文章编号 2095-1531(2016)01-0051-14

面发射分布反馈半导体激光器

田 锟[1],邹永刚[1*],马晓辉[1],郝永芹[1],关宝璐[2],侯林宝[1]
(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 北京工业大学 光电子技术省部共建教育部重点实验室,北京 100124)

摘要:本文详细阐述了面发射分布反馈半导体激光器(SE-DFB-LD)的基本工作原理、结构设计及其工作性能,针对国内外研究最新进展与发展现状进行了总结和评述,并在此基础上,对面发射半导体激光器的研究工作和发展趋势做出了进一步的讨论和展望。随着面发射分布反馈半导体激光器各性能指标的不断优化提升和后期加工、装调技术的逐渐成熟,其将不断满足科学研究及工业、军事等实际应用领域对半导体激光器的需求,具有很大的发展潜力。

关 键 词:二阶光栅;面发射;分布反馈;半导体激光器
中图分类号:TN258.4 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20160901.0051

Surface emitting distributed feedback semiconductor lasers

TIAN Kun[1], ZOU Yong-gang[1*], MA Xiao-hui[1], HAO Yong-qin[1], GUAN Bao-lu[2], HOU Lin-bao[1]
(1. *State Key laboratory of High-power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun* 130022, *China*;
2. *Key Laboratory of Opto-electronics Technology of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing* 100124, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: zouyg@cust.edu.cn*

Abstract: The basic theory, structure and performance of surface emitting distributed feedback semiconductor lasers (SE-DFB-LD) were demonstrated and described in this paper, and the present situation of research and development at home and abroad was summrred and reviewed. Based on all of these, the further research and development trend were discussed and prospected. With the consecutive optimization and enhancement of performance and the advancement of late machining and alignment technology, SE-DFB-LD will fulfill the requirement for scientific research and practical applications and has great development potential and capacity in industry and military, *etc*.

Key words: second-order grating; surface emitting; distributed feedback; semiconductor lasers

收稿日期:2015-09-03;**修订日期**:2015-10-12
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11474038)
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11474038)

1 引 言

半导体激光器因其尺寸小、重量轻、光电转换效率高、寿命长、稳定性好和易于集成等独特优势而被广泛应用于工业生产和军事装备等领域,并已成为光电子领域的核心器件[1]。同时,随着相关半导体制备工艺技术的改进和完善,半导体激光器性能指标得到了大幅提升,应用领域和范围也进一步拓宽。目前,在半导体激光器的加工与应用过程中,为获得理想的激光输出质量,往往在增大激光器输出功率的同时需要进行光束整形、准直和耦合[2],从而克服边发射半导体激光器出射光束图形复杂、发散角大等先天劣势,但是昂贵的精密光束整形系统和高装调难度大幅增加了激光器的加工制作成本,制约了边发射激光器件的产品化。

表面发射半导体激光器为上述边发射激光器所面临的问题提供了切实可行的解决方案。按照结构不同,表面发射半导体激光器有很多种,现今商用的主要是垂直腔表面发射激光器(Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers,VCSELs),因其圆形输出光斑、单纵模输出、低阈值电流、易耦合、价格低廉以及易集成化等特点已广泛应用于通信领域[3-4],但是与边发射激光相比,其极低的光子单程增益严重限制了器件的输出功率,同时圆对称结构使得横向模式不稳定,以及制作材料单一等都阻碍了 VCSELs 的进一步发展。

2014 年,中科院长春光机所采用全自主化设计的芯片结构及模块结构串接 4 个单管高功率垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)设计,成功研制了百瓦级 980 nm 波段高功率准列阵模块[5]。其尺寸仅为 2.2 mm × 2.2 mm,输出功率高达 210 W,这是继 2012 年成功制备单管 VCSELs 模块输出92 W(国际最高)以来,迄今为止所报道的最高功率指标。该突破使得微小型高功率 VCSELs 模块有望在激光引信、激光测距及激光面阵雷达系统中达到实用化水平,但目前还处于实验室阶段,并未进行市场推广。

除 VCSELs 以外,还有纵向振荡表面发射半导体激光器,如光子晶体(PhC)谐振腔激光器[6],但其需要的高纵横比、灵活调节空气填充系数的深刻蚀技术和带边吸收域的精确设计都限制了其实用化;而环形腔(Ring cavity)激光器[7-11]对器件制备技术水平要求较高,对其产品化亦存在一定的制约性。相对前述激光器,采用二阶 Bragg 式光栅实现表面输出耦合功能的面发射 DFB 半导体激光器(SE-DFB-LD)优势明显,其最大的亮点在于外延片采用二阶光栅,不仅提高激光器器件工作效能,同时简化了系统结构,降低了制备和运行成本。目前,典型产品已实现高功率(单管 73 W)、高亮度(单管近衍射极限 3 W,CW),窄线宽(0.08 nm)[12],单管及阵列单模激射和单瓣近衍射极限出光[13]。与单横模、高折射率差的光子晶体结构结合有望实现瓦级的连续波工作衍射极限功率。此外,金属/半导体界面处产生的表面等离子体被有针对性地用于光束整形和发散角压缩[14],进一步改善了二阶金属光栅 SE-DFB-LD 的出光质量及工作性能。二阶光栅 SE-DFB-LD 可靠性及实用水平的提升和后期的批量化生产将促成激光雷达、激光探测、信息处理、激光工业加工等众多领域迅猛的发展及革命性的飞跃。

本文综述了面发射二阶光栅分布反馈半导体激光器的工作原理、结构与工作性能,对国内外的近五年的研究进展进行了总结,并就其发展趋势和工作展望进行了分析。

2 相关基本原理、结构设计及性能

2.1 相关基本工作原理

光栅是一种集衍射与干涉作用于一体的混合光学元件,在光栅上有规则地配置狭缝和沟槽等波状起伏结构,使其光透过率或反射率呈周期性变化,从而对入射光波的相位或振幅进行空间周期性调制。因此,SE-DFB-LD 将光栅置于半导体激光器内,即在半导体激光器的芯片上制作 Bragg 光栅,并通过衍射作用对光波进行分布反馈,从而实现选纵模,窄线宽及面发射的目的。

相对传统端面光反馈的 F-P 腔半导体激光器,SE-DFB-LD 的光栅结构分布于整个谐振腔内,进而对光进行“分布”反馈,使得相向传播的光波发生耦合。其中,只有满足 Bragg 反射条件

的光子才能形成稳定的光反馈,进而产生光增益和光放大。其 Bragg 条件为:

$$2n_{\text{eff}}\Lambda = q\lambda \ , \qquad (1)$$

式中,n_{eff}为光栅材料和填充材料的有效折射率,Λ 为光栅周期,q 为光栅的阶数 $q \in N^*$,λ 为 Bragg 波长。q 阶光栅的光栅周期 Λ 是腔内形成稳定振荡光子的半波长的 q 倍,可知,对于具有一定带宽的激光器来说,出光特性(如激射波长、出光方向)均由光栅的周期 Λ 决定,因此可通过改变光栅周期来调制衍射出光方向。

在激光器中,除了常见的介质光栅,还有采用金属填充的半导体材料光栅,即金属-半导体衍射光栅[15-16]。当激光器工作时,其内部(金属、半导体交界面)存在等离子体增强效应[17](如图 1)和电极反射作用(如图 2),从而影响器件出光特性。根据 Maxwell 方程可知,一定条件下等离子体表面波(SPW)沿着金属与电介质交界面传播,金属表面结构的改变(制成光栅)会影响表面等离子体的特性,进而改变与光的作用效果。光波入射金属-半导体光栅界面时发生散射。当具有特定角度散射光在界面方向上的分量与 SPW 的动量相等且消失波存在时,散射光将会与 SPW 发生共振(SPR),产生表面等离子体增强效应。

