

# 808 nm 垂直腔面发射激光器阵列抽运的全固态激光器研究进展

刘芳华<sup>1,2</sup>, 龚鑫<sup>1,2</sup>, 张雅楠<sup>1,2</sup>, 孟俊清<sup>1,2\*</sup>, 陈卫标<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 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)具有线宽窄、光束质量好、可靠性高和制造成本低等优点。随着 808 nm VCSEL 阵列的输出功率和转换效率的提高,VCSEL 阵列成为了固态激光器抽运源的新选择。介绍了 VCSEL 的性能优势、应用场合及发展现状,综述了 VCSEL 阵列抽运的固态激光器的研究进展,讨论了其技术缺陷及发展前景。

**关键词** 激光器;全固态激光器;垂直腔面发射激光器;高功率激光

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.120001

## Research Progress on 808 nm VCSEL-Array-Pumped Solid-State Lasers

Liu Fanghua<sup>1,2</sup>, Gong Xin<sup>1,2</sup>, Zhang Yanan<sup>1,2</sup>, Meng Junqing<sup>1,2\*</sup>, Chen Weibiao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** When compared with the traditional edge-emitting semiconductor lasers, the vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) offer several advantageous properties, including a narrow line width, superior beam quality, high reliability, and low manufacturing cost. Recently, with an increase in the output power and power conversion efficiency of the 808 nm VCSEL arrays, they have become an attractive alternative for the pumping sources of solid-state lasers. In this study, we introduce the performance advantages, applications, and status of the VCSELs. As for the VCSEL-array-pumped solid-state lasers, the research progress is reviewed, and the development prospect as well as their technical shortcomings are discussed.

**Key words** lasers; all-solid-state lasers; vertical-cavity surface-emitting lasers; high power laser

**OCIS codes** 140.3460; 140.3580; 140.7260

## 1 引言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有线宽窄、温漂系数小、可二维拓展等特点,已成为全固态激光器的新型抽运源<sup>[1]</sup>。与传统的边发射半导体激光二极管相比,VCSEL 具有以下更具吸引力的优点:更小的温漂特性( $0.07 \text{ nm} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )(边发射激光二极管的温漂系数为  $0.3 \text{ nm} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1[2]}$ );出射光束为低发散度的圆对称光束,易于耦合<sup>[3]</sup>;制造工艺简单,成本低

廉<sup>[4]</sup>;可在二维平面任意拓展集成,以实现高功率激光输出<sup>[5]</sup>;电光效率高;可靠性更好<sup>[6]</sup>;高功率工作时不会产生光学损伤<sup>[7]</sup>。近年来,808 nm 的 VCSEL 取得突破性进展,VCSEL 阵列的输出功率和能量得到显著提高,通过制造大尺寸的二维平面阵列,输出功率可达几百瓦甚至几千瓦,并且具有很高的电光转换效率,其电光转换效率通常高于 42%。因此,VCSEL 阵列可以替代传统的边发射激光二极管巴条,作为全固态激光器的抽运源,例如用

收稿日期: 2018-12-04; 修回日期: 2018-12-21; 录用日期: 2019-01-09

\* E-mail: jqmeng@siom.ac.cn

于抽运掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)调Q激光器经倍频产生蓝绿激光,以应用于水下通信以及空间激光雷达探测<sup>[8]</sup>。高功率VCSEL阵列特别适用于构建结构紧凑的固态激光器,有利于实现固态激光器的小型化以适应各个场景需求。激光器在空间应用情形中,空间环境温度变化迅速,昼夜温差大,因此器件需要适应较大的温度变化范围,由于边发射激光二极管对温度非常灵敏,而激光二极管的波长与激光介质吸收峰的匹配程度直接影响到激光器的输出能量,因此需要复杂的温控系统<sup>[9]</sup>。而VCSEL的温漂系数只有边发射激光二极管的五分之一,输出波长对温度的变化不敏感;面发射的结构使其可长时间运转而不致光学损伤,满足可靠性要求;因此可在未来取代边发射激光二极管作为空间应用激光器的抽运源。

鉴于VCSEL阵列抽运的固态激光器的诸多优势,主要介绍了808 nm VCSEL的国内外发展状况,以及利用808 nm VCSEL阵列抽运的全固态激光器的研究进展,并对比分析相关的技术特点和关键问题。

## 2 808 nm 垂直腔面发射激光器的发展现状

垂直腔面发射激光器的概念最早由日本东京工业大学的伊贺教授于1977年提出,两年后,Soda等<sup>[10]</sup>在77 K温度下首次制成VCSEL。1984年,Iga等<sup>[11]</sup>实现了在室温下制得砷化铝镓/砷化镓(AlGaAs/GaAs)面射型激光器,自此,VCSEL的研究进入飞速发展期。VCSEL的研究主要集中在850 nm和980 nm两个波长,850 nm波长的VCSEL多用于中短距离光互联领域<sup>[12]</sup>,980 nm波长的VCSEL主要用于抽运掺铒光纤放大器<sup>[13]</sup>,许多研究单位和公司都发布了自己研究成果及商业产品,电光转换效率都高达50%以上<sup>[14]</sup>。而近些年,对于适用于抽运固态激光器的808 nm波长VCSEL的研究才实现技术突破,这是因为衬底材料GaAs在808 nm处有强烈的吸收,传统的底发射VCSEL结构不再适用,而需要高效率的散热方式<sup>[15]</sup>。

808 nm的VCSEL首次由Summers等<sup>[16]</sup>在1999年提出,该VCSEL的发光直径为10  $\mu\text{m}$ ,中心波长为810.5 nm,在工作电流为70 mA时获得了最大功率为4 mW的输出。在2004年,ULM photonics公司的Grabherr等<sup>[17]</sup>设计了发光直径为

