材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.03.011

高温高效率半导体激光器阵列封装结构研究

杨 璠*，刘刚明，杨 帆，吴寸雪，闫治晚，刘 骁

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘 要： 分析了热沉和陶瓷基板对背冷式封装结构半导体激光器阵列性能的影响。通过栅格化厚铜填充技术降低了复合金刚石热沉的等效电阻，并实现了热膨胀系数匹配；采用热沉和陶瓷基板嵌入焊接技术，提高了封装散热能力和稳定性。制作了间距为 0.4 mm 的 5Bar 条芯片阵列样品，在 70 ℃热沉温度、200 A 工作电流（占空比为 1%）条件下进行性能测试，结果显示器件输出功率为 1 065 W、电光转换效率为 59.2%。在高温大电流条件下进行了 1 824 h 寿命试验，器件表现出良好的可靠性。

关键词： 半导体激光器阵列；二极管激光器；高温；高效率；封装

中图分类号： TN248.4 **文章编号：** 1001－5868(2021)03－0358－06

Research on High Temperature and High Efficiency Semiconductor Laser Array Packaging Structure

YANG Fan, LIU Gangming, YANG Fan, WU Cunxue, YAN Zhiwan, LIU Xiao

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: The influence of heat sink and ceramic substrate on the performance of semiconductor laser array with back-cooled packaging structure was analyzed. The equivalent resistance of the heat sink of composite diamond was reduced and the matching of thermal expansion coefficient was realized by rasterized thick copper filling technology. Using heat sink and ceramic substrate embedded welding technology, the heat dissipation ability and stability of the packaging structure was improved. Then the sample of 5Bar chip array with 0.4 mm spacing was fabricated, and test results indicate that at 70 ℃, 200 A and 1% duty cycle, the output power and the electro-optic conversion efficiency can reach 1 065 W and 59.2%, respectively. The sample shows good reliability in the 1 824 hours life test under high temperature and high current.

Key words: semiconductor laser array; diode laser; high temperature; high efficiency; packaging

0 引言

大功率半导体激光器阵列是 Nd：YAG 固体激光器系统最理想的泵浦光源[1]，具有效率高、体积小和寿命长等特点，广泛应用于泵浦、医疗、工业加工、特种照射等领域。近年来大功率半导体激光器发展迅速，工作温度和光功率密度不断提高，芯片工作时产生的热量也不断增加，如果封装系统不能及时散热，将会导致芯片温度急速上升、波长红移、效率降低和可靠性下降，严重时会引起系统失效甚至导致安全事故，热效应已经成为制约大功率半导体激光器发展中不可忽视的问题[2]。影响大功率半导体激光器阵列可靠性的另一个关键因素是封装应力，在封装过程中，热沉与半导体激光器芯片之间存在热膨胀系数（CTE）不匹配，造成芯片在焊接过程中产生热应力，这些应力被引入有源区，会改变有源区半导体材料能带，加速缺陷形成及迁移，对激光器的阈值电流、偏振特性、波长和光谱性能等造成影响，并降低激光器寿命[3]。

本文优化了背冷式大功率半导体激光器阵列模

收稿日期：2021－02－29.

* 通信作者：杨 璠

块的封装结构：通过栅格化厚铜填充技术降低了复合金刚石热沉的等效电阻，并实现了热膨胀系数匹配；采用热沉和陶瓷基板嵌入焊接技术，提高了封装散热能力和稳定性，获得了高效且散热稳定的封装结构。优化结构封装样品实现了功率密度高达 15 261 W/cm^2 的激光输出，在 70 ℃高温下实现了高效率、长寿命工作。

1　阵列模块结构

本文研究的背冷式半导体激光器阵列封装结构如图 1 所示。尺寸为 1.2 mm×10 mm 的激光 Bar 条芯片烧焊在金属化热沉上形成 COS(Chip on Carrier)子模块；多个 COS 子模块串联堆叠，Bar 条间距为 0.4 mm；堆叠的 COS 子模块焊接在带有陶瓷绝缘片的镀金无氧铜座上，陶瓷绝缘片采用具有较高导热性能和极佳电绝缘性能的两面镀金氮化铝(AlN)陶瓷；阵列模块两端引出激光器电极。