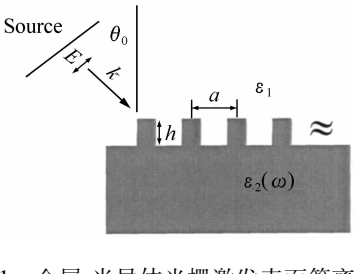


图 1　金属-半导体光栅激发表面等离子体

Fig. 1　SPPs excited at the interface of metal and semiconductor

合金处理后的二阶金属光栅 P 面盖层或包层会同时起到欧姆电极的作用。光波作用于金属-半导体光栅,衍射出垂直于光栅平面向上及向下传播的一级衍射光。向下传播的衍射光直接从表面输出,向上传播的衍射光会与金属电极作用损失部分能量并反射向下传播,部分反射光与向上传播的一级光发生干涉,相干增强或减弱光强,从而影响二阶光栅耦合系数。

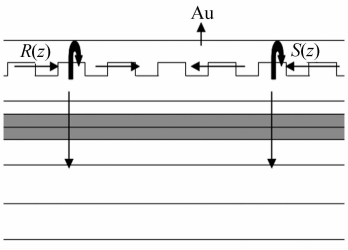


图 2　电极反射作用

Fig. 2　Effect of electrode reflection

2.2　结构设计及性能

对于出射特定波长 λ 的激光器来说,可分为不同内置光栅阶数的光栅耦合激光器(N 阶光栅的光栅周期是介质内半波长的整数 N 倍)。而光栅的阶数决定了光的衍射方向。一阶光栅上只发生与入射光相反的一级衍射;二阶光栅上发生与入射光方向相反的二级衍射及与其垂直的一级衍射;三阶光栅上发生 3 个不同方向的衍射;更高阶的光栅上会发生更多的衍射方向。

常见的边发射 DFB-LD 因耦合机制不同而分为折射率耦合 DFB-LD、增益耦合 DFB-LD 与复耦合 DFB-LD,通过内置一阶光栅实现光子沿纵向稳定振荡反馈的 DFB-LD,其在单纵模激射、波长稳定性、工作可靠性等方面都明显优越于传统的边发射 F-P 腔 LD。然而除存在共有的边发射结构所致大发散角等缺点外,这些结构又都各有其不同于其他的不足之处,进而影响了其实际应用。

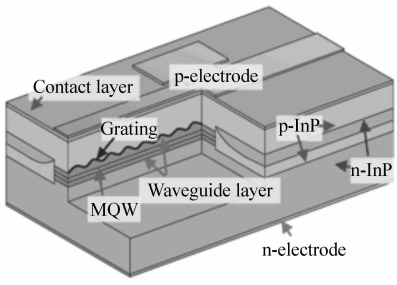
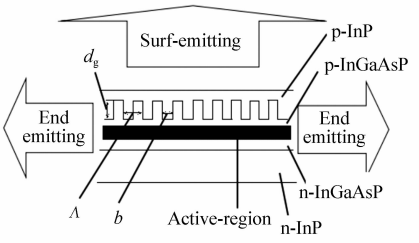


图 3　一阶光栅分布反馈激光器示意图

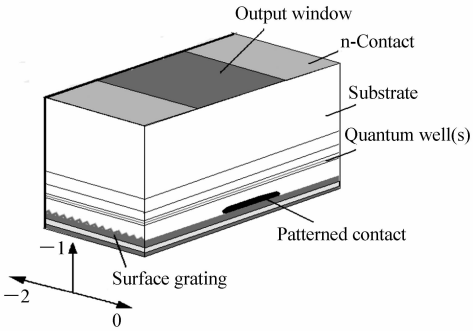
Fig. 3　Schematic diagram of first-order grating DFB laser

SE-DFB-LD 为内置二阶光栅,光子沿腔长方向稳定反馈振荡,并垂直芯片表面耦合出光的 DFB-LD,具有单纵模工作、表面出光、小发散角、亮度高、线宽窄、温漂小、工作稳定、工艺较简单等

优点，大大增加了激光系统运用的方便性和灵活性，在泵浦固体及光纤激光器、激光焊接、激光雷达、空间光通信等领域具有非常广阔的应用前景。



(a) 二阶光栅DFB激光器结构
(a) Structure of second-order grating DFB laser



(b) 二阶光栅DFB激光器模型
(b) Model of second-order grating DFB laser

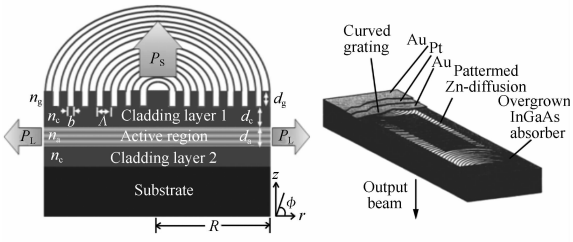
图4 二阶光栅 DFB 激光器示意图

Fig. 4 Schematic diagram of second-order grating DFB laser

光栅分类：

(1)在光栅的形状结构上，除了传统的平面直线形，还有圆形(Circular)、碟形(Disk)、环形(Ring)以及曲线形(Curved)。圆形光栅耦合面发射激光器产生圆对称、大孔径、低发散的优质激光束，易高效地光纤耦合，是相干合束中用于二维激光阵列集成的优质模块；碟状布拉格谐振腔激光器在低阈值、高效率、超紧凑激光器设计中实用性最强；同时环形布拉格谐振腔激光器在高效率、高功率、大面积激光器领域中最具发展潜力。碟形和环形布拉格光栅可对垂向圆形光斑进行控制。曲线光栅面发射 SE-DFB 可以对出光模式(光束截面二维方向的发散角)进行控制并且实现圆形光栅 SE-DFB 所不易完成的二维漏模耦合阵列化出光。

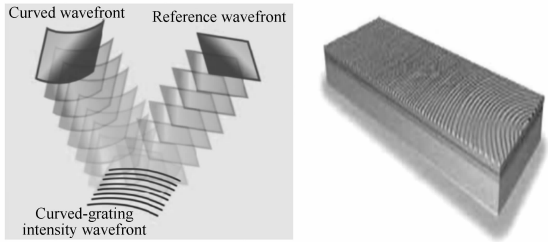
(2)考虑光栅材料、结构对光增益的影响，即根据 n_{eff} 虚数部分的大小，可将 SE-DFB-LD 分为：



(a) 圆形光栅SE-DFB-LD (b) 曲线光栅SE-DFB-LD
(a) Circular-grating SE-DFB-LD (b) Curved-grating SE-DFB-LD

图5 圆形光栅及曲线光栅 SE-DFB-LD 示意图

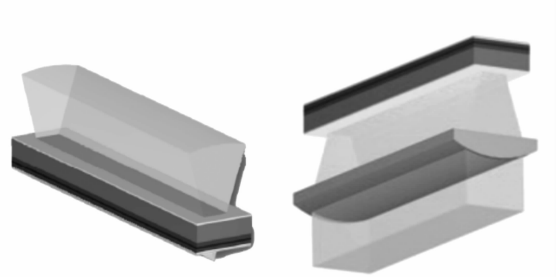
Fig. 5 Schematic diagram of circular-grating SE-DFB-LD and curved-grating SE-DFB-LD



(a) 全息刻蚀 (b) 曲线光栅
(a) Holographic lithography (b) Curved grating

图6 全息刻蚀及曲线光栅结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of holography lithography and curved grating



