

激光与光电子学进展

基于 SiP 技术的 VCSEL 阵列微系统封装

王栋皓^{1,2,3}, 付登源^{1,2,3}, 赵俊元^{1,2,3}, 赵松庆^{4,5}, 吴根水^{4,5}, 陈海燕^{4,5}, 朱银芳^{1,2,3*}, 杨晋玲^{1,2,3**}

¹中国科学院半导体研究所半导体集成技术工程研究中心, 北京 100083;

²中国科学院大学材料科学与光电工程中心, 北京 100049;

³传感器技术国家重点实验室, 上海 200050;

⁴中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009;

⁵航空制导武器航空重点实验室, 河南 洛阳 471009

摘要 针对半实物仿真系统的需求, 基于系统级封装技术提出了一款由垂直腔面发射激光器(VCSEL)激光器阵列、激光器驱动芯片、电源芯片等组成的微系统, 并介绍了基于微机电系统微纳加工技术的 VCSEL 激光器阵列的制造工艺流程。该激光器的封装方法具有集成度高、可靠性高等特点, 相比于其他驱动及封装方法大大提高了驱动效率和空间利用率, 因此在光学成像、通信、互联等领域具有广泛应用前景, 为实现半实物仿真中激光成像发生器奠定了基础。

关键词 激光光学; 激光器阵列; 垂直腔面发射激光器; 系统级封装; 微系统; 微机电系统; 微纳加工

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2114011

VCSEL Array Microsystem Packaging Based on SiP Technology

Wang Lihao^{1,2,3}, Fu Dengyuan^{1,2,3}, Zhao Junyuan^{1,2,3}, Zhao Songqing^{4,5}, Wu Genshui^{4,5},
Chen Haiyan^{4,5}, Zhu Yinfang^{1,2,3*}, Yang Jinling^{1,2,3**}

¹Engineering Research Center for Semiconductor Integrated Technology, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai 200050, China;

⁴China Airborne Missile Academy, Luoyang, Henan 471009, China;

⁵Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Airborne Guided Weapons, Luoyang, Henan 471009, China

Abstract This paper proposes a microsystem composed of vertical cavity surface-emitting laser arrays, laser driver chips, and power chips based on system in package technology to meet the needs of the hardware-in-the-loop simulation system. In addition, a manufacturing process flow based on microelectromechanical systems technology was developed. The packaging method has a high level of integration and high reliability. Driving efficiency and space utilization are significantly improved compared with other driving and packaging methods. Consequently, it has broad application prospects in optical imaging, communication, and interconnection, laying the groundwork for realizing the laser-imaging generator in semi-physical simulation systems.

收稿日期: 2020-10-16; 修回日期: 2020-11-13; 录用日期: 2020-12-27

基金项目: 航空科学基金项目(20170136003)

通信作者: *yfzhu@semi.ac.cn; **jlyang@semi.ac.cn

Key words laser optics; laser arrays; vertical cavity surface-emitting laser; system-in-package; micro-system; micro-electro-mechanical system; micro-nano processing

OCIS codes 140.3290; 140.7260; 230.1480; 230.3120

1 引言

随着新一代制导装备系统及红外技术的发展,激光成像制导与多模制导技术成为光电精确制导技术的发展方向。当今世界各国争先研究激光成像半实物仿真技术^[1]。半实物仿真系统能在实验室内对激光成像仪、寻的器及各种激光探测系统的动态性能进行测试和评估,其核心技术是动态激光图像生成。激光动态图像生成技术是指在实验室条件下模拟产生激光目标和背景,为被测试的激光成像系统提供激光目标和背景的图像源。激光动态图像生成技术由计算机图像生成系统和激光成像发生器系统两部分组成,激光成像发生器是激光动态图像生成技术中的核心部件^[2]。当探测纵深分辨率达到毫米量级时,激光器单元发射激光时延将达到皮秒量级,这就要求激光器的响应速度必须达到皮秒量级。随着图像分辨率要求的提高,激光器还必须形成大规模二维阵列。这就要求激光成像发生器不仅具有大型二维阵列规模,而且具有较低延迟响应速度、高发光功率和宽动态范围等优越性能。基于微电子机械系统(MEMS)技术的垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有响应速度快、易于阵列化、发射功率高、动态范围大等优点,将成为用于半实物仿真中激光成像发生器的主要发展方向^[3-7]。

