

激光与光电子学进展

垂直腔面发射激光器横模控制方法的研究进展

王翔媛, 崔碧峰*, 李彩芳, 许建荣, 王豪杰

北京工业大学信息学部, 光电子技术教育部重点实验室, 北京 100124

摘要 垂直腔面发射激光器(VCSEL)作为理想的激光光源,具有广阔的发展前景。在光纤通信、光互连以及激光打印等应用领域中,大多要求 VCSEL 工作在基横模状态,而由于 VCSEL 自身的结构特点,易于激射出多横模,因此对 VCSEL 横向模式的限制成为了研究热点。本文综述了 VCSEL 横模控制方法的研究报道,分类分析了光子晶体、表面浮雕、反波导、扩展谐振腔以及高对比度光栅结构等横模控制方法的研究进展。

关键词 激光器; 垂直腔面发射激光器; 基横模; 控制方法

中图分类号 TN365

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0700008

Research Progress of Transverse Mode Control for Vertical Cavity Surface Emitting Lasers

Wang Xiangyuan, Cui Bifeng*, Li Caifang, Xu Jianrong, Wang Haojie

Key Laboratory of Opto-Electronics Technology of Ministry of Education,

Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract Vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) as an ideal laser light source has a broad development prospect. In the application fields of optical fiber communication, optical interconnection, and laser printing, VCSEL is required to work in a single fundamental mode. Due to the structural characteristics of VCSEL, it is easy to shoot multiple horizontal modes, so the limitation of the lateral mode of VCSEL has become a research hotspot. In this paper, the research reports of VCSEL transverse mode control method are reviewed, and the research progress of photonic crystal, surface relief, anti-waveguide, extended resonator, and high contrast grating structure is classified and analyzed.

Key words lasers; vertical cavity surface emitting laser; fundamental transverse mode; control method

OCIS codes 140.3570; 060.2430; 130.5990

1 引 言

近年来,随着通信技术的高速发展,提高数据传输速率变得尤为重要,而当器件集成度过高时,会出现“电子瓶颈”效应^[1],此时仅依赖电子传输信息,无法满足信息交互的需求。为了实现信息的超

高速传输,利用光子器件的优越性,光纤通信、光互连、光传感以及光信息处理等技术应运而生。作为光信息技术的核心器件,垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有低阈值电流、低功耗、小发散角、动态单纵模、高调制效率、圆形光斑、面发射易于二维集成等优点^[2-4],是光纤通信、光互连等领域的理想光

收稿日期: 2020-08-10; 修回日期: 2020-09-04; 录用日期: 2020-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(11204009)、北京市自然科学基金(4142005, 4182014)、北京市科技计划一般项目(KM201810005025)

*E-mail: cbf@bjut.edu.cn

源,一直受到国内外研究机构的重视。

基横模 VCSEL 是光纤通信、光互连、激光打印等应用领域的首选器件^[5-6],因为只有稳定的基横模器件才能够保证光斑能量无暗纹,发散角小,而且基横模也是纵模稳定工作的必要条件。对于常规氧化限制型 VCSEL 来说,通常当氧化孔径小于 $4\ \mu\text{m}$ 时,器件可以工作在基横模状态^[7]。但这种利用较小氧化孔径结构制备的基横模器件,存在器件输出光功率低、串联电阻大、制备困难、热稳定性及可靠性差等问题^[8-10]。因此,在大氧化孔径条件下实现 VCSEL 基横模高功率输出,一直以来是研究人员关注的焦点。

本文对 VCSEL 横模控制方法的研究报道进行了分析和总结,详细介绍了各种横模控制方法的研究进展,为之后 VCSEL 横模控制方法的研究提供了理论及实验指导。

2 VCSEL 横模控制方法

2.1 光子晶体结构

光子晶体(PC)VCSEL 运用光子晶体的光子局域特性,通过在上分布式布拉格反射器(DBR)表面刻蚀光子晶体结构,利用光子晶体图形与缺陷区域之间的折射率差异,使光限制在光子晶体的缺陷区域内,改变了腔内的横向模式分布,实现了大氧化孔径下的稳定单模输出。

光子晶体 VCSEL 首次由 Unold 等^[11]提出,其扫描电镜图(SEM)如图 1 所示,通过在顶部 DBR 上刻蚀光子晶体孔洞实现了单模输出,其中对于氧化孔

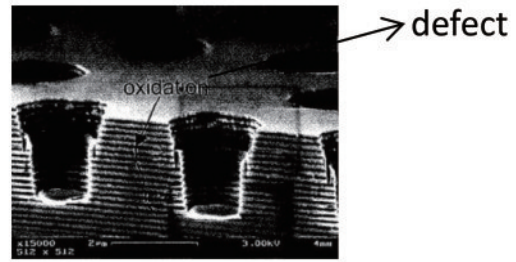


图 1 光子晶体 VCSEL 的扫描电镜图^[11]

Fig. 1 SEM image of a photonic crystal VCSEL^[11]

径 $12\ \mu\text{m}$ 的 $980\ \text{nm}$ VCSEL,最大单模输出功率为 $0.45\ \text{mW}$,阈值电流为 $10\ \text{mA}$ 。自此以后,大家开始对光子晶体 VCSEL 的结构进行了不同设计。伊利诺伊大学的 Danner 课题组首次采用聚焦离子束刻蚀的后工艺技术,并结合电感耦合等离子体刻蚀将光子晶体孔蚀刻到预制的 VCSEL 中,分别制备了图 2 的单缺陷和 7 点缺陷的 PC VCSEL,且均实现了单模激射^[12],其区别在于图 2(b)中缺陷区域面积稍大,增加了发光面积,并且对比光谱图可以看出,缺陷孔数量的增加可以扩大光的限制范围,相对提高了边模抑制比。之后他们又设计了新的光子晶体孔的排列方式,制备了双缺陷耦合的光子晶体 VCSEL^[13],图 3 为该光子晶体阵列的分布图,其在轴向上有两个 PC 缺陷,将器件 a 和 b 的中心孔洞直径分别设置为 $3.2\ \mu\text{m}$ 和 $2.3\ \mu\text{m}$,远场测量结果对应图 4 中的 a 和 b 曲线,远场剖面图表明控制光子晶体孔的直径可以实现对耦合的控制,从而实现 VCSEL 单模高功率输出,这也为提高相干耦合激光器轴上光功率提供了新思路。