(a) SE-DFB-LD表面出光
(a) Surface emitting of SE-DFB-LD

(b) SE-DFB-LD光束准直
(b) Beam collimating of SE-DFB-LD

图7 SE-DFB-LD 表面出光及准直示意图

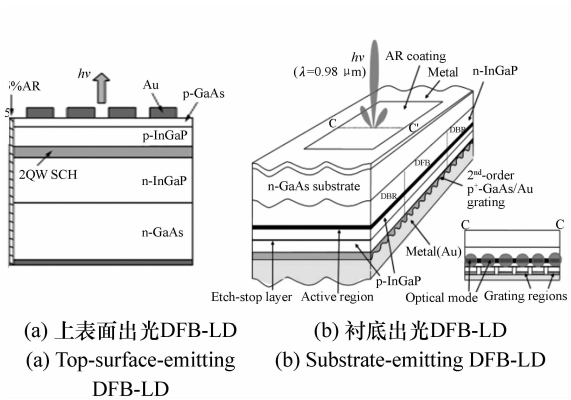
Fig. 7 Schematic diagram of surface emitting and beam collimating

折射率耦合型 SE-DFB-LD、增益耦合型 SE-DFB-LD，以及复耦合型 SE-DFB-LD。折射率耦合型 SE-DFB-LD，模式简并，工作不稳定且近场反对称，远场光斑为双瓣，必须引入 π 的相移才能得到单瓣出光；增益耦合型和复耦合型 SE-DFB-LD

工艺难,散射损耗大,增益或损耗项引起了大的阈值增益差,获得远场单瓣出光。

(3)按光栅材料的不同(其相应的工作原理亦有差别),可分为介质光栅 SE-DFB-LD 和金属光栅 SE-DFB-LD。工作原理上,前者只涉及二阶光栅衍射与光的反馈,后者可以在此基础上更多涉及了等离子体增强作用和电极发射作用。结构上,前者的光栅离有源区较近,从而增强了光栅对内部光波的衍射及调制几率。后者离有源区较远,但因所附加等离子增强原理而依然有较高的光电转换效率及表面出光耦合效率。

(4)按激光器出光面的位置可分为 Top-Surface-Emitting DFB-LD 和 Substrate-Emitting DFB-LD。相对而言,后者结构应用较为普遍。



(a) 上表面出光DFB-LD　(b) 衬底出光DFB-LD
(a) Top-surface-emitting DFB-LD　(b) Substrate-emitting DFB-LD

图 8　上表面出光及衬底出光 DFB-LD 示意图

Fig. 8　Schematic diagram of top-surface-emitting DFB-LD and substrate-emitting DFB-LD

(5)按出光窗口和光栅与有源区相对位置不同,可分为同侧或异侧。后者较为常见,两者位于异侧的二阶金属光栅结构相对于位于同侧的金属结构,光场作用中多了电极作用。

(6)按器件内光栅的周期性可将其分为周期性(periodic)光栅和非周期性(biperiodic)光栅。相对于传统的边发射 LD,垂直腔面发射 LD(VCSEL)及 DFB-LD,二阶光栅 SE-DFB-LD 具有众多优良性能:

芯片内部:

(1)基于光栅对光的衍射、调制作用,可以形成类型多样且作用效果各异的谐振腔,从而实现了光子纵向反馈振荡及表面耦合出光的目的。

(2)表面发射损耗会引起主模式和最低阶次模式间存在大的阈值增益差,消除了模式简并,获得单纵模激射模式。

(3)内部芯片不需要解理便可直接进行测试,提高了成品率,降低了生产成本。

(4)曲线光栅的引入避免了来自外界的光反馈,同时对光波前整形,增加了出射光亮度并抑制了侧模细丝化的形成。

芯片外部:

(1)增大了出光面积和模式体积,避免了光学灾变、面反射模式体积小和功率密度低等影响出光功率的问题。相应地降低了加工散热器件工艺难度,提高了波长稳定性,简化了装置结构。

(2)在出光口上大面积镀增透膜可避免两端面镀高反膜及相应引入的表面损伤问题,降低了加工工艺难度及制备成本。

(3)表面出射光束受光栅调制,窄化光谱线宽并压缩了二维出光截面上的发散角,从而改善了出光模式,使得之后的光束整形、准直和光纤耦合易于进行,此外还省去了复杂庞大的辅助设备。易封装、易获得集成化高功率、高光束质量阵列。

(4)相对于常见的边发射 LD 系统,面发射 LD 器件表面电极接触面积较大,降低了芯片电阻,采用低电流电源便可驱动系统运行。

(5)SE-DFB-LD 中曲线形光栅结构可以通过单元之间的行波耦合实现高功率高质量光束输出的侧模锁相相干阵列。

(6)二阶金属光栅 SE-DFB-LD 中利用金属光栅取代了介质光栅,避免了光栅制作完成后需要进行的二次外延生长过程,同时用作电极的金属光栅具有最小化的热阻抗。面发射 LD 所具有的大散热面积更有利于实现系统的温度稳定性及波长稳定性。

3　国内外研究进展及展望

光栅耦合面发射激光器的研究起始于 20 世纪 70 年代,较集中地应用于近红外(IR)波段的设备[18-20]。TE 偏振激光器中,纵模辐射损失较低,倾向于反对称激射(例如远场具有双瓣的模式),为了实现单瓣工作,出现了很多方法如采用复耦合光栅、引入相移、两边设置反射镜、采用啁

啾光栅以及载流子注入等，其中最成功的是采用没有功率损失的中心光栅 π 相移[21-24]或者作用相当于一个 π 相移的啁啾光栅[25]。

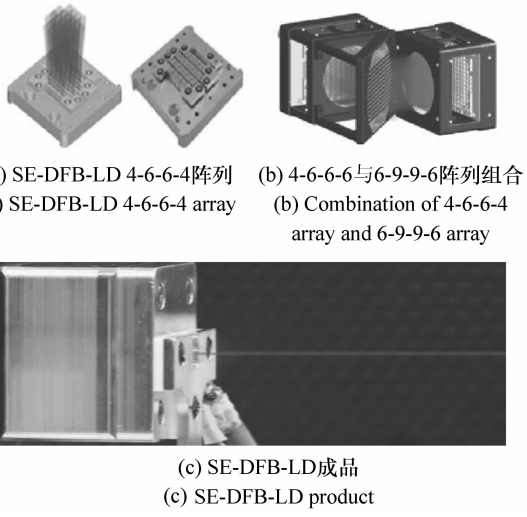
然而，这段时间相关的光栅衍射理论、光栅制作工艺及光栅耦合器件制备技术的发展都不够完善。需制备的器件及相关实验结果不能准确验证相关的理论分析与计算结果，阻碍了光栅耦合器件及系统研究的进程。

随着光栅刻蚀技术水平的稳步提升，微光学领域的研究也日趋深入，出现了多种新的刻蚀技术如全息刻蚀[26-27]、纳米压印技术[28]、表面等离子体加强光刻技术[29]、电子束直写技术[30]、LIGA技术、质子写入技术[31]等，这些技术都有力地推动着具有特殊结构和特定用途的光栅不断革新，极大地拓展了光栅的应用领域。其发展是由单一到多样，由单周期光栅到双周期交叉光栅，由介质光栅到金属光栅，由单层光栅到多层光栅，刻划精度及光栅所具性能不断提升，制造技术持续发展并走向娴熟的过程。光栅刻蚀技术方面的工作极大地推动了光栅耦合器件及 SE-DFB-LD 优化及发展进程。

20 世纪 90 年代中期，量子级联激光器（QCLs）问世[32]之后，出射 TM 偏振光束的器件成为光栅耦合面发射激光器的分析热点。至今，中红外面发射分布反馈光栅量子级联激光器的内部关键结构主要包括：二维量子晶体结构[33]、空气-金属/半导体光栅[34]、衬底发光金属/半导体光栅[35-36]、金属/半导体非周期光栅[37]及全半导体光栅[38]。

