

高调谐效率V型腔可调谐半导体激光器设计与研究

王傲, 邹永刚, 李明宇, 陈拓, 常锴, 王小龙, 宫景丽, 石琳琳, 范杰, 郑舟, 马骁, 何建军

引用本文:

王傲, 邹永刚, 李明宇, 等. 高调谐效率V型腔可调谐半导体激光器设计与研究[J]. 发光学报, 2020, 41(8): 977–983. WANG Ao, ZOU Yong–gang, LI Ming–yu, et al. Design and Research of High Tuning Efficiency V–cavity Tunable Semiconductor Laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(8): 977–983.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/fgxb20204108.0977

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

宽范围可调谐内腔液晶垂直腔面发射激光器设计与研究

Design and Research of Wide Range Tunable Intracavity Liquid Crystal Vertical Cavity Surface Emitting Laser 发光学报. 2018, 39(11): 1621–1626 https://doi.org/10.3788/fgxb20183911.1621

光谱稳定的低功耗980 nm单模泵浦源半导体激光器

Low Power Dissipation 980 nm Single Mode Pumping Source Laser with Wavelength Stabilization 发光学报. 2016, 37(1): 33-37 https://doi.org/10.3788/fgxb20163701.0033

稳定耦合效率的沟槽结构半导体激光器

Stable Coupling Efficiency of Semiconductor Lasers with Groove Structure 发光学报. 2017, 38(5): 636-641 https://doi.org/10.3788/fgxb20173805.0636

体布拉格光栅外腔红光半导体激光器实验研究

Experimental Research on Volume-Bragg-grating External Cavity Red-light Semiconductor Lasers 发光学报. 2019, 40(11): 1401-1408 https://doi.org/10.3788/fgxb20194011.1401

外腔反馈对量子点激光器输出特性的影响

Influence of External Cavity Feedback on The Output Characteristics of Quantum-dot Lasers 发光学报. 2013, 34(4): 474-479 https://doi.org/10.3788/fgxb20133404.0474

文章编号:1000-7032(2020)08-0977-07

高调谐效率 V 型腔可调谐半导体激光器设计与研究

王 傲¹, 邹永刚^{1*}, 李明宇^{2*}, 陈 拓², 常 锴², 王小龙¹, 宫景丽³, 石琳琳¹, 范 杰¹, 郑 舟¹, 马 骁³, 何建军³

(1. 长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 13002; 3. 浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: V 型腔可调谐半导体激光器由于具备结构简单紧凑、性能优良等特点,在光通讯领域有着较大的应用潜力。然而,由于激光器外延结构热导率相近,用于波长调谐的热量大部分直接流失,激光器无法 得到较高的调谐效率。本文通过在调谐区域加入隔热结构,设计了具有高调谐效率的 V 型腔可调谐激 光器。利用由 COMSOL Multiphysics 建立的 V 型腔激光器温度模型,分析了隔热结构的加入对激光器各 部分的温度影响。通过 Rsoft 建立的谐振腔光场分布,优化半波耦合器参数,使激光器具有最佳的模式 选择性。结果表明,激光器主边模阈值增益差达到 6.07 cm⁻¹,调谐效率从 0.165 nm/mW 提升至 0.3 nm/mW。同时,隔热结构的加入不会使激光器其他区域有明显的温升,器件性能受到的负面影响可以 忽略。

关 键 词:半导体激光器;波长可调谐;热效应;隔热结构 中图分类号:TN248.4 **文献标识码:** A **DOI**: 10.37188/fgxb20204108.0977

Design and Research of High Tuning Efficiency V-cavity Tunable Semiconductor Laser

WANG Ao¹, ZOU Yong-gang^{1*}, LI Ming-yu^{2*}, CHEN Tuo², CHANG Kai²,

WANG Xiao-long¹, GONG Jing-li³, SHI Lin-lin¹, FAN Jie¹, ZHENG Zhou¹, MA Xiao³, HE Jian-jun³

