

GaSb 基光泵浦半导体碟片激光器的研究进展(特邀)

尚金铭^{1,2}, 张宇^{1,2}, 杨成奥^{1,2}, 谢圣文^{1,2}, 黄书山^{1,2}, 袁野^{1,2}, 张一^{1,2},
邵福会^{1,2}, 徐应强^{1,2}, 牛智川^{1,2}

- (1. 中国科学院半导体研究所 半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083;
2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

摘要: GaSb 基光泵浦半导体碟片激光器 (OP-SDLs) 可以获得高光束质量和高功率的红外激光输出, 是近年来新型中红外激光器件研究领域的热点。文中介绍了 GaSb 基光泵浦半导体碟片激光器增益芯片的外延结构和工作原理, 综述了 2 μm 波段 GaSb 基泵浦半导体碟片激光器的研究进展, 讨论了该类激光器的波长扩展、功率提升、实现窄线宽短脉冲发射和有效热管理关键问题, 评述了性能发展的主要技术方向和应用前景。

关键词: GaSb 基光泵浦半导体碟片激光器; 2 μm ; 热管理; 高光束质量

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1003004

Research progress of GaSb based optically pumped semiconductor disk lasers(*invited*)

Shang Jinming^{1,2}, Zhang Yu^{1,2}, Yang Cheng'ao^{1,2}, Xie Shengwen^{1,2}, Huang Shushan^{1,2}, Yuan Ye^{1,2},
Zhang Yi^{1,2}, Shao Fuhui^{1,2}, Xu Yingqiang^{1,2}, Niu Zhichuan^{1,2}

- (1. State Key Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;
2. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: GaSb based optically pumped semiconductor disk lasers (OP-SDLs) attracts considerable attention in novel mid-infrared laser device research field for their potential excellent beam quality and high output power. The epitaxy structure and basic principle of GaSb based OP-SDLs wafers were summarized. The development of GaSb based OP-SDLs at 2 μm wavelength was reviewed respectively by analyzing the aspects of wavelength extending, power scaling, line-width narrowing, short-pulse generation and effective thermal management. The technical development direction and application prospects of this type of laser were discussed.

Key words: GaSb based optically pumped semiconductor disk lasers; 2 μm ;
thermal management; excellent beam quality

收稿日期: 2018-05-07; 修订日期: 2018-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(61790580); 国家 973 计划(2014CB643903)

作者简介: 尚金铭(1993-), 男, 博士生, 主要从事碲化物半导体激光器方面的研究。Email: shangjinming@semi.ac.cn

导师简介: 牛智川(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事新型半导体光电材料与量子器件方面的研究。Email: zcnui@semi.ac.cn

0 引言

2 μm 波段处于大气窗口中,该波段光源对 CH₄、CO、NO 和 HF 等污染气体具有很强的吸收^[1-3],因此在环境污染检测、生物医学传感光谱学和远程气体检测等方面有重要的应用价值。目前,2 μm 波段的激光器主要有掺 Tm³⁺和 Ho³⁺的固体和光纤激光器、掺 Cr²⁺/Fe²⁺ 硫族化合物激光器和 GaSb 基半导体激光器^[4-5]。与光纤和固态激光器相比,GaSb 基半导体激光器应用更加广泛,由于 GaSb 基半导体激光器可以通过半导体能带工程调节带隙宽度,因此可以通过不同的量子阱结构进行发射波长的设计。

目前,电泵 GaSb 基半导体激光器已经表现出相对优异的性能。然而,用于气体光谱,自由空间光通信,红外对抗和其他重要应用的激光器在需要高功率的同时还需要良好的光束质量。而传统的电泵半导体激光器虽然可以获得较高的功率输出,但是受到光束质量的限制。而半导体面发射激光器(VCSEL)虽然可以实现圆对称的激光输出但是输出功率较低。光泵浦半导体碟片激光器(OP-SDL)也称为光泵浦垂直外腔面发射激光器(OPS-VECSEL),它兼顾了半导体面发射激光器(VCSEL)与二极管泵浦全固态激光器(DPSS)的优点^[6],可以输出高功率、圆对称、近衍射极限的基模光束。典型的 SDL 结构如图 1 所示。与传统的光纤和固态激光器相比,SDL 可以通过半导体能带工程调节增益材料组分以及量子阱宽度进行激光波长的设计^[7-9]。与电泵 VCSEL 相比,SDL 没有 p-n 结结构,降低了材料内部自由载流子吸收引起的内损耗,能够实现高功率输出。此外,由于 SDL 具有稳定的光学外腔结构,还可以通过在腔内插入非线性光学晶体和可饱和吸收体(SESAM)等光学元件的方式进行腔内倍频、波长调谐和锁模等光学调节。表 1 总结了光泵浦半导体碟片激光器(OP-SDL)与其他激光技术的对比数据^[10]。由于 GaSb 基 SDL 在 2 μm 波段可实现高光束质量和高功率的激光输出,在由空间光通信、红外对抗、激光光谱学、以及激光医疗等领域中具有特别重要的应用。

