

高速光器件封装技术发展趋势

Development Trend of High-Speed Optical Device Packaging Technology

张一鸣/ZHANG Yiming^{1,2}

刘宇/LIU Yu^{1,2}

张志珂/ZHANG Zhike³

(1. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 北京大学, 北京 100871)

(1. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

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

3. Peking University, Beijing 100871, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 04-0046-005

摘要: 针对 5G 应用场景, 高速光模块起着重要的作用, 其设计、制备和封装受多方面的因素限制。就封装这一因素对光模块高频特性的影响进行了详细分析, 并提出了 3 种不同维度的设计方案。基于此, 针对性地开发了 3 种符合应用标准的高速光模块。认为在未来大规模、高密度、高速率光电集成器件中, 封装技术将会朝着多维度、多形态的方向发展。

关键词: 三维封装; 高速直调激光器; 单片集成外调激光器; 多波长激光器

Abstract: High-speed optical module plays an important role in 5G application scene, and its design, fabrication and packaging are affected by many factors. In this paper, the influence of high-frequency characteristics of the optical module induced by packaging is analyzed in detail, and three different dimensions of the design scheme are proposed. Then three kinds of high-speed optical modules conforming to the application standard have been developed. It is considered that in the future, the packaging technology will be developed in the direction of multi-dimension and multi-form in the large scale, high density and high rate optoelectronic integrated devices.

Keywords: three-dimension packaging; high-speed directly modulated laser; monolithic integrated electro-absorption modulated laser; multi-wavelength laser

1 面向 5G 的光模块需求及挑战

1.1 光电模块的需求

随着物联网、大数据和云计算技术的飞速发展, 信息交互所需要的数据通信量呈现出爆炸式增长, 应运而生的光纤通信技术随之成为能够实现高速信息传输的首选技术。其中, 作为支撑光学通信发展的基础部件——半导体激光器, 其结构与性能也在不断被优化, 以满足现代通信需求。相比于 4G, 5G 的基站发生变化, 从 4G 的射频拉远单元 (BBU)、基带处理单元 (RRU) 两级结构演进到 5G 的集中单元 (CU)、分布单元 (DU) 和有源天线处理单元 (AAU) 三级结构, 进而衍生出前传、中传和回传 3 个网络。5G 的概念提出后, 对光模块的需求大幅度增加, 这个需求主要体现在 2 个方面: 一是对光模块数量的需求, 除了传统前传

和回传网络中需要的光模块之外, 在中传的环节, 也即 CU 和 DU 连接的中传环节, 也需要增加新的光模块; 二是对光模块速率的需求, 4G 前传主要是 6G 光模块, 后逐步升级到 10 G 光模块, 回传在 4G 初期采用 GE, 后逐步升级到 10 G, 而 5G 通信中仅 5G 前传就需要 25 G/50 G 光模块数千万只, 回传速率则更高, 需要 100 G 的光模块, 回传的汇聚层将会升级到 200 G 或 400 G^[1]。

1.2 光电芯片封装的挑战

据工信部表示: 5G 系统将于 2020 年实现商业化, 在制定标准的进程中, 25 G/100 G 光模块标准得到大多数运营商的肯定。研究者们不断改

良半导体材料的特性, 研制满足速率标准的、更集成化、更小型化的半导体光模块, 大幅度提高了数字信号和模拟信号的传输质量。

高速光模块的开发需要经过 3 个流程: 芯片设计与制造、高频电极和电路设计、光电子器件封装和测试。过去, 人们一直认为提高高频响应特性的关键在于芯片的设计与制作, 这其实忽视了封装设计的重要性。然而封装作为模块实用化的最后一步, 也是关键的一步, 对器件能够实现良好的高频响应有着至关重要的意义, 失败的封装设计将会导致器件的性能大大降低, 甚至不能使用, 使前期制作功亏一篑。如今, 模块的微波封装测试技术作为微波光子学领域