25  $\mu\text{m}$ 的单管VCSEL,其输出功率为25 mW,中心波长为808 nm,电光转换效率为25%,并首次展望了808 nm VCSEL集成大面积二维阵列,从而能够获得大功率输出。2009年,Princeton Optronics公司的Seurin等<sup>[15]</sup>改变了传统的底发射VCSEL结构,将衬底完全去除后焊接在金刚石热沉上,实现了808 nm顶发射的VCSEL阵列,尺寸为5 mm  $\times$  5 mm,集成了10000个VCSEL发光单元,连续输出功率超过120 W,最大电光转换效率为42%,非常适用于抽运固态激光器。此后Princeton Optronics公司生产的808 nm高功率VCSEL阵列不断推陈出新,在2011年,该公司使用12块2.7 mm  $\times$  2.7 mm的VCSEL阵列组成抽运模块,中心波长为808.4 nm,在80 A驱动电流下,准连续输出功率可以达到500 W,电光转换效率为44%<sup>[18]</sup>,之后,该公司又将该抽运模块的输出功率提高到1.2 kW<sup>[19]</sup>。2012年,该公司设计了可以用于端面抽运的VCSEL圆型阵列,在驱动电流为220 A、脉宽为250  $\mu\text{s}$ 、重复频率为70 Hz时,抽运模块峰值输出功率为810 W<sup>[20]</sup>。2014年,该公司将氧化铍(BeO)代替金刚石作为热沉,得到2 mm  $\times$  2 mm的808 nm VCSEL阵列平均输出功率为6 W,电光转换效率为42%<sup>[8]</sup>。在2017年,该公司又设计制作了抽运峰值功率高达2.3 kW的VCSEL阵列<sup>[21]</sup>。

国内对于808 nm VCSEL的研究主要集中在有源区材料的理论设计和大口径的单管VCSEL制造两方面。2011年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的Zhang等<sup>[22-23]</sup>对808 nm的VCSEL材料与结构进行了详细的设计,并制备了单管发光直径为70  $\mu\text{m}$ 的VCSEL并组成2  $\times$  2的阵列<sup>[24]</sup>,在注入电流为2.6 A时得到最大输出功率为115 mW,中心波长为808.7 nm,并于2014年对该结构进行优化,制备了单管发光直径为60  $\mu\text{m}$ 的VCSEL并组成2  $\times$  2的阵列<sup>[25]</sup>,在注入电流为110 A、重复频率为100 Hz时,获得最大峰值功率为30 W的输出,中心波长为808.38 nm。长春理工大学Hao等<sup>[26]</sup>在2011年制备了出光直径为300  $\mu\text{m}$ 的808 nm VCSEL,最大连续输出功率为0.3 W,中心波长为803.3 nm,接着又在2015年制备了出光直径为500  $\mu\text{m}$ 的808 nm VCSEL<sup>[27]</sup>,注入电流为1.3 A时,输出功率为0.42 W,中心波长为803.32 nm。国内在单管808 nm VCSEL的研究上具有一定进展,但是大尺寸、大功率的808 nm二

维 VCSEL 阵列设计制造未见报道,制造工艺与国际同行尚有差距。

综上,随着国内外半导体激光器制造工艺的进步,808 nm VCSEL 阵列正在朝着大尺寸、高功率、高功率密度的方向发展,也将越来越适合用作全固态激光器的抽运光源,应用在科研和商业领域。

### 3 808 nm VCSEL 阵列抽运的全固态激光器研究进展

#### 3.1 VCSEL 端面抽运的固态激光器研究进展

早期的 808 nm VCSEL 单管输出功率低,只有毫瓦量级,中心波长相对 808 nm 有所偏移,在抽运固态激光器方面常采用受激发射截面大、吸收谱线宽、激光阈值相对较低的掺钕钒酸钇(Nd:YVO<sub>4</sub>)晶体作为增益介质<sup>[28]</sup>,单管 VCSEL 发光直径通常只有 10~50 μm,可用于端面抽运微片激光器。2001 年,卡迪夫威尔士大学的 Wu 等<sup>[29]</sup>利用 VCSEL 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 微片晶体,实现了低阈值、高斯光斑输出,功率为 8 μW。2002 年,台湾交通大学的 Lan 等<sup>[30]</sup>使用同样的腔结构,实现了 1.2 mW 的 TEM<sub>00</sub> 基模激光输出,并发现 VCSEL 在较高注入电流下的中心波长会发生偏移,导致激光器输出功率下降。2013 年,长春理工大学大学的 Hao 等<sup>[31]</sup>利用自主研制的大口径 808 nm VCSEL 端面抽运 Nd:GdVO<sub>4</sub> 微片晶体,获得了峰值功率 0.754 W 的 1064 nm 激光输出。

随着 Princeton Optronics 公司在制造 808 nm 二维 VCSEL 阵列技术上的突破,一块 5 mm ×

5 mm 的二维 VCSEL 阵列可以实现百瓦级的功率输出,中心波长为 808 nm,谱线宽度小于 1 nm,非常适合于抽运机械特性好、导热率高、光学质量好的 Nd:YAG 晶体。表 1 为 VCSEL 阵列端面抽运固态激光器研究进展。2011 年,美国陆军夜视和电子传感器理事会(RDECOM CERDEC)利用 4 块 Princeton Optronics 公司生产的 2.7 mm × 2.7 mm VCSEL 阵列组成抽运源,经过聚焦透镜会聚端面抽运 Nd:YAG 圆棒,采用被动调 Q 的方式,调节 VCSEL 阵列的工作电流在 80~170 A 范围内变化,实现了单脉冲能量 9~18 mJ 的功率输出,这是由于工作电流变化使得 VCSEL 阵列发散角改变<sup>[32]</sup>,输出脉冲重复频率为 5 Hz。2012 年,Princeton Optronics 公司又设计了用于端面抽运固态激光器的 808 nm 圆形 VCSEL 阵列模块,圆形 VCSEL 抽运模块的结构及特性如图 1 所示<sup>[33]</sup>。利用该抽运模块端面抽运 Nd:YAG 晶体,采用被动调 Q 方式,获得了单脉冲能量为 18 mJ、重复频率为 4 Hz 的 1064 nm 激光输出,通过倍频晶体获得了单脉冲能量为 10 mJ 的 532 nm 激光输出。同年,RDECOM CERDEC 也利用该模块端面抽运 Nd:YAG 晶体,采用被动调 Q 方式,获得了单脉冲能量为 22 mJ、重复频率为 5 Hz 的激光输出;而采用主动调 Q 方式时,获得了单脉冲能量为 35 mJ、重复频率为 5 Hz 的激光输出,通过磷酸钛氧钾(KTP)和三硼酸锂(LBO)晶体实现了 355 nm 激光输出,单脉冲能量为 7.5 mJ,转换效率为 21%,由此可见,采用主动调 Q 方式可以显著提高单脉冲能量<sup>[34]</sup>。