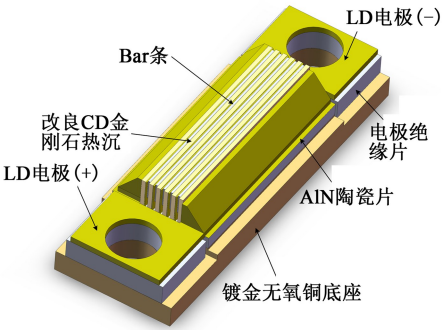


图 1　阵列封装结构示意图

阵列模块中使用自制的 808 nm 波长、200 W 准连续 Bar 条芯片，该芯片为 GaAs 基 GaAsP 无铝量子阱结构，芯片有 59 个发光点，腔长为 1.2 mm。Bar 条芯片主要参数为：在 20～70 ℃热沉温度范围内，其特征温度 T_0 为 269.3 K，特征温度 T_1 为 726.7 K；在 200 A 工作电流下，芯片输出功率为 238 W，工作电压为 1.79 V，体电阻为 1 500 μΩ，中心波长温度漂移系数为 0.25 nm/℃。Bar 条典型光电参数如图 2 所示。

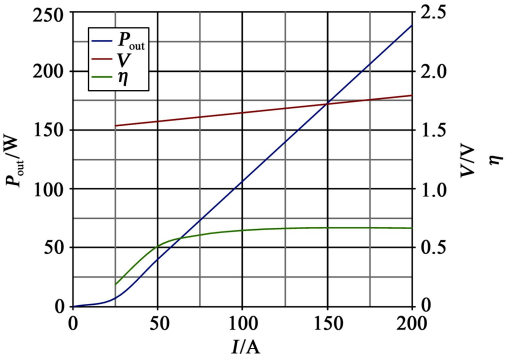


图 2　Bar 条典型光电参数图

2　封装结构优化设计

2.1　热沉材料结构优化

从封装可靠性角度考虑，为了抑制长期使用过程中铟焊料带来的铟须生长可靠性问题[4]，目前大功率半导体激光器 Bar 条芯片、热沉的主流焊接方式均采用 AuSn 焊料。该封装主要考虑热沉与芯片的热膨胀系数匹配、热沉的导电性能、热导率等。常用的热沉有钨铜(WCu)热沉、表面金属化的 AlN 热沉和表面覆铜的复合(CD)金刚石热沉等[5-7]。

钨铜热沉具有与芯片热膨胀系数匹配、本身的电阻率低等优点，但 0.2 mm 厚度的热沉加工难度大；表面金属化的 AlN 热沉具有加工精度高、与芯片热膨胀系数匹配的优点，但其电阻率高；表面覆铜的 CD 金刚石热沉具有加工精度高、热导率高等优点，电阻率处于前两类热沉之间，但与芯片热膨胀系数不够匹配。几种热沉特点对比如表 1 所示。

表 1　常见几种热沉特点对比[5-7]

热沉结构	热沉材料	热膨胀系数/($\times10^{-6}\cdot K^{-1}$)	热导率/($W\cdot mK^{-1}$)	杨氏模量/GPa	电阻	加工精度
六面金属化	AlN	4.0～6.0	170	310	大	高
表面镀金	WCu(90/10)	5.7	157	256	小	较高
六面金属化	CD 金刚石	3	600	841	较大	高
栅格化、表面覆铜、六面金属化	改良 CD 金刚石	4.0～5.5	～600	841	小	高

芯片热膨胀系数为 5.8×10^{-6}/K

本文提出了一种新型的带缝隙的表面覆铜的 CD 金刚石热沉，其具有导电导热性能好、加工精度高和与芯片热膨胀系数匹配的优点。这种新型的 CD 金刚石热沉结构如图 3 所示，在 CD 金刚石上切割微米量级的多条缝隙，然后在其表面覆铜、六面金属化，利用低电阻率的铜和金材料填补缝隙。芯片烧焊时缝隙对准芯片发光点之间的空缺部分，以避免影响芯片的焊接和散热。由于薄 CD 金刚石的上下表面均敷有适当厚度的铜，铜的热膨胀系数为 16.6×10^{-6}/K，CD 金刚石的热膨胀系数为 3×10^{-6}/K，所以两者相互作用使得其热膨胀系数得到优化。同时在 CD 金刚石上进行了栅格化开槽，进一步优化其热膨胀系数，得到了等效热膨胀系数处

