文章编号 2095-1531(2017)02-0194-13

水平腔面发射半导体激光器研究进展

海一娜,邹永刚*,田 锟,马晓辉,王海珠,范 杰,白云峰
(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)

摘要:近年来,水平腔面发射半导体激光器具有高功率、高光束质量及易封装集成等优良性能,已成为激光器领域的研究热点。本文详细阐述了几种水平腔面发射半导体激光器的结构设计、工作原理以及激光输出特性,并对该激光器国内外最新研究进展与发展现状进行了总结和论述。在此基础上,对该激光器的研究方向和发展趋势进行了分析与展望。目前,水平腔面发射半导体激光器的激光输出功率可达瓦级,美国 Alfalight 公司引入曲线形光栅的单一发射器输出功率可达 73 W。随着应用领域的不断拓展,中远红外波段水平腔面发射激光器将成为未来的研究焦点。

关 键 词:面发射;转向镜;二阶光栅;光子晶体;半导体激光器
中图分类号:TN248.4 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20171002.0194

Research progress of horizontal cavity surface emitting semiconductor lasers

HAI Yi-na, ZOU Yong-gang*, TIAN Kun, MA Xiao-hui, WANG Hai-zhu, FAN Jie, BAI Yun-feng
(*State Key laboratory of High-power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun* 130022, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: zouyg@cust.edu.cn*

Abstract: In recent years, horizontal cavity surface emitting semiconductor lasers have become a hot research topic in the field of lasers due to its excellent properties such as high power, high beam quality, easy packaging, integration and so on. In this paper, we describe several types of horizontal cavity surface emitting semiconductor lasers and their working principle, structure design and features. Then, we summarize and review the present research and development of the proposed lasers at home and abroad, and on this basis, aiming at the research work for horizontal cavity surface-emitting semiconductor lasers and development trends, a further analysis and outlook are given. Currently, the output power of the horizontal cavity surface emitting semiconductor lasers has achieved watts level, and the output power of single transmitter producted by Alfalight company can reach up to 73 W with curved grating. With the expansion of application fields, far infrared band horizontal cavity surface emitting lasers will become focus in the future.

Key words: surface emitting; steering mirror; second order grating; photonic crystal; semiconductor lasers

收稿日期:2016-10-20;**修订日期**:2016-11-29
基金项目:吉林省科技计划重点项目(No. 20140204028GX, No. 20150204068GX)
Supported by Key Project of S&T Development Plan of Jilin Province of China (No. 20140204028GX, No. 20150204068GX)

1　引　言

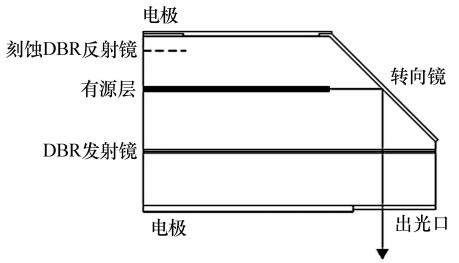
半导体激光器因具有体积小,光电转换效率高,工作寿命长和高速直接调制等优点,是通信、光泵浦激光器、光信息存储等不可或缺的重要光源,也是需要高效单色光源的光电子系统中的核心器件[1],在工业生产和军事领域中被广泛应用[2-4]。随着半导体器件工艺水平的发展和激光光束准直整形方法的优化,半导体激光器的出光特性得到了明显提升,应用领域也进一步拓展[5]。目前,普遍通过对大功率半导体激光器输出光束进行整形[6-9]和光纤耦合[10-11]来获取理想的光束质量,但整形系统和装调难度的提升增加了器件的复杂程度和制作成本,亦不利于阵列集成,因此限制了半导体激光器在大功率激光器件领域的进一步拓展应用。面发射激光器件在克服以上边发射器件局限性的同时具有更多独特优势,拥有更好的发展前景。

目前商用的面发射激光器多为垂直腔面发射半导体激光器(VCSELs),因其具有高光束质量、单纵模输出、低阈值电流、易耦合集成、价格低廉等特点[12-13]而广泛应用于通信领域。而水平腔面发射半导体激光器发展较晚,水平腔面发射半导体激光器出光孔不需要镀高反膜,表面损伤阈值小;另因表面出光,出光发散角小,避免了大快轴发散角附带的问题;激光器共振腔较长,光增益较大,单模输出功率大,是理想的高功率、单模单瓣耦合光源。同时水平腔面发射半导体激光器在制造上简单,更容易集成二维阵列。

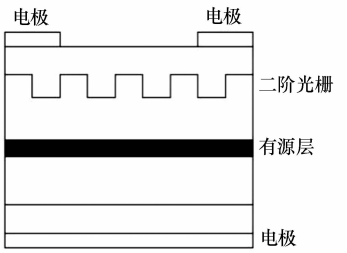
本文综述了几种不同结构水平腔面发射半导体激光器的基本工作原理、器件结构设计与工作性能,对国内、外近十年的研究进展进行了总结和分析,并就其发展趋势做出了展望。

2　基本原理

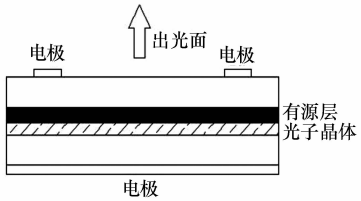
目前,水平腔半导体激光器实现面发射的方法主要是引入 3 种结构——转向镜,二阶光栅和光子晶体。这 3 种结构都是以传统边发射半导体激光器结构为基础,通过改变器件结构,实现面发射。转向镜面发射激光器是在传统边发射激光器的基础结构上进行几何改变,在器件上纵向波导边缘刻蚀 45°反射镜,如图 1(a)所示。该器件通过 DBR 反射镜提供光反馈和选模,光子振荡激射后经 45°转向镜反射,改变光路,最终从器件表面输出。二阶光栅面发射激光器和光子晶体面发射激光器则是在传统边发射激光器结构中增加二阶光栅层和光子晶体层,利用二阶光栅和光子晶体的本身特性改变激射方向,如图 1(b)、1(c)所示。二阶光栅面发射激光器[14-19]利用二阶光栅的衍射效应实现表面垂直出光。其中零级和二级衍射光用于光反馈以及选模作用,一级衍射光提



(a) 转向镜面发射激光器结构示意图
(a) Structure diagram of steering lens surface emitting lasers



(b) 二阶光栅面发射激光器结构示意图
(b) Structure diagram of 2nd order grating surface emitting lasers



(c) 光子晶体面发射激光器结构示意图
(c) Structure diagram of photonic crystal surface emitting lasers