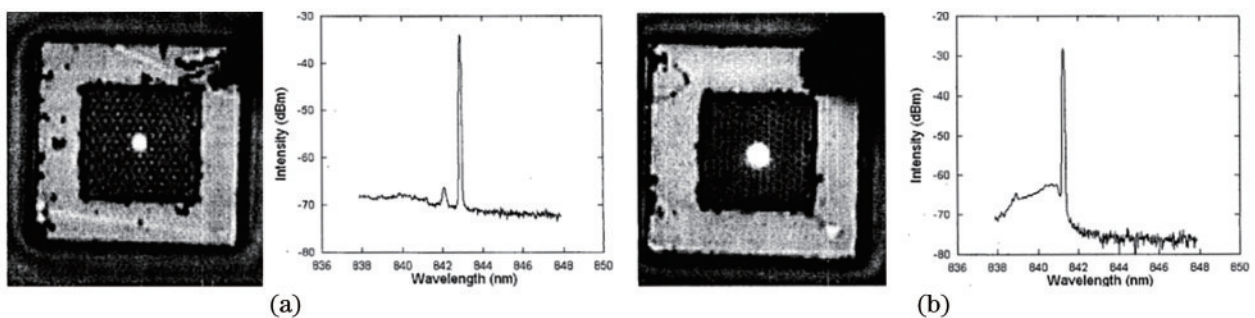


图 2 光子晶体缺陷基本激射模式的近场模式和光谱图^[12]。(a)单缺陷;(b)7点缺陷

Fig. 2 Near-field pattern and spectra of photonic crystal defect fundamental lasing mode^[12]. (a) Single defect; (b) 7-point defect

随着对 PC VCSEL 结构的不断探索, Lee 等^[14]提出正方形晶格 PC VCSEL [图 5(a)],并分别对不同氧化孔径的 VCSEL 制备了不同晶格常数的光子晶体图形,其中氧化孔径为 $16\ \mu\text{m}$ 、晶格常数为 $5\ \mu\text{m}$ 的 PC VCSEL 的单模输出功率约为 $1\ \text{mW}$ 。在光子

晶体刻蚀的启发下,他们改变了孔洞直径,非对称地引入两个小孔洞,增加了有效腔面积,使光在水平与垂直方向的限制效果不同,其光谱分离度比常规的 PC VCSEL 大,提高了极化选择性,可以有效地实现单偏振和单模操作,并观察到优化的

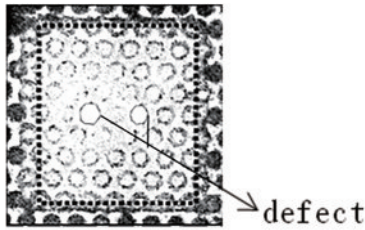


图 3 双缺陷的光子晶体 VCSEL 的近场图^[13]
Fig. 3 Near-field image of photonic crystal VCSEL with two defects^[13]

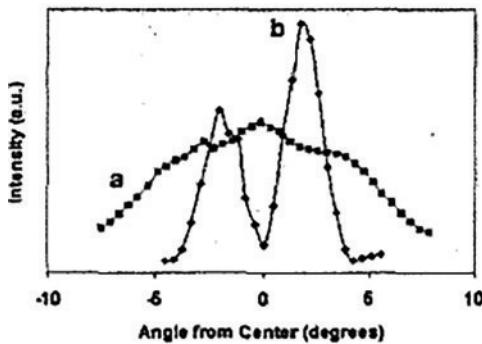


图 4 非耦合缺陷和耦合缺陷的远场强度分布^[13]
Fig. 4 Far-field intensity profiles for uncoupled and coupled defects^[13]

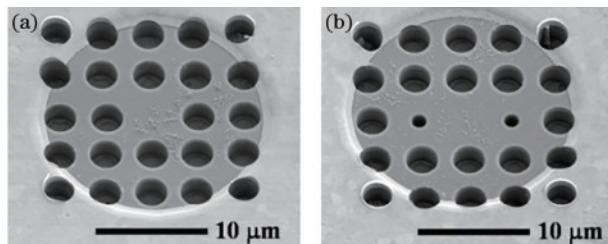


图 5 PC VCSEL 结构^[14]。(a)正方形晶格 PC VCSEL 的扫描电镜图；(b)优化的 PC VCSEL
Fig. 5 Structure of PC VCSEL^[14]. (a) SEM image of square-lattice PC VCSEL; (b) modified PC VCSEL

PC VCSEL 偏振选择与晶体取向无关,即两个小孔在 X、Y 轴的偏振效果相同[图 5(b)]。

由于量子点(QD)VCSEL^[15]具有增益谱窄、微分增益高以及阈值电流密度低等优点, Yang 等^[16]结合光子晶体结构制作了用于光纤通信的量子点光子晶体 VCSEL,其结构如图 6 所示,可以看出,随着工艺条件的改进,光子晶体图案变得圆滑,孔洞质量得到提高,成功制备了量子点 PC VCSEL,其中 990 nm 波段 VCSEL 输出功率为 5.7 mW, 阈值电流为 5 mA; 1.3 μm 波段 VCSEL 输出功率为 0.2 mW, 阈值电流为 4.75 mA, 边模抑制比均超过 35 dB, 且展现出良好的单模特性。

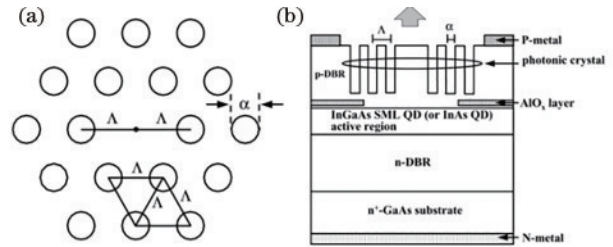


图 6 量子点光子晶体 VCSEL 原理图^[16]。(a)光子晶体结构；(b)剖面图
Fig. 6 Schematic of QD PC VCSEL^[16]. (a) PC structure; (b) cross-sectional view