(1. State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

3. State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

* Corresponding Authors, E-mail: zouyg@cust.edu.cn; Limingyu@cust.edu.cn

Abstract: V-cavity tunable semiconductor laser has great potential in optical network because of its advantages of simplicity, compactness and high performance. However, because the thermal conductivity of epitaxial structure is similar, most of the heat for wavelength tuning is lost directly, and so the tuning efficiency of laser is low. In this paper, a V-cavity laser with high tuning efficiency is designed by adding a heat insulation structure in the tuning region of the laser. Through the temperature model of V-cavity laser built by COMSOL Multiphysics, the effect of adding thermal insulation structure on the temperature of each part of the laser is analyzed. Through the optical field distribution established by Rsoft, the proper half wave coupler parameters are selected, so that the laser has the best mode selectivity. The results show that threshold gain difference between the lowest threshold

收稿日期: 2020-04-22;修订日期: 2020-05-06

基金项目:吉林省科技发展计划(20180519018JH,20190302053GX);吉林省教育厅"十三五"科学技术项目(JJKH20190543KJ)资助 Supported by Jilin Province Science and Technology Development Plan(20180519018JH,20190302053GX); Jilin Education Department "135" Science and Technology(JJKH20190543KJ)

mode and the next lowest threshold mode is 6.07 cm⁻¹, and the tuning efficiency increases from 0.165 nm/mW to 0.3 nm/mW. Meanwhile, the addition of thermal insulation structure will not cause obvious temperature rise in other areas of the laser, and the negative impact on the device performance can be ignored.

Key words: semiconductor lasers; wavelength tunable; thermal effects; thermal insulation

1引言

可调谐激光器由于其能够动态调整输出波长 的特性,在通信、探测、传感等领域获得了广泛应 用^[14]。近年来随着光通信技术的不断提高,对 可调谐激光器的研究主要向宽波长调谐范围和高 边模抑制比(SMSR)方向发展,各种类型的边发 射可调谐激光器相继出现,如分布布拉格反射器 激光器^[5]、Y分支可调谐激光器^[6]、环形耦合腔 可调谐激光器等[7]。上述可调谐激光器在波长 调谐范围、SMSR 等方面表现出优异的性能,但是 普遍存在器件制作工艺复杂的问题,如需要二次 外延生长、微纳光栅制作等。器件制作有一定难 度,增加了激光器制作成本,在一定程度上限制了 实际应用。何建军等提出了一种 V 型结构谐振 腔的可调谐半导体激光器,通过独特设计,使两个 谐振腔之间的耦合器具备优异的选模功能,从而 实现 SMSR 40 dB、调谐范围 30 nm 以上^[8]。 V 型 腔可调谐激光器在性能上表现优异的同时,避免 了复杂的工艺,制作简单,结构紧凑,显示出较好 的应用前景^[9-10]。

V型腔可调谐激光器的调谐机制有两种,分 别是利用载流子注入效应的电致调谐和利用热光 效应的热致调谐。其中,热致调谐避免了载流子 注入引起的谱线加宽,因此在一些需要窄线宽的 领域具有明显的优势^[11]。一般而言,V型腔激光 器热调谐依靠电流注入谐振腔后产生的热量实 现,电热转化效率不高,影响了激光器的调谐效 率。何建军等通过在谐振腔调谐区上方附加薄膜 电阻并以其作为热源的方法改变产热方式,将调 谐效率提升了35%(从0.1 nm/mW到0.135 nm/ mW)^[11],为高调谐效率器件提供了一种思路。 然而,由于激光器外延层热导率相近,薄膜电阻产 生的热量不会在调谐区滞留,而是向下直接传递 至热沉,致使热量利用并不充分,限制了调谐效率 的进一步提高。 针对以上问题,本文设计了一种具有高调谐 效率的 V 型腔激光器结构。通过在谐振腔下方 设置隔热结构,充分利用热量,探索提高激光器调 谐效率的可能性。首先,通过 Rsoft 建立的谐振腔 中光场的分布,完成半波耦合器的设计,使激光器 主边模之间具有最大的阈值增益差。然后,利用 COMSOL Multiphysics 建立的激光器温度分布模 型,分析隔热结构的加入对激光器各部分温度的 影响,探索最佳的隔热结构设计方案。