于(4.0～5.5)×10^{-6}/K 范围的热沉，与芯片热膨胀系数 5.8×10^{-6}/K 相近，避免了热沉热膨胀系数与芯片不匹配带来的可靠性问题。

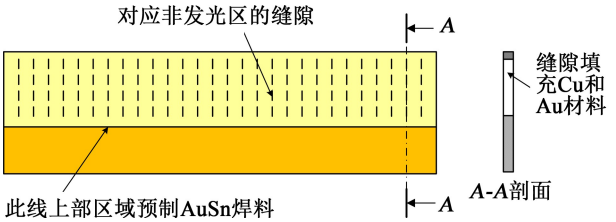


图 3 新型 CD 金刚石热沉结构示意图

由表 1 所列该新型 CD 金刚石热沉的热膨胀系数、热导率与传统的 AlN 热沉、WCu 热沉、CD 金刚石热沉对比可知，这种金刚石热沉具有与 GaAs 材料匹配的热膨胀系数和极高的热导率。

对市场常用的热沉进行等效电阻测试，结果显示在 200 A 工作电流下，采用 AlN 热沉、WCu(90/10)热沉、CD 金刚石热沉和本文提出的新型 CD 金刚石热沉，封装后芯片工作电压分别升高 0.22，0.000 12，0.16 和 0.011 6 V。热沉等效电阻分别为 1 100，0.6，800 和 58 μΩ，详细情况如表 2 所示。

表 2 常用热沉等效电阻率表

热沉	工作电压/V	200 A 下热沉电压降/V	热沉等效电阻/μΩ	电压升高/%
AlN 热沉	2.010 03	0.22	1 100	12.29
WCu(90/10)热沉	1.790 12	0.000 12	0.6	0.007
CD 金刚石热沉	1.950 01	0.16	800	8.94
改良 CD 金刚石热沉	1.801 60	0.011 6	58	0.65

从表 1 和表 2 可知，该新型 CD 金刚石热沉是大功率激光器高密度背冷式封装的理想热沉结构。采用 SOLIDWORKS 对各种热沉的热特性进行了模拟，得到采用不同热沉，芯片在 200 A 工作电流下的温升情况，结果如表 3 所示，其中本文的新型金刚石热沉的模拟结果如图 4 所示。

表 3 三种热沉下芯片的温升模拟结果 单位：℃

占空比/%	AlN 热沉	WCu(90/10)热沉	改良 CD 金刚石热沉
0.5	4.15	3.42	0.99
1	8.32	6.81	1.97
2	16.56	13.54	3.98
5	41.36	33.94	9.94

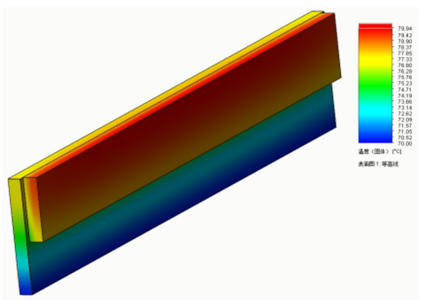
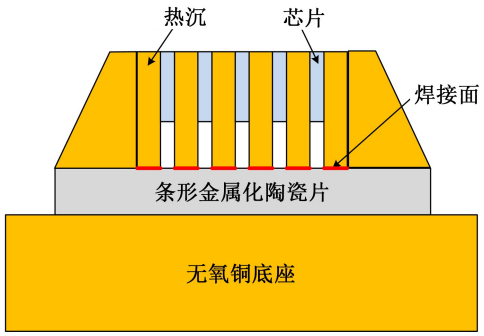


图 4 新型 CD 金刚石热沉的热分布模拟图

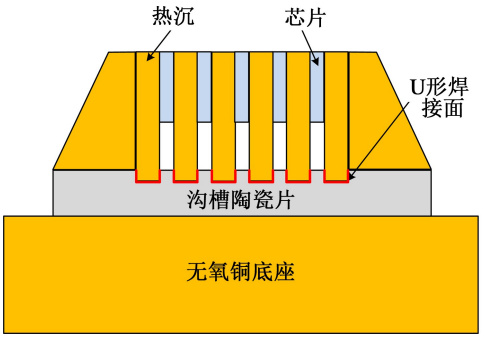
2.2 背冷式阵列结构优化

常规的封装方案中，将芯片烧焊到热沉后形成的多层三明治结构中，再用低温焊料焊接到带条状金属化图形的 AlN 陶瓷片上，其具有工艺操作性强和扩展性强等优点，但在散热能力及高温条件下的长期可靠性等方面存在不足，如图 5(a)所示。

