

文章编号 1674-2915(2010)05-0415-17

# 面发射分布反馈半导体激光器及 光栅耦合半导体激光器

戚晓东<sup>1,2</sup>, 叶淑娟<sup>1,2</sup>, 张楠<sup>1,2</sup>, 秦莉<sup>1</sup>, 王立军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 阐述了以曲线光栅面发射分布反馈半导体激光器(SEDFFB)为代表的 SE-DFB 器件的原理和结构, 讨论了它们的性能和特点并与其他类型的半导体激光器进行了比较。指出依靠曲线光栅特殊的衍射特性, 可实现对模式的控制和二维漏模耦合阵列化出光, 得到窄线宽(典型值 0.08 nm)、小发散角(典型值 0.5 mrad)、高亮度(单管近衍射极限 3 W(CW))和大功率(单管最高 73 W, 列阵为 kW 级)的激光。综述了 SE-DFB 的发展历程、现状及未来的发展趋势, 强调由于曲线光栅耦合 SE-DFB 激光器兼具边发射和面发射器件的优势和诸多其他优秀性能, 将其应用于不同材料体系, 不同结构的半导体激光器及其阵列, 制作不同波段的高功率、高光束质量的 SEDFFB 器件会有很好的研究意义和应用前景。

关键词: 面发射分布反馈半导体激光器; 高功率高亮度激光器; 激光列阵; 光栅耦合器件; 金属光栅

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

## Surface-emitting distributed-feedback semiconductor lasers and grating-coupled laser diodes

QI Xiao-dong<sup>1,2</sup>, YE Shu-juan<sup>1,2</sup>, ZHANG Nan<sup>1,2</sup>, QIN Li<sup>1</sup>, WANG Li-jun<sup>1</sup>(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Machines and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

**Abstract:** The principles and structures of Surface-emitting Distributed-feedback Bragg( SE-DFB) semiconductor lasers, especially curved-grating coupled SE-DFB lasers, are described, then, their characteristics are discussed and compared with that of other semiconductors. It points out that the SE-DFB lasers based on special diffractive characteristics of curved grating can achieve the mode control and two-dimensional leaky-mode coupling of laser arrays, and can obtain the laser with narrow line width( typically 0.08 nm), small divergence

收稿日期: 2010-05-11; 修订日期: 2010-07-13

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目( No. 60636020); 国家自然科学基金资助项目( No. 60676034, 10974012); 吉林省科技发展项目( No. 20080335); 中国科学院知识创新工程领域前沿项目和国家自然科学基金重点支持项目( No. 90923037)

angle( typically 0.5 mrad) , high brightness( 3 W( CW) near-diffraction limit emitting from a single device) and high power( 73 W maximum in a single device and kW level in arrays) . After reviewing the development, present status and new opportunities in future of the SE-DFB devices, it emphasizes that as the curved-grating coupled SE-DFB has both strengths from side emitting and surface emitting devices, it will have great research significance and wide application prospect by introducing into semiconductor lasers and arrays with different material systems and structures.

**Key words:** Surface-emitting Distributed-feedback-Bragg( SE-DFB) semiconductor laser; high-power & high-brightness laser; laser array; grating-coupled device; metal grating

## 1 引言

高功率、高光束质量的半导体激光器因其尺寸小、价格低、效率高和使用寿命长等优点,已经被广泛应用于工业、医疗和军事等众多领域。随着半导体工艺技术和配套设备的不断革新,人们已经开发出了涵盖常见波长的半导体激光器,相关的半导体激光器产品在诸多领域中也正在取代传统的固体激光器和气体激光器。然而,在激光切割、激光熔覆、激光雷达等应用领域,多要求激光器同时具有高功率、高光束质量等苛刻性能,一般的边发射半导体激光器要通过组成 bar 条、stack 堆栈或者将面发射半导体激光器组成二维列阵,并通过特殊技术进行光束整形和光纤耦合输出才能同时实现输出高质量、高功率激光的目标,这无疑增加了半导体激光器产品的成本,使其实际市场竞争力下降。

面发射分布反馈半导体激光器( SE-DFB)<sup>[1~4]</sup>,特别是曲面光栅( Curved-grating)面发射分布反馈激光器的问世和发展<sup>[5~7]</sup>促进了低成本、高亮度、小发散角、高功率出光的半导体激光器的进步并向产业化发展。这种激光器可以实现单管以及列阵的单模、单瓣近衍射极限出光<sup>[8~10]</sup>,目前已经实现了窄线宽(典型值 0.3 nm)、小发散角(典型值为 0.5 mrad)、高亮度(单管近衍射极限 3 W( CW))和高功率(单管最高 73 W,列阵从百 W 级到 kW 级)出光<sup>[7]</sup>,并在泵浦光纤激光器,激光切割、焊接、熔覆,激光医疗,激光雷达,自由空间光通信等领域具有非常广阔的应用前景。不仅如此,该器件的发展也为光栅耦合型半导体器件的发展提供了新的思路。

本文概述以曲线光栅面发射分布反馈半导体激光器为代表的光栅耦合半导体激光器的工作原理、基本结构、发展历程和现状,以及未来发展的新契机,藉此为相关领域未来研究工作的开展提供参考。

## 2 SE-DFB 的原理和结构

面发射分布反馈半导体激光器( SE-DFB)是基于光栅耦合效应的半导体激光器<sup>[4]</sup>,原理上与分布布拉格反射激光器( DBR-LD)有共同之处,但又有所不同。

分布反馈半导体激光器( DFB-LD)和 DBR-LD<sup>[11]</sup>都是靠内含 Bragg 光栅实现对光的反馈,光栅周期性结构提供反射,只有满足 Bragg 波长的光,才能反射加强,得到前向和后向波的耦合,实现纵模选择。这种结构不仅在建立大容量、低损耗、单模光纤通信系统中极为重要,而且还在更宽的工作温度和工作电流范围内,抑制了在普通半导体激光器中常见的模式跳变,由此可获得低噪声的优良特性。在 DBR-LD 中,光栅区仅在两侧或一侧,只用来作反射器,增益区内没有光栅;而在 DFB-LD 中,光栅分布在整个谐振腔中,所以称之为分布反馈,如图 1 所示。因为采用了内藏 Bragg 光栅选择工作波长,所以 DBR-LD 和 DFB-LD 的谐振腔损耗有明显的波长依存性,这就决定了它们在单色性和稳定性方面优于一般的 F-P 激光器。对于一般的平直光栅耦合机构,光栅周期要满足 Bragg 反射条件:

$$\lambda_B = \frac{N_B}{2n_g} \quad (1)$$

式中,  $\lambda_B$  为 Bragg 波长,  $n_g$  为介质群折射率,正整

数  $N$  为光栅阶数 ( $N$  阶光栅的光栅周期是介质内半波长的  $N$  倍)。对于 975 nm AlGaAs 激光器, 通常  $n_g$  为 3.4, 则一阶光栅周期为 144 nm, 二阶光栅周期为 288 nm。光栅耦合型激光器按光栅阶数分为不同阶光栅耦合激光器。光栅的阶数决定了出射光的衍射方向, 一阶光栅就只有与入射光相反方向的一级衍射光; 二阶光栅有与入射光相反方向的二级衍射光和与其垂直的一级衍射光; 三阶光栅有 3 个方向的衍射光, 更高阶的光栅有更多方向的衍射光。为了得到高效率的衍射光,

一般只把一阶和二阶光栅用于半导体激光器, 得到沿腔长方向的反馈振荡, 端面出光的一阶光栅分布反馈激光器 (因为研究较多, 一般仅把这种激光器简称为 DFB-LD) 和沿腔长方向振荡反馈, 表面出光的二阶光栅分布反馈激光器 (称为 SE-DFB)。一般的 DFB-LD 虽然可以选单纵模, 但是端面出光光束质量差, 有快轴和慢轴之分, 快轴发散角大 (一般为  $40^\circ$ ); 而 SE-DFB 不仅可选单纵模, 而且表面出光, 光束发散角小, 可达到 0.5 mrad, 亮度也高。

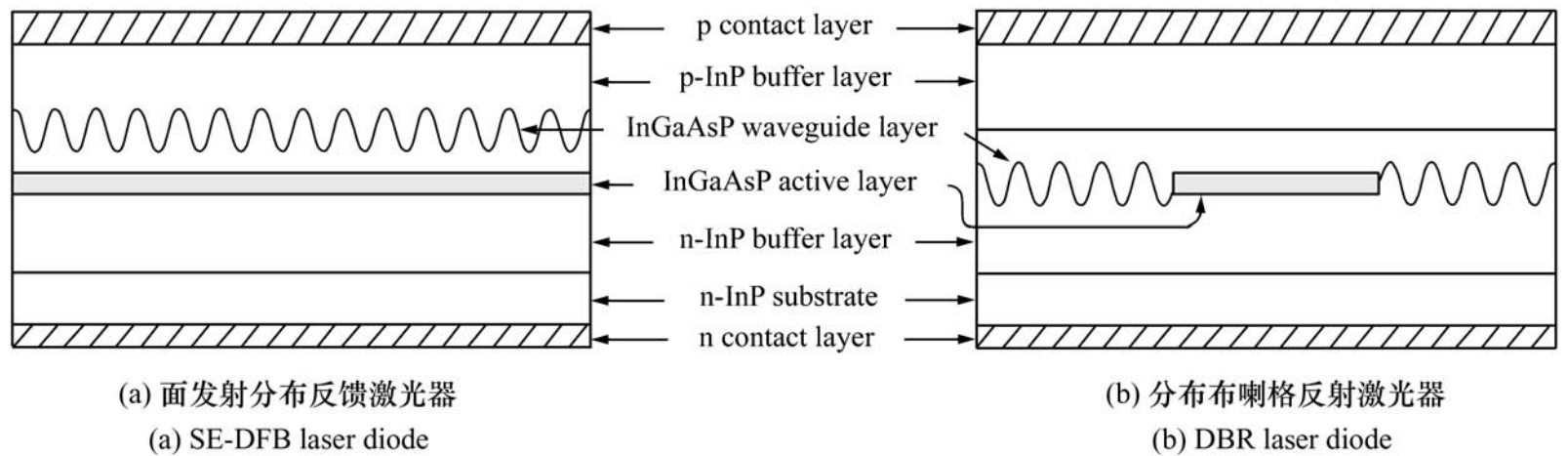
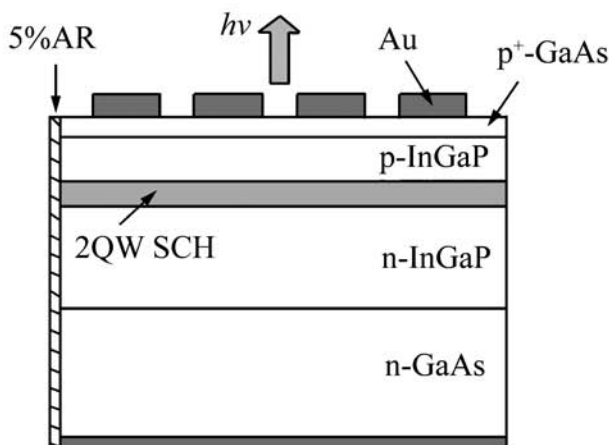


