

垂直腔面发射半导体激光器的特性及其研究现状

李玉娇^{1,2}, 宗楠^{1*}, 彭钦军¹

¹中国科学院理化技术研究所中国科学院固体激光重点实验室, 北京 100190;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 与传统的边发射半导体激光器相比,垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有光束质量好、阈值电流低、易于二维阵列集成和制造成本低廉等优点。近年来,以 VCSEL 为基础发展起来的电抽运和光抽运垂直外腔面发射激光器(VECSEL),在获得高的输出功率和光束质量的同时,可以通过在腔内插入光学元件,实现腔内倍频、波长可调谐和锁模等激光技术,在激光领域很有竞争力。本文介绍了面发射半导体激光器的结构、工作原理及性能优势,综述了其在高功率输出、可调谐技术、锁模技术等方面的研究现状与进展,探讨了该类型激光器的发展前景。

关键词 激光器;垂直腔面发射半导体激光器;电抽运;光抽运;高功率;可调谐技术;锁模技术

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.050006

Characteristics and Progress of Vertical-Cavity Surface-Emitting Semiconductor Lasers

Li Yujiao^{1,2}, Zong Nan¹, Peng Qinjun¹

¹Key Laboratory of Solid State Laser, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Compared with the traditional edge emitting semiconductor lasers, the vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) shows many advantages, such as good beam quality, low threshold current, easy fabrication in two-dimensional arrays and low cost. In recent years, the electrically pumped and optically pumped vertical external cavity surface emitting laser (VECSEL) developed on the basis of VCSEL is a very competitive light source in the laser field. It can realize intracavity frequency doubled, tunable wavelength and mode-locked lasers technology by inserting corresponding optical element within the cavity, and obtain high output power and beam quality. We introduce the structures, working principles and performance advantages of VCSEL and VECSEL. The research status and latest progress including high power, tunable operation, and mode-locking lasers are reviewed. The development prospect of VCSEL and VECSEL are discussed.

Key words lasers; vertical-cavity surface-emitting semiconductor laser; electric pumping; optical pumping; high power; tunable technology; mode-locked technology

OCIS codes 140.5960; 140.7260; 140.3600; 140.4050

1 引言

半导体激光器具有体积小、质量轻、效率高、波长范围广、易集成、可靠性高、可批量化生产等优点

点^[1],自 20 世纪 70 年代初实现室温连续运转以来,已成为光电子技术领域的重要器件。传统的边发射半导体激光器已实现较大功率输出,但其输出光斑为椭圆形,光斑的纵横比最差可达 100:1,在某些应

收稿日期: 2017-11-06; 收到修改稿日期: 2017-11-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61505226)

作者简介: 李玉娇(1992—),女,博士研究生,主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: 1402578996@qq.com

导师简介: 彭钦军(1976—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事激光物理、高功率全固态激光技术、变频激光技术、光电信息处理技术等方面的研究。E-mail: pengqinjun@mail.ipc.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: zongnan@mail.ipc.ac.cn

用中须附加光束整形系统。1979年, Soda等^[2]提出了垂直腔面发射激光器(VCSEL)的概念, 与传统的边发射激光器不同的是其激光出射方向垂直于衬底表面, 可获得圆形光斑。由于谐振腔长与波长接近, 动态单模性比较好, 有望在光通信、光互连、光存储、激光显示和照明等领域大展身手。目前, Princeton Optronics公司获得了VCSEL单管连续输出的最大功率为5.5 W^[3]。可是, 由于VCSEL的谐振腔是由顶部布拉格反射镜(DBR)和底部布拉格反射镜构成, 腔长与波长同量级, 导致器件发散角较大(半角宽度约15°)。为了获得较小的发散角, 一种垂直外腔面发射激光器(VECSEL)应运而生。由于采用外腔结构, 其腔长由波长量级增加到毫米至厘米量级, 有效改善了光束质量, 理论极值达 $M^2 \sim 1$ 。早期的垂直外腔面发射激光器依旧采用电抽运(EP)方式, 目前EP-VECSEL单管获得了超过9 W的连续输出^[4]。可是电抽运VCSEL和VECSEL均因电流注入不均匀和串联电阻热堆积, 在单横模工作模式下高功率输出受到限制。1997年, Kuznetsov等^[5]提出的光抽运垂直外腔面发射激光器(OP-VECSEL), 也有人称为半导体盘片激光器(SDL)^[6]。其综合了高光束质量的垂直腔面发射激光器和高功率激光二极管抽运的固体激光器的优势, 可同时获得高功率和高光束质量的激光输出, 覆盖从深紫外到中红外波段的广阔波段。在紫外及蓝紫光波段, 半导体增益介质以InGaN-GaN材料体系为主, 在GaN基底材料上生长出多个InGaN量子阱。在红光至近红外波段, 半导体增益介质主要采用在GaAs衬底上生长InGaP-AlGaInP、GaAs-AlGaAs、InGaAs-GaAsP及GalnNAs-GaAs量子阱。1.5 μm 附近波段主要在InP衬底上生长AlGaInAs-InP量子阱来实现, 2~3 μm 则通过在GaSb衬底上生长GaInAsSb-GaSb材料系来实现。对于更长的4~5 μm 波段, 衬底材料多为BaF₂, 增

益介质材料为PbSe-PbEuTe或PbTe-PbEuTe体系。同时, 得益于其外腔的存在, 可以方便地进行锁模而获得超短脉冲输出; 还可以实现高效率的激光腔内频-频转换, 扩展了输出波长范围。另外, OP-VECSEL的独到之处在于半导体增益芯片结构简单、无p-n结、无电接触, 极大地简化其生长过程, 在提高增益芯片可靠性的同时, 消除附加电阻上的热效应; 抽运波长可选择性设计; 可获得百纳米的波长调谐范围; 半导体增益芯片上抽运光斑较大, 高功率时产生光学损伤的可能性减小; 激光器体积紧凑, 携带方便, 实用程度高。在实际应用中, 方便作为仪器仪表和显微镜的配套光源, 目前, 单管OP-VECSEL连续输出功率已高达106 W^[7]。

本文介绍了VCSEL, EP-VECSEL和OP-VECSEL的原理和特性, 并综述了其最新研究进展、主要应用和发展前景。

2 基本原理

2.1 VCSEL

如图1所示, 典型的VCSEL包括顶发射和底发射两种结构。一般来说, 早期典型器件是通过金属有机物化学气相沉积(MOCVD)技术在n型GaAs衬底上生长而成的。其主要由DBR作为激光腔镜, 量子阱有源区(MQWs)夹在n-DBR和p-DBR之间, 由于量子阱厚度小, 使单程增益很小, 因此反射镜的反射率较高, 一般全反腔镜反射率>99.9%, 输出腔镜反射率通过理论计算设定最佳的耦合输出率(>99%), 然后, 在衬底和p-DBR外表面制作金属接触层。通过在p-DBR或n-DBR上制作一个圆形出光窗口, 获得圆形光束, 窗口直径从几微米到百微米量级, 再和导热性好的热沉键合, 提高芯片的散热性能。由于GaAs衬底对800 nm附近的光有强吸收^[8], 所以在这个波段的器件通常采取顶发射结构。底发射结构可