收稿日期: 2018-07-16
网络出版日期: 2018-08-02

的重要研究课题之一,已经成为研究者们争相开发的新技术。目前为止,关于封装完备的光电模块在各大期刊上都有详尽描述。早期 EBBERG A 等人于 2000 年报道了一种采用 TO 封装形式无制冷的多量子阱直调激光器,传输速率达到 10 Gbit/s^[3]。次年,OKAYASU M 等人报道了蝶形封装的直调激光器模块,3 dB 带宽已达到 15 GHz^[4]。2015 年,中科院半导体所报道了一种蝶形封装的高速窄线宽激光器模块,3 dB 带宽达到 30 GHz,同时线宽只有 130 kHz^[5]。随后,他们通过对封装结构的改善,将直调激光器模块的带宽提高到 32 GHz^[6]。这些产品已满足 5G 应用中 25 G 光模块的需求,只是还不能进行大批量的工业生产,因为还需要在操作稳定性、工艺重复性等方面进行优化。而对于 5G 应用中 100 G 光模块的要求来说,单个激光器已无法满足这么高的传输速率,于是多波长直调激光器阵列 (MLA) 应运而生。目前,100 G 光模块的实现主要是利用 4 个波长的直调激光器芯片,每个芯片数字带宽达到 25 Gbit/s,大大减轻了单波长的压力。早在 1987 年,就出现了多波长激光器芯片的报导,OKNDA H 等人使用四分之一波长移位结构,实现一个 5 通道 1.3 μm 分布式反馈激光器 (DFB) 阵列^[6],单通道调制带宽超过 4 GHz。1990 年,NEC 的 YAMAGUCHI M 等人采用了半绝缘的掩埋异质结构实现了 1.5 μm 波段 4×2.5 Gbit/s 激光器阵列^[7]。2008 年,1 550 nm 波长下单片集成 4×25 Gbit/s 的 DBR 激光器阵列问世,该芯片满足 100 Gbit/s 以太网传输的需求^[8]。之后,第 1 个小型化 1 310 nm 波长的 100 Gbit/s (4×25.8 Gbit/s) 光发射模块 (TOSA) 也随即问世^[9]。在 2014 年,电子电信研究院 KWON O K 研究团队制作出混合集成 100 Gbit/s (10×10 Gbit/s) 直调激光器阵列,但未进行封装,只是将整体固定在可散热的钨铜衬底上^[10]。单管光模块的封装已经具备良好的

基础了,但是多通道光模块封装技术的发展还比较缓慢,存在电串扰大、光耦合效率低、装配工艺精度低、模块体积大等问题。因此在 5G 应用中,更高速单管光模块封装和多通道光模块封装是研究的重点。

对于单个器件和阵列器件的封装,应考虑以下几个方面:

(1) 如何设计高效的光耦合系统以及控温系统;

(2) 单管器件向高速率大带宽发展时,如何利用封装带来的寄生效应补偿芯片的不足;

(3) 阵列器件向小型化、集成化发展时,如何实现在有限空间内完成多路微波信号的馈入,以及完成结构变换、模场匹配等复杂的结构设计。

2 25 G/100 G 光模块封装的关键技术

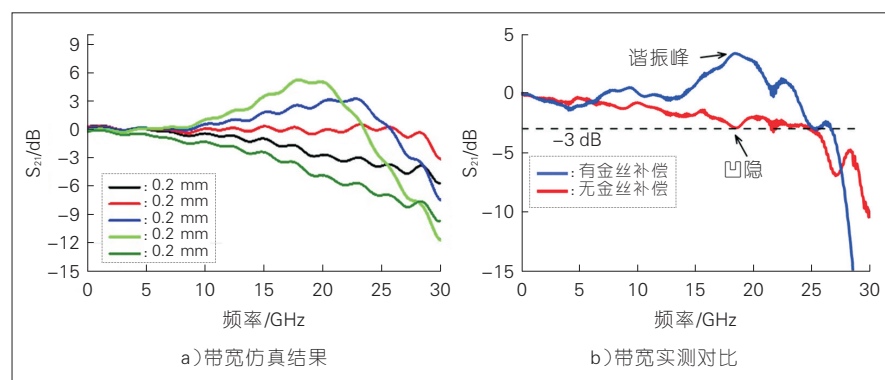
2.1 高速光模块的一维封装技术

仅从器件结构优化这一角度来说,半导体激光器芯片的最大调制带宽能够达到 40 GHz。这对于 5G 场景应用中所需的 25 GHz 光模块是足够的,那么对于拥有大带宽的芯片来说,封装成为限制器件整体带宽的主要因素。通常,完整的封装设计包括电、热、光、机械设计。在进行封装设计时主要从如何完整的传输微波信号,如何控制芯片工作时的温度状态,如何高效率地进行光电转换以及如何保证器件的高可靠性这几个方面进行考虑。对于单管激光器来说,光耦合、控温系统以及机械设计已经是成熟的技术,只有影响器件带宽性能的高频微带电路是一直在不断优化改进的,接下来我们主要对电连接中高频微带电路设计作重点分析。

一般使用微带线、共面波导以及接地共面波导这几种传输线结构实现电连接,主要完成信号馈入、信号传递等功能,需要注意的是:不同传输线结构之间还存在特征阻抗变换和微波模式匹配的问题。电极间的