图 1　水平腔面发射激光器结构示意图

Fig. 1　Structure diagram of horizontal cavity surface emitting lasers

供输出耦合使光从器件表面出射。光子晶体面发射激光器[20-22]是在器件中加入光子晶体结构,利用光子晶体周期性介电常数的特性来实现器件表面发射出光。

3 器件结构

3.1 角度转向镜结构

2005年,加拿大 M. L. Osowski 等人[23]设计了一种高功率频率稳定的面发射激光器。如图2所示,利用干法刻蚀技术在激光器上刻蚀45°自由转向镜(其精确度低于0.1°),实现谐振光的全内反射,并从衬底表面射出。该器件采用DBR结构提供反馈,实现选频和稳频的作用。半宽全高0.9 nm,阵列出光功率可达瓦级。

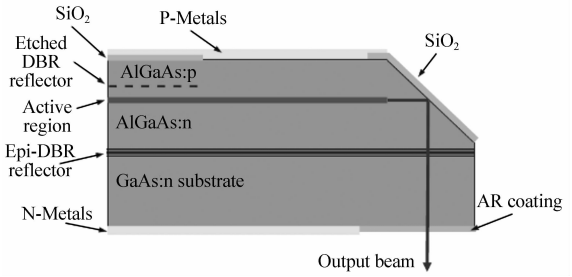


图2 垂直发射激光器芯片结构示意图[23]

Fig. 2 Structure diagram of vertical emitting laser chip[23]

2010年,德国 M. Moehrle 等人[24]首次将45°转换镜与集成检测光电二极管合并设计了一种1 490 nm水平腔面发射激光器。如图3所示。该器件具有同 VCSEL 一样低的阈值电流3~7 mA(工作温度20~90 ℃)。

3.2 二阶光栅面发射分布反馈激光器

3.2.1 直线形光栅

2005年,美国 Li Shuang 等人[25]研制了无铝二阶光栅面发射激光器,这一结构依靠优先刻蚀和二次外延来控制横模。输出光波长为980 nm。光栅结构分为700 μm的二阶 DFB 光栅以及两侧600 μm的 DBR 结构。结构中存在的横向有效折射率差($\Delta n > 0.05$),20个单元构成阵列,分别实现1.6 W和10 W的连续和脉冲输出功率。2007年,该研究团队[26]对该结构进行了优化改进,内

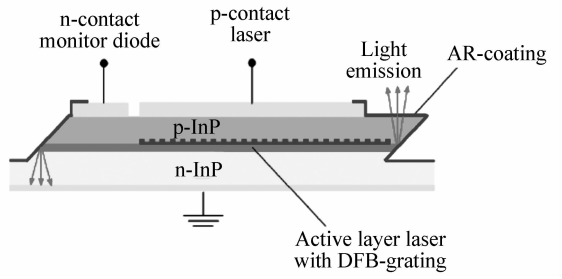


图3 水平腔面发射激光器横截面原理图[24]

Fig. 3 Schematic cross-sectional view of horizontal cavity surface emitting lasers(HCSEL)[24]

置折射率波导,同时为了使光场和二阶光栅充分发挥作用,选择了一个薄的P盖层结构;采用分离限制异质结结构来提供必要的增益和光学限制,实现了波长稳定和单频激光输出。40个单元连续功率达到2.4 W。阵列制备过程中要将腔内各个光模式调谐到共振状态,如图4所示。

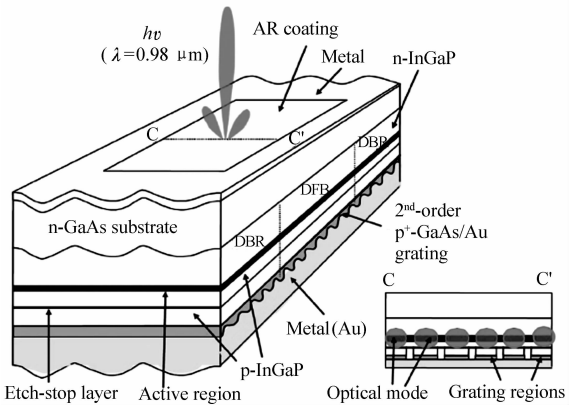


图4 二维面发射激光器的立体结构图

插图:面发射激光器截面图[26]

Fig. 4 3-D schematic view of 2-D surface-emitting laser

Inset: Cross-sectional view of surface-emitting laser[26]

2006年,德国 S. Höfling 等人[27]研制了具有新型波导结构(耦合的法珀脊型波导)的单模量子级联激光器。通过光学平版刻蚀和干法刻蚀技术将波导结构刻蚀到薄晶片上,将束缚态向连续态跃迁结构设计的49个活跃期嵌入等离子体以提升波导结构性能(1.4 μm厚高浓度掺杂和3.2 μm厚低浓度掺杂 GaAs 材料),为面发射激光器研究提出了不同于传统结构的波导结构。

2006年,美国 Martin Schubert 等人[28]采用中

心 π 相移二阶金属光栅(具有空气层)制备面发射激光器,输出波长 100 μm。其利用 Floquet-Bloch 和辐射场完美匹配层边界条件的耦合模理论进行分析(这个理论的组合对二阶光栅高折射率差是有效的)。光栅占空比和光场强度是影响面发射激光器工作性能的主要因素。如图 5 所示。

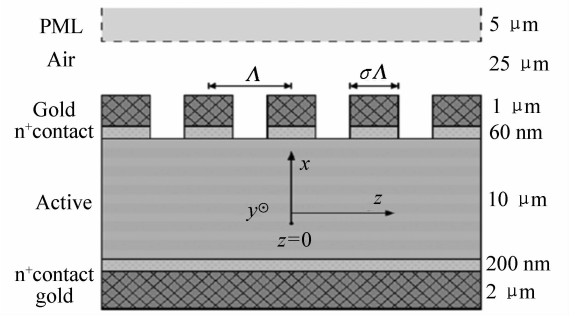


图 5　激光器结构(光栅周期 Λ 和占空比 σ)[28]

Fig. 5　Laser structure (grating periodicity Λ and duty cycle σ)[28]

随着激光器技术的发展以及应用领域的拓展需求,2007 年,A. Lyakh 和 P. Zory 等人[29]研制了窄线宽($<1\ cm^{-1}$)激光器,用于化学传感器和污染监测。如图 6 所示,在量子级联激光器上全息曝光并刻蚀光栅,光栅周期为 1.65 μm。采用 MOCVD 低压生且慢速生长 0.1 nm/s,使输出功率损失最低。获得短脉冲激发(100 ns,16 kHz),单纵模波长5 μm。

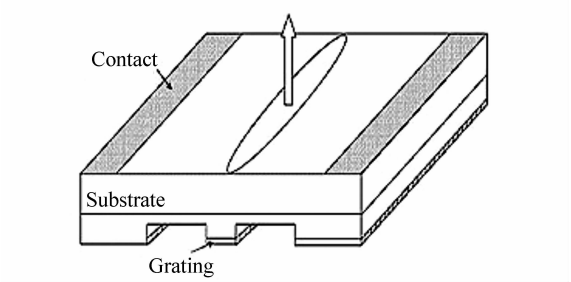


图 6　衬底发射量子级联激光器结构示意图[29]