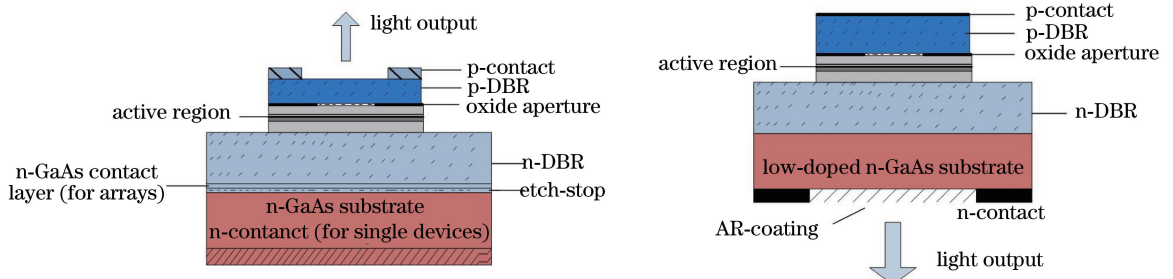


图1 VCSEL结构简图。(a)顶发射结构;(b)底发射结构

Fig. 1 Schematic of VCSEL. (a) Top-emitting; (b) bottom-emitting

用于产生 976 nm 和 1064 nm 波段^[9],为了减少衬底的吸收损耗,通常将衬底减薄到 150 μm 以下,再生长一层增透膜,提高激光光束质量,最后将增益芯片安装在热沉上,离有源区更近,因此散热性更好。

2.2 EP-VECSEL

EP-VECSEL 的芯片包括电注入结构、有源区和 DBR,与传统的 VCSEL 相比,其引入的外腔结构增加了腔长,如图 2 所示。谐振腔包括 p-DBR、n-DBR 以及外腔镜等 3 个镜面,是一种由两个子谐振腔构成的耦合谐振腔。激光器芯片上生长的 p-DBR、n-DBR 以及夹在其中的有源区组成的谐振腔为有源腔,提供激励所需的增益;由 p-DBR 及外腔镜组成的谐振腔可以通过控制不同传输模式的损耗,抑制高阶横模,从而改善光束质量。

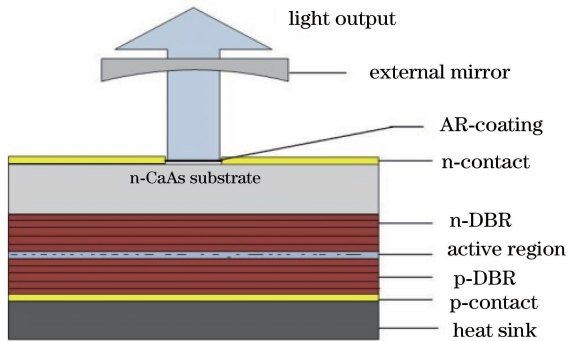


图 2 EP-VECSEL 器件结构图

Fig. 2 Device structure chart of EP-VECSEL

2.3 OP-VECSEL

OP-VECSEL 与 EP-VECSEL 相比,减少了电流注入部分,其结构主要包括热沉、增益芯片、外腔输出镜(OC)、抽运光。抽运方式通常有两种:端面抽运和背端抽运;图 3 为端面抽运的 OP-VECSEL 结构,抽运光反向注入且与输出光成一定夹角(一般为 45°)聚焦到增益芯片上,如果角度太大会导致抽运光斑形状不均匀,而角度太小可能阻挡激光振荡^[1]。其增益芯片为顶发射结构,主要分为 4 个部分:衬底、DBR、MQWs 增益区和窗口层,可在衬底上通过分子束外延技术(MBE)或者金属化学物有机气相沉积(MOCVD)逐层生长而成。考虑激光器的散热问题,通常把激光器芯片的顶层与热导率高的导热片键合后使用,如光学金刚石片、光学 SiC 片或蓝宝石片等。

图 4 为背端抽运的 OP-VECSEL 及其增益芯片的结构,与端面抽运不同,其抽运光从后腔镜入射与输出光同轴同向。尽管抽运光斑不大,但可获得更加均匀的圆形抽运光斑,并且抽运光耦合系统相对容易架设,结构紧凑,更有利于激光的集成与封装。其增益芯片为底发射结构,生长顺序与顶发射不同,先在衬底上生长窗口层,再生长 MQWs,最后生长 DBR。再将 DBR 焊接到金刚石或 SiC 散热片上。另外,由于抽运光通过 DBR 后才进入增益区,因此要尽量使 DBR 对抽运光透明,对激光波长有高反射。

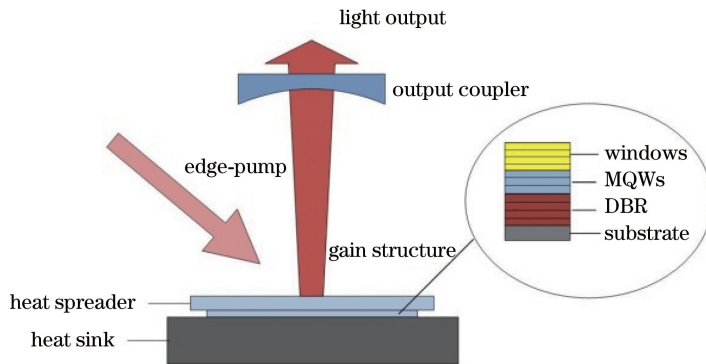


图 3 OP-VECSEL 端面抽运装置图

Fig. 3 Edge-pumped setup of OP-VECSEL

3 研究进展

3.1 VCSEL

近红外波段的研究较多也较为成熟,其中 808 nm 波段主要集中在高功率阵列输出方面。长期以来,Princeton Optronics 公司致力于该方面的研究^[10],并于 2013 年获得了目前最高输出功率的

808 nm VCSEL 阵列,应用于高速成像的高功率照明模块,其输出功率高达 4800 W,可以在准连续条件下工作^[11]。

850 nm VCSEL 阵列输出功率已经达到 4 W^[12]。2015 年,Watkins 等^[13]报道了 850 nm 单管 VCSEL 的单频激光输出超过 100 mW,为目前 850 nm 最高的单管输出功率,据悉,该小组正在努

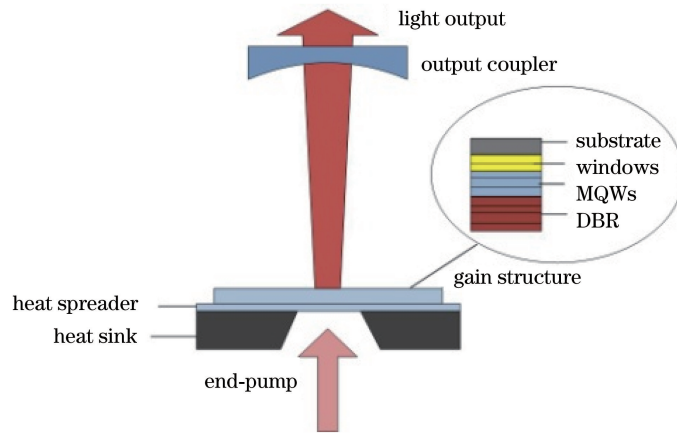


图4 OP-VECSEL 背端抽运装置图

Fig. 4 End-pumped setup of OP-VECSEL

力研制该波段输出功率 5 W 的单管器件。

980 nm 波段 VCSEL 的研究最为成熟。在很长一段时间内, D'Asaro 等^[14] 获得的 3 W 980 nm VCSEL 一直是电抽运 VCSEL 单管输出的最高功率。2015 年他们获得了发射波长为 976 nm 的高功率电抽运 VCSEL, 在 20 °C 连续工作条件下, 功率达到 5.5 W, 刷新了单管 VCSEL 的最高功率^[3]。显然, 阵列是提高输出功率的有效途径。2012 年, Princeton Optronics 公司推出的 980 nm 高功率 VCSEL 面阵和面阵组合模块产品, 面阵组合模块连续输出超过 14 kW, 为目前 980 nm 阵列输出的最高功率^[15]。