截至 2008 年，已出现了多种光栅造型耦合器件及实现高输出功率的 SE-DFB-LD 集成阵列结构。在相关的基本理论（Surface Plasmon[39]，Surface Plasmon Polarition[40]、ARROW[41]、主动光格子[42]等）、结构（折射率耦合、复耦合、衬底发光、量子级联等）、现象（远场双瓣、侧模细丝化等）、工艺（光栅刻蚀、集成阵列、封装等）等方面的探索与问题研究已取得了一定的成果，使得不同的类型、结构及用途的 SE-DFB-LD 进军到了通信、军事、工业等领域。

2009 年，Alfalight 公司[43]首次在 SPIE OPTO 会展上展示其曲线光栅 SE-DFB-LD 产品，工作波长为 976 nm 的 SE-DFB-LD 在连续波工作模式下达到超过 2 W 的衍射极限功率，单一发射器输出功率达 73 W。相对于无稳频装置的边发射激光器，SE-DFB-LD 波长随温度稳定性（温漂）为 0.07 nm/℃，无需晶片制冷设备，带宽窄于 0.25 nm，亮度相当于边发射激光器的 10 倍。4-6-6-4 圆形模式的激光阵列出光达 200 W，6-9-9-6 圆形模式的阵列出光将近 300 W，并通过交叉极化合并激光单元实现多种千瓦级阵列，是 SE-DFB-LD 研究发展历程中的里程碑。



(a) SE-DFB-LD 4-6-6-4阵列
(a) SE-DFB-LD 4-6-6-4 array

(b) 4-6-6-6与6-9-9-6阵列组合
(b) Combination of 4-6-6-4 array and 6-9-9-6 array

(c) SE-DFB-LD成品
(c) SE-DFB-LD product

图 9 Alfalight 公司 SE-DFB-LD[43]

Fig. 9 Configuration of Alfalight's SE-DFB-LD [43]

3.1 国外研究进展

2009 年，Xiankai Sun 和 Amnon Yariv 在已有工作基础上对非均匀泵浦面发射啁啾圆形光栅激光器的模式性质（如阈值增益水平和频率解谐因子）进行研究和分析，并且对圆形 DFB、碟状和环状布拉格谐振腔激光器基模的远场模式进行了全面详细研究，为后续相关研究奠定了理论基础。同年，G. Masions、M. Carras 等人[37]提出了非周期光栅结构，如图 10 所示。QCLs 中该光栅一周期内包含 2 个沟槽（即一个一阶光栅和一个二阶光栅）。该种结构在降低金属引起损失的同时可对垂直于波导方向的模式进行耦合，实现对一阶和二阶傅里叶组分振幅的精确控制。通过设定宽度相同的两个槽或峰来控制两个傅里叶组分的相对相移，同时芯片制作采用了 InP 包层和 InGaAs/

AlInAs 有源区(已提出)的设计,制备了高边模抑制比、低光束发散角(12° ×3.1°)、阈值电流密度为 3 kA/cm^2(300 K,无冷却器)、中红外激射折射率耦合、水平腔衬底出光的量子级联激光器(HC-SELs)。

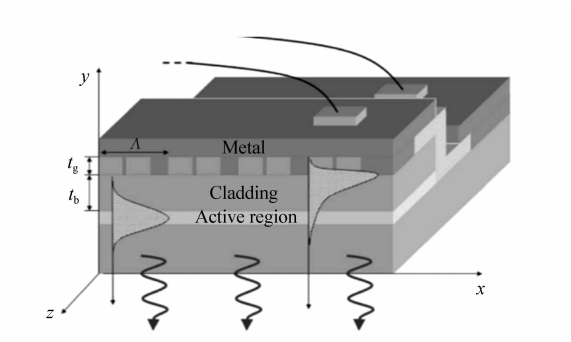


图 10　具有非周期光栅结构的面发射分布反馈量子级联激光器示意图[37]

Fig. 10　Schematic diagram of SE-DFB-QCLs using bi-periodic top metal grating

集成相干的太赫兹光源是生物制药、大气科学等众多领域的理想光源,而边发射 THz QCLs 的大发散角限制了其实际应用。2010 年,S. F. Yu 和 X. F. Li[44]就太赫兹圆形金属光栅 SE-DFB-LD(如图 11)提出了全面的理论模型并对其模式特性进行了设计和分析,采用金属包层以及二阶圆形金属光栅构成的表面耦合机制和超高光束限制提升了激射效率,并发现 MDM 波导的圆形造型会引起衍射场强度随着光栅半径 r 的增加而衰减,从而为获得高度集中的圆形面发射模式提供理论依据。

二维光子晶体结构和集成角天线可以同时普遍地用于两个方向上扩大相干光出射面。美国加州理工学院与桑迪亚国家实验室 Tsung-Yu Kao、Qing Hu 等人[45]提出了第 3 种获得对称输出光束的方法,即采用实现锁相调频的“相位节”(phase sector)制作二阶 DFB 激光器锁相阵列(图 12 为三脊型 SE-DFB 阵列)。两个同频但随意相位的相同脊型 DFB-LD 通过“相位节”连接而获得沿锁相阵列方向更加紧凑的光束模式的 SE-THz-QCLs 锁相阵列。正常运行情况下,六脊型激光锁相阵列为单瓣远场光束模式(FWHM≈10°)。此外,通过改变增益引起的光学折射率(optical index),相位节可以独自偏置(biased)来实现频率调谐,而

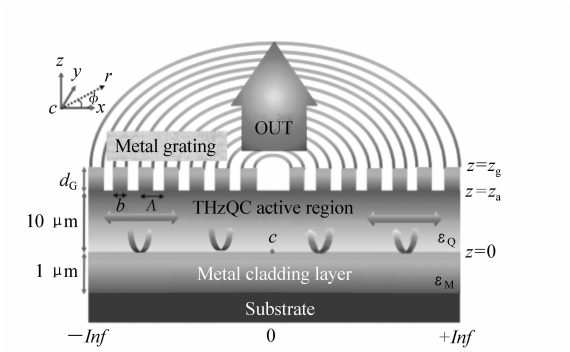


图 11　二阶同轴圆形金属光栅太赫面发射分布反馈量子级联激光器示意图[44]

Fig. 11　Schematic diagram of THz SE-DFB-QCLs with a 2nd-order CCMG[44]

不会对输出功率水平造成很大影响。

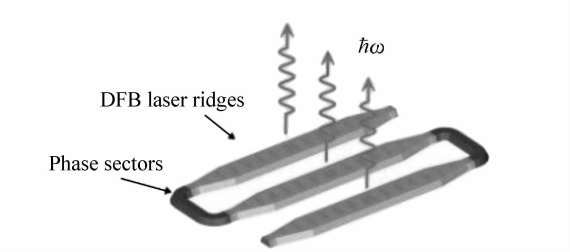


图 12　三脊型 SE-DFB 激光器阵列示意图[41]

Fig. 12　Schematic diagram of a three-ridges surface-emitting DFB array

新加坡南洋理工大学 S. F. Yu 和 X. F. Li[46]对具有二阶同轴圆形金属光栅(circular concentric metal grating, CCMG)结构的 THz SE-DFB-LD 提出了相应的理论及方法来分析激光器光场分布、阈值及模式特性,得出 MDM 波导的几何圆形结构随着 r 的增加,衍射场强度逐渐衰减而产生高度集中的圆形表面发射模式(对于提出的结构,可能出射集中在 THz 亚波长的激光)。