本文提出将 AlN 陶瓷片开宽槽(后续简称沟槽陶瓷)的封装形式，有效解决了上述不足，如图 5(b)所示。



(a) 常规封装结构



(b) 改进封装结构

图 5 改进前后的封装结构示意图

从图 5 可以看出：常规的封装方案是将热沉焊接到 AlN 陶瓷片金属化图形表面上，优化后的结构是将热沉插入 AlN 陶瓷片的金属化槽内。其优势在于焊接面积增大，焊接过程和后续工作过程产生的氧化层处于槽的两边，氧化层的产生和增厚几乎不影响散热。

采用 SOLIDWORKS 软件对三种热沉、两种开槽的 AlN 陶瓷片形成的六种封装结构的热特性进行了模拟，这六种结构分别是：(Ⅰ)AlN 热沉＋常规 AlN 陶瓷片；(Ⅱ)WCu 热沉＋常规 AlN 陶瓷片；(Ⅲ)新型 CD 金刚石热沉＋常规 AlN 陶瓷片；(Ⅳ)AlN 热沉＋沟槽 AlN 陶瓷片；(Ⅴ)WCu 热沉＋沟槽 AlN 陶瓷片；(Ⅵ)

新型 CD 金刚石热沉＋沟槽 AlN 陶瓷片。封装完成后假设焊料无氧化层，阵列温升模拟结果如表 4 所示，阵列宏观热场模拟结果如图 6 所示。假定焊料边缘有 10 μm 厚的氧化层，温升模拟结果如表 5 所示。

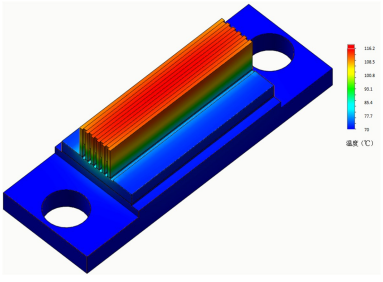
综合以上结果可知，采用带缝隙的新型 CD 金刚石热沉＋开宽槽的 AlN 陶瓷片方案在散热能力和高温下的抗焊料氧化能力具有明显的优势。

表 4　六种封装方案温升情况

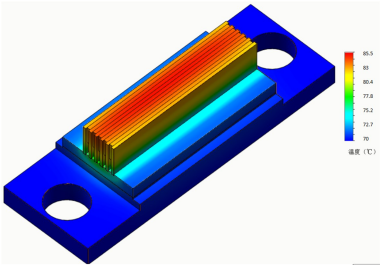
占空比/%	改进前温升/℃			改进后温升/℃		
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ
0.5	4.42	3.68	1.66	3.43	2.86	1.30
1	8.85	7.35	3.35	6.88	5.73	2.59
2	17.73	14.69	6.69	13.72	11.43	5.19
5	44.65	37.13	16.66	34.73	29.05	13.00

表 5　六种封装方案在边缘有 10 μm 厚氧化层的温升情况

占空比/%	改进前阵列温升/℃			改进后阵列温升/℃		
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ
0.5	4.66	3.83	1.74	3.46	2.88	1.31
1	9.33	7.72	3.51	6.93	5.77	2.61
2	18.69	15.46	7.05	13.88	11.56	5.25
5	47.05	38.58	17.49	35.26	29.50	13.20
备注：氧化层厚度以 10 μm 进行模拟计算，假定芯片性能无退化						



（a）　方案Ⅰ



（b）　方案Ⅳ

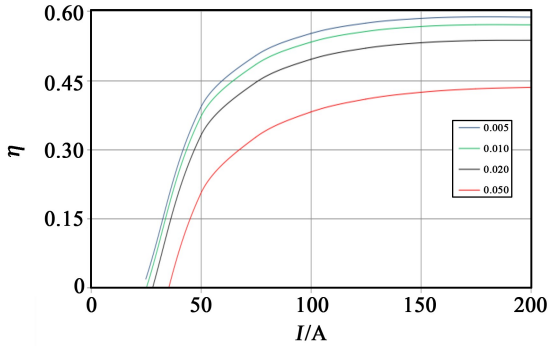
图 6　模块宏观热场模拟图(5%占空比)