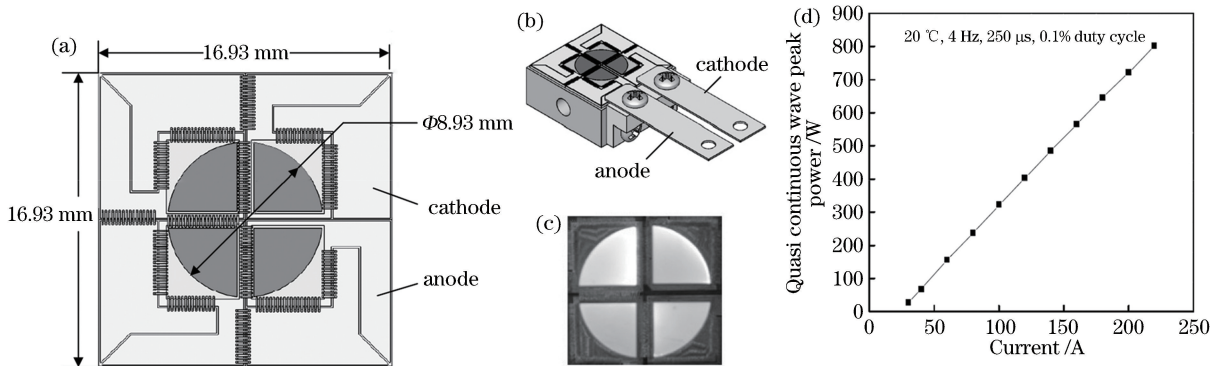


图 1 圆形 VCSEL 抽运模块的结构及特性。(a)抽运模块的结构及尺寸;(b)焊接在铜热沉上的抽运模块;(c)抽运模块的发光分布;(d)抽运模块的输出特性

Fig. 1 Structure and performance of circular VCSEL pump module. (a) Structure and dimension of pump module; (b) pump module mounted on Cu heat-sink; (c) light emission distribution of pump module; (d) output performance of pump module

在数学模型建立方面,曼尼托巴大学的 Alimohammadian 等<sup>[35]</sup>在 2014 年首次提出 VCSEL



阵列抽运的固态激光器理论模型,他们按照具体参数和能级速率方程建立了利用 VCSEL 阵列抽运的连续工作的固态激光器模型,其中 808 nm VCSEL 阵列使用的是 Princeton Optronics 公司提供的参数。在模型分析上,对比分析了 Nd:YAG 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 分别作为增益介质的输出特性,得出了 VCSEL 阵列连续状态工作情况下,Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的工作效率要优于 Nd:YAG 晶体的结论,具有一定的理论指导意义。

在实际应用方面,匹兹堡大学的 Li 等<sup>[36]</sup>在 2016 年研究设计了一种 VCSEL 端面抽运的结构紧凑、可

便携的主动调 Q 激光器,并用于激光诱导击穿光谱分析。在 2017 年,Princeton Optronics 公司为了提高端面抽运的固态激光器单脉冲能量以满足激光测距、激光诱导击穿光谱等应用场合,设计了一种水冷式 VCSEL 阵列端面抽运的 Nd:YAG 固体激光器<sup>[37]</sup>,单脉冲能量高达 47 mJ,水冷 VCSEL 抽运的被动调 Q 激光器封装图如图 2 所示,激光器的封装总长度为 13.8 cm,直径最大处为 2.7 cm,VCSEL 阵列在最大峰值功率为 2.39 kW 输出时,电光转换效率为 42.4%,此时得到了单脉冲能量为 47 mJ、重复频率为 15 Hz 的 1064 nm 激光输出,光光转换效率为 16.1%。