2 器件设计与讨论

V型腔激光器结构如图 1(a)所示,主要由半 波耦合器和两个具有一定长度差的谐振腔组成, 其中固定增益腔 466 μm,通道选择腔 490 μm(激 光器拥有 20 个间隔 100 GHz 的工作信道)。两个 长度不一的谐振腔之间通过游标效应扩大激光器 的调谐范围,而半波耦合器通过对不同相位入射 光的增益损耗来提高激光器的 SMSR。隔热结构 处于两个谐振腔调谐区下方的衬体内部。如图 1(b)所示,增益电极位于半波耦合器和两个谐振 腔的增益区之上,与接触层直接接触,提供增益电 流。薄膜电阻位于谐振腔调谐区上方,在其与接 触层之间加入了一层二氧化硅电隔离层,使其只 起到提供热量的作用。如图 1(c)所示,隔热结构 尺寸由参数 L 和 W 决定,L 和 W 分别为隔热结构 边缘到谐振腔中心的距离。

2.1 半波耦合器

如图 2 所示,将谐振腔在半波耦合器端面处 镜面展开。为简便起见,仅使光从端口 1 入射,通 过半波耦合器后,从 3、4 端口输出。其中 3、4 端 口出射光的相位差为激光器的耦合相位。端口 4 和端口 1 的振幅之比为自耦合系数 C₁₁,端口 3 和 端口 1 的振幅之比为交叉耦合系数 C₁₂。要使激 光器具备优异的模式选择性,在使耦合器成为耦 合相位 180°的半波耦合器的同时还需要特定的 耦合系数,其可以通过下列公式得到^[12]:



图1 激光器示意图

Laser schematic

Fig. 1



图 2 耦合器镜面展开图

Fig. 2 Schematic diagram of coupler image expansion

$$|C_{12}| = \frac{|\Delta\omega_1 - \Delta\omega_2| \sqrt{L_1 L_2}}{\nu},$$

$$|C_{11}| = |1 - C_{12}|, \qquad (1)$$

其中, $\Delta\omega_1$ 和 $\Delta\omega_2$ 分别为两个谐振腔的角频率间 隔, L_1 和 L_2 为两个谐振腔的腔长, ν 为激射波长 频率。波导宽度固定为3 µm,耦合器形状由 W_c 和 L_c 决定。改变耦合器参数,通过 Rsoft 建立的 谐振腔光场分布,得到与之对应的耦合系数与耦 合相位,如图3所示。其中归一化交叉耦合系数 $\chi = C_{12}^2/(C_{11}^2 + C_{12}^2)$ 。根据上文所述对耦合器的要 求,选择 $L_c = 40$ µm, $W_c = 2.6$ µm,此时耦合相位 180°,归一化交叉耦合系数0.1431。图4 是激光 器主边模的阈值增益差与归一化交叉耦合系数和 耦合相位的关系图。可以看到,该设计下激光器 阈值增益差达到 6.07 cm⁻¹,具有最佳的模式选 择性。



图 3 (a) 归一化交叉耦合系数; (b) 耦合相位随耦合器参数变化情况。

Fig. 3 Normalized cross coupling coefficient(a) and coupling phase(b) with the change of coupler paramaters



图 4 激光器主边模的阈值增益差随归一化交叉耦合系 数和耦合相位的变化曲线

Fig. 4 Threshold gain difference between the lowest threshold mode and the next lowest threshold mode as a function of the normalized cross-coupling coefficient and coupling phase

2.2 隔热结构

通过 V 型腔激光器两个谐振腔均可实现波长 调谐,为了避免重复叙述,本文建立激光器温度模型 时选择通过波长选择腔调谐。由于热沉的热容和体 积都远大于激光器,因此仿真中认为激光器基座底 部温度恒定在 293.15 K。激光器的其他界面则认为 与外界空气保持热对流,热对流满足公式:

$$q_0 = h(T_{ext} - T),$$
 (2)

其中h 为热交换系数,对于激光器模型,h = 20 W·m⁻²·K^{-1[11]}; T_{ext} 为外界温度 293.15 K, q_0 为表面流入物体的热功率面密度。基于以上的边界条件,利用 COMSOL Multiphysics 建立仿真模型。表1 为构建激光器模型时所使用的参数,包括厚度D、密度 ρ 、热容C、热导率K、杨氏模量E、泊松比 γ 和热膨胀系数 α ,参数来自文献[13-14]和 COMSOL Multiphysics 材料库。