韩国光州科技技术院报道了二阶 Cr 表面金属光栅侧向双锥脊型波导 InGaAsP-InGaAsP 对量子阱分布反馈激光器[47]。单模激射,工作波长为 1.3 μm,边模抑制比高达 43 dB,波长随温度稳定性(温漂)为 0.071 nm/K。同年又成功研制了性能优良的二阶金属表面光栅侧向耦合分布反馈激光器[48],工作波长 1.55 μm,波长随温度稳定性为 0.08 nm/K。

然而,如何消除金属光栅导致的光损失,提升

激光器工作温度、压缩输出光束发散角且准确控制出射光波长成为另一个重要课题。2011 年,G. Maisons、M. Carras 等人[36]就这一问题提出了一个新颖的想法——将光栅的分布反馈与表面耦合输出的功能分开,相应地设计了基于二阶金属光栅耦合器的高效定向单模 QCL,并进行了实验验证。工作部分由一个具有一阶光栅 DFB 谐振腔和具有二阶光栅的耦合器组成,如图 13 所示。激射波长 5.65 μm,边模抑制比(SMSR)为 30 dB,低光束发散度(FWHM = 2.3°和 4°),但是因为 DFB 段的高折射率耦合系数和低的耦合效率,使得出射功率为标准边发射激光器功率的 1/10。因此,还需进一步对器件的结构和相关参数进行优化以实现高功率连续波工作以及高质量光束输出。

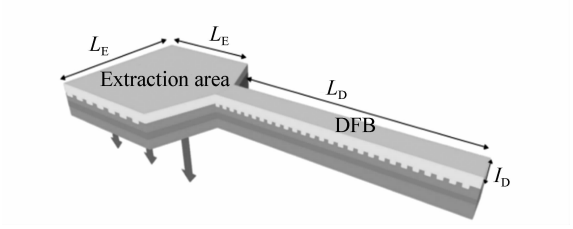


图 13 衬底出光分布反馈量子级联激光器示意图[49]

Fig. 13 Schematic diagram of the studied substrate-emitting DFB quantum cascade lasers

对于过热转移问题,外延层向下接合(epilayer-down bonding)是种高效可行的方法,Y. Bai、S. Tsao、N. Bndyopadhyay 等人[49]利用这种方法率先研制并报道了连续波工作的衬底发光量子级联环形激光器,之前所报道的衬底出光 QCL 均是脉冲工作。工作波长 4.85 μm,室温下连续波工作输出功率高达 0.51 W,稳定持续单模激射功率达 0.4 W,测试证明远场为高阶模且为方位偏振光束。

二阶 DFB 光栅的引入缩小了脊轴方向的发散角,环形光栅、准直硅镜、三阶布拉格光栅等被用于改善出射光的二维图形,同轴圆形光栅(CCG)也被证实为一种有效克制脊形波导缺点的方法。Guozhen Liang、Houkun Liang 等人[50]在 2013 年成功制备采用非均匀二阶分布反馈同轴圆形光栅(CCG)的单模工作 SE-THz QCLs。获得 70 K 下 30 dB 边模抑制比和同轴六折旋转对称的远场模式,其峰值输出功率比体积相近的脊型波导激光器的高 3 倍多,与面积相当的脊型激光器有相近的阈值增益;与环形 DFB-QCLs 相比,表面出射光场分布较为均匀,非常适合二维高功率激光阵列集成。

2014 年,C. Sigler、J. DKirch 等人[51]设计了一种单瓣、中红外波段激射(波长 4.6 μm)、低阈值(< 0.5 A)、高斜率效率(> 3 W/A)的 GCSE-QCLs。因量子激光器中 TM 偏振光学模式对二阶 DFB 金属/半导体光栅上的反对称表面等离子体模式的谐振耦合导致反对称模被强烈吸收,使得其本身具有抑制反对称模和增强对称模的作用。如图 14 所示结构中,设置 DFB 光栅两侧被分布布拉格反射镜(DBR)光栅束缚,避免了端面反射引起的不可控反射以及高功率时热致压力引起灾变性的端面退化,进而使得此种结构有实现稳定输出连续波工作瓦级相干光的潜力。

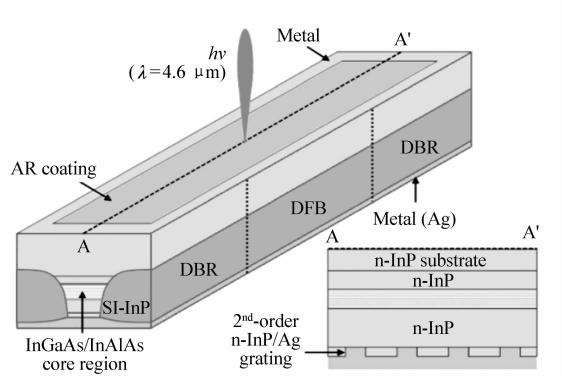


图 14 面发射掩埋异质结构 DFB/DBR 量子级联激光器及其纵截面示意图(右)[51]

Fig. 14 Schematic diagram and vertical section (right) of surface-emitting buried-heterostructure DFB/DBR quantum cascade lasers[51]

Rolf Szedlak、Clemens Schwarzer 等人[52]介绍了两种调整环形 QCLs 远场模式的方法,其分别基于具有旋转光栅狭缝和稍微偏离中心结构的新型 DFB 光栅。实验表明:前者结构引进了确定程度的径向偏振,而这种程度取决于光栅狭缝的倾斜角度,并且狭缝旋转角度的增大会削减光栅的耦合能力,从而降低耦合输出功率;后者结构获得相位匹配波前、相干干涉以及一个沿垂直环面方向圆对称、强度分布非均匀的中央单瓣远场模式。

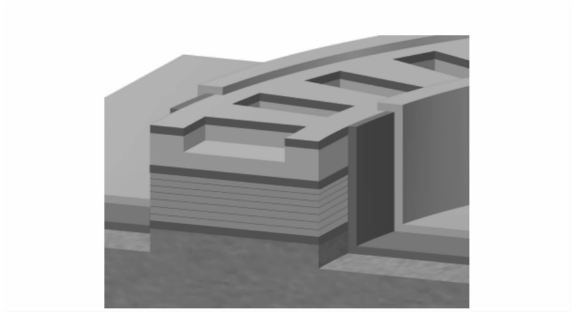


图 15　环形量子级联激光器异质结构示意图

Fig. 15　Schematic diagram of the heterostructure of ring quantum cascade lasers

3.2　国内研究进展

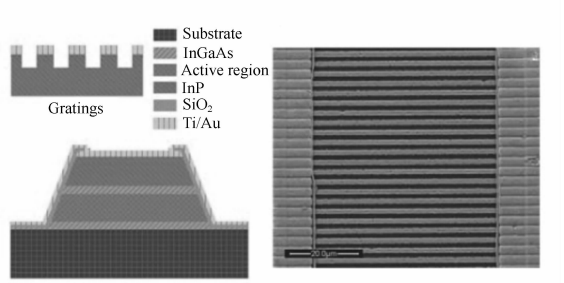
近年来,国外光栅耦合面发射分布反馈半导体激光器的研究进展非常迅速;相对而言,国内在该方面的研究起步较晚,但发展相对较快。中科院半导体所、中科院长春光机所、清华大学等科研单位的相关报道表明我国现已在 SE-DFB-LD 领域获得较丰硕的研究成果。

至今虽有众多良好的实验成果,但对 SE-DFB-LD 的优化(输出耦合效率、远场分布等)依然需要很多模拟及实验工作。2010 年,中科院长春光机所叶淑娟等人[53]基于耦合模理论对二阶光栅 SE-DFB-LD 的阈值增益、光子密度分布及外微分量子效率等进行了综合分析,并通过数值讨论了光栅占空比对器件出光特性的影响,优化后光栅占空比为 0.43,边模抑制比达 35 dB,外微分量子效率达 47%。更重要的是该理论分析和数值讨论方法是一种完整的极具参考价值的针对二阶 DFB 激光器出光特性综合分析的方法。