图 1 典型的 DFB 和 DBR 半导体激光器结构图

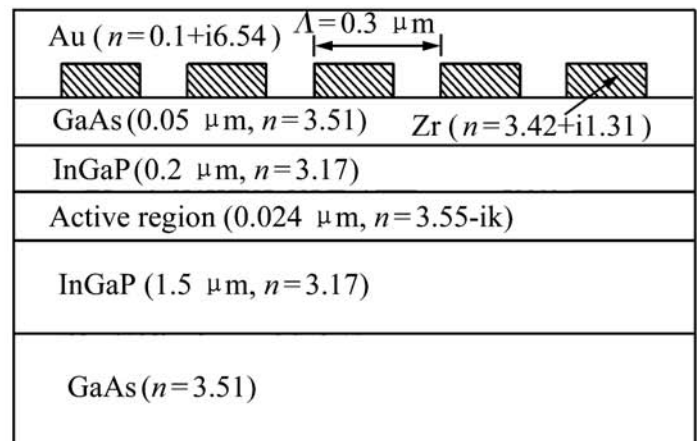
Fig. 1 Typical schematic diagrams of DFB and DBR laser diode

按照光栅对光的吸收是否足够严重, 即  $n_g$  的虚数部分是否比较大 (一般金属材料或者增益介质较大), 可以把 SE-DFB 分为两种类型: 折射率耦合 SE-DFB<sup>[10]</sup> 和复耦合 (增益耦合属于复耦合范畴) SE-DFB<sup>[4]</sup>, 如图 2 所示。其中, 折射率耦合 SE-DFB 的近场是反对称的, 远场光斑是双瓣, 因

此, 必须引入  $\pi$  的相移, 才能得到单瓣出光; 而复耦合 SE-DFB 靠增益和折射率的耦合得到远场单瓣出光。光栅的形状不仅仅有传统的直线形, 还有碟形 (disk)<sup>[13, 14]</sup>、环形 (ring)<sup>[13, 14]</sup>、圆形<sup>[13 ~ 16]</sup>和曲线形<sup>[5]</sup>, 如图 3 所示。碟形和环形光栅通常用于实现垂向圆形光斑的控制, 并形成 DBR-LD。



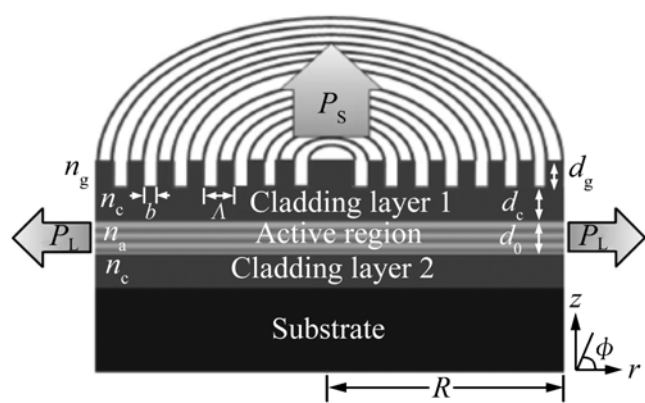
(a) 折射率耦合 SE-DFB  
(a) Index-coupled SE-DFB



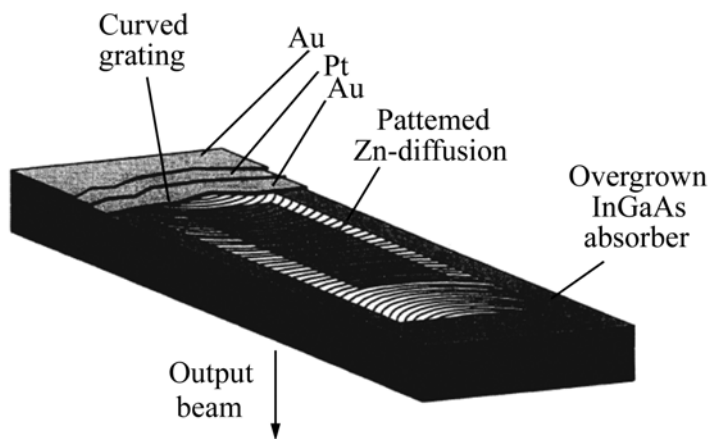
(b) 复耦合 SE-DFB  
(b) CC-SE-DFB

图 2 折射率耦合 SE-DFB 和复耦合 SE-DFB 结构图

Fig. 2 Schematic diagrams of index-coupled and complex-coupled SE-DFBs



(a) 具有圆形光栅的 SE-DBF 激光器

(a) Circular-grating SE-DBR<sup>[15]</sup>

(b) 具有曲线性光栅的 SE-DFB 激光器

(b) Curved-grating SE-DFB laser<sup>[5]</sup>

图3 具有圆形和曲线形光栅的 SE-DFB 激光器

Fig.3 SE-DFB laser diodes with circular and curved gratings

由于垂向和水平方向同时出光,目前报道的单向出光效率不高,功率不大;而曲线光栅面发射 SE-DFB 由于可以同时实现出光截面二维方向上发散角的控制,和实现圆形光栅 SE-DFB 所不易完成的二维漏模耦合列阵化出光,其作为发展高功率、高光束质量半导体激光器的备选方案备受关注。现在已经实现了曲线光栅 SE-DFB 的单管和列阵的近衍射极限大功率出光。单管出光达到 W 级单模单瓣出光<sup>[17]</sup>;阵列依靠波导或者反波导结构<sup>[18]</sup>,利用各个单元之间的漏模耦合作用,再利用极化合束技术,可以实现 kW 级相干列阵出光<sup>[18]</sup>。

### 3 曲线光栅 SE-DFB 的性能及与其他类型半导体激光器的比较

本文重点介绍了以曲线光栅为代表的面向分布反馈激光器的性能和发展历程。

面发射分布反馈激光器是一种结合了边发射和面发射半导体激光器各自优点,并避免了半导体激光器诸多不利于实现大功率、高光束质量出光因素的混合型激光器。该激光器依赖光栅结构实现对光的控制,采用横向增益振荡,垂向耦合出光,增大了出光面积和模式体积,避免了边发射端面镀高反膜所引入的表面损伤问题,以及面发射模式体积小和功率密度低等影响出光功率的问题;由于无需在端面镀高反膜,而只要在出光窗口上大面积一次性镀增透膜,故所有的镀膜和测试

工艺可以在晶片上进行,无需单独解理处理,使得镀膜和测试成本大为降低。由 Macomber, Botez 和 Alflight 公司发展起来的金属曲线光栅耦合技术<sup>[19]</sup>,如图 4 所示。SE-DFB 激光器与边发射结构相似,都是基于量子阱和波导结构的半导体激光器,但是 SE-DFB 通过刻蚀在器件底面的二阶曲线光栅衍射(如图 4(b)),从顶端的出光口垂直出光(如图 4(a)),并且器件内光场的横向振荡通过端面的吸收区加以抑制;光栅的曲线造型控制着波前,使得出射光在沿着腔长方向上准直并增强亮度(如图 4(c)),由于在其正交方向上光束缓慢发散(半高全宽为 8°),使用一个简单的圆柱形透镜足以实现理想的准直效果(如图 4(d))。将光栅设计到靠近 p 面电极的位置,也避免了传统 DFB 半导体激光器件将光栅刻蚀到有源区附近时必然要进行二次生长的复杂工艺,降低了器件制造成本,提高了器件可靠性;而且,由于具有面发射散热面积大的优点,加上产热较高的部位更靠近 p 面电极,以及分布反馈结构固有的温漂小的特点,使其波长稳定性提高,尤其适用于要求窄线宽、温度稳定性好的泵浦激光领域。其散热问题可以通过简单的焊接无氧铜热沉来解决,避免了在边发射和面发射器件中广泛使用的复杂工艺以及高精度对准焊接工艺的微通道散热技术,从而减少了附加装置、降低了运行成本;同时由于曲线光栅可以很好地控制出光模式,可以使用简单的半圆柱形透镜实现光束整形,避免了使用复杂精密的光学元件进行整形的麻烦,再次

降低了外围设备成本和体积, 使其很早就 在激光武器方面得到应用<sup>[20]</sup>; 再者, 由于电极接触面积增大, 串联电阻降低, 器件可以使用低电流电源驱动, 降低了边发射器件对电源的苛刻要求。曲线形 SE-DFB 由于侧向可以形成 X 形漏模, 多个单

元器件间可以通过平行四边形阵列化排列<sup>[2, 21]</sup> 实现列阵级的相干耦合大功率、相干出光<sup>[22]</sup>。在制作工艺上, Alfalight 公司所使用的全息光刻制作曲线光栅的方法比较适合大规模低成本生产, 如图 5 所示。

