was simulated under the Gym torcs environment, and a model heterogeneous photovoltaic power generation network was used as the performance evaluation carrier to verify the rationality the model.

Key words: heterogeneous photovoltaic power grid; power prediction; depth deterministic policy gradient; multi-agent; efficiency simulation verification

收稿日期: 2020-04-23.

基金项目: 四川大学-泸州市人民政府战略合作项目
(2018CDLZ-28).

* 通信作者: 苏诗慧 E-mail: ma26565061@126.com

0 引言

构建融合人工智能技术、现代信息技术、泛在物联网技术的智慧光伏发电系统被视为协同环境、资源、社会三者可持续和谐发展的直接途径之一,具有显著的异构数据融合^[1]、电力与信息双向互动、高度的自主感知与决策、广泛的能量交换等特性。输出功率自动最优预测与蓄电池储能功率自主精确调节是保障智慧光伏发电系统稳定运行的核心环节,构建中短期光伏发电功率预测模型是实现智慧光伏发电系统稳定运行的重要途径。针对传统仿生智能算法在功率预测中存在的问题,文献[2]提出一种基于频域分解的短期负荷预测方法,利用孤立森林等方法对神经网络进行优化后实现对短期光伏发电功率的预测,但该方法没有考虑调节清洗异常数据的数据比例,难以达到最好的预测结果。文献[3-4]为了提升预测的精确度,制定了对原始训练样本先聚类或分解再预测的方案,但同样存在缺乏对数据异常值的处理等缺点。文献[5]利用深度置信网络法进行光伏的功率预测,但由于其参数训练效率较低,影响了算法的推广与应用。

本文利用四川省泸州市光照辐射度数据和当地某光伏发电系统的运维数据,构建了基于改进深度确定性策略梯度(Deep Deterministic Policy Gradient,DDPG)的中短期光伏发电功率预测模型。通过引入多智能体机制与改进深度确定性策略梯度算法,建立输出功率精准预测、信息共享、全景可视、精确建模与蓄电池储能功率自主精确调节之间的高维度决策映射,实现了多维异构性光伏发电参数的横向融合集成。最后,以四川省泸州市某示范性异构光伏发电网为工程应用案例,开发对应的原型系统并对模型综合效能进行了实证分析。一线运维验证结果表明,原型系统具备光伏电网可视化要素生成^[6],具有较好的落地推广应用价值。

1 中短期光伏发电功率预测模型架构设计

基于改进 DDPG 的中短期光伏发电功率预测模型体系,将光伏发电系统全生命周期功率预测与蓄电池储能功率自主精确调节体系架构进行如下划分:数据感知与共享层、输出功率预测层、蓄电池储

能功率自主精确调节层和人机交互层。其中,数据感知与共享层借助嵌入 Storm 流计算的数据融合算法对峰值功率^[7]、网络功率分布、功率损耗、开路电压、电压降落、功率衰减、逆变器参数等多维数据进行快速计算与共享。输出功率预测层通过多智能体机制,把光伏发电输出功率相关核心参数视为具有自主感知与决策能力的智能体,在自身状态更新的同时主动向外界共享自身状态信息,实现输出功率的精确预测。蓄电池储能功率自主精确调节层引入通过改进 DDPG 算法实现异构光伏电网蓄电池储能功率自主精确调节机制。利用多智能体共享信息生成目标发电网参数要素集合,为最优预测模型构建提供可视化支撑,全景预测异构光伏电网真实工作状态。人机交互层利用跨平台应用系统,实现友好人机交互。模型架构如图 1 所示。



图 1 中短期光伏发电功率预测模型架构示意图

基于所提预测体系架构设计数据流顶层,以某异构光伏电网电力线路参数全生命周期实时监测数据流走向为例,依据国家电网公司 IEC61850 行业标准规范^[8],构建了增量光伏电网智慧全景发电功率预测与蓄电池储能功率自主精确调节的逻辑过程,其示意图如图 2 所示。

感知子群内部通过一对一或者一对多自动优先级逻辑控制实现数据有序采集,感知子群之间通过嵌入 Storm 流计算的数据融合算法对多维数据进行快速计算与共享,然后依次经过异构数据快速计算与暂存、归一化格式下的多智能体信息共享、实时解码与全景预测等环节,实现人机实时交互。

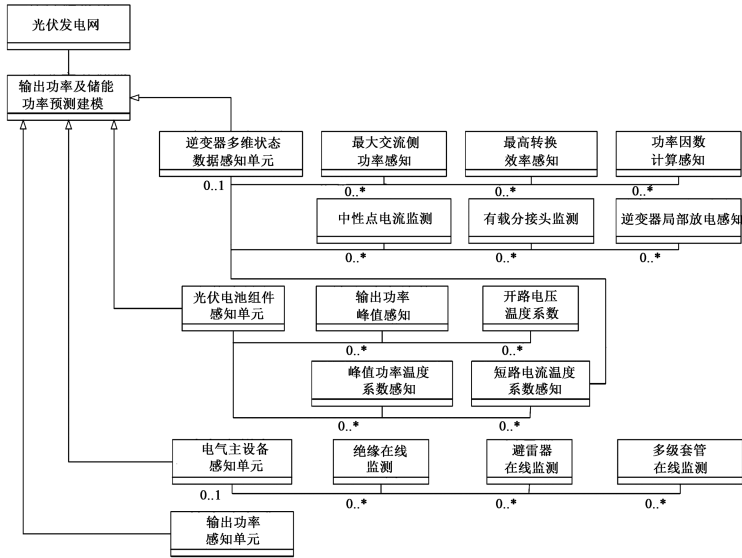


图 2 发电网全寿命周期实时数据流走向示意图

2 中短期光伏发电功率预测模型量化实现

基于上述分析,给出异构光伏发电输出功率预测与蓄电池储能功率自主精确调节模型量化实现过程,为工程化效能分析提供定量保证。

2.1 引入多智能体及信息共享机制

信息共享机制的搭建,就是利用 DDPG 算法强大的自我决策能力,实现多维差异性发电网参数的特征提取与共享计算,并提供正反馈机制以修正共享过程中的误差。同时,利用 DDPG 算法强大的自我感知能力,实现多维差异性发电网参数的有序重组。构建全局协同控制下的多智能体共享信息机制,给出量化的详细实现过程,如图 3 所示。

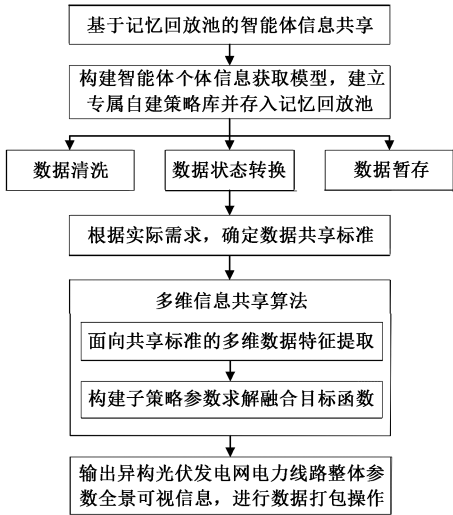


图 3 全局协同控制下多智能体共享信息机制逻辑示意图

2.2 引入改进深度确定性策略梯度算法

在蓄电池功率调节环节中引入 DDPG 算法,DDPG 的 status(即 s)为当前所属状态,在当前状态下选择的行为为 a ,使用策略网络 μ 来充当动作函数 actor(a),则 Q 函数表征为 $Q(s, \mu(s))$,在 t 时刻, Deterministic Policy Gradient 策略通过 μ 函数确定一个动作 a_t ,表示为式(1):

$$a_t = \mu(s_t \mid \theta^\mu) \tag{1}$$

深度学习算法使用价值网络来拟合函数 $Q(s, \mu(s))$ 充当 critic 的角色,DDPG 的目标函数 $J(\theta^\mu)$ 定义如下:

$$J(\theta^\mu) = E_{\theta^\mu} [r_1 + \gamma r_2 + \gamma^2 r_3 + \cdots] \tag{2}$$

式中, γ 为衰变系数, θ^μ 为产生动作的策略网络参数, r 代表步数。

此时 Q 函数可以表示为在采用确定性策略网络 μ 下选择动作的奖励期望值,在 DDPG 中采用 DQN 算法,结构使用 Q 网络拟合 Q 函数。首选训练不同子策略的集合 K ,在每一个回合,为要执行的智能体随机选择特定的子策略,通过最大化融合目标函数选择最佳子策略。不同子策略将会在不同回合执行,所以针对每一个智能体可以得到一个记忆回放池,最后对每一个智能体的子策略参数求解融合目标函数的梯度 $\nabla_{\theta_i} J$,表征如式(3):

$$\nabla_{\theta_i} J \approx \frac{1}{S} \sum_j \nabla_{\theta_i} \mu_i(O_i^j) \nabla_{a_j} Q_i^{\mu_i} \cdot (x^j, a_1^j, \cdots, a_i, \cdots, a_N^j) \Big|_{a_i = \mu_i(O_i^j)} \tag{3}$$

基于融合共享效应, Q 网络中的参数定义为

$\theta^Q, Q^\mu(s, \mu(s))$ 表示使用 μ 策略在 s 状态选取动作所获取的回报期望值^[9], 连续空间内期望可用积分表示, 定义 J_β 为全体的平均收益, 对共享策略 μ 的好坏进行评估:

$$J_\beta(\mu) = \int_{S_s}^{\rho^s} \rho^\beta(s) Q^\mu(s, \mu(s)) ds = E_{s \sim \rho^\beta} [Q^\mu(s, \mu(s))] \quad (4)$$

基于式(1)~(3)实现异构光伏发电网电力线路参数的有序重组, 引入智能体专属自建策略库并存入记忆回放池^[10], 通过子策略参数求解融合目标函数进行信息融合与共享, 这样就可以从算法上实现异构光伏发电网电力线路整体参数全景可视。

发电网电力线路参数更新对算法的学习效率和实时性要求较高, 因此引入双重 Q 网络机制改善 DDPG 算法的决策性能, 提高算法实时性, 即融入另一网络(Target.net)产生 Q -target 值, $Q(s, a, \theta_i)$ 表示当前网络 Eval.net 的输出, 用来评估当前状态动作对的值函数; $Q(s, a, \theta - i)$ 表示 Target.net 的输出, 代入上面求 Q -target 值的公式中得到目标 Q 值。引入 Target.net 后, 在一段时间里目标 Q 值保持不变, 这在一定程度上降低了当前 Q 值和目标 Q 值的相关性, 提高了算法的稳定性。双重 DQN 的损失函数等价表示形式如下:

$$L(\theta) = E_{s,a,r,s'} [(Q^*(s, a | \theta) - y)^2] \quad (5)$$

$$y = r + \gamma \max_{a'} \bar{Q}^*(s', a') \quad (6)$$

其中, Q^* 表示 DQN 下的 Action-value 函数。基于上述定义, Policy Gradient(PG)通过概率分布函数确定最优策略, 在每一步均根据该概率分布获取当前状态最佳的动作^[11], 采取随机性策略 $a_t \sim \pi_\theta(s_t | \theta^\pi)$ 产生动作, 目标函数和梯度分别表示为

$$J(\pi_\theta) = \int_{S_s}^{\rho^s} \rho^\pi(s) \int_{A_s}^{\rho^a} \pi_\theta(s, a) r(s, a) da ds = E_{s \sim \rho^\pi, a \sim \pi_\theta} [r(s, a)] \quad (7)$$

$$\nabla_\theta J(\pi_\theta) = \int_{S_s}^{\rho^s} \rho^\pi(s) \int_{A_s}^{\rho^a} \nabla_\theta \pi_\theta(s, a) Q^\pi(s, a) da ds = E_{s \sim \rho^\pi, a \sim \pi_\theta} [\nabla_\theta \log \pi_\theta(a | s) Q^\pi(s, a)] \quad (8)$$

其中, Policy Gradient 采取随机性策略, 所以需要对最优策略的概率分布进行采样以获得当前动作, 且迭代过程中的每一步都要对整个动作空间积分, 造成庞大的计算量^[12]。改进的 DDPG 算法在 PG 的基础上采取了确定性策略, 根据行为直接通过函数 μ 确定动作, μ 为最优行为策略 $a_t = \mu(s_t | \theta^\mu)$ 。则量化的输出功率自动最优预测与蓄电池储能功率

自主精确调节机制可以表征如下:

$$J(\mu_\theta) = \int_{S_s}^{\rho^s} \rho^\mu(s) r(s, \mu_\theta(s)) ds = E_{s \sim \rho^\mu} [r(s, \mu_\theta(s))] \quad (9)$$

考虑在竞争环境下式(9)表征方式的不稳定性, 对式(9)进行一阶求导处理, 则确定性策略(Deterministic Policy, DP)梯度可进一步表示为

$$\nabla_\theta J(\mu_\theta) = \int_{S_s}^{\rho^s} \rho^\mu(s) \nabla_\theta \mu_\theta(s) Q^\mu(s, a) |_{a=\mu_\theta} ds = E_{s \sim \rho^\mu} [\nabla_\theta \mu_\theta(s) Q^\mu(s, a) |_{a=\mu_\theta}] \quad (10)$$

该 DP 具有很强的兼容性, 可以通过自我学习实现异构光伏发电网的输出功率自动最优预测与蓄电池储能功率自主精确调节机制。

2.3 模型典型环境下的仿真验证

为了验证基于改进的 DDPG 算法的光伏发电功率预测模型的实际工作效能, 分析光伏发电网电力线路参数信息共享的全局最优协同控制机制、光伏发电网输出功率自动最优预测与蓄电池储能功率自主精确调节的实际协同效能, 基于谷歌的 Tensorflow 1.2.1 和 OpenAI 的 Gym 0.9.2 环境开发验证环境并对模型进行数据训练分析。

设定初始化训练参数如表 1, 信息工程奖励值的绝对值限制在 $[-1, 1]$ 内, 因为负回报是稀疏的, 因此将标准动作奖励值设定为 -1 , 参数的选取参考实际工程要求^[13], 确保在模型训练的后期仍然具有较强的进化活力, 引导训练进化向更优的方向发展。

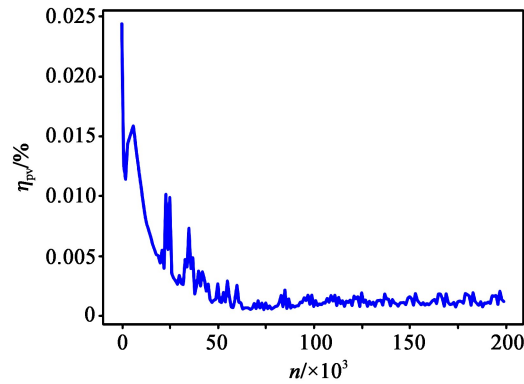
设定三组不同训练参数, 从典型环境下预测模型误差率性能仿真、典型环境下的输出功率自动最优预测与蓄电池储能功率自主精确调节精确度性能仿真等多维度对算法进行了仿真验证。为不失一般性, 采用标准随机数据集来验证模型的多维效能, 同时引入本课题选题项目所在地四川省泸州市 2018~2019 年度辐射照度数据作为训练预测数据。采用显著差异标识在仿真图中给出对比结果, 最终三轮训练仿真结果如图 4~6 所示。图中横坐标 n 表示模型训练迭代次数, 纵坐标 η_{pv} 和 P_{pvo} 分别表示预测误差率和光伏输出功率。

仿真结果表明, 在不同初始化训练网络、折扣因子取值及迭代次数下, 模拟训练的光伏发电功率预测值曲线和功率实际值曲线最终都拟合较好, 验证了模型对于不同应用场合的适应性和稳定性, 初步实现了异构光伏发电网全寿命周期工作状态的全景预测。仿真结果证明模型具有较好的收敛性, 规避

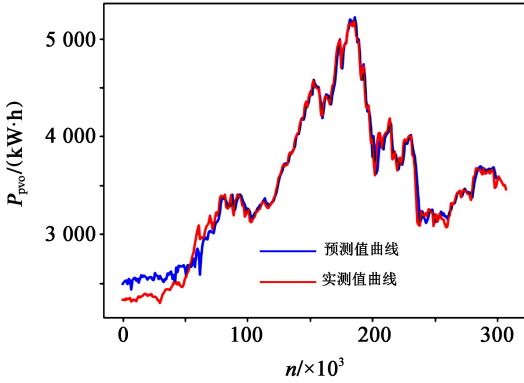
了前文所述传统仿生算法的弊端。在模型自主性、预测拟合性、全局最优、储能调节自主决策等方面具有明显优势。

表 1 模型训练参数

参数	数值
发电网参数样本容量	N
初始化网络输入值	$128 \times 256 \times 8$
折扣因子 γ	0.9
学习率 α	0.001
标准动作奖励值	-1

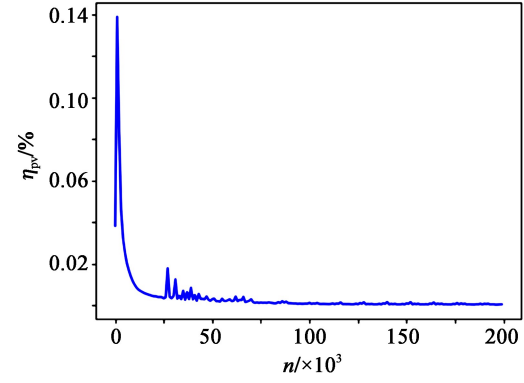


(a) 预测误差曲线

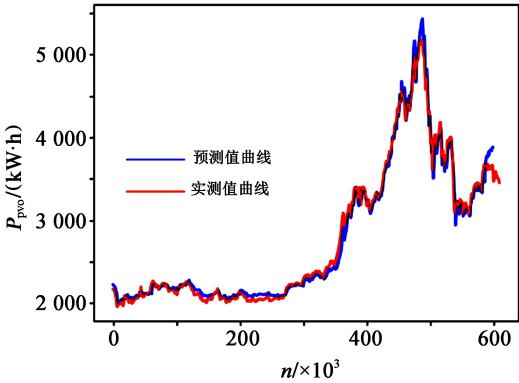


(b) 预测值与实测值曲线对比

图 4 光伏发电功率模型性能检测第一轮仿真图

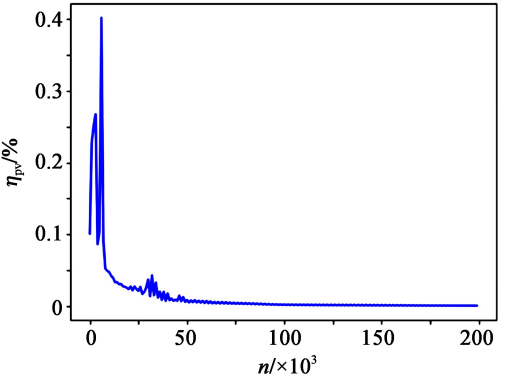


(a) 预测误差曲线

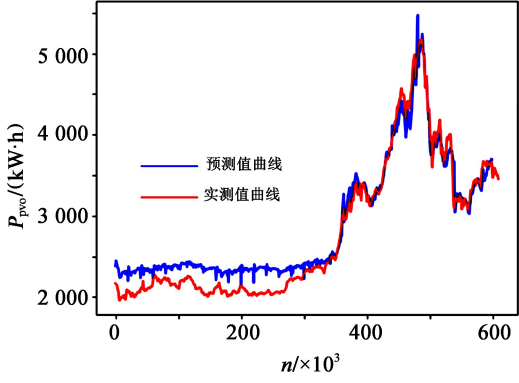


(b) 预测值与实测值曲线对比

图 5 光伏发电功率模型性能检测第二轮仿真图



(a) 预测误差曲线



(b) 预测值与实测值曲线对比

图 6 光伏发电功率模型性能检测第三轮仿真图

3 模型工程化应用效能验证

为验证上述光伏发电网输出功率自动最优预测与蓄电池储能功率自主精确调节系统在一线运维环境下的实际效能,结合项目所在地情况,以四川省泸州市纳溪区某示范性光伏发电网分立发电单元为例进行模型应用效能验证。该发电网络工作结构图如图 7 所示,忽略光伏发电网的蕴含谐波,太阳能电池组件是实现能量转换的主设备,为整个发电网数据流向的源点,逻辑图中包含控制器,是预测模型的硬件

运行载体,输出功率交互间隔为 0.1 s,持续时间为一周。为了简化计算,设定输出功率参数、储能功率参数序列长度均为 $T=64$,采用前段子时间序列作为参数计算段,后段子时间序列作为校验计算段,确保预测结果具有可信度。

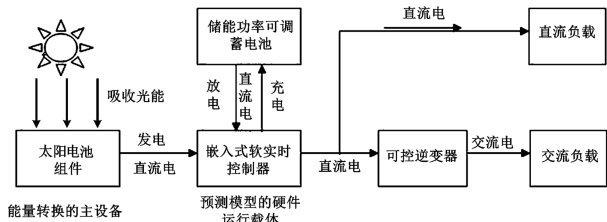


图 7 泸州市某示范性异构光伏发电网发电单元逻辑示意图

基于图 5 给出的某示范性异构光伏发电网发电单元控制数据流逻辑走向,选用 13 MW 的太阳能电池组件。分别设置 2019-06-01 至 2019-07-01,2019-09-01 至 2019-10-01,2019-11-25 至 2019-12-25 三个数据采集组,连续周期性分别采集三个数据采集时间段共 90 天的天气状态、输出功率、储能功率等数据,其中,每个数据采集组的前 20 天数据作为模型学习训练数据,后 10 天数据作为预测对照数据。考虑到光伏发电系统对天气状态敏感,分别进行晴朗(光照大于 8 000 lux)、阴天(光照小于 5 000 lux)、下雨(光照小于 2 000 lux)、下雪天气(光照小于 1 000 lux)状态下的中短期光伏发电功率预测效能分析,选取光伏发电出力波动预测有效率、光伏发电输出功率预测有效率、储能电池储能功率预测有效率等多维度对预测模型进行整体工程应用效能分析,具体如表 2 所示。通过表 2,可以从定性和定量两个层面分析得出,文章所提基于改进 DDPG 算法的中短期光伏发电功率预测模型可以在较短的时间内有效处理光伏发电功率预测精确建模问题,在模型有效性、预测拟合性、中短期适应性、数据建模精确性等方面具有明显优势。

表 2 光伏发电功率预测模型工程化应用效能表(单位:%)

天气	晴朗	阴天	下雨	下雪
短期	出力波动	87.11	91.24	85.73
	输出功率	89.51	90.21	92.19
	储能功率	88.98	83.51	85.43
中期	出力波动	81.53	81.53	78.29
	输出功率	81.53	75.55	74.93
	储能功率	69.73	80.19	70.53

4 结论

针对传统的仿生智能算法不能很好地适应高维

动态系统的预测建模,无法满足高维动态系统对自主感知与决策属性需求的问题,提出了一种基于 DDPG 算法的中短期光伏发电功率预测模型。在构建多智能体机制的同时构建了具有社会属性的、面向光伏发电系统发电过程参数信息共享的全局最优协同控制体系,引入 DDPG 算法对蓄电池功率自主调节策略进行优化。基于 Tensorflow 开源框架,多维度地对算法进行了仿真验证。以某示范性光伏发电网为工程应用案例,开发对应的原型系统并对模型综合效能进行了实证分析。一线运维验证结果表明,原型系统在模型自主性、预测拟合性、全局最优、储能调节自主决策等方面具有明显优势。

参考文献:

[1] Pierro M, Bucci F, De Felice M, et al. Multi-model ensemble for day ahead prediction of photovoltaic power generation[J]. Solar Energy, 2016, 134(4): 132-146.