同年,中科院半导体所郭万红等人[54]运用耦合模理论描述了 SE-DFB-QCLs 的模式性质,并在此基础上,数值分析了波导结构、光栅造型以及装置长度对激光器工作状态的影响,并对这些参数进行了优化。通过光栅中心引入 π 相移,获得了远场单瓣模式、表面输出耦合效率 22%、低阈值增益 10 cm^{-1}的激光器件。之后,郭万红等人[55]设计并模拟了基于表面等离子体波导(Surface-plasmon waveguide)SE-DFB-QCLs,讨论分析了设备的参数及性能(损失、耦合系数,阈值增益及输出耦合效率),并设计了表面输出耦合效率为 43%、阈值增益为 12 cm^{-1}的优化器件,相对于传统的电介质波导 DFB-QCLs 有了明显的改善。

制作于金属接触层的光栅虽提高了折射率差和输出耦合系数,但引起的高波导损失将会限制激光器的工作性能。2011 年,郭万红等人[56]在薄的 InGaAs 接触和包层浅刻蚀了金属覆盖的二阶光栅制成混合波导,成功研制了基于混合波导的 SE-DFB-QCL。通过优化浅刻蚀二阶光栅的占空比获得相对低的波导损失和高的耦合强度,实现了稳定的单模工作(90 ~ 130 K 条件下),占空比高于 20 dB,90 K 时斜率效率为194 mW/A,沿着波导的方向远场双瓣模式(分离 15°)。

相对于室温工作的连续波半导体激光器,脉冲工作、高峰值功率且低运行成本的高性能半导体激光设备更受市场青睐。2012 年,中科院半导体所陈剑燕等人[57]提出了基于表面等离子增强(Surface-plasmon-enhanced)二阶分布反馈谐振腔的脉冲 SE-QCLs,工作波长 8.3 μm,室温单模工作,边摸抑制比为 20 dB,沿波导方向发散角为 0.35°的远场双瓣模式,160 K 时峰值出射功率(peak powers) 3.85 W。他们提出浅刻蚀表面等离子体增强二阶分布反馈谐振腔是实现高功率单模面 SE-QCL 最实用的结构。



(a) LD光栅与脊形波导横截面　(b) 局部光栅电子显微俯瞰图

(a) Cross section of the grating region and the ridge-waveguide　(b) Scanning electron microscopy top viewpoint of partial grating

图 16　面发射量子级联激光器[57]

Fig. 16　Surface emitting quantum cascade lasers[57]

同年,中科院半导体所姚丹阳等人[58]研制出性能优良的表面金属光栅 DFB-QCLs(如图 17),工作波长为 8.3 μm,290 K 时峰值功率达 463 mW,400 K 时仍然达 18.7 mW,具有较大的温度调谐范围,单模工作且边模抑制比为20 dB。这种结构极大地推动了长波光谱范围表面金属光栅 DFB-QCLs 的实际应用。

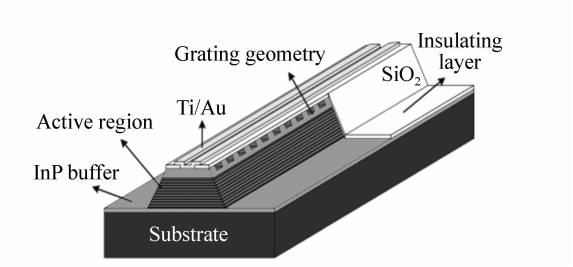


图17 表面金属光栅分布反馈量子级联激光器示意图[58]

Fig. 17 Schematic diagram of the surface metal grating distributed feedback quantum cascade lasers

环形腔光栅面发射激光器采用埋栅技术已实现室温连续工作,可是复杂的制备程序及远场多阶横模制约了其向实际应用转变。2013年,中科院半导体所姚丹阳等人[59]采用埋栅技术研制出高温(达75 ℃)连续工作的SE-DFB-QCLs,工作波长4.6 μm,283 K时获得0.85 kA/cm^{2}的最低阈值电流密度和高达105 mW的输出功率,远场单瓣图形,0.17°×18.7°低发散角,边模抑制比达30 dB。

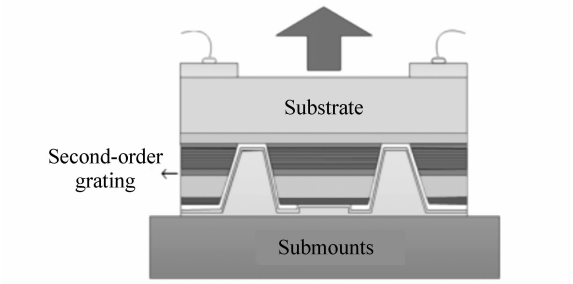


图18 面发射量子级联激光器示横截面[59]

Fig. 18 Schematic of cross section of the surface-emitting quantum cascade lasers

中科院半导体所谭少阳等人[60]研制成功脊形波导的SE-DFB-LD。其中采用全息照相术和湿法刻蚀制作二阶光栅,以两个低温生长的优质InGaAs/GaAs量子阱作为有源区,实现激射波长为1 064 nm,单模工作电流达255 mA,相应的输出功率达90 mW,高于55 dB的边模抑制比以及耦合效率达60 cm^{-1}的工作模式。

取样光栅一直未应用于DFB-QCL制作,其附加优势(通过改变取样周期来将多波长SE QCLs制作在单元芯片上)也未得到体现。2014年,中科院半导体所张锦川等人[61]成功将λ/4-EPS(等效相移技术)应用于SE-DFB-QCLs的研制。通过改变取样周期实现单个晶片上多波长选择性的单模激射且平均边模抑制比超过20 dB,获得工作波长约4.6 μm以及发散角为0.6°×16.8°的远场单模激射模式,室温下可实现脉冲模式达72 nm的较大波长覆盖范围,成为迄今首个采用λ/4-EPS的面发射激光装置。

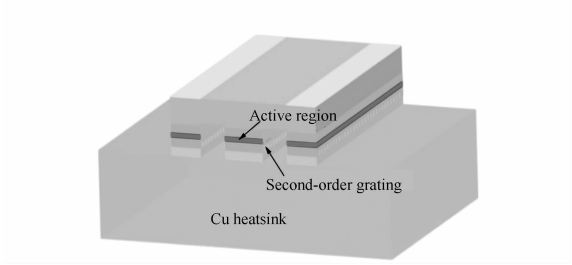


图19 宽条形衬底出光分布反馈量子级联激光器示意图[62]

Fig. 19 Schematic of broad area substrate-emitting distributed feedback quantum cascade lasers

通过在激光器两端面镀高反膜减少基模和高阶模的镜面损失差,以及基横模具有最低的波导损失而首先激射是获得基横模的好方法。基于此,姚丹阳等人[62]开展了对宽条型脉冲工作的DFB-QCLs的研发并获得了成功,器件工作波长为4.6 μm,脊长、脊宽分别为2 mm、60 μm。温度为20 ℃时,峰值功率达1.82 W,温度为50 ℃时达1.22 W,脉冲宽度为1 μs,占空比为0.2%。在两端面镀高反膜进而获得沿脊宽方向远场单瓣、发散角为7.9°,沿腔长方向远场双瓣、发散角为0.61°的远场基横模。热沉温度高达115℃,激光器单模出射连续可调(无跳模),相应温度调谐系数为$\Delta\nu/\Delta T = -0.16\ \mathrm{cm^{-1}C^{-1}}$。在众多激光应用领域中,这种宽条型衬底出光激光器会因其峰值输出功率高、高光束质量而更具竞争力。