目前,研究人员已经进行了大量工作来提高 GaSb 基 SDL 的光学性能,德国夫琅禾费研究所、法国蒙彼利埃大学、芬兰坦佩雷理工大学、英国斯特拉

思克莱德大学等^[10-13]单位在 GaSb 基 SDL 的研究工作上已经取得了重大成就。文中介绍了 GaSb 基 SDL 的基本工作原理,综述了 2.X 波段 GaSb 基 SDL 在功率扩展、窄线宽和短脉冲等方面的研究现状和进展。

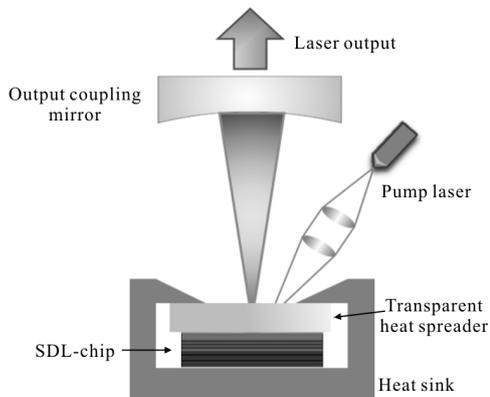


图 1 半导体碟片激光器(SDL)的结构示意图

Fig.1 Schematic of typical SDL

表 1 SDL(VECSEL)与其他激光技术的对比数据图^[10]

Tab.1 SDL(VECSEL) compared to other technologies^[10]

Laser technology	Wave-length	Power	Beam quality	Linewidth & SMSR	Tunability	Compactness
DFB	√	-	×	×	-	√
ECDL	√	-	×	-	-	-
VCSEL	√	×	√	×	√	√
VECSEL	√	√	√	√	√	-
Fiber laser	×	-	√	√	×	-
DPSSL	×	√	√	-	×	×

1 GaSb 基 SDL 的基本原理和外延生长

典型 SDL 的外延结构和工作原理图(为了标识方便,DBR 和增益区域中显示出的重复结构已被省去)如图 2 所示。图 2(b)中,S 为衬底,DBR 为分布布拉格反射镜,AR 为增益区域,W 为限制窗台,C 为帽层。SDL 采用势垒泵浦的方式,注入的泵浦光被增益区势垒层吸收,产生光生载流子,光生载流子注入至量子阱中复合产生激光^[14]。可以根据能带设计利用分子束外延(MBE)技术在 GaSb 衬底上进行所需波长的 SDL 外延结构的生长。SDL 结构由分布式布拉格反射器(DBR),增益区域和限制/窗口区域三个部分组成。分布式布拉格反射器(DBR)由 21.5

对晶格匹配的 GaSb/AlAs_{0.08}Sb_{0.92} 交替生长而成, 每层的厚度为 $\lambda/4$, 由于 AlAs_{0.08}Sb_{0.92} ($n_{\text{AlAsSb}}=3.16$) 和 GaSb ($n_{\text{GaSb}}=3.89$) 折射率差相对较高, 因此, 仅需比近红外 SDL 更少层数 DBR 就可以实现设计波长处反射率达到 99.9% 以上。增益区由 10 个 GaIn(Al)AsSb/AlGaAsSb 应变量子阱组成, 量子阱宽度为 10 nm, 相邻的量子阱之间的光学长度为 $\lambda/2$, 通过控制外延生长, 使量子阱位于谐振腔内驻波场的波腹位置形成共振周期增益(RPG)^[15]的多量子阱结构。在整个结构的顶部, 生长光学长度为 $\lambda/4$ 的 Al_{0.85}Ga_{0.15}As_{0.06}Sb_{0.94} 窗口层以防止表面处的载流子复合并优化 DBR 和芯片表面形成的光学微腔的长度, 随后生长 10 nm 厚度的 GaSb 帽层以避免 SDL 表面氧化。由于 SDL 生长结构复杂, 外延生长的精确性强烈地影响着 SDL 的性能。此外, 为了改善有源区域的散热效果, 一般在 SDL 芯片表面毛细键合 SiC 或者金刚石作为散热窗口。

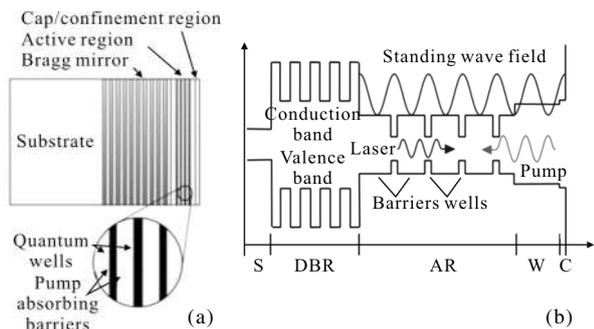


图 2 SDL 的外延结构(a)及 SDL 的工作原理示意图(b)