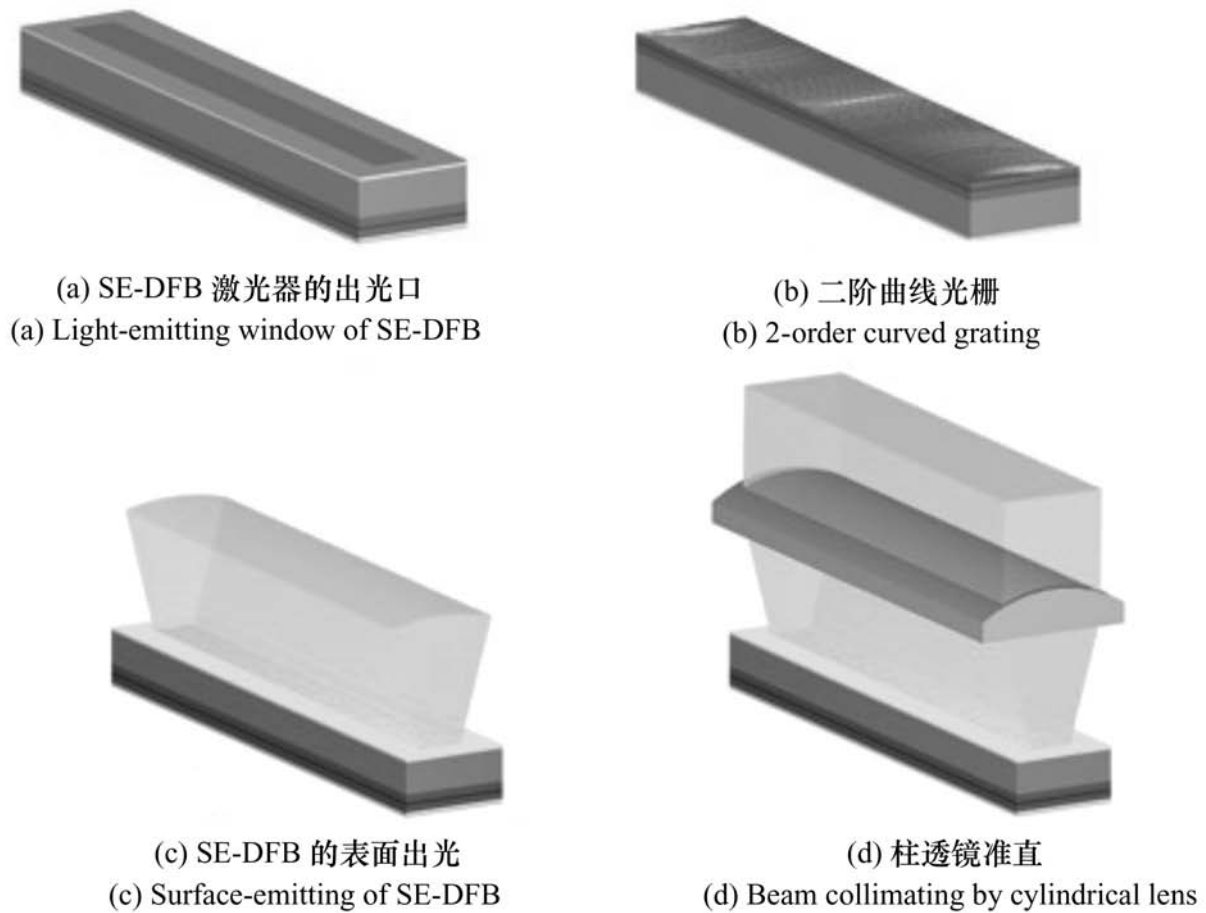


图 4 金属曲线光栅面发射分布反馈激光器及其光束整形<sup>[22]</sup>

Fig. 4 Metal curved-grating SE-DFB and its beam shaping

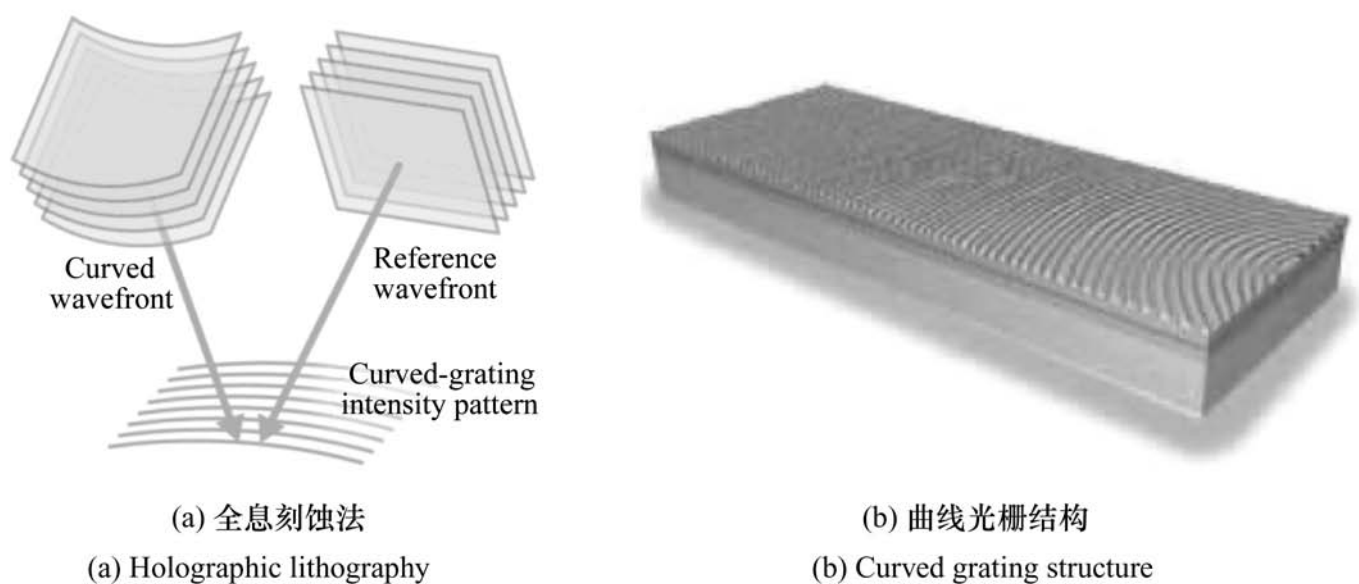


图 5 全息刻蚀方法和曲线光栅结构示意图<sup>[7]</sup>

Fig. 5 Sketches of hologram lithography and curved grating structure<sup>[7]</sup>

受光栅衍射效率和波导耦合效率的限制, 曲线光栅面发射半导体激光器的转化效率尚不能达到边发射半导体激光器的水平, 而且目前器件工作波长有限, 有待继续在新的波长上开发出新产

品。另外, 由于 Alfalight 公司做出的高功率 SE-DFB 的光栅是刻在金属与半导体界面上的, 离有源区比较远, 理论上耦合效率会比光栅在有源区附近的低, 但是根据报道的结果显示, 其插头效率

仍然很高(53%);不过考虑到光栅周期已经小于波长或者与波长量级相同,金属光栅界面上可能存在表面等离子体加强效应,最终导致出光效率比较高,而实际 SE-DFB 研究中针对该猜想的研究尚无人报道,而该效应对于开发新型器件亦有

潜在研究价值。

曲线光栅面发射分布反馈激光器与边发射和面发射半导体激光器的关键性能指标比较如表 1 所示。

表 1 曲线光栅耦合面发射 SE-DFB 与其他常见大功率激光器性能比较

Tab.1 Parameter comparison between curved-grating SE-DFB and other common high power laser diodes

比较内容	曲线 SE-DFB LD	边发射大功率 LD	面发射大功率 LD
单管最大功率/W	73	>30	3.5
列阵组件最大功率/W	200(4-6-6-4 阵列), 300(6-9-9-6 阵列), 1,000(两片极化耦合)	>1 000/bar	230(5 mm ×5 mm)
单模单管连续功率/W	3	2	<7 m
线宽典型值/nm	0.3	2~3	1~2
最小发散角/mrad	0.5 ×8°	很大	很大
最大插头效率/%	50	>70	50~60
温漂(nm/ )	0.07	0.3	0.3
散热方法	无氧铜热沉	微通道	微通道
窗口(μm <sup>2</sup> )及出光类型	200 ×1 200,面发射	200 ×5,端面发射	400 ×400,面发射
已开发的大功率器件工作波长/nm	833, 975	808, 850, 880, 980, 1800 等	808, 850, 880, 980 等
是否有表面损伤阈值	无	有	有

## 4 SE-DFB 的发展史和研究现状

1972 年,美国 Bell 实验室的 H. Kogelikh 和 C. V. Shahn 等人首次提出了 DFB-LD 的概念<sup>[23]</sup>,并在玻璃衬底上用染料胶制造了光栅结构。1975 年,日本 Nakamura 用光泵浦 GaAs 周期光栅耦合激光器,实现了第一只室温下连续工作的 DFB-LD<sup>[24]</sup>,并使得半导体在光通信领域的应用得到重视。随后,关于 SE-DFB 的实验和理论研究也逐渐展开。但因为它们的输出光是双瓣,使其很难用传统的方法耦合到光纤,并在光通信和光耦合设备中得到应用。研究者提出了很多方法试图解决这个问题,如在中间加入相移、采用啁啾光栅、加入相移片、两边加反射镜、载流子注入,采用复耦合光栅等,但是由于技术限制,还是不能得到满意的器件,使 SE-DFB 的研究相当缓慢。同时,由于金属有机化学气相沉积(MOCVD)等半导体外延技术的发展<sup>[25]</sup>,使得采用垂向 DBR 产生垂向出光的垂直腔面发射激光器(VCSEL)<sup>[26-28]</sup>发

展迅速,并导致采用横向 DFB 光栅实现垂直出光的 SE-DFB 在当时最活跃的光通信等领域失去了吸引力。

80 年代中期,美国军方提出了 PILOT(Phase Integrated Laser Optical Technology)计划<sup>[29]</sup>,目标是通过光栅耦合面发射激光器实现激光线阵的高亮度、高功率的相干耦合。

1987 年,Perkin-Elmer 公司的 S. H. Macomber 等人<sup>[2]</sup>采用直线型光栅耦合半导体激光器结构得到了 70 mW(peak pulsed),833 nm 的出光,出光光场为双瓣模式。

1989 年,Hughes Danbury 光学系统公司的 S. H. Macomber 等人<sup>[1]</sup>得到了 30 个单元 6.8 W(peak pulsed),27 个单元 3 W(CW)的出光。期间,California 的 D. F. Welch,日本 BNR 公司的 T. Makino 等人对光栅耦合面发射器件的量子阱结构、阈值电流、自发辐射、微分效率等问题也进行了相关的分析<sup>[30,31]</sup>,使关于光栅耦合器件的讨论和优化设计逐步升温。

此后,随着光栅刻蚀技术的发展(除了机械



刻划、湿法刻蚀、干法刻蚀,后来又发展起来了全息刻蚀、纳米压印光刻技术<sup>[34~36]</sup>、表面等离子体加强光刻技术<sup>[37]</sup>、电子束直写技术<sup>[38,39]</sup>、质子写入技术<sup>[40]</sup>、聚焦离子束<sup>[41]</sup>等多种刻蚀方法<sup>[42,43]</sup>,SE-DFB的研究又逐步升温。现在由于全息刻蚀技术的发展成熟使光栅刻蚀精度提高,批量生产的成本降低,光栅的形状也从传统的矩形光栅变为同心环形、曲线形等各种形状,这使得SE-DFB得以迅速产品化。