1 μm 波段自 Hou 等^[16] 率先在室温下获得 1060 nm 连续输出连续输出后发展迅速。Zhou 等^[9] 通过优化 DBR 和增益区的设计, 获得了目前 VCSEL 单管 63.4% 的最高转换效率, 高于 Kageyama 等^[17] 获得的 62% 的转换效率。同时, 他们用于照明领域的 1064 nm 照明器, 由 8×16 kW 的模块组成, 输出功率高达 100 kW。

1310 nm 和 1550 nm 波段的 VCSEL 器件一般由 InP 和 GaAs 基材料体系来实现。Boehm 等^[18] 制作的 1.3~2.0 μm AlGaInAs/InP 系 VCSEL, 为了降低热效应, 顶部反射镜由基于 InP 的化合物半导体组成, 在 MBE 结构上生长的掩埋隧道结提供了自调节的横向电和光限制以及稳定的低电串联电阻。1.315 μm 器件室温下的单模最大输出功率为 0.43 mW, 多模连续工作的最大输出功率为 7 mW。Klem 等^[19] 在掺 Si 的 GaAs 衬底上生长 InGaAsN 增益材料并通过增大电流注入孔径和隧道结的形式在室温下获得了 1300 nm 的连续输出, 最大输出功率为 2.1 mW, 可操作最高温度为 105 °C。Nishida

等^[20] 把 DBR 和量子阱之间的 AlGaAs 空间层替换为 i-GaAs 隔离层, 以此阻止 Al 扩散到量子阱中降低表面质量和量子阱的光致发光(PL)密度, 获得了 4.2 mW 的 1261.5 nm 输出。Michalzik^[21] 将 Sb 加入到 GaInNAs 材料中, 得到的 GaInNAsSb 可输出波长为 1530 nm, 连续输出功率为 2 μW。

可见光波段的紫光和蓝绿光主要通过 GaN 基材料直接激发, 主要难点是短波长高反射率 DBR 的生长、有效的电流注入以及热管理。目前, 420 nm 紫光已经获得了 0.6 mW 的输出功率^[22]。使用高反射率的全电介质 DBR^[23] 的 GaN 基 VCSEL 已经获得了 0.7 mW 的 451 nm 蓝光和 0.8 mW 的 503 nm 绿光, 其输出功率较低。Hamaguchi 等^[24] 考虑到 n 型 GaN 衬底的热导率高于传统使用的蓝宝石或 Si 衬底, 加之外延横向过生长(ELO)方法可以精确控制腔体长度和形成高反射率电介质 DBR, 通过两者结合在 GaN 基 VCSEL 中获得了 1.165 mW 的 453 nm 激光输出, 为目前电抽运蓝光 VCSEL 输出的最高功率。

红光 VCSEL 也在热管理上遇到了很大的挑战。较高的发射能量将 DBR $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的 x 的组成范围限制在 0.5~1.0, 限制了反射镜中可用的折射率范围, 反过来又需要更多的 DBR 层数以实现所需的反射率, 较多的 DBR 层数会产生较高的电流阻抗, 而较高的热阻会加重器件的热效应。Johnson 等^[25] 在室温下获得了多模 673 nm 的 AlGaInP VCSEL 最大输出功率达到 11.54 mW, 转换效率达 22.9%, 为目前红光波段单管输出的最高水平。为了提高输出功率, Seurin 等^[26] 将 GaAs 衬底去除并将芯片焊接在高导热性基座上, 制造高功率二维阵列, 如 2 mm×2 mm 的 688 nm VCSEL 阵列在室温

下获得了 3 W 的连续输出功率,而 4 mm×4 mm 的 650 nm 和 688 nm VCSEL 阵列在准连续 (QCW) 运转中分别获得了 17 和 55 W 的输出功率。

3.2 EP-VECSEL

EP-VECSEL 是 VCSEL 向 OP-VECSEL 发展的过渡产物,其研究主要集中在最初的近红外波段 (850~1550 nm),同时可以基于腔内倍频有效地在可见光区域产生激光辐射,易于设计为具有多个激光元件的二维阵列,大幅提高了输出功率。因此,EP-VECSEL 适合批量生产,大大降低了制造成本。

近红外波段的研究已有较多相关报道^[27-29]。Leeuwen 等^[30]研制的 980 nm EP-VECSEL 产品,外腔镜使用双凸透镜与平面镜构成扩展腔结构,单管器件的基模和多模连续输出功率分别为 365 mW 和 1 W,在 15 ns、1 kHz 的脉冲工作条件下,基横模峰值输出功率达到 4 W。Princeton Optronics 公司亦研制出包含 475 个发光单元的 980 nm EP-VECSEL 列阵器件,连续及脉冲工作时基模输出功率分别达到 42 W 和 155 W,成为 EP-VECSEL 基横模输出的最高水平^[31]。1.06 μm 波长获得了 EP-VECSEL 单管最高的输出功率,Zhao 等^[4]使用 MOCVD 在 n 型 GaAs 衬底上生长芯片材料,为了减小吸收,衬底掺杂浓度很低 ($< 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)。增益区由 InGaAs/GaAs 组成,DBR 由 GaAs/AlGaAs 组成,该器件输出功率达 9.04 W。

2004 年,Kurdi 等^[32]首次报道了 InGaAsP EP-VECSEL 室温输出 1550 nm 激光,该口径为 50 μm 的 InP 基 VCSEL 连续输出功率为 0.3 mW,准连续条件下输出达 2.76 mW。利用掩埋隧道结型和离子注入结型控制电流均匀性,获得了 1550 nm 的 3 mW 脉冲输出和 0.5 mW 单横模输出^[33]。2010 年,Harkonen 等^[34]利用掩埋隧道结型在 GaInAsSb VCSEL 中获得了 2.34 μm 脉冲光输出,设计了 30~90 μm 口径的器件,并在 90 μm 口径的器件中获得最高的脉冲峰值功率为 1.5 mW。

3.3 OP-VECSEL

在红外波段,850 nm 激光常采用量子阱内抽运方式以提高量子效率,减小热效应。其中,Zhang 等^[35]使用 806 nm 光纤耦合激光二极管抽运 GaAs/AlGaAs VCSEL,得到最大功率 1.02 W 的 855 nm 输出。Beyertt 等^[36]使用 833 nm 抽运光阱内抽运获得了 865 nm 的 1.6 W 的激光输出,光光转换效率高至 50%。美国相干公司^[37]研制的 InGaAs/GaAs VCSEL,获得了 30 W 的 980 nm 和 19 W

的 920 nm 的连续多模输出,为目前 980 nm 单管 OP-VECSEL 获得的最高功率。960 nm 基模激光也获得了数十瓦的功率输出。Rudin 等^[38]报道了 20.2 W 输出的 InGaAs/GaAs VCSEL,其 DBR 对激光反射率 R 为 99.95%,同时对抽运光反射率为 97%,使抽运光得以两次通过增益区,吸收可达 85%。使用 808 nm 激光器 45° 入射抽运,斜效率为 49%,光光转换效率为 43%,光束质量因子 $M^2 \approx 1.1$,这是目前 OP-VECSEL 单管基模输出的最高功率。