Fig.2 Epitaxial structure of SD (a) and schematic diagram of the working principle of SDL (b)

2 GaSb 基 SDL 的研究进展

2.1 2.X 波段大功率 GaSb 基 SDL 的发展

2003 年, 蒙彼利埃大学的 Cerutti 等研究人员首次实现了 GaSb 基 SDL 的激光输出^[16]。2008 年, 斯特拉思克莱德大学的 Hopkins 等人第一次实现室温下高光束质量的 GaSb 基 SDL 的瓦级功率的激光输出^[17], 发射波长为 2.0 μm 。在 15 $^{\circ}\text{C}$ 条件下, GaSb 基 SDL 的输出功率可以达到 3 W, 光束质量可以达到 1.1~1.4。此外, 当实验温度降至 -15 $^{\circ}\text{C}$ 时, 通过使用金刚石作为顶部散热器, GaSb 基 SDL 输出功率可以达到 5 W。在此温度下, GaSb 基 SDL 的斜率效率超过 25%。2009 年, 坦佩雷理工大学的 Paajaste 等

人通过引入 In_{0.2}Ga_{0.8}Sb/GaSb 应变量子阱结构^[18], 在室温下实现 3.6 W 的激光输出, 在 15 $^{\circ}\text{C}$ 条件下可以实现 4 W 的激光输出。2016 年, 夫琅禾费研究所的 Holl 等人通过采用低量子亏损结构、优化泵浦光斑直径以及在 SDL 芯片表面键合具有高导热率的金刚石, 改善增益芯片热特性等方式, 在 20 $^{\circ}\text{C}$ 条件下实现 17 W 的激光输出^[19], 发射波长为 2.02 μm , 功率输出特性如图 3 所示, 这是迄今为止 GaSb 基 SDL 的最大输出功率。

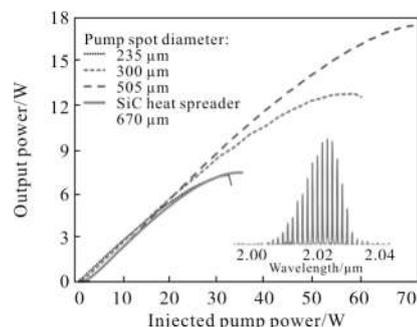


图 3 不同泵浦光斑直径的 2.0 μm SDL 输出功率特性图^[19]

Fig.3 Output power characteristics of SDL at 2.0 μm with different pump spot diameters^[19]

2004 年, 蒙彼利埃大学的 Cerutti 等人在 268~308 K 的实验温度下第一次实现 2.3 μm GaSb 基 SDL 室温下连续工作^[20-21], 连续输出(CW)模式下输出的圆形 TEM₀₀ 低发散角的激光输出的功率可达 8.5 mW。2007 年夫琅禾费研究所的 Rattunde 等人首次获得 2.3 μm GaSb 基 SDL 瓦级室温连续激光输出^[22]。2009 年同一研究组的 Rösener 等人利用多增益元件的方式实现了 GaSb 基 SDL 在 2.3 μm 波段的最高激光输出, 当泵浦功率增加至 30 W 时, 可实现 3.3 W 的激光输出^[23]。

2011 年, 坦佩雷理工大学的 Paajaste 等人首次将 GaSb 基 SDL 的输出波长扩展至 2.5 μm ^[24]。其结构由 21.5 对晶格匹配的 GaSb/AlAs_{0.085}Sb_{0.915} 形成的分布布拉格反射镜和增益区组成, 其中增益区由 Al_{0.35}Ga_{0.65}As_{0.035}Sb_{0.965} 势垒层和 9.5 nm 厚的位于驻波波腹位置的 In_{0.35}Ga_{0.65}As_{0.09}Sb_{0.91} 应变量子阱组成。在 5 $^{\circ}\text{C}$ 条件下, 最大输出功率为 0.6 W, 光束质量 M^2 低于 1.6。2016 年, 夫琅禾费研究所的 Holl 等^[25] 通过采用 1470 nm 的泵浦源代替 980 nm 的泵浦源进行势垒泵浦, 使用更低量子亏损的泵浦方式, 减

少了芯片内部热的产生,使 2.45 μm GaSb 基 SDL 的功率得到明显提高,输出功率可达 7 W,斜率效率达到 30%以上。其功率输出特性如图 4 所示。

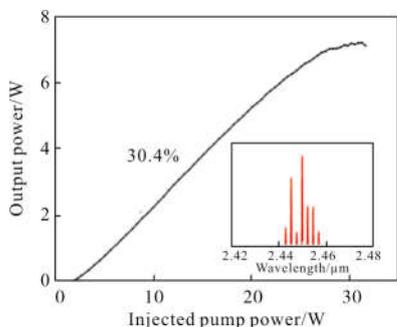


图 4 2.45 μm SDL 的输出特性图^[25]