3.3 发展趋势及展望

由近些年的相关科研报道可知:SE-DFB-LD的大部分工作集中于量子级联激光器结构上,并在基础理论、波导结构、光栅造型、模式特性、阵列模型等方面都逐步完善。然而,在大功率、高亮度的体材料有源层SE-DFB-LD方面的成果相对较少,在外延片结构方面(如宽波导大光腔结构、非

对称波导结构等)没有明显的创新和突破。目前输出功率最高的依然是 Alfalight 公司生产的商用二阶曲线光栅面发射 DFB 激光器。相对而言,国内各个大功率激光器研究组均未对该种激光器件的研发表现足够的重视。

目前,SE-DFB-LD 的工作波段主要集中在近、中红外,以及少量的远红外波段。丰富光栅耦合 SE-LDs 的工作物质及结构,拓展工作波长范围,将是推动新波长 SE-DFB-LD 器件革新开发并拓展 SE-DFB-LD 应用领域的必经之路。

通过借鉴现有的光栅耦合器件理论及制备工艺,分析、探究多种材料和造型的光栅(尤其金属光栅)对 LD 器件整体工作性能的影响,并优化设计光栅的各个参数及光栅在器件中的位置,将有助于进一步改善光束输出质量,提升器件工作的可靠性。值得一提的是:特定材料、构型的光栅可用于远、近光场图形的调制,以满足对输出光场图形的特定需要。

分析影响光栅衍射效率及波导耦合效率因素,应探究高光栅衍射效率及高波导耦合效率的最佳切合点,权衡系统各个参数以获得高衍射效率及耦合输出效率的激光系统。

此外,在金属光栅方面:需要深入探究金属光栅对内部光子的吸收损耗所产生的对光栅耦合系数以至系统的整体性能影响和金属表面等离子体增强效应、电极作用与各频率光波、金属光栅各参数(造型、材质、掺杂成分等)的关系。

为实现单管及阵列器件高功率、高光束质量出光,已研制出线形结形、抛物线形等折射率波导耦合半导体激光器以及 Y 结形、Lorenz 型曲线等波导耦合阵列,并开展对新型波导单元器件及阵列结构造型的探索、创新以期实现相干耦合效率及光束质量、激射功率的进一步提升。

值得注意的是,常用的电子束光刻、全息光刻以及纳米压印,因精度、成本、技术水平限制等而不能被直接用于工业化批量生产。因此,提升光刻与刻蚀工艺水平,同时探索具有更高精确度、更好均匀性且低成本、高效率的光栅制备技术,是实现 SE-DFB-LD 器件稳定、高效工作的关键。

4　结束语

目前,国际上在 SE-DFB-LD 理论、器件及工艺方面已经取得了长足的发展,光栅器件制备与应用得到了足够的重视,各种光栅耦合型 SE-DFB-LD 都以自身的独特优势在不同领域得到了肯定。

国内主要的研究单位有中科院半导体所、长春光机所、长春理工大学等。随着 SE-DFB-LD 各项性能不断优化和提升,相信将会有更多的激光研究团队加入到该种激光器的研发和革新工作中,积极缓解、改变我国“跟踪研究能力强,原创成果少”的现状。全新设计和研发的 SE-DFB-LD 亦会体现出更加优良的工作性能以满足人们对高质量、高功率激光束的需求。其与高科技应用设备的结合将推动半导体激光器在泵浦固体和光纤激光器、军事、工业加工、航空航天、生物医学、自由空间光通信等领域进一步拓展应用。

参考文献:

[1] 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)

[2] 佟存柱,汪丽杰,田思聪,等. 布拉格反射波导半导体激光器的研究[J]. 中国光学,2015,8(3):480-498.
TONG C Z,WANG L J,TIAN S C,*et al*.. Study on bragg reflection waveguide diode laser[J]. *Chinese Optics*,2015,8(3):480-498. (in Chinese)

[3] 张胜金,刘晓莉,崔锦江,等. 高峰值功率 808nm 垂直腔面发射激光器列阵[J]. 发光学报,2014,35(9):1098-1103.
ZHANG S J,LIU X L,CUI J J,*et al*.. High peak power 808 nm vertical-cavity surface-emitting laser array[J]. *Chinese J. Luminescence*,2014,35(9):1098-1103. (in Chinese)

[4] 李秀山,宁永强,崔锦江,等. 介质膜集成衬底垂直外腔面发射激光器[J]. 发光学报,2015,36(5):572-576.
LI X S,NING Y Q, CUI JJ,*et al*.. Vertical external cavity surface emitting laser with dielectric film integrated on sub-

strate[J]. *Chinese J. Luminescence*,2015,36(5):572-576(in Chinese)

[5] OFweek 激光网讯,长春光机所开发出百瓦级微型化高功率半导体激光模块[EB/OL]. http://laser.ofweek.com/2014-08/ART-240001-8500-28869877.html,2014-8-22.

[6] BAI Y,DARVISH S R,SLIVKEN S,*et al*.. Electrically pumped photonic crystal distributed feedback quantum cascade lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2007,91(14):1411231-1411233.

[7] MAHLER L,MARIA I A,WALTHER C,*et al*.. Distributed feedback ring resonators for vertically emitting terahertz quantum cascade lasers[J]. *Optics Express*,2009,17(15):13031-13039.

[8] MUJAGIC E,DEUTSCH C,DETZ H,*et al*.. Vertically emitting terahertz quantum cascade ring lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2009,95(3):0111201-0111203.

[9] MAHER L,TREDICUCCI A,BELTRAM F,*et al*.. Vertically emitting microdisk lasers[J]. *Nature Photonics*,2009,3:46-49.

[10] MUJAGIC E,NOBILE M,DETZ H,*et al*.. Ring cavity induced threshold reduction in single-mode surface emitting quantum cascade lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2010,96(3):0311111-0311113.

[11] SCHWARZER C,SZEDLAK R,AHN S I,*et al*.. Linearly polarized light from substrate emitting ring cavity quantum cascade lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2013,103:0811011-0811013.

[12] OVERTON G. Semiconductor lasers curved grating creates high-brightness surface-emitting DFB laser[J]. *Laser Focus World*,2009,45(4):35-36.

[13] BOTEZ D. High-power monolithic single-mode diode lasers employing active photonic lattices[J]. *SPIE*,2003,4993:20-7.

[14] CAPASSO F,YU N,CUBUKCU E,*et al*.. Using plasmonics to shape light beams[J]. *Optics and Photonics News*,2009,20(5):22-27.

[15] LAYKH A,ZORY P,SOUZA M D,*et al*.. Substrate-emitting, distributed feedback quantum cascade lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007,91(18):1811161-1811163.

[16] MAISONS G,CARRAS M,GARCIA M,*et al*.. Substrate emitting index coupled quantum cascade lasers using biperiodic top metal grating[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2009,94(15):1511041-1511043.

[17] OKAMOYO K,NIKI I,SHVARTSER A,*et al*.. Surface-plasmon-enhanced light emitters based on InGaN quantum wells [J]. *Nature Materials*,2004,3(9):601-605.

[18] KOZARINOV R F,SURIS R A,FUKS B I. Instability with respect to waves of spatial charge exchange in compensated semiconductors[J]. *Soviet Physics-Semiconductors*,1973,7(4):480-6.

[19] EVAN G A,HAMMER J M,CARLSON N W,*et al*.. Surface-emitting 2^{th}-order distributed Bragg reflector laser with dynamic wavelength stabilization and far-field angle of 0.25-degrees[J]. *Appl. Phys. Lett.*,1986,49(6):314-315.