随着 VCSEL 阵列规模和输出功率的不断增大,不仅其驱动难度加大,产生的热量也在不断提高。由此导致的器件响应延迟、阈值电流增大、斜率效率与输出功率下降、波长红移等一系列问题,严重影响器件的电光稳定性与寿命^[8-11]。因此,提高器件的驱动效率以及封装水平,以达到稳定的电光性能、提高器件可靠性显得至关重要。Hasnain 等^[12-13]利用激光输出波长随温度的变化关系研究了器件在工作中有源区的温升;Eitel 等^[14]研制了 12×3.3 Gb/s 并行激光器驱动电路和光发阵列;Kageyama 等^[15]先后对多种金属焊料封装制备的激光器器件进行了大量研究,提出了片间无空洞填充结构,降低了贴片层的热效应。但是对于更大规模的激光器阵列还没有相关的高性能驱动封装方法。

目前对于高性能大规模 VCSEL 阵列芯片的需

求日趋增加,例如:需要更大的阵列规模、更高的发光功率,更快的响应时间以及更高的驱动同步率,更高可靠性的封装等等。因此,迫切需要开发响应时间短,集成度高,可靠性强的大规模激光器阵列的驱动和封装方法。本文提出的封装结构采用三维堆叠封装,基于微纳加工工艺对散热结构进行图形化,具有集成度高、导热性能优良等优点。

2 系统级封装概述

系统级封装(SiP)是指在一微系统中,集成多种芯片、模块、子系统部件,通过合理有效的封装方式实现内部各部件的互联,并能完成独立的一种或多种功能^[16]。SiP 系统级封装是通过封装的形式来实现系统功能的有机整体,并对系统内的多颗裸芯片进行物理保护、电气连接。其中,物理保护主要为系统提供合适、稳定的工作环境,并避免机械振动和热效应等对系统影响;而电气连接不仅包含系统内部与和封装外部电路的电学互联,SiP 还承担着对内部芯片之间的电气互联。由于内部芯片互联的复杂性,SiP 需要基板,而普通封装不一定需要基板。

SiP 由结构可分为三类^[17]:1)2D SiP,在基板的同一侧将各芯片排列并封装在系统内;2)堆叠 SiP,在基板的两侧采用物理方法将多个芯片堆叠整合封装;3)3D SiP,在 2D 和堆叠 SiP 基础上,把多个芯片、模块、组件等进行层叠互联,构成立体封装,也称为堆叠型 3D 封装。

SiP 的优点在于集成了原本独立分离的芯片、模块、组件,大大减小了系统体积,而且由于较高的集成度,电学互联距离缩短,也减小了各种电学寄生效应,增强了各部件的电磁兼容性、提高了响应速度、降低了系统整体功耗。

近年来 SiP 的发展趋势主要包括^[18]:1)封装基板的功能性增强,不仅仅只是提供芯片的物理固定,而逐渐根据系统功能、应用场合等设计基板;2)功能性组件增多,在集成电路、无源电子器件等基础上增加了 MEMS 器件、激光器等芯片组件,实现更大规模、更多功能的系统集成封装;3)逐渐与微纳加工工艺兼容,具有特征尺寸更小,精度更高、