连接常用金丝键合的方式,但是金丝键合会带来电寄生效应^[11]。以往认为电寄生效应只会恶化电网络的传输响应,但是经研究发现:金丝引入的电感和电极焊盘带来的电容会产生谐振,该谐振构成低通型网络,出现类似于滤波器的频率响应特性,利用这一特性可以扩展其截止频率,对光电子器件响应特性进行补偿,从而提高器件的高频响应特性。因此,我们利用先进系统设计 (ADS) 仿真软件建立激光器等效电路模型,模型包括封装网络和本征芯片 2 部分。通过调节封装网络部分的电路模型,得到的模拟电路响应能够对实际封装给予指导意义。当金丝长度为 0 时,即没有补偿时,器件的响应曲线可以认为是器件的真实响应。随着金丝长度的增加,传输响应曲线逐渐抬升,带宽也在增加。这意味着金丝引起的谐振效应补偿了器件在高频处衰落的响应。当金丝长度增加到某一值时,该效应达到饱和,此时激光器带宽达到了最大值,并且带内平坦度良好。而当金丝长度继续增加时,金丝引起的谐振对器件高频处的衰落的补偿不一致,导致带宽逐渐下降,谐振峰很高。仿真结果如图 1 所示,在实际封装中,我们将金丝长度设置为 0.6 mm,得到与仿真一致的实测图。尽管激光器的小信号频响扩大了,但是如果观察激光器的相频特性,会发现在谐振频率处线性度会很差,通常这不利于高速数据的调制传输。对于通信系统而言,幅频特性和相频特性一样重要,相频特性不好,会导致相位信息丢失,在复杂的高阶调制中缺少一个维度的调制空间。因此,在带宽和平坦度之间我们需要找到平衡点,通过控制金丝的长度以满足不同的应用场景。

在此仿真实验指导下,中科院半导体所报道了一种封装结构,如图 2 所示。在这种封装结构中,芯片 n 极直接贴装在信号线上, p 极通过金丝与旁边的地线相连,金丝的长度可



▲ 图1 金丝寄生效应的仿真与实测图

控。并且,在转折处采用了扫掠弯头以确保阻抗和宽度的连续性。另外,为了将同轴接头转化为平面结构,研究者引入了一段过渡传输线,以保证电磁场的模场匹配。再结合等效电路,优化了直流偏置电路。这种封装方案提高了注入效率,降低了功耗,有效补偿了高频衰落,增大了带宽。最终封装后的该模块经测试,带宽达到了30 GHz。

2.2 100 G 混合集成二维封装技术

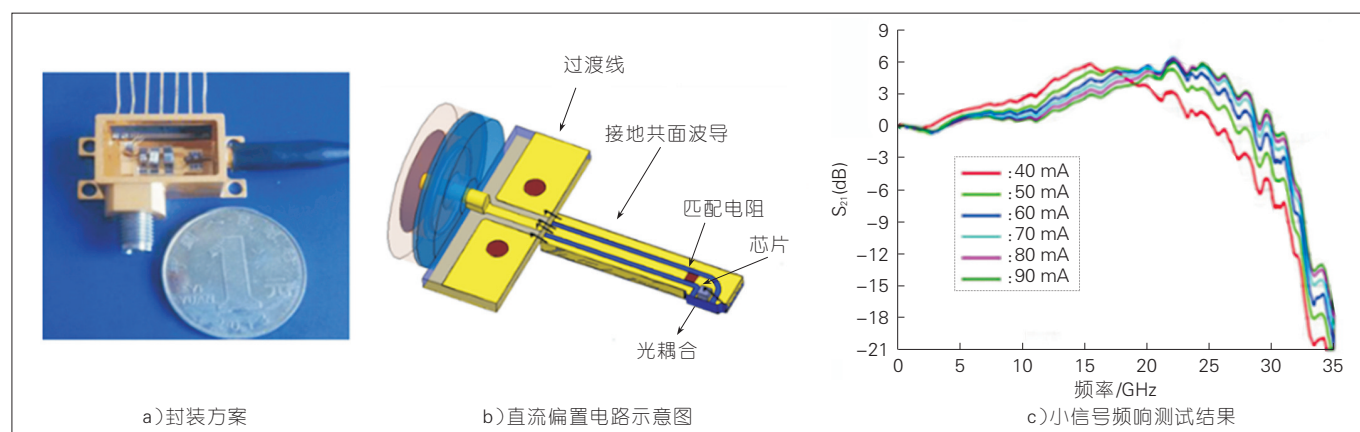
二维封装主要是针对阵列器件。目前100 G以太网中,受限单波长激光器的带宽,多波长激光器的提出与研究尤为必要,起初采用的方案是10×10 Gbit/s,通道数较多使得控制复杂,功耗也大。后来随着单管激光器带宽的提升,采用4×25 Gbit/s的方案成为更加可行的方案。