国内对光子晶体 VCSEL 的研究起步相对较晚,2007 年中国科学院半导体研究所^[17]在国内首次成功研制了 PC VCSEL, 摸索了其制备工艺及测试方法,并研究了刻蚀深度和光子晶体参数对激光器单模条件的影响,为进一步实现单模 PC VCSEL 奠定了基础。之后 Xie 等^[18]通过优化 PC VCSEL 的氧化孔径与出光孔径之间的关系,制备出基横模输出功率为 3.1 mW、阈值电流为 0.9 mA、边模抑制比为 35 dB 的 850 nm PC VCSEL。

其实,由于光子晶体 VCSEL 设计上的简易性和制造上的可重复性,光子晶体结构在实现单模 VCSEL 方面具有较大的优化潜力。通过适当选择孔的深度、直径和排列方式,可以使用这种折射率限制来制备高输出功率和低阈值电流的单模光子晶体缺陷 VCSEL。

2.2 表面浮雕结构

表面浮雕(SR)结构是制备基横模 VCSEL 的有效方法。通过在器件的出光面刻蚀表面浮雕图形,即在普通氧化限制型 VCSEL 的上 DBR 表面高阶模激射区域刻蚀一定深度,增大其镜面损耗,使高阶模式的镜面反射率相对降低,从而达到抑制高阶模激射的目的,有效实现基横模稳定输出。

Martinsson 等^[19]于 2000 年报道了表面浮雕 VCSEL(图 7),他们将出光孔表面的 DBR 高阶模环

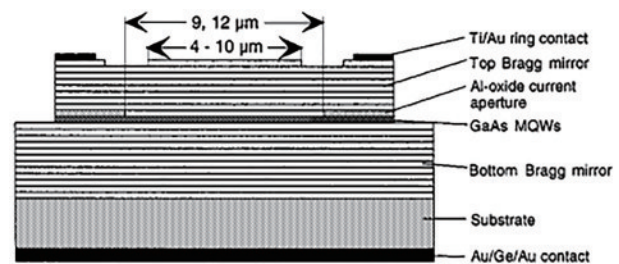


图 7 刻蚀表面浮雕的 VCSEL 示意图^[19]
Fig. 7 Schematic of VCSEL with etched surface-relief^[19]

形区域刻蚀一定深度,出光孔的中心区域不发生变化,从而出光孔中心部位呈现凸起的形状,形成表面浮雕结构,当氧化孔径为 $9\ \mu\text{m}$ 、表面浮雕直径为 $4\ \mu\text{m}$ 、注入电流为 $6\ \text{mA}$ 时, $850\ \text{nm}$ VCSEL 的单模输出功率为 $2.2\ \text{mW}$ 。受刻蚀表面浮雕以及光子晶体结构的影响,日本的 Furukawa 等^[20]通过在高阶模式区域刻蚀三角形孔洞结构制备了图 8 的 VCSEL,并在氧化孔径为 $15\ \mu\text{m}$ 时,设计了图 9 所示的两种三角形孔洞分布,稀疏的排列方式使得中心区域的直径增加,输出功率提高,最终实现了 $850\ \text{nm}$ VCSEL 阈值电流为 $5\ \text{mA}$ 、功率为 $7\ \text{mW}$ 的稳定单模输出。此后 Xu 等^[21]报道了将 SR 用于 $1.3\ \mu\text{m}$ 波段的量子点 VCSEL,其结构如图 10 所示,采用双台氧化工艺,且无需介质,降低了工艺难度,当氧化孔径为 $15\ \mu\text{m}$ 时,基横模输出功率达 $3.42\ \text{mW}$, 阈值电流为 $2.15\ \text{mA}$ 。

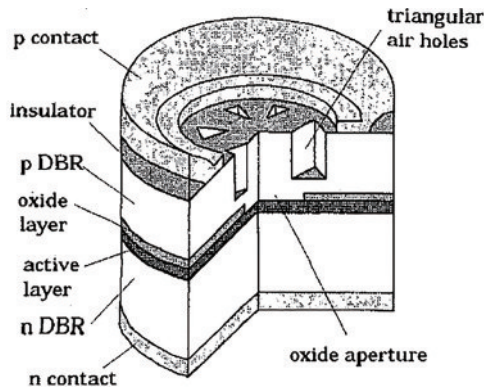


图 8 三角形孔洞的 VCSEL 结构^[20]

Fig. 8 VCSEL with triangular holey structure^[20]

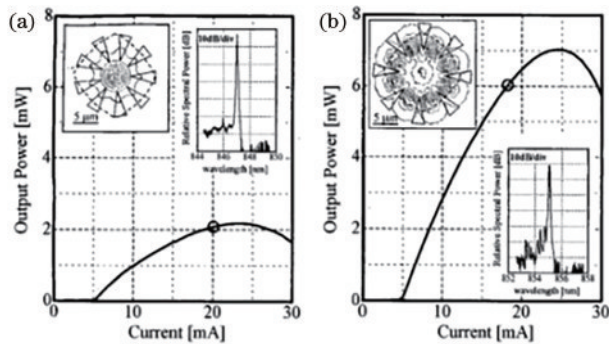


图 9 光-电流特性近场模式及光谱^[20]

Fig. 9 Light-current characteristics near-field patterns and spectra^[20]

与圆形台面 VCSEL 相比,矩形台面 VCSEL 具有一定优势,其在有源区面积增大的情况下,电流密度分布不发生变化,受此启发,2014 年中国科学

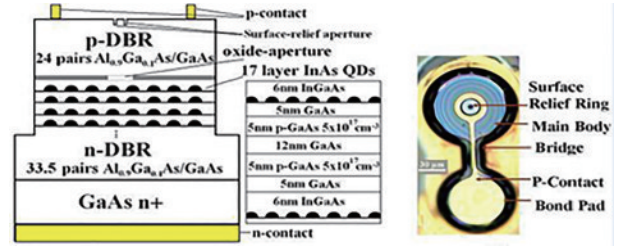


图 10 采用表面浮雕技术的 $1.3\ \mu\text{m}$ 量子点 VCSEL^[21]

Fig. 10 Schematic of $1.3\ \mu\text{m}$ QD VCSEL with surface-relief technique^[21]