Fig.4 Output characteristics of 2.45 μm SDL^[25]

2010 年,夫琅禾费研究所的 Rösener 等人进一步扩展了 GaSb 基 SDL 的波长范围,实现了 2.8 μm 的激光输出^[25-26]。在 20 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,输出功率可达 0.12 W。与波长为 2.0 μm 和 2.5 μm 的 GaSb 基 SDL 相比,输出波长为 2.8 μm 的 SDL 增益芯片的量子阱内的 As 和 Sb 含量更多。此外,随着激光输出波长的增加,分布布拉格反射层和共振周期增益(RPG)的有源区的厚度不断增加,这使得增益芯片的外延生长难度增加。2017 年,同一研究组通过使用 1 470 nm 激光源作为泵浦源,减少量子亏损,提高光-光转化效率和减小热量产生的方式,在 20 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,实现 2.8 μm GaSb 基 SDL 0.85 W 的激光输出^[27]。

到目前为止,已经对 GaSb 基 SDL 的高输出功率输出进行了许多尝试。不同波长 GaSb 基 SDL 发射的最大 CW 输出功率已在图 5 中列出。为了进一

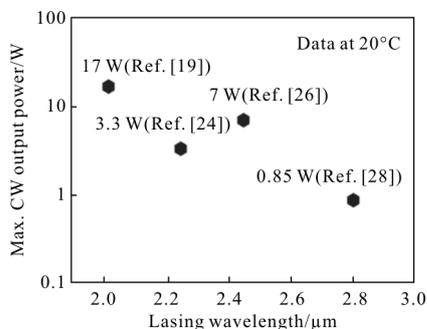


图 5 20 $^{\circ}\text{C}$ 条件下不同工作波长的 GaSb 基 SDL 的最大输出功率数据图

Fig.5 Maximum output power of GaSb based SDL emission at different operation wavelength at 20 $^{\circ}\text{C}$

步增加 GaSb 基 SDL 的输出功率,在外延优化、横向激光抑制和有效的热管理等方面还需要进一步提高。

2.2 窄线宽 GaSb 基 SDL 的发展

与传统的电泵半导体激光器相比,具有外腔结构的 GaSb 基 SDL 具有更大的灵活性和可调性,可以通过将用于光谱或光束控制的光学元件集成到谐振腔中进行精确的光学和光谱调节^[28]。例如,通过在谐振腔中插入双折射滤光片作为波长选择元件,可以产生稳定的单频激光。2005 年,蒙彼利埃大学的 Ouvrard 实现了线宽小于 20 kHz 的 2.3 μm GaSb 基 SDL 单频激光输出,但是输出功率相对较低(5 mW)^[29]。2007 年斯特拉斯克莱德大学的 Hopkins 等人实现了单频 GaSb 基 SDL 680 mW 的激光输出,输出波长为 2.3 μm 。然而,随着功率的逐渐提高,线宽显著增加(在 MHz 范围内)^[30]。直至 2011 年,夫琅禾费研究所的 Kaspar 等人通过主动稳频装置实现了 2.3 μm GaSb 基 SDL 线宽为 390 kHz,功率为 200 mW 的激光输出^[31]。

相对于 2.3 μm 窄线宽 GaSb 基 SDL 的研究,2.0 μm 窄线宽 GaSb 基 SDL 的研究要稍晚一些。2011 年,夫琅禾费研究所的 Rösener 等人^[32]通过使用频率稳定装置实现 2.0 μm GaSb 基 SDL 的单纵模激光发射,线宽可达到 9 kHz,输出功率约为 100 mW。2012 年,同一研究小组的 Kaspar 等人^[33]通过改善泵浦光斑与腔模式的匹配实现输出功率为 960 mW (1 100 mW),线宽为 60 kHz 的激光输出,发射波长为 2.05 μm ,边模抑制比可以达到 30 dB (20 dB)。2013 年,Kaspar 等人^[34]利用改进的 PDH (Pound-Drever-Hall) 锁定结构实现了对 2.0 μm 窄线宽 GaSb 基 SDL 的进一步改善,通过这种稳频技术使得腔膜式与泵浦光斑之间实现高度的空间重叠,从而获得了功率高达 1 W 的激光输出和 20 kHz 线宽的良好性能。为了使 SDL 腔体免受环境噪声的影响,GaSb 基 SDL 模块通常由坚固耐用的铝块加工而成^[13](见图 6),可以优化机械稳定性,并使泵浦光学元件可以沿着光束轴线移动进行腔体调节。在宽光谱区域提供可调节窄线宽和单频操作的能力是 SDL 技术在低成本微型激光器领域中的关键优势。