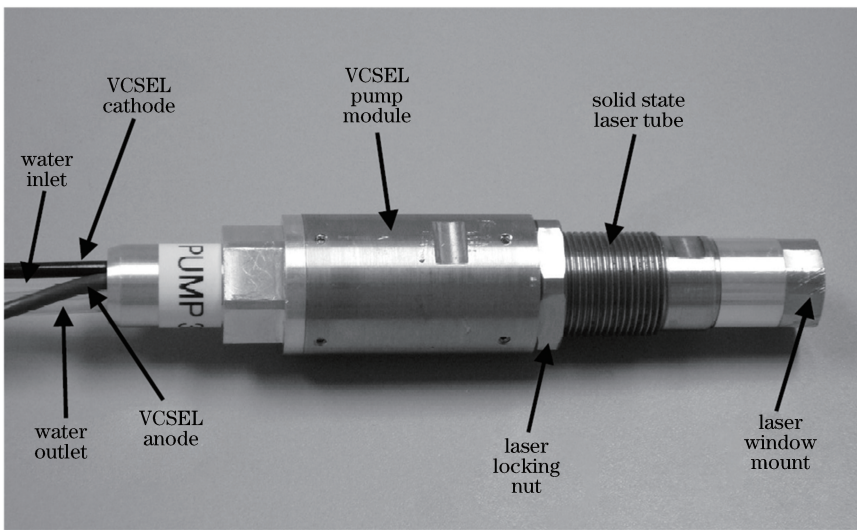


图 2 水冷 VCSEL 抽运的被动调 Q 激光器封装图

Fig. 2 Package drawing of water-cooled VCSEL-pumped passively Q-switched laser

808 nm VCSEL 端面抽运的固态激光器因具有结构紧凑、可便携性好、线宽窄、光束质量好等优点而被广泛应用于激光测距仪、激光指示器、激光诱导击穿光谱、红外成像、医学美容等领域。单管 VCSEL 由于具有发光直径小、出射光斑为圆形的特性,可以采用透镜聚焦直接用于端面抽运微片激光器。未来随着 VCSEL 发光直径的增大,微片激光器的输出功率也将提高。而对于 VCSEL 阵列,每个发光单元的数值孔径约为 0.15,直接使用透镜聚焦的效果差,不利于抽运增益介质。未来可利用 VCSEL 圆出射的特性,使用微透镜阵列对每个发光单元进行准直,更有利于对抽运光整形会聚,二维 VCSEL 阵列通过微透镜阵列耦合至光纤的示意图如图 3 所示<sup>[2]</sup>,使用这种方法,不仅降低了注入电流对 VCSEL 发散角的影响,还提高了抽运光功率密度和抽运效率。由于端面抽运的固态激光器具有单脉冲激光能量小的缺点,提高 VCSEL 的工作电流虽然可以提高输出功率,但是过高的工作电流会影

响 VCSEL 的发散角并导致中心波长红移,因此,在未来需要用更高功率密度和更高峰值功率的 808 nm VCSEL 阵列作为抽运源。

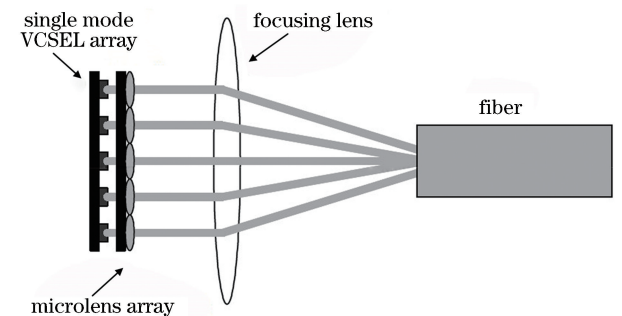


图 3 二维 VCSEL 阵列通过微透镜阵列耦合至光纤的示意图  
Fig. 3 Schematic of 2D VCSEL array coupled into fiber via microlens array

**3.2 VCSEL 阵列侧面抽运的固态激光器研究进展**  
VCSEL 阵列侧面抽运的固态激光器,相比于端面抽运的固态激光器,由于抽运面积大,抽运方式简单,装配要求低,增益晶体散热快,因此可采用大功

表1 VCSEL阵列端面抽运固态激光器研究进展

Table 1 Research progress on VCSEL- array end-pumped solid-state lasers

Research unit /year	Parameter	Output
U.S. Army RDECOM CERDEC <sup>[32]</sup> (2011)	Nd : YAG, end-pumped, passively Q-switched	18 mJ, 4.6 ns, 5 Hz @1064 nm
U.S. Army RDECOM CERDEC <sup>[34]</sup> (2012)	Nd : YAG, end-pumped, passively Q-switched Nd : YAG end-pumped, acousto-optic Q-switched	22 mJ, 1.4ns, 5 Hz @1064 nm 35 mJ, 7 ns, 5 Hz @1064 nm, 7.5 mJ, 5 Hz @355 nm 18 mJ, 4 Hz
Princeton Optronics <sup>[33]</sup> (2012)	Nd : YAG, end-pumped, passively Q-switched	@1064 nm 10 mJ, 4 Hz @532 nm
Princeton Optronics <sup>[38]</sup> (2012)	Nd : YAG, end-pumped, passively Q-switched	63 mJ @1064 nm
Princeton Optronics <sup>[20]</sup> (2012)	Nd : YAG, end-pumped	5.8 W, 100 Hz @1064 nm
Changchun University of Science and Technology <sup>[31]</sup> (2013)	Nd : GdVO <sub>4</sub> , end-pumped	0.754W, 606 Hz @1064 nm
University of Pittsburgh <sup>[36]</sup> (2016)	Nd : YAG end-pumped, actively Q-switched	12.9 mJ, 16 ns, 10 Hz @1064 nm
Princeton Optronics <sup>[37]</sup> (2017)	Nd : YAG, end-pumped, passively Q-switched	47 mJ, 15 Hz @1064 nm

率 VCSEL 阵列作为抽运源,从而实现高峰值功率、大能量的激光输出。目前,主要是 Princeton Optronics 公司在参与相关研究,该公司利用在 808 nm 二维 VCSEL 阵列的制造优势,使用了 12 块 3 mm×3 mm 尺寸的 VCSEL 阵列组成了大功率抽运模块,抽运模块实物图如图 4 所示,该模块中心波长为 808.4 nm,光谱宽度为 1.0 nm,功率可达几百瓦至千瓦级,可用于侧面抽运固态激光器<sup>[18]</sup>。