院长春光学精密机械与物理研究所报道了图 11 所示的浅面浮雕矩形台面 VCSEL,将出光孔表面的边缘区域刻蚀 0.5 对 DBR,结果显示,浅面浮雕结构的矩形台面 VCSEL 可实现输出功率为 $5.87\ \text{mW}$ 、边模抑制比大于 $30\ \text{dB}$ 的单模输出^[22]。

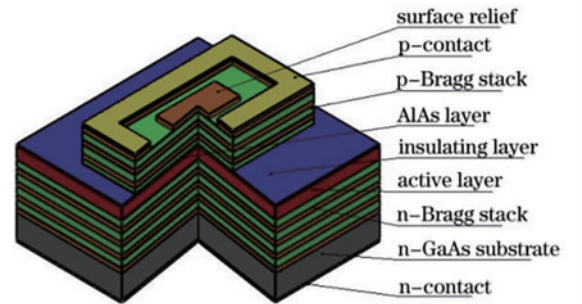


图 11 制作 VCSEL 的工艺结构^[22]

Fig. 11 Structure of fabricated VCSEL^[22]

此外,Unold 等^[23]对表面浮雕 VCSEL 有深入的研究,利用浅表面浮雕刻蚀技术,当注入电流为 $4\ \text{mA}$ 时,氧化孔径为 $7\ \mu\text{m}$ 的 $850\ \text{nm}$ VCSEL 实现了功率为 $2\ \text{mW}$ 的基横模输出,氧化孔径为 $5.8\ \mu\text{m}$ 的 $980\ \text{nm}$ 波段 SR VCSEL 中基横模输出功率达 $5.7\ \text{mW}$ ^[24]。之后为了更好地控制偏振特性,改变了表面浮雕的形状,提出了图 12 所示的椭圆形 SR VCSEL 结构,实验发现,器件的偏振光沿椭圆长轴方向,这为实现单模和单偏振提供了理论依据^[25]。

可见,表面浮雕刻蚀技术可改善 VCSEL 的光谱质量,实现单模输出。与普通 VCSEL 的制备工艺相比,表面浮雕 VCSEL 仅增加一次光刻和腐蚀工艺,因此制备方法较简单。但其缺点是高阶模式损耗区对于腐蚀精度要求极高,稍有偏差就会影响选模效果。

2.3 扩展谐振腔结构

扩展谐振腔结构基于单片集成技术,通过扩展谐振腔可以实现模式选择,而较大的氧化孔径可以减小串联电阻,从而保证 VCSEL 在较大的氧化孔径下实现单模高功率稳定输出。

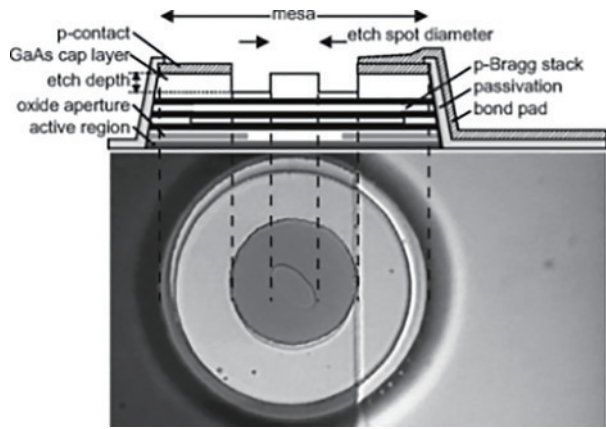


图 12 椭圆形表面浮雕 VCSEL 示意图^[25]

Fig. 12 Schematic of ellipse surface relief VCSEL^[25]

Deppe 等^[26]首次研究了单片长腔的 VCSEL, 器件结构如图 13 所示, 通过在 DBR 与有源区之间插入一定厚度的 spacer 层来获得高空间相干性的 VCSEL, 实验获得了发散角仅有 1.6° 的圆形对称光束, 且输出光谱为单模。为了更好地研究 spacer 层厚度对 VCSEL 单模输出特性的影响, Unold 等^[27]制备并测量了不同厚度 spacer 层对应的 VCSEL 输出特性, 在氧化孔径为 $7\ \mu\text{m}$ 、spacer 厚度为 $4\ \mu\text{m}$ 、注入电流为 $9\ \text{mA}$ 的条件下, 获得了单模输出功率为 $5\ \text{mW}$ 的 $980\ \text{nm}$ VCSEL, 且改善了器件的热阻。之后 Wiemer 等^[28]报道了 $980\ \text{nm}$ 高功率单片长腔 VCSEL, 其中阈值电流为 $9.1\ \text{mA}$, 基横模输出功率为 $7.8\ \text{mW}$ 。但 VCSEL 腔长增加会受到一定的限制, 为解决该问题, Fischer 等^[29]报道了图 14 所示的耦合谐振腔 VCSEL 结构, 其顶部和底部腔中均含有 GaAs 量子阱结构, 通过将电流独立注入到两个腔中, 可以选择耦合模式, 最终在氧化孔径为 $10\ \mu\text{m}$ 、

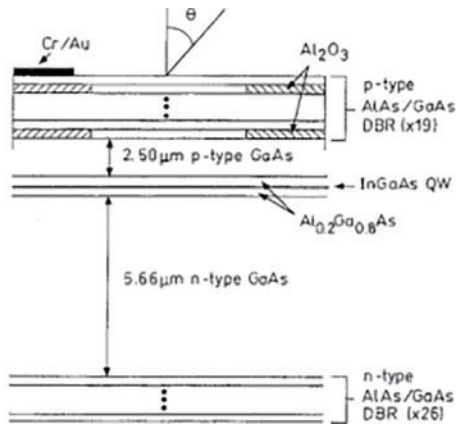


图 13 $10\ \mu\text{m}$ 长单片 VCSEL 的截面示意图^[26]

Fig. 13 Cross-section schematic of $10\ \mu\text{m}$ long monolithic VCSEL^[26]