1990年,出现了光栅耦合面发射器件的多种结构模型<sup>[44,45]</sup>,其中主要研究单位为Wisconsin大学和Arizona大学,及相关光电子企业,如Hughes Danbury光学系统公司,Spectra-Physics公司,Alfalight公司等。光栅耦合器件的列阵化问题也开始受到重视<sup>[2]</sup>,此后不利于列阵化集成的环形、碟形等光栅造型的光栅耦合器件在大功率激光器件领域有被逐渐淘汰的趋势,相关报道越来越少,而且多局限在理论分析、基本现象探索和基本工艺的改进尝试<sup>[46~51,52~54]</sup>,出光功率等激光指标提升不大,而且很少有人强调实验效果。但是由于圆对称型光栅耦合器件的理论和基本现象的探索持久而广泛,其对完善一般线型光栅耦合器件的设计和分析理论具有很好的借鉴意义。

1991年,P. Akkapeddi和S. H. Macomber等人率先实现单管0.67 W,线阵3 W (peak pulsed),准直后发散角为40  $\mu$ rad的SE-DFB器件,并用于非相干激光雷达<sup>[3]</sup>。该设计使用了直线型二阶光栅,光栅对垂直出光、锁相效果和出光发散角的控制体现出很大的优势,但双瓣出光问题仍未解决。1989至1992年,Wisconsin大学的C. A. Zmudzinski, J. L. Mawst和D. Botez等人利用单元器件间的漏模共振波导(ROW)在单片上实现了脊型边发射激光器为40单元列阵的单瓣锁相相干近衍射极限出光<sup>[55~58]</sup>,13倍阈值出光功率为2.1 W,外微分量子效率为47%,并由此开始了ROW及反共振反射波导(ARROW)相关的理论研究。

1990至1992年,T. Erdogan等人使用光泵机制制作了不同类型的圆对称形光栅表面发射AlGaAs/GaAs量子阱半导体激光器<sup>[44,45]</sup>,其目标是实现半导体激光器的高光束质量出光。虽然实现

了单瓣出光,但是实际出光功率不能满足大功率应用的要求。1995年,F. Choa等人采用环形光栅与VCSEL结合的设计报道了低阈值光栅耦合面发射器件在信号处理方面的应用<sup>[59]</sup>,此后关于圆对称光栅耦合面发射器件的研究逐渐向该领域集中。1998年,Arizona大学的Mahmoud Fallahi等人<sup>[60]</sup>制作了环形光栅耦合面发射电泵半导体激光器,采用DBR光栅耦合结构,阈值电流为15 mA,单管出光功率达到170 mW。这是当时除直线型和曲线形以外其他造型的光栅耦合半导体激光器报道的最大功率结果,此后关于大功率方面的研究鲜有突破。

1997年,S. H. Macomber等人采用曲线形光栅单元器件,并依靠ROW机构<sup>[5]</sup>,实现了64个单元160 W(CW),横向发散角为12.5°,纵向5 mrad的SE-DFB列阵。光栅制作使用了全息光刻工艺,但最大的问题是单元器件横向的双瓣出光和侧模细丝化(filamentation)等影响出光稳定性的非线性效应。

1997至1998年,Wisconsin大学的H. Yang, M. Kasraian, M. Nesnidal, J. Lopez, D. Botez等人全面开展了复耦合(complex-coupled)光栅和反共振波导的理论和实验研究<sup>[4,61~65]</sup>。复耦合光栅作为一种可行方案基本实现了出光的单瓣图形,但是由于光栅位于出光口上或者有源区内,以及工艺水平限制,光损耗大,散热不好,热透镜效应明显,功率做不大;而对报道结构的研究继续推动了后面该研究小组向更普遍的主动光格子(Active Photonic Lattices, APLs)理论的过渡,并最终从实验上实现了高效的列阵相干锁相出光。其40个单元(中心波长为0.98  $\mu$ m,单元窗口宽为200  $\mu$ m,长为1 mm)形成的一维阵列实现了峰值功率10 W的近衍射极限出光<sup>[64]</sup>,最大外微分量子效率>50%。

1999年,J. Lopez, G. Witjaksono, D. Botez等人出光窗口上率先使用Au移相二阶光栅,使得原有的双瓣光场反相位叠加,实现了单瓣出光<sup>[10]</sup>,远场发散角半高全宽为0.05°。

2001年,G. Witjaksono和D. Botez等人将移相光栅放置到p面电极区,同样得到远场发散角0.04°的单瓣出光<sup>[66,67]</sup>。其在移相180°时实现反

相锁相和最佳反对称叠加,如图 6 所示,88%的能

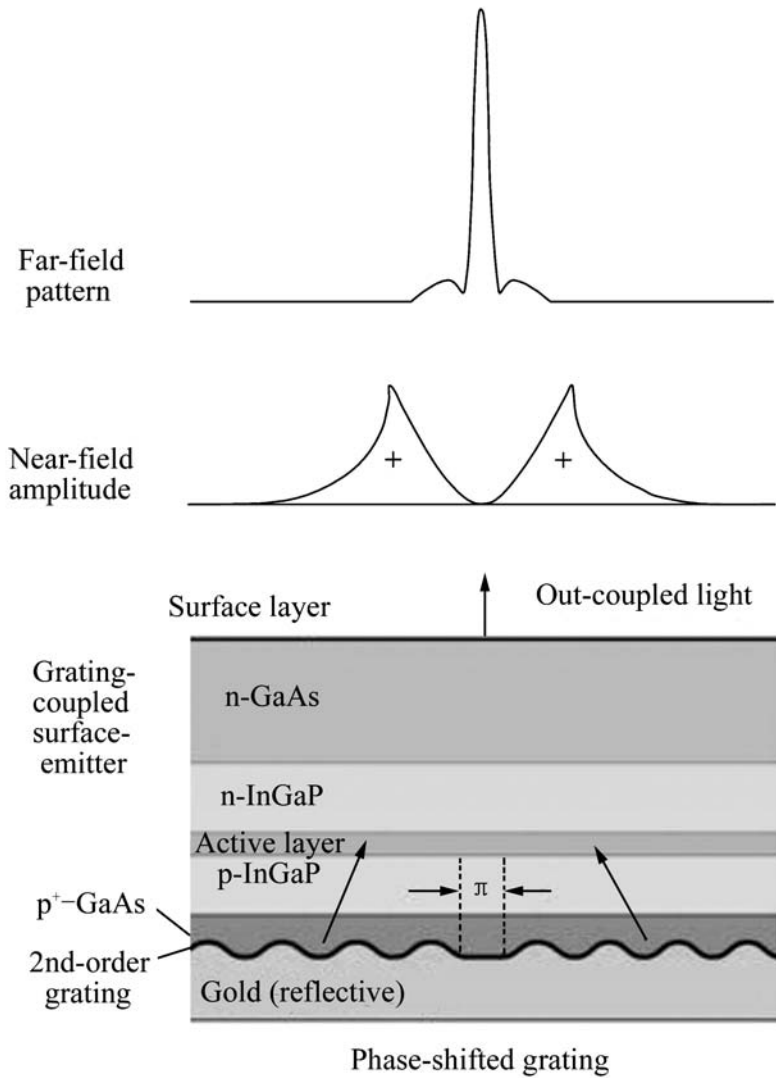
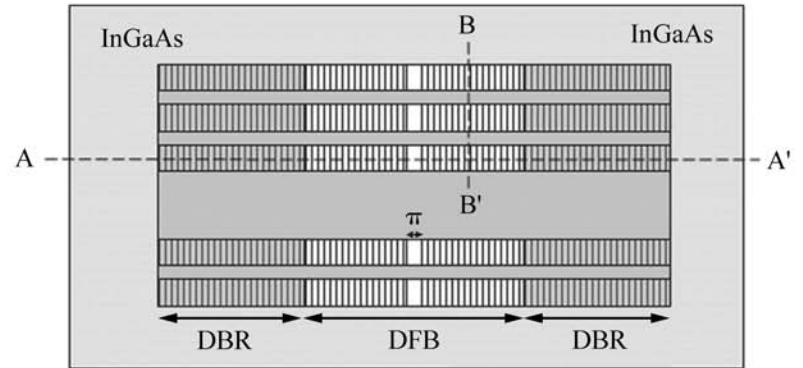


图 6 引入中心相移的 SE-DFB 器件截面图,相移  $\pi$  [66]

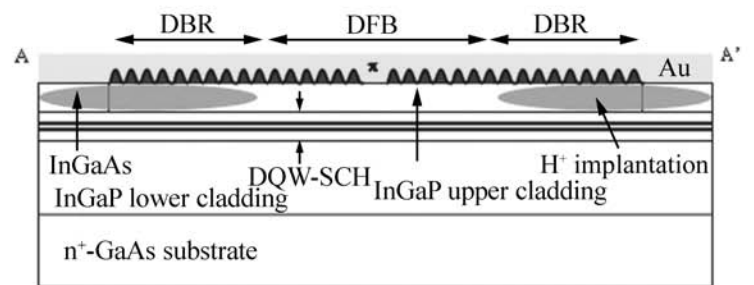
Fig. 6 Schematic cross-section of SE-DFB device with central phase shift,  $\pi$  [66]

量集中在中央光斑中,外量子效率达 51%。这种设计接受了 Macomber 将光栅置于电极区、而窗口区大面积镀增透膜的设计,使出光功率和稳定性更容易提高,相移光栅使用全息光刻制成。2000 至 2002 年间,该组提高折射率阶跃 ( $n = 0.1$ ) 有效避免了热透镜效应 [68],并将侧模细丝化解释为由侧向模式随机发射产生,从而在增加相移机制基础上尝试和完善了主动光格子结构,很好地解决了侧模稳定性和窄线宽单模出光问题,并实现了晶片级列阵的 W 级大功率相干出光 [68~75]。所谓主动光格子 (APLs) 实际上是折射率周期性分布形成的具有光子带隙的阵列结构,其格点便是各个单元器件。考虑到光栅内的调相光栅相移为  $\pi$ ,光波往返相移为  $2\pi$ ,移相光栅实际上没有对光格子形成缺陷态。H. Yang, L. J. Mawst, D. Botez 等人研究了一维和二维 APLs 形成的 SE-DFB

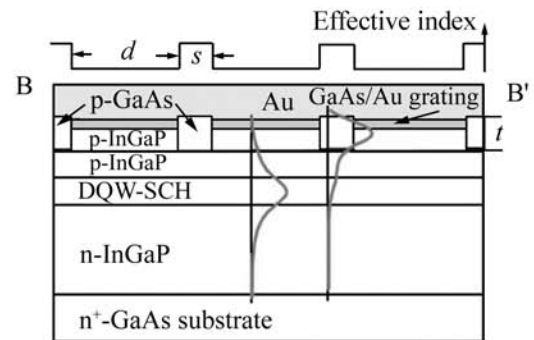
列阵。其中一维 APLs 使用了类似脊型边发射激光器的移相 SE-DFB 激光器单元,内部 DFB 和 DBR 光栅长度依据外量子效率最大优化后分别为 550 和 600  $\mu\text{m}$ ,光栅占空比为 0.4,器件使用无 Al 的 InGaAs/InGa(As)P/GaAs 材料系,双量子阱