新型 CD 金刚石热沉不仅热阻极低，电阻也很低，所以采用其封装的芯片温升仅是其他封装形式的 1/2 甚至 1/3，随着阵列工作电流占空比的上升，其散热效果越发明显。插入沟槽明显比直接焊接到 AlN 上结构的散热效果好，芯片温升降低约 28%。

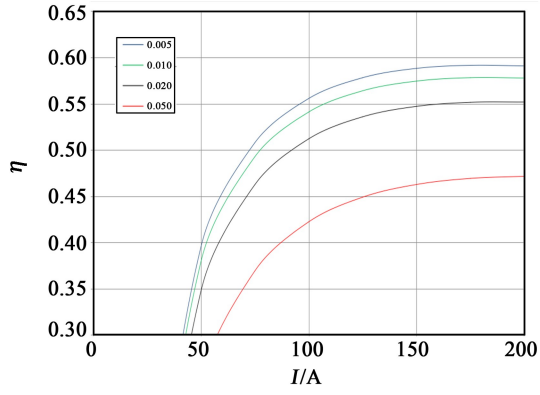
对比表 4 和表 5 所示有无氧化层情况下芯片的温升数据可知，直接插入沟槽结构的温升变化量约 0.1%，而常规封装方案温度上升了 5%，这还是在假定芯片不退化的理想情况的结果。而实际高温工作中，焊料氧化将导致温度上升、芯片退化加快，温度进一步上升，焊料氧化加剧，形成一个恶性循环，因此实际温升比模拟结果更严重，这将可能导致芯片快速退化甚至失效。

3　测试结果验证

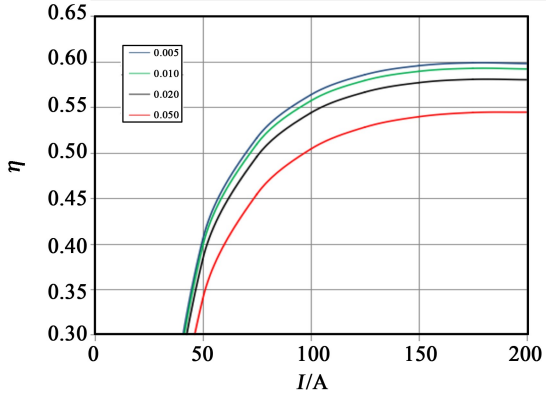
实验制备了三种样品，分别为样品 a：钨铜热沉＋平面陶瓷，样品 b：钨铜热沉＋沟槽陶瓷和样品 c：新型金刚石热沉＋沟槽陶瓷，在 70℃ 工作温度、0～



（a）　样品 a



（b）　样品 b



（c）　样品 c

图 7　三种样品在不同占空比下的光电转换效率测试结果

200 A 工作电流下条件下对其电光转换效率 η 进行了测试，结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出：在 0.5%，1%，2%，5% 四种占空比下，样品 a 的电光转换效率分别为 58.7%，57.0%，53.7% 和 43.5%，输出功率分别为 1 057，1 027，966 和 782 W。阵列在 1% 占空比下的中心波长为 808.32 nm。

在四种占空比下，样品 b 的电光转换效率分别为 59.1%，57.8%，55.2% 和 47.1%，较样品 a 分别提高了 0.4%，0.8%，1.5% 和 3.6%；输出功率分别为 1 063，1 040，993 和 849 W，较样品 a 分别提高了 6，13，27 和 67 W，说明沟槽陶瓷比平面陶瓷的封装结构具有更佳的散热能力。阵列在 1% 占空比下的中心波长为 807.72 nm，按照芯片实测中心波长温度漂移系数 0.25 nm/℃计算，本封装样品中芯片温度比钨铜＋平面陶瓷方案中芯片温度低(808.32－807.72)/0.25＝2.4 ℃。