可大规模制作的特点。

3 SiP 设计方案

基于 SiP 技术的 VCSEL 系统集成结构示意图如图 1 所示。该结构主要由基板、VCSEL 激光器阵列、驱动模块以及热沉外壳组成。驱动模块为激光器提供电学驱动信号,并控制激光器阵列的工作状态,基板为 SiP 封装提供机械固定和电学连接衬底。激光器阵列和驱动模块分列于基板的两侧,基板与激光器阵列和驱动模块之间分别设计有导热膜和隔热膜结构,用来避免工作时激光器产生的高温对驱动芯片的影响。在基板表面还设计有金属传输引线和电极,通过金属传输线(金线)来实现封装系统内以及对封装体外的电学互联。而基板与热沉结构合为一体,为整个系统提供封装支撑以及热量传递。

3.1 激光器在基板上分布

对于 VCSEL 激光器,器件的输出功率与温度

之间的关系可以表示为

$$P = \frac{h\nu}{q} (I - I_{th}) \eta_d \left(1 - \frac{\Delta T}{T_{off}}\right), \quad (1)$$

式中: h 为普朗克常量; ν 为光子频率; q 为电子电量; I 为激光器注入电流; I_{th} 为激光器阈值电流; T_{off} 为截止温度,数值为 170 K; ΔT 为器件内部温升。由(1)式可知,当器件温度不断升高时,其输出功率不断下降,当器件温度超过截止温度时输出功率可降至零。除了输出功率,由于温度的影响,各层材料之间热膨胀系数的差别也会在内部产生应力,各材料之间扩散加剧,导致器件退化,缩短激光器的使用寿命。而在大规模 VCSEL 阵列中,器件之间存在热相互作用,这会降低 VCSEL 整体器件的性能。

首先对单个激光器器件工作时的温度梯度进行仿真,结果如图 2 所示,图 2(a)为功率为 5 mW 的单个激光器工作时的温度分布图,图 2(b)为径向温度曲线。

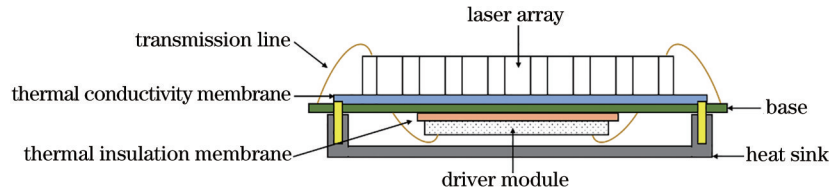


图 1 系统封装结构示意图

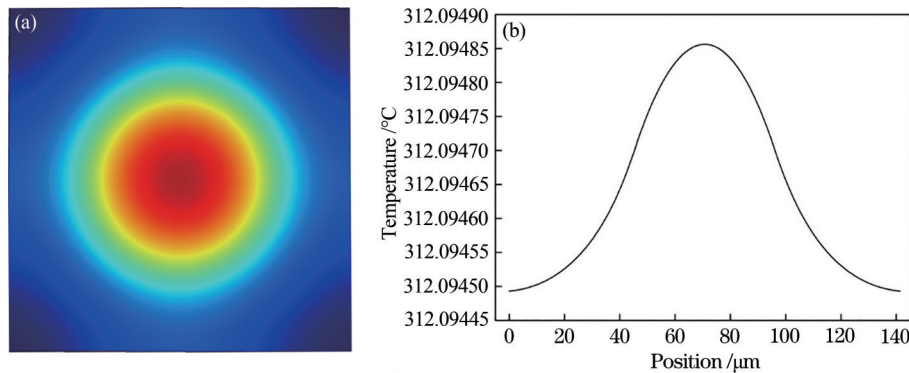


图 2 单器件工作温度特性。(a)温度分布图;(b)径向温度曲线

Fig. 2 Operating temperature characteristics of single device. (a) Temperature distribution diagram; (b) radial temperature curve