[2] 朱文立, 张 利, 杨 明, 等. 考虑日周期性影响的光伏功率爬坡事件非精确概率预测[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(20): 31-40.

Zhu Wenli, Zhang Li, Yang Ming, et al. Imprecise probabilistic prediction of photovoltaic power ramp event considering daily periodic effect[J]. Automation of Electronic Power System, 2019, 43(20): 31-40.

[3] Cheng K, Guo L M, Wang Y K, et al. Application of clustering analysis in the prediction of photovoltaic power generation based on neural network[J]. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2017, 93(6): 120-124.

[4] 孙志强, 李东阳. 基于时频熵和神经网络的光伏发电功率预测模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(1): 221-230.

Sun Zhiqiang, Li Dongyang. Prediction model of photovoltaic power generation based on time-frequency entropy and neural network[J]. J. of Central South University (Natural Science Edi.), 2020, 51(1): 221-230.

[5] 代 倩, 段善旭, 蔡 涛, 等. 基于天气类型聚类识别的光伏系统短期无辐照度发电预测模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 28-35.

Dai Qian, Duan Shanxu, Cai Tao, et al. Short-term PV generation system forecasting model without irradiation based on weather type clustering[J]. Proc. of the CSEE, 2011, 31(34): 28-35.

[6] 阳 霜, 罗滇生, 何洪英, 等. 基于 EMD-LSSVM 的光伏发电系统功率预测方法研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(6): 1387-1395.

Yang Shuang, Luo Diansheng, He Hongying, et al. Output power forecast of PV power system based on EMD-LSSVM model[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2016, 37(6): 1387-1395.

[7] 王继东,冉冉,宋智林. 基于改进深度受限玻尔兹曼机算法的光伏发电短期功率概率预测[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 43-49.

Wang Jidong, Ran Ran, Song Zhilin. Probability forecast of short-term photovoltaic power generation based on improved depth restricted Boltzmann machine algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 43-49.

[8] Mashud Rana, Ashfaqur Rahman. Multiple steps ahead solar photovoltaic power forecasting based on univariate machine learning models and data re-sampling[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2020, 28(3): 21-26.

[9] 王育飞,付玉超,薛花. 计及太阳辐射和混沌特征提取的光伏发电功率 DMCS-WNN 预测法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(S1): 63-71.

Wang Yufei, Fu Yuchao, Xue Hua. DMCS-WNN prediction method of photovoltaic power generation by considering solar radiation and chaotic feature extraction[J]. Proc. of the CSEE, 2019, 39(S1): 63-71.

[10] Cheng Gang, Song Shaojian, Lin Yuzhang, et al. Enhanced state estimation and bad data identification in active power distribution networks using photovoltaic power forecasting[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 42(10): 177-183.

[11] Gao Mingming, Li Jianjing, Feng Hong, et al. Day-ahead power forecasting in a large-scale photovoltaic plant based on weather classification using LSTM[J]. Energy, 2019, 18

(8): 187-193.

[12] 崔杨,陈正洪,孙朋杰. 弃光限电条件下不同纬度地区短期光伏发电功率预测对比分析[J]. 太阳能学报, 2018, 39(6): 1610-1618.

Cui Yang, Chen Zhenghong, Sun Pengjie. Comparison and analysis of short-term photovoltaic power generation power forecast in different latitudes under the condition of optical abandoning and power limiting [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2018, 39(6): 1610-1618.

[13] 李燕青,杜莹莹. 基于最优相似度与 IMEA-RBFNN 的短期光伏发电功率预测[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2018, 45(5): 29-35, 61.

Li Yanqing, Du Yingying. Short-term photovoltaic power forecasting based on optimal similarity and radial basis function neural networks optimized by improved mind evolutionary algorithm[J]. J. of North China Electric Power University (Natural Science Edi.), 2018, 45(5): 29-35, 61.

作者简介:

苏诗慧(1994—),女,内蒙古包头人,硕士研究生,主要从事新能源系统及储能技术在电网中的应用研究;

雷勇(1966—),男,博士,教授,硕导,从事现代电子技术、低温超导技术等方面的研究。

Engineering J., 2010, 160(1): 284-292.

[13] Guet S, Fortunati R V, Mudde R F, et al. Bubble velocity and size measurement with a four-point optical fiber probe [J]. Particle & Particle Systems Characterization, 2003, 20(3): 219-230.

[14] 康静. 油井井下阵列光纤探针传感器结构优化技术研究[D]. 济南: 燕山大学, 2014.

Kang J. Research on structure optimization of array optical fiber probe sensor in oil well[D]. Ji'nan: Yanshan University, 2014.

[15] 王炎. 油气水三相流蓝宝石光纤探针传感器持气率测量技术研究[D]. 济南: 燕山大学, 2013.

Wang Y. Research on gas holdup measurement of oil-gas-water three-phase flow based on sapphire optical fiber probe sensor [D]. Ji'nan: Yanshan University, 2013.

[16] 杭天渊,刘凤,王晓蕾,等. 蓝宝石光纤探针传感器探针研制工艺及传光测试[J]. 光学与光电技术, 2017, 15(4): 26-32.

Hang T Y, Liu F, Wang X L, et al. Probe preparation technology of sapphire fiber probe sensor and light transmitting test[J]. Opt. & Optoelect. Technol., 2017, 15(4): 26-32.

作者简介:

姜劭栋(1986—),男,山东栖霞人,博士,助理研究员,主要从事光纤传感器及其应用研究。

(上接第 675 页)

[7] 姜劭栋,张发祥,李淑娟,等. 光纤光栅应变传感系统在船舶结构监测中的应用[J]. 半导体光电, 2017, 38(2): 268-270.

Jiang S D, Zhang F X, Li S J, et al. Application of FBG strain sensing system in ship structure monitoring[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(2):268-270.

[8] Moujaes S. Testing of a spherical dual-tipped optical fiber probe for local measurements of void fraction and gas velocity in two-phase flows [J]. Canadian J. of Chemical Engin., 1990, 68(3): 504-510.

[9] Jii V, Vee M, Orvalho S, et al. Measurement accuracy of a mono-fiber optical probe in a bubbly flow[J]. Inter. J. of Multiphase Flow, 2010, 36(7): 533-548.

[10] Yamada M, Saito T. A newly developed photoelectric optical fiber probe for simultaneous measurements of a CO₂ bubble chord length, velocity and void fraction and the local CO₂ concentration in the surrounding liquid [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2012, 27: 8-19.

[11] Chaumat H, Billetduquenne A M, Augier F, et al. On the reliability of an optical fibre probe in bubble column under industrial relevant operating conditions [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2007, 31(6): 495-504.

[12] Higuchi M, Saito T. Quantitative characterizations of long-period fluctuations in a large-diameter bubble column based on point-wise void fraction measurements [J]. Chemical

基于任意场景的 CCD 相机电子学增益测试方法研究

胡明鹏^{1*}, 成俊舟^{1,2}, 任王涛^{1,2}, 熊锐^{1,2}

(1. 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在分析 CCD 相机噪声特性的基础上,设计了一种用于 CCD 相机电子学增益测试的新方法。该方法采用任意场景作为测试背景,通过改进算法推导了图像信号 S_{DN} 和图像噪声 σ_{DN} 之间的线性关系,从而解算出相机的电子学增益。与传统方法采用积分球或 EMVA1288 标准要求的均匀光源相比,该方法具有操作简便、经济性高的特点。与原有算法进行对比实验,结果表明,该方法能够较精确地对 CCD 相机电子学增益进行测试,测试重复性高,且有效可靠。

关键词: 电子学增益; CCD 相机; 噪声; 均匀光源; 测试

中图分类号: TN386.5 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0724-05

Test Methods of CCD Cameras' Electronic Gain Based on Arbitrary Scene

HU Mingpeng¹, CHENG Junzhou^{1,2}, REN Wangtao^{1,2}, XIONG Rui^{1,2}

(1. Institute of Optics and Electronics of the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: Based on analyzing the noise properties of CCD camera, a new method was proposed for testing its electronic gain. Applying arbitrary scene, the linear relationship between the image signal S_{DN} and the image noise σ_{DN} was deduced with an improved algorithm, and the electronic gain of the CCD camera was calculated. Different from the traditional methods which apply integrating sphere or uniform light source required by EMVA 1288 standard, the new method presents the characteristics of simple operation and high economy. Comparison experiments were performed between the traditional and the proposed methods, and the results indicate that, the new method can test the electronic gain of CCD cameras precisely and effectively with a high repeatability.

Key words: electronic gain; CCD camera; noise; uniform light source; test

0 引言

电子学增益是 CCD 相机的核心指标之一,是 CCD 芯片及其成像系统研制的重要辅助手段和设计依据,对其进行科学、准确的测试至关重要。在设计各种以 CCD 为成像器件的光学仪器时,必须选用和测定所选取 CCD 的性能指标,然而在测定 CCD 性能指标时通常得到的是其输出的数字图像,该值与系统的增益、偏置、积分时间等均有关系,不具备

通用性,因此需要建立数字图像与电子数之间的对应关系,该转换系数即电子学增益 $K^{[1-2]}$ (单位为 DN/e^-)。另外,在众多相机研制厂商的产品资料中,往往只给出相机的量子效率曲线,并不包含电子学增益的测试数据。同时,相机位数不同其电子学增益测试结果亦不同,会给相机研制的理论计算与设计带来很大的麻烦,不利于 CCD 相机的选型和光学仪器的成像性能设计。

在电子学增益测试问题上,国内外均进行了大量的研究工作,测试装置通常选取高均匀的积分球光源作为测试背景,有两种实现方式:一种是将积分球作为均匀的面光源,测试时直接将 CCD 探测面靠

收稿日期:2020-05-27.

基金项目:国家重点研发计划专项项目(2016YFB0500200).

* 通信作者:胡明鹏

E-mail: hmp@ioe.ac.cn

近积分球的出口,从而对电子学增益进行测试^[1],但是这种方式往往会使积分球出口的朗伯发射光打在 CCD 的筒壁之上,经过反射后再打在 CCD 靶面之上,这样造成的杂光会影响测试精度;为了改进这种方式,欧洲机器视觉协会制定的 EMVA1288 标准推荐了另一种照明方式^[3],即 CCD 距离均匀光源的距离与开口尺寸保持一定的距离口径之比,仿真表明此方法既保证了 CCD 靶面处能够保持高均匀性,又减小了杂光的影响。

本文在分析探测器噪声源的基础上提出一种新的 CCD 电子学增益测试方法,该方法不需要特殊和昂贵的测试装置,CCD 系统选择任意一幅静态场景对其成像,即可解算电子学增益;另外,该方法不仅适用于不含镜头的 CCD,而且在 CCD 已安装镜头后仍然可以对其电子学增益进行测试。

1 电子学增益测试原理

1.1 噪声模型

CCD 探测器对信号的响应及噪声产生的过程^[4]如图 1 所示。一定数量的光子流经过探测器时,由光电效应转换为一定数量的光电子,在此过程中会引入光子散粒噪声 σ_{SHOT} ,暗信号 μ_{D} 及暗噪声 σ_{DSHOT} ^[5-6]。以上信号及噪声再经过系统增益的相乘作用,经过电子系统的放大、模数转换等最终生成数字信号,在此过程会引入读出噪声 σ_{READ} 。读出噪声又分为量化噪声、复位噪声、放大器噪声等。如果考虑面阵 CCD,还会引入光固定图形噪声 σ_{FPFN} 和暗固定图形噪声 σ_{DFPN} 。

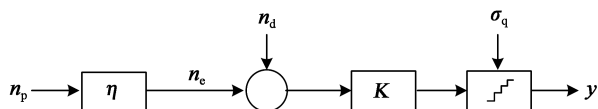


图 1 CCD 探测器响应及噪声产生示意图

其中的时间噪声主要有 σ_{SHOT} 、 σ_{DSHOT} 、 σ_{READ} ，而空间噪声主要有 σ_{FPFN} 和 σ_{DFPN} 。

总噪声^[7]可以用式(1)表示：

$$\sigma_{\text{TOTAL}} = \sqrt{\sigma_{\text{SHOT}}^2 + \sigma_{\text{FPFN}}^2 + \sigma_{\text{DFPN}}^2 + \sigma_{\text{READ}}^2 + \sigma_{\text{DSHOT}}^2} \quad (1)$$

1.2 光子散粒噪声

CCD 的探测靶面吸收入射在其表面的光子流并产生电荷的过程可以认为是一个随机过程,即在相同的照明和 CCD 参数设置条件下,各像元吸收光子并产生光电子并不是一个稳定的过程,而是围绕

一个均值上下波动。从量子力学理论出发,光子散粒噪声应服从玻色-爱因斯坦分布,其表达如式(2)所示^[8], $\sigma_{\text{SHOT}}(N_{e-})$ 为光子散粒噪声, N_{e-} 为光电子数, h 为普朗克常量, λ 为入射光波长, k 为玻尔兹曼常量, c 为光速, T 为绝对温度。

$$\sigma_{\text{SHOT}}(N_{e-})^2 = N_{e-} \cdot \frac{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (2)$$

当 $\lambda < 1 \mu\text{m}$ 时,可认为 $hc/\lambda \gg kT$,即可以推出式(3):

$$\sigma_{\text{SHOT}}^2 = N_{e-} \quad (3)$$

即由光子产生的散粒噪声的均方差值 σ_{SHOT}^2 与光电子数 N_{e-} 相等,当散粒噪声和光电子由电子单位变为数字单位时,式(3)两端同时乘以电子学增益 K ,则可以推导得到式(4):

$$K = DN_{\text{噪声均方差}} / DN_{\text{灰度平均}} \quad (4)$$

2 测试方法

2.1 传统测试方法

在对式(4)进行 K 值求解时,传统的方式一般是将 CCD 放置于均匀光源前进行测试^[1,9-10]。测试系统的硬件组成如图 2 所示,包括照度可调的均匀光源、光源控制器、图像采集卡、数据处理计算机等四部分。照度可调的均匀光源为待测 CCD 提供输入光信号,一般采用积分球;光源控制器用于实时调整积分球的输出照度;图像采集卡用于采集待测 CCD 相机输出的图像数据;数据处理计算机用于控制光源控制器、调整积分球输出照度、采集待测 CCD 图像、运行测试算法、完成增益测试等功能。

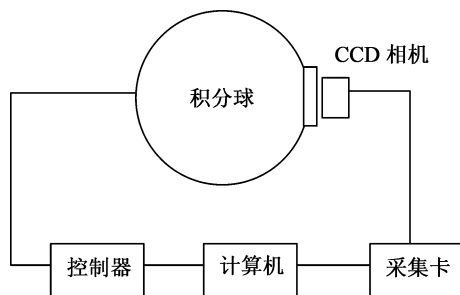


图 2 传统测试系统硬件组成

采用上述硬件进行 CCD 电子学增益测试时,首先将积分球设置为某一亮度,设置 CCD 积分时间 t_1 至不饱和,连续采集两帧图像 S_1 和 S_2 ;然后 CCD 设置积分时间 t_2 至不饱和,连续采集另外两帧图像 S_3 和 S_4 ,最后按照式(5),(6)计算噪声均方差之差

$\Delta\sigma_{\text{噪声}}$ 和均值差 $\Delta\mu_{\text{均值}}$ 。

$$\Delta\sigma_{\text{噪声}} = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{i=M, j=N} (S_1(i, j) - S_2(i, j))^2}{2N} \tag{5}$$

$$\Delta\mu_{\text{均值}} = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{i=M, j=N} S_1(i, j) - \sum S_2(i, j)}{N} \tag{6}$$

这样就可以求出 CCD 相机的电子学增益 $K = \Delta\mu_{\text{均值}} / \Delta\sigma_{\text{噪声}}$ 。当然,为了更好地避免单点测试误差带来的影响,也可以采集多个曝光时间,拟合出 $\sigma_{\text{噪声}}$ 和 $\mu_{\text{均值}}$ 曲线,曲线的斜率即为电子学增益 K 值。

2.2 本文测试方法

传统的测试方法均以均匀光源为基础,式(5)~(6)中,噪声和均值的测试都在一定程度上引入了由于光源不均匀性带来的影响。进行噪声统计的前提是认为 CCD 整个靶面的响应特性近似相同,采用对全靶面像元做统计而得到的均方差,此时若 CCD 靶面像元之间响应率相差比较大,则测试结果也将变得不准确。此外传统的测试方法对均匀光源、测试环境要求都比较高,经济性较差。

针对以上问题,本文提出一种新的测试方法。如果 CCD 探测器响应的目标光强不是均匀光而是任意场景,对 CCD 靶面上的每个像元在时间维度上单独统计计算散粒噪声和响应,这样不仅能够彻底消除由场景不均匀性带来的影响,也可消除由像元和像元响应不均匀性带来的影响,甚至包含镜头的 CCD 也可以用此方法进行测试。具体做法如下:

1)将 CCD 探测器(可包含成像镜头)对任意一幅场景成像,设置系统的曝光时间 t_1 ,此时对要选择的场景响应做灰度统计,让所有的像元响应都在线性区间范围之内,连续采集系统的输出图像 T 帧,记为 $S_1(M, N, T)$;

2)设置系统的曝光时间 t_2 ,对要选择的场景响应做灰度统计,让所有的像元响应都在线性区间范围之内,采集系统的输出图像 $S_2(M, N, T)$;

3)对 $S_1(M, N, T)$ 做以下运算,统计出每个像元的平均值 $DN_{\text{均值}}$:

$$DN_{\text{均值}}(i, j) = \frac{\sum_{k=1}^T S_1(i, j, k)}{T} \tag{7}$$

4)对 $S_1(M, N, T)$ 和 $S_2(M, N, T)$ 做以下运算对 $S_1(M, N, T)$ 做以下运算,统计出每个像元的

噪声均方差 $DN_{\text{均方差}}$:

$$DN_{\text{均方差}}(i, j) = \frac{\sum_{k=1}^T (S_1(i, j, k) - DN_{\text{均值}}(i, j))^2}{T} \tag{8}$$

5)这样可以得到每个像元的电子学增益值:

$$K(i, j) = \frac{DN_{\text{均方差}}(i, j)}{DN_{\text{均值}}(i, j)} \tag{9}$$

6)为了更好地避免单点测试误差带来的影响,也可以采集多个曝光时间,拟合出 $\sigma_{\text{噪声}}$ 和 $\mu_{\text{均值}}$ 曲线,曲线的斜率即为电子学增益 K 值。

3 实验对比

分别采用传统方式和改进方式对同一个 CCD 相机(型号 Pointgray GS3-U3-14S5M-C)的电子学增益进行测试,相机的基本参数如表 1 所示。

表 1 CCD 成像系统参数

类别	参数	指标
光学系统	有效口径/mm	15
	光阑	可调,调至最大
	焦距/mm	25
	成像距离	可调
相机系统	分辨率	1 384×1 036
	帧频/Hz	30
	像素大小/ μm	6.45
	光谱范围/nm	400~700
	位数	可变,设置为 8 位
	曝光时间/ms	0.03~33

测试对比两种测试方法包含 3 种处理状态,即不含镜头采用传统方式测试记为处理 1,不含镜头采用改进方式测试记为处理 2,含镜头采用改进方

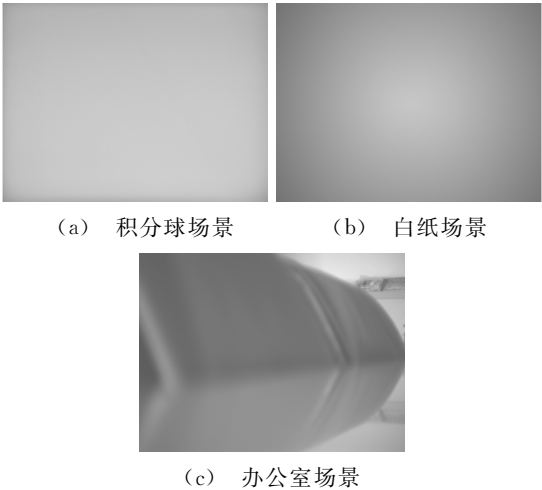


图 3 三种处理场景实验图

式测试记为处理 3。其中处理 1 面对的场景为积分球出口处,处理 2 面对的场景为白纸,处理 3 面对的场景是办公室某一场景,为了不让场景中某些反光过强处导致 CCD 饱和,对处理 3 中的镜头做了一定的离焦。3 种处理的原始图像如图 3 所示。

处理 1 采用了全像素统计的结果,通过多积分时间拟合的方式进行测试,测试结果如图 4 所示,其中纵坐标为图像均值,横坐标为均方差值,单位均为 DN,该曲线的斜率即为电子学增益 K 。

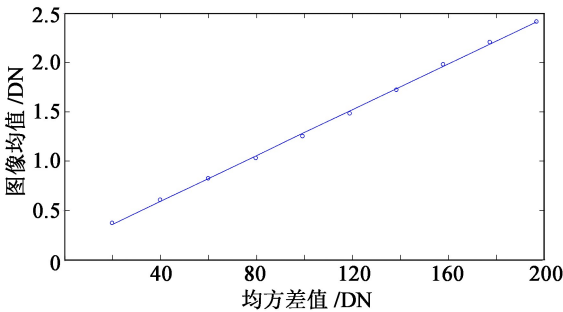
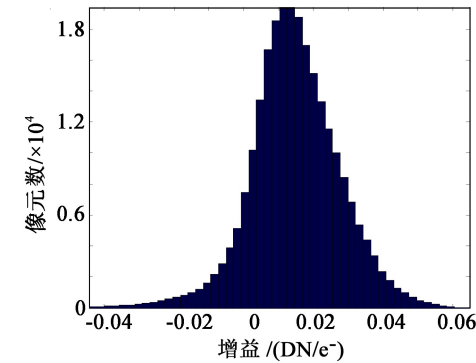
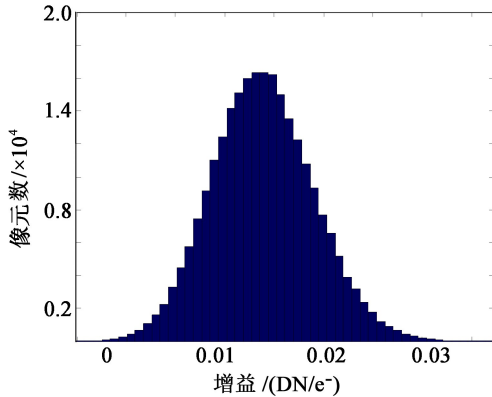


图 4 处理 1 的信号与噪声均方差关系曲线

处理 2 和处理 3 采用的是改进算法,通过多帧对应像元统计的方式进行处理,可以分别得到每个像元的电子学增益,如图 5 所示。



(a) 处理 2 中各像素对应增益统计



(b) 处理 3 中各像素对应增益统计

图 5 处理 2 和处理 3 的增益测试结果示意图

将处理 2 和处理 3 中各像素位置点做平均即可得到平均电子学增益,3 种处理方式得到的最终测试结果分别为 $0.015\ 1\ \text{DN}/\text{e}^-$, $0.015\ 0\ \text{DN}/\text{e}^-$ 和 $0.014\ 7\ \text{DN}/\text{e}^-$,这表明 3 种处理方式的测试结果比较吻合。

4 结论

采用改进算法对采用任意场景作为目标的 CCD 相机电子学增益进行测试,结果表明该方法测试准确、可靠,对设备的依赖程度不高,并且能够一次性地将全靶面每一个像素的电子学增益测试出来,对 CCD 相机筛选有重要的指导意义。在测试过程中有以下几点需要注意:

- 1)本测试方法对场景要求不高,但对场景光强分布有一定要求,即不超出相机的动态范围;
- 2)对环境光强变化有一定要求,即在测试过程中环境光强不要出现较大的变化,否则也会影响测试结果。

该方法已应用于航空、航天相机电子学增益指标测试。

参考文献:

[1] 李载峰,李俊霖,兰太吉. CCD 相机电子学增益测试方法研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(12): 49-52.
Li Zaifeng, Li Junlin, Lan Taiji. Research of the CCD camera's electronics gain test method [J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(12): 49-52.