表1 激光器模型参数

Tab. 1 Laser model parameters								
Layer	Material	D∕ µm	$\frac{\rho}{(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})}$	C/ (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	$\frac{K}{(\mathbf{W}\cdot\mathbf{m}^{-1}\cdot\mathbf{K}^{-1})}$	E∕ GPa	γ	$\alpha/(10^{-6} \text{ K}^{-1})$
Gain electrode	Au	0.50	19 300	129.0	317.0	70.0	0.440	14.20
Thin film resistor	Pt	0.20	21 450	134.0	69.1	168.0	0.380	9.00
Electrical isolation	SiO_2	0.25	2 200	730.0	1.4	70.0	0.170	0.50
Contact	InGaAs	0.20	5 500	310.0	5.0	67.0	0.323	5.66
Waveguide	InP	0.15	4 820	180.0	67.0	61.1	0.360	4.51
Grinsch	InGaAsP	0.05	4 903	456.6	49.2	65.1	0.340	5.13
Active	InGaAsP	0.08	4 903	456.6	49.2	65.1	0.340	5.13
Etch stop	InGaAs	2.00	5 500	310.0	5.0	67.0	0.323	5.66
Substrate	InP	100.00	4 820	180.0	67.0	61.1	0.360	4.51
Submount	AlN	4.00	3 240	743.0	285.0	310.0	0.250	4.50

V型腔激光器温度分布如图 5 所示。薄膜电 阻产生的热量传入激光器,在不含隔热结构的情 况下,热量不会在调谐区聚集,而是直接向下通过 衬底流入热沉,如图 5(a)所示。在一定的加热功 率下,调谐区的温度上升有限,对波长的调谐作用 并不明显。而加入隔热结构后,由图 5(b)可以看 到,低热传导率的空气阻碍了热量的向下传递,热 量只能绕开隔热区域向下传递,缓滞在谐振腔的 调谐段,热量得到充分利用,激光器的调谐效率因 此得到提高。根据建立的激光器温度分布模型, 将不同加热电流下激光器谐振腔的温度变化带入 下列公式中:

$$\Delta n = \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T, \qquad (3)$$

建立折射率和加热电流之间的变化关系,然后根据 V 型腔激光器阈值方程^[15],得到图 6 中激光器 工作波长随注入薄膜电阻电流的变化曲线。其中, Δn 为温度引起的折射率变化, $\partial n/\partial t$ 为折射 率对温度的变化率, ΔT 为薄膜电阻加热引起的谐振腔温度变化。如图 6 所示,在激光器不含隔热 结构时,需要大约 59 mA 的加热电流才能完成预 设的 20 信道波长切换;而在含隔热结构时,对于 实现同样距离的波长调谐,激光器只需要 40 mA 的加热电流。调谐效率由原来的 0.13 nm/mW 提



图 5 加热功率为 0.15 W 时, V 型腔激光器温度分布图。(a) 无隔热结构;(b) 有隔热结构。

Fig. 5 Temperature distribution of V-cavity laser with heating power of 0.15 W. (a) Without thermal insulation structure. (b) With thermal insulation structure.

图 6 激光器工作波长随薄膜电阻加热电流的变化关系

Fig. 6 Relationship between the wavelength of laser and the heating current of thin film resistor

升到 0.3 nm/mW,调谐效率提高 81%。

图 7 给出了波长调谐时激光器主要工作区域 (上下包层及其之间的区域)的温度分布。由图 7(a)可以看到,当电流注入薄膜电阻时,热量主 要聚集在调谐区,增益区的温度基本恒定,受到的 影响较小。为了更加详细地分析隔热结构对谐振 腔温度分布的影响,图 7(b)给出了不同隔热结构 尺寸和无隔热结构时激光器加热腔中心沿 Y 轴 的温度分布。不同尺寸下温度在各点的大小虽然 不同,但是沿 Y 方向的变化趋势却是相同的。温 度的升高主要集中于谐振腔调谐区,在接近增益 区时开始下降,进入增益区 20 μm 左右后,基本 降至初始温度。因此,当使加热腔温度变化进行 波长调谐时,隔热结构的加入在使所需的加热功 率减小的同时,不会带来增益区的额外温升,从而 影响激光器的其他性能。