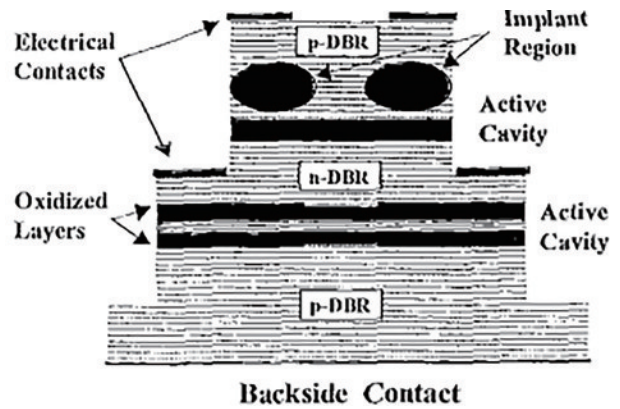


图 14 耦合谐振腔的 VCSEL 结构^[29]

Fig. 14 Structure of coupled-resonator VCSEL^[29]

注入电流为 $5\ \text{mA}$ 的条件下, 实现了 $850\ \text{nm}$ VCSEL 功率约为 $5.2\ \text{mW}$ 的基横模输出。

随着研究的不断深入, 采用外部反射镜实现大功率单模 VCSEL 的工作有了一定进展, Kardosh 等^[30]报道了图 15 所示的 VCSEL 与弯曲介质反射镜的单片集成结构, 该结构在 VCSEL 衬底制作光刻胶图案, 其表面的 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ DBR 为激光操作提供了充分的光反馈, 氧化孔径为 $9\ \mu\text{m}$ 的底发射 VCSEL 在 $980\ \text{nm}$ 波段单模输出功率可达 $15\ \text{mW}$, 阈值电流为 $7.5\ \text{mA}$ 。

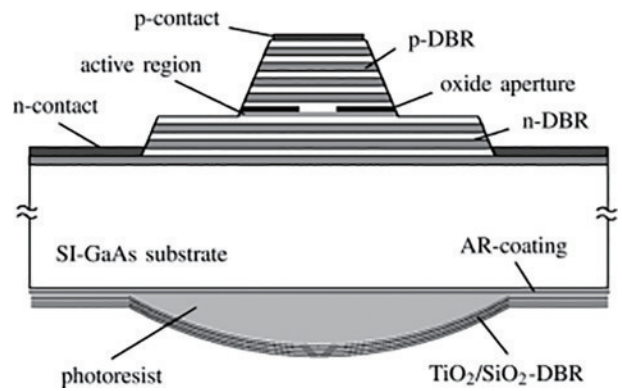


图 15 单片集成 VCSEL 的截面示意图^[30]

Fig. 15 Cross-section schematic of monolithic integrated VCSEL^[30]

实际上 VCSEL 的腔长相对较短, 适当延长谐振腔将有利于较大孔径器件的单模输出, 同时可降低发散角和热阻。但扩展谐振腔涉及复杂的工艺且对位错和机械扰动高度敏感, 制备有一定的难度。

2.4 反波导结构

反谐振反射光波导 (ARROW) 结构是实现单模大功率 VCSEL 的方法之一, 由于反波导结构中不同区域的折射率分布差异, 所形成的 ARROW 结构

中高阶模振荡区域的光程差发生改变,难以形成有效的驻波模式,导致高阶模的损耗较大,抑制了高阶模激励,从而在大孔径条件下获得基横模输出。

1995年 Wu等^[31]开始了在反波导 VCSEL 领域的研究,图 16 为反波导 VCSEL 的结构图,反波导区使高阶模在包层附近有较高的强度分布,高阶横模损耗相对较大从而被抑制,实验演示了固定偏振方向的基横模 VCSEL,最终在 16 μm 的大氧化孔径下,实现了 910 nm 波段 VCSEL 功率约为 1.2 mW 的基横模激励,其阈值电流仅为 0.8 mA。为了提高基横模功率,韩国电子与通讯实验室的 Yoo等^[32]改进了工艺,利用无定型 GaAs 掩埋的方法,制备了 990 nm VCSEL,其单模输出功率为 1.5 mW,阈值电流为 0.5 mA。

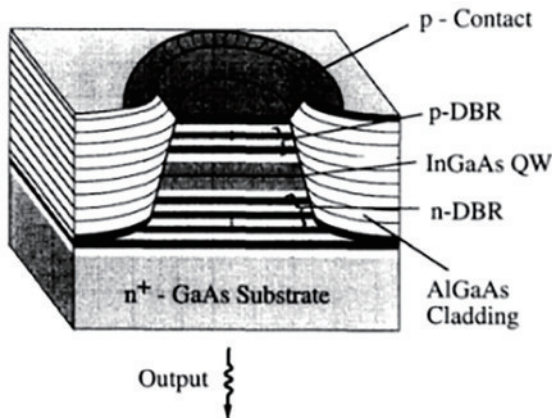


图 16 反波导 VCSEL 原理图^[31]

Fig. 16 Schematic of anti-waveguide VCSEL^[31]

由于这种反波导结构中基横模损耗相对较大,输出功率受到限制。于是结合 DBR 的概念,Zhou等^[33]采用图 17 所示的 ARROW 结构,在 8 μm 孔径下实现了 980 nm 波段 ARROW VCSEL 连续波单模输出功率为 7.1 mW。在反波导 VCSEL 制备相

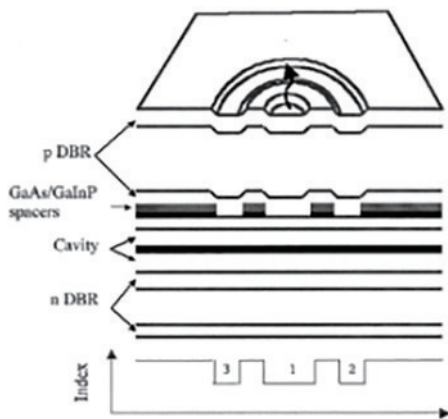


图 17 ARROW VCSEL 剖面图^[33]

Fig. 17 Cross-sectional view of ARROW VCSEL^[33]

对成熟的状态下,Tee等^[34]研究了其瞬态响应,表明了反波导 VCSEL 具有实现高消光比、单模输出的潜力。最近 Więckowska等^[35]提出了一种新型氧化物岛的 ARROW VCSEL,图 18 为一个具有双氧化层的 VCSEL 的结构图,一层提供横向光场和电流约束,另一层形成氧化岛,并发现该结构改善了 VCSEL 的单模发射性能。