目前 1 μm 波段研究最为成熟。Lee 等^[39]在背端抽运 OP-VECSEL 中利用液体毛细管绑定散热窗口获得了 9.1 W 的 1079 nm 连续输出,这是背端抽运获得的最高输出功率。Heinen 等^[7]利用热电制冷器控制温度,提高芯片和基底的键合质量,利用金刚石作为散热片,在 3 °C 时获得了 106 W 的 1028 nm 连续 InGaAs OP-VECSEL 多模激光输出,这是目前单管最高输出功率,在输出功率为 99.6 W 时,光光转换效率达 45%。Zhang 等^[40]利用腔内的双折射滤波片和 5% 的输出耦合镜,获得了 23.6 W 的 1013 nm 单频输出,为目前单频输出的最高功率。在更长的 1160~1200 nm 波段,由于 InGaAs/GaAs 中 In 的组分更高,晶格应变更严重,Kantola 等在 InGaAs/GaAs 量子阱中生长了 GaAsP 应力补偿层,在热沉 -15 °C 下获得了 50 W 的 1180 nm 输出,光光转换效率为 28%^[41]。2017 年,Leinonen 等^[42]在 AlGaInAs OP-VECSEL 中利用特制的金反射镜将未吸收的光再次反射进增益区,增强吸收,在热沉 -5 °C 下获得了 33 W 的 1275 nm 激光输出。

Lyytikainen 等和 Rantamaki 等合作进行了 1.3~1.55 μm 的研究,先后获得了 2.7 W 的 1.3 μm 输出^[43]、2.6 W 的 1.57 μm 输出和 1 W 的 1.56 μm 单频输出^[44-45],以及 5 W 的 1.48 μm 激光输出^[46]。2014 年他们设计了腔内金刚石散热芯片结构,并利用 980 nm 抽运 AlGaInAs/InP 结构,获得 1300 nm 出光功率为 7.1 W,且 $M^2 < 1.25$,为该波段输出的最高功率^[47]。

2~5 μm 中红外波段已经获得数十瓦级输出。Hopkins 等^[48]在 AlGaIn/AsSb VCSEL 中获得了 5 W 的 2 μm 激光输出,利用双折射滤波片可调谐波长范围为 80 nm。2015 年,Holl 等^[49]利用 1470 nm 低量子亏损抽运并结合前后散热热沉,在 0 °C 条件下获得了 2 μm 激光的最高输出,功率达 20 W,之后换用金刚石散热片在室温下获得了

17 W 的激光输出^[50]。Ishida 等^[51-52]使用 1.55 μm 光纤激光抽运 PbSrS/PbS 和 PbTe/CdTe VECSEL, 通过控制温度, 分别获得了 2.65~3 μm 和 3.3~4.2 μm 的激光输出, 最大功率分别达 2 W 和 700 mW。而在 BaF₂ 衬底上生长 PbTe/PbEuTe 增益区并使用 Al 作为散热片, 亦获得了 300 mW 的 5 μm 波长输出^[53]。

在可见光波段, 同 GaN-VECSEL, 直接激发材料获得紫光以及蓝光的主要难点集中在生长优质的 DBR 结构、合适的抽运源、腔结构的设计, 以及高效的热管理。Debusmann 等^[54]利用 375 nm 染料激光器抽运 InGaN OP-VECSEL, 获得 415 nm 蓝光, 单脉冲能量为 60 nJ, 相应峰值功率 22 W。2015 年, Baumgärtner 等^[55]在热沉温度 -15 °C 条件下, 于 GaInP/AlGaInP OP-VECSEL 中获得了 1.6 W 的 665.5 nm 连续红光, 2016 年, 利用多程量子阱抽运, 将功率提高到 2.5 W, 这是目前红光 OP-VECSEL 的最高输出功率^[56]。

在紫外波段, 直接从 GaN 基 VECSEL 中获得紫外光输出仍是一个亟待突破的难题。2000 年, Zhou 等^[57]利用三倍频锁模 355 nm Nd:YAG 激光器为抽运源, 采用 GaN/AlGaIn 和 SiO₂/HfO₂ DBR 形成谐振腔, 获得了室温准连续条件下 InGaIn/GaN VECSEL 的 383 nm 的紫外光, 输出功率为 3 mW。

综上所述, 面发射半导体激光器通过直接激发已可使输出波长覆盖从深紫外到数微米红外的波长范围。其中 1 μm 波段研究较为成熟, 在该波段 VCSEL 单管最高输出功率达 5.5 W, 阵列输出功率达 100 kW; EP-VECSEL 单管最高输出功率超过 9 W, 阵列输出达 42 W; OP-VECSEL 单管最高输出功率 106 W, 单频最高输出功率 23.6 W。另外, 其突出的高转换效率也为面发射半导体增彩不少, VCSEL 的转换效率最高可达 63.4%。OP-VECSEL 转换效率也高达 50%。

4 应用

通过激光技术可以扩展面发射半导体激光器的应用, 将其优点发挥到极致。利用偏硼酸钡(BBO)、三硼酸锂(LBO)、磷酸氧钛钾(KTP)等非线性晶体进行变频可得到更短波长的激光输出, 进一步扩展波长范围; 半导体增益片具有数十纳米的增益带宽, 扩展腔结构亦可方便地插入滤波元件和调谐元件, 获得单频和可调谐激光输出; 半导体可饱和吸收镜(SESAM)被动锁模和克尔透镜锁模可以获得飞秒

级超短脉冲, 同时具有高重复频率, 这些技术使面发射激光器有更为广阔的应用前景。

红外波段的 808 和 980 nm 着重于高功率面阵的研究, 用于抽运掺铒的光纤放大器和端面抽运 Nd:YAG、Nd:YVO₄ 等固体激光器以及红外照明、成像等应用^[11]。另外, Watkins 等研制的单频窄线宽 780、795 和 850 nm VCSEL^[13]可用于原子钟及其相关领域, 如基于原子钟新型传感器等。980 nm EP-VECSEL^[58]使用 SESAM 被动锁模已经获得了 2.5 ps 脉宽的激光输出, 其平均功率为 53.2 mW、峰值功率为 4.73 W、重复频率为 18.2 GHz, 均为目前 EP-VECSEL 锁模的最高水平。980 nm OP-VECSEL^[59]利用 InGaAs 增益芯片的克尔透镜效应锁模得到了脉宽为 930 fs、重复频率为 210 MHz 和峰值功率为 6.8 kW 的激光输出, 为目前 OP-VECSEL 超短脉冲最高的峰值功率, 可应用于光通信和光时钟领域。

1 μm 激光的超短脉冲, 通过 SESAM 锁模脉冲宽度已经缩短至 60 fs^[60], 重复频率高达 175 GHz^[61], 平均功率提高到 6.4 W^[62], 峰值功率亦提高到 4.35 kW^[63]。使用碳纳米管可饱和吸收镜(GSAM)锁模, Husaini 等^[64]获得了脉宽为 353 fs、脉冲能量为 2.8 nJ、平均功率为 10 W 的 1030 nm 输出, 为目前超短脉冲最高的平均功率。在高速计算系统和计量学等领域、光时钟、频率转换、高速电光采样、时间分辨光谱学等占有一席之地。近几年, M Squared Laser 公司成功地实现了输出波长范围 920~1050 nm 的锁模 VECSEL 的商业化应用, 为日渐兴起的非线性显微镜市场提供了一种低成本、易操作的激光光源。2016 年, Lubeigt 等^[65]再次实现了脉冲 130 fs 以下, 重复频率为 200 MHz、平均功率为 0.85 W 的锁模 OP-VECSEL, 有望代替钛宝石超快激光器在非线性的应用。2017 年, Scheller 等^[66]报道了产生 1012 和 1015 nm 的双波长 OP-VECSEL, 可用于差频产生太赫兹光源。图 5 是常用的 2 种 SESAM 被动锁模腔型, 激光的一个端镜为耦合输出镜, 另外一个端镜是被动锁模元件 SESAM。图 5(a)所示的 V 型腔通过移动耦合输出镜和 SESAM 的位置改变增益介质和 SESAM 上激光模式大小的比例, 获得可调节的脉宽输出, 图 5(b)所示的 Z 型腔则具有更稳定的锁模输出^[67]。