可以看出,单个器件的温度扩散呈圆形分布,扩散范围约为 $140 \mu\text{m}$ 。此时,圆心处的器件可以视为一个瞬时热源,并产生一个热脉冲,初始时间为 0 时,热量来不及向周围扩散,器件在极小的范围内产生温升,即圆心处温度处于最高值;随着时间的推移,热量向四周扩散,温度分布逐渐趋于平缓。

不同时间和位置的温度可表示为

$$T(x, \tau) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\alpha\tau}} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{4\beta\tau}\right], \quad (2)$$

式中: α 为器件衬底的扩散系数; β 为常数; $2\Delta x = 2|x-x_0|$ 称为两个相邻器件的扩散长度。

可见,在脉冲持续时间内,若相邻器件间的间距远大于相应的有效扩散长度,则可以认为此时相

邻器件的热相互作用已被大幅削弱了,从而能有效地改善列阵的散热效果。综合考虑整体封装尺寸以及散热效果,经优化后,器件间隔为有效扩散长

度的 1/2 时,可以获得较小封装尺寸以及较好的散热效果,64×64 激光器阵列的温度特性仿真结果如图 3 所示。

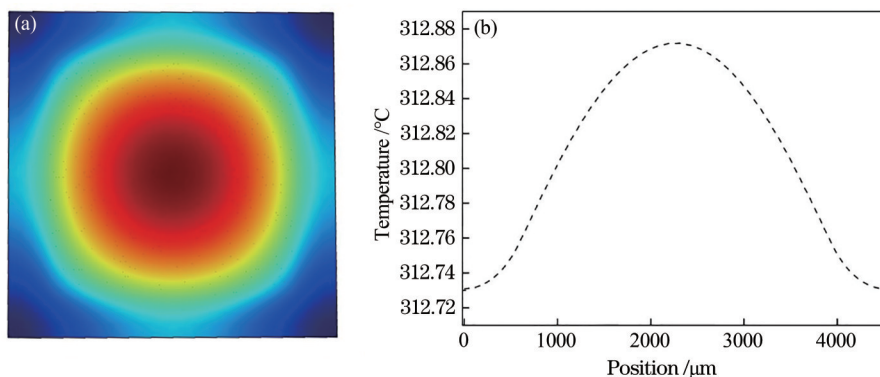


图 3 器件阵列的工作温度特性。(a)温度分布图;(b)径向温度曲线

Fig. 3 Operating temperature characteristics of the device array. (a) Temperature distribution diagram; (b) radial temperature curve

3.2 大规模激光器阵列驱动模块设计

激光器驱动电路的作用是将输入的数字信号进行放大,并转化为相应的电流/电压信号来驱动激光器的开启或关断。

如图 4 所示,激光器驱动模块包括激光器驱动芯片和激光器控制芯片:其中,激光器驱动芯片中含有输入缓冲模块、主放大电路和输出缓冲模块,主要功能是使激光器耦合电路获得足够大摆幅的数字信号以调节驱动激光器发光。输入缓冲模块进行激光器和电路间的阻抗匹配,减小输入反射;主放大电路实现驱动信号高增益、低噪声的放大;输出缓冲模块通常为差分电路,可以将高速驱动信号无损传递到片外负载,减少驱动信号间干扰。

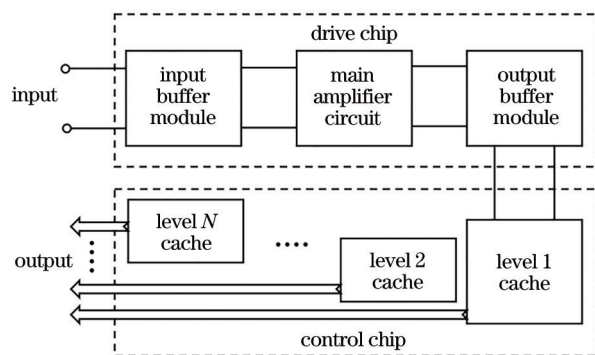


图 4 激光器阵列驱动模块示意图

Fig. 4 Schematic diagram of laser array drive module

激光器控制芯片由多级缓存结构共同组成,随着激光器阵列规模的增加,单个激光器之间会出现驱动信号的延迟,导致在快闪等模式下工作的激光器阵列产生误差,多级缓存结构根据激光器阵列规