Fig. 6　Schematic representation of the substrate-emitting quantum cascade laser[29]

2009 年,G. Masions,M. Carras 等人[30]设计了中红外波段水平腔面光子级联激光器,该器件采用非周期光栅结构,从衬底出射激光。如图 7 所示。光栅结构由一个一阶光栅和一个二阶光栅组成,可以对垂直波导方向模式进行耦合的同时降低由金属引起的损失,能够对一阶和二阶傅里叶组分进行精确控制。通过宽度相同的两个槽或峰的变化来调节两个傅里叶组分的相对相移。外延片采用 InGaAs/AlInAs 有源区两侧 InP 包层结构。温度 300 K 时阈值电流密度比是3 kA/cm^2,光束发散角为 12° × 3.1°,同时该器件有较高的边模抑制比。

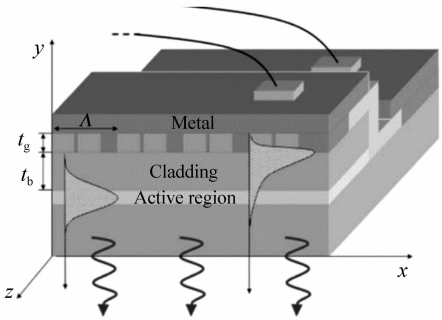


图 7　非周期光栅结构面发射量子级联激光器示意图[30]

Fig. 7　Schematic diagram of surface-emitting quantum cascade lasers using biperiodic top metal grating[30]

2014 年,C. Sigler,J. DKirch 等人[31]设计了 4.6 μm 波段的光栅耦合面发射量子级联激光器,该器件远场单瓣,阈值小于 0.5 A,斜率效能大于 3 W/A。如图 8 所示。利用 TM 模式和二阶分布反馈金属-半导体光栅的反对称表面等离子体模式的谐振耦合功能抑制器件的反对称模,使其具有强对称模。器件两端的分布布拉格反射镜(DBR)光栅可以对光场和载流子分布起到束缚作用,避免了不可控反射以及灾变型的端面退化,因此该器件具有稳定输出相干光的潜力,同时连续波工作输出功率可达瓦级。

2016 年,美国 C. Boyle 和 C. Sigler 等人[32],对中红外波段二阶光栅面发射激光器进行了研究。利用二阶金属半导体 DFB 光栅和二阶 DBR 光栅实现光反馈和耦合输出,研制出光栅耦合面发射量子级联激光器。如图 9 所示,该器件工作波段 4.7 μm。DFB 区域长度为 2.55 mm,两边 DBR 区域长度均为 1.28 mm,光栅整体长度为

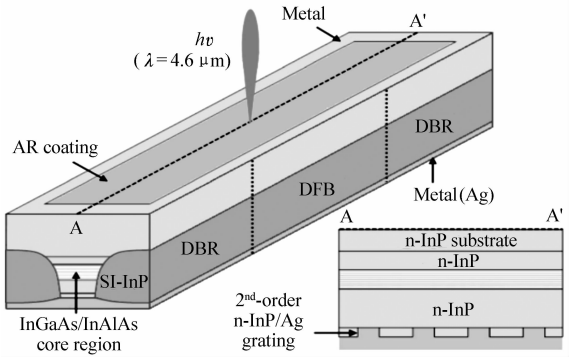


图 8 面发射掩埋异质结构 DFB/DBR 量子级联激光器结构示意图[31]

Fig. 8 Schematic diagram of surface-emitting buried-heterostructure DFB/DBR quantum cascade lasers[31]

5.1 mm。该器件在纵向有对称光栅模式,这是因为波导光学模式的谐振耦合可以形成反对称表面等离子模式,同时反对称模式会被光栅中的金属强烈吸收,得到有利于激射的对称模式。峰值泵浦功率到达0.4 W。

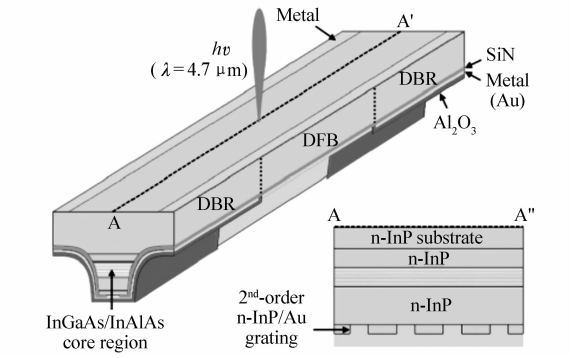


图 9 三维器件结构示意图[32]

Fig. 9 Schematic three-dimensional device representation[32]

国内的研究机构对于 SE-DFB 结构半导体激光器的关注较少,只有清华大学、北京半导体所、中科院长春光机所等单位开展了一些初步的探索。

2010 年,郭万红,陆全勇等人[33]对红外波段基于表面等离子波导的量子级联面发射激光器进行了分析研究,基于耦合模式理论和无限周期结构的 Floquet-Bloch 理论,对金、银、钯材料进行分析,得出表面等离子波导层采用银可以在 7.8 μm 获得面发射量子级联激光器。并优化器件结构,获得一种相对于传统波导的分布反馈量子级联激光器性能有明显的提升的新型结构,该结构表面输出耦合效率为 43%,阈值增益为12 cm^{-1}。如图 10 所示。

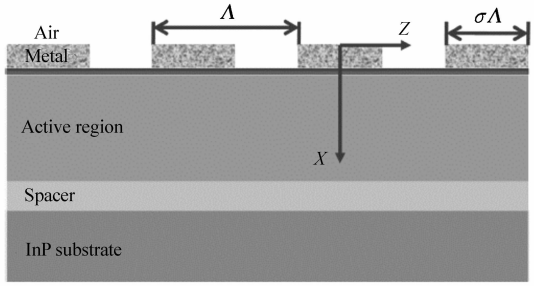


图 10 激光器结构横截面结构图[33]

Fig. 10 Schematic cross section of laser structure[33]

2011 年,郭万红、刘俊岐等人[34]设计了混合波导面发射分布反馈量子级联激光器。该混合波导由薄的 InGaAs 接触层和浅刻蚀在带有金属覆盖层的包层上的二阶光栅混合而成。通过优化浅刻蚀二阶光栅的占空比,降低波导损失同时提升耦合强度。温度为 90 ~ 130 K 时能够获得稳定的单模输出,占空比高于 20 dB,90 K 时高斜率效率为 194 mW/A。该器件沿波导方向远场是分离 15°的双瓣模式。