[2] 卢家莉,李彬华,胡泊. 一种电子倍增 CCD 电子倍增增益的确定方法[J]. 兵工学报, 2015, 36(4): 710-715.
Lu Jiali, Li Binhua, Hu Po. A method of determining EMCCD electron multiplication gain[J]. Acta Armamentar II, 2015, 36(4): 710-715.

[3] European Machine Vision Association. EMVA1288 Release 3.0, Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras[S]. www.emva.org: 2019.

[4] 李洪博,刘云清,宋延嵩,等. CMOS 相机光电参数的测试方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 1-6.
Li Hongbo, Liu Yunqing, Song Yansong, et al. Test method of optoelectronic parameters of CMOS camera[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 1-6.

[5] Laitinen J, Ailisto H J. Experimental evaluation of CCD and CMOS cameras in low-light-level conditions[C]// Proc. of Industrial Lasers and Inspection (EUROPTO Series). of Inter. Society for Optics and Photonics, 1999: 60-65.

[6] 李云飞,李敏杰,司国良,等. TDICCD 图像传感器的噪声分析与处理[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1196-1201.
Li Yunfei, Li Minjie, Si Guoliang, et al. Noise analyzing and

processing of TDI-CCD image sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(8): 1196-1201.

[7] 万 志, 任建伟, 李宪圣, 等. 基于辐射传输模型的 TDI CCD 遥感相机信噪比分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 497-500.

Wan Zhi, Ren Jianwei, Li Xiansheng, et al. Analysis of signal-to-noise ratio for remote sensing TDI CCD camera based on radiative transfer model[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(3): 497-500.

[8] 李俊霖. 航天遥感相机成像电子学系统评测技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.

Li Junlin. Research on the measurement technology of remote sensing camera electronics system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, 2016.

=====

(上接第 666 页)

[2] 李 博, 唐玉春. 大容量无源光网络关键技术[J]. 光通信技术, 2019(10): 32-35.

Li Bo, Tang Yuchun. Key technologies of large capacity passive optical network[J]. Optical Commun. Technol., 2019(10): 32-35.

[3] Tahirramani N, Bhatt N. Proposed modifications in ITU-T G. 729 8 kbps CS-ACELP speech code and its overall performance analysis[J]. Inter. J. of Speech Technol., 2017, 20(3): 1-14.

[4] Xiong Y, Jiang J, Zhang Z, et al. Hybrid resource scheduling algorithm with traffic differentiation in TWDM-PON[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(6): 1490-1497.

[5] Tarsono D, Ahmad A, Sharif K A, et al. Optical and network performance analysis of XGS-PON system over active co-existence PON systems[J]. Optics & Photonics J., 2017, 7(8): 40-48.

[6] Mondal W U, Roy D, Dutta S, et al. Economic analysis of TWDM PONs: A sustainability and policy-making perspective [J]. IEEE/OSA J. of Optical Commun. & Networking, 2019, 11(3): 79-94.

[7] 李庆玲, 郑 义, 李祚涵, 等. 光栅型可调谐掺铥连续光纤激光器研究进展[J]. 半导体光电, 2017, 38(4): 465-471.

Li Qingling, Zheng Yi, Li Zuohan, et al. Research progress on tunable thulium-doped continuous wave fiber laser using gratings[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(4): 465-471.

[8] 刘 婷, 何荣希. LR-PON 中改进的节能动态带宽分配算法 [J]. 半导体光电, 2016, 37(6): 863-868.

[9] 孙景旭, 刘则洵, 万 志, 等. CCD 成像电子学单元光电参量测试系统[J]. 应用光学, 2013, 34(2): 289-293.

Sun Jingxu, Liu Zexun, Wan Zhi, et al. Photoelectric parameters testing system for CCD imaging electronics unit[J]. J. of Appl. Opt., 2013, 34(2): 289-293.

[10] 赫英威, 李 平, 吴厚平, 等. 积分球辐射光源照度均匀性研究[J]. 应用光学, 2012, 33(3): 548-553.

He Yingwei, Li Ping, Wu Houping, et al. Output irradiance uniformity of integrating sphere source[J]. J. of Appl. Optics, 2012, 33(3): 548-553.

作者简介:

胡明鹏(1982—),男,硕士,高级工程师,主要从事光学系统像质测试与评价、辐射定标、相机测试与评价等方面的研究。

Liu Ting, He Rongxi. Improved energy-efficient dynamic bandwidth allocation algorithm for long-reach passive optical networks[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(6): 863-868.

[9] 胡西学, 郭宏博, 宫宁强, 等. 一种简单的光-电关联方法[J]. 电子显微学报, 2019, 38(4): 403-407.

Hu Xixue, Guo Hongbo, Gong Ningqiang, et al. A simple method of correlative light and electron microscopy[J]. J. of Chinese Electron Microscopy Society, 2019, 38(4): 403-407.

[10] 何祖源, 刘银萍, 马 麟, 等. 小芯径多模光纤拉曼分布式温度传感器[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(4): 285-291.

He Zuyuan, Liu Yinping, Ma Lin, et al. Raman distributed temperature sensor using multimode fiber with reduced core size [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(4): 285-291.

[11] 张永棠. 一种高效率的 1 060 nm 半导体激光器设计[J]. 电子器件, 2018, 41(6): 5-9.

Zhang Yongtang. A high efficiency 1 060 nm semiconductor laser design[J]. Chinese J. of Electron Devices, 2018, 41(6): 5-9.

[12] 周富肯, 张永棠. 一种低阈值波导随机激光器的研制[J]. 光通信技术, 2018, 42(2): 39-41.

Zhou Fuken, Zhang Yongtang. Development of a low threshold waveguide stochastic laser [J]. Optical Communication Technology, 2018, 42(2): 39-41.

作者简介:

张永棠(1981—),男,博士,教授,硕士生导师,研究方向为光通信及网络空间安全技术、网络安全感知。

相位共轭信号在无中继传输系统中的性能研究

陈芳, 刘军, 李伯中, 周鸿喜, 段明雄, 李子凡*

(国家电网有限公司信息通信分公司, 北京 100761)

摘要: 研究了相位共轭信号在长距离无中继传输系统中的抗非线性效应的性能。通过构建相应的仿真系统,对比分析了单偏振信号与相位共轭信号的性能差异。仿真结果表明,对于无中继传输系统,相位共轭信号的色散预补偿与有中继传输系统有所差别。在传输信号为 32-GBaud 的 QPSK、传输距离为 330 km 以及后向泵浦设置为 0.8 W 的情况下,当前向泵浦为 0.4, 0.6 以及 0.8 W 时,相较于单偏振传输信号,相位共轭信号的 BER 性能均可提高 2 dB 以上。此外,相对于单偏振信号,相位共轭信号的传输距离约提升 10%。

关键词: 相干光通信; 相位共轭; 无中继; 拉曼放大; 单模光纤

中图分类号: TN256 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0729-05

Study on the Performance of Phase-conjugated Signal for Unrepeated Transmission System

CHEN Fang, LIU Jun, LI Bozhong, ZHOU Hongxi, DUAN Mingxiong, LI Zifan

(Information and Telecommunication Branch of State Grid, Beijing 100761, CHN)

Abstract: In order to mitigate the problem of strong nonlinear effect in the long-distance unrepeated transmission system, the performance of phase conjugated signals was studied. The performance difference between single polarization and phase conjugated system was analyzed by simulations. Simulation results show that the dispersion pre-compensation of the phase conjugate signals is different from that of the relay transmission system. Compared with the single polarization signal, when the transmission distance is 330 km and the backward pump is set to be 0.8 W, the BER performance of the conjugated signal can be improved by more than 2 dB for 32-GBaud QPSK when the forward pump is 0.4, 0.6 and 0.8 W, respectively. Meanwhile, the transmission distance of the phase conjugated signal is increased by about 10%.

Key words: coherent optical communications; phase-conjugated; unrepeated; Raman amplifier; single mode fiber

0 引言

在如今的信息时代,光纤通信的发展使得通信容量呈指数增长。而对于线性通信链路而言,其理论容量存在所谓的香农极限^[1]。随着光纤传输容量的不断增加,为了获得比较高的信噪比,发送端光信号功率也要求相应的增加。此时,由于光纤的非线性效应所引起的信号失真成为了影响信噪比的一个重要因素,而在无中继传输系统中,随着对传输容量

与距离的要求越来越高,光纤中的非线性作用越来越明显^[2]。因此,为了进一步提高无中继传输系统的性能,必须对系统进行非线性补偿。

前期已有大量关于非线性补偿方法的报道,其中以后向传输算法最为常见^[3-4]。该方法能够准确地还原原始信号,但是复杂度较高,因此对数字信号处理的硬件要求较高。链路中间光信号相位共轭技术也是一种非线性效应补偿的有效方法^[5-6]。但是该方法需要改变现有通信架构,同时完全找到光纤链路的中点并对光信号做相位共轭处理是非常困难的。特别是对于无中继传输系统而言,是无法在链

收稿日期:2020-06-13.

*通信作者:李子凡 E-mail: lizifanchina@bupt.edu.cn

路中间增加有源器件的。贝尔实验室的 Liu 等^[7]提出了一种相位共轭波信号用于抑制非线性效应的方法,其主体思想是在正交的两个偏振态上传输一对相位共轭信号,最后在接收端直接将两路信号相加即可大幅度地抑制非线性效应引起的失真。该方法具有易于实现、算法简单,以及结构可与现有光通信系统相兼容等特点。

本文首先从耦合模非线性薛定谔方程出发,详尽阐述了相位共轭信号在抑制非线性效应中的工作原理;然后,利用仿真软件构建了单偏振态 32-Gbaud QPSK 和偏振复用相位共轭 32-Gbaud QPSK 无中继传输系统;最后,对比分析了两个系统的传输性能。仿真结果表明,在传输误码率性能和传输距离方面,相位共轭信号都优于单偏振信号。

1 相位共轭信号工作原理

偏振复用信号在光纤中传播应满足耦合模非线性薛定谔方程^[8]。一般情况下,假设非线性长度远大于偏振态随机旋转长度。此时,耦合模非线性薛定谔方程可简化为 Manakov 方程:

$$\left[\frac{\partial}{\partial z} + \frac{i}{2} \beta_2(z) \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{\alpha(z) - g(z)}{2} \right] E_{x,y}(z, t) = i \frac{8}{9} \gamma [|E_{x,y}(z, t)|^2 + |E_{y,x}(z, t)|^2] E_{x,y}(z, t) \quad (1)$$

其中, $\beta_2(z)$ 为二阶色散, z 为相对于 0 点的传输距离, t 为时间, $\alpha(z)$ 为 z 点处的损耗, $g(z)$ 为 z 点处的增益, $E_{x,y}(z, t)$ 为 x 和 y 偏振态传输到距离 z 和 t 时刻的电场, γ 为非线性系数。按照微扰理论模型,对方程(1)的解取一阶近似时,可表示如下:

$$E \approx \sqrt{P_0} [(E_{0,x}, E_{0,y})^T + (E_{1,x}, E_{1,y})^T] \quad (2)$$

其中, P_0 为光信号功率,方程右边的 $E_{0,x}$ 与 $E_{0,y}$ 为在没有非线性的情况下方程(1)的归一化电场强度解。而 $E_{1,x}$ 与 $E_{1,y}$ 分别表示一阶近似下的归一化非线性失真项,上标 T 表示转置。结合式(1)和(2)对信号做傅里叶变换,可解得在不考虑非线性的情况下的解:

$$\begin{aligned} \tilde{E}_{0,x}(z, \omega) &= \sqrt{P_0} \tilde{E}_x(0, \omega) \exp \left[\frac{G(z) + iD(z)\omega^2}{2} \right] \\ \tilde{E}_{0,y}(z, \omega) &= \sqrt{P_0} \tilde{E}_y(0, \omega) \exp \left[\frac{G(z) + iD(z)\omega^2}{2} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\tilde{E}_{0,x}(z, \omega)$ 和 $\tilde{E}_{0,y}(z, \omega)$ 分别表示无非线性影

响情况下, x 偏振和 y 偏振态信号传输到 z 点的电场频域信号, ω 为角频率, $G(z) = \int_0^z [g(z') - \alpha(z')] dz'$, $D(z) = \int_0^z \beta_2(z') dz'$ 。将式(2)代入式(1),做傅里叶变换并整理后可得:

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial}{\partial z} + \frac{i}{2} (i\omega)^2 \beta_2(z) + \frac{\alpha(z) - g(z)}{2} \right] \tilde{E}_{1,x/y}(z, \omega) = \\ i \frac{8}{9} \gamma P_0 [\tilde{E}_{0,x/y}(z, \omega) \cdot \tilde{E}_{0,x/y}^*(z, \omega) + \tilde{E}_{0,y/x}(z, \omega) \cdot \\ \tilde{E}_{0,y/x}^*(z, \omega)] \cdot \tilde{E}_{0,x/y}(z, \omega) \end{aligned} \quad (4)$$

假设接收端的功率及信号受色散影响可完全补偿,即 $\int_0^z \beta_2(z') dz' = 0$ 。则根据式(3)和(4)可得到一阶非线性项的表达式:

$$\begin{aligned} \tilde{E}_{1,x/y}(L, \omega) = i \frac{8}{9} \gamma P_0 L_{\text{eff}} \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega_1 \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega_2 \eta(\omega_1 \omega_2) \times \\ [\tilde{E}_{x/y}(0, \omega + \omega_1) \tilde{E}_{x/y}(0, \omega + \omega_2) \tilde{E}_{x/y}^*(0, \omega + \omega_1 + \omega_2) + \\ \tilde{E}_{y/x}(0, \omega + \omega_1) \tilde{E}_{y/x}(0, \omega + \omega_2) \tilde{E}_{y/x}^*(0, \omega + \omega_1 + \omega_2)] \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\tilde{E}_{1,x/y}(L, \omega)$ 为传输距离为 L , x 或 y 偏振态对应的频域一阶非线性量, L_{eff} 为有效非线性长度, $\eta(\omega_1 \omega_2) = \int_0^L \exp(G(z) - iD(z)\omega_1 \omega_2) dz / L_{\text{eff}}$ 。

当在长度为 L 的光纤中,色散成对称分布时,即 $D(z) = -D(L - z)$ 时, $\eta(\omega_1 \omega_2)$ 变为一个纯实数。值得注意的是,在无中继系统中光信号功率在光纤传输过程中不是均匀衰减的。前向泵浦的增益作用使得光信号在靠近发送端部分功率较强,而随着前向泵浦的衰减,超出拉曼(Raman)泵浦有效作用距离后,光信号的衰减与光纤本身衰减有关。因此,在此处对色散进行预补偿时,为了实现最优效果,色散预补偿的长度应以非线性有效作用长度为参考。因此,相较于文献[7]中对色散的处理,本文色散应该满足: $D(z) = -D(L_{\text{eff}} - z)$ 这一关系。根据 $E_{1,y}(L, \omega) = -[E_{1,x}(L, -\omega)]^*$ 和 $E_{1,y}(L, t) = -[E_{1,x}(L, t)]^*$, 以及式(2)和(5)可得相位共轭的非线性补偿满足下式:

$$\begin{aligned} E_x(L, t) + E_y(L, t)^* &= E_x(0, t) + E_{1,x}(L, t) + \\ E_y^*(0, t) + E_{1,y}^*(L, t) &= E_x(0, t) + E_{1,x}(L, t) + \\ E_x(0, t) - E_{1,x}(L, t) &= 2E_x(0, t) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $E_x(L, t)$ 表示 x 偏振态信号传输距离为 L 、时刻 t 的电场。对应地, $E_y(L, t)^*$ 表示 y 偏振态信号传输距离为 L 、时刻 t 的共轭电场。由式(6)可以很明显的看出,一阶非线性失真项得到了很好抑制。理论上分析该方法对非线性有较强的抑制作用,其

相应的示意图如图 1 所示。为了进一步验证该方法在长距离无中继传输系统中的抗非线性的性能,本文通过仿真软件构建了无中继传输系统。同时,对单偏振传输系统也进行了对比研究。

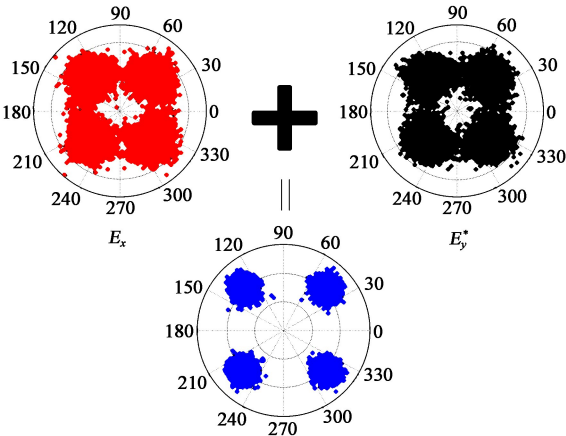
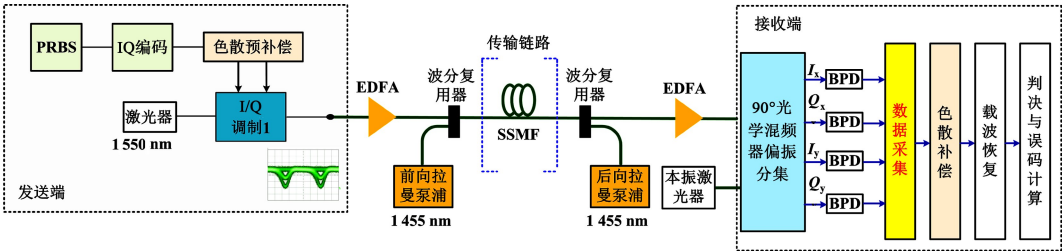


图 1 相位共轭信号非线性补偿示意图

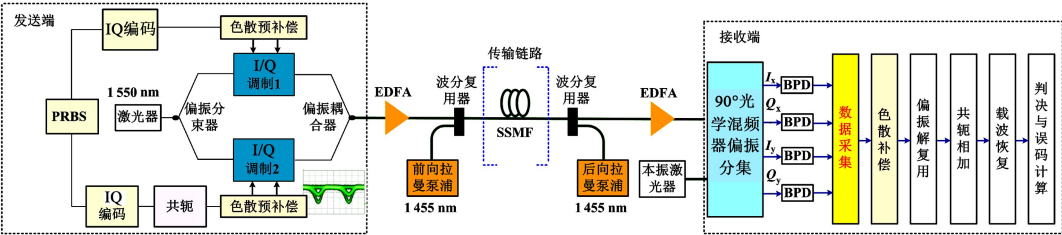
2 系统仿真设置

仿真系统如图 2 所示,其中图 2(a)为单偏振无中继传输系统仿真结构图,图 2(b)为偏振复用相位共轭系统。对比图 2(a)和(b)可看出,在发送端,图 2(a)电信号由伪随机码经过 IQ 编码再做色散预补偿后产生。因为在相位共轭传输系统中,需要对色

散进行 50% 的预补偿,所以,此处为了对比的公正性,在单偏振传输系统中也进行了色散预补偿。与图 2(a)结构相比,图 2(b)为偏振复用系统,但是 IQ 调制器 2 上调制的信号为加载到调制器 1 上的共轭信号。图 2 中两种结构发送端激光器线宽为 100 kHz,中心波长为 1 550 nm,输出功率为 10 dBm。PRBS 速率为 32-GBaud, IQ 编码可将 PRBS 信号编成 mQAM, mPSK 等。在传输链路方面,两种方案保持一致。波分复用后的光信号经过一段色散补偿光纤与掺铒光纤放大器(EDFA)放大后与 1 450 nm 的拉曼泵浦激光源复用在一起注入到光纤链路中。此处的光纤采用 SSMF 参数设置,其损耗为 0.2 dB/km,二阶色散为 16 ps/(nm · km),偏振模色散设置为 0.1 ps/km^{1/2},有效面积为 72 μm²,拉曼峰值增益为 0.72/(W · km)。在光纤的另一端,后向 1 450 nm 拉曼泵浦光源通过一个波分复用器耦合到光纤中。在接收端,光信号经过一个波分解复用器将各波长信号分解出来,经过相干检测后,首先对信号进行采集,之后补偿剩余 50% 的色散。图 2(a)中由于没有偏振复用,所以可直接进行载波恢复,然后做信号判决与误码计算。而对于图 2(b),则需要先进行偏振解复用,然后以式(2)~(3)为参考对两个偏振态信号进行共轭相加。最后,进行载波相位恢复、判决以及误码计算。



(a) 单偏振信号



(b) 偏振复用相位共轭信号

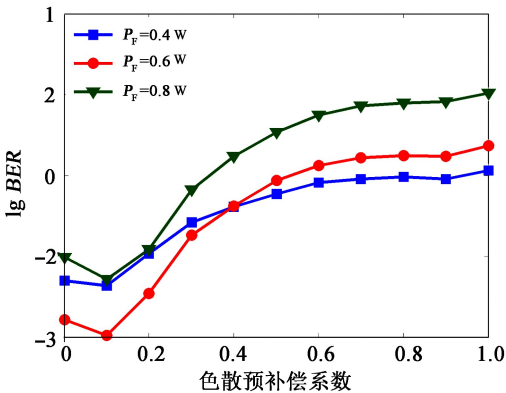
图 2 无中继传输系统结构图

3 结果及讨论

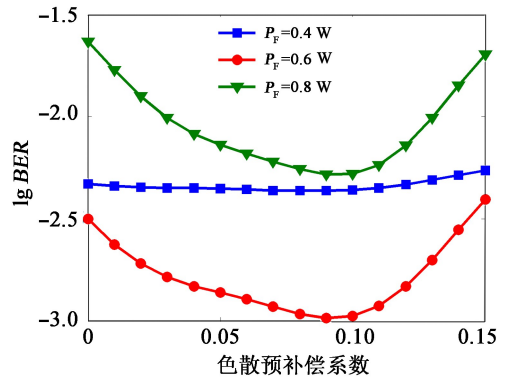
为了验证图 2(b)中相位共轭传输系统色散预

补偿对系统性能的影响,图 3 给出了不同前向泵浦功率下,色散预补偿对系统性能的影响。根据前期研究经验,本仿真系统的后向泵浦功率固定为

0.8 W。在前向泵浦功率 P_F 为 0.4 和 0.6 W 时,注入光纤的功率 P 均设置为 8 dBm,在前向泵浦功率为 0.8 W 时,注入光纤功率设置为 6 dBm。图 3(a) 为色散预补偿系数在 0~1 变化情况下的系统误码率(BER)性能。色散预补偿系数为 0 表示没有预补偿,系数为 1 表示预补偿所有链路中的色散。由此,可从图 3(a)看出,色散预补偿系数为 0.5(即预补偿链路一半色散的情况)时,系统的误码率性能不是最好的。在三个不同前向泵浦功率情况下,最好的误码率性能在预补偿色散系数为 0.1 附近。为了更加准确地找到最佳色散预补偿系数,图 3(b)给出了预补偿系数在 0~0.15 的误码率曲线。由图 3(b)可以看出,三个不同前向功率情况下的最优值有所偏差,但均在 0.09 附近。这是因为,在存在前向拉曼泵浦的情况下,非线性有效作用长度与拉曼放大的开关增益有关。因此,图 3 表明在无中继传输系统中,色散预补偿长度并不以系统链路总长度为参考依据。