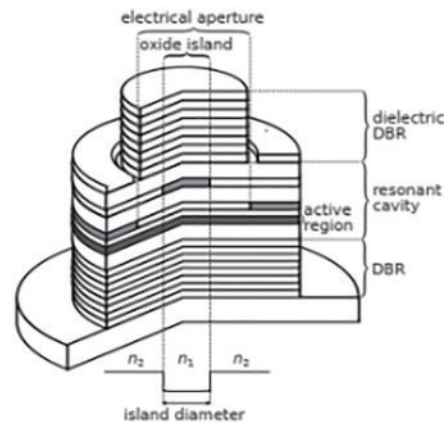


图 18 具有氧化物岛的 ARROW VCSEL 结构^[35]

Fig. 18 ARROW VCSEL structure with oxide island^[35]

由此可见,反波导结构具有实现大孔径单模输出的优势和前景。但是其制备需要二次外延技术,工艺比较复杂,且对位错、机械扰动高度敏感。不过通过改进二次外延技术和优化器件设计,可以充分利用 ARROW 结构的优点,获得更高功率的单模输出。

2.5 高对比度光栅结构

高对比度光栅(HCG)优化了传统的 DBR 结构,减少了 DBR 的对数,由于其反射率可以随入射角度变化^[36],通过设计和优化光栅结构的尺寸可以抑制高阶横模,在更大孔径下实现单模操作,从而提供更高的输出功率。

2007年 Zhou等^[37]报道了图 19 所示的高对比度亚波长光栅 VCSEL,其顶部反射镜由 4 对 DBR 和一

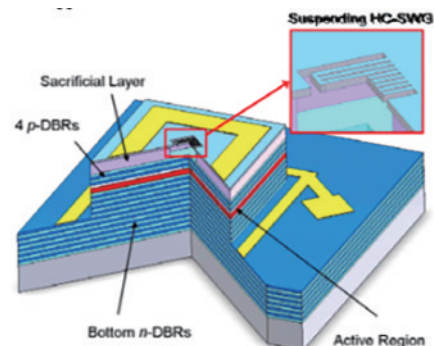


图 19 HCG 集成 VCSEL 的截面示意图^[37]

Fig. 19 Cross-section schematic of HCG integrated VCSEL^[37]

个高反射 HCG 组成,提供了较强的光反馈,在氧化孔径为 10 μm 时获得 850 nm VCSEL 输出功率为 2 mW、边模抑制比为 30 dB、阈值电流为 4 mA 的基横模激射。在此影响下,Kashino 等^[38]使用高度角相关的 HCG 反射镜对 980 nm VCSEL 的横模控制进行了研究,图 20 阐明了 HCG VCSEL 横模控制的基本思想,每个横模的角度不同,利用该方法可以抑制所有高阶模,在氧化孔径为 6 μm 时,980 nm VCSEL 的最大输出功率为 0.5 mW,阈值电流为 1 mA,并且优化 HCG 的反射率可以提高其输出功率。

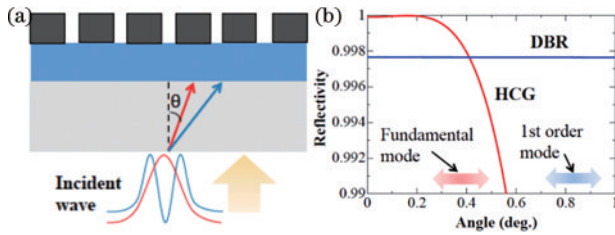


图 20 HCG VCSEL 横模控制^[38]。(a)示意图;(b) VCSEL 横向控制时 HCG 的角依赖计算

Fig. 20 HCG VCSEL transverse mode control^[38]. (a) Schematic; (b) calculated angular dependence of HCG for transverse-mode control of VCSEL

为了进一步提高 DBR 的反射率,郑舟等^[39]设计了图 21 所示的 VCSEL 结构,把液晶作为 HCG 的低折射率材料,将其与 VCSEL 结合不仅减小了外延

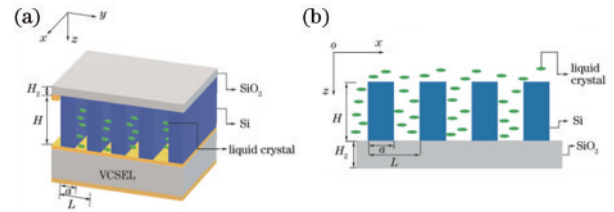


图 21 Si-SiO₂ HCG 结构示意图^[39]。(a)三维结构示意图;(b)填充液晶后光栅的截面图

Fig. 21 Structure diagram of Si-SiO₂ HCG^[39]. (a) Three-dimensional structure diagram; (b) cross-sectional view of grating after filling liquid crystal

层厚度,而且具有良好的偏振选择性,保证了 VCSEL 的稳定输出,推进了液晶可调谐 VCSEL 的实用化进程。

高对比度光栅结构的 VCSEL 除了可实现单一横模外,与其他方法相比,它还具有偏振模式选择、快速波长调谐等良好的特性,是一种有潜力的制备基横模高功率 VCSEL 的技术手段。

2.6 五种横模控制方法的分析比较

目前,横模控制方法主要用于 850 nm 和 980 nm 波段的 VCSEL,从表 1 可以看出,850 nm 波段采用扩展谐振腔以及表面浮雕结构获得的基横模输出功率较大,其中最大基横模功率为 7 mW。而 980 nm 波段采用扩展谐振腔以及反波导结构获

表 1 不同横模控制方法下 850 nm~1.3 μm 波段 VCSEL 的基横模功率对比

Table 1 Fundamental transverse mode power comparison of 850 nm—1.3 μm band VCSEL under different transverse mode control methods