模选用一级缓存至 n 级缓存工作,其中, $n \geq 1$,根据激光器阵列规模的大小以及单个激光器的响应时间进行补偿计算,实现对该多级缓存结构的设置,经激光器控制芯片中的缓存芯片处理后再对激光器阵列进行驱动。例如:单根信号传输线控制 k 个激光器子阵列,每个激光器子阵列信号响应时间为 t ,此时缓存级数 $n=k$,每级缓存结构信号延迟为 $(k-1) \times t$ 。因此,通过控制每一级缓存的信号延迟时间,可以实现大规模 VCSEL 阵列的快速、高响应驱动。

3.3 SiP 制造工艺

所设计的基于 MEMS 技术的微纳制造工艺流程如图 5 所示,主要包括:1) 清洗、准备承载基板,在设计位置打孔至贯穿基底;2) 在小孔中采用电镀工艺填充 Cu 金属,作为屏蔽孔和导热孔,并在基板上制作 Au 电极和微带线作为电气连接;3) 采用光刻-剥离工艺在基板背面图形化 Al-聚酰亚胺热反层;4) 采用钢网作为掩模在基板正面图形化导热硅脂,并与导热孔相接;5) 固定 VCSEL 阵列和激光器驱动模块,并通过引线键合方式形成电学连接;6) 通过导热孔连接热沉结构,完成封装。

在封装体中,导热膜由激光器器件的排列方式来图形化,增大了导热膜的传热效率。而屏蔽孔和对应的微带线在器件工作时全部接地,利用其高电导率和屏蔽性能,可有效降低驱动信号间的串扰,提高器件的响应速度,提升系统可靠性。基于微纳工艺的制造方法具有较高的精度和工艺兼容性,并且可以实现大批量规模化制作。

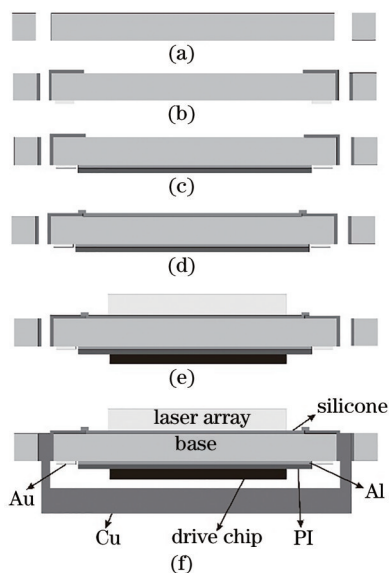


图 5 制造工艺流程截面图

Fig. 5 Cross-sectional view of manufacturing process

4 结 论

本文设计了一种基于 SiP 技术的 VCSEL 阵列系统。对大规模激光器阵列的热特性进行了深入分析,优化了阵列排布,并针对激光器阵列延迟问题设计了驱动模块,最后提出了基于微纳加工工艺的系统封装方法。该系统为实现半实物仿真中激光成像发生器奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Gao H, Zhao S Q. Exploration of applications of IR image simulator[J]. Infrared Technology, 2014, 36(5): 409-414.
高辉, 赵松庆. 红外成像目标模拟器的应用探索[J]. 红外技术, 2014, 36(5): 409-414.
- [2] Zhao S Q, Wu G S, Liu X N, et al. 256 × 256 unit element MOS minute resistance array dynamic scene producing device[J]. Aero Weaponry, 2015(6): 40-45.
赵松庆, 吴根水, 刘晓宁, 等. 256 × 256 元 MOS 微电阻阵列动态场景生成装置[J]. 航空兵器, 2015(6): 40-45.
- [3] Zhao S Q, Wu Y G. Some problems in optical projection system design of infrared imaging target simulator[C]//Proceedings of the 2001 Annual conference of The Chinese Society for System Simulation, August 1, 2001, Dalian, China. Beijing: China Simulation Federation, 2001: 470-475.
赵松庆, 吴永刚. 红外成像目标模拟器光学投射系统

设计中的几个问题[C]//二〇〇一中国系统仿真学会学术年会论文集. 大连, 中国. 北京: 中国系统仿真学会, 2001: 470-475.