(a) 色散预补偿系数为 0~1 时系统的误码率



(b) 色散预补偿在 0~0.15 时系统的误码率

图 3 不同前向泵浦功率下色散预补偿对系统性能的影响

在色散预补偿系数为 0.09 时,仿真研究了不同前向泵浦下,注入光功率 P_L 与系统误码率的关系,

结果如图 4 所示。图中,虚线为单偏振信号的结果,对应于图 2(a)所示的仿真系统,实线为相位共轭信号的结果,对应于图 2(b)所示的仿真系统。此处的传输信号为 32-GBaud 的 QPSK,传输距离 L 为 330 km,后向泵浦设置为 0.8 W。从图 4 可以看出,相位共轭传输系统的性能较单偏振态有明显提高。同时,随着前向泵浦功率增大,性能提升越明显。对于前向泵浦为 0.4、0.6 以及 0.8 W 的情况,相较于单偏振传输信号,相位共轭信号的 BER 性能在最好情况下均可提高 2 dB 以上。

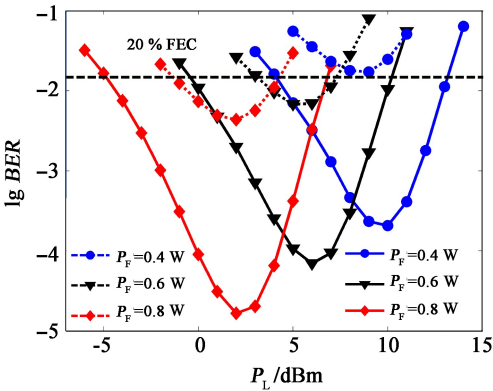


图 4 不同前向泵浦功率下注入光功率与误码率关系

为了进一步研究单偏振信号与相位共轭信号的传输距离,图 5 给出了在不同注入光功率下,误码率随传输距离变化的关系图。此处,前向泵浦功率设置为 0.6 W,后向泵浦功率设置为 0.8 W,传输信号为 32-GBaud 的 QPSK 信号。图中虚线表示单偏振信号传输结果,实线表示相位共轭传输结果。从图中可以看,在注入光纤功率为 0、2 和 4 dBm 下,相位共轭信号的传输距离始终优于单偏振信号。对应于 20%FEC 下,相位共轭信号比单偏振信号可多传输 20 km 以上。此外,为了研究在本系统设置情况下,单偏振信号与相位共轭信号的传输极限,本文进一步仿真了单偏振信号与相位共轭信号在不同传输距离下的误码率随注入光功率变化曲线,如图 6 所示。图 6 中蓝色虚线表示单偏振信号传输距离为 330 km 情况下的传输结果,蓝色实线表示相位共轭信号传输距离为 360 km 情况下的结果,红色虚线表示单偏振信号传输距离为 340 km 情况下的传输结果,红色实线相位共轭信号传输距离为 370 km 情况下的传输结果。从图中可以看出,以 20%FEC 作为参考,对于单偏振信号,在传输距离为 340 km 时,最优注入光功率下的误码率依然达不到 FEC 标准,对于相位共轭信号,在传输距离为 370 km 时,

最优注入光功率下的误码率也无法达到 FEC 标准。因此,可以看出,在此仿真参数下,单偏振信号的传输极限在 330 km 左右,而相位共轭信号的传输极限在 360 km 左右。相对于单偏振信号,相位共轭信号的传输距离约提升 10%。

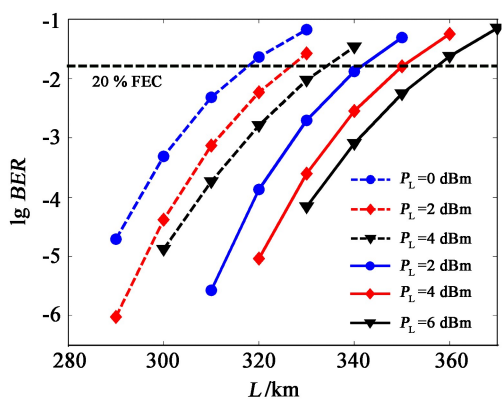


图 5 不同注入光功率下传输距离与误码率关系

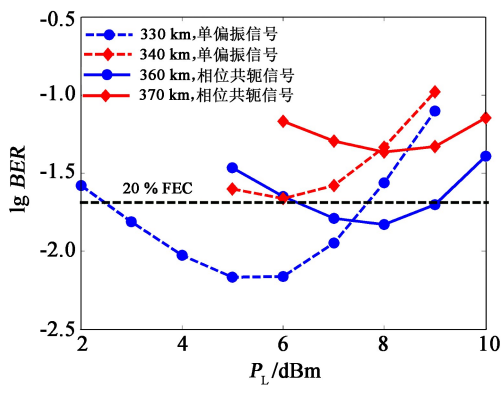


图 6 单偏振信号与相位共轭信号在不同传输距离下的误码率随注入光功率变化曲线

4 结束语

本文基于相位共轭信号技术,分析了无中继传输系统中的该方案用于非线性抑制的性能。仿真结果表明,在后向泵浦为 0.8 W、前向泵浦分别为 0.4、0.6 以及 0.8 W、色散预补偿系数在 0.09 附近时,相位共轭信号的传输性能最佳。在此基础上,相

位共轭信号的 BER 性能较单偏振传输信号提高 2 dB 以上。此外,在注入光纤功率为 0、2 和 4 dBm 下,相位共轭信号的传输距离始终优于单偏振信号。相对于单偏振信号,相位共轭信号的传输距离约提升 10%。因此,相位共轭信号在无中继传输系统中具有较明显优势,在特定情况下具有一定应用潜力。

参考文献:

[1] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. Bell Syst. Tech., 1948, 27(3): 379-423.

[2] Xu Kehang, Zhang Hong, Jing Qin, et al. Transmission performance of 5×112 -Gb/s super-nyquist PDM-QPSK over unrepeated Raman-amplified link [C]// Proc. Asia Communications and Photonics Conf. 2017: Su2A. 35.

[3] Ip E, Kahn J M. Compensation of dispersion and nonlinear impairments using digital back propagation [J]. J. of Lightwave Technol., 2008, 26(20): 3416-3425.

[4] Mateo E F, Zhu L, Li G. Impact of XPM and FWM on the digital implementation of impairment compensation for WDM transmission using backward propagation[J]. Opt. Express, 2008, 16(20): 16124-16137.

[5] Fekete Yavir A, Pepper D D M. Compensation for channel dispersion by nonlinear optical phase conjugation[J]. Opt. Lett., 1979, 4(2): 52-54.

[6] Pepper D M, Yavir A. Compensation for phase distortions in nonlinear media by phase conjugation[J]. Opt. Lett., 1980, 5(2): 59-60.

[7] Liu X, Chraplyvy A R, Winzer P J. Phase-conjugated twin waves for communication beyond the Kerr nonlinearity limit [J]. Nature Photon., 2013, 7(7): 560-568.

[8] Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics [M]. San Diego: Academic Press, 2007: 41-46.

作者简介:

陈 芳(1982—),女,硕士,高级工程师,从事电力信息通信建设工作;

李子凡(1990—),男,博士,从事通信与信息系
统研究工作。

(上接第 710 页)

[9] 邓雪菲,彭先蓉,张建林,等. 基于相关滤波的长时目标跟踪算法[J]. 半导体光电, 2019, 40(5): 742-748.

Deng Xuefei, Peng Xianrong, Zhang Jianlin, et al. Long-term object tracking algorithm based on correlation filtering [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(5): 742-748.

[10] Zuo W M, Wu X H, Lin L, et al. Learning support correlation filters for visual tracking[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2019, 41(5):

1158-1172.

[11] Wu Y, Lim J, Yang M H. Object tracking benchmark[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(9): 1834-1848.

作者简介:

崔雄文(1988—),男,云南昭通人,博士,高级工程师,主要研究方向为光电和雷达信号处理。

基于能量守恒与光谱法的无创血糖检测技术

陈 健¹, 王太宏^{2*}, 段小川³

(1. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361102; 2. 南方科技大学 电子与电气工程系, 广东 深圳 518055; 3. 厦门大学 萨本栋微米纳米科学技术研究院, 福建 厦门 361102)

摘 要: 传统的人体血糖检测方法是有创的,具有一定的局限性。文章提出一种结合能量守恒法与光谱法的血糖检测技术,该技术能够实现人体血糖的无创、实时和准确检测。首先设计了一种人体体征数据采集装置,用于实时采集血糖相关数据并上传至上位机。然后将数据分别用多元线性回归、 k 近邻回归和支持向量回归三种机器学习算法进行分析评估,对比得出最优算法用于无创血糖检测。实验证明,提出的无创血糖检测技术是可行的,其中基于支持向量回归算法的测量准确度最高,相关系数高达 0.862,具有较高的准确性和鲁棒性。

关键词: 无创血糖测量; 能量守恒; 光谱法; 支持向量回归

中图分类号: TN215 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0734-04

Noninvasive Detection of Blood Glucose Based on Conservation of Energy Metabolism and Spectroscopy

CHEN Jian¹, WANG Taihong², DUAN Xiaochuan³

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, CHN;

2. Department of Electrical and Electronic Engineering, South University of Science and Technology, Shenzhen 518055, CHN;

3. Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361102, CHN)

Abstract: Traditional human blood glucose testing methods are invasive and have certain limitations. In this paper, a new technique is proposed by combining energy conservation method and spectroscopy to realize non-invasive, real-time and accurate detection of human blood glucose. Firstly, a body sign data collection device was designed to collect blood glucose-related data in real time and upload it to the upper computer. Then the data were analyzed and evaluated with such three different machine learning algorithms as multiple linear regressions, k -nearest neighbor regression and support vector regression, thus the optimal algorithm for non-invasive blood glucose detection could be confirmed by comparisons. Experimental results show that, the proposed technique for noninvasive blood glucose detection realizes high feasibility, accuracy and robustness, the measurement accuracy based on the support vector regression algorithm is the best, and the correlation coefficient reached as high as 0.862.

Key words: non-invasive detection of blood glucose; conservation of energy metabolism; spectroscopy; support vector machines

收稿日期: 2020-02-11.

基金项目: 中国基金会项目(21601148); 自然科学基金福建省
科学基金项目(2017J05090).

* 通信作者: 王太宏 E-mail: wangth@sustech.edu.cn

0 引言

糖尿病是由于人体内胰岛素分泌不调而引起血糖偏离正常值的一类疾病,其显著特征为高血糖。研究表明,糖尿病容易引起各类并发症,如视网膜病变、心脑血管病变、白内障以及心脏病等^[1]。目前临床上治疗糖尿病的主要方法是通过频繁监测血糖浓度来调整人体胰岛素的注射量^[2]。血糖检测手段分为有创、微创和无创三种。相比于有创和微创血糖浓度检测技术,无创血糖检测可以作为一种长期检测的方法,该方法具有成本低、无创、可以连续实时测量等优点。

无创血糖检测技术主要分为以下几类:红外光、拉曼光等光谱法;人体液体提取法;阻抗谱法;能量守恒法等^[3-4]。其中,能量守恒法是由日本的 Cho 等人最先提出来的^[5]。研究发现,该方法测血糖的影响因素众多且测量准确度不高,因此目前尚无基于能量守恒法测血糖的市场产品推出^[6]。相比之下,近红外光谱法测血糖是一种更加成熟的技术,该技术也是国内外学者研究的重点方向,但其容易受个体皮肤差异的影响。

本文提出一种结合能量守恒法与光谱法的血糖检测技术。通过自主设计的数据采集装置一次性采集所有数据,与实时血糖微创值组成矩阵,然后输入不同的机器学习算法模型中进行回归训练并验证。最终选出基于支持向量回归算法的模型为最佳模型。

1 结合代谢热整合法和光谱法

1.1 代谢热整合法测血糖原理

在人体内的物质代谢过程中,血液中的葡萄糖在氧气供应充足的情况下发生如下反应^[7]:



葡萄糖是人体的主要能量物质来源。研究表明,人体静坐不动时,在无穷短的时间内可认为血液中的葡萄糖完成代谢反应(1)的同时,生成物 ATP 也完成了能量代谢,转化成其他物质,用于保持体温的稳定^[8]。

ATP 能量主要以辐射、对流、蒸发、传导等散热方式散发到环境中,散热量可以通过人体辐射温度、环境温湿度等参数表现出来。同时人体血液中的氧气供给量可以用血氧饱和度和心率来表征。因此通过测量环境温湿度、人体辐射温度、人体血氧饱和度

以及心率,即可间接估计血液中葡萄糖的含量。建立血糖浓度的数学函数关系式:

$$BG = f_1(T_E, R_H, T_O, S_{O_2}, H)$$

(2)

式中, BG 为人体血糖浓度, f_1 为某种数学关系,本文将其作为检测无创血糖浓度的算法, T_E 和 R_H 分别为人体静坐时所处环境温度和湿度, T_O 为人体辐射温度, S_{O_2} 为血氧饱和度, H 为心率。

1.2 光谱法测血糖原理

光谱法测血糖利用了光电容积脉搏波技术。实验中使用的传感器由光源及光电转换器组成。当手指贴近光源,入射光源透过人体外周血管,血液会吸收一部分光强,因此光电转换器接收到的反射光信号会有所衰减。脉搏搏动呈周期性变化,导致反射光强也呈周期性变化,光电转换器将光信号转换为电信号并将其放大和输出,得到了光电容积脉搏波的原始数据。通过建立脉搏波数据与血糖间的数学模型,可以推算出血糖浓度^[9]。

图 1 为截取的部分脉搏波原始波形,图 2 为对原始波形进行滤波及去基线后得到的波形。

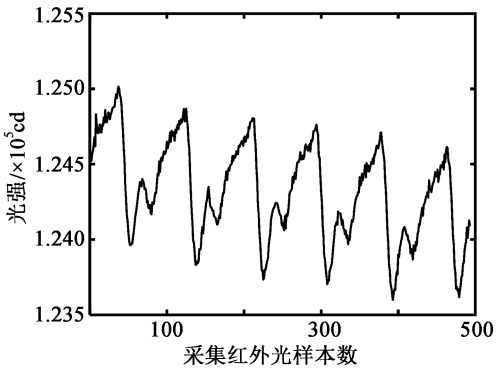


图 1 脉搏波原始数据

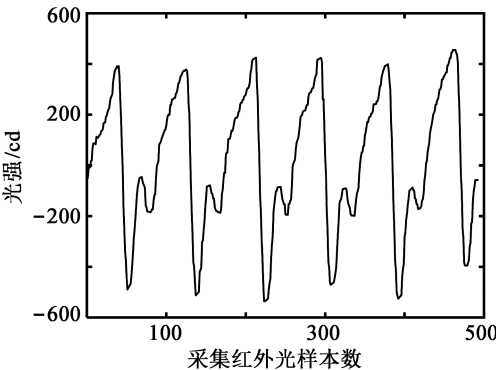


图 2 预处理后的脉搏波数据

根据光谱法测血糖原理,需建立脉搏波波形与血糖浓度的关系。对处理后的波形数据用主成分分析法(PCA)进行降维,提取出脉搏波的 6 个特征参

数,分别设为 t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 和 t_6 ,得到人体血糖浓度的数学函数关系:

$$BG = f_2(t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6) \tag{3}$$

式中, f_2 为某种函数关系, $t_1 \sim t_6$ 为脉搏波数据降维后提取的6个特征参数。

本文结合能量守恒法和光电容积脉搏波法测血糖,由式(2)和(3)可得血糖计算的函数关系:

$$BG = f(T_E, R_H, T_O, S_{O_2}, H_R, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6) \tag{4}$$

建立起上述函数关系后利用相应的算法模型即可推算出血糖浓度。

2 数据采集仪器的设计

为方便测量,本文设计了一种集成多种传感器的数据采集装置,可一次性测出实验所需的所有参数。该装置安装剖面图和实物图分别如图3和4所示。

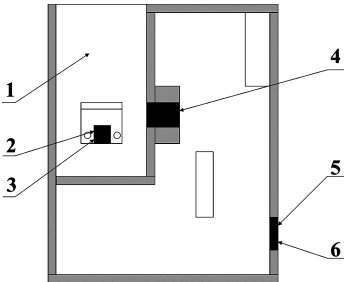


图3 传感器集成安装图



图4 数据采集仪器实物图

3 血糖检测算法原理

数据采集装置将实时采集数据上传至上位机,上位机读取数据后进行预处理,然后分别利用多元线性回归、 k 近邻回归及支持向量回归三种机器学习

习算法模型建立血糖浓度与人体心率、温度、脉搏波等参数的关系。

3.1 多元线性回归算法

多元线性回归模型,即具有多个自变量的回归问题。文中与血糖有关的参数有11个,由此可建立如下回归模型:

$$BG = a_1 T_E + a_2 R_H + a_3 T_O + a_4 S_{O_2} + a_5 H_R + b_1 t_1 + b_2 t_2 + b_3 t_3 + b_4 t_4 + b_5 t_5 + b_6 t_6 + \xi \tag{5}$$

式中, $a_1 \sim a_5, b_1 \sim b_6, \xi$ 均是常数,即回归系数,可在对样本数据进行多元回归训练后求出。

3.2 k 近邻算法

k 近邻算法常用于分类问题,该算法的思路是:给定一个样本,如果该样本与训练集的 k 个最相似样本中的大多数属于一个类别,则该样本也属于该类别。当 k 近邻算法用于解决回归问题时,一般使用平均值法,即将该样本最相似的训练集中的 k 个样本输出的平均值作为回归预测值。

3.3 支持向量回归算法

支持向量机(SVM)是一种二分类模型,其目的是寻找一个超平面来对样本进行分割。本文使用基于高斯核函数的支持向量机模型来解决血糖测量回归问题,就是找到一个回归平面,让一个集合的所有数据到该平面的距离最近,也称支持向量回归(SVR)。SVR模型具有简单、学习速度快、所需训练样本数少、泛化能力好等优点,非常适合文中血糖测量问题。

4 实验结果分析

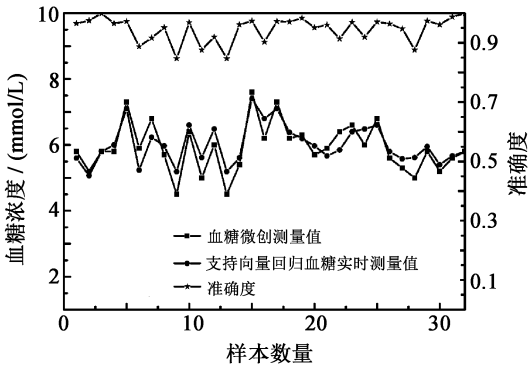
实验采集数据历时一个月,选取本人作为志愿者,共采集了160组样本数据,每组样本均需要用微创血糖仪记录对应的血糖微创测量值。然后随机选取样本中的80%作为训练集,使用多元线性回归、 k 近邻回归及支持向量回归三种不同的机器学习算法模型分别进行回归训练,剩下的20%作为测试集进行验证。通过比较测量结果,最终得出最佳模型。

4.1 算法误差分析

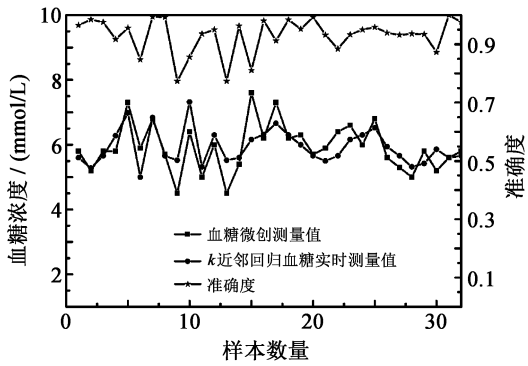
图5为三种不同算法测量结果的双 y 轴点线图,横坐标代表样本数量,左侧纵坐标为血糖微创测量值与算法测量值,右侧纵坐标为无创血糖算法测量值的准确度。准确度的计算公式为

$$\text{准确度} = 1 - \frac{|\text{血糖微创测量值} - \text{血糖无创测量值}|}{\text{血糖微创测量值}} \tag{6}$$

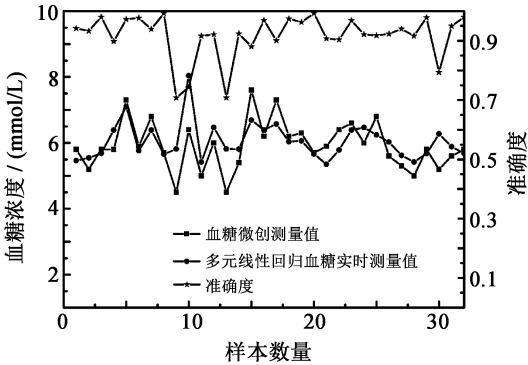
图 5(a)中血糖微创测量值与血糖算法测量值的两条曲线重合更明显,经过计算,准确度均值高达 94%,相比于图 5(b)~(c)两种算法的测量准确度更高,即支持向量回归算法测量的血糖值更接近对应的血糖微创测量值。



(a) 支持向量回归算法



(b) *k* 近邻回归算法



(c) 多元线性回归算法

图 5 三种不同算法的血糖比较点线图

4.2 整体性能比较

表 1 分别列出了支持向量回归、*k* 近邻回归及多元线性回归三种机器学习算法得出的整体性能,比较了血糖测量值与血糖微创值的相关系数(*R*)、均方误差(MSE)以及均方根误差(RMSE)。

结果表明,使用支持向量回归模型得到的相关

系数为 0.862,比使用 *k* 近邻算法回归模型、多元线性回归模型得到的相关系数更大。使用支持向量回归模型得到的均方误差和均方根误差分别为 0.138 2、0.371 8,比使用 *k* 近邻算法回归模型、多元线性回归模型得到的均方误差和均方根误差更小。因此使用支持向量回归模型得到的血糖测量值最接近微创测量值。

表 1 算法整体性能

参数	支持向量回归	<i>k</i> 近邻回归	多元线性回归
<i>R</i>	0.862	0.691	0.60
MSE	0.138 2	0.280 9	0.374 6
RMSE	0.371 8	0.53	0.612

5 结论

本文基于能量守恒法和光谱法提出了一种无创血糖检测方法,将采集手指表面生理信号的多种传感器进行集成,制作了一种无创血糖检测装置。然后使用支持向量回归、*k* 近邻算法回归及多元线性回归三种机器学习算法对预先采集好的数据进行训练和验证。

实验结果表明,使用支持向量回归模型得到的相关系数为 0.862,整体准确度达 94%以上,比 *k* 近邻回归和多元线性回归模型的测量结果更准确。因此得出结论:使用支持向量回归模型的血糖测量值准确度最高,拟合效果最好,适用于测量人体血糖值。

参考文献:

[1] 郑毅,朱香平,聂荣志,等. 用于血糖无创检测的喇曼光谱系统[J]. 光子学报, 2017, 46(8): 158-166.
Zheng Y, Zhu X P, Nie R Z, et al. Raman spectroscopy system for non-invasive blood glucose detection[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(8): 158-166.
[2] 杨青. 无创及微创血糖仪研究进展[J]. 中国医疗器械信息, 2019(12): 23-24.
Yang Qing. Research progress on non-invasive and minimally invasive blood glucose meters[J]. China Medical Device Information, 2019(12): 23-24.
[3] Litinskaia E L, Bazaev N A, Pozhar K V, et al. Methods for improving accuracy of non-invasive blood glucose detection via optical glucometer[C]// IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical & Electronic Engin., 2017: 7910487.