2011 年,叶淑娟、秦莉等人[35]模拟了激光中心波长 927 nm 的 SE-DFB 半导体激光器,采用表面二阶金属光栅,实现连续注入1.6 A电流,单面输出单功率 200 W,光谱线宽为 0.8 nm。利用有机化学气相沉积(MOCVD)生长得到外延结构,利用全息光刻技术制作二阶光栅(周期为 286 nm)。2012 年,长春光机所叶淑娟、秦莉等人[36]研制了 940 nm 宽条(100 μm)二阶光栅分布反馈面发射激光器,远场角 2.7°,0.07 nm光谱线宽,连续输出功率 718 mW。

2012 年,陈剑燕、刘俊岐等人[37]研制了 8.3 μm波段的二阶分布反馈谐振腔的脉冲面发射量子级联激光器。如图 11 所示。该器件利用表面等离子增强(surface-plasmon-enhanced)的优势,室温工作时实现单模、远场双瓣模式,沿波导方向发散角为 0.35°,边模抑制比为 20 dB;温度

160 K 时,出射峰值功率为 3.85 W。

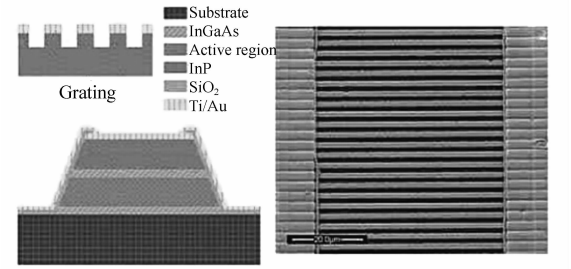


图 11　面发射量子级联激光器光栅与脊形波导横截面及局部光栅的电子显微俯瞰示意图[37]

Fig. 11　Schematic cross section of the grating region and the ridge-waveguide of surface emitting quantum cascade lasers and scanning electron microscopy top viewpoint of partial grating[37]

同年,姚丹阳、刘峰奇等人[38]设计了 8.3 μm 波长表面金属光栅分布反馈量子级联激光器,器件工作温度为 290 K 时,输出峰值功率可达 463 mW;工作温度为 400 K 时,输出峰值功率达到 18.7 mW,具有较大的温度调谐范围。该器件实现单模输出,边模抑制比为20 dB。如图 12 所示。

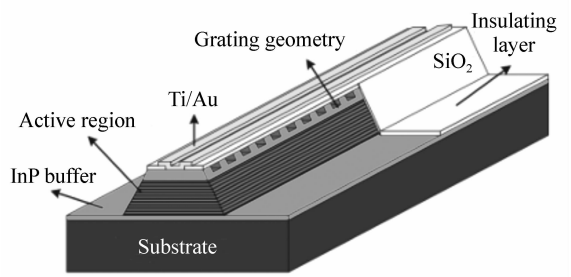


图 12　表面金属光栅分布反馈量子级联激光器示意图[38]

Fig. 12　Schematic diagram of the surface metal grating distributed feedback quantum cascade lasers[38]

2013 年,姚丹阳、张金川等人[39]研制出的 4.6 μm 波长的面发射分布反馈量子级联激光器,如图 13 所示,该器件利用掩埋光栅技术,在75 ℃高温时连续工作。温度为 10 ℃时,远场单瓣,最低阈值电流密度为 0.85 kA/cm^2,输出功率为 105 mW,发散角 0.17° × 18.7°,边模抑制比为

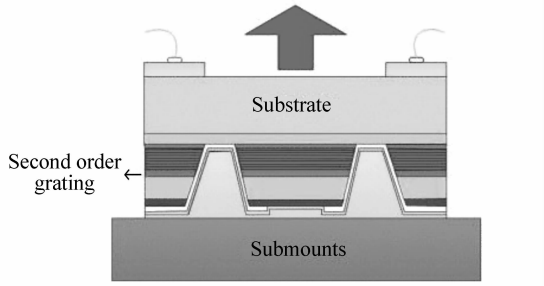


图 13　面发射量子级联激光器示横截面结构图[39]

Fig. 13　Schematic cross section of the surface-emitting quantum cascade lasers[39]

30 dB。

同年,谭少阳、翟腾等人[40]设计了脊形波导的面发射分布反馈量子级联激光器,并对改进器件进行性能测试。有源区采用两个低温生长的 InGaAs/GaAs 量子阱,利用全息曝光和湿法刻蚀技术制作二阶光栅,获得 1 064 nm 的工作波长。单模工作时电流为 255 mA,输出功率 90 mW,边模抑制比高于 55 dB,耦合效率达60 cm^{-1}。

2014 年,张锦川、刘峰奇等人[41]将等效相移技术(EPS)应用于激光器件的研究,研制了 4.6 μm波长 λ/4-EPS 面发射分布反馈量子级联激光器。通过改变取样周期,使单个晶片具有多波长选择性,同时单模出射,平均边模抑制比超过 20 dB,发散角为 0.6° ×16.8°。室温时脉冲工作可获得较大波长覆盖范围 72 nm。是迄今为止首个引入 λ/4-EPS 的面发射激光器。

同年,姚丹阳、张锦川等人[42]成功研制了 4.6 μm波长的宽条型脉冲分布反馈量子级联激光器,如图 14 所示,脊长、脊宽分别是 2 mm、60 μm。温度 20 ℃时,峰值功率 1.82 W;温度 50 ℃时,峰值功率 1.22 W。脉冲宽度为 1 μs,占空比为 0.2%。在激光器两侧端面镀高反膜,可以获得沿脊宽方向远场单瓣模式,发散角为 7.9°;而沿腔长方向远场获得双瓣模式,发散角为 0.61°。当热沉温度高达 115 ℃时,器件单模出射连续可调,相应温度调谐系数为 $\Delta v/\Delta T = -0.16\ \mathrm{cm^{-1}C^{-1}}$。

2015 年,刘颖慧、张锦川等人[43]利用顶部二阶金属半导体光栅结构发射横磁偏振光,实现了在室温下连续输出波长4.8 μm。衬底在 25 ℃时

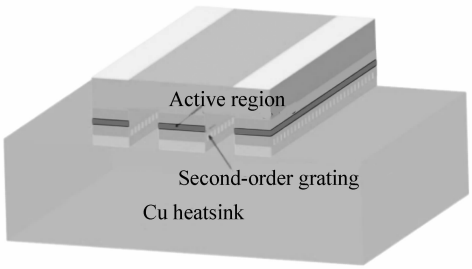


图14 宽条形衬底出光分布反馈量子级联激光器示意图[42]

Fig. 14 Schematic of broad area substrate-emitting distributed feedback quantum cascade lasers[42]

发光功率为94 mW,阈值电流密度1.21 kA/cm^2,单边抑制比为30 dB,发散角为0.58° × 16.2°。如图15所示。

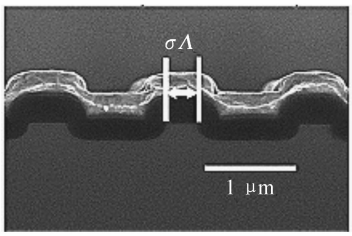


图15 光栅结构扫描电子显微镜图像[43]