在使激光器调谐效率变化的同时,隔热结构 尺寸的变化也会带来激光器主要工作区域热应力 的重新分布,这会对器件的寿命和可靠性产生一 定的影响。因此,对隔热结构尺寸的优化应同时

- 图 7 加热功率 0.15 W 时,激光器主要工作区域温度分 布(a)与加热腔沿 Y 轴二维温度分布曲线(b)。
- Fig. 7 (a) Temperature distribution in the main working area of the laser. (b) Two dimensional temperature distribution curve of heating cavity along Y axis. The heating power is 0. 15 W.

考虑调谐效率和激光器的可靠性。

激光器调谐效率和主要工作区域最大 von Mises 应力随隔热结构尺寸变化如图 8 所示。在 图 8(a)中可以看到,调谐效率先随着 L 的增大而 增大,在 L 增大到 70 μm 左右时,基本保持不变。 这是因为在隔热结构的作用下,热量需要先水平 传递,绕开隔热结构后才能往下流入热沉,在该过 程中热量得到充分的利用。而当 L 增大到一定程 度后,隔热结构对热量的影响效果已经饱和,调谐 效率因此逐渐保持不变。调谐区域温度的非均匀 变化导致了复杂的热应力变化情况。图 8(c)为 最大 von Mises 应力随 L 变化情况。最大 von Mises 应力开始时随着 L 的增大急剧增大,在达到最大值之后有一定程度的降低,然后基本保持不变。综合考虑器件的调谐效率和最大 von Mises 应力, L 的优化取值区间为 70~80 μ m,此时激光器调谐效率较高且最大 von Mises 相对较小。如图 8(b)和8(d)所示,器件的调谐效率和最大 von Mises 应力大致随着 W 的增大呈线性增大。这是由于 W 在 0~10 μ m 之间变化(避免 W 较大引起

的两个隔热结构重叠),在这个较小的区间内,隔 热结构尺寸的变化还没有引起调谐区域复杂的温 度变化,因此对调谐效率和最大 von-Mises 应力的 影响大致呈线性。一方面,由于最大 von Mises 应 力随着 W 的增大而逐渐接近材料的屈服极限,器 件容易损坏^[13,16];另一方面,进行波长调谐时,过 大的 W 会使非加热腔也出现较明显的温升,从而 导致激光器工作信道偏移现象。因此,W 的优化 取值区间为7~9 μm。

图 8 调谐效率和最大 von Mises 应力随隔热结构尺寸变化情况。(a)调谐效率随 L 的变化;(b)调谐效率随 M 的变化;
 (c)最大 von Mises 应力随 L 的变化;(d)最大 von Mises 应力随 M 的变化。

Fig. 8 Thermal tuning efficiency and maximum von Mises stress with the change of thermal insulation structure size. (a) Change of thermal tuning efficiency with L. (b) Change of thermal tuning efficiency with W. (c) Change of maximum von Mises stress with L. (d) Change of maximum von Mises stress with W.

3 结 论

本文通过采用低热导率的空气替换谐振腔 调谐区下方部分 InP 衬体的方法,设计了具有高 调谐效率的 V 型腔可调谐半导体激光器结构。 通过 Rsoft 和 COMSOL Multiphysics 分别分析了 半波耦合器和隔热结构各项参数对激光器谐振 腔光场和温度分布的影响。结果表明,优化后 的半波耦合器使激光器主边模阈值增益差达到 6.07 cm⁻¹,模式选择性达到最佳效果。隔热结 构的加入改变了热量在激光器中的传递路径, 使热量得到充分利用。在可靠性得到保证的基 础上,激光器的调谐效率从原来的0.165 nm/ mW提高至0.3 nm/mW,效率提升明显。同时, 激光器非调谐区域温升有限,性能不会因为隔 热结构的加入而降低。

参考文献:

[1] 冯志庆, 白兰, 王宁, 等. 基于双透镜外腔结构的窄线宽可调谐半导体激光器 [J]. 发光学报, 2012, 33(10): 1138-1142.