近红外波段中有三个石英光纤的低损窗口, 850 nm 是第一个低损窗口, 主要用于短距离的高速

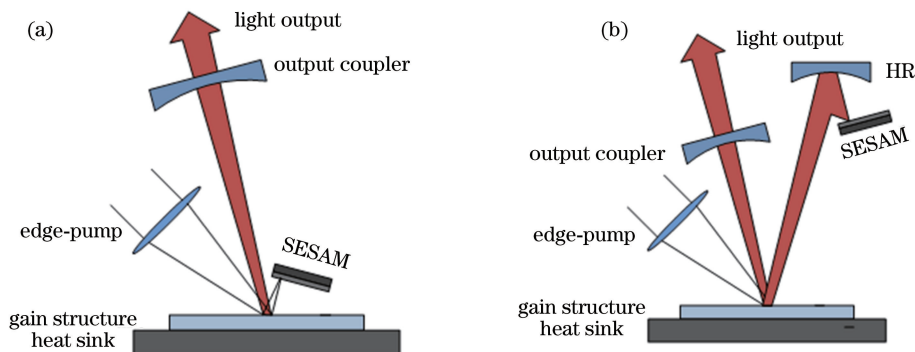


图 5 OP-VECSEL SESAM 被动锁模示意图。(a) V 型腔;(b) Z 型腔

Fig. 5 Schematic of the passively mode-locked OP-VECSEL. (a) V-shaped cavity; (b) Z-shaped cavity

数据通讯和光互连;1330 nm 是第二个低损窗口;而 1550 nm 是第三个低损窗口,也是损耗最低的一个窗口。因此,1310 nm 和 1550 nm VCSEL 分别用于中距离和远距离高速数据通讯和光互连、光并行处理、光识别系统等。目前,850 nm VCSEL 设备的传输速度可达 $160 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[68]。1.3 μm VCSEL 设备的传输速度可达到 $25 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[69],1.5 μm VCSEL 设备的传输速度可达 $56 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[70]。2011 年,Gierl 等^[71]利用微机械技术(MEMS)进行调谐首次报道了 1550 nm 波段可调谐范围 $>100 \text{ nm}$ 的单模输出,刷新了之前 1550 nm 最宽可调谐范围 65 nm 的记录^[72]。2012 年,Jayaraman 等^[73]报道了在 InP 1310 nm VCSEL 中利用 MEMS 技术获得了 150 nm 的连续可调范围,该器件在其整个调谐范围内扫描速度高达 500 kHz,可用做光学相干断层扫描和高速瞬态光谱扫描的光源。

1.68 μm 与 1.80 μm 波长和 2~2.5 μm 波段主要用于环境监测。前者可分别用于甲烷和水的气体检测。后者对大气中的污染物,如 CH_4 、 CO 、 NO_2 、 H_2 、 CO 等有强烈的吸收谱线,可用于天然气探测和大气环境监测,但是 CO_2 和 H_2O 对其吸收率很低,因此可以对样品进行光谱分析从而确定其成分组成^[74]。2009 年,Harkonen^[75]使用 980 nm 光源采用典型的 V 型腔结构抽运 GaSb VECSEL,获得了 4 W 的 2 μm 激光输出,并使用腔内双折射滤光片实现了 156 nm 可调谐范围。这是 OP-VECSEL 可获得的最宽的调谐范围。Solus Technologies 公司开发了一种中红外 1.9~2.5 μm 波长范围窄线宽激光光源,适用于气体传感器和分子光谱学^[76]。2.5~5 μm 中红外波段可基于分子振动的模式作气体痕量分析,因此可以用于环境检测、高速排气分析、化学反应控制等领域。

可见光波段激光可用于激光显示、激光照明、激光高密度存储和激光打印等领域。由于直接从材料中激发获得高功率输出不易,更多的通过外腔变频方法获得。EP-VECSEL 利用 PPLN 晶体倍频获得了 4.7 W 的 531 nm 绿光输出^[4,77]。美国相干公司^[37]在 InGaAs/GaAs OP-VECSEL 中通过 LBO 晶体腔内倍频得到 15 W 的 488 nm 和 5 W 的 460 nm 倍频蓝光输出,是目前报道的蓝光最高输出功率。和传统的 780 nm 半导体激光器相比,倍频蓝光 VECSEL 具有波长短和光束质量好的优点,使聚焦光斑更小,可有效提高存储密度,从而提高存储的容量。另外,488 nm 激光器还可用于流式细胞计来提高人类疾病的诊断准确率。2007 年,Hunziker 等^[78]使用 LBO 倍频研制的绿光 OP-VECSEL,基模绿光最大输出 11.5 W。为了提高功率他们使用两片芯片,成功获得了 24 W 的 531 nm 输出。随后,采用三个 InGaAs/GaAs VECSEL 芯片在腔内进行串接及腔内倍频的方式,获得了 532 nm 绿光基模输出达 55 W,高阶模输出达 66 W,这是目前绿光输出的最高功率^[79]。该公司还利用 OP-VECSEL 腔内倍频后得到的蓝光和绿光,与二极管激光器提供的红光相结合,构成三基色光源,成功用于激光显示^[80],该光源体积小、成本低、集成度高,是激光显示领域很有竞争力的光源。基于 530 nm 绿光 OP-VECSEL 的小型犯罪侦查成像系统,可以有效减小相机的光圈,从而获得足够大的景深,可用于检测犯罪现场的指纹、痕迹等证据。

Rautiainen 等^[81]在利用 1 μm 波段倍频获得黄红光(580~620 nm)方面进行研究,获得了目前最高连续输出功率的黄光和红光。在研究中发现,GaInAs 中掺入 N 可以有效的减少 GaInAs 的晶格应力,获得 1.1~1.5 μm 波段的激光输出,以便于倍

频获得黄红光。而利用 LBO 晶体倍频获得了 20 W 连续 588 nm 输出,为目前黄光输出的最高功率,展示了黄光 VECSEL 在医疗领域的巨大潜力,可为视网膜病变等眼科疾病提供有效的治疗^[82]。另外, Hessenius 等^[83]利用标准具调谐和 LBO 晶体倍频获得了可调谐单频黄光输出,调谐波长可覆盖钠 D2 线(588.991 nm)和 D1 线(589.595 nm),是钠导星优质光源。2015 年, Kantola 等^[84]通过控制 0.5% 掺 N 量获得了 1230 nm 激光输出,并通过 LBO 倍频获得了 10.5 W 的 615 nm 连续激光输出,这是目前通过倍频可获得红光的最高功率。在测量和非接触检测系统等领域凭借良好的光束质量,可简化准直光学系统,提高分辨率。与适当染料耦合,是共焦显微镜在生物观测领域的潜在竞争对手。

紫外波段在生物医学、原子捕获、光谱学、激光光刻、激光高密度存储等领域有重要的应用。目前,由红光倍频获得紫外光已获得数百毫瓦的功率输出。2015 年, Baumgärtner 等^[55]在应力补偿研制的红光 OP-VECSEL 中,利用 BBO 晶体倍频获得了 429 mW 的 331.6 nm 紫外光输出。而 Mateo 等^[56]利用多程量子阱抽运 OP-VECSEL 产生的 665 nm 红光倍频,获得了 820 mW 的 333 nm 紫外光输出,这是目前紫外波段可达到的最高功率。2017 年, Yakshin 等^[85]在 InGaAs VECSEL 获得了 936 nm 的基频光输出,通过四次倍频获得 190 mW 的 234 nm 的深紫外输出,是目前可获得的最短波长。