(a) 金属化前器件的 p 面俯视图  
(a) Top view of device in p-side without metallization



(b) 纵向截面图 (对应俯视图 AA' 线段位置)  
(b) Longitudinal-transverse cross section (at line AA' in the top view)



(c) 侧面截面图 (对应俯视图 BB' 线段位置), 以及 ROW 线阵单元及单元间 (即对应高/低有效折射率区域) 横模电场分布图 [76]  
(c) Lateral-transverse cross section (at line BB' in the top view) with transverse-field profiles in element and interelement regions of ROW array (i.e., in low- and high-effective-index regions) [76]

图 7 SE-DFB 激光器的一维线阵示意图

Fig. 7 Schematic representation of 1-D ROW linear array of SE-DFB lasers

分别限制结构,窗口宽 200  $\mu\text{m}$ ,各单元间不经解理,直接在晶片上横向排列形成周期为一个波长的 ROW 型“二阶增益耦合光栅结构”的一维光格子,如图 7 所示,单元间通过行波耦合形成侧模锁定的相干列阵,并实现了 40 个单元  $2 \times$  衍射极限大功率 (连续 1.6 W) 出光 [68],插头效率为 23%。



而二维结构是直接由单元器件组成的钻石形(diamond)光格子结构(如图8所示),器件之间可以形成ROW或者ARROW耦合锁相,实现相干大功率出光;这样的单元 $200\ \mu\text{m} \times 1500\ \mu\text{m}$ 的ROW型2D列阵预期相干连续功率为3 W,线宽大概为0.08 nm,单个晶片上可以产生10 W以上的相干出光,而此后的报道值与预期基本相符<sup>[8,17]</sup>。但此时的器件为形成特定的波导结构,有些实验使用了二次生长技术,对工艺要求比较高。

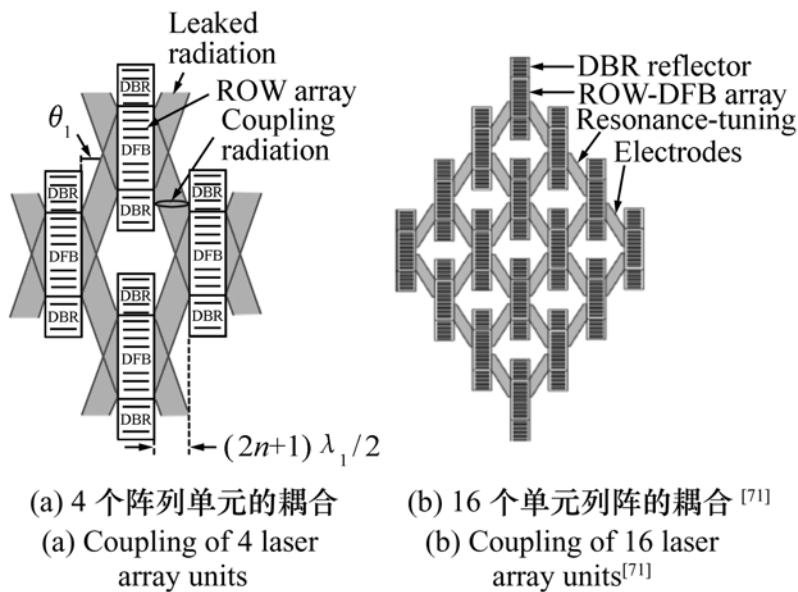


图8 SE-DFB激光器的二维列阵漏模共振耦合示意图(通过晶片级的漏模共振耦合形成)

Fig. 8 Schematic representation of 2-D array of SE-DFB lasers formed by resonant leaky-wave coupling

G. C. Dente<sup>[77]</sup>和Macomber<sup>[78]</sup>分别于2001年和2003年发布和完善了关于稳模的设计理论,解释并基本解决了侧模细丝化等问题,并基于耦合模和非线性理论形成了一套设计和数值分析的方法。2005至2007年,S. Li和D. Botez等人报道了其列阵设计的数值计算方法<sup>[76,79]</sup>。至此,前面提到的相关SE-DFB器件的基本理论问题基本得到解决,各种方案经过优胜劣汰有些已进入工业界推广阶段。

2006年,Macomber所在的Alfalight公司和Botez所在的Wisconsin大学合作,一起实现了单元3 W,列阵45 W的连续出光<sup>[80]</sup>,其线宽0.3 nm,温漂0.07 nm/。同年,其报道的 $100\ \mu\text{m} \times 2\ \text{mm}$ 宽面SE-DFB的插头效率也达到了53%的最高纪录<sup>[81]</sup>,连续输出功率为5 W,半高全宽达0.23 nm。

2009年,Alfalight公司<sup>[71]</sup>在SPIE OPTO展会上展出其曲线光栅SE-DFB产品,并获得媒体的广泛关注。其报道的976 nm SE-DFB半导体激光器,在连续工作模式下相干输出功率超过2 W,单一发射器的输出功率已经达到73 W。通过扩大列阵规模已经实现了更强的高亮度、高功率出光。其中4-6-6-4的列阵出光为200 W,6-9-9-6的列阵出光为300 W,两片列阵经极化耦合实现了kW级出光。

目前来看,SE-DFB经受住了历史的考验,最终成为少数在大功率、高亮度应用领域具有明显优势的方案被优选出来,并进入到工业应用阶段。但是,在这个发展过程中,国内的研究机构始终没有参与到相关研究中,确实令人遗憾。目前,在SE-DFB器件发展中所出现的一些关键难题已经得到深入的分析并逐步解决,使曲线光栅耦合SE-DFB激光器关键性能指标较其他类型的半导体激光器有很多优势,而且这些优势是由引入光栅和相关波导耦合机制后所带来的本质上的优势。

## 5 SE-DFB发展方向的讨论

光栅理论和应用:毋庸置疑,以上讨论过的圆对称型,以及传统的直线型光栅耦合器件的研究是新型SE-DFB器件发展的前期理论和技术积累。人们也看到,在不同领域应用的光栅耦合结构对于推动面向不同工业需要的新型SE-DFB器件的发展也可能带来无限的机遇。瑞典的Chalmers技术大学和日本的大阪大学等在曲线光栅耦合激光器的远场图形的设计方面做了一定的研究<sup>[83]</sup>,这些研究的开展对于按照特定需要改善光场图形有一定的借鉴意义。

金属光栅与各种类型激光器件的结合:由于以上报道中所使用的曲线光栅实际上是位于金属与半导体的界面上,而且其周期小于或者等于波长量级,按照相关理论<sup>[84~87]</sup>,其表面可能会产生表面等离子激元(Surface Plasmon, SP)以及表面等离子极化子(Surface Plasmon Polariton, SPP),并可能导致光场加强效应<sup>[88~91]</sup>,从而有利于提高光转化效率和对发光方向的控制。这些基本的问题

在近些年已经成为了科学界研究的一个热点,使人们对金属光栅的使用产生了新的认识。而这些新的认识恰恰是过去的 SE-DFB 研究过程中所没有考虑到的,所以很可能为更好地实现大功率、高亮度 SE-DFB 半导体激光的发展提供了新的研究思路。事实上,国内外一些研究单位已经开始将光栅结构结合在面发射和边发射器件中,以实现光束的近衍射极限甚至是超衍射极限聚焦的加强<sup>[92~94]</sup>,相关的理论和数值模拟方法也在逐渐完善中<sup>[95,96]</sup>。

同时,将光栅结构,特别是金属光栅结构应用在以大功率稳定出光为目标的量子级联激光器(Quantum Cascade Laser, QCL)上的尝试,也让人们看到了其结合更多样的激光器可能会带来不同凡响的效果。在量子级联激光器上使用二阶光栅不仅使其实现了面发射出光,更重要的是使这种很难在室温下稳定工作的器件实现了室温下的稳定工作<sup>[97,98]</sup>,而且正在使器件向比较难实现的短波长方向发展。1998年,美国 Bell 实验室的 C. Gmachl 在 300 K 室温下利用 DFB 结构率先实现了波长 8.5  $\mu\text{m}$  QCL 峰值功率为 60 mW 的低噪(边模抑制比 30 dB)单模脉冲工作<sup>[99]</sup>,该器件立刻得到了室温下气体探测器等方面的应用<sup>[100]</sup>。2005年,美国 Northwestern 大学的 J. S. Yu 等人利用 DFB 二阶光栅结构实现了波长 4.8  $\mu\text{m}$  量子级联激光器在室温下的连续工作(CW 135 mW@ 25  $^\circ\text{C}$ , 37 mW@ 60  $^\circ\text{C}$ , 插头效率为 1.48%。如图 9 所示)<sup>[101]</sup>。金属光栅 SPP 效应在 QCL 出光方向和模式控制方面更具有独特的优势<sup>[102]</sup>。2009 年前后,美国 Harvard 大学的 N. Yu 等人已利用出光口附近的金属光栅将 QCL 的发散角压缩在 3  $^\circ$  左右<sup>[103~107]</sup>(此前通常是 50  $^\circ$ ~60  $^\circ$ )。

关于新波长器件的开发:从以上讨论可以看到,目前 SE-DFB 器件开发的波长范围尚且有限,这一方面是由应用领域的需要造成的,另一方面与材料和工艺水平的限制有一定的关系。红外和紫外一直以来都是大功率激光应用的领域,而由于受到 n 型 GaAs 材料对 850 nm 激光的强吸收的限制,再加上波长越长的激光器所需刻蚀精度要求越低,导致目前的 SE-DFB 激光器的波长主要

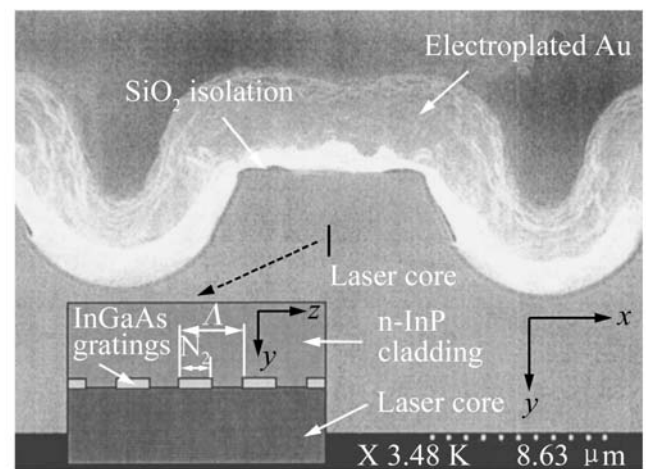


图 9 光栅耦合面发射 QCL 的微观结构<sup>[101]</sup>

Fig.9 Microscopic structure of grating-coupled surface emitting QCL<sup>[101]</sup>