样品 c 的表现最佳，在 0.5%，1%，2%，5% 占空比下分别实现了 59.8%，59.2%，58.0% 和 54.5% 的电光转换效率，输出功率分别为 1 076，1 065，1 044 和 980 W，最高功率密度达到 6 220 W/cm^2，阵列在 1% 占空比下的中心波长为 806.55 nm，这种封装样品中芯片温度比钨铜＋平面陶瓷方案中芯片温度低 7.1 ℃，体现了沟槽陶瓷封装结构和新型 CD 金刚石热沉带来的综合优势。

对样品 c 在 20 ℃工作温度、500 A 电流下(0.5% 占空比)进行光电性能测试，结果显示，其峰值功率 P_p 达到 2 747 W，功率密度高达 15 261 W/cm^2，电光转换效率为 49.36%，详细测试结果如图 8 所示。

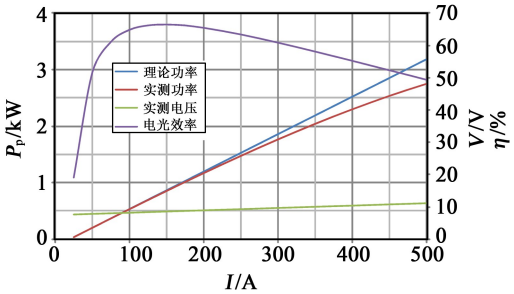


图 8 样品 c 在 500 A 下测试结果

从图 8 中可以看出：在高电流情况下，实际测量峰值功率明显小于理论值，这主要是由大电流导致芯片温度上升所致。在 200 A 电流下，两者几乎重合，说明此时散热理想。

3.1 阵列模块寿命试验

将功率测试正常的金刚石热沉＋沟槽陶瓷封装的四只阵列样品(编号为 A，B，C 和 D)，在重复频率为 100 Hz、脉冲宽度为 200 μs、工作温度 70 ℃条件下进行寿命试验，试验条件如表 6。寿命试验过程中样品功率变化如图 9 所示。

表 6 样品寿命试验条件

试验步骤	工作电流/A	工作时间/h
1	200	1 008
2	250	504
3	300	216
4	200	96

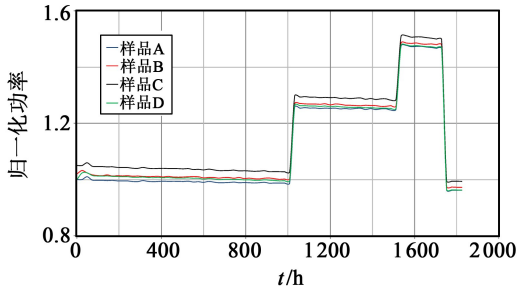


图 9 四只样品老化功率变化曲线

A～D 四只样品在经过 1 800 h 高温大电流寿命试验后，功率分别下降了 1.31%，1.13%，2.30% 和 0.46%；样品在经过大电流逐步加速等所有试验后，功率分别只下降了 3.83%，3.78%，5.65% 和 3.76%。

4 结论

本文提出了一种新型的背冷式大功率半导体激光器模块封装结构，模拟及实验结果表明，这种新型的 CD 金刚石热沉＋凹槽 AlN 陶瓷封装结构，为高温高密度半导体激光器阵列提供了一种优化解决方案。在 20 ℃工作温度、500 A 电流(0.5% 占空比)条件下，采用优化方案封装的 808 nm 波长 5Bar 阵列的输出峰值功率达到 2 747 W，光功率密度高达 15 261 W/cm^2；在 70 ℃工作温度、200 A 电流(1% 占空比)条件下，光功率密度达到 6 200 W/cm^2，输出功率为 1 065 W，电光转换效率为 59.2%；在 200～300 A 大电流、70 ℃高温寿命试验中表现出良好的可靠性。

参考文献：

[1] 陈良惠，杨国文，刘育衔. 半导体激光器研究进展[J]. 中国

激光，2020，47(5)：1-19.
Chen Lianghui，Yang Guowen，Liu Yuxian. Development of semiconductor lasers[J]. Chinese J. of Lasers，2020，47(5)：1-19.

[2] 王　辉，王德宏. 导体激光器焊接的热分析[J]. 微纳电子技术，2008，45(7)：428-431.
Wang Hui，Wang Dehong. Thermal analysis of the semiconductor lasers welding [J]. Micronanoelectronic Technol.，2008，45(7)：428-431.