5 结束语

经过 40 年的发展,面发射半导体激光器技术和应用已经取得了显著成果,其未来发展有以下方面: 1) 更高输出功率; 2) 扩展输出波长; 3) 高度集成化。

可以通过 4 个方面提高功率输出: 1) 增加抽运尺寸,同时控制腔内的放大自发发射,减少增益损耗^[86]。2) 进一步改善热管理,如使用导热性高的金刚石散热片和热沉^[50],利用脉冲抽运^[87],设计和制造双散热结构^[88],低热阻半导体结构等等。通过以上方法,VCSEL 和 OP-VECSEL 单管输出功率有望增加到数十瓦和数百瓦水平并保持优良的光束质量。3) 使用多个增益芯片(目前最多有三个芯片),同时增加增益芯片面积。4) 激光合束,可通过相干合束和非相干合束来获得,同时可保持优异的光束质量^[89]。

扩展波长可通过以下方式实现: 1) 使用现有的

半导体材料系统,找到合适的抽运源和抽运方式获得新波长,如 GaN 材料系统直接激发的蓝光^[90-91],若能同时具有高功率和良好的光束质量将获得诸多应用。然而,合适的抽运光源并不容易获得。2) 通过使用新型材料系统或新型非线性光学技术获得新的波长。各种非线性光学频率转换可扩大波长的范围;腔内倍频、三倍和四倍、和频产生,双波长激光器差频产生等^[92-93],将波长扩展到 200 nm 以下的深紫外和 5 μm 以上的中红外波段,以此来填补现有波长的空白区域。

高度集成化是指在一个半导体衬底上整合多个功能块。例如抽运源、可饱和吸收镜等器件,抽运源与 VECSEL 增益结构的集成已有相关报道^[94]。这种集成抽运的 VECSEL 可降低器件组装难度,易于制造大功率激光器,从而降低设备成本并扩大激光器的潜在市场。功能组件集成的另一个例子是锁模集成外腔面发射激光器^[95],其中增益区和可饱和吸收区域集成在衬底上。通过这些方式,可以产生更加简单、紧凑、易于制造和便宜的设备,以及实现更好的性能和新颖的功能。未来发展功能集成可以帮助 VECSEL 在商业上得到更广泛的应用,特别是在低成本和大批量应用中,如移动投影显示器等领域。

总而言之,面发射半导体激光器正通过技术推动和市场拉动扩大其影响力。现有和正在开发的产品在市场推动下将刺激新商业的出现,例如数瓦级红、绿和蓝 VECSEL 用于激光投影仪。近期,苹果公司宣布 iPhone 8 即将采用 VCSEL 为其新的后置 3D 成像系统提供光源,可更快的实现摄像头对焦。此外,还能实现精准的深度映射,从而有助于在增强现实技术中的应用^[96]。紧凑、高效和高性能的可定制波长的激光器将会扩大现有商业应用中的使用,VCSEL 将会在某些应用领域替代现有激光技术。如可输出蓝光和绿光的 Ar 离子气体激光器,在过去是共焦荧光显微镜和抽运钛宝石的唯一激光源,后来在很大程度上被全固态激光器取代,而由于 VCSEL 波长可调谐、功率高、光束质量高,加之器件结构紧凑、效率高、可靠性高,逐渐取代固态激光器。VCSEL 将在新型科学应用(如分子光谱学、激光陀螺仪、微波光子学和原子钟等)得到更加广泛地应用。

参 考 文 献

- [1] Hua L L, Yang Y. Characteristics and development of optically pumped vertical external cavity surface emitting lasers [J]. Material Review A: Review,

- 2013, 27(11): 64-69.
华玲玲, 杨阳. 光泵浦垂直外腔面发射激光器特性及研究进展[J]. 材料导报 A: 综述篇, 2013, 27(11): 64-69.
- [2] Soda H, Iga K, Kitahara C, *et al.* GaInAsP/InP surface emitting injection lasers[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1979, 18(12): 2329-2330.
- [3] Zhou D L, Seurin J F, Xu G Y, *et al.* Progress on high-power, high-brightness VCSELs and applications[C]. SPIE, 2015, 9381: 93810B.
- [4] Zhao P, Xu B, van Leeuwen R, *et al.* Compact 4.7 W, 18.3% wall-plug efficiency green laser based on an electrically pumped VECSEL using intracavity frequency doubling [J]. Optics Letters, 2014, 39(16): 4766-4768.
- [5] Kuznetsov M, Hakimi F, Sprague R, *et al.* High power (>0.5 W CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM₀₀ beams [J]. IEEE Photonics Technology Letter, 1997, 9(8): 1063-1065.
- [6] Okhotnikov O G. Chapter 1: VECSEL semiconductor lasers: a path to high-power, quality beam and UV to IR wavelength by design [M]. New York: Wiley-VCH Verlag, 2010: 1-71.
- [7] Heinen B, Wang T L, Sparenberg M, *et al.* 106 W continuous-wave output power from vertical-external-cavity surface-emitting laser[J]. Electronics Letters, 2012, 48(9): 516-517.
- [8] Shi J J, Qin L, Ning Y Q, *et al.* 850 nm vertical cavity surface-emitting laser arrays [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(1): 17-23.
史晶晶, 秦莉, 宁永强, 等. 850 nm 垂直腔面发射激光器阵列[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 17-23.
- [9] Zhou D L, Seurin J F, Xu G Y, *et al.* Progress on vertical-cavity surface-emitting laser arrays for infrared illumination applications [C]. SPIE, 2014: 172-176.
- [10] Seurin J F, Xu G, Khalfin V, *et al.* Progress in high-power high-efficiency VCSEL arrays [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7229: 722903.
- [11] Photonics Media. PR-HPIL-4800-W808 VCSEL illuminator [EB/OL]. (2013-08-27) [2017-11-06] <https://www.photonics.com/Product.aspx?PID=5&VID=109&IID=722&PRID=54712>.
- [12] Princeton Optronics. 4 W 850 nm VCSEL array [EB/OL]. [2017-11-06] <http://www.princetonoptronics.com/wp-content/uploads/PCW-SMV-4-W0850-datasheet2.pdf>.
- [13] Watkins L, Ghosh C, Seurin J F, *et al.* High-power vertical-cavity surface-emitting lasers for atomic clock applications[J]. SPIE Newsroom, 2015.
- [14] D'Asaro L A, Seurin J F, Wynn J D. High-power, high-efficiency VCSELs pursue the goal [J]. Photonics Spectra, 2005, 39(2): 62-66.
- [15] Wang L J, Ning Y Q, Qin L, *et al.* Development of high power diode laser [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2015, 36(1): 1-19.
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.
- [16] Hou H Q, Choquette K D, Geib K M, *et al.* High-performance 1.06 μm selectively oxidized vertical-cavity surface-emitting lasers with InGaAs-GaAsP strain-compensated quantum wells [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(8): 1057-1059.
- [17] Kageyama T, Takaki K, Imai S, *et al.* High efficiency 1060nm VCSELs for low power consumption[C] // Proceedings of IEEE International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, 2009, 109: 391-396.
- [18] Boehm G, Ortsiefer M, Shau R, *et al.* InP-based VCSEL technology covering the wavelength range from 1.3 to 2.0 μm [J]. Journal of Crystal Growth, 2003, 251(1): 748-753.
- [19] Klem J F, Serkland D K, Geib K M. Advances in 1300 nm InGaAsN quantum well VCSELs [C]. SPIE, 2002, 4646: 137-144.
- [20] Nishida T, Takaya M, Kakinuma S, *et al.* 4.2 mW GaInNAs long-wavelength VCSEL grown by metalorganic chemical vapor deposition [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(5): 958-961.
- [21] Michalzik R. VCSELs: Fundamentals, technology and applications of vertical-cavity surface-emitting lasers[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2013: 353-377.
- [22] Omae K, Higuchi Y, Nakagawa K, *et al.* Improvement in lasing characteristics of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers fabricated using a GaN Substrate[J]. Applied Physics Express, 2009, 2(5): 052101.
- [23] Kasahara D, Morita D, Kosugi T, *et al.* Demonstration of blue and green GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers by current injection at room temperature [J]. Applied Physics Express, 2011, 4(7): 072103.
- [24] Hamaguchi T, Fuutagawa N, Izumi S, *et al.*