Time	Wavelength /nm	Method	Threshold current /mA	Power /mW	Operating current /mA	Oxide aperture / μm
1999	850	Surface relief ^[23]	1.5	2	4	7
2000	850	Surface relief ^[19]	2.2	2.2	6	9
2000	850	Extended resonator ^[29]	1.5	5.2	13.7	10
2004	850	Surface relief ^[20]	5	7	—	15
2007	850	HCG ^[37]	4	2	10	10
2012	850	PC ^[18]	0.9	3.1	10	8
2000	980	Extended resonator ^[27]	1.5	5	9	7
2001	980	PC ^[9]	10	0.45	48	12
2001	980	Surface relief ^[21]	3	5.7	7	7
2002	980	ARROW ^[30]	16	7.1	22	8
2005	980	Extended resonator ^[25]	9.1	7.8	35	6
2008	980	Extended resonator ^[27]	7.5	15	38	9
2013	980	HCG ^[38]	1	0.5	3	6
1996	990	ARROW ^[32]	0.5	1.5	7.5	10
2008	990 _(QD)	PC ^[16]	4.2	5.7	35	18
2008	1300 _(QD)	PC ^[16]	4.75	0.25	6	26
2011	1300 _(QD)	Surface relief ^[21]	2.15	3.42	—	15

得的基横模输出功率较大,最大基横模功率高达 15 mW。此外,对于长波长波段的 VCSEL,设计了光子晶体以及表面浮雕结构的量子点 VCSEL,其中采用光子晶体结构,1.3 μm 波段的量子点 VCSEL 基横模输出功率仅为 0.2 mW,而采用表面浮雕结构实现了 1.3 μm 波段功率为 3.42 mW 的单模输出。由此看来,对于特定波长的 VCSEL,尽管有些方法的基横模输出功率不够理想,但其光束质量相对较好,故仍有优化空间。

3 结束语

本文对 VCSEL 横模控制方法进行了全面总结,概述了 5 种在大氧化孔径下实现 VCSEL 高功率基横模稳定输出的方法。为了解决氧化孔径与单模高功率输出之间的矛盾,国内外研究者针对在大氧化孔径下实现单模输出的方法进行了不同的探索,本文介绍了利用光子晶体、表面浮雕、反波导、扩展谐振腔以及高对比度光栅结构来实现 VCSEL 高功率基横模输出的方法。随着对 VCSEL 横模控制方法的不断尝试,研究人员开始采用光子晶体、表面浮雕、反波导以及扩展谐振腔结构实现对 VCSEL 横模的控制,上述研究方法有力推动了单模 VCSEL 的研究进展,但这些结构通常要求精确的设计与自对准技术,在器件的制备方面存在一定困难,因此要进一步完善以满足应用需求。经过不断深入研究,研究人员探索出了新的技术手段,转为用高对比度光栅结构实现对 VCSEL 横模的控制,这不仅解决了高反射 DBR 材料选择的问题,也避免了复杂的工艺,而且可以实现单一横模、偏振模式选择以及快速波长调谐等功能,应用前景广阔。

在实际应用中单模高功率 VCSEL 有较大市场发展空间,而目前的单模 VCSEL 的功率仍然较低,无法很好满足需求,因此需要探索制定出更理想的方案,实现单模高功率 VCSEL 在光纤通信、激光打印、光谱学、传感以及生物光子学等领域的大规模应用。

参 考 文 献

- [1] Mangaser R, Rose K. Estimating interconnect performance for a new National Technology Roadmap for Semiconductors [C]//Proceedings of the IEEE 1998 International Interconnect Technology Conference (Cat. No. 98EX102), June 3-3, 1998, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 1998: 253-255.
- [2] Xie Y Y, Kan Q, Xu C, et al. Low threshold current single-fundamental-mode photonic crystal VCSELs [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(6): 464-466.
- [3] Jager R, Grabherr M, Jung C, et al. 57% wallplug efficiency oxide-confined 850 nm wavelength GaAs VCSELs [J]. Electronics Letters, 1997, 33(4): 330-331.
- [4] Alias M S, Leisher P O, Choquette K D, et al. Efficiency and spectral characteristics of 850 nm oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers [C]//2006 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics, October 29-December 1, 2006, Kuala Lumpur, Malaysia. New York: IEEE Press, 2006: 231-235.
- [5] Pian S J, Ullah S, Yang Q, et al. Single-mode semiconductor nanowire lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701003.
片思杰, Ullah Salman, 杨青, 等. 单模半导体纳米线激光器 [J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701003.
- [6] Tang Y, Cao C F, Zhao X Y, et al. Laser single-mode characteristics of InGaAs/GaAs/InGaP quantum well lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(13): 131402.
汤瑜, 曹春芳, 赵旭熠, 等. InGaAs/GaAs/InGaP 量子阱激光器的激光单模特性研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(13): 131402.
- [7] Unold H J, Mahmoud S W Z, Jager R, et al. Large-area single-mode VCSELs and the self-aligned surface relief [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2001, 7(2): 386-392.
- [8] Choquette K D, Chow W W, Hadley G R, et al. Properties of small-aperture selectively oxidized VCSELs [C]//Conference Proceedings LEOS'96 9th Annual Meeting IEEE Lasers and Electro-Optics Society, November 18-21, 1996, Boston, MA, USA. New York: IEEE Press, 1996: 144-145.
- [9] Bond A E, Dapkus P D, O'Brien J D. Aperture placement effects in oxide-defined vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(10): 1362-1364.
- [10] Shchukin V, Ledentsov N N, Kropp J, et al. Single-mode vertical cavity surface emitting laser via oxide-aperture-engineering of leakage of high-order transverse modes [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2014, 50(12): 990-995.
- [11] Unold H J, Golling M, Michalzik R, et al. Photonic crystal surface-emitting lasers: tailoring waveguiding