Fig. 15 SEM image of the grating structure[43]

3.2.2 曲线形光栅

2009年,美国Alfalight公司[44]将曲形光栅应用到面发射分布反馈半导体激光器上,在9XX ~ 1 5XX nm波段都能得到大功率激光器。如图16所示,将光栅刻在p盖层上,中心为泵浦区域,边缘为非泵浦区域,最边缘还有吸收区域,用于抑制菲涅尔反射。曲线形光栅的设计是为了构成一个类似"传统的非稳定型谐振腔",能够最大限度的从增益介质中获取能量,得到好的光束质量的横模。Alfalight公司报道[45]的976 nm波长的面发射分布反馈激光器在连续波工作模式时衍射极限功率超过2 W,单一发射器输出功率为73 W的最大记录。

3.2.3 圆形光栅

2005年,英国G. A. Turnbull、A. Carleton等人[46]对聚合物圆形光栅分布反馈激光器的圆形光栅进行了特性研究。如图17所示,在硅衬底上

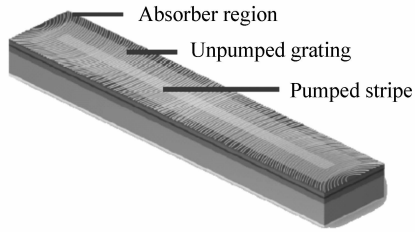


图16 曲线形光栅面发射分布反馈激光器(带有中心泵浦区域、光栅和吸收区域)俯视图[44-45]

Fig. 16 An underside view of a curved-grating surface emitting distributed feedback laser showing central pumped-stripe, grating and absorber regions[44-45]

生成一层薄的共轭聚合物。通过圆形光栅的外直径和占空比的优化,获得最小的阈值和最优的面发射斜率效率。通过实验获得:圆形光栅为250 μm时,激光器的阈值为19 nJ,斜率效能为0.13%。

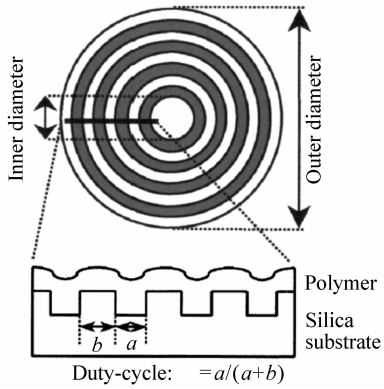


图17 圆形光栅激光器常见结构[46]

Fig. 17 Generic structure of the circular grating lasers[46]

2010年,S. F. Yu和X. F. Li[47]提出了太赫兹圆形金属光栅面发射分布反馈激光器的理论模型,并分析了该模式特性。如图18所示。通过分析可知,金属包层和二阶圆形金属光栅形成的表面耦合以及超高光束限制可以提升器件的激射效率。同时发现圆形状的金属-介质-金属波导结构会使衍射场强度随光栅半径r的增加而衰减,为获得高度集中的圆形面发射模式提供了理论依据。

2013年,Guozhen Liang、Houkun Liang等人[48]成功研制了单模工作面发射太赫兹量子级

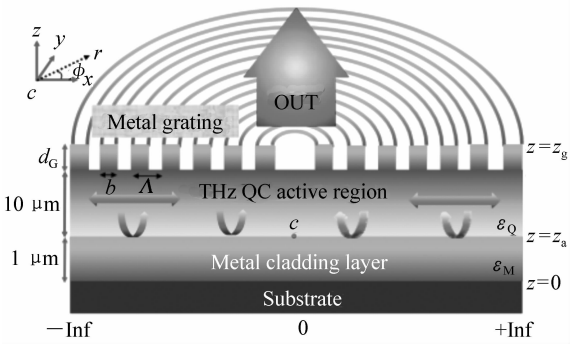


图 18　二阶同轴圆形金属光栅太赫面发射分布反馈量子级联激光器示意图[47]

Fig. 18　Schematic diagram of THz surface emitting distributed feedback quantum cascade lasers with a 2nd-order concentric circular metal grating[47]

联激光器。该器件采用非均匀二阶分布反馈同轴圆形光栅(CCG)。工作温度 70 K 时边模抑制比为 30 dB,获得同轴六折旋转对称的远场模式。其峰值输出功率是体积相近的脊型波导激光器的 3 倍,阈值增益与面积相当的脊型激光器相近;表面出射光场分布比环形分布反馈量子级联激光器均匀,非常适合二维高功率激光阵列的集成。

2014 年,奥地利 Rolf Szedlak 等人[49]对圆形量子级联激光器的远场模式进行了研究,设计并制作了 9 μm 圆形量子级联激光器,如图 19 所

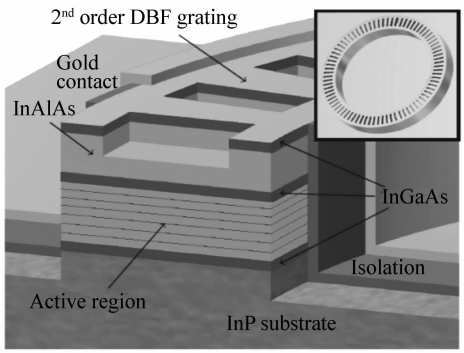


图 19　圆形量子级联激光器异质结和波导结构示意图 插图是完整的圆形激光器形貌[49]

Fig. 19　Schematic illustration of the heterostructure and the waveguide of a ring quantum cascade lasers. The inset shows a sketch of the complete ring laser[49]

示。通过理论和实验分析可知,除了通过光栅 π 相移的方法外,还可以利用旋转光栅裂缝的方法来获得更好的远场模式。

3.3　光子晶体面发射激光器

1999 年,出现了光子晶体面发射激光器(PESELs)第一实验演示[50-51],就因为它独特的特性和与常见的半导体激光器相比性能的提升吸引了人们的关注[51-60]。光子晶体由于其特有的结构能够在较宽的区域提供稳定的单模和较高的功率。

2009 年,法国 Gangyi Xu、Virginie Moreau 等人[61]研制了 7.3 μm 波段面发射光子晶体量子级联激光器,光子晶体被单独的放在金属层之上,金属层模式和非金属层区域之间的失配足够满足光学反馈获取激光。如图 20 所示。单模抑制比 20 dB,工作温度为 220 K。当光子晶体厚度为 150 nm时,出光发散角为 9°,出光功率达到 mW 级。

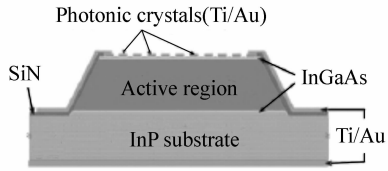


图 20　器件横截面图[61]