(下转第 742 页)

基于 CLAHE 和多尺度细节融合的静脉图像增强算法

马静云, 叶 兵*, 汪仕铭

(合肥工业大学 电子科学与应用物理学院, 合肥 230009)

摘 要: 利用静脉识别原理采集的静脉图像通常模糊不清、难以分辨。传统的 CLAHE 算法虽然能够提高静脉图像的对比度,但是会丢失图像的一些细节信息。文章提出了一种基于 CLAHE 和多尺度细节融合的静脉图像增强算法。首先对静脉图像进行 ROI 提取,采用 CLAHE 算法增强静脉与手背间的对比度;然后利用多尺度细节融合算法得到静脉图像的细节图,再通过均值滤波滤除细节层中的高频噪声;最后把上面两种方法得到的图像加权叠加得到细节增强后的静脉图像。实验结果表明,该方法在提高静脉图像对比度的同时保留了原图像的细节信息。

关键词: 静脉图像; CLAHE 算法; 多尺度细节融合; 加权叠加

中图分类号: TN219 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0738-05

Vein Image Enhancement Based on CLAHE and Multi-scale Detail Fusion

MA Jingyun, YE Bing, WANG Shiming

(School of Electronic Science and Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, CHN)

Abstract: The vein images collected by using the principle of vein recognition are usually blurred and difficult to distinguish. The traditional CLAHE algorithm can improve the contrast of vein images, but will lose some details of the image. Therefore, a vein enhancement algorithm based on CLAHE and multi-scale detail fusion is proposed. Firstly, the ROI of the vein image is extracted, and the CLAHE algorithm is used to enhance the contrast between the vein and the back of the hand. Then, the multi-scale detail fusion algorithm is used to obtain the detailed image of the vein image, and then the high-frequency noise is filtered out in the detail layer through the average filter. Finally, the images obtained by the two methods are weighted and superimposed to obtain vein images with enhanced details. Experimental results show that this method not only improves the contrast of the vein images, but also retains the details of the original images.

Key words: vein image; CLAHE algorithm; multi-scale detail fusion; weighted overlay

0 引言

在医疗过程中,静脉穿刺是医生临床治疗、抢救病人的重要给药途径,通常医生会仅凭肉眼判断手背上的静脉进行穿刺,但是由于医生的经验不足或肥胖人群及婴幼儿的血管难以辨认等因素,静脉识别错误经常发生,给病人带来额外的痛苦。根据静

脉血中的血红蛋白对波长为 850 nm 左右的近红外光有明显的吸收特性,可设计出反射式红外静脉实时显影系统。但是由于日光灯的干扰、人体手背的厚度不一和采集设备干扰等问题,采集的血管图像对比度较差、视觉模糊且含有多种不同的噪声,这使得手背上的静脉血管与背景之间的分界不太明显,容易混淆医生的判断。血管图像增强算法有很多种,传统的算法是基于频域和空域来增强图像高频信息,如反锐化掩膜,但是这种方法在增强图像高频信息时往往会放大噪声甚至产生伪像。目前应用广

收稿日期:2020-05-21.

基金项目:安徽省自然科学基金项目(J2014AKZR0032).

*通信作者:叶 兵 E-mail: 1297210279@qq.com

泛的是通过调整图像的直方图信息的图像增强算法。最基本的直方图均衡化(HE)可以提升图像整体的对比度,但是对图像局部信息表现效果较差。蔡超峰等^[1]提出了子块部分重叠的局部直方图均衡化,鲁周迅等^[2]采用先手动将图像拆分成不同步长的子图,再对子图进行直方图均衡化。但是上述直方图均衡类算法都没有考虑到对图像细节信息的增强。本文提出用多尺度细节提升算法来增强图像中的细节信息,并将该算法与常用直方图均衡类算法进行比较,结果表明本文算法更有效。

1 手背静脉图像有效区域提取

1.1 OTSU 算法

最大类间方差法(OTSU 算法)可以快速计算图像二值化分割的阈值。假设一幅灰度图的总像素数为 n ,分割阈值为 T ,小于阈值的像素数为 n_0 ,大于阈值的像素数为 n_1 ,前景像素个数占比为 w_0 ,平均灰度为 u_0 ,背景像素个数占比为 w_1 ,平均灰度为 u_1 ,图片整体平均灰度为 u ,类间方差为 g ,则有:

$$\begin{cases} w_0 = n_0/n; w_1 = n_1/n \\ w_0 + w_0(u_0 - u)^2 = 1 \\ u = w_0u_0 + w_1u_1 \\ g = w_0(u_0 - u)^2 + w_1(u_1 - u)^2 \\ g = w_0w_1(u_0 - u_1)^2 \end{cases} \quad (1)$$

取 g 值最大时的 T 为最佳阈值。

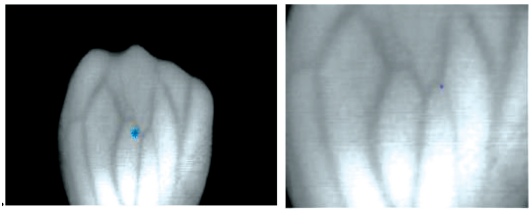
1.2 ROI 区域提取

在对静脉图像进行对比度增强前,对图像进行静脉区域的提取,可以去除背景信息,减少无关信息对静脉图像增强的影响,加快算法的运算速度,提高算法的准确性。本文利用计算二值化图像质心的方法提取有效区域^[3]:(1)静脉图像二值化。静脉图像中主要包含手背和背景信息,如图 1(a)所示,假设手背信息是静脉图像的前景,根据适当阈值对图像进行二值化可以区分出图像的前景和背景。本文采用 OTSU 算法计算分割的阈值 T ,灰度值高于阈值 T 的像素值设为 1,低于阈值 T 的像素值设为 0;(2)计算二值图像的质心。设分割后图像的质心为 $Z(g_i, g_j)$,则计算公式为

$$g_i = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n (i \cdot f(i, j))}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n f(i, j)}, g_j = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n (j \cdot f(i, j))}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n f(i, j)} \quad (2)$$

其中, m, n 分别代表图像的高和宽, $f(x, y)$ 表示二值手背区域的像素点。

(3)以 $Z(g_i, g_j)$ 为中心截取固定大小(125×150)的图像为 ROI 区域,如图 1(b)所示。



(a) 原图像 (b) ROI 区域

图 1 有效区域提取结果

2 基于 CLAHE 与多尺度细节融合的静脉图像增强

2.1 算法流程

近红外光下拍摄的手背静脉图像通常有整体灰度较低、血管与手背之间区分不明显、噪声较多的特点。针对这些特点,本文提出一种静脉图像增强算法,算法流程如图 2。

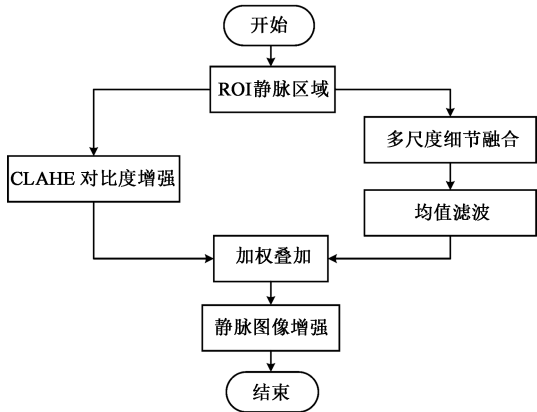


图 2 本文算法流程图

先采用 CLAHE 算法对 ROI 静脉图像进行对比度增强,CLAHE 采用了对比度增强幅度受限的技术,在防止图像失真的同时可以抑制噪声。之后再利用多尺度细节增强算法提取出细节层,即在原始静脉图像的基础上建立非高斯采样的高斯金字塔,再利用高斯差分(Difference of Gaussian, DOG)提取出多个边缘层,最后将多个细节层融合后得细节图。细节层中除含有大量边缘信息外,还有大量高频噪声,可通过均值滤波滤除。最后将对比度增强图像与细节层两张图片进行加权叠加得到静脉增强图像。

2.2 对比度受限的自适应直方图均衡化

直方图均衡化是通过计算图像的灰度概率分布来确定对应的输出灰度值,从而扩展图像的动态范围,达到图像直方图均匀分布的目的。假设 $m \times n$ 的离散灰度图像灰度数为 $[0, L-1]$, n_j 表示灰度为 j 的像素的数目,则其出现的概率及对应的累积分布函数是

$$p(j) = \frac{n_j}{mn}, \quad 0 \leq j < L \tag{3}$$

$$T(j) = \sum_{i=0}^j p(i), \quad 0 \leq j < L \tag{4}$$

则输入图像 F 与输出图像 G 之间的映射关系是

$$G = \text{INT}[(L-1)T(F) + 0.5] \tag{5}$$

其中,INT[]为取整符号。

对比度受限的自适应直方图均衡化^[4](CLAHE)是一种对比度增强幅度受限制技术结合局部直方图均衡化的算法,与直方图均衡化相比,可以防止图像失真和抑制噪声。对比度增强幅度受限技术是对局部直方图中高于某个阈值的像素进行裁剪,再把裁剪的部分均匀分布到直方图中,以达到限制直方图幅值的目的。设子块的总像素为 N , α 为截断系数,则受限的阈值 C 为

$$C = \frac{N}{L} + \alpha \left(N - \frac{N}{L} \right), \quad \alpha \in [0, 1) \tag{6}$$

局部直方图均衡化则是将图像分成子块,对子块进行直方图均衡化。把图像分成子块的方式有三种:子块不重叠、子块重叠和子块部分重叠。考虑到运算速度和算法实现的难易程度,本文选择的是将图像分成有限个互不重叠的子块。但是不重叠的子块在图像重构时会产生块状效应,为了解决该问题,在对子块进行直方图均衡化后,采用双线性插值技术计算像素点的值。CLAHE 的算法流程图如图 3 所示。

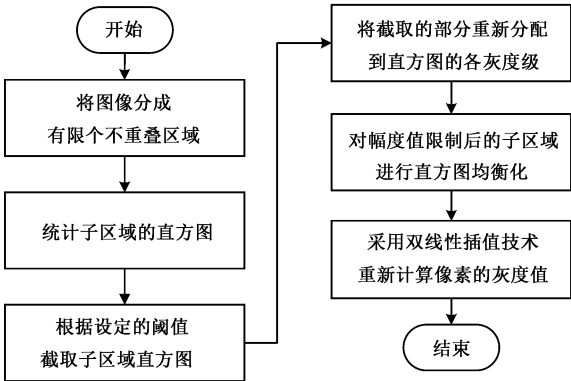


图 3 CLAHE 算法流程图

2.3 多尺度细节融合

多尺度细节融合^[5]是通过建立图像的非采样高斯差分金字塔来提取多层血管边缘信息,再将提取的边缘细节层进行融合。

传统的高斯金字塔的建立是利用原图像,对其进行梯次向下采样从而形成多层分辨率不同的图像,再对每层图像进行不同尺度的高斯滤波,以形成一系列以金字塔排列、像素逐渐减少的图像集合。但是在对原图像采样的过程中会产生不确定的像素信息,从而对血管信息的判断。因此,本文采用的是构建非采样高斯金字塔。多尺度细节融合算法的实现步骤为:

(1)建立非采样高斯金字塔^[6]。本文采用 3 个不同尺度的高斯核与原图像进行卷积运算,生成 3 个模糊程度不同的高斯平滑图,设 $f(x, y)$ 为原始图像,高斯平滑后的图像 $G(x, y)$ 为

$$\begin{cases} G_1(x, y) = G_{\sigma_1}(x, y) * f(x, y) \\ G_2(x, y) = G_{\sigma_2}(x, y) * f(x, y) \\ G_3(x, y) = G_{\sigma_3}(x, y) * f(x, y) \end{cases} \tag{7}$$

式中,“*”表示卷积运算。

(2)提取边缘细节层。高斯差分(DOG),即两个不同尺度高斯模糊图像相减,可以提取出图像的边缘信息,且计算速度较快。因此本文利用 DOG 提取出血管图像的 3 个细节层:

$$\begin{cases} D_1(x, y) = G_1(x, y) - f(x, y) \\ D_2(x, y) = G_2(x, y) - G_1(x, y) \\ D_3(x, y) = G_3(x, y) - G_2(x, y) \end{cases} \tag{8}$$

(3)细节层融合。提取的细节层 $D_i (i=1, 2, 3)$ 包含不同层次的边缘信息,将 3 个细节层进行融合得到总的细节层,由于像素的灰度值最大为 255,为了防止像素溢出,在图像叠加时取其平均值。则细节层 $D(x, y)$ 为

$$D(x, y) = \frac{1}{3} \sum_{i=0}^3 D_i(x, y) \tag{9}$$

(4)均值滤波。均值滤波的目的是降低噪声,通过对目标像素及周围像素取平均值再赋值给目标像素来实现滤波。融合的细节层中不仅含有大量的边缘信息,同时高频噪声信息也增多了,对图像进行均值滤波可以滤除噪声。

2.4 获得静脉增强图像

设 ROI 静脉图像为 I ,CLAHE 算法处理后的图像为 I_{CLAHE} ,提取的细节信息图像为 I_{detail} ,则静脉

增强图像 I^* 为

$$I^* = aI_{\text{CLAHE}} + bI_{\text{detail}} \tag{10}$$

其中, a, b 为比例系数。

3 实验结果与分析

本文首先对静脉图像的 ROI 区域采用对比度受限的直方图均衡化处理,其中 CLAHE 算法是将 ROI 区域分成了 8×8 个互相不重叠的子区域,子区域的受限阈值为 0.01。在图像对比度增强后,为了进一步增强图像中的细节信息,对静脉图像进行多尺度细节融合处理,其中标准差 σ 的取值为 1.0, 2.0 和 4.0,再对提取的细节层选择 6×6 的均值模板进行滤波,图像加权叠加时的系数 a, b 分别取值 1 和 0.8。则基于 CLAHE 和多尺度细节增强的静脉图像的结果如图 4。其中图 4(a)是原始静脉图像的 ROI 区域;图 4(c)为 CLAHE 处理后对比度增强的静脉图像;图 4(e)是多尺度细节提升后的结果图。图 4(b),(d),(f)为对应的直方图。

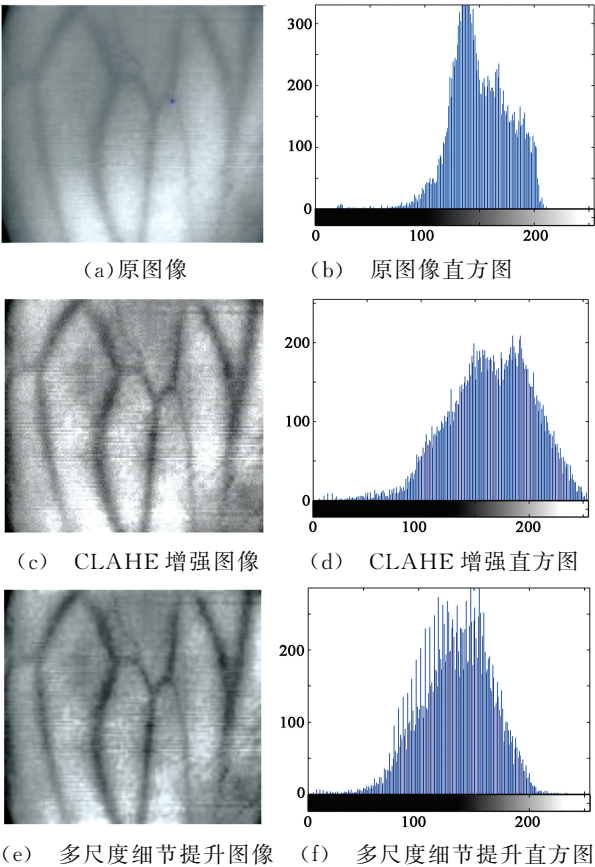


图 4 静脉增强结果及其直方图

由结果图可以看到,CLAHE 算法虽然提高了静脉图像的对比度,但是对图像的增强效果不均衡,

在图片的下方甚至出现了过增强现象,而本文算法对图像的整体增强则较为均衡。观察原图像、CLAHE 增强和多尺度细节提升直方图,可以看到,在对图像进行 CLAHE 增强后丢失了很多的细节信息,而本文的算法在增强图像对比度的同时保留了原图像的细节信息。

为了客观评价算法,本文采用信息熵 $H^{[7]}$ 、峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio,PSNR)和边缘保持系数^[8] E 作为评价指标,将本文算法与常用直方图均衡化算法(HE)、子块部分重叠的直方图均衡化算法^[9](POSHE)和对比度受限的直方图均衡化算法(CLAHE)进行比较。信息熵用来衡量图像中的信息量,信息量越大则熵值越大,一维信息熵的定义式为

$$H = - \sum_{i=0}^{255} p_i \log p_i \tag{11}$$

其中, p_i 为灰度值为 i 的像素所占总像素的比。

峰值信噪比(PSNR)根据均方误差 MSE 来定义:

$$MSE = \frac{1}{hm} \sum_{i=1}^{h-1} \sum_{j=1}^{m-1} (X(i,j) - Y(i,j))^2 \tag{12}$$

$$PSNR = 10 \lg \frac{(2^n - 1)^2}{MSE} \tag{13}$$

式中,MSE 表示处理后的图像 X 与原图像 Y 的均方误差, $X(i,j),Y(i,j)$ 分别表示原图像和处理后的图像, h,m 分别表示图像的高和宽, n 为每个像素的比特数,一般取值为 8。 $PSNR$ 值越高表示图像失真越小。边缘保持系数 E 计算公式为

$$E = \frac{\sum_{i=1}^m |G_{R1} - G_{R2}|_{\text{增强后}}}{\sum_{i=1}^m |G_{R1} - G_{R2}|_{\text{原图像}}} \tag{14}$$

其中, m 表示像素个数, G_{R1},G_{R2} 为像素点上下或左右相邻像素差值, E 值越大则对比度增强效果越好。表 1 所列为各算法的 $H,PSNR$ 和 E 值。

表 1 各算法的性能指标

评价指标	HE	POSHE	CLAHE	本文算法
H	5.857 0	7.913 4	7.294 5	7.627 0
$PSNR$	13.358 0	12.722 2	18.761 9	21.669 9
E	2.932 3	3.458 9	3.385 5	3.918 5

由表 1 可以看出,与 HE,POSHE 和 CLAHE 算法相比,本文算法的 $PSNR$ 和 E 值最大, H 值仅次于 POSHE 算法。综合各种客观评价可以得出本文算法效果较好。

4 结论

针对红外静脉图像对比度低的问题,本文提出了 CLAHE 与多尺度细节融合算法相结合的静脉图像增强算法,并将其与常见的直方图均衡化算法进行了比较。实验结果表明,本文算法在增强对比度的同时,解决了直方图均衡化算法细节丢失的问题,为后续图像分割奠定了基础。

参考文献:

[1] 蔡超峰,任景英. 基于直方图均衡化的手背静脉图像对比度增[J]. 计算机应用, 2013, 33(4): 1125-1127.

Cai C F, Ren J Y. Contrast enhancement of hand vein image based on histogram equalization [J]. J. of Computer Applications, 2013, 33(4): 1125-1127.

[2] 鲁周迅,张彬彬. 一种新的手背静脉分割方法[J]. 微电子学与计算机, 2014, 31(8): 25-28.

Lu Z X, Zhang B B. A new segmentation method of hand dorsal vein image[J]. Microelectronics & Computers, 2014, 31(8): 25-28.

[3] 王定汉,冯桂兰,王 雄,等. 基于静脉灰度值特征的图像分割算法研究[J]. 光电工程, 2018, 45(12): 15-21.

Wang D H, Feng G L, Wang X, et al. Research on image segmentation algorithm based on features of venous gray value [J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(12): 15-21.

[4] 刘巧玲,李 想,明 旭. 基于双线性插值的 CLAHE 算法研究与实现[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2015, 34(2): 149-151.

Liu Q L, Li X, Ming X. Research and implementation of CLAHE algorithm based on bilinear interpolation [J]. J. of Chengdu University (Natural Science Edi.), 2015, 34(2): 149-151.

[5] Kim Y, Koh J, Lee C, et al. Dark image enhancement based

—————

(上接第 737 页)

[4] 陈真诚,龚 琼,王弟亚,等. 基于能量守恒的无创血糖检测传感器的设计[J]. 传感技术学报, 2008, 21(5): 724-728.

Chen Zhencheng, Gong Qiong, Wang Diya, et al. Design of non-invasive blood sugar measuring sensor based on energy metabolic conversation[J]. J. of Transduction Technol., 2008, 21(5): 724-728.

[5] Cho O K, Kim Y O, Mitsumaki H, et al. Noninvasive measurement of glucose by metabolic heat conformation method[J]. Clinical Chemistry, 2004, 50(10): 1894.

[6] 马 爽,蒲宝明. 基于支持向量机的无创血糖光谱算法[J]. 计算机系统应用, 2016, 25(8): 120-124.

Ma Shuang, Pu Baoming. Non-invasive blood glucose measurement based on support vector machine algorithm[J]. Computer Systems & Applications, 2016, 25(8): 120-124.

[7] Eadie M, Steele R J. Non-invasive blood glucose monitoring

on pairwise target contrast and multi-scale detail boosting [C]// Proc. of IEEE Inter. Conf. on Image Proc., 2015: 1404-1408.

[6] 穆柯楠,赵祥模,惠 飞. 基于非采样高斯差分金字塔的多尺度融合边缘检测[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(5): 130-138.

Mu K N, Zhao X M, Hui F. Multiscale fused edge detection algorithm based on non-sampling difference of Gaussian pyramid [J]. J. of Sichuan University (Engin. Science Edi.), 2015, 47(5): 130-138.

[7] 朱庆丰,张 瑞,朱雯青,等. 基于小波变换与像元对目标的短波红外图像增强算法[J]. 半导体光电, 2019, 40(5): 688-693.

Zhu Q F, Zhang R, Zhu W Q, et al. SWIR image enhancement based on wavelet transform and pairwise target contrast[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(5): 688-693.

[8] 田晓东. 声呐图像滤波方法的比较分析[J]. 声学 & 电子工程, 2007(1): 22-25, 30.

Tian X D. Comparative analysis of sonar image filtering methods[J]. Acoustics and Electronic Engineering, 2007(1): 22-25, 30.

[9] 杨晓鹏,蔡超峰,潘 珩,等. 手背静脉图像预处理算法研究[J]. 中国医疗设备, 2013, 28(10): 20-23.

Yang X P, Cai C F, Pan H, et al. Research on pretreatment algorithm of hand vein image[J]. China Medical Devices, 2013, 28(10): 20-23.

作者简介:

马静云(1994—),女,河南鹤壁人,硕士生,研究方向为激光技术与应用;

叶 兵(1961—),男,安徽合肥人,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为激光技术与应用、电子电路设计。

and data analytics[C]// Proc. Conf. ACM, 2017: 3093283.

[8] Berger A J, Itzkan I, Feld M S. Feasibility of measuring blood glucose concentration by near-infrared Raman spectroscopy[J]. Spectrochimica Acta Part A Molecular & Biomolecular Spectroscopy, 1997, 53A(2): 287-292.