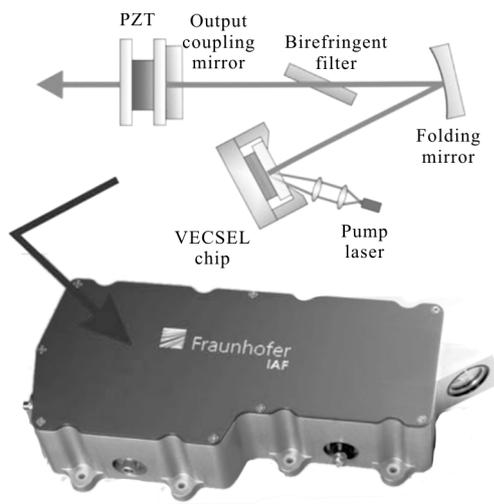


图 6 2.0 μm 窄线宽单频 GaSb 基 SDL^[13]

Fig.6 2.0 μm GaSb based SDL with narrow line-width single frequency emission^[13]

2.3 短脉冲激光器

由于 2 μm 波段的短脉冲 SDL 激光器可用作光放大器和中红外超连续谱光源的种子源^[35]或用于同步泵浦中红外光参量振荡器(OPO)的泵浦源。因此除连续运行的 GaSb 基 SDL 激光器外,2 μm 波段的短脉冲 SDL 也具有广泛的应用。在 2009 年亚利桑那大学的 Yarborough 等人^[36]通过使用二极管泵浦的 1.064 μm 波段的 Nd:YAG 激光器的脉冲激光进行泵浦,当脉冲宽度为 300 ns 时,可获得 70 W 的峰值功率,输出波长为 2.0 μm。在 2010 年,同一研究小组获得了脉冲宽度为 143 ns, 峰值功率为 342 W 的激光输出。这是迄今为止最高的 GaSb 基 SDL 的峰值功率^[37]。

2010 年, 坦佩雷理工大学的 Härkönen 等人^[38]首次报道了一种发射波长为 2.0 μm 的皮秒脉冲的 GaSb 基 SDL, 通过使用由三个 InGaSb/GaSb 应变量子阱形成的半导体可饱和吸收镜(SESAM)实现了重复频率为 881.2 MHz 的自启动锁模脉冲。GaSb 基 SDL 中产生的脉冲能量和持续时间分别为约 30 pJ 和 1.1 ps。图 7 显示了其所使用的 z 型激光腔, 其中增益芯片和 SESAM 分别用作折叠镜和腔端镜。图中 RoC 为曲率半径, R 为反射率。2011 年, 同一研究小组通过优化增益芯片结构和可饱和吸收镜实现了 384 fs 的近变换极限脉冲^[39], 这是已知的 GaSb 基 SDL 可获得的最短的脉冲。此外, 2012 年夫琅禾费

研究所的 Kaspar 等人^[40]实现了 2.05 μm 的电光腔倒空半导体碟片激光器的脉冲发射, 脉冲宽度为 3 ns, 峰值功率为 30 W (脉冲能量为 100 nJ)。为了在 GaSb 基 SDL 中产生纳秒脉冲, 需要在 35 cm 的共振腔中使用布鲁斯特角偏振棱镜和普克尔盒。这些可实现纳秒脉冲的 GaSb 基 SDL 激光发射可广泛应用于高精度光学检测和测距等应用。