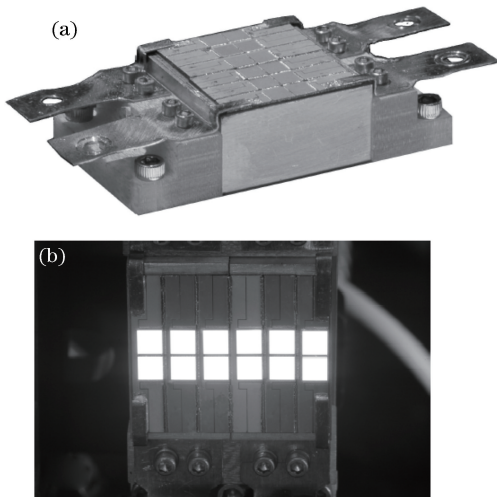


图4 抽运模块实物图。(a) VCSEL 阵列安装在 20 mm×20 mm 微型冷却器组件上;(b)抽运模块发射的均匀抽运光

Fig. 4 Picture of pump module. (a) VCSEL array mounted on 20 mm × 20 mm micro-cooler assembly; (b) uniform distribution of pump light from pump module

近年来,Princeton Optronics 公司致力于使用 VCSEL 阵列侧面抽运结构实现高重复频率、大脉冲

能量的蓝绿和紫外激光输出。他们利用图 3 所示的 VCSEL 阵列和柱透镜构成抽运模块,其中柱透镜对抽运光进行整形会聚,采用单侧面抽运、双侧面抽运等抽运方式抽运 Nd : YAG 晶体,采用被动调 Q、电光调 Q 等方式,获得了 1064, 532, 355, 266, 946, 473 nm 的激光输出,已被广泛应用于激光雷达、水下蓝绿激光通信、红外成像、激光显示、光盘存储等领域。表 2 为近年来 VCSEL 阵列侧面抽运固态激光器研究进展。

VCSEL 阵列侧面抽运的固态激光器虽然光束质量不如端面抽运,但在实现大能量输出方面更有优势。但是,现阶段 808 nm VCSEL 阵列存在功率密度不够和峰值功率低的问题,一块 5 mm×5 mm 的 VCSEL 阵列峰值功率密度为 4 kW·cm<sup>-2</sup>,而一块普通边发射二极管巴条的功率密度可达 20 kW·cm<sup>-2</sup>,因此 Princeton Optronics 公司通过组合多块 VCSEL 阵列再经透镜会聚,提高了抽运模块的功率密度,但是未来还需提高单块 VCSEL 阵列的功率密度与峰值功率,以提高 VCSEL 侧面抽运的固态激光器的功率输出。

### 3.3 可宽温度工作的 VCSEL 阵列抽运的固态激光器研究进展

半导体激光二极管抽运的固态激光器因具有结构紧凑、光束质量好、可靠性高等优点而被应用于激光测距、激光指示、激光雷达等领域。但在实际情形下,由于边发射二极管的抽运中心波长会随温度漂移,往往需要使用水冷和半导体制冷器(TEC)制冷等温控措施对抽运源精确控温,以获得稳定的激光输出。但是,这会导致固态激光器变得笨重,且

表2 VCSEL阵列侧面抽运固态激光器研究进展

Table 2 Research progress on VCSEL-array side-pumped solid-state lasers

Research unit /year	Parameter	Output
Princeton Optronics <sup>[18]</sup> (2011)	Nd : YAG, side-pumped, passively Q-switched	4.7 mJ, 4 ns @1064 nm, 2.5 mJ @532 nm, 0.8 mJ, 2.7ns @266 nm
	Nd : YAG, dual-side- pumped, acousto-optic Q-switched	12 mJ, 23 ns @946 nm, 5.6 mJ, 17 ns @473 nm
Princeton Optronics <sup>[33]</sup> (2012)	Nd : YAG, dual-side-pumped, acousto-optic Q-switch	21 mJ, 4 Hz @946 nm, 10 mJ, 4 Hz, 17 ns @473 nm
	Nd : YAG, dual-side-pumped, passively Q-switch	7 mJ, 40 Hz @1064 nm, 6.5 mJ, 10.9 ns, 240 Hz @1064 nm,
Princeton Optronics <sup>[20]</sup> (2012)	Nd : YAG, dual side-pumped, passively Q-switched	0.8mJ, 240 Hz @266 nm 8.34 W @1064 nm, 0.68 mJ,
	Nd : YAG, dual-side-pumped, acousto-optic Q-switched	10 ns, 1.3 KHz @266 nm 20.4 mJ, 300 Hz @946 nm
Princeton Optronics <sup>[39]</sup> (2013)	Nd : YAG, dual-side-pumped, acousto-optic Q-switched	20.4 mJ, 300 Hz @946 nm
	Nd : YAG, Three-VCSEL-array side-pumped, acousto-optic Q-switched	4.9 mJ, 210 Hz @473 nm, 3.2 mJ, 340 Hz @473 nm

无法应用于需要小型化、环境温度起伏较大的场合。研究人员通常采用多种波长激光二极管组合成抽运源<sup>[41]</sup>,以及优化增益介质结构<sup>[42]</sup>等方法提升固态激光器对边发射激光二极管波长漂移的不敏感性,从而实现无温控措施在一定温度范围内稳定输出,但是这些方法提升了功耗,降低了抽运效率。而VCSEL的温漂系数一般为 $0.07 \text{ nm} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,因此对温控的精度和要求都不高,非常适合于抽运在宽温度范围工作的固态激光器<sup>[43]</sup>。

2013年,RDECOM CERDEC利用VCSEL端面抽运Nd:YAG晶体,在 $10\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内实现了 $14\sim 17 \text{ mJ}$ 的激光输出,但是在实现 $355 \text{ nm}$ 激光输出时,温度的变化会改变非线性晶体的折射率,因此会导致实现和频输出的相位匹配角发生失谐,在被动转动非线性晶体实现相位匹配后,可获得 $1.4 \text{ mJ}$ 的紫外激光稳定输出<sup>[44]</sup>。由于VCSEL可在高温环境中工作,2013年,印度理工学院的Wintner等<sup>[45]</sup>提出使用VCSEL阵列抽运的固态激光器制作激光火花塞用于发动机点火,不仅使用寿命长久,还可以克服在低温环境中发动机无法点火的困难。得益于VCSEL低廉的成本,这种激光火花塞未来可广泛应用于商业领域。2016年,Princeton Optronics公司发现 $808 \text{ nm}$  VCSEL阵列的中心波长会随着温度的升高而产生红移;VCSEL的输出功率随着注入电流的升高而线性增大,但是,在注入电流过高时,VCSEL的输出功率增长平缓甚至下降;在工作温度升高时,VCSEL的输出功率会下降,VCSEL阵列在不同热沉温度下的输出特性如图5所示<sup>[43]</sup>。因