[3] 陈天奇. 高功率半导体激光器阵列热应力/应变特性研究[D]. 北京：中国科学院大学，2018.
Chen Tianqi. Study on thermal stress/strain characteristics of high power semiconductor laser array[D]. Beijing：University of Chinese Academy of Sciences，2008.

[4] 王警卫，侯　栋，高立军，等. 全无铟封装传导冷却高功率半导体激光器叠阵[J]. 光电产品与资讯，2016，7(2)：31-36.
Wang Jingwei，Hou Dong，Gao Lijun，et al. All indium free encapsulated conductive cooled high power semiconductor laser stack[J]. OE Product & News，2016，7(2)：31-36.

[5] Agrawal G P，Dutta N K. Quantum-Well Semiconductor Lasers[M]. US：Springer，1986：426-471.

[6] 江剑平. 半导体激光器[M]. 北京：电子工业出版社，2000.
Jiang Jianping. Semiconductor Laser[M]. Beijing：Publishing House of Electronics Industry，2000.

[7] Jerome B K. Semiconductor Lasers and Heterojunction LEDs [M]. NewYork：Academic Press，1977.

作者简介：

杨　璠(1962—)，男，重庆人，高级工程师，主要从事半导体光源、探测器的光纤耦合封装及大功率半导体激光器阵列封装的研究和开发工作；

刘刚明(1974—)，男，重庆人，高级工程师，主要从事大功率半导体激光器研究和开发工作。

(上接第357页)

[7] Lee M J，Park Y，Suh D S，et al. Two series oxide resistors applicable to high speed and high density nonvolatile memory [J]. Adv. Materials，2010，19(22)：3919-3923.

[8] Zhang H，Wu Z，Yang W，et al. Large phase-transition hysteresis for nanostructured VO_x film prepared on ITO conductive glass by DC reactive magnetron sputtering [J]. Vacuum，2013，94：84-86.

[9] Marvel R E，Harl R R，Craciun V，et al. Influence of deposition process and substrate on the phase transition of vanadium dioxide thin films[J]. Acta Materialia，2015，91：217-226.

[10] Suh J Y，Lopez R，Feldman L C，et al. Semiconductor to metal phase transition in the nucleation and growth of VO_2 nanoparticles and thin films[J]. J. of Appl. Phys.，2004，96(2)：1209-1213.

[11] Sun H，Zhang B，Bian J，et al. Stability and heating rate dependent metal-insulator transition properties of VO_2 film grown by MBE[J]. J. of Materials Science Materials in Electronics，2017，28(22)：1-6.

[12] 何长安，王庆国，曲兆明，等. 磁控溅射工艺对二氧化钒薄膜生长及场致相变性能的影响[J]. 功能材料，2018，423(12)：185-189.
He Chang'an，Wang Qingguo，Qu Zhaoming，et al. Effect of magnetron sputtering on the growth and field-induced phase transition of vanadium dioxide thin films[J]. J. of Functional Materials，2018，423(12)：185-189.

[13] Li D，Li M，Pan J，et al. Hydrothermal synthesis of Mo-doped VO_2/TiO_2 composite nanocrystals with enhanced thermochromic performance[J]. ACS Appl. Materials & Interfaces，2014，6(9)：6555.

[14] 王　宏，张文杰，朱圣龙，等. 退火对 TiO_2 磁控溅射薄膜结构和光催化活性的影响[J]. 材料保护，2010，2(43)：57-60.
Wang Hong，Zhang Wenjie，Zhu Shenglong，et al. Effect of annealing on microstructure and photocatalytic activity of magnetron sputtered titanium dioxide films [J]. Materials Protection，2010，2(43)：57-60.

[15] Lopez R，Haynes T E，Boatner L A，et al. Size effects in the structural phase transition of VO_2 nanoparticles[J]. Physical Review B，2002，65(22)：224113.

[16] 林　华，黄维刚，图铭旌. VO_2 的相变原理及影响相变的因素[J]. 功能材料，2004，35：188-191.
Lin Hua，Huang Weigang，Tu Mingjing. Theories and the influence factors of VO_2 phase transition[J]. J. of Functional Materials，2004，35：188-191.

作者简介：

高振雨(1997—)，男，硕士研究生，研究方向为半导体薄膜与器件；

何春清(1973—)，男，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为凝聚态物理及核技术应用。