集中在泵浦光纤激光器所关心的 975 nm 附近,在更宽的波长范围上仍然空白。如今,借助金属光栅本身的特殊性质和先进的技术支撑,已经开展了广谱超连续紫外等波段的强场研究<sup>[108,109]</sup>。而紫外波段一直是推动光刻技术发展的前沿阵地,除了目前刚刚开始的用光栅实现超聚焦<sup>[110~112]</sup>的研究外,猜想能否用光栅耦合发光能力更强的半导体器件以实现“较大面积”上的紫外激光?而目前激光理论<sup>[113,114]</sup>和借助 SPP 等实现新型激光器<sup>[115~119]</sup>的研究对激光器性能的提高提供了新的思路,这对于新波段 SE-DFB 激光器的开发也有一定的推动作用。

波导及光栅的形状:器件本身或者光栅采用什么样的造型对形成大功率、高光束质量的出光最有利的问题一直伴随着 SE-DFB 的发展,而且这种讨论还在持续。英国 Bath 大学的 F. Causa 和 D. Massanotti 等人研究发现线形结形,抛物线蝴蝶结形折射率波导耦合半导体激光器及其列阵体现了高亮度、高功率的特点<sup>[120~123]</sup>,尤以抛物线形波导结构器件的光束质量最好。实际上,在上世纪 70 至 80 年代, A. Milton, W. Burns, D. R. Scifres, D. Botez, W. Streifer 和 D. Welch 等人就已经开始了使用 Y 结型和一般形状波导耦合列阵产生高亮度、高功率激光输出的理论和实验研究<sup>[30,124~131]</sup>,最近 Illinois 大学 Champaign 分校的 V. C. Elarde 和 J. J. Coleman 等人采用 Lorenz 型曲线波导阵列将条形激光器耦合阵列成功耦合实现了单瓣高亮出光<sup>[132]</sup>,证实了通过一定造型的波

导调整激光的相位差可以实现一般耦合激光器阵列的单瓣高功率出光。可见,通过选择合适的波导或者器件造型,对于提高光束质量和相干效果有很大作用,而这些方面有待在新型 SE-DFB 上加以完善。

## 6 结束语

光栅耦合激光器件在半导体激光器发展历程中扮演了重要的角色。目前以曲线光栅耦合 SE-DFB 为代表的面发射分布反馈激光器已经经历了较长时间的历史选择和考验,其在高功率、高光束质量半导体激光器领域兼具边发射和面发射器

件的优势,同时具有他们所不具有的诸多卓越性能,因此必将会在相关领域发挥独特的作用。遗憾的是,国内相关的研究单位尚未参与到与之直接相关的研究中,而且这方面的研究仍然局限在以 S. H. Macomber 和 D. Botez 等人为核心的有限几个研究组内。不过,相信借助其他类型光栅耦合器件的研究基础和最近新发展起来的新理论和器件构想,我国会有机会和能力在 SE-DFB 的波长拓展、结构优化、应用开发,以及新型器件的理论研究和开发等领域在国际前沿占据一席之地。

本实验室在该方向正在开展相关的研究工作,有关的理论和实验研究进展将陆续报道。

### 参考文献:

- [1] MACOMBER S H, MOTT J S, NOLL R J. Surface-emitting distributed feedback semiconductor laser[ J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 17( 7) : 472-474.
- [2] MOTT J S, MACOMBER S H. Two-dimensional surface emitting distributed feedback laser arrays[ J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1989, 1( 8) : 202-204.
- [3] AKKAPEDDI P, MACOMBER S H. Surface emitting distributed feedback laser as a source for laser radar[ J]. *SPIE*, 1991, 1416: 44-50.
- [4] KASRAIAN M, BOTEZ D. Anti-phase complex-coupled, surface-emitting distributed-feedback diode laser[ J]. *SPIE*, 1997, 3001: 55-62.
- [5] MACOMBER S H, MOTT J S, SCHWARTZ B D, *et al.* Curved-grating, surface-emitting DFB lasers and arrays[ J]. *SPIE*, 1997, 3001: 42-45.
- [6] LI S. High-coherent-power, two-dimensional grating surface-emitting( GSE) semiconductor lasers[ D]. *Madison: University of Wisconsin-Madison*, 2006.
- [7] OVERTON G. Semiconductor lasers: curved grating creates high-brightness surface-emitting DFB laser[ J]. *Laser Focus World*, 2009, 45( 4) : 35-36.
- [8] BOTEZ D. High-power monolithic single-mode diode lasers employing active photonic lattices[ J]. *SPIE*, 2003, 4993: 20-22.
- [9] WITJAKSONO G, LI S J J L, BOTEZ D. 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( 23) : 5365-5367.
- [10] LOPEZ J, WITJAKSONO G, BOTEZ D. Single-mode, single-lobe operation of surface-emitting, second-order distributed feedback lasers[ J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 75( 7) : 885-887.
- [11] 李宜峰. 两段式 DFB 半导体激光器模式及双稳特性研究[ D]. 成都: 西南交通大学, 2002.  
LI Y F. Investigation on mode characteristics of two-segment DFB lasers[ D]. *Chengdu: Southwest Jiaotong University*, 2002.
- [12] GHAFOURI-SHIRAZ H. *Distributed Feedback Laser Diodes and Optical Tunable Filters*[ M]. New Jersey: Wiley, 2003.
- [13] LI X F, YU S F, MEMBER S. Static and dynamic modeling of circular grating-coupled distributed feedback lasers[ J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 2008, 44( 8) : 770-776.
- [14] SUN X K, YARIV A. Surface-emitting circular DFB, disk- and ring-Bragg resonator lasers with chirped gratings: a unified theory and comparative study[ J]. *Optics Express*, 2008, 16( 12) : 9155-9164.
- [15] SUN X K, YARIV A. Surface-emitting circular DFB, disk-, and ring-Bragg resonator lasers with chirped gratings. II:

- nonuniform pumping and far - field patterns[ J] . *Opt. Express*, 2009, 17( 1) : 1-6.
- [ 16] SUN X K, YARIV A. Surface-emitting circular DFB, disk-, and ring-Bragg resonator lasers with chirped gratings III: gain saturation effects and above-threshold analysis[ J] . *Opt. Express*, 2009, 17( 12) : 10119-10125.
- [ 17] WITJAKSONO G, LI 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( 23) : 5365-5367.
- [ 18] NESNIDAL M, MAWST L, BOTEZ D. Distributed-feedback grating used lateral-mode selector in phase-locked antiguided arrays[ J] . *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1997, 9( 1) : 34-36.
- [ 19] KASRAIAN M, BOTEZ D. Metal-grating-outcoupled, surface-emitting distributed-feedback diode lasers[ J] . *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 69( 10) : 2795-2797.
- [ 20] GOLSHANI A, LOCK A, FREISLEBEN S. Adjustable surface emission from AlGaAs/GaAs laser diodes based on first-order-grating coupled surface mode emission[ J] . *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 69( 16) : 2312-2314.
- [ 21] BOTEZ D, CENTER T, BEACH R. High-power monolithic phase-locked arrays of antiguided semiconductor diode lasers [ J] . *IEE Proceedings J Optoelectronics*, 1992, 139( 1) : 14-23.
- [ 22] KANSKAR M, BRUNET F. Surface-emitting laser array[ J/OL] . *Photonics Spectra*, 2009. <http://www.ventureinvestors.com/archives/1628>.
- [ 23] KOGELNIK H, SHANK C. Coupled-wave theory of distributed feedback lasers[ J] . *J. Appl. Phys.*, 1972, 43( 5) : 2327-2335.
- [ 24] NAKAMURA M, AIKI K, UMEDA J, *et al.* . cw operation of distributed-feedback GaAs/GaAlAs diode lasers at temperatures up to 300 K[ J] . *Appl. Phys. Lett.*, 1975, 27( 1) : 403-405.
- [ 25] WEYERS M, BHATTACHARYA A, BUGGE F, *et al.* Epitaxy of high-power diode-laser structures [ J] . *Topics Appl. Phys.*, 2000, 78: 83-120.
- [ 26] SODA H, IGA K, KITAHARA C, *et al.* . GaInAsP/InP surface emitting injection lasers[ J] . *Jpn J Appl. Phys.*, 1979, 18( 12) : 2329-2330.
- [ 27] SODA H, MOTEGI Y, IGA K. GaInAsP/InP surface emitting injection lasers "with short cavity length"[ J] . *IEE J. Quantum Electron.*, 1983, QE-19( 6) : 1035-1041. .
- [ 28] IGA K, ISHIKAWA S, OHKOUCHI S, *et al.* Room-temperature pulsed oscillation of GaAlAs/GaAs surface emitting injection laser[ J] . *Appl. Phys. Lett.*, 1984, 45: 348-350.
- [ 29] HECHT J. Surface-emitters take on high power[ J] . *Laser Focus World*, 2005, 41( 5) : 143-147.
- [ 30] WELCH D, PARKE R, HARDY A, *et al.* Low-threshold grating-coupled surface-emitting lasers[ J] . *Appl. Phys. Lett.*, 1989, 55: 813-815.
- [ 31] MAKINO T. Spontaneous emission model of surface-emitting DFB semiconductor lasers[ J] . *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, 29( 1) : 14-22.
- [ 32] NG W, HONG C-S, YARIV A. Holographic interference lithography for integrated optics[ J] . *IEEE Trans On Electron Devices*, 1978, 25( 10) : 1193-1200.
- [ 33] SCHATTENBURG M, ANDERSON E, SMITH H. X-ray/VUV transmission gratings for astrophysical and laboratory applications[ J] . *Phys. Scripta*, 1990, 41: 13-20.
- [ 34] RAO C, CHEETHAM A. Science and technology of nanomaterials: current status and future prospects [ J] . *J. Mater. Chem.*, 2001, 11( 12) : 2887-2894.
- [ 35] HIRAI Y, HARADA S, ISAKA S, *et al.* . Nano-Imprint lithography using replicated mold by Ni electroforming[ J] . *Jpn J. Appl. Phys.*, 2002, 1( 41) : 4186-4189.
- [ 36] SREENIVASAN S, WILLSON C, SCHUMAKER N, *et al.* . Low-cost nanostructure patterning using step and flash imprint lithography[ J] . *SPIE*, 2002, 4608: 187-194.
- [ 37] SHAO D, CHEN S. Surface-plasmon-assisted nanoscale photolithography by polarized light[ J] . *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86( 25) : 253107.
- [ 38] NAKAYAMA Y, OKAZAKI S, SAITOU N, *et al.* Electron-beam cell projection lithography: a new high-throughput elec-