Fig. 20　Schematic cross section of a device[61]

2014 年,日本 Yong Liang 等人[62]对光子晶

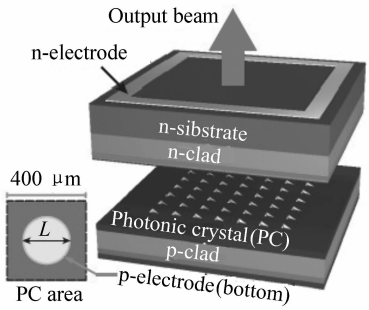


图 21　光子晶体面发射激光器结构示意图 左下方说明的是底部侧模圆形 p 电极直径[62]

Fig. 21　Schematic structure of a PCSEL device. Lower left panel illustrates bottom side view of circular p-electrode with diameter L[62]

体面发射激光器的单模稳定性进行了分析,设计并制作了光子晶体面发射激光器,如图 21 所示。该结构采用晶片键合技术,嵌入方形井网光子晶体结构层,利用直角等腰三角形不对称特性获得有效出光平面耦合,p 电极层是圆形电极。通过理论分析和实验可知,获取稳定光子晶体结构,需要增大主要发光模式与竞争模式之间的阈值边缘 $\Delta\alpha$,同时避免空间烧孔现象。

4 发展趋势

由近些年的相关报道可知:在 3 种结构的激光器中,转向镜原理较为简单,但工艺复杂并且制作困难。光子晶体结构需要大的高宽比和空气填充系数的精确控制,同时还要考虑边界吸收。然而二阶光栅结构的水平腔面发射半导体激光器结构由于其制备工艺及其性能的优势获得了广泛的关注,并在结构参数和性能上得到了快速地优化。

二阶光栅多应用于量子级联激光器结构上,并在基础理论、波导结构、光栅设计、出光特性等方面都取得了较好的发展。二阶光栅中矩形光栅的应用较为广泛,虽然能产生稳定单模输出且光束质量较好,但很难达到大功率。而美国 Alfalight 公司生产的商用二阶曲线光栅面发射分布反馈激光器,单一发射器输出功率能达到 73 W。曲形光栅的设计原理是构成一个类似“传统的非稳定型谐振腔”,能够最大限度的从增益介质中获取能量,得到好的光束质量的横模。虽然曲线形光栅能带来大功率,但曲线形光栅易受温度和诱发载流子介电常数变化的伤害,在高功率输出时器件容易产生多模。二阶分布反馈光栅的引入可以减小沿脊轴方向的发散角,环形光栅、准直硅镜、三阶布拉格光栅等可以用于改善出射光的二维图形,并且同轴圆形光栅也被证实为一种有效克制脊形波导缺点的方法。因此对于新型器件的研究,可以从探索新的光栅形状(三角形,矩形等等)以及新型波导结构出发,这样不仅可以提升激光器的功率,还能增强器件的稳定性。

随着应用领域的扩展,中红外波段面发射激光器成为研究热点。该波段是追迹气体探测、自由空间通信和污染监测等应用领域的理想波段。光子晶体面发射激光器在该波段得到了广泛的研究,但其性能还有待提升。二阶光栅面发射激光器也开始对该波段进行探索研究,但远场光斑为双瓣。随着半导体器件工艺的发展,使二阶光栅面发射激光器在该波段范围工作成为可能。二阶光栅工艺的发展可以扩大工作波长的范围,应用在更多领域。光栅材料除了采用半导体材料以外,还可以采用金属材料,由于金属与半导体界面能够产生等离子体,可以提高斜率效率和输出功率,并改善光束质量。器件结构上还可以采取渐变式波导结构或梯形波导结构,有助于光场强度分布的改善和光耦合输出效率的提升。

表 1 3 种结构面发射激光器性能

Tab. 1 Properties of three kinds surface emitting laser structures

引入结构	波段范围/nm	出光光束质量	加工工艺	出光功率
转向镜[23-24]	979.65	半高全宽 0.9 nm	较复杂	W 级
	1 490	半高全宽 0.6 nm	较复杂	mW 级
二阶光栅[44]	9XX ~ 1 5XX	椭圆形光斑发散角较小	较简易	W 级
光子晶体[22,61-62]	1 4XX ~ 8 0XX	圆形光斑发散角较小	较复杂	mW 级

5 结束语

目前,国际上水平腔面发射半导体激光器已经取得极大的发展。由 3 种具有特殊结构的面发射激光器综合对比可知,转向镜面发射激光器因其工艺较难,光束质量较差而很少被关注;二阶光栅面发射激光器和光子晶体面发射激光器因其光束质量好,输出功率大等优点而得到广泛认可,并且在基本理论,制作工艺等方面都已经趋于成熟。

国内相关研究单位较少,并大部分工作集中在二阶光栅面发射激光器的研究上,对光子晶体结构激光器研究较少。随着水平腔面发射激光器性能的提升及应用领域的扩展,将会有越来越多的研究人员加入到该激光器结构的研发和探索中。对二阶光栅结构的深入研究以及相关工艺水平的不断提升将有利于器件性能的提高以及工作波段的拓展。而光子晶体面发射激光器因其工作波段的优势可以在气体追踪,污染检测等领域得到广泛应用,具有良好的发展前景。

参考文献:

[1] LEE H C,GAENSSLEN R E. *Advances in Fingprint Technology*[M]. Elsevier,1991.

[2] TANIYASU Y,KASU M,MAKIMOTO T. An aluminium nitridelight-emitting diode with a wavelength of 210 nanometres [J]. *Nature*,2006,441:325-328.

[3] HIRAVAMA H,TSUKADA Y, MAEDA T,*et al*.. Marked enhancement in the efficiency of deep-ultraviolet AlGaN light-emitting diodes by using a multi quantum-barrier electronlocking layer[J]. *Appl. Phys. Express*,2010,3:031002.

[4] KHAN M A,SHATALOV M,MARUSKA H P,*et al*.. III-Nitride UV devices[J]. *Jpn. J. Appl. Phys*.,2005,44(10):7191-7206.