- [4] Zhao S Q, Wu Y G, Liu X N, et al. Test method for radiation characteristics of MOS resistor array infrared dynamic scene simulator[C]//Seminar on infrared Imaging System Simulation Test and Evaluation Technology, September 26, 2011, Ningbo, China. Beijing: Chinese Society of Astronautics, 2011: 37-41.
赵松庆, 吴根水, 刘晓宁, 等. MOS 电阻阵列红外动态场景模拟器辐射特性测试方法[C]//第三届红外成像系统仿真测试与评价技术研讨会, 宁波, 中国. 北京: 中国宇航学会, 2011: 37-41.
- [5] Zheng Z, Zou Y G, Shi L L, et al. High-contrast grating structure design for liquid crystal tunable vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 011402.
郑舟, 邹永刚, 石琳琳, 等. 液晶可调谐 VCSEL 中高对比光栅结构的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 011402.
- [6] Liu F H, Gong X, Zhang Y N, et al. Research progress on 808 nm VCSEL-array-pumped solid-state lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(12): 120001.
刘芳华, 龚鑫, 张雅楠, 等. 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[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(12): 120001.
- [7] Yan Y Y, Chen Z W, Qiu J, et al. Effect of package on luminescence characteristics of high-power VCSEL with narrow pulse[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0814001.
颜颖颖, 陈志文, 邱剑, 等. 封装对大功率 VCSEL 窄脉冲发光特性的影响[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0814001.
- [8] Lim Y L, Nikolic M, Bertling K, et al. Self-mixing imaging sensor using a monolithic VCSEL array with parallel readout[J]. Optics Express, 2009, 17(7): 5517-5525.
- [9] Safaisini R, Joseph J R, Dang G T, et al. Scalable high-power, high-speed CW VCSEL arrays[J]. Electronics Letters, 2009, 45(8): 414-415.
- [10] Nakwaski W, Osinski M. Thermal analysis of etched-well surface-emitting diode lasers[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1991, 4(12): 541-543.
- [11] Nakwaski W. Dynamical thermal properties of stripe-geometry laser diodes[J]. IEE Proceedings I Solid State and Electron Devices, 1984, 131(3): 94-102.

- [12] Hasnain G, Tai K, Yang L, et al. Performance of gain-guided surface emitting lasers with semiconductor distributed Bragg reflectors[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1991, 27(6): 1377-1385.
- [13] Tell B, Brown-Goebeler K F, Leibenguth R E. Thermal characteristics of deep red (0.77 μm) vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1992, 4(6): 521-523.
- [14] Eitel S, Hunziker S G, Vez D, et al. Multimode VCSELs for high bit-rate and transparent low-cost fiber-optic links[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4649: 183-190.
- [15] Kageyama N, Torii K, Morita T, et al. Efficient and reliable high-power laser diode bars with low-smile implementation[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(8): 991-994.
- [16] Petzold M, Altmann F, Krause M, et al. Micro structure analysis for system in package components: novel tools for fault isolation, target preparation, and high-resolution material diagnostics[C]//2010 Proceedings 60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), June 1-4, 2010, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2010: 1296-1302.
- [17] Tekin T. Review of packaging of optoelectronic, photonic, and MEMS components[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(3): 704-719.
- [18] Tummala R. Fundamentals of microsystems packaging [J]. *Microelectronics International*, 2003, 20(1): 60.