此,该公司依据环境温度的变化,被动地调节VCSEL的驱动电流,使得在 $25\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内,Nd:YAG晶体获得相同的吸收功率,激光器可以稳定工作产生重复频率为 $15 \text{ Hz}$ 、脉冲能量为 $18 \text{ mJ}$ 的 $1064 \text{ nm}$ 激光。该激光器采用TEC外加风冷式温控结构,采用端面抽运、被动调Q的方式使结构进一步小型化,非常适合应用于环境复杂多变及需要轻量化使用的场合。

中国科学院上海光学精密机械研究所也致力于研制可以在较宽温度范围内稳定工作的小型化固体激光器,以满足在空间环境应用的需求<sup>[46]</sup>。2013年,于真真等<sup>[47]</sup>利用VCSEL端面抽运Nd:YAG晶体制作了 $15\sim 35\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内稳定工作,可作为机载或者星载激光雷达的光源;2018年,陈思露等<sup>[48]</sup>采用VCSEL侧面抽运Nd:YAG晶体结构,在VCSEL阵列后加装了微透镜阵列,使激光器实现了在 $9\sim 17\text{ }^\circ\text{C}$ 内无温控措施稳定工作,可应用于嫦娥探月工程和卫星探测;同年,白家荣等<sup>[49]</sup>使用TEC给VCSEL控温,采用侧面抽运Nd:YAG晶体的结构,实现了 $-75\sim +40\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内稳定工作,并准备未来应用于火星探测器上。此外,日本的Institute for Molecular Science利用VCSEL端面抽运Nd:YAG晶体,加入了微透镜阵列,在 $10\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内实现了脉冲能量大于 $1 \text{ mJ}$ 的激光输出<sup>[50]</sup>。表3为可宽温度范围工作的 $808 \text{ nm}$  VCSEL阵列抽运的固态激光器研究进展。

综上, $808 \text{ nm}$  VCSEL阵列抽运的固态激光器可以在一定的温度范围内实现无温控稳定工作,在



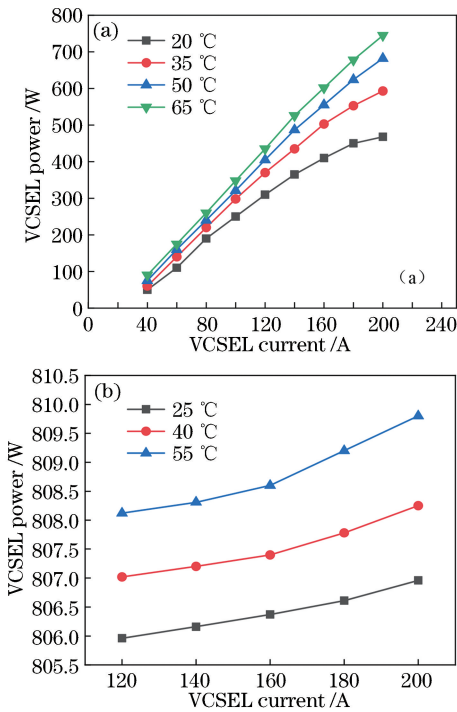


图 5 VCSEL 阵列在不同热沉温度下的输出特性。(a) 输出功率随注入电流的变化曲线；(b) 中心波长随注入电流的变化曲线

Fig. 5 Output performances of VCSEL array at different heat sink temperatures. (a) Output power as function of injection current; (b) central wavelength as function of injection current

未来的应用中需要注意以下几点：1) 可以利用注入

表 3 可宽温度范围工作的 VCSEL 阵列抽运的固态激光器研究进展

Table 3 Research progress on VCSEL-array-pumped solid-state lasers operating in wide temperature range

Research unit / year	Parameter	Output	Temperature / °C
U.S. Army RDECOM CERDEC <sup>[44]</sup> (2013)	Nd : YAG, end-pumped, passively Q-switched	14-17 mJ, 2-4 ns, 10 Hz @1064 nm, 1.4 mJ, 10 Hz @355 nm	10-60
Institute for Molecular Science, Japan <sup>[50]</sup> (2013)	Nd : YAG, end-pumped, passively Q-switched	1 mJ @1064 nm	10-80
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences <sup>[47]</sup> (2013)	Nd : YAG, end-pumped, passively Q-switched	81 μJ, 13 ns, 100 Hz @1064 nm	15-35
Princeton Optronics <sup>[43]</sup> (2016)	Nd : YAG, end-pumped, passively Q-switched	18 mJ, 15 Hz @1064 nm	25-60
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences <sup>[48]</sup> (2018)	Nd : YAG, side-pumped, passively Q-switched	2.1 mJ, 40 Hz @1064 nm	9-17
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences <sup>[49]</sup> (2019)	Nd : YAG, side-pumped, passively Q-switched	21.5 mJ, 1 Hz, 4.3 ns @1064nm	-75-40