[5] 王立军,宁永强,秦莉,等. 大功率半导体激光器研究进展[J]. 发光学报,2015,36(1):1-19.
WANG L J,NING Y Q,QIN L,*et al*.. Development of high power diode laser[J]. *Chinese J. Luminescence*,2015,36(1):1-19. (in Chinese)

[6] 李珂,石鹏,张晓波,等. 双透镜系统光学整形元件的设计制作[J]. 中国激光,2010,37(8):1972-1977.
LI K,SHI P,ZHANG X B,*et al*.. Design and preparation of diffraction optical element in dual lens system[J]. *Chinese J. Lasers*,2010,37(8):1972-1977. (in Chinese)

[7] 马浩统,周朴,王小林,等. 基于液晶空间光调制器的激光光束近场整形[J]. 光学学报,2010,30(7):2032-2036.
MA H T,ZHOU P,WANG X L,*et al*.. Near-field beam shaping based on liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Optica Scinica*,2010,30(7):2032-2036. (in Chinese)

[8] 陈凯,李平雪,陈檬,等. 高斯光束整形为平顶光束的非球面系统设计和面形参数分析[J]. 激光与光电子学进展,2011,48(3):032201.
CHEN K,LI X P,CHEN M,*et al*.. Design and analysis of surface parameters of aspheric lenses system converting Gaussian beam to flattop beam[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*,2011,48(3):032201. (in Chinese)

[9] 金国藩,严瑛白,邬敏贤,等. 二元光学[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
JIN G F,YAN Y B,WU M X,*et al*.. *Binary Optics*[M]. Bingjing:National Defense Industry Press,1998. (in Chinese)

[10] STEFAN H,BEN L,BORIS R,*et al*.. Single emitter based diode lasers with high brightness and narrow linewidth[J]. *Proc. SPIE*,2011,7918:79180M.

[11] PAUL W,BERND K H,KARSTEN R,*et al*.. High-power, high-brightness and low-weight fiber coupled diode laser device[J]. *SPIE*,2011,7918:PSI79180O.

[12] KITCHING J,KNAPPE S. A microwave frequency reference based in VCSEL driven dark line resonances in Cs vapor [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*,2000,49(6):1313-1317.

[13] MILLER M,GRANBHERR M. Improved output performance of high-power VCSELs[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*,2001,7:210-216.

[14] 田锟,邹永刚,马晓辉,等. 面发射分布反馈半导体激光器[J]. 中国光学,2016,9(1):51-64.
TIAN K,ZOU Y G,MA X H,*et al*.. Surface emitting distributed feedback semiconductor lasers[J]. *Chinese Optics*,2016,9(1):51-64. (in Chinese)

[15] 戚晓东,叶淑娟,张楠,等. 面发射分布反馈半导体激光器及光栅耦合半导体激光器[J]. 中国光学与应用光学,2010,3(5):415-431.
QI X D,YE S J,ZHANG N,*et al*.. Surface-emitting distributed-feedback semiconductor lasers and grating-coupled laser diodes[J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*,2010,3(5):415-431.

[16] TOBY J G,DON O,YAN X,*et al*.. Long wavelength surface-emitting distributed feedback(SE-DFB) laser for range find-

ing applications[J]. *SPIE*,2012,8241:824113-4.

[17] LIANG G Z,LIANG H K,ZHANG Y,*et al*.. Low divergence single-mode surface-emitting concentric-circular-grating terahertz quantum cascade lasers[J]. *Optics Express*,2013,21(26):31878-31882.

[18] CLEMENS S,ELVIS M,SANG I A,*et al*.. Grating duty-cycle induced enhancement of substrate emission from ring cavity quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*,2012,100(19):191103-3.

[19] CLEMENS S,ROLF S,SANG I A,*et al*.. Linearly polarized light from substrate emitting ring cavity quantumcascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*,2013,103(8):081101-3.

[20] SHOICHI K,TAKESHI K,YASUHIRO N,*et al*.. GaN-based surface-emitting laser with two-dimensional photonic crystal acting as distributed-feedback grating and optical cladding[J]. *Applied Physics Letters*,2010,97(25):251112-3.

[21] WU T T,CHEN C C,LU T C,*et al*.. Effects of lattice types on GaN-based photonic crystal surface-emitting lasers[J]. *Quantum Electronics*,2015,21(1):1700106.

[22] ZHAO D Y,LIU S,YANG H J,*et al*.. Printed large-area single-mode photonic crystal bandedge surface-emitting lasers on silicon[J]. *Scientific Reports*,2016,6:18860.

[23] OSOWSKI M L,LAMMERT R M. High Power Frequency Stabilized Surface Emitting Arrays[R]. Osowski-SSDLTR,2005.

[24] MOEHRLE M,KREISSL J,MOLZOW W D,*et al*.. Ultra-low threshold 1490 nm surface-emitting BH-DFB laser diode with integrated monitor photodiode[C]. 22nd International Conference on Indium Phosphide & Related Materials (IPRM),IEEE,2010:TuA3-4.

[25] LI S,BOTEZ D. Design for high-power single-mode operation from 2-D surface-emitting ROW-DFB lasers[J]. *Photonics Technology Letters*,2005,17(3):519-521.

[26] LI S,BOTEZ D. Analysis of 2-D Surface-Emitting ROW-DFB Semiconductor Power Single-Mode Operation[J]. *J. Quantum Electronics*,2007,43(8):655-667.

[27] HOFLING S,HEINRICH J,REITHMAIER J P,*et al*.. Widely tunable single-modequantum cascade lasers with two monolithically coupled Fabry-P rot cavities[J]. *Appl. Phys. Lett*.,2006,89:241126.

[28] MARTIN S,FARHAN R. Analysis of Terahertz surface emitting quantum-cascade lasers[J]. *J. Quantum Electronics*,2006,42(3):257-265.

[29] LYAKH A,ZORY P,BOTEZ D,*et al*.. Substrate-emitting, distributed feedback quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*,2007,91:181116.

[30] MAISONS G,CARRAS M,GARCIA M,*et al*.. Substrate emitting index coupled quantum cascade lasers using biperiodic top metal grating[J]. *Applied Physics Letters*,2009,94(15):151104.

[31] SIGLER C,KIRCH J D,EARLES T,*et al*.. Design for high-power, single-lobe,grating-surface-emitting quantum cascade lasers enabled by plasmon-enhanced absorption of antisymmetric modes[J]. *Applied Physics Letters*,2014,1049 (13):131108.

[32] BOYLE C,SIGLER C,KIRCH J D,*et al*.. High-power, surface-emitting quantum cascade laser operating in a symmetric grating mode[J]. *Applied Physics Letters*,2016,108:121107.

[33] GUO W H,LU Q Y,LIU J Q,*et al*.. Analysis of surface emitting distributed-feedback quantum cascade laser based on a surface-plasmon waveguide[J]. *J. Semiconductors*,2010,31(11):114014.

[34] GUO W H,LIU J Q,CHEN J Y,*et al*.. Single-mode surface-emitting, distributed feedback quantum-cascade lasers based on hybrid waveguide structure[J]. *Chinese Optics Letters*,2011,9(6):061404.

[35] 叶淑娟,秦莉,戚晓东,等.二阶光栅分布反馈半导体激光器的出光特性[J].中国激光,2010,37(9):2371-2375.
YE SH J,QIN L,QI X D,*et al*.. Emission characteristics of second-order distributed feedback semiconductor lasers[J]. *Chinese J. Lasers*,2010,37(9):2371-2375.(in Chinese)

[36] CHEN Y Y,QIN L,JIA P,*et al*.. High power narrow far-field broad-stripe semiconductor lasers with second-order metal grating feedback[J]. *Semiconductor Lasers and Applications*,2012,8552:85520E.