- for single-mode emission [C]//Proceedings of 27th European Conference on Optical Communication (Cat. No. 01TH8551), September 30-October 4, 2001, Amsterdam, Netherlands. New York: IEEE Press, 2001: 520-521.
- [12] Danner A J, Yokouchi N, Raftery J J, et al. Focused ion beam post-processing for single mode photonic crystal vertical cavity surface-emitting lasers [C]//61st Device Research Conference. Conference Digest (Cat. No. 03TH8663), June 23-25, 2003, Salt Lake City, UT, USA. New York: IEEE Press, 2003: 155-156.
- [13] Choquette K D, Danner A J, Raftery J J, et al. Vertical cavity photonic crystal coupled-defect lasers for optical interconnects [C]//2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings, March 6-13, 2004, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2004
- [14] Lee K H, Baek J H, Hwang I K, et al. Square-lattice photonic-crystal vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Optics Express*, 2004, 12 (17): 4136-4143.
- [15] Lü Z R, Zhang Z K, Wang H, et al. Research progress on 1.3 μm semiconductor quantum-dot lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0701016.
吕尊仁, 张中恺, 王虹, 等. 1.3 μm 半导体量子点激光器的研究进展 [J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0701016.
- [16] Yang H P D, Hsu I C, Chang Y H, et al. Characteristics of InGaAs submonolayer quantum-dot and InAs quantum-dot photonic-crystal vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(11): 1387-1395.
- [17] Xu X S, Wang C X, Du W, et al. Investigation of photonic crystal vertical-cavity surface-emitting lasers at 850 nm [J]. *Physics*, 2007, 36(1): 17-19.
许兴胜, 王春霞, 杜伟, 等. 光子晶体垂直腔面发射 850 nm 波长激光器研究 [J]. *物理*, 2007, 36(1): 17-19.
- [18] Xie Y Y, Xu C, Kan Q, et al. High power single mode output low threshold current photonic crystal vertical cavity surface emitting lasers [C]//OFC/NFOEC, March 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2012: 1-3.
- [19] Martinsson H, Vukusic J A, Larsson A. Single-mode power dependence on surface relief size for mode-stabilized oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(9): 1129-1131.
- [20] Furukawa A, Sasaki S, Hoshi M, et al. High-power single-mode VCSELs with triangular holey structure [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, 2004. (CLEO), May 16-21, 2004, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2004: 1024-1025.
- [21] Xu D W, Yoon S F, Ding Y, et al. 1.3 μm In(Ga)As quantum-dot VCSELs fabricated by dielectric-free approach with surface-relief process [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(2): 91-93.
- [22] Li X S, Ning Y Q, Jia P, et al. Rectangular mesa shaped vertical cavity surface emitting laser with shallow surface relief [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(12): 1202005.
李秀山, 宁永强, 贾鹏, 等. 浅面浮雕矩形台面垂直腔面发射半导体激光器 [J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1202005.
- [23] Unold H J, Grabherr M, Eberhard F, et al. Increased-area oxidised single-fundamental mode VCSEL with self-aligned shallow etched surface relief [J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(16): 1340.
- [24] Unold J, Golling M, Mederer F, et al. Singlemode output power enhancement of InGaAs VCSELs by reduced spatial hole burning via surface etching [J]. *Electronics Letters*, 2001, 37(9): 570-572.
- [25] Debernardi P, Unold H J, Maehns J, et al. Single-mode, single-polarization VCSELs via elliptical surface etching: experiments and theory [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, 9(5): 1394-1405.
- [26] Deppe D G, Huffaker D L. High spatial coherence vertical-cavity surface-emitting laser using a long monolithic cavity [J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(3): 211-213.
- [27] Unold H J, Mahmoud S W Z, Jager R, et al. Improving single-mode VCSEL performance by introducing a long monolithic cavity [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(8): 939-941.
- [28] Wiemer M W, Aldaz R I, Miller D A B, et al. A single transverse-mode monolithically integrated long vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(7): 1366-1368.
- [29] Fischer A J, Choquette K D, Chow W W, et al. 5.2 mW single-mode power from a coupled-resonator vertical-cavity laser [C]//LEOS 2000. 2000 IEEE

- Annual Meeting Conference Proceedings. 13th Annual Meeting. IEEE Lasers and Electro-Optics Society 2000 Annual Meeting, November 13-16, 2000, Rio Grande, Puerto Rico, USA. New York: IEEE Press, 2000: 802-803.
- [30] Kardosh I, Demaria F, Rinaldi F, et al. High-power single transverse mode vertical-cavity surface-emitting lasers with monolithically integrated curved dielectric mirrors [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(24): 2084-2086.
- [31] Wu Y A, Li G S, Nabiev R F, et al. Single-mode, passive antiguided vertical cavity surface emitting laser [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1995, 1(2): 629-637.
- [32] Yoo B S, Chu H Y, Park M S, et al. Transverse mode characteristics in amorphous-GaAs-antiguided vertical-cavity surface-emitting lasers [C]//Proceedings of European Meeting on Lasers and Electro-Optics, September 8-13, 1996, Hamburg, Germany. New York: IEEE Press, 1996: 11.
- [33] Zhou D L, Mawst L J. High-power single-mode antiresonant reflecting optical waveguide-type vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(12): 1599-1606.
- [34] Tee C W, Yu S F, Pentyl R V, et al. Transient response of ARROW VCSELs [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2005, 41(2): 140-147.
- [35] Więckowska M, Czyszanowski T, Almuneau G, et al. Antiresonant oxide island as a measure for improved single-mode emission in VCSELs [C]//2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), July 1-5, 2018, Bucharest, Romania. New York: IEEE Press, 2018: 1-4.
- [36] Yang J M, Lin Y L, Huang Q Q, et al. Wavelength-tunable linearly polarized Yb-doped fiber laser based on tilted fiber grating [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(3): 0314003.
杨锦民, 林彦吕, 黄千千, 等. 基于倾斜光栅的可调谐线偏振掺镱光纤激光器 [J]. 光学学报, 2020, 40(3): 0314003.
- [37] Zhou Y, Huang M C Y, Chang-Hasnain C J. Transverse mode control in high-contrast subwavelength grating VCSEL [C]//2007 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 6-11, 2007, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2007: 1-2.
- [38] Kashino J, Inoue S, Matsutani A, et al. Transverse mode control of VCSELs using angular dependent high-contrast grating mirror [C]//2013 IEEE Photonics Conference, September 8-12, 2013, Bellevue, WA, USA. New York: IEEE Press, 2013: 244-245.
- [39] Zheng Z, Zou Y G, Shi L L, et al. High-contrast grating structure design for liquid crystal tunable vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 011402.
郑舟, 邹永刚, 石琳琳, 等. 液晶可调谐 VCSEL 中高对比光栅结构的设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 011402.