FENG Z Q, BAI L, WANG N, et al. Narrow-linewidth tunable semiconductor lasers based on dual-lens external-cavity structure [J]. Chin. J. Lumin., 2012,33(10):1138-1142. (in Chinese)

[2]李保志,邹永刚,王小龙,等. 宽范围可调谐内腔液晶垂直腔面发射激光器设计与研究 [J]. 发光学报, 2018, 39(11):1621-1626.

LI B Z,ZOU Y G,WANG X L, *et al.*. Design and research of wide range tunable intracavity liquid crystal vertical cavity surface emitting laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018,39(11):1621-1626. (in Chinese)

- [3] COLDREN L A. Monolithic tunable diode lasers [J]. IEEE J. Selected Top. Quantum Electron., 2000,6(6):988-999.
- [4] BUUS J, MURPHY E J. Tunable lasers in optical networks [J]. J. Lightw. Technol., 2006, 24(1):5-11.
- [5] BROX O, TAWFIEQ M, DELLA CASA P, et al. Realisation of a widely tuneable sampled grating DBR laser emitting around 970 nm [J]. Electron. Lett., 2017,53(11):744-746.
- [6] KUNDU I, DEAN P, VALAVANIS A, et al. Continuous frequency tuning with near constant output power in coupled Ybranched terahertz quantum cascade lasers with photonic lattice [J]. ACS Photonics, 2018,5(7):2912-2920.
- [7] WAN Y T,ZHANG S,NORMAN J C, et al. Tunable quantum dot lasers grown directly on silicon [J]. Optica, 2019, 6(11):1394-1400.
- [8] LIN X F, LIU D K, HE J J. Design and analysis of 2 × 2 half-wave waveguide couplers [J]. Appl. Opt., 2009,48(25): F18-F23.
- [9] MENG J J,XIONG X H,XING H B, et al. Full C-band tunable V-cavity-laser based TOSA and SFP transceiver modules
 [J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2017,29(12):1035-1038.
- [10] HE J J, LIU D K. Wavelength switchable semiconductor laser using half-wave V-coupled cavities [J]. Opt. Express, 2008,16(6):3896-3911.
- [11] DENG H Y, MENG J J, WEI W X, et al. Wavelength tunable V-cavity laser employing integrated thin-film heaters [J]. IEEE Photonics J., 2016,8(4):1502908.
- [12] 胡志朋. 基于刻蚀槽的耦合腔半导体激光器研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2017.
 HU Z P. Coupled Cavity Semiconductor Laser Based on Deep-etched Trenches [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
 (in Chinese)
- [13] HAN X M, CHENG Q, LIU F, et al. Numerical analysis on thermal tuning efficiency and thermal stress of a thermally tunable SG-DBR laser [J]. IEEE Photonics J., 2016,8(3):1501512.
- [14] OGAWA S,IMADA M,NODA S. Analysis of thermal stress in wafer bonding of dissimilar materials for the introduction of an InP-based light emitter into a GaAs-based three-dimensional photonic crystal [J]. Appl. Phys. Lett., 2003,82(20):3406-3408.
- [15] 邓浩瑜. 热调谐 V 型腔半导体激光器及其传感应用研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2016. DENG H Y. Research on Thermally Tuned V-cavity Semiconductor Laser and Its Sensing Application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)
- [16] SHEEN M T, HO Y H, WANG C L, et al. The joint strength and microstructure of fluxless Au/Sn solders in InP-based laser diode packages [J]. J. Electron. Mater., 2005,34(10):1318-1323.

王傲(1995 -),男,河南洛阳人,硕 士研究生,2018 年于长春理工大学 获得学士学位,主要从事光电子技 术及应用方面的研究。 E-mail: 2646064957@qq.com

李明宇(1978 -),男,吉林长春人,博 士,教授,博士研究生导师,2006 年于 浙江大学获得博士学位,主要从事光 电子技术及应用方面的研究。 E-mail: Limingyu@ cust. edu. cn

邹永刚(1982-),男,吉林长春人, 博士,研究员,博士研究生导师, 2009年于吉林大学获得博士学位, 主要从事光电子技术及应用方面的 研究。

E-mail: zouyg@ cust. edu. cn