[9] 刘宇巍. 基于 PPG 和 ECG 信号融合的无创血糖检测方法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.

Liu Yuwei. Research on non-invasive blood glucose detection based on PPG and ECG fusion signal [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technol., 2018.

作者简介:

陈 健(1995—),男,硕士研究生,研究方向为物联网和智能传感器;

王太宏(1966—),男,博士,讲席教授,博士生导师,研究方向为传感与智能感知。

二值加权正交迭代相机位姿估计算法

陈紫强^{*}, 周秉毅, 刘庆华, 谢振鑫

(桂林电子科技大学 认知无线电与信息处理省部共建教育部重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘 要: 在相机位姿估计算法的实际应用中, 由于 2D 像点与 3D 参考点的错误匹配, 参考点中往往含有异常值。针对现有算法抗异常值能力较弱的问题, 提出了一种基于正交迭代的二值加权算法。该算法在正交迭代算法的基础上, 引入包含两个阈值的加权系统来衡量参考点的可靠性。选取重投影误差的四分位数中的最大值作为阈值之一, 另外引入一个与重投影误差和焦距相关的阈值来加速异常值比例较低时的收敛速度。最终选取两阈值的最大值对目标函数进行二值加权, 降低了异常值对估计结果的影响。实验表明, 该方法提升了正交迭代算法的抗异常值能力, 具有较强的鲁棒性。

关键词: 相机位姿估计; 正交迭代; 加权优化

中图分类号: TP391 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0743-06

A Binary Weighted Orthogonal Iterative Camera Pose Estimation Algorithm

CHEN Ziqiang, ZHOU Bingyi, LIU Qinghua, XIE Zhenxin

(Key Laboratory of Cognitive Radio and Information Processing of the Ministry of Education, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, CHN)

Abstract: In the practical application of camera pose estimation algorithm, affected by the matching error, the reference points often contain outliers. In view of the weak ability of existing algorithms to resist the outliers, a binary weighted algorithm based on orthogonal iteration is proposed. Based on the orthogonal iterative algorithm, a weighted system with two thresholds is introduced to measure the reliability of the reference point. The maximum value of the quartile of the reprojection error is selected as one of the thresholds. In addition, a threshold related to the reprojection error and focal length is introduced to accelerate the convergence speed when the proportion of outliers is low. Finally, the maximum value of two thresholds is selected to weight the objective function, which reduces the influence of outliers on the estimation. The experimental results show that the method improves the anti-outlier ability of the orthogonal iterative algorithm and performs better in robustness.

Key words: camera pose estimation; orthogonal iterative algorithm; weighted optimization

0 引言

相机位姿估计是视觉测量、人工智能、三维重建

中的一项关键技术, 具有操作便捷、成本低等优点, 近年来广泛应用于室内定位^[1]、机器人导航^[2]、增强现实^[3]等领域。相机位姿估计问题又称 n 点透视问题(Perspective- n -Point, PnP)。该问题通过给定的 n 对 2D-3D 参考点, 求解相机坐标系与世界坐标系之间的关系。

PnP 研究已取得了丰硕的成果。其中线性解析类方法^[4-6]通常利用投影几何模型将 PnP 问题构建

收稿日期: 2020-05-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61861011, 61871425); 广西自然科学基金项目(2016GXNSFAA380036, 2018GXNSFAA138091); 广西重大科技项目(AA17204093).

^{*}通信作者: 陈紫强 E-mail: chenziqiang@guet.edu.cn

为方程系统,这类算法解算速度快,但容易受到噪声等因素的影响,导致解算稳定性较低。通过引入迭代可以提升算法的稳定性。文献[7]以最小化共线性误差为目标,提出了正交迭代算法。受文献[4]提出的 EPnP 算法启发,文献[8]同样利用选取的四个虚拟控制点表示 3D 参考点,在此基础上利用高斯牛顿迭代算法对控制点进行优化,获得了较高的精度和稳定性。文献[9]从优化初值的角度出发,提出了两种利用共面点求解初值的方式,降低了迭代算法的计算复杂度。文献[10]在正交迭代算法的基础上,引入了参考点深度权重和参考点与光轴的距离权重,降低了相机镜头畸变对算法的影响,提升了算法的稳定性。文献[11-12]在正交迭代算法的基础上,对每次迭代步骤进行整合,提取每次迭代的重复计算,并将重复计算放在整个迭代过程之前进行,将每次迭代的计算复杂度从 $O(n)$ 降到了 $O(1)$ 。

在实际应用中,由于 2D 像点与 3D 参考点的错误匹配,参考点的坐标数据中不可避免地混杂着异常值。在异常值存在的情况下,上述算法提供的估计结果与真值之间存在较大误差,无法满足实际需求。鉴于此,本文提出一种二值加权正交迭代算法。该算法中包含两个阈值,首先选取重投影误差的四分位数的最大值为阈值之一,以降低重投影误差较大的参考点对算法的影响。其次,为了避免异常值比例较低时,参考点可靠度的误判,引入了一个与重投影误差成正比、与焦距成反比的阈值,以加速算法收敛。最终选取两阈值中的最大值对目标函数进行加权优化,以降低异常值对估计结果的影响,提高算法的稳定性。

1 二值加权正交迭代算法

1.1 正交迭代算法

PnP 问题建立在如图 1 所示的几何成像模型之上。其中 wP_i 为 3D 参考点在世界坐标系下的坐标, cP_i 表示 3D 参考点在相机坐标系下的坐标, v_i 为与之对应的世界坐标系下的 2D 像点坐标。 cP_i 与 wP_i 之间的关系为刚体变换,可描述为

$${}^cP_i = R {}^wP_i + t \tag{1}$$

其中, $R = [r_1 \ r_2 \ r_3]^T$ 为 3×3 旋转矩阵, $t = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ 为 3×1 位移向量。PnP 问题通过 v_i 与 wP_i 间的投影关系,估计 R 和 t ,将估计值记为 $\hat{R}$ 和 $\hat{t}$ 。图 1 中, ${}^cP'_i = \hat{R} {}^wP_i + \hat{t}$ 为 wP_i 通过估计值 $\hat{R}$

和 $\hat{t}$ 求得的相机坐标系下的坐标。

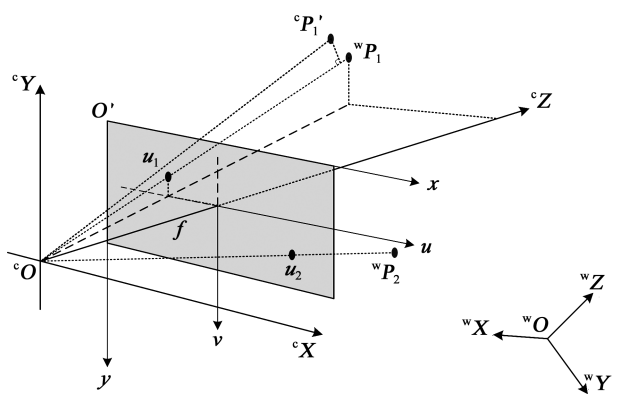


图 1 几何透视成像模型

根据几何透视成像模型,正交迭代算法^[6]利用 3D 参考点、2D 像点及投影中心的共线关系,将投影像点 $v_i = (u_i, v_i, 1)^T$ 表示为

$$v_i = \frac{1}{r_i^T w P_i + t_z} (R^w P_i + t) \tag{2}$$

根据共线特性, cP_i 在 v_i 上的正交投影等于其本身,可表示为

$${}^cP_i = V_i {}^cP_i \tag{3}$$

其中, $V_i = v_i v_i^T / v_i^T v_i$ 是正交投影矩阵,将参考点正交投影到 v_i 所在的线上, V_i 满足下式:

$$\| {}^cP_i \| \geq \| V_i {}^cP_i \| \tag{a}$$

$$V_i^T = V_i \tag{b}$$

$$V_i^2 = V_i^T V_i = V_i \tag{c}$$

将式(1)代入式(3):

$$R^w P_i + t = V_i (R^w P_i + t) \tag{5}$$

${}^cP'_i$ 与 cP_i 往往存在一定距离,无法保持共线性,据此构建目标函数:

$$E(R, t) = \min_{R, t} \sum_{i=1}^n \| (I - \hat{V}_i) (R^w P_i + t) \|^2 \tag{6}$$

其中, $\hat{V}_i = \hat{v}_i \hat{v}_i^T / \hat{v}_i^T \hat{v}_i$, $\hat{v}_i$ 为 2D 像点测量值, I 为单位矩阵。

假设第 k 次迭代旋转矩阵为 $R^{(k)}$,通过式(7)~(8)求解平移向量 $t^{(k)}$ 和正交投影矩阵 $q_i^{(k)}$:

$$t^{(k)}(R) = \frac{1}{n} \left(I - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{V}_i \right)^{-1} \cdot$$

$$\sum_{i=1}^n (\hat{V}_i - I) R^{(k)w} P_i \tag{7}$$

$$q_i^{(k)}(R) = \hat{V}_i [R^{(k)w} P_i + t^{(k)}(R)] \tag{8}$$

以式(6)为目标,利用式(9)进一步迭代求解 $R^{(k+1)}$:

$$\mathbf{R}^{(k+1)} = \operatorname{argmin}_{\mathbf{R}} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{R}^w \mathbf{P}_i + \mathbf{t} - \hat{\mathbf{V}}_i \mathbf{q}_i^{(k)}\|^2 \quad (9)$$

重复迭代,直到求得的旋转矩阵 $\mathbf{R}^*$ 满足式(10),停止迭代。

$$\mathbf{R}^* = \operatorname{argmin}_{\mathbf{R}} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{R}^w \mathbf{P}_i + \mathbf{t} - \hat{\mathbf{V}}_i (\mathbf{R}^{*w} \mathbf{P}_i + \mathbf{t}(\mathbf{R}^*))\|^2 \quad (10)$$

1.2 二值加权正交迭代算法

从正交迭代算法的目标函数式(6)可以看出,其对每个参考点赋予了相同的权值。受匹配误差影响,参考点信息往往含有较大的非线性误差,导致算法的精度和稳定度下降。鉴于此,为了提高算法的稳定度,在目标函数中引入二值权重系数:

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \min_{\mathbf{R}, \mathbf{t}} \sum_{i=1}^n \|\omega_i (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{V}}_i) (\mathbf{R}^w \mathbf{P}_i + \mathbf{t})\|^2 \quad (11)$$

其中, ω_i 为第 i 个参考点权重系数,用以衡量第 i 个参考点是否可靠:

$$\omega_i = \begin{cases} 1, & \epsilon_i \leq \max(\epsilon_{\max}, \delta_{\max}) \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\epsilon_i = \|\hat{\mathbf{v}}_i - \mathbf{v}_i\|_2$ 表示重投影误差, $\epsilon_{\max} = Q_{25\%}(\epsilon_1, \dots, \epsilon_n)$, 选取 $\epsilon_i, (i=1, \dots, n)$ 中重投影误差的四分位数中的最大值作为 $\epsilon_{\max}$ 。若只有 $\epsilon_{\max}$ 作为阈值,在没有异常值的情况下,算法将无法完全利用参考点信息。为了防止这种情况,引入阈值 $\delta_{\max} = k\tau/f$, 其中, τ 为最大重投影误差, f 为焦距,根据大量的仿真实验,最终将系数 k 确定为 1.4。

加权迭代:根据目标函数式(11)进行迭代求解。假设第 k 次迭代旋转矩阵为 $\mathbf{R}^{(k)}$, 通过式(13)~(14)求解 $\mathbf{t}^{(k)}$ 和 $\mathbf{q}_i^{(k)}$:

$$\mathbf{t}^{(k)}(\mathbf{R}) = \left(\sum_{i=1}^n \omega_i (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{V}}_i) \right)^{-1} \sum_{i=1}^n \omega_i (\hat{\mathbf{V}}_i - \mathbf{I}) \cdot \mathbf{R}^{(k)w} \mathbf{P}_i \quad (13)$$

$$\mathbf{q}_i^{(k)}(\mathbf{R}) = \hat{\mathbf{V}}_i [\mathbf{R}^{(k)w} \mathbf{P}_i + \mathbf{t}^{(k)}(\mathbf{R})] \quad (14)$$

利用式(15)进一步迭代求解 $\mathbf{R}^{k+1}$:

$$\mathbf{R}^{(k+1)} = \operatorname{argmin}_{\mathbf{R}} \sum_{i=1}^n \|\omega_i (\mathbf{R}^w \mathbf{P}_i + \mathbf{t} - \hat{\mathbf{V}}_i \mathbf{q}_i^{(k)})\|^2 \quad (15)$$

利用奇异值分解法解算式(15),定义矩阵:

$$\mathbf{M} = \sum_{i=1}^n \omega_i \mathbf{q}_i'^{(k)w} \mathbf{P}_i'^T \quad (16)$$

其中, $\mathbf{q}_i' = \mathbf{q}_i - \bar{\mathbf{q}}$, $\mathbf{P}_i'^w = \mathbf{P}_i - \bar{\mathbf{P}}$, $\bar{\mathbf{q}}$ 和 $\bar{\mathbf{P}}$ 分别为 $\mathbf{q}_i$ 和 $\mathbf{P}_i$ 的加权平均。分解 $\mathbf{M}$ 矩阵, $\mathbf{M} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^T$,

$\mathbf{R}^{(k+1)} = \mathbf{U}\mathbf{V}^T$ 。重复迭代过,直到求得的旋转矩阵 $\mathbf{R}^*$ 满足式(17),停止迭代。

$$\mathbf{R}^* = \operatorname{argmin}_{\mathbf{R}} \sum_{i=1}^n \|\omega_i [\mathbf{R}^w \mathbf{P}_i + \mathbf{t} - \hat{\mathbf{V}}_i (\mathbf{R}^{*w} \mathbf{P}_i + \mathbf{t}(\mathbf{R}^*))]\|^2 \quad (17)$$

当 n 个参考点中有 m 个权值被判定为零的参考点时,将权值为零的参考点下标记为 $\{j_1, \dots, j_m\}$, 式(11)可表示为

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \min_{\mathbf{R}, \mathbf{t}} \sum_{i \notin \{j_1, \dots, j_m\}}^{n-m} \|(\mathbf{I} - \hat{\mathbf{V}}_i) (\mathbf{R}^w \mathbf{P}_i + \mathbf{t})\|^2 \quad (18)$$

式(18)在式(6)的基础上,消除了投影误差较大的参考点,不影响全局收敛性。

2 实验结果与分析

为了验证本文提出的二值加权正交迭代算法的正确性和有效性,在 Matlab 2018a 平台下进行了仿真数据和真实数据实验,对比了 LHM^[6] 和二值加权正交迭代算法 R_LHM 的精确度和稳定性。实验中,以角距离作为旋转矩阵误差衡量标准,旋转矩阵误差 E_R 为

$$E_R = \max\{\angle(\mathbf{R}_{\text{true}}(:, i), \mathbf{R}(:, i))\} \quad (19)$$

其中, $i=1, 2, 3$, $\mathbf{R}_{\text{true}}$ 和 $\mathbf{R}$ 分别表示真值和估计值。用 $\angle(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ 计算列向量 $\mathbf{a}$ 与 $\mathbf{b}$ 的角距离,公式为

$$\angle(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \frac{180}{\pi} |\arccos(\mathbf{a}^T \mathbf{b})| \quad (20)$$

位移向量误差为

$$E = \|\mathbf{t}_{\text{true}} - \mathbf{t}\| / \|\mathbf{t}_{\text{true}}\| \quad (21)$$

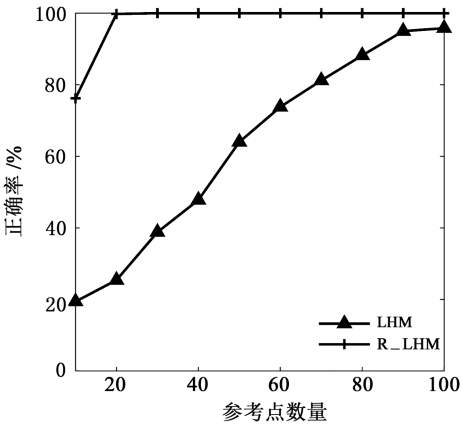
当估计结果同时满足 $E_R < 5^\circ$ 和 $E_t < 5\%$ 时,判定估计结果正确,并以此为标准统计算法正确率。

2.1 仿真实验及分析

仿真数据:随机生成 2D 像点坐标,其坐标范围为 $[0, 640] \times [0, 480]$ 。在 $[4, 8]$ 内随机生成归一化深度,利用投影模型将 2D 像点坐标扩张为相机坐标系下的 3D 参考点坐标,等效焦距为 800 像素。通过随机生成的旋转矩阵和位移向量,将相机坐标系下的坐标转换到世界坐标系,与 2D 像点形成 2D~3D 点对。参考文献[16]中异常值生成的方法,通过对随机选取的 2D 像点坐标进行重排,打乱其与对应 3D 坐标的匹配关系,模拟误匹配情况,生成异常值。设置两组实验:(1)比较异常值数量相等时, LHM 算法和本文提出的 R_LHM 算法在不同

参考点数量下的精确度和稳定度;(2)在参考点数量相等情况下,比较 LHM 算法和 R_LHM 算法在不同比例的异常值下的精确度和稳定度。

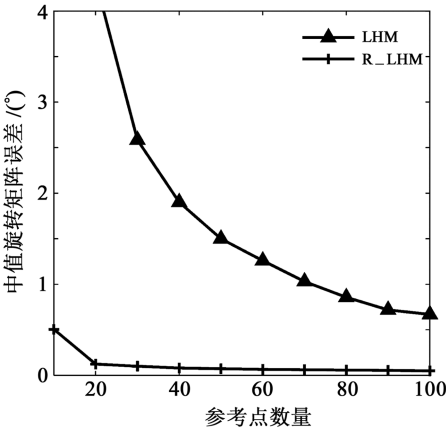
图 2 为实验 1 的仿真结果。该组实验下,参考点数量从 10 增加到 100,从中随机选取 3 个参考点,并对其像点坐标重排。由图 2 可知,LHM 算法和 R_LHM 算法的中值误差均随参考点数增加而减小。表明 LHM 算法和 R_LHM 算法在参考点数较多时,能够得到更好的估计值。当参考点数为 50 时,LHM 算法的中值旋转矩阵误差为 1.5°左右,中值位移向量误差降至 4%左右。R_LHM 算法的中值误差始终小于 LHM 算法的中值误差,当参考点数量为 10 时,其中值旋转矩阵误差约为 0.5°,中值位移向量误差约为 0.4%。从正确率来看,随着参考点数的增加,两种算法的正确率均逐渐接近 100%,其中 R_LHM 算法的正确率始终高于 LHM 算法。当参考点数为 10 时,R_LHM 算法的正确率在 78%左右,当参考点数增加到 20 时,R_LHM 算法的解算正确率达到 100%。当参考点数量为 80 时,



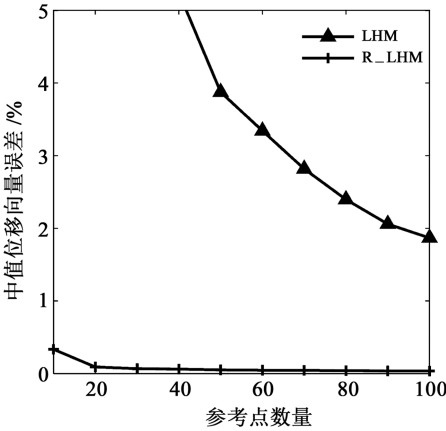
(c) 正确率
图 2 实验 1 的仿真结果

LHM 算法的正确率超过了 90%。实验证明,二值加权系统的引入有效减少了异常值对估计结果的影响。

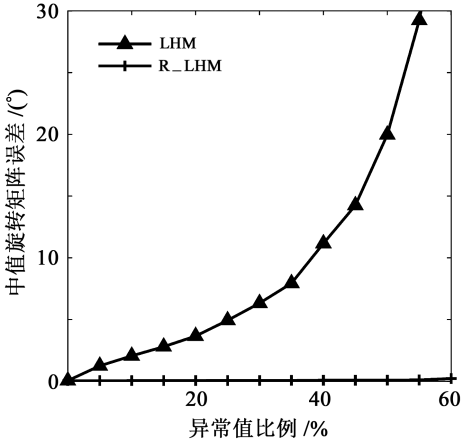
图 3 为实验 2 的仿真结果。该组实验中,参考点数量为 100 个,异常值比例从 0 以 5%为步长增加到 60%。通过图 3 可观测异常值对两种算法的影响:随着异常值比例的增加,LHM 算法的中值误差明显变大。R_LHM 算法的中值误差始终维持在较低的状态。从正确率来看,当异常值比例为 5% 时,LHM 算法的正确率为 77%左右,当异常值比例增加到 15% 时,LHM 算法的正确率降为 0。R_LHM 的正确率始终维持在 100%,直至异常值比例超过 50%。当异常值比例达到 60% 时,R_LHM 算法的正确率降至 61%左右。实验表明,在异常值比例不高于 50% 时,引入与重投影误差相关的阈值 $\max(\epsilon_{\max}, \delta_{\max})$ 对目标函数式(6)进行二值加权优化,能够有效抑制匹配误差的影响,提升算法的抗异常值能力。



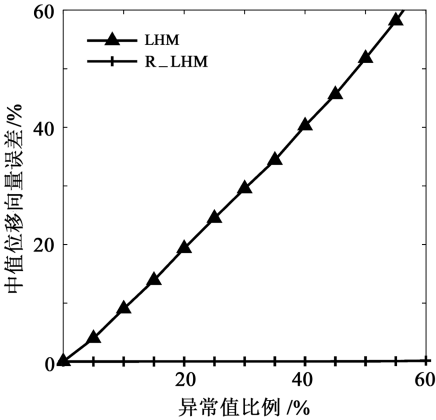
(a) 中值旋转矩阵误差



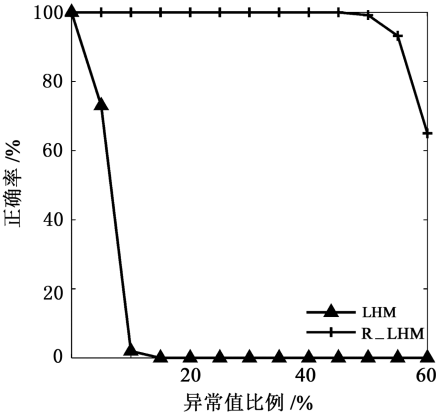
(b) 中值位移向量误差



(a) 中值旋转矩阵误差



(b) 中值位移向量误差



(c) 正确率

图 3 实验 2 的仿真结果

图 4 为参考点数为 20,异常值比例为 5%时,以式(22)为停止条件,500 组实验下迭代次数的频率。

$$\begin{cases} |E^{(k-1)} - E^{(k)}| / E^{(k-1)} \leq 10^{-5} \\ E^{(k)} \leq 10^{-8} \end{cases} \quad (22)$$

其中, $E^{(k)}$ 表示当前迭代的共线性误差, $E^{(k-1)}$ 表示前一次迭代的共线性误差。从图 4 可以看出,采用最小化二值加权的共线性误差优化函数的迭代次数主要集中在 11~16 次,迭代次数不超过 20 次。

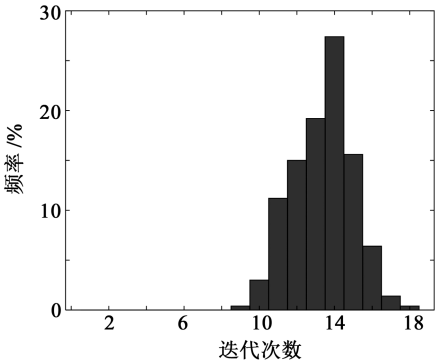


图 4 R_LHM 迭代次数

2.2 真实数据验证

为了进一步验证本文提出的二值加权正交迭代算法 R_LHM 的可行性,进一步利用真实数据对 R_LHM 和 LHM 进行了性能对比。用于测试算法性能的图片由 FUJIFILM FinePix HS35EXR 相机拍摄,分辨率为 4 608 像素×3 456 像素。

首先选取 20 个参考点的图像坐标,测量了对应的世界坐标系的 3D 参考点坐标。随机选取 2 个参考点,交换与其对应的 2D 像点坐标。分别用 R_LHM 和 LHM 算法估计相机位姿,并利用估计值将 3D 参考点重新投影到相平面。图 5 给出了原始 2D 像点(original)及 R_LHM 算法和 LHM 算法的重投影结果,可以直观地看出,R_LHM 算法的重投影像点与原始 2D 像点距离较近。

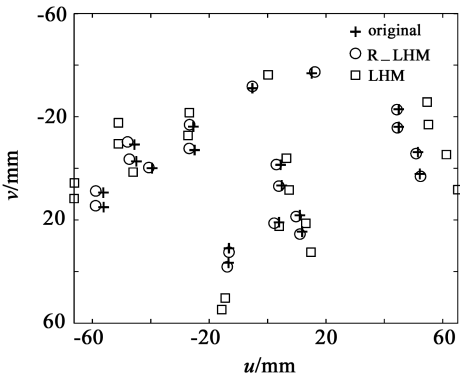


图 5 重投影结果

表 1 展示了真实数据下的重投影误差 E_{repro} 、旋转矩阵误差 E_R 和位移向量误差 E_t 。其中重投影误差取 20 个点的平均值,即:

$$E_{\text{repro}} = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} \| \hat{\mathbf{v}}_i - \mathbf{v}_i \|_2 \quad (23)$$

通过表 1 数据可以看出,在参考点中存在异常值的情况下,与 LHM 算法相比,R_LHM 算法获得了更小的重投影误差。此外,R_LHM 算法提供的位移向量误差比 LHM 算法的低了一个数量级。实验验证了 R_LHM 算法在真实数据下的抗异常值能力。

表 1 真实图像下的重投影误差、旋转矩阵误差和位移向量误差

算法	$E_{\text{repro}}/\text{mm}$	$E_R/(\text{^\circ})$	$E_t/\%$
R_LHM	1.508 2	1.220 2	2.330 5
LHM	9.080 3	5.196 7	20.099 4

3 结语

针对正交迭代算法抗异常值能力较弱的问题，提出了一种二值加权正交迭代相机位姿估计算法。该算法中的加权系统包含两个与重投影误差相关的阈值。首先选取重投影误差的四分位数中的最大值作为阈值之一，以降低重投影误差较大的参考点对算法的影响。然后引入一个与重投影误差和焦距相关的阈值，以避免异常值比例较低时，浪费参考点信息。最终选取两阈值中的最大值对目标函数进行二值加权，以降低异常值对算法的影响。在仿真数据和真实数据下，验证了本文算法能够有效处理异常值情况，具有更好的鲁棒性。

参考文献：

[1] 席志红, 李 爽, 甘兴利. PnP 算法在室内定位中的应用[J]. 无线电工程, 2017, 47(10): 39-44.