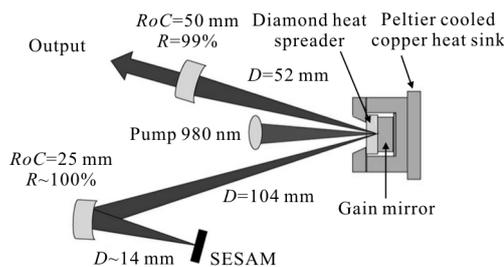


图 7 激光腔的示意图

Fig.7 Schematics of the laser cavity

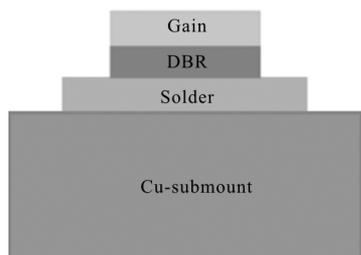
3 有效的热管理

热管理问题是实现高性能的 SDL 的关键问题, 对 GaSb 基 SDL 而言, 热量产生主要集中于泵浦区域, 由于泵浦光的阈值功率密度可以达到数 kW/cm², 在泵浦光的持续辐射下, 芯片内部共振周期增益的多量子阱结构和 DBR 的材料参数会发生一定的变化, 从而导致有效增益降低, 最终影响 SDL 的性能。此外, GaSb 材料的导热率较低, 随着 GaSb 基 SDL 发射波长的不断扩展, SDL 内部共振周期增益的量子阱和分布反馈布拉格反射镜(DBR)的厚度也相应地增加, 这会造成 SDL 结构内部热阻较高, 进一步影响激光输出功率的提升。在 2003 年由 Cerutti 等人^[16]首次报道的 GaSb 基 SDL 中就因为热管理的限制而只能在准连续条件下实现激光发射。对于室温连续输出的 GaSb 基 SDL 而言, 有效地热管理是必不可少的条件。为了进行有效的热管理, 研究人员在减少热量产生方面进行了大量的工作。SDL 中热量主要由泵浦光与发射光之间的能量差异而产生的量子亏损所引起, 如果采用波长为 980 nm 的商用二极管激光器对 2 μm 波段的 GaSb 基 SDL 进行泵浦, 产生的量子亏损将超过 50%(50%的泵浦能量将损失并转化为热)。为了提高光-光转化效率和减少热量的产生, 2006 年夫琅禾费研究所的 Schulz 等人^[41]等人提出了量子阱泵浦 GaSb 基 SDL

的概念。量子阱泵浦是使泵浦光直接由量子阱吸收，与势垒泵浦方式相比，量子阱泵浦可大大降低量子亏损的产生。2007 年，Schulz^[42]等人使用波长为 1.96 μm 的激光作为泵浦源(量子亏损约 18%)，在 15 $^{\circ}\text{C}$ 条件下实现 2 W 的激光输出，输出波长为 2.35 μm 。2015 年，Holl 等人^[43]采用 1 470 nm 的而激光激光器作为泵浦源(量子亏损约 27%)，在有效散热的条件下实现了 10.8 W 的激光输出，输出波长为 2.0 μm 。

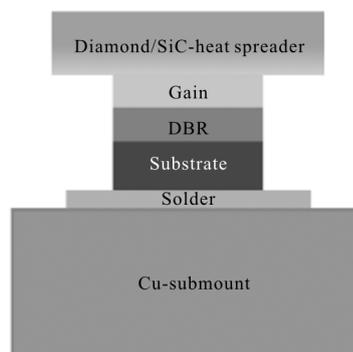
为了进一步提高光泵浦 GaSb 基 SDL 的性能，如图 8 所示的三种散热方式被广泛应用于热管理。第一种散热方式是通过去除 GaSb 衬底，并将外延生长的 GaSb/AlAs_{0.08}Sb_{0.92} DBR 直接焊接在热沉表面^[44-45]。增益区域和铜热沉之间的热阻主要由 DBR 层和具有较低导热率的 GaSb 外延层引起，通过机械减薄或者选择性湿法腐蚀可以去除数百 μm 厚的衬底，因此可以大大减小热阻，从而减少热量的产生。为了方便去除 GaSb 衬底，通常采用倒序生长的方式进行外延片的生长，生长的顺序依次为：蚀刻截止层、窗口层/载流子限制层、分布布拉格反射镜。

另一种有效的散热方式是通过液体毛细键合在窗口层键合高导热率的透明晶体，如金刚石(导热率为 2 000 W/mK)和 SiC(导热率为 370 W/mK)。这种方法有效地将泵浦区域产生的热量通过散热片传导至外部铜制夹具中，极大地减少 SDL 增益芯片表面的热积累^[46-47]。此外，还可以将上述两种热管理方法相结合^[43]，通过将已去除衬底的 SDL 芯片窗口层和 DBR 层分别键合散热片进行进一步有效的热管理。前端的 SiC 或金刚石散热片通过液体毛细键合与增益芯片直接接触，主要减少泵浦所产生的热量。与 DBR 相接触的散热片主要减少增益芯片内部所产生的热量，以及作为 SDL 增益芯片与热沉之间热量的热传导沟道。



(a) 移除衬底

(a) Substrate removing



(b) 腔内散热器

(b) Intracavity heat spreader



(c) 双面散热

(c) Double-sided heat sinking

图 8 三种主要热管理方式的示意图

Fig.8 Schematic representations of three main thermal management methods

4 结 论

近些年 2.0~2.8 μm GaSb 基 SDL 已经取得了快速的发展，低阈值泵浦功率，数瓦级的功率输出，近衍射极限的光束质量等性能已经被数个国外研究所报道，这弥补了长期以来中红外半导体激光器输出功率较低的不足，实现了高功率高光束质量的激光输出。这使得 GaSb 基 SDL 的实际应用也越来越广泛。尽管已经取得了很大的进步，但是 GaSb 基 SDL 未来的研究重点仍然是如何进一步在波长扩展，功率提升，线宽变窄和超短脉冲生成等方面进行性能的提升。虽然国内该领域研究起步较晚，但笔者课题组与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光学及应用国家重点实验室合作已经实现室温下 0.5 W 的连续激光输出，相信在不久的将来会取得更大的突破。