[20] MITSUNAGA K,KAMEYA M,KOJIMA K,*et al*.. CW surface-emitting grating-coupled gaas algaas distributed feedback laser with very narrow beam divergence[J]. *Appl. Phys. Lett.*,1987,50(25):1788-1790.

[21] WITJAKSONO G,BOTEZ D. Surface-emitting,single-lobe operation from second-order distributed-reflector lasers with central grating phaseshift[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2001,78(26):4088-4090.

[22] WITJAKSONO G, I S,LEE J J,*et al*.. Single-lobe, surface-normal beam surface emission from second-order distributed feedback lasers with half-wave grating phase shift[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2003,83(26):5365-5367.

[23] MIYAI E,NODA S. Phase-shift effect on a two-dimensional surface-emitting photonic-crystal laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2005,86(11):1111131-1111133.

[24] KUMAR S,WILLIAM B S,QI Q,*et al*.. Surface-emitting distributed feedback terahertz quantum-cascade lasers in metal-metal waveguides[J]. *Optics Express*,2007,15(1):113-128.

[25] XU G Y,COLOMBELLI R,SURAJ P,*et al*.. Efficient power extraction in surface-emitting semiconductor lasers using graded photonic heterostructures[J]. *Nature Communications*,2012,3:952-959.

[26] LAI N D,HUANG Y D,LIN J H,*et al*.. Fabrication of periodic nanovein structures by holography lithography technique [J]. *Optics Express*,2009,17(5):3362-3369.

[27] GOODCHILD D,BOGDANOV A,WINGAR S,*et al*.. Fabrication of fine pitch gratings by holography, electron beam lithography and nano-imprintlithography[J]. *SPIE*,2007,6517:651734-651742.

[28] SREENIVASAN S V,WILLSON C G,SCHUMAKER N E,*et al*.. Low-cost nanostructure patterning using step and flash imprint lithography[J]. *SPIE*,2002,4608:187-194.

[29] SHAO D B,CHEN S C. Surface-plasmon-assisted nanoscale photolithography by polarized light[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005,86(25):253107.

[30] LOHAU J,FRIEDRICHOWSKI S,DUMPICH G,*et al*.. Electron-beam lithography with metal colloids: direct writing of metallic nanostructures[J]. *J. Vacuum Science & Technology B*(Microelectronics and Nanometer Structures),1998,16: 77-79.

[31] VAN K J A,BRTTIOL A A,WATT F. Three-dimensional nanolithography using proton beam writing[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2003,83:1629-1631.

[32] FINGEG N,SCHRENK W,GORNIK E. Analysis of TM-polarized DFB laser structures with metal surface gratings[J]. *IEEE J. Quantum Electronics*,2000,36(7):780-786.

[33] COLOMBELLI R,SRINIVASAN K,TROCCOLI M,*et al*.. Quantum cascade surface-emitting photonic crystal laser[J]. *Science*,2003,302(5649):1374-1377.

[34] PFLUGL C,AUSTERER M,SCHRENK W,*et al*.. Second-harmonic generation in GaAs-based quantum-cascade lasers grown on lang 100 rang substrates[J]. *Electronics Letters*,2005,41(24):1331-1333.

[35] LYAKH A,ZORY P,DSOUZA M,*et al*.. Substrate-emitting, distributed feedback quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*,2007,91(18):1811161-1811163.

[36] MAISONS G,CARRAS M,GARCIA M,*et al*.. Directional single mode quantum cascade laser emission using second-order metal grating coupler[J]. *Applied Physics Letters*,2011,98(2):0211011-0211013.

[37] 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):1511041-1511043.

[38] BAI Y,TSAO S,BANDYOPADHYAY N,*et al*.. High power, continuous wave, quantum cascade ring laser[J]. *Applied Physics Letters*,2011,99(26):2611041-2611043.

[39] ATWATER H A. The promise of plasmonics[J]. *Scientific American*(International Edition),2007,296(4):38-45.

[40] LIU J S Q,BRONGERSMA M L. Omnidirectional light emission via surface plasmon polaritons[J]. *Applied Physics Letters*,2007,90(9):911161-911163.

[41] MAWST L. J,BOTEZ D,ZMUDZINSKI C,*et al*.. Resonant self-aligned-stripe antiguided diode laser array[J]. *Applied Physics Letters*,1992,60(6):668-670.

[42] YANG H,MAWST L. J,NESNIDAL M,*et al*.. 10W? near-diffraction-limited peak pulsed power from Al-free, 0.98 μm-emitting phase-locked antiguided arrays[J]. *Electronics Letters*,1997,33(2):136-137.

[43] OVERTON G. Semiconductor lasers:curved grating creates high-brightness surface-emitting DFB laser[J]. *Laser Focus World*,2009,45(4):35-36.

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

[45] KAO Q Y,HU Q,RENO J L. Phase-locked arrays of surface-emitting terahertz quantum-cascade lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2010,96(10):1011061-1011063.

[46] LI X F,YU S F. Diffraction characteristics of concentric circular metal grating operating at terahertz regime[J]. *J. Quantum Electronic*,2010,46(6):898-905.

[47] YEO C I,JANG S J, J S,*et al*.. 1.3-μ mlaterally tapered ridge waveguide DFB lasers with second-order Cr surface gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*,2010,22(22):1668-1670.

[48] JANG S J,YEO C I,YU J S,*et al*.. 1.55-mum DFB lasers with narrow ridge stripe and second-order metal surface gratings by holographic lithograph[J]. *Physica Status Solidi A*,2010,207(8):1982-1987.

[49] BAI Y,TSAO S,BANDYOPADHYAY N,*et al*.. High power, continuous wave, quantum cascade ring laser[J]. *Appl.*

Phys. Lett. ,2011 ,99(26) :2611041-2611043.

[50] LIANG G Z,LIANG H K,ZHANG Y,*et al.*. Single-mode surface-emitting concentric-circular-grating terahertz quantum cascade lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.* ,2013 ,102 :0311191-0311194.

[51] 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]. *Appl. Phys. Lett.* ,2014 ,1049(13) : 1311081-1311085.

[52] SZEDLAK R,SCHWARZER C,ZEDERBAUER T,*et al.*. Grating-based far field modifications of ring quantum cascade lasers[J]. *Optics Express*,2014 ,22(13) :15829-15836.

[53] 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 S J,QIN LI,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)

[54] GUO W H,LIU J Q,LU Q Y,*et al.*. Design of surface emitting distributed feedback quantum cascade laser with single-lobe far-field pattern and high outcoupling efficiency[J]. *Chin Phys. B*,2010 ,19(5) :0542081-0542087.

[55] 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. Semiconductor*,2010 ,31(11) :1140141-1140145.

[56] 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) :0614041-0614043.

[57] CHEN J Y,LIU 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.

[58] 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]. *Chin. Phys. Lett.* ,2012 ,29(9) :0942051-0942053.

[59] YAO D Y,ZHANG J C,LIU F Q,*et al.*. Surface-emitting quantum cascade lasers operation in continuous-wave mode above 70 ℃ at $\lambda \sim 4.6$ μm[J]. *Appl. Phys. Lett*, ,2013 ,103 :0411211-0411214.

[60] TAN S Y,ZHAI T,LU D,*et al.*. Fabrication and characterization of high power 1064-nm DFB lasers[J]. *Chin. Phys. Lett.* ,2013 ,30(11) :1142021-1142023.

[61] 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 :0331061-0331064.

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

作者简介:

田 锟(1991—),男,河北石家庄人,硕士研究生,2014 年于邯郸学院获得学士学位,主要从事光电子技术与应用等方面的研究。E-mail: springwulitk@ sina.cn

邹永刚(1982—),男,吉林长春人,博士,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、光电子器件等方面的研究。E-mail:zouyg@ cust. edu. cn