[37] CHEN J Y,KIU J Q,GUO W H,*et al*.. High-power surface-emitting surface-plasmon-enhanced distributed feedback

quantum cascade lasers[J]. *Photonics Technology Letters*,2012,24(11):972-974.

[38] YAO D Y,LIU F Q,ZHANG J C,*et al*.. High power surface metal grating distributed feedback quantum cascade lasers emitting at $\lambda \sim 8.3$ μm[J]. *Chinese Physics Letter*,2012,29(9):94205.

[39] YAO D Y,ZHANG J C,LIU F Q,*et al*.. Surface-emitting quantum cascade lasers operation in continuous-wave mode above 70 ℃ at λ-4.6 μm[J]. *Applied Physics Letters*,2013,103:041121.

[40] TAN S Y,ZHAI T,LU D,*et al*.. Fabrication and characterization of high power 1064-nm DFB lasers[J]. *Chinese Physics Letter*,2013,30(11):114202.

[41] ZHANG J C,LIU F Q,YAO D Y,*et al*.. Multi-wavelength surface emitting quantum cascade lasers based on equivalent phase shift[J]. *J. Applied Physics*,2014,115:033106.

[42] YAO D Y,ZHANG J C,LIU F Q,*et al*.. 1.8W room temperature pulsed operation substrate-emitting quantum cascade lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*,2014,26(4):323-325.

[43] LIU Y H,ZHANG J C,JIA Z W,*et al*.. Top grating, surface-emitting DFB quantum cascade lasers in continuous-wave operation[J]. *Photonics Technology Letters*,2015,27(17):1829-1832.

[44] TOBY J G,DON O,YAN X,*et al*.. High-power surface emitting distributed feedback(SE-DFB) lasers[J]. 2012 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting,IEEE,2012:1-2.

[45] KANSKAR M,CAI J,KEDLAYA D,*et al*.. High brightness 975 nm surface-emitting distributed feedback laser & arrays [J]. *SPIE*,2010,7686:76860J.

[46] TURNBULL G A,CARLETON A,BARLOW G F,*et al*.. Influence of grating characteristics on the operation of circular-grating distributed feedback polymer lasers[J]. *J. Applied Physics*,2005,98:023105.

[47] YU S F,LI X F. Design and analysis of terahertz surface-emitting distributed-feedback lasers with circular metal grating [C]. IEEE 3rd International Nanoelectronics Conference,IEEE,2010:1-2.

[48] LIANG G Z,LIANG H K,ZHANG Y,*et al*.. Single-mode surface-emitting concentric-circular-grating terahertz quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*,2013,102:031119.

[49] ROLF S,CLEMENS S,TOBIAS Z,*et al*.. Grating-based far field modifications of ring quantum cascade lasers[J]. *Optics Express*,2014,22(13):15829-15836.

[50] MEIER M,MEKIS A,DODABALAPUR A,*et al*.. Laser action from two- dimensional distributed feedback in photonic crystal[J]. *Applied Physics Letters*,1999,74:7.

[51] IMADA M,NODA S,CHUTINAN A,*et al*.. Coherent two-diamwnsional lasing action in surface-emitting laser with triandular-lattice photonic crystal structure[J]. *Applied Physics Letters*,1999,75:316.

[52] NODA S,YOKOYAMA M,IMADA M,*et al*.. Polarization mode control of two-dimensional photonic crystal laser by unit cell structure design[J]. *Science*,2001,293:1123.

[53] IMADA M,CHUTINAN A,NODA S,*et al*.. Multidirectionally distributed feedback photonic crystal lasers[J]. *Phys. Rev. B*,2002,65:195306.

[54] VURGAFTMAN I,MEYER J R. Design optimization for high-brightness surface-emitting photonic-crystal distributed-feedback lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron*,2003,39:689-700.

[55] OHNISHI D,OKANO T,IMADA M,*et al*.. Room temperature continuous wave operation of a surface-emitting two-dimensional photonic crystal diode laser[J]. *Optical Express*,2004,12:1562-1568.

[56] MIYAI E,SAKAI K,OKANO T,*et al*.. Photonics:Lasers producing tailored beams[J]. *Nature*,2006,441:946-948.

[57] MATSUBARA H,YOSHIMOTO S,SAITO H,*et al*.. GaN photo-crystal surface-wmitting laser at blue-violet wavelengths [J]. *Science*,2008,319:445-447.

[58] KIM M,KIM C S,BEWLEY W,*et al*.. Surface-emitting photonic-crystal distributed-feedback laser for the midinfrared [J]. *Applied Physics Letters*,2006,88:191105.

[59] CHASSAGNEUX Y,COLOMBELLI R,MAINEULT W,*et al*.. Electrically pumped photonic-crystal terahertz lasers controlled by boundary conditions[J]. *Nature*,2009,457:174-178.

[60] KUROSAKA Y,IWAHASHI S,LIANG Y,*et al*.. On-chip beam-steering photonic-crystal lasers[J]. *Photonics*,2010,4:

447-450.

[61] XU G Y, VIRGINIE M, YANNICK C, *et al*.. Surface-emitting quantum cascade lasers with metallic photonic-crystal resonators[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94: 221101-3.

[62] LIANG Y, TSUYOSHI O, KYOKO K, *et al*.. Mode stability in photonic-crystal surface-emitting lasers with large $\kappa_{1D}L$ [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104: 021102-3.

作者简介:

海一娜(1990 -),女,内蒙通辽人,博士研究生,主要从事光电子技术与应用方面的研究。E-mail:haiyn90@163.com

邹永刚(1982 -),男,吉林长春人,博士,副研究员,硕士生导师,2004年、2009年于吉林大学分别获得学士、博士学位,主要从事光电子技术与应用、光电子器件等方面研究。E-mail:zouyg@cust.edu.cn

《发光学报》

—EI核心期刊(物理学类;无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊,曾于1992年,1996年,2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为"物理学类核心期刊",并于2000年同时被评为"无线电电子学、电信技术类核心期刊"。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和"万方数据资源系统"等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年;美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年;日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文;2008年被荷兰"Elsevier Bibliographic Databases"确定为源期刊;2010年被美国"EI"确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的"中国期刊方阵"的评定中,《发光学报》被评为"双效期刊"。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金"择重"资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊,A4开本,144页,国内外公开发行。国内定价:40元,全年480元,全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地　址: 长春市东南湖大路3888号
《发光学报》编辑部
邮　编: 130033
电　话: (0431)86176862, 84613407
E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号: CN 22-1116/O4
国际标准刊号: ISSN 1000-7032
国内邮发代号: 12-312
国外发行代号: 4863BM
http:// www.fgxb.org