电流改变 VCSEL 输出功率与温度对 VCSEL 输出功率的制约关系, 寻求平衡函数, 通过控制 VCSEL 工作电流使固态激光器在更宽的温度范围内工作。2) 可通过给 VCSEL 阵列加装微透镜阵列, 降低温度对 VCSEL 发散角的影响, 提高抽运效率的同时, 也可提高激光输出的光束质量。3) 在实现紫外激光输出时, 需要注意温度变化对非线性晶体折射率的影响, 这会导致实现和频输出的相位匹配角发生失谐。目前通过被动转动非线性晶体的角度进行相位匹配, 可以实现宽温度范围稳定工作, 但是需手动调节, 因此仍需改进。4) 由于 VCSEL 对温度不敏感, 不需要非常精确的温控措施, 因此可以采用风冷或 TEC 等简易温控措施, 这样不仅可以提高其工作的温度范围, 还可以使其更为轻便易携, 从而广泛应用于温度复杂多变的环境。

#### 4 结束语

对于采用 808 nm VCSEL 抽运的固态激光器, 由于 VCSEL 具有低温漂且不会产生光学损伤的优点, 可以长时间、宽温度范围稳定工作, 因此得到了国内外众多科研单位的广泛研究。但是, 808 nm VCSEL 存在输出功率低、功率密度低等缺点, 目前文献对于 808 nm VCSEL 抽运的固态激光器的优化, 主要从 3 个方面着手: 1) 将 VCSEL 组成二维阵列提高输出功率, 目前输出功率可达到千瓦级;

2) 加入微透镜阵列将 VCSEL 的输出光进行整形会聚以提高功率密度; 3) 依据环境温度被动调节 VCSEL 的注入电流从而使固态激光器在更宽的温度范围内稳定工作。在技术层面, VCSEL 抽运的固态激光器的发展主要受制于 808 nm VCSEL 技术的发展, 未来可从 3 个方面进行提高: 优化 VCSEL 芯片结构和有源区材料, 以提高 808 nm VCSEL 的电光效率; 提高 VCSEL 单晶的输出功率; 提高 VCSEL 的集成化。随着国内外对于 808 nm VCSEL 优化设计的进行, VCSEL 将越来越适合作为固态激光器的抽运源。在未来, 采用 VCSEL 抽运的固态激光器在复杂的空间环境和苛刻的温度环境中将具有巨大的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] Moench H, Conrads R, Gronenborn S, *et al.* Integrated high power VCSEL systems [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9733: 97330V.
- [2] Zhou D L, Seurin J F, Xu G Y, *et al.* Progress on high-power high-brightness VCSELs and applications [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9381: 93810B.
- [3] Miller M, Grabherr M, King R, *et al.* Improved output performance of high-power VCSELs [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2001, 7(2): 210-216.
- [4] Choquette K D, Hou H Q. Vertical-cavity surface emitting lasers: moving from research to manufacturing[J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(11): 1730-1739.
- [5] Wang C, Geske J, Garrett H, *et al.* Large-area high-power VCSEL pump arrays optimized for high-energy lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 8381: 83811R.
- [6] Guenter J K, Tatum J A, Clark A, *et al.* Commercialization of Honeywell's VCSEL technology: further developments[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 4286: 1-14.
- [7] Moser A, Latta E E. Arrhenius parameters for the rate process leading to catastrophic damage of AlGaAs-GaAs laser facets [J]. Journal of Applied Physics, 1992, 71(10): 4848-4853.
- [8] Zhou D L, Seurin J F, Xu G Y, *et al.* Progress on vertical-cavity surface-emitting laser arrays for infrared illumination applications[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9001: 90010E.
- [9] Chen W B, Hou X. Laser in space application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 206.
- [10] Soda H, Iga K I, Kitahara C, *et al.* GaInAsP/InP surface emitting injection lasers[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1979, 18(12): 2329-2330.
- [11] Iga K, Ishikawa S, Ohkouchi S, *et al.* Room-temperature pulsed oscillation of GaAlAs/GaAs surface emitting injection laser[J]. Applied Physics Letters, 1984, 45(4): 348-350.
- [12] Larsson A. Advances in VCSELs for communication and sensing[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(6): 1552-1567.
- [13] Seurin J F, Xu G Y, Wang Q, *et al.* High-brightness pump sources using 2D VCSEL arrays[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7615: 76150F.
- [14] Seurin J F, Ghosh C L, Khalfin V, *et al.* High-power high-efficiency 2D VCSEL arrays [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6908: 690808.
- [15] Seurin J F, Xu G Y, Khalfin V, *et al.* Progress in high-power high-efficiency VCSEL arrays [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7229: 722903.
- [16] Summers H D, Preston J M, Kemp A J, *et al.* Microchip laser with vertical-cavity surface-emitting laser diode pump[C] // IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics (IEEE Cat. No. 99CH37013), May 28-28, 1999, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE, 1999: 517-518.
- [17] Grabherr M, Miller M, Jaeger R, *et al.* Commercial VCSELs reach 0.1 W cw output power [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5364: 174-182.
- [18] van Leeuwen R, Xiong Y H, Watkins L S, *et al.* High power 808 nm VCSEL arrays for pumping of compact pulsed high energy Nd:YAG lasers operating at 946 nm and 1064 nm for blue and UV light generation[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7912: 79120Z.
- [19] van Leeuwen R, Zhao P, Chen T, *et al.* High power high repetition rate VCSEL array side-pumped pulsed blue laser [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8599: 85991I.
- [20] van Leeuwen R, Xiong Y H, Seurin J F, *et al.* High-power vertical-cavity surface-emitting lasers for diode pumped solid-state lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8381: 83810I.
- [21] Zhou D L, Seurin J F, Xu G Y, *et al.* Progress on high-power 808 nm VCSELs and applications [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10122: 1012206.
- [22] Zhang Y, Ning Y Q, Zhang L S, *et al.* Design and