波长的扩展和半导体结构的发展密切相关,现阶段电泵浦 GaSb 基半导体激光器已经可以实现 3 μm 以上激光发射。长波长的 SDL 由于不存在掺杂层,与电泵浦激光器相比,降低了自由载流子的吸收损耗,这种吸收损耗随着波长的增加变得尤为重要。因此,通过能带工程的调节以及外延生长的优化,有望实现 3 μm 以上 GaSb 基 SDL 的高性能激光输出。

为了扩展 GaSb 基 SDL 的应用,要求更坚固、小型化、更高稳定性的封装。在小型化大功率、高光束质量、窄线宽和超短脉冲源等领域,GaSb 基 SDL 具有相当大的发展潜力。通过不断地优化外延生长以及更加有效的热管理,可以制造出带有复杂谐振腔的小型化商用 GaSb 基 SDL 设备。随着 GaSb 基 SDL 的不断发展,可预见在未来 GaSb 基 SDL 将会有更加广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Nikitichev A A, Stepanov A I. 2-mm lasers for optical monitoring [J]. *Journal of Optical Technology c/c of Opticheskii Zhurnal*, 1999, 66(66): 718-723.
- [2] Zhang Dongyan, Wang Rongrui. Progress on mid-infrared lasers [J]. *Laser and Infrared*, 2011, 41(5): 487-491. (in Chinese)
- [3] Werle P. A review of recent advances in semiconductor laser based gas monitors [J]. *Spectrochimica Acta Part A Molecular & Biomolecular Spectroscopy*, 1998, 54(2): 197-236.
- [4] Mikhailova M P, Titkov A N. Type II heterojunctions in the GaInAsSb/GaSb system [J]. *Semiconductor Science & Technology*, 1994, 9(7): 1279-1284.
- [5] Baranov A N, Cuminal Y, Boissier G, et al. Electroluminescence of GaInSb/GaSb strained single quantum well structures grown by molecular beam epitaxy [J]. *Semiconductor Science & Technology*, 1996, 11(8): 1185-1190.
- [6] Tilma B W, Mangold M, Zaugg C A, et al. Recent advances in ultrafast semiconductor disk lasers[J]. *Light Science & Applications*, 2015, 4(7): e310.
- [7] Ville-Markus Korpijärvi, Kantola E L, Leinonen T, et al. Monolithic GaInNAsSb/GaAs VECSEL operating at 1 550 nm[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(6): 480-484.
- [8] Kantola E, Leinonen T, Ranta S, et al. 1 180 nm VECSEL with 50 W output power [C]//SPIE, 2015, 9349: 93490U.
- [9] 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.
- [10] Myara M, Garnache A. Industrial integration of high coherence tunable single frequency semiconductor lasers based on VECSEL technology for scientific instrumentation in NIR and MIR[C]//SPIE, 2017, 10087: 1008704.
- [11] Burns D, Hopkins J M, Kemp A J, et al. Recent developments in high-power short-wave mid-infrared semiconductor disk lasers[C]//SPIE, 2009: 7193.
- [12] Rösener B, Rattunde M, Kaspar S, et al. GaSb-based optically pumped semiconductor disk lasers emitting in the 2.0-2.8 μm wavelength range[C]//SPIE, 2010, 7578: 75780X.
- [13] Kaspar S, Rattunde M, Töpfer T, et al. Recent advances in 2- μm GaSb-based semiconductor disk laser—power scaling, narrow-linewidth and short-pulse operation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(4): 1501908.
- [14] Schulz N, Rattunde M, Manz C, et al. Optically pumped GaSb-based VECSEL emitting 0.6 W at 2.3 μm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(9): 1070-1072.
- [15] Corzine S W, Geels R S, Scott J W, et al. Design of Fabry-Perot surface-emitting lasers with a periodic gain structure [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989, 25(6): 1513-1524.
- [16] Cerutti L, Garnache A, Genty F, et al. Low threshold, room temperature laser diode pumped Sb-based VECSEL emitting around 2.1 μm [J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(3): 290-292.
- [17] 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.
- [18] Paajaste J, Suomalainen S, Koskinen R, et al. High-power and broadly tunable GaSb-based optically pumped VECSELs emitting near 2 μm [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2009, 311(7): 1917-1919.
- [19] Holl P, Rattunde M, Adler S, et al. GaSb-based 2.0 μm SDL with 17 W output power at 20°C [J]. *Electronics*