- Milliwatt-class GaN-based blue vertical-cavity surface-emitting lasers fabricated by epitaxial lateral overgrowth [J]. *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, 2016, 213(5): 1170-1176.
- [25] Johnson K, Hibbs-Brenner M. High output power 670 nm VCSELs [C]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6484: 648404.
- [26] Seurin J F, Khalfin V, Xu G Y, *et al.* High-power red VCSEL arrays [C]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8639: 86390O.
- [27] McInerney J G, Mooradian A, Lewis A, *et al.* High-power surface emitting semiconductor laser with extended vertical compound cavity [J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(6): 523-525.
- [28] Shchegrov A V, Umbrasas A, Watson J P, *et al.* 532 nm laser sources based on intracavity frequency doubling of extended-cavity surface-emitting diode lasers [C]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5332: 151-156.
- [29] Watson J, Shchegrov A, Umbrasas A, *et al.* Laser sources at 460 nm based on intracavity doubling of extended-cavity surface-emitting lasers [C]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5364: 116-121.
- [30] Leeuwen R V, Seurin J F, Xu G Y, *et al.* High power pulsed intracavity frequency doubled vertical extended cavity blue laser arrays [C]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7193: 71931D.
- [31] Zhang L S. Structure design and fabrication of high power vertical cavity surface emitting laser [D]. Changchun : Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2012.
张立森. 大功率垂直腔面发射激光器的结构设计与研制 [D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2012.
- [32] Kurdi M E, Bouchoule S, Bousseksou A, *et al.* Room-temperature continuous-wave laser operation of electrically-pumped 1.55 μm VECSEL [J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(11): 671-672.
- [33] Bousseksou A, Bouchoule S, Kurdi M E, *et al.* Fabrication and characterization of 1.55 μm single transverse mode large diameter electrically pumped VECSEL [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2006, 38(15): 1269-1278.
- [34] Härkönen A, Bachmann A, Arafin S, *et al.* 2.34 μm electrically pumped VECSEL with buried tunnel junction [C]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7720: 772015.
- [35] Zhang W, Ackemann T, McGinily S, *et al.* Operation of an optical in-well pumped vertical-external-cavity surface-emitting laser [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(29): 7729-7735.
- [36] Beyertt S S, Brauch U, Demaria F, *et al.* Efficient gallium-arsenide disk laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2007, 43(10): 869-875.
- [37] Chilla J L A, Butterworth S D, Zeitschel A, *et al.* High power optically pumped semiconductor lasers [C]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5332: 143-150.
- [38] Rudin B, Rutz A, Hoffmann M, *et al.* Highly efficient optically pumped vertical-emitting semiconductor laser with more than 20 W average output power in a fundamental transverse mode [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(22): 2719-2721.
- [39] Lee J H, Kim J Y, Lee S M, *et al.* 9.1 W High-efficient continuous-wave end-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(20): 2117-2119.
- [40] Zhang F, Heinen B, Wichmann M, *et al.* A 23 watt single-frequency vertical-external-cavity surface-emitting laser [J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 12817-12822.
- [41] Kantola E, Leinonen T, Ranta S, *et al.* 1180 nm VECSEL with 50 W output power [C]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9349: 93490U.
- [42] Leinonen T, Iakovlev V, Sirbu A, *et al.* 33 W continuous output power semiconductor disk laser emitting at 1275 nm [J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 7008-7013.
- [43] Lyytikäinen J, Rautiainen J, Toikkanen L, *et al.* 1.3 μm optically-pumped semiconductor disk laser by wafer fusion [J]. *Optics Express*, 2009, 17(11): 9047-9052.
- [44] Rautiainen J, Lyytikäinen J, Sirbu A, *et al.* 2.6 W optically-pumped semiconductor disk laser operating at 1.57 μm using wafer fusion [J]. *Optics Express*, 2008, 16(26): 21881-21886.
- [45] Rantamäki A, Rautiainen J, Sirbu A, *et al.* 1.56 μm 1 watt single frequency semiconductor disk laser [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 2355-2360.
- [46] Lyytikäinen J, Rautiainen J, Sirbu A, *et al.* High-power 1.48 μm wafer-fused optically pumped semiconductor disk laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(13): 917-919.
- [47] Sirbu A, Rantamäki A, Saarinen E J, *et al.* High