- comparison of GaAs, GaAsP and InGaAlAs quantum-well active regions for 808-nm VCSELs[J]. *Optics Express*, 2011, 19(13): 12569-12581.
- [23] Zhang Y, Ning Y Q, Zhang J S, *et al.* Structural design of 808 nm InGaAlAs vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(9): 0902007.  
张艳, 宁永强, 张金胜, 等. 808 nm InGaAlAs 垂直腔面发射激光器的结构设计[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 0902007.
- [24] Zhang Y. Structural design and fabrication of 808-nm vertical-cavity surface-emitting laser [D]. Changchun: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2011: 71-72.  
张艳. 808-nm 垂直腔面发射激光器的结构与研制[D]. 长春: 中国科学院研究生院, 2011: 71-72.
- [25] Zhang J S. Investigations on the high power semiconductor laser structure [D]. Changchun: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2014: 89-92.  
张金胜. 高功率半导体激光器结构研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院, 2014: 89-92.
- [26] Hao Y Q, Luo Y, Feng Y, *et al.* Large aperture vertical cavity surface emitting laser with distributed-ring contact[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(7): 1034-1037.
- [27] Feng Y, Feng D W, Hao Y Q, *et al.* Temperature characteristic of 808 nm VCSELs with large aperture [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9521: 95210L.
- [28] Koechner W. *Solid-state laser engineering* [M]. Berlin: Springer, 2005: 63-65.
- [29] Wu J, Iordache G, Summers H D, *et al.* Optical characteristics of VCSEL pumped microchip lasers [J]. *Optics Communications*, 2001, 196: 251-256.
- [30] Lan Y P, Chen Y F, Huang K F, *et al.* Oxide-confined vertical-cavity surface-emitting laser pumped Nd : YVO<sub>4</sub> microchip lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(3): 272-274.
- [31] Hao Q, Ma L, Yan L, *et al.* A fundamental mode Nd:GdVO<sub>4</sub> laser pumped by a large aperture 808 nm VCSEL [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(5): 055003.
- [32] Goldberg L, McIntosh C, Cole B. VCSEL end-pumped passively Q-switched Nd : YAG laser with adjustable pulse energy [J]. *Optics Express*, 2011, 19(5): 4261-4267.
- [33] Xiong Y H, van Leeuwen R, Watkins L S, *et al.* High power VCSEL array pumped Q-switched Nd: YAG lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8235: 82350M.
- [34] Cole B, Hays A, McIntosh C, *et al.* Compact VCSEL pumped Q-switched Nd : YAG lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8235: 82350O.
- [35] Alimohammadian E, Major A. Modeling of a CW Nd : YVO<sub>4</sub> laser longitudinally pumped by high power VCSEL modules at 808 nm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8959: 89591D.
- [36] Li S, Liu L, Chen R Z, *et al.* Development of a compact vertical-cavity surface-emitting laser end-pumped actively Q-switched laser for laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(3): 033114.
- [37] van Leeuwen R, Xu B, Wang Q, *et al.* Passively Q-switched VCSEL-pumped Nd:YAG laser with 47 mJ pulse energy [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10082: 100820L.
- [38] Seurin J F, Xu G Y, Miglo A, *et al.* High-power vertical-cavity surface-emitting lasers for solid-state laser pumping [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8276: 827609.
- [39] Chen T, Xu B, Leeuwen R V, *et al.* 0.9-W compact UV pulsed lasers using high-power VCSEL array side-pumping [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8599: 85991J.
- [40] van Leeuwen R, Chen T, Watkins L, *et al.* 1 W frequency-doubled VCSEL-pumped blue laser with high pulse energy [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9342: 93420N.
- [41] Xie W, Ma X H, Zhu X L, *et al.* Temperature insensitive high energy Q-switched Nd : YAG slab laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(6): 065803.
- [42] Crépy B, Le Nevé M, Montagne J, *et al.* Efficient, diode temperature insensitive Nd : YAG hybrid longitudinal/transversal-pumped zig-zag slab laser: delta concept [C] // *Advanced Solid-State Lasers*, February 3-6, 2002, Québec City, Canada. Washington, D.C. : OSA, 2002: TuC4.
- [43] van Leeuwen R, Xu B, Chen T, *et al.* VCSEL-pumped passively Q-switched monolithic solid-state lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9726: 97260U.
- [44] Cole B, Hays A, McIntosh C, *et al.* Wide temperature operation of a VCSEL pumped 355nm frequency tripled Nd:YAG laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8599: 85991L.

- [45] Wintner E, Kofler H, Srivastava D K, *et al.* Laser plasma ignition: status, perspectives, solutions [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 9065: 90650B.
- [46] Lu S W, Meng J, Zhao X Q, *et al.* Temperature insensitive Nd : GdVO<sub>4</sub> laser with high peak power and narrow pulse width [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0401009.  
鲁绍文, 孟洁, 赵学强, 等. 高功率窄脉宽宽温 Nd : GdVO<sub>4</sub> 激光器 [J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0401009.
- [47] Yu Z Z, Hou X, Zhou Q L, *et al.* VCSEL pumped compact wide-temperature Nd : YAG laser and grazing-incidence amplifier [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6): 0602003.  
于真真, 侯霞, 周群立, 等. 垂直腔面发射激光器抽运小型宽温 Nd : YAG 激光器及掠入射式放大器的研究 [J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602003.
- [48] Chen S L, Zhang X, Jiang J, *et al.* VCSEL side-pumped all solid-state lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10): 1001001.  
陈思露, 张鑫, 蒋静, 等. VCSEL 侧面抽运的全固态激光器 [J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1001001.
- [49] Bai J R, Liu Y, Zhong C Y, *et al.* Narrow pulse width lasers operating over wide range of low temperature [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0101004.  
白家荣, 刘源, 钟朝阳, 等. 可低温工作的窄脉冲宽温激光器 [J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0101004.
- [50] Tsunekane M, Taira T. Compact and wide temperature acceptance of VCSEL-pumped micro-laser for laser ignition [C] // Advanced Solid-State Lasers Congress, October 27- November 1, 2013, Paris, France. Washington D. C.: OSA, 2013: ATu3A.58.