Xi Z H, Li S, Gan X L. PnP solution applied in indoor location [J]. Radio Engineering, 2017, 47(10): 39-44.

[2] 禹鑫铤, 朱熠琛, 詹益安, 等. SLAM 过程中的机器人位姿估计优化算法研究[J]. 高技术通讯, 2018, 28(8): 48-54.

Yu X Y, Zhu Y C, Zhan Y A, et al. Research on pose estimation optimization algorithm in mobile robot SLAM process[J]. High Technology Letter, 2018, 28(8): 48-54.

[3] 孙建新, 钟雷声, 张 利. 直升机着舰实时目标定位姿态预测仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36(6): 114-119.

Sun J X, Zhong L S, Zhang L. Real-time attitude prediction of helicopter landing simulation[J]. Computer Simulation, 2019, 36(6): 114-119.

[4] Moreno-Noguer F, Lepetit V, Fua P. Accurate non-iterative $O(n)$ solution to the PnP problem[C]// Proc. of 2007 IEEE 11th Inter. Conf. on Computer Vision, 2007: 1-8.

[5] Wang P, Xu G L, Cheng Y H, et al. A simple, robust and fast method for the perspective-n-point problem[J]. Pattern Recognition Letters, 2018,108(1): 31-37.

[6] Pribyl B, Zemcik P, Cadik M. Camera pose estimation from lines using plucker coordinates[C]// Proc. of British Machine Vision Conf. , 2015: 1-12.

[7] Lu C P, Hager G D, Mjolsness E. Fast and globally convergent pose estimation from video images [J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2000, 22(6): 610-622.

[8] Peng C. An iterative camera pose estimation algorithm based

on EPnP[C]// Proc. of 2017 Chinese Intelligent Automation, 2017: 415-422.

[9] Zhou K, Wang X J, Wang Z, et al. Complete initial solutions for iterative pose estimation from planar objects[J]. IEEE Access, 2018, 6: 22257-22266.

[10] 李丽媛, 李文韬, 许海燕, 等. 基于正交迭代的参考点不确定相机位姿估计[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(1): 251-259.

Li L Y, Li W T, Xu H Y, et al. Camera pose estimation with uncertain reference point based on orthogonal iterative [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(1): 251-259.

[11] Shi D C, Dong X C, Zheng Y. An improved orthogonal iterative algorithm for monocular camera pose estimation [C]// Proc. of Inter. Conf. on Artificial Intelligence and Computer Science, 2017: 233-242.

[12] 李 鑫, 龙古灿, 刘进博, 等. 相机位姿估计的加速正交迭代算法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 258-265.

Li X, Long G C, Liu J B, et al. Accelerative orthogonal iteration algorithm for camera pose estimation[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 258-265.

[13] 苏建东, 齐晓慧, 段修生. 基于单目视觉和棋盘靶标的平面姿态测量方法[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 211-221.

Su J D, Qi X H, Duan X S. Plane pose measurement method based on monocular vision and checkerboard target[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 211-221.

[14] Abdel-Aziz Y I, Karara H M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2015, 81(2): 103-107.

[15] 王卫文, 杨 威, 罗 剑, 等. 一种新的相机外参数标定方法[J]. 半导体光电, 2014, 35(6): 186-189.

Wang Weiwen, Yang Wei, Luo Jian, et al. A new calibrating method of camera external parameters [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(6): 186-189.

[16] Zhao J T, Zhang S P, Zhang D L, et al. A new calibrating method of camera external parameters[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(5): 843-848.

[17] Xu C, Zhang L, Cheng L, et al. Pose estimation from line correspondences: A complete analysis and a series of solutions[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2017, 39(6): 1209-1222.

作者简介：

陈紫强(1973—),男,湖南沅江人,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为视频信号处理。

基于面阵三维成像激光雷达的目标点云分割技术

王盛杰^{1,2,3}, 刘 博^{1,3*}, 李和平², 陈 臻^{1,3}, 吕升林⁴

(1. 中国科学院空间光电精密测量技术重点实验室, 成都 610209; 2. 电子科技大学 光电科学与工程学院, 成都 611731;
3. 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209; 4. 空军装备部驻成都地区第五军事代表室, 成都 610000)

摘 要： 针对偏振三维成像系统的高效目标三维点云分割问题,提出一种多维信息融合的高效分割理念。系统采用高分辨率 EMCCD 相机作为面阵探测器,在一次成像过程中,可同时获得视场中的灰度图像以及三维点云数据。根据该成像特点,建立灰度图的像素坐标与点云数据像素坐标之间的点对点映射关系,结合粒子群优化算法的边缘分割方法,将灰度图中目标分割后的坐标信息映射到三维点云数据中,得到其三维点云数据。该方法将三维点云数据降维处理为二维图像处理,显著降低了计算复杂度,避免了点云数据误差对分割精度造成的影响。实验验证了多维数据融合目标三维点云分割方法的有效性。

关键词： 面阵激光雷达; 偏振调制; 数据融合; 粒子群优化算法; 点云分割

中图分类号: TN958.98 **文章编号:** 1001-5868(2020)05-0749-08

Point Cloud Segmentation Method Based on Planar Array 3D Imaging Lidar System

WANG Shengjie^{1,2,3}, LIU Bo^{1,3}, LI Heping², CHEN Zhen^{1,3}, LV Shenglin⁴

(1. Key Laboratory of Science and Technology on Space Optoelectronic Precision Measurement of the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN; 2. School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, CHN; 3. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN;
4. The Fifth Military Representative Room of the Air Force Equipment Department in Chengdu, Chengdu 610000, CHN)

Abstract: Aiming at the problem of efficient target 3D point cloud segmentation in polarization-modulated 3D imaging system, an efficient segmentation concept of multi-dimensional information fusion is proposed. The system uses a high-resolution EMCCD camera as a planar array detector, during an imaging cycle, the gray image in the field-of-view and the 3D point cloud data can be obtained simultaneously. According to the imaging characteristics, the point-to-point mapping relationship between pixel coordinates of gray image and pixel coordinates of point cloud data is established. Combining with the image edge segmentation method by using particle swarm optimization algorithm, the coordinate information of the target after segmentation is mapped to the 3D point cloud data, so its 3D point cloud data is obtained. In this method, 3D point cloud data processing is reduced to 2D image processing, which significantly reduces the computational complexity and avoids the influence of distance noise on segmentation accuracy. The effectiveness of the method is verified by experiments.

Key words: planar lidar; polarization-modulation; data fusion; particle swarm optimization algorithm; point cloud segmentation

0 引言

激光探测与测距(Lidar)系统可以生成场景三维结构的三维表示,而面阵三维成像激光雷达被认为是获取高密度三维空间信息的领先技术。当前面临的挑战是系统如何在保持高速、高分辨率三维成像的同时,兼具实时点云数据处理能力^[1-2]。

基于偏振调制的面阵三维成像激光雷达利用两台电子倍增电荷耦合器件(EMCCD)摄像机采集激光照射到目标后的回光,其偏振状态由电光调制器(EOM)调制。使用偏振调制图像(包括 $\cos^2$ 调制图像和 $\sin^2$ 调制图像)重建深度图像^[3]。该系统的优点是简化了远程成像的数据采集,使偏振调制的三维成像系统不仅可以提高动态三维成像的性能,而且可以提供高分辨率的成像效果($1\,024\times 1\,024$ 像素或更高)。这为后续任务中高分辨率视场的点云数据获取以及处理(如目标点云分割、目标姿态测量)提供了硬件基础。

但在实际应用中,由于成像环境背景复杂、目标结构存在多样性、点云数量多,从三维激光成像数据中提取有价值的空间信息十分困难和耗时。点云分割是指将点云数据中具有相同或相似属性和相邻空间位置的点通过一定的方法进行分类。它可以分割单帧点云或点云模型。近十年来,三维点云激光数据的常用分割方法主要有基于边缘的分割算法、基于区域的分割算法和基于聚类的分割算法。

基于边缘的分割算法分为边缘检测和边界内点聚类两个步骤。通过对边缘梯度的区分勾勒出不同点云区域的边界,再对边界内包含的点分组聚类,实现对不同区域点云的分割^[4]。点云数据中边缘的确定,是由局部表面点云属性的变化超过给定的阈值来定义的。常用的局部表面性质是法向量、梯度、主曲率或高阶导数。这类方法的优势是可以实现快速分割,并且算法简单。但是在实测点云数据中,难免会出现由噪声异常值导致点云分布不均匀的情况,从而产生分割误差。受噪声的影响,点云模型的边缘定位精度较差,会导致将无关物体的边缘认定为相同目标的边缘并进行识别,因此对识别闭合的线段效果较差^[5]。

基于区域的分割算法从点云中具有结构特征点(种子点)开始,向周边具有相似结构特征的邻点生长,如法向量、点曲率等^[6]。基于区域的分割算法包含区域增长算法和分层分解算法。区域增长算

法:选择种子点,并根据给定的相似标准生长片区,直到没有连续的点集加入。区域生长方法受种子点选择的影响较大,起始特征点选择时若受噪声影响,得到错误的点云结构特征,会导致分割过程出现误差,产生分割不足或过度分割的结果;分层分解算法:假设所有属于同一个目标的点云通过八叉树^[6]或KD-tree^[7]采用层次法分解获得的分割结果不同的细节。该方法在三维点云分割中应用广泛,实现简单,但鲁棒性较差,另外受多个分割评价标准的影响,导致其计算时间较长,不适合实时成像数据处理^[8]。基于区域的算法利用点云的结构特征信息,因此对噪声的鲁棒性优于基于边缘的算法,然而,起始点云区域的位置,以及目标边界点法线和曲率的计算精度都会对分割结果造成影响。

基于聚类的分割算法是对特征参数点云的分组。文献[9-10]分别采用均值漂移聚类和模糊聚类来实现对点云模型的分割,以及基于高斯混合模型聚类对三维点云的法向量进行聚类。 K -means也是一种常用的处理方法,它结合随机采样一致性(RANSAC)算法对每个簇进行平面拟合,即可完成对特殊需求点云结构的分类提取^[11]。基于聚类的分割方法的优点是鲁棒性好,不需要搜索点或区域。但是,当点云数据量非常大时,分割计算量会很大,连续的边界点检测效果不佳,并且,当使用RANSAC方法提取目标中的特定成分时,必须先给定合适的容忍误差和指定的迭代次数作为收敛条件,而非合作目标并不具备这些先验知识。因此,该方法不适用于面阵三维成像系统的目标分割。

偏振调制的面阵三维成像激光雷达采用高横向分辨率的EMCCD相机作为探测器,每一个像素可以捕获位于该像素的光强信息,并通过对激光反射回光的偏振态进行调制,通过光强信息解算出该像素位置上目标的距离。因此,首先基于EMCCD相机成像结果,建立二维灰度图与三维点云数据在探测器接收面上的像素位置映射关系,从而将三维点云数据处理的问题降维到二维数据处理中,通过降低维度的思想减少算法复杂度和数据处理时间。得益于探测器的高横向分辨率,分割精度能够得到保障。然后,利用粒子群优化算法对灰度图中的目标边缘进行识别检测,并将边缘内部数据作为目标主体区域进行分割,以将目标从其他外部干扰物体中分割出来。最后输入灰度图,得到粗分割后的目标主体部分,将二维分割后目标的坐标映射到三维点

云数据中并显示出来,即可获得分割后仅包含目标主体部分的三维数据。

1 研究方法

1.1 偏振调制三维成像系统

基于偏振调制的高分辨率面阵三维成像系统由光发射部分、光接收部分以及上位机处理部分组成。其中发射部分包括脉冲激光器、扩束镜和两台反光镜;接收部分由望远镜、分光棱镜(PBS)、两部电光晶体、高压电源以及两台 EMCCD 相机构成;控制部分选用 DG535 数字延时脉冲发生器用以同步控制信号,实现同步控制激光器发射频率、电光调制器电压增益时间以及距离选通的晶体回光通断时间。其系统原理图如图 1。

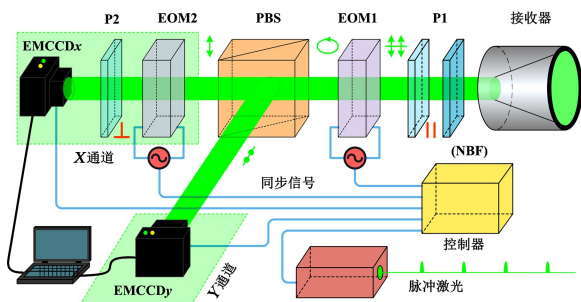


图 1 面阵激光三维成像系统原理图

可实现基于偏振调制的面阵三维成像的系统框架及工作流程如下:

首先,选用 532 nm 波段的激光作为照明光源,脉冲激光拥有低重复率(10 Hz)、高脉冲能量(200 mJ)、短脉冲持续时间(8 ns)。当线偏振光照射到目标上时,它会被物体反射或散射。系统中的 Cassegrain 望远镜作为接收器,接收到的回光通过中心波长为 532 nm 的窄带滤光器(NBF),该滤光器用于滤除阳光和任何其他光源的背景辐射。回光经过准直后,通过起偏器(P1,平行于发射光的线性偏振光,在图中用符号“||”表示)使回光变为线偏振光,并以一定的角度入射到电光调制器(EOM1),在其上施加一个斜坡电压,相位延迟将与电压成正比。

线偏振回光以一定角度入射到电光调制器(EOM1)之前,返回光的强度相较于发射的激光强度会减弱:

$$I_{\text{REC}}(\rho) = \alpha I'_{\text{REC}}(\rho) \quad (1)$$

其中, $I_{\text{REC}}(\rho)$ 为经过线性偏振器 P1 的返回光强度, $I'_{\text{REC}}(\rho)$ 为接收器接收到的返回光强度, α 为衰减系数。

接下来,回光入射进电光晶体 EOM1 后,给电光晶体(EOM1)施加随时间 t 单调递增的线性调制电压 $V(t)$,在时间范围 T_G 内,将施加于电光晶体的电压从 0 V 线性上升为半波电压 V_π ,此时系统的有效测距范围 L 以及调制电压 $V(t)$ 在该周期内的表达式如下:

$$\begin{cases} L = \frac{1}{2}c \cdot T_G \\ V(t) = \frac{V_\pi}{T_G}t, \quad 0 \leq t \leq T_G \end{cases} \quad (2)$$

式中, c 为光速。由于晶体的电光效应,线偏振光将发生与电压成正比关系的相位延迟,将线性偏振光转化为椭圆偏振光^[12]。相位差 θ 可以写成随时间线性变化的电压 $V(t)$ 的关系函数:

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{63} V(t) \quad (3)$$

式中, λ 是激光束的波长, n_0 为晶体的折射率, γ_{63} 为晶体电光系数。因此可将相位差 θ 改写成与调制电压 $V(t)$ 相关的函数:

$$\theta(t) = \pi \frac{V(t)}{V_\pi}, \quad 0 \leq V(t) \leq V_\pi \quad (4)$$

随后,利用偏振光束分离技术,将两个相互垂直且有一定相位差的偏振光(椭圆偏振光)经过偏振分光棱镜(PBS)后,将椭圆偏振光分成两个正交的偏振光分量:p 偏振光和 s 偏振光。分别使用两部 EMCCD 摄像机在两条分光路径上来检测 p 偏振光和 s 偏振光。p 偏振光通过 X 通道到达 EMCCD_x 被其接收, s 偏振光分别反射到 Y 通道和到达 EMCCD_y。输出的两路光强表达式写为^[13]

$$\begin{cases} I_X(\rho, t) = I_{\text{REC}} \cdot \cos^2 \left[\frac{\theta(t)}{2} \right] \\ I_Y(\rho, t) = I_{\text{REC}} \cdot \sin^2 \left[\frac{\theta(t)}{2} \right] \end{cases} \quad (5)$$

式中, I_{REC} 表示返回光的光强, I_X 和 I_Y 是经过 PBS 分光棱镜后,偏振光的两束分量 p 偏振调制和 s 偏振调制分量的光强度,并且两束偏振光分量是互补的。对同一个目标,它们拥有相同的目标反射率和相同的时间差 t 。在双摄像头结构中,透射到 X 通道的光强 $I_X(\rho, t)$ 与透射到 Y 通道的光强 $I_Y(\rho, t)$ 的强度总和为

$$I_X(\rho, t) + I_Y(\rho, t) = I_{\text{REC}}(\rho, t) \quad (6)$$

其中, $I_{\text{REC}}(\rho, t)$ 是回光的光强,等于两个通道光强之和。对非合作目标而言,目标表面的反射率 ρ 是未知的,但通过式(7)可以消除目标反射率这一未知

量,从而得到电光晶体经电压调制的时间 t 与两个通道接收到的偏振分量 $I_X(\rho, t), I_Y(\rho, t)$ 的关系:

$$\tan^2 \left[\frac{\theta(t)}{2} \right] = \frac{I_X(\rho, t)}{I_Y(\rho, t)} \quad (7)$$

作为间接面阵三维成像系统,利用接收到的已知信息 $I_X(\rho, t), I_Y(\rho, t)$ 与相位差 $\theta(t)$ 的关系,以及调制电压 $V(t)$ 与时间 t 的关系,则可由以上公式共同推导目标距离 D 与时间 t 的关系:

$$\begin{cases} L = \frac{1}{2}c \cdot T_G, & 0 \leq t \leq T_G \\ \theta(t) = \pi \cdot \frac{V(t)}{V(\pi)}, & 0 \leq t \leq T_G \\ \tan^2 \left[\frac{\theta(t)}{2} \right] = \frac{I_X(\rho, t)}{I_Y(\rho, t)} \\ V(t) = \frac{V_\pi}{T_G} \cdot t, & 0 \leq t \leq T_G \\ D = \frac{1}{2}c \cdot t \end{cases} \quad (8)$$

可以根据上述公式实现三维重建,得到激光雷达系统与目标之间的距离 D :

$$D = \frac{2L}{\pi} \arctan \sqrt{\frac{I_Y(\rho, t)}{I_X(\rho, t)}} \quad (9)$$

该技术最大的优点是可以利用一对 EMCCD 相机进行超分辨率的三维成像,将调偏后的一帧图像重建成一帧三维图像。

1.2 多维数据融合模型的建立

要实现实时目标点云数据处理,如何快速准确

$$\begin{bmatrix} g_{1 \times 1} & g_{1 \times 2} & \cdots & g_{1 \times 1024} \\ g_{2 \times 1} & g_{2 \times 2} & \cdots & g_{2 \times 1024} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ g_{1024 \times 1} & g_{1024 \times 2} & \cdots & g_{1024 \times 1024} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} r_{1 \times 1} & r_{1 \times 2} & \cdots & r_{1 \times 1024} \\ r_{2 \times 1} & r_{2 \times 2} & \cdots & r_{2 \times 1024} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{1024 \times 1} & r_{1024 \times 2} & \cdots & r_{1024 \times 1024} \end{bmatrix}$$

因此,对本系统来说,激光雷达测距阵列探测器和 CCD 灰度阵列探测器共享同一个面阵像素矩阵,这样就很容易得到每个点的位置坐标。基于该映射模型,可以将三维数据处理问题降维到二维数据处理中,再通过映射关系得到三维信息。

1.3 基于粒子群算法的边缘检测

粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 的基本思想是初始化随机位置和速度的粒子群后,通过迭代得到并跟踪当前群中的最优粒子,并令所有粒子在解空间中全局搜索,直到找到全局最优解,在下次迭代的过程中,所有粒子的位置都向全局最优解逼近^[14]。

假设在 N 维空间中,粒子群中的第 i 个粒子由

地从复杂背景中分割目标是一个非常关键的步骤。通过融合二维图像和三维点云来解决大规模三维场景的目标分割问题,处理思路如下:

首先,根据面阵三维成像系统的结构特征优势,建立二维图像与三维点云数据融合模型,确定图像与点云之间的坐标映射关系,实现将二维图像的初步分割结果映射到三维点云,得到目标点云的粗分割结果;其次,提出基于粒子群优化的灰度阈值图像分割方法,在提高分割精度的同时,减小数据计算量、降低算法复杂度;最后,基于映射得到的目标三维点云分割结果,提取目标的精细特征,得到表征目标结构清晰的三维点云数据。