- tron-beam direct-writing technology using a specially tailored Si aperture[ J] . *J. Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1990, 8: 1836-1840.
- [39] LOHAU J, FRIEDRICHOWSKI S, DUMPICH G, *et al.* . Electron-beam lithography with metal colloids: direct writing of metallic nanostructures[ J] . *J. Vacuum Science & Technol. B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1998, 16: 77-79.
- [40] Van KAN J, BETTIOL A, WATT F. Three-dimensional nanolithography using proton beam writing[ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 2003, 83: 1629-1631.
- [41] SANZ D, RORISON J, YU S. InGaN/GaN MQW Laser Diodes with 4th Order FIB-etched Gratings[ J] . *Quantum Electronics and Laser Science*, 2005, 2: 1023-1025.
- [42] CAMPBELL S. *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication*[ M] . New York: Oxford University Press, 1996.
- [43] PEASE R, CHOU S. Lithography and other patterning techniques for future electronics[ J] . *IEEE*, 2008, 96(2): 248-250.
- [44] ERDOGAN T, HALL D. Circularly symmetric distributed feedback semiconductor laser: an analysis[ J] . *Appl. Phys.* , 1990, 68: 1435-1444.
- [45] ERDOGAN T, KING O, WICKS G, *et al.* . Circularly symmetric operation of a concentric-circle-grating, surface-emitting, AlGaAs/GaAs quantum-well semiconductor laser[ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 1992, 60: 1921-1923.
- [46] FALLAHI M, CHATENOU D, TEMPLETON I, *et al.* . Recent developments on InGaAs/GaAs circular-grating distributed Bragg reflector lasers[ J] . *SPIE*, 1995, 2398: 135-141.
- [47] LARSSON A, HAGBERG M, ERIKSSON N, *et al.* . Grating coupled surface emitters with enhanced surface emission efficiency[ J] . *SPIE*, 1995, 2398: 21-33.
- [48] JORDAN R, HALL D. Radiation from concentric-circle grating, surface-emitting planar waveguides: the volume current method[ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 1994, 64: 3077-3079.
- [49] JORDAN R, HALL D. Highly directional surface emission from concentric-circle gratings on planar optical waveguides: the field expansion method[ J] . *J. Opt. Society Am. A*, 1995, 12(1): 84-94.
- [50] JORDAN R, HALL D, KING O, *et al.* . Lasing behavior of circular grating surface-emitting semiconductor lasers[ J] . *J. Opt. Society Am. B*, 1997, 14(2): 449-453.
- [51] OLSON C, GREENE P, WICKS G, *et al.* . High-order azimuthal spatial modes of concentric-circle-grating surface-emitting semiconductor lasers[ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 1998, 72: 1284-1286.
- [52] WRIGHT K. Nonlinear dynamics of circular-grating distributed-feedback semiconductor devices[ J] . *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, 16: 96-102.
- [53] LI M, WANG J, ZHUANG L, *et al.* . Fabrication of circular optical structures with a 20 nm minimum feature size using nanoimprint lithography[ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 2000, 76: 673-675.
- [54] TOVAR A, CLARK G. Concentric-circle-grating, surface-emitting laser beam propagation in complex optical systems[ J] . *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, 14(12): 3333-3340.
- [55] BOTEZ D, MAWST L, PETERSON G, *et al.* . Resonant optical transmission and coupling in phase-locked diode laser arrays of antiguides: the resonant optical waveguide array[ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 1989, 54: 2183-2185.
- [56] ZMUDZINSKI C, BOTEZ D, MAWST L. Simple description of laterally resonant, distributed-feedback-like modes of arrays of antiguides[ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 1992, 60: 1049-1051.
- [57] MAWST L, BOTEZ D, ZMUDZINSKI C, *et al.* . Resonant self-aligned-stripe antiguided diode laser array[ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 1992, 60: 668-670.
- [58] BOTEZ D, MAWST L. effect: key intermodal-discrimination mechanism in arrays of antiguided diode lasers[ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 1992, 60: 3096-3098.
- [59] CHOA F, SHIH M, FAN J, *et al.* . Very low threshold 1.55  $\mu\text{m}$  grating coupled surface-emitting lasers for optical signal processing and interconnect[ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 1995, 67: 2777-2779.

- [60] FALLAHI M, KASUNIC K J. Design and fabrication of circular grating coupled distributed Bragg reflector lasers[ J] . *Opt. Eng.* , 1998, 37( 4) : 1169-1174.
- [61] NESNIDAL M, MAWST L, BOTEZ D, *et al.* . Lateral-mode selection in phase-locked antiguided arrays via distributed-feedback grating[ J] . *SPIE*, 1997, 3001: 82-86.
- [62] LOPEZ J, KASRAIAN M, BOTEZ D. Surface-emitting, distributed-feedback diode lasers with uniform near-field intensity profile[ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 1998, 73: 2266-2268.
- [63] BOTEZ D, KASRAIAN M. *Single lobe surface emitting complex coupled distributed feedback semiconductor laser*: US, 5727013[ P] . 1998-03-10.
- [64] YANG H, MAWST LJ, NESNIDAL M, *et al.* . 10 W near-diffraction-limited peak pulsed power from Al-free, 0. 98 [ micro sign] m-emitting phase-locked antiguided arrays[ J] . *Electronics Lett.* , 1997, 33( 2) : 136-137.
- [65] NAPARTOVICH A, BOTEZ D. Analytical theory of phase-locked arrays of antiguided diode lasers[ J] . *SPIE*, 1997, 2994: 600-609.
- [66] 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: 4088-2090.
- [67] SHUANG L, WITJAKSONO G, MACOMBER S, *et al.* . Analysis of surface-emitting second-order distributed feedback lasers with central grating phaseshift[ J] . *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE J.* , 2003, 9( 5) : 1153-1165.
- [68] YANG H, MAWST L, BOTEZ D. 1. 6 W continuous-wave coherent power from large-index-step (  $n = 0. 1$  ) near-resonant, antiguided diode laser arrays[ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 2000, 76: 1219-1221.
- [69] BOTEZ D. High-power coherent GaAs-based monolithic semiconductor lasers[ J] . *SPIE*, 2001, 4533: 41-46.
- [70] BOTEZ D. Active photonic lattices for high-coherent-power generation[ J] . *SPIE*, 2002, 4651: 233-237.
- [71] BOTEZ D. Active photonic lattices: lasers for watt-range coherent-power generation[ J] . *SPIE*, 2002, 4905: 78-84.
- [72] WITJAKSONO G, LI S, LEE 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: 5365-5367.
- [73] BOTEZ D. High-power monolithic single-mode diode lasers employing active photonic lattices[ J] . *SPIE*, 2003, 4993: 20-27.
- [74] BOTEZ D. High-power high-brightness semiconductor lasers[ J] . *SPIE*, 2005, 5624: 203-212.
- [75] LI S, XU D, BOTEZ D. High power, single-mode operation from photonic-lattice semiconductor lasers with controllable lateral resonance[ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 2006, 88( 9) : 091112.
- [76] LI S, BOTEZ D. Analysis of 2-D surface-emitting ROW-DFB semiconductor lasers for high-power single-mode operation [ J] . *IEEE J. Quantum Electronics*, 2007, 43( 8) : 655-668.
- [77] DENTE G C. Low confinement factors for suppressed filaments in semiconductor lasers[ J] . *IEEE J. Quantum Electron.* , 2001, 37( 12) : 1650-1653.
- [78] MACOMBER S. Design of high-power, surface-emitting DFB lasers for suppression of filamentation[ J] . *SPIE*, 2003, 4993: 37-49.
- [79] LI S, BOTEZ D. Design for high-power single-mode operation from 2-D surface-emitting ROW-DFB lasers[ J] . *IEEE Photonics Technology Lett.* , 2005, 17( 3) : 519-521.
- [80] KANSKAR M, CAI J, GALSTAD C, *et al.* . High power conversion efficiency and wavelength stabilized, narrow bandwidth 975 nm siode laser pumps[ J] . *SPIE*, 2006, 6216( 09) : 1-7.
- [81] KANSKAR M, HE Y, CAI J, *et al.* . 53% wallplug efficiency 975 nm distributed feedback broad area laser[ J] . *Electronics Lett.* , 2006, 42: 1455-1456.
- [82] Alfalight. *Novel Grating Boosts Brightness*[ M] . Madison: Alfalight Inc. 2009.
- [83] MODH P, BACKLUND J, BENGTSSON J, *et al.* . Multifunctional gratings for surface-emitting lasers: design and implementation[ J] . *Appl. Opt.* , 2003, 42: 4847-4854.
- [84] BARNES W, DEREUX A, EBBESEN T. Surface plasmon subwavelength optics[ J] . *Nature*, 2003, 424( 6950) : 824-830.
- [85] OZBAY E. Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions[ J] . *Science*, 2006, 311( 5758) : 189-