- performance wafer-fused semiconductor disk lasers emitting in the 1300 nm waveband [J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 29398-29403.
- [48] Hopkins J M, Hempler N, Rösener B, *et al.* High-power, (AlGaIn)(AsSb) semiconductor disk laser at 2.0 μm [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(2): 201-203.
- [49] Holl P, Rattunde M, Adler S, *et al.* Recent advances in power scaling of GaSb-based semiconductor disk lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(6): 1501012.
- [50] Holl P, Rattunde M, Adler S, *et al.* GaSb-based VECSEL for high-power applications and Ho-pumping[C]. *SPIE*, 2017, 10087: 1008705.
- [51] Ishida A, Sugiyama Y, Isaji Y, *et al.* 2 W high efficiency PbS mid-infrared surface emitting laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(12): 121109.
- [52] Khiar A, Volobuev V, Witzan M, *et al.* In-well pumped mid-infrared PbTe/CdTe quantum well vertical external cavity surface emitting lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(23): 231105.
- [53] Rahim M, Felder F, Fill M, *et al.* Optically pumped 5 μm IV-VI VECSEL with Al-heat spreader [J]. *Optics Letters*, 33(24): 3010-3012.
- [54] Debusmann R, Brauch U, Hoffmann V, *et al.* Spacer and well pumping of InGaN vertical cavity semiconductor lasers with varying number of quantum wells[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(3): 033110.
- [55] Baumgärtner S, Kahle H, Bek R, *et al.* Comparison of AlGaInP-VECSEL gain structures[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2015, 414: 219-222.
- [56] Mateo C M N, Brauch U, Kahle H, *et al.* 2.5 W continuous wave output at 665 nm from a multipass and quantum-well-pumped AlGaInP vertical-external-cavity surface-emitting laser [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(6): 1245-1248.
- [57] Zhou H L, Diagne M, Makarona E, *et al.* Near ultraviolet optically pumped vertical cavity laser[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(21): 1777-1779.
- [58] Zaugg C A, Gronenborn S, Moench H, *et al.* Absorber and gain chip optimization to improve performance from a passively modelocked electrically pumped vertical external cavity surface emitting laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(12): 121115.
- [59] Kornaszewski L, Maker G, Malcolm G P A, *et al.* SESAM-free mode-locked semiconductor disk laser [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(6): 20-23.
- [60] Quarterman A H, Wilcox K G, Apostolopoulos V, *et al.* A passively mode-locked external-cavity semiconductor laser emitting 60 fs pulses[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3: 729-731.
- [61] Wilcox K G, Quarterman A H, Apostolopoulos V, *et al.* 175 GHz, 400 fs-pulse harmonically mode-locked surface emitting semiconductor laser [J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7040-7045.
- [62] Rudin B, Wittwer V J, Maas D J H C, *et al.* High-power MIXSEL: an integrated ultrafast semiconductor laser with 6.4 W average power[J]. *Optics Express*, 2010; 18(26): 27582-27588.
- [63] Wilcox K G, Tropper A C, Beere H E, *et al.* 4.35 kW peak power femtosecond pulse mode-locked VECSEL for supercontinuum generation[J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 1599-1605.
- [64] Husaini S, Bedford R G. Graphene saturable absorber for high power semiconductor disk laser mode-locking[J]. *Applied Physics Letter*, 2014, 104(16): 161107.
- [65] Lubeigt W, Bialkowski B, Lin J P, *et al.* Commercial mode-locked vertical external cavity surface emitting lasers [C]. *SPIE*, 2017, 10087: 100870D.
- [66] Scheller M, Baker C W, Koch S W, *et al.* High power dual-wavelength VECSEL based on a multiple folded cavity [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(10): 790-793.
- [67] Hoogland S, Dhanjal S, Tropper A C, *et al.* Passively mode-locked diode-pumped surface-emitting semiconductor laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(9): 1135-1137.
- [68] Kottke C, Caspar C, Jungnicke V, *et al.* High speed 160 Gb/s DMT VCSEL transmission using pre-equalization [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2017, W41: W41. 7.
- [69] Chen X, Hurley J, Stone J, *et al.* Universal fiber for both short-reach VCSEL transmission at 850 nm and single-mode transmission at 1310 nm[C]// *Proceedings of IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*, 2016.
- [70] Kuchta D M, Huynh T N, Doany F E, *et al.* Error-free 56 Gb/s NRZ modulation of a 1530 nm VCSEL link[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(14): 3275-3282.
- [71] Gierl C, Gruendl T, Debernardi P, *et al.* Surface

- micromachined tunable 1.55 μm -VCSEL with 102 nm continuous single-mode tuning [J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 17336-17343.
- [72] Matsui Y, Vakhshoori D, Wang P D, *et al.* Complete polarization mode control of long-wave length tunable vertical-cavity surface-emitting lasers over 65 nm tuning, up to 14 mW output power [J] *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, 39(9): 1037-1048.
- [73] Jayaraman V, Cole G D, Robertson M, *et al.* High-sweep-rate 1310 nm MEMS-VCSEL with 150 nm continuous tuning range [J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(14): 867-869.
- [74] Zong N, Li C M, Chen Y H, *et al.* Research and progress of optically pumped semiconductor vertical-external-cavity surface-emitting lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 785-789.
宗楠, 李成明, 陈亚辉, 等. 光泵垂直扩展腔面发射半导体激光器的研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(6): 785-789.
- [75] Harkonen A. Antimonide disk lasers achieve multiwatt power and a wide tuning range [J]. *SPIE Newsroom*, 2009.
- [76] Ouvrard A, Garnache A, Cerutti L, *et al.* Single-frequency tunable Sb-based VCSELs emitting at 2.3 μm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(10): 2020-2022.
- [77] Jiang L D, Zhang X H, Zhan X H, *et al.* Progress in frequency-doubled external-cavity surface-emitting laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(9): 090001.
蒋丽丹, 张晓华, 詹小红, 等. 倍频外腔面发射激光器研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(9): 090001.
- [78] Hunziker L E, Ihli C, Steingrube D S. Miniaturization and power scaling of fundamental mode optically pumped semiconductor lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics Quantum Electron*, 2007, 13(3): 610-618.
- [79] Chilla J, Shu Q Z, Zhou H L, *et al.* Recent advances in optically pumped semiconductor lasers [C]. *SPIE*, 2007, 6451: 645109.
- [80] Chilla J L A, Zhou H L, Weiss E, *et al.* Blue and green optically pumped semiconductor lasers for display [C]. *SPIE*, 2005, 5740: 41-47.
- [81] Rautiainen J, Härkönen A, Korpijärvi V M, *et al.* 2.7 W tunable orange-red GaInNAs semiconductor disk laser [J]. *Optics Express*, 2007, 15(26): 18345-18350.
- [82] Kantola E, Leinonen T, Ranta S, *et al.* High-efficiency 20 W yellow VECSEL [J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 6372-6380.
- [83] Hessenius C, Lukowski M, Moloney J, *et al.* Tunable single-frequency yellow laser for sodium guidestar applications [J]. *SPIE Newsroom*, 2012.
- [84] Kantola E, Leinonen T, Penttinen J P, *et al.* 615 nm GaInNAs VECSEL with output power above 10 W [J]. *Optics Express*, 2015, 23(16): 20280-20287.
- [85] Yakshin M, Hessenius C, Prasad C, *et al.* A compact, efficient deep UV optically pumped VECSEL [C]. *CLEO: Science and Innovations*, 2017: SM3M. 4.
- [86] Bedford R G, Kolesik M, Chilla J L A, *et al.* Power-limiting mechanisms in VECSELs [C]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5814: 199-208.
- [87] Zhang P, Dai T L, Liang Y P, *et al.* Optimization of pump pulses in a vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(4): 0402001.
张鹏, 戴特力, 梁一平, 等. 垂直外腔面发射激光器抽运脉冲的优化设计 [J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0402001.
- [88] Liu X N, Wang X H, Wang F, *et al.* Analysis of thermal characteristics in optically pumped semiconductor vertical-external-cavity surface-emitting laser with doubled heatspreader [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(9): 091404.
刘向南, 王晓华, 王菲, 等. 双散热片结构光抽运垂直外腔面发射激光器的热特性分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(9): 091404.
- [89] Kaneda Y, Fan L, Hsu T C, *et al.* High brightness spectral beam combination of high-power vertical-external-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(17): 1795-1797.
- [90] Park S H, Kim J, Jeon H, *et al.* Room-temperature GaN vertical-cavity surface-emitting laser operation in an extended cavity scheme [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(11): 2121-2123.
- [91] Park S H, Jeon H. Microchip-type InGaN vertical external-cavity surface-emitting laser [J]. *Optical Review*, 2006, 13(1): 20-23.
- [92] Leinonen T, Ranta S, Laakso A, *et al.* Dual-wavelength generation by vertical external cavity surface-emitting laser [J]. *Optics Express*, 2007, 15

- (20): 13451-13456.
- [93] Leinonen T, Morozov Y A, Harkonen A, *et al.* Vertical external-cavity surface-emitting laser for dual-wavelength generation [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(12): 2508-2510.
- [94] Illek S, Albrecht T, Brick P, *et al.* Vertical-external-cavity surface-emitting laser with monolithically integrated pump lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(24): 1952-1954.
- [95] Maas D J H C, Bellancourt A R, Rudin B, *et al.* Vertical integration of ultrafast semiconductor lasers [J]. Applied Physics B, 2007, 88(4): 493-497.
- [96] 激光网. VCSEL 激光器市场爆发: 国内能否分一杯羹? [EB/OL]. (2017-08-17) [2018-1-3]. <http://laser.ofweek.com/2017-08/ART-240002-8420-30161487.html>.