基于偏振调制的面阵三维成像系统,EMCCD 相机是一种在帧传输 CCD 的基础上增加输出寄存器的特殊结构电荷耦合器件。在面阵三维成像系统工作的过程中,入射到 EMCCD 中的回光光子会被每一个位置的像素接收并转化成电子。

同时, X 通道和 Y 通道的回光强度存在互补关系,分别对两个通道 EMCCD 面阵接收到的光强相加可解调出视场的回光光强,每个像素的光强组成灰度图 $G^{\text{pixel}} = [g_{m \times n}; (m, n = 1, 2, \dots, 1024)]$ 。而根据上文对偏振调制三维成像的介绍,作为间接三维成像系统,可以通过光强解算出每个像素位置上的距离 $R^{\text{pixel}} = [r_{m \times n}; (m, n = 1, 2, \dots, 1024)]$ 。所以,灰度图中每一个像素的光强值对应了该位置的距离值。

n 维向量 $\mathbf{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN})$ 表示,粒子群中所有位置上最好的粒子用 g 表示,第 i 个粒子的最佳位置(即给出最佳函数值的位置)用 X 表示,并且第 i 个粒子的位置的改变速度用 $\mathbf{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN})$ 表示。

粒子按照如下方程进行操作,式中的上标表示迭代的次数:

$$V_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 \times \text{rand}_1(0, 1) \times (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \times \text{rand}_2(0, 1) \times (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (10)$$

$$x_{id} = x_{id} + \xi v_{id} \quad (11)$$

上式中的几个变量对粒子群算法的速度位置更新公式有重要影响:

ω 为保持粒子原速度的系数,称为惯性因子,

其值为非负数,且该值越大,全局寻优能力越强;

c_1, c_2 为两个正值的加速常数, c_1 是粒子跟踪自己历史最优值的权重系数,该系数表示某粒子对本体的认识,称为粒子的个体认知参数; c_2 是粒子跟踪群体最优值的权重系数,它表示某粒子对群体知识的认识,称为社会参数^[15]。通常情况下取 $c_1 = c_2 \in [0, 4]$ 时可以获得较好的解,对于本系统所采集的图像,取 $c_1 = c_2 = 2$; $rand_1, rand_2$ 表示在 $(0, 1)$ 范围内均匀分布的两个随机数;

ξ 为算法在更新位置时,速度前加的系数,称为约束因子^[16],通常设为 1。

以上即为标准粒子群算法更新的全过程,除变量外, p_{id}^k 表示粒子群中第 i 个变量在第 d 维下的个体极值; p_{gd}^k 表示在第 d 维下的全局最优解。一些以该方法为基础的改进粒子群算法采用最大允许速度 $V_{\max}$ 最大值来防止粒子群过大,即当 $v_{id}^{k+1} \geq V_{\max}$ 时,令 $v_{id}^{k+1} = V_{\max}$ 。

式(10)用于计算第 i 个粒子在每次迭代时的速度。在迭代过程中需要考虑三个条件:首先, v_{id}^k 是粒子先前的速度;其次, $p_{id}^k - x_{id}^k$ 为粒子的最佳先前位置与当前位置之间的距离;最后, $p_{gd}^k - x_{id}^k$ 是粒子群最佳体验与第 i 个粒子当前位置之间的距离。在算法更新过程中,粒子同时跟踪个体最优位置解 P_{best} 和全局最优位置 G_{best} 来改变自己的位置和预速度,称为全局标准粒子群优化算法^[17]。

当粒子的位置和速度更新后,对第 i 个个体最优位置解 P_{best} 和全局最优位置 G_{best} 符合以下更新规则:

$$i\text{best}_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^{t+1}, & \text{if } f(X_i^{t+1}) < f(i\text{best}_i^t) \\ i\text{best}_i^t, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

$$g\text{best}_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^{t+1}, & \text{if } f(X_i^{t+1}) < f(g\text{best}_i^t) \\ g\text{best}_i^t, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

根据实践经验,全局粒子群算法对每个粒子速度的更新,是由粒子个体最优值 P_{best} 和粒子群体全局最优值 G_{best} 决定的。

图像边缘上的像素具有相似或相同的强度。本文利用了曲线的两个因素:一方面是同质性和均匀性,另一方面,曲线边界的强度是由梯度大小来衡量的。

比较常用的边缘检测算法是同质性算子^[20],它

从 3×3 个窗口的中心像素中减去 8 个周围像素,如图 2 所示。

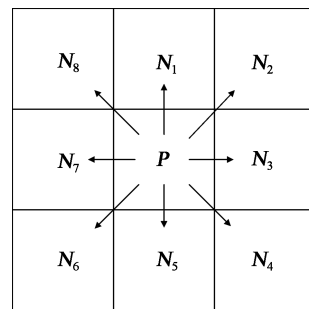


图 2 同质性运算符

$$H_p = \begin{cases} \max\{|I_p - I_{N_i}|, i = 1, 2, \dots, 8\} > \text{threshold} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (14)$$

在式(14)中, H_p 为像素的同质性表达式, p 为计算 H_p 值后得到的特定像素, N_i 是像素 p 的第 i 个邻域像素, I_p 是像素 p 的灰度强度值, 阈值根据 EMCCD 相机灰度值分布决定, 此处 在 0 到 255 之间。

边界曲线上的同质性是用来描述像素的性质均匀性的属性。该因子为曲线上像素同质性的平均值, 每个像素的同质性由式(15)计算:

$$H_c = \frac{1}{l_c} \sum_{P_i \in C} H_{P_i} \quad (15)$$

式中, P_i 为边界曲线 C 上的第 i 个元素, H_{P_i} 由式(16)计算得到, l_c 是边界曲线 C 的长度, 可以写为

$$l_c = \sum_{P_i \in C} \begin{cases} 1 & dP_i \perp \text{ or } \parallel \\ \sqrt{2} & \text{else} \end{cases} \quad (16)$$

其中, 当结果为 1 时, P_i 为垂直或平行的状态, 否则为 $\sqrt{2}$ 。

均匀性代表了这些像素点在曲线上的强度相似性, 曲线上的像素具有相似的强度, 因此我们提出了一种描述方法来测量所有曲线的相似度:

$$U_c = \frac{1}{l_c} \sum_{i=1}^{l_c-1} |I_{P_{i+1}} - I_P| \quad (17)$$

平均梯度幅值表示曲线的强度。如果曲线表示一条边, 则其平均梯度大小将大于阈值。平均梯度幅度定义为

$$G_c = \frac{1}{l_c} \sum_{i=1}^{l_c} G_i \quad (18)$$

式中, G_i 为第 i 个像素在曲线 C 上的梯度大小。

在构造粒子群优化算法的目标函数时, 本章构

造了一个具有同质性、均匀性和平均梯度幅值的目标函数：

$$f_c = \begin{cases} (H_c + G_c - U_c) \cdot l_c, & H_c \geq \text{threshold} \\ -\infty, & \text{else} \end{cases}$$

(19)

粒子群优化算法应用于目标边缘检测的目的是找出 f_c 值最大且 G_c 值大于阈值的最佳边缘曲线。

边缘检测是识别和定位图像中梯度不连续点的过程。这些不连续性表示像素强度的变化,而像素强度是图像中物体边界的特征^[18]。可通过图像的梯度幅值识别并检测目标边缘。对像素 $P(i,j)$ 采用有限差分法求微分：

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial x} = f(i,j) - f(i-1,j) \\ \frac{\partial f}{\partial y} = f(i,j) - f(i,j-1) \end{cases}$$

(20)

因此,像素 $P(i,j)$ 的梯度大小可以表示为

$$\text{grad}(P(i,j)) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}$$

(21)

将梯度幅值为非零的像素作为边缘曲线的候选像素^[19]。通过这种方法可以提高处理速度。而基于自适应粒子群优化的目标边缘分割方法利用粒子群优化算法找到边缘分割阈值的近似最优解,从而得到近似最优的分割结果。边缘分割步骤如下：

步骤 1: 根据图像像素灰度值,计算图像梯度 g ,找到所有非零的像素,进行排序并归纳入矩阵 A ;

步骤 2: 对矩阵 A 中梯度最大的像素值进行自适应粒子群优化算法处理,得到适应度曲线 C ;

步骤 3: 根据计算出的平均梯度幅度阈值,判断曲线 C 是否是目标的边缘,如果是,则标记这条曲线;

步骤 4: 如果步骤 3 中的曲线 C 被判断为属于目标边缘,则清除像素的边缘梯度 g ,重新开始一个新的排序矩阵 A ;如果新矩阵 A 中梯度最大的像素没有被标记为边缘,则重复步骤 2~4,直到最大梯度小于阈值时停止。

2 实验结果与分析

由于实验系统组成复杂,激光装置体积大,目前只能将三维成像系统固定在实验室光学平台上。由于实验环境的限制,实验目标被放置在距离成像系统约 1 km 的居民楼屋顶上。三维成像的实验装置

如图 3 所示,强度图像和深度图像将在单脉冲周期内进行重建。在工作过程中,使用分辨率为 $1\,024 \times 1\,024$ 像素的双 EMCCD 相机分别在通道 X 和 Y 中积累返回光。三维成像系统的参数如表 1 所示。



图 3 面阵激光三维成像系统平台及成像环境

表 1 面阵激光三维成像系统参数

系统参数	值
波长/nm	532
脉冲能量/mJ	200
脉冲耐时/ns	8
时帧率/Hz	1
分辨率/pixel	$1\,024 \times 1\,024$
孔径/mm	200

激光雷达系统采用 EMCCD 相机作为探测器,可以同时捕获视场中物体的三维特征和灰度图像,如图 4 所示,利用该系统能够通过图像处理完成点云分割。为了证明基于多维数据融合的点云分割方法对远程目标点云分割的准确性和效率,在相同的实验数据基础上,将该方法与上述介绍的传统点云分割方法对相同的数据进行了比较。

图 4 展示了多维数据融合方法的三维点云目标分割各步骤的效果。其中,图 4(a)为实验环境下通过 EMCCD 相机采集的视场灰度(光强)图像;图 4(b)针对 EMCCD 高离散灰度值的特点,采用自适应粒子群优化算法(PSO)完成粗分割,但仍然存在其他拥有相近灰度值物体的干扰,无法准确定位目标的像素坐标;图 4(c)中 PSO 算法分割后的二值图像可以很好地保留目标的二值图像,消除其他物体灰度对像素的干扰,从灰度图中分割出目标并准确定位目标的像素坐标;图 4(d)为面阵三维成像激光雷达通过偏振调制得到图 4(a)相同视场的深度图,其中颜色表示每个像素的距离。可以看出,目标箱子与面阵三维成像系统之间的距离为 $940 \sim 945$ m;并且在成像视场中除目标箱子外,还存在背后的倚靠箱体、栏杆、墙体等其他物体;图 4(e)为将深度图转换为三维点云图的方式表达,在目标未分

割之前,视场中的点云数据不仅包括目标箱子,还包括栏杆、墙壁等其他物体的点云数据;图 4(f)中通过 PSO 算法将灰度图中分割的目标坐标位置映射到相应的点云数据中,即可得到目标点云的数据信息,从复杂的背景中准确有效地分割出目标点云。证明了该方法在复杂背景下完成三维目标分割的可行性和鲁棒性。

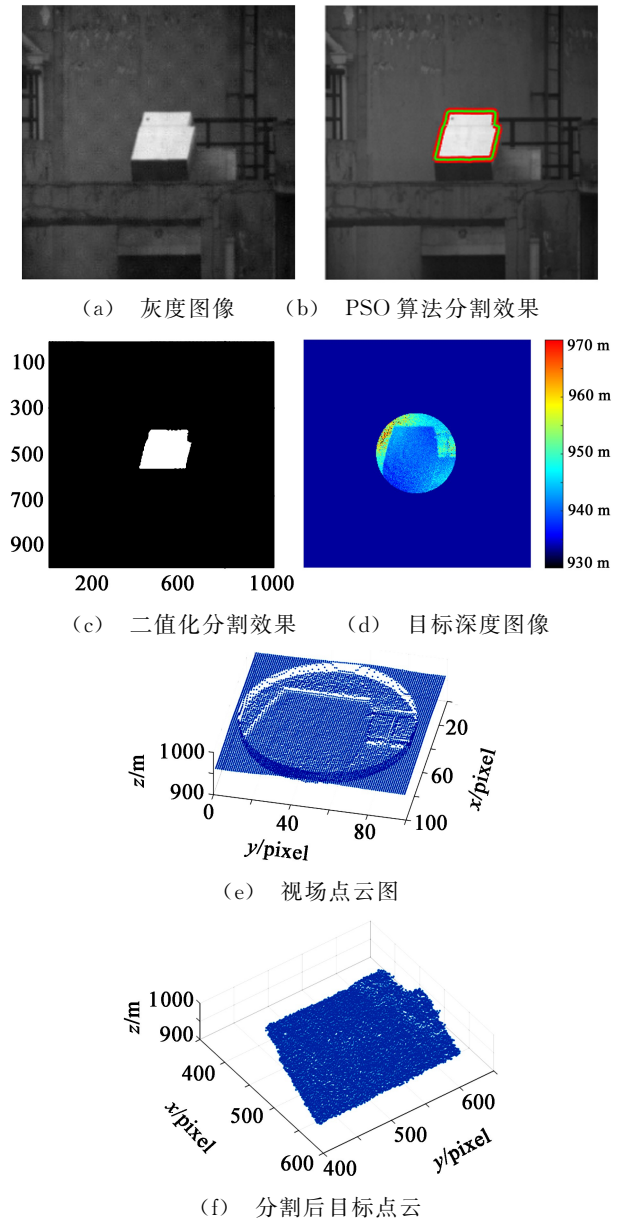


图 4 偏振调制三维成像激光雷达数据

利用图像灰度特性进行分割的优势在于算法实现简单、实用性强且应用范围广;缺点是当图像中存在目标灰度差异不明显,或视场中不同物体的灰度范围值有重叠时,难以得到准确的分割结果。然而,并没有任何算法适用于所有的场景,因此需要根据

应用环境的不同对算法阈值进行调整。本方法可以最大程度地分割出目标的主体部分,虽然根据情况的不同会产生部分信息的丢失,但在大幅提升算法运行效率的同时保证了主要信息的完整。

为了证明本方法在远程目标云分割效率上的优势,在相同的实验数据基础上,将该方法与引言中提到的传统点云分割方法进行了比较。在四种算法耗时比较中,使用了 MATLAB 中的下采样函数,将点云和图像数据按 10%~100% 采样,比较不同状态下数据在目标上的时间消耗。计算中使用的计算机配置为 Intel(R),Core(TM),i5-4200CPU @ 2.80 GHz, 4 GB RAM。

从图 5 中的绿色曲线可以看出,边缘分割算法的时间消耗是比较稳定的。随着点云数量的增加,算法稳定在 3~5 s 左右,不仅分割精度低,而且不能满足实时性要求。区域增长分割算法如图 5 中的蓝色曲线所示,当点云数量较少时,算法效率较高,但随着点云数量的增加,算法耗时较长,不适合实时数据处理。红色曲线表示聚类分割算法的时间,虽然分割效果可以接受,但是时间太长,只能用于点云后处理。本文提出的基于图像的分割方法不受三维数据的影响,只需要处理二维数据,因此算法的时间复杂度较低。从图 5 的青色曲线可以看出,本文算法的时间是稳定的,平均时间只有 0.72 s,有利于该算法在后续点云实时数据处理中的应用。

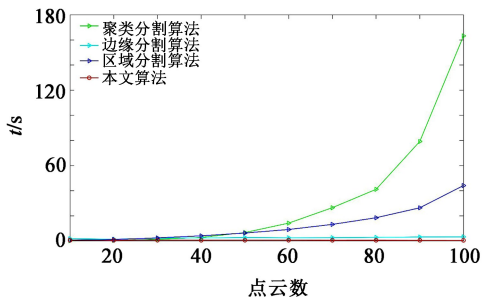


图 5 不同分割算法在不同点云数下的算法耗时

3 结论

得益于新颖的偏振调制三维成像方法,利用系统中的 EMCCD 相机作为平面阵列探测器,在单帧拍摄的过程中,同时获得了视场的灰度图像和三维点云数据。在此基础上,建立了激光测距值与图像像素之间的相关模型。提出点云分割思想,将三维数据处理降维为二维数据处理。该方法将算法复杂度降低了一个数量级,大大提高了点云分割的效率。

另外,由于 EMCCD 相机的高水平分辨率,分割效果也非常好。

这种分割方法的主要优点是适用于调偏的三维成像系统,可以大大减少数据量,显著提高鲁棒性。同时,该方法避免了点云数据误差造成的分割精度差、分割误差大的问题。该方法具有很大的潜力,只需稍加修改就可以应用于不同的环境,为点云数据的实时处理提供了可能。

参考文献:

[1] McManamon P F. Review of ladar: A historic, yet emerging, sensor technology with rich phenomenology[J]. Opt. Eng. , 2012, 51(6): 1-14.

[2] Chen Z, Liu B, Wang S, et al. Efficient subpixel registration for polarization-modulated 3D imaging[J]. Opt. Express, 2018, 26: 23040.

[3] Wang Shengjie, Liu Bo, Chen Zhen, et al. High-precision calibration algorithm for large field-of-view polarization-modulated 3D imaging[J]. IEEE Photon. Technol. Lett. , 2019, 31: 1064-1067.

[4] 宋立鹏. 室外场景三维点云数据的分割与分类[D]. 大连: 大连理工大学, 2015: 22-25.

Song Lipeng. Segmentation and classification of outdoor scene 3D point cloud data [D]. Dalian: Dalian University of Technol. , 2015: 22-25.

[5] 刘晓妮. 基于超体素的三维数据分割方法研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2019: 39-49.

Liu Xiaoni. Research on 3D data segmentation based on ultramarine[D]. Jilin: Jilin University, 2019: 39-49.

[6] 邵正伟, 席平. 基于八叉树编码的点云数据精简方法[J]. 工程图学学报, 2010, 31(4): 79-82.

Shao Zhengwei, Xi Ping. Data reduction for point cloud using octree coding[J]. J. of Engineering Graphics, 2010, 31(4): 79-82.

[7] Miller F P, Vandome A F, MCBrewster J. KD-Tree[M]. USA: Alpha Press, 2009.

[8] 陈国军, 孔李燕, 张清伟, 等. 基于 RGB-D 三维点云目标分割[J]. 计算机技术与发展, 2018, 28(12): 38-42.

Chen Guojun, Kong Liyan, Zhang Qingwei, et al. 3D point cloud target segmentation based on RGB-D data[J]. Computer Technology and Development, 2018, 28(12): 38-42.

[9] 曹晓叶, 王知衍, 梁英宏, 等. 基于均值漂移聚类的点模型简化方法[J]. 计算机应用, 2008, 28(4): 963-965.

Cao Xiaoye, Wang Zhiyan, Liang Yinghong, et al. A point

model simplified method based on mean-shift clustering[J]. J. of Computer Applications, 2008, 28(4): 963-965.

[10] 张敏, 于剑. 基于划分的模糊聚类算法[J]. 软件学报, 2004, 15(6): 858-868.

Zhang Min, Yu Jian. Fuzzy clustering algorithm based on partition[J]. J. of Software, 2004, 15(6): 858-868.

[11] Hartigan J A, Wong M A. A K-means clustering algorithm[J]. Appl. Stat. , 1979, 28(1): 100-108.

[12] Steier W H, Chen A, Lee S-S, et al. Polymer electro-optic devices for integrated optics[J]. Chemical Phys. , 245(1/3): 487-506.

[13] Chen Z, Liu B, Liu E H, et al. Adaptive polarization-modulated method for high resolution 3D imaging[J]. IEEE Photon. Technol. Lett. , 2016, 28(3): 295-298.

[14] Niu B, Zhu Y, He X. A multi-population cooperative particle swarm optimizer for neural network training[C]// Proc. Inter. Conf. on Advances in Neural Networks, 2006: 570-576.

[15] 刘勃, 张久文, 温志贤, 等. 基于数学形态学的图像处理[J]. 天水师范学院学报, 2004, 24(2): 29-33.

Liu Qing, Zhang Jiuwen, Wen Zhixian, et al. On handling mathematical morphology in images[J]. J. of Tianshui Normal University, 2004, 24(2): 29-33.

[16] 周驰, 高海兵, 高亮, 等. 粒子群优化算法[J]. 计算机应用研究, 2003, 20(12): 7-11.

Zhou Chi, Gao Haibing, Gao Liang, et al. Particle swarm optimization (PSO) algorithm[J]. Application Research of Computers, 2003, 20(12): 7-11.

[17] 陆宗骐, 童韬. 链码和在边界形状分析中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(12): 102-107.

Lu Zongqi, Tong Tao. The application of chain code sum in the edge form analysis[J]. J. of Image and Graphics, 2002, 7(12): 102-107.

[18] 吴雪丽, 张杰, 李灿林. 一种快速边缘检测算法[J]. 小型微型计算机系统, 2012, 33(6): 1300-1305.

Wu Xueli, Zhang Jie, Li Canlin. Fast edge detection algorithm[J]. J. of Chinese Computer Systems, 2012, 33(6): 1300-1305.

作者简介:

王盛杰(1989—),男,安徽合肥人,博士生,主要研究方向为激光雷达、点云处理;

刘博(1979—),男,博士,研究员,博士生导师,四川省“千人计划”特聘专家,主要研究方向为激光雷达探测与激光通信。

《半导体光电》编辑委员会

顾问 王占国(科学院院士) 姚建铨(科学院院士) 方家熊(工程院院士)

主任 欧 黎

副主任 蒋志伟

委员 (以姓氏笔画为序)

王小勇 方 亮 孔 梅 宁永强 孙长征 刘秉琦 刘 胜 刘 斌
华 勇 安俊明 李 成 李向阳 李国强 余 华 邹卫文 张卫平
张佰君 沈鸿烈 宋凝芳 罗风光 周立庆 孟 洲 祝连庆 赵明富
徐学良 高新江 郭 霞 崔一平 龚 敏 蒋亚东 喻志农 童杏林
熊 平 潘 武 瞿鹏飞

半导体光电

BANDAOTI GUANGDIAN

(双月刊 1976 年创刊)

第 41 卷 第 5 期 2020 年 10 月

主管单位 中国电子科技集团有限公司
主办单位 重庆光电技术研究所
编辑出版 《半导体光电》编辑部
编委主任 欧 黎
主 编 蒋志伟
执行主编 李福果
责任编辑 朱玲瑞
印 刷 重庆五湖印务有限公司
国内订阅 《半导体光电》编辑部
通信地址 重庆市南岸区南坪花园路 14 号(400060)
电 话 (023)65860286(编辑)
(023)65860287(发行)
电子邮箱 soe@163.net

SEMICONDUCTOR OPTOELECTRONICS

(Bimonthly, Started in 1976)

Vol. 41 No. 5 October 2020

Competent Authorities China Electronics Technology Group Corporation
Sponsored by Chongqing Optoelectronics Research Institute
Edited and Published by Editorial Office of Semiconductor Optoelectronics
Director of Editorial Board OU Li
Chief Editor JIANG Zhiwei
Executive Chief Editor LI Fuguo
Editor in Charge ZHU Lingrui
Printed by Chongqing Wuhu Printing Corp.
Domestic Subscription Editorial Office of Semiconductor Optoelectronics
Address No. 14 Garden Road, Nan'an District, Chongqing 400060,
P. R. China
Telephone (023)65860286 (Edition)
(023)65860287 (Distribution)
E-mail soe@163.net