- 193.
- [86] ATWATER H A. The promise of plasmonics[ J] . *Scientific American*, 2007, 17( 3) : 56-63.
- [87] EBBESEN T, LEZEC H, GHAEMI H, *et al.* . Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[ J] . *Nature*, 1998, 391( 6668) : 667-669.
- [88] OKAMOTO 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.
- [89] PAIELLA R. Tunable surface plasmons in coupled metallo-dielectric multiple layers for light-emission efficiency enhancement[ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 2005, 87( 11) : 111104.
- [90] VUCKOVIC J, LONCAR M, SCHERER A. Surface plasmon enhanced light-emitting diode[ J] . *IEEE J. Quantum Electron.* , 2000, 36( 10) : 1131-1144.
- [91] LIU J, BRONGERSMA M. Omnidirectional light emission via surface plasmon polaritons[ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 2007, 90( 9) : 091116.
- [92] LEZEC H, DEGIRON A, DEVAUX E, *et al.* . Beaming light from a subwavelength aperture[ J] . *Science*, 2002, 297( 5582) : 820-822.
- [93] MARTIN-MORENO L, GARCIA-VIDAL F, LEZEC H, *et al.* . Theory of highly directional emission from a single sub-wavelength aperture surrounded by surface corrugations[ J] . *Phys. Rev. Lett.* , 2003, 90( 16) : 167401.
- [94] GUO B, SONG G, CHEN L. Plasmonic very-small-aperture lasers[ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 2007, 91: 021103.
- [95] CHUANG W, WANG J, YANG C, *et al.* . Numerical study on quantum efficiency enhancement of a light-emitting diode based on surface plasmon coupling with a quantum well[ J] . *IEEE Photonics Technol. Lett.* , 2008, 20( 16) : 1339-1341.
- [96] LIU H, LALANNE P. Microscopic theory of the extraordinary optical transmission[ J] . *Nature*, 2008, 452( 7188) : 728-731.
- [97] PFLUGL C, AUSTERER M, SCHRENK W, *et al.* . Single-mode surface-emitting quantum-cascade lasers[ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 2005, 86( 21) : 211102.
- [98] SCHRENK W, FINGER N, GIANORDOLI S, *et al.* . Surface-emitting distributed feedback quantum-cascade lasers[ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 2000, 77( 14) : 2086-2088.
- [99] GMACHL C, CAPASSO F, FAIST J, *et al.* . Continuous-wave and high-power pulsed operation of index-coupled distributed feedback quantum cascade laser at 8.5  $\mu\text{m}$ [ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 1998, 72: 1430-1432.
- [100] NAMJOU K, CAI S, WHITTAKER E, *et al.* . Sensitive absorption spectroscopy with a room-temperature distributed-feedback quantum-cascade laser[ J] . *Opt. Lett.* , 1998, 23( 3) : 219-221.
- [101] YU J S, SLIVKEN S, DARVISH S R, *et al.* . High-power, room-temperature, and continuous-wave operation of distributed-feedback quantum-cascade lasers at  $\lambda \sim 4.8 \mu\text{m}$ [ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 2005, 87( 4) : 041104.
- [102] XING Q, LI S, TIAN Z, *et al.* . Enhanced zero-order transmission of terahertz radiation pulses through very deep metallic gratings with subwavelength slits[ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 2006, 89: 041107.
- [103] YU N, CUBUKCU E, DIEHL L, *et al.* . Bowtie plasmonic quantum cascade laser antenna[ J] . *Opt. Express*, 2007, 15( 20) : 13272-13281.
- [104] YU N, CUBUKCU E, DIEHL L, *et al.* . Plasmonic quantum cascade laser antenna[ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 2007, 91: 173113.
- [105] YU N, FAN J, WANG Q, *et al.* . Small-divergence semiconductor lasers by plasmonic collimation[ J] . *Nature Photonics*, 2008, 2( 9) : 564-570.
- [106] YU N, BLANCHARD R, FAN J, *et al.* . Small divergence edge-emitting semiconductor lasers with two-dimensional plasmonic collimators[ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 2008, 93: 181101.
- [107] CAPASSO F, YU N, CUBUKCU E, *et al.* . Using plasmonics to shape light beams[ J] . *Opt. Photonics News*, 20( 5) : 22-27.
- [108] TZALLAS P, SKANTZAKIS E, KALPOUZOS C, *et al.* . Generation of intense continuum extreme-ultraviolet radiation by many-cycle laser fields[ J] . *Nature Phys.* , 2007, 3( 12) : 846-850.

- [109] HAURI C, KORNELIS W, HELBING F, *et al.*. Generation of intense, carrier-envelope phase-locked few-cycle laser pulses through filamentation[ J] . *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, 2004, 79( 6) : 673-677.
- [110] ANTOSIEWICZ T, WR Bel P, SZOPLIK T. Nanofocusing of radially polarized light with dielectric-metal-dielectric probe [ J] . *Opt. Express*, 2009, 17: 9191-9196.
- [111] BAIDA F, BELKHIR A. Superfocusing and light confinement by surface plasmon excitation through radially polarized beam[ J] . *Plasmonics*, 2009, 4( 1) : 51-59.
- [112] VOGEL M. Theoretical and numerical investigation of plasmon nanofocusing in metallic tapered rods and grooves[ D] . Queensland: Queensland University of Technology, 2009.
- [113] JORGE B, MARIN S. A unified picture of laser physics[ J] . *Science*, 2008, 320( 5876) : 623-624.
- [114] TURECI H, GE L, ROTTER S, *et al.*. Strong interactions in multimode random lasers[ J] . *Science*, 2008, 320( 5876) : 643-646.
- [115] CHEN S, QIAN B, CHEN K, *et al.*. Conformal coverage for two-dimensional arrays of microcavities with quasi-three dimensional confinement by distributed Bragg reflectors[ J] . *Appl. Surface Sci.*, 2007, 253( 9) : 4254-4259.
- [116] PEDACI F, BARLAND S, CABOCHE E, *et al.*. All-optical delay line using semiconductor cavity solitons[ J] . *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92( 1) : 011101.
- [117] GARCIA-VIDAL F, MORENO E. Lasers go nano[ J] . *Nature*, 2009, 461( 7264) : 604-605.
- [118] NOGINOV M, ZHU G, BELGRAVE A, *et al.*. Demonstration of a spaser-based nanolaser[ J] . *Nature*, 2009, 460( 7259) : 1110-1112.
- [119] OULTON R, SORGER V, ZENTGRAF T, *et al.*. Plasmon lasers at deep subwavelength scale[ J] . *Nature*, 2009, 461( 7264) : 629-632.
- [120] CAUSA F, MASANOTTI D. Observation and analysis of phase-locking in parabolic bow-tie laser arrays[ J] . *IEEE J. Quantum Electron.*, 2006, 42( 10) : 1016-1022.
- [121] CAUSA F, MASANOTTI D. High brightness index-guided parabolic bow-tie laser arrays[ J] . *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2004, 16( 9) : 2000-2002.
- [122] MASANOTTI D, CAUSA F. Optical guiding properties of high-brightness parabolic bow-tie laser arrays[ J] . *IEEE J. Quantum Electronics*, 2005, 41( 7) : 909-916.
- [123] MASANOTTI D, CAUSA F, SARMA J. High brightness, index-guided parabolic bow-tie laser diodes[ J] . *IEE Proceedings-Optoelectronics*, 2004, 151: 123-128.
- [124] STREIFER W, HARDY A, BURNHAM R, *et al.*. Single-lobe phased-array diode lasers[ J] . *Electronics Lett.*, 1985, 21( 3) : 118-120.
- [125] STREIFER W, WELCH D, CROSS P, *et al.*. Y-junction semiconductor laser arrays: Part I-Theory[ J] . *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, 23( 6) : 744-751.
- [126] STREIFER W, BURNHAM R D, SCIFRES D R. Radiation losses in distributed feedback lasers and longitudinal mode selection[ J] . *IEEE J. Quantum Electron.*, 1976, QE-13: 154-161.
- [127] SCIFRES D, STREIFER W, BURNHAM R. Experimental and analytic studies of coupled multiple stripe diode lasers [ J] . *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, 15( 9) : 917-922.
- [128] MILTON A, BURNS W. Mode coupling in optical waveguide horns[ J] . *IEEE J. Quantum Electron.*, 1977, 13( 10) : 828-835.
- [129] BUTLER J, ACKLEY D, BOTEZ D. Coupled-mode analysis of phase-locked injection laser arrays[ J] . *Appl. Phys. Lett.*, 1984, 44( 14) : 293-295.
- [130] BOTEZ D, SCIFRES D. *Diode Laser Arrays*[ M] . Cambridge: Cambridge Univ Press, 1994.
- [131] WELCH D, STREIFER W, CROSS P, *et al.*. Y-Junction semiconductor laser arrays: Part II--Experiments[ J] . *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, 23( 6) : 752-756.
- [132] ELARDE V, TOBIN K, PRICE R, *et al.*. Curved waveguide array diode lasers for high-brightness applications[ J] . *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2008, 20( 13) : 1085-1087.

作者简介:戚晓东(1985—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要从事新型半导体激光器、纳米电子学和纳米光子学方面的研究。E-mail: qi.xiaodong@queensu.ca  
王立军(1946—),男,吉林舒兰人,研究员,博士生导师,主要从事大功率半导体激光器方面的研究。  
E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn

## 《光机电信息》征稿启事

本刊由中国光学学会、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办,科学出版社出版。

本刊征集光学和应用光学、激光和光电子学、微纳科技和精密工程、材料科学、电磁学和电子学、仪器仪表、信息科学和技术等几大领域如下形式的文章:

### 1. 研究信息快报

本栏目主要报道最新研究成果、阶段新结果、片段新结果的介绍或说明,不要求是纯学术论文。目的是为那些尚未能形成正式研究论文,但希望把已有的最新研究成果、阶段或片段新结果抢先发表的科研工作者提供一个平台,保护广大科研人员的知识产权。主要内容包括研究背景简介、研究过程或实验过程简述、观察到的结果、数据及相关信息说明、评论等,附图表数据等,也可附参考文献(一般不要求)。本栏目发表的论文数据不影响在正式发表论文时使用。

本栏目出版周期:收稿日期为每月5日之后、25日之前收到,下月即出版发表。如为当月5号之前收到,当月发表。

### 2. 研究快报

本栏目主要征集研究新成果的快速报道。要求具有如下内容:摘要、关键词、研究背景(引言)、研究过程或实验过程、研究结果、参考文献。

### 3. 研究评论

主要是对当前最新研究结果或研究动态的评论或展望,也可是基于他人研究结果的二次开发或更深层次的研究结果报道。

### 4. 综述文章

- (1) 综述本领域或本学科的研究成果和进展、发展动态和趋势。
- (2) 作者本研究群体的研究工作综述。

### 5. 研究论文

征集研究新结果的学术论文。

### 6. 应用开发类论文

接受各类大学、研究所、企业自主研发的新产品性能报道和新应用报道;新型器件在系统应用结果方面的报道等。是反映企业研发创新和对自身产品的再认识的能力、并能够让用户更好地了解产品性能、拓展应用范围的手段。本栏目论文具有产品推广广告作用。

### 7. 成果信息和研发信息

本栏目主要为大学、研究所等研发部门发布研究成果信息或项目工程研发信息;企业需要开发或攻关的项目信息等。目的是为研发部门和企业之间架起沟通桥梁。

### 8. 各类形式的企业宣传、广告,具体来电来函商谈。

本刊做各类宣传、广告,欢迎媒体利用。“好酒也怕巷子深”——您的产品多一份广告就会多一份收益,本刊广告效费比高,宣传范围广。纸版的广告+电子版的广告——更值得客户信赖,更能为您培养潜在的中、远期客户。

网上投稿: E-mail: xxfw@ciomp.ac.cn; xxfwome@sina.com; gjdxxw@gmail.com

挂号邮寄: 邮编: 130033 地址: 长春市东南湖大路3888号《光机电信息》编辑部

电话: 0431-86176853