- Letters*, 2016, 52(21): 1794–1795.
- [20] Cerutti L, Garnache A, Ouvrard A, et al. High temperature continuous wave operation of Sb-based vertical external cavity surface emitting laser near 2.3 μm [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, 268 (1–2): 128–134.
- [21] Cerutti L, Garnache A, Ouvrard A, et al. 2.36 μm diode pumped VCSEL operating at room temperature in continuous wave with circular TEM₀₀ output beam[J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(14): 869–871.
- [22] Rattunde M, Schulz N, Rösener B, et al. High brightness GaSb-based optically pumped semiconductor disk lasers at 2.3 μm [C]//SPIE, 2007, 6479: 647915.
- [23] Rösener B, Rattunde M, Moser R, et al. GaSb-based optically pumped semiconductor disk laser using multiple gain elements[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(13): 848–850.
- [24] Paajaste J, Koskinen R, Nikkinen J, et al. Power scalable 2.5 μm (AlGaIn)(AsSb) semiconductor disk laser grown by molecular beam epitaxy [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2011, 323(1): 454–456.
- [25] Holl P, Rattunde M, Wagner J. Optimization of 2.5 μm VCSEL: influence of the QW active region[C]//SPIE, 2016, 97340: 97340S.
- [26] Rösener B, Rattunde M, Moser R, et al. Continuous-wave room-temperature operation of a 2.8 μm GaSb-based semiconductor disk laser[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(3): 319–321.
- [27] Holl P, Rattunde M, Adler S, et al. GaSb-based VCSEL for high-power applications and Ho-pumping [C]//SPIE, 2017, 10087: 1008705.
- [28] Holms M A, Burns D, Ferguson A I, et al. Actively stabilized single-frequency vertical-external-cavity AlGaAs laser [J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 1999, 11(12): 1551–1553.
- [29] Cerutti L, Garnache A, Ouvrard A, et al. Vertical cavity surface emitting laser sources for gas detection [J]. *Physica Status Solidi*, 2005, 202(4): 631–635.
- [30] Hopkins J M, Maclean A J, Burns D, et al. Tunable, single-frequency, diode-pumped 2.3 μm VCSEL[C]//Lasers and Electro-Optics, and Quantum Electronics, 2008, 15(13): 1–2.
- [31] Kaspar S, Rosener B, Rattunde M, et al. Sub-MHz linewidth 200 mW actively stabilized 2.3 μm semiconductor disk laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(20): 1538–1540.
- [32] Rösener B, Kaspar S, Rattunde M, et al. 2 μm semiconductor disk laser with a heterodyne linewidth below 10 kHz[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18): 3587–3589.
- [33] Kaspar S, Rattunde M, Töpfer T, et al. Semiconductor disk laser at 2.05 μm wavelength with <100 kHz linewidth at 1 W output power [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(3): 407–415.
- [34] Kaspar S, Rattunde M, Topper T, et al. Linewidth narrowing and power scaling of single-frequency 2X μm GaSb-based semiconductor disk lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2013, 49(3): 314–324.
- [35] Price J H V, Monro T M, Ebendorff-Heidepriem H, et al. Mid-IR supercontinuum generation from nonsilica microstructured optical fibers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 738–749.
- [36] Yarborough J M, Lai Y Y, Kaneda Y, et al. Record pulsed power demonstration of a 2 μm GaSb-based optically pumped semiconductor laser grown lattice-mismatched on an AlAs/GaAs Bragg mirror and substrate [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95 (8): 645109.
- [37] Lai Y Y, Yarborough J M, Kaneda Y, et al. 340 W peak power from a GaSb 2 μm optically pumped semiconductor laser (OPSL) grown mismatched on GaAs [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(16): 1253–1255.
- [38] Härkönen A, Paajaste J, Suomalainen S, et al. Picosecond passively mode-locked GaSb-based semiconductor disk laser operating at 2 μm [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(24): 4090–4092.
- [39] Harkonen A, Grebing C, Paajaste J, et al. Mode-locked GaSb disk laser producing 384 fs pulses at 2 μm wavelength[J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(7): 454–456.
- [40] Kaspar S, Rattunde M, Topper T, et al. Electro-optically cavity dumped 2 μm semiconductor disk laser emitting 3 ns pulses of 30 W peak power [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(14): 1063–1087.
- [41] Schulz N, Rattunde M, Wagner J, et al. GaSb-based VCSELs emitting at around 2.35 μm employing different optical pumping concepts [C]//Photonics

- Europe, 2006: 6184.
- [42] Schulz N, Rattunde M, Ritzenthaler C, et al. Resonant optical in-well pumping of an (AlGaIn)(AsSb)-based vertical-external-cavity surface-emitting laser emitting at 2.35 μm [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(9): 1063-1069.
- [43] 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): 324-335.
- [44] Perez J P, Laurain A, Cerutti L, et al. Technologies for thermal management of mid-IR Sb-based surface emitting lasers [J]. *Semiconductor Science & Technology*, 2017, 25(4): 045021.
- [45] Devautour M, Michon A, Beaudoin G, et al. Thermal management for high-power single-frequency tunable diode-pumped VECSEL emitting in the near- and mid-IR [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(4): 1701108.
- [46] Liao Z L. Semiconductor wafer bonding via liquid capillarity [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(5): 651-653.
- [47] Kaspar S, Rattunde M, Schilling C, et al. Micro-cavity 2 μm GaSb-based semiconductor disk laser using high-reflectivity SiC heatspreader [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(4): 041117.