阵列器件的封装主要考虑的就

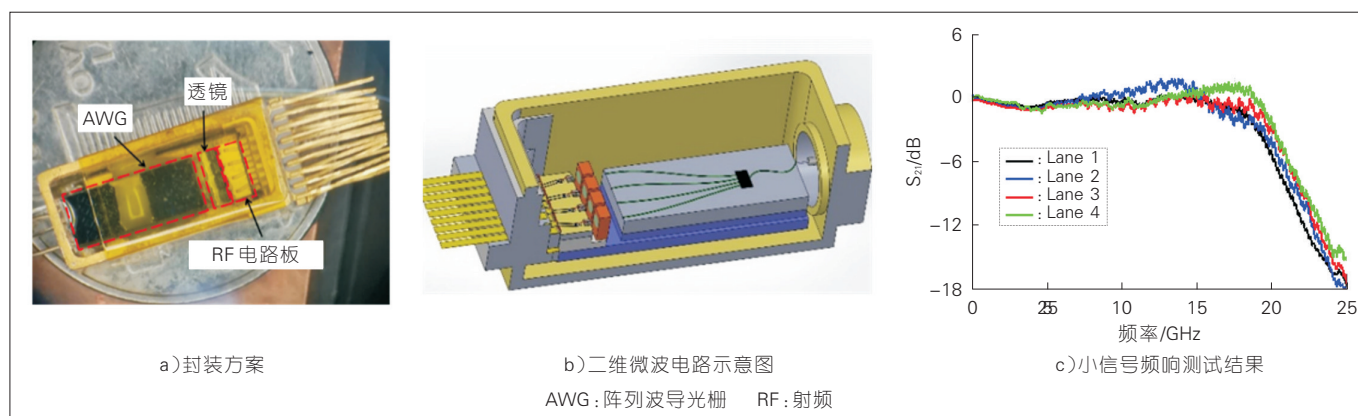
是多路信号的输入输出以及信号间串扰问题。以多波长激光器为例,管壳和微波电路设计都明显与单个激光器不同,多波长激光器的管壳除了起支撑、导热的作用外,还要完成多路微波信号的同时馈入。在单波长激光器封装中,仅使用单个高频连接器就可以实现这部分功能,比如标准的2.92 mm接头、1.85 mm接头、GPO接头、GPP0接头,但是在多通道阵列的封装中,这些连接器都因体积上的原因,无法被用于多通道射频的馈入。尤其对一个标准微尺寸的管壳而言,宽度只有4~5 mm,因此采用多层的陶瓷基板和地-信号-地共面波导电极引脚阵列来作为信号馈入的通道是一种可行的方法。中科院半导体研究所在2018年使用这种管壳,结合表面贴装技术,制作出了一种4×25 Gbit/s的发射模块。该结构的设计省去了常用于板级互连的印

制软带传输线,克服了管壳内外电路的高度差,射频和直流信号分开可控,并且该模块还可以方便地与外部控制电路PCB板集成在一起。除此之外,微波电路的设计也尤为重要,多路射频信号的排布以及结构变换都需要在有限的管壳空间内实现。该研究小组设计的4×25 Gbit/s的发射模块采用抗干扰能力强的接地共面波导传输线作为高频信号传输介质,并结合侧面金属化以及过孔设计实现上表面地电极与下表面地平面的连接,形成一个整体的“共地”结构,实现了良好的接地和屏蔽效果,改善了信号的完整性,有助于降低信号线之间的电串扰。对该电路结构测试的结果显示:相邻通道之间的串扰在30 GHz范围内均低于-22 dB。

该四通道阵列芯片经过上述的封装设计及工艺,实现了能够满足100 G-4 WDM-10标准的超紧凑,低功耗的多波长激光器模块^[12],如图3所示。管壳体积只有11.5 mm×5.4 mm×5.4 mm。内部包括4个波长间隔20 nm的直调激光器模块、四通道微波电路、4个聚焦透镜,以及带有LC光口的粗波分复用复用器。对该模块进行特性测试,得到测试结果为:4个通道的3 dB频率响应均在20 GHz左右;但是由于在芯片和合波器间没有足够的空间安置隔离器,使得光束在传输过程中产生了各种反射,这些反射最终会进入到激光器芯片有源腔,



▲ 图2 针对单管直调激光器的封装方案与测试结果



▲图3 针对4通道直调激光器的封装方案与测试结果

干扰载流子的流动,在带宽曲线上呈现出振荡现象。在光纤通信中,载流子的涨落会带来相对强度噪声,信号质量恶化、眼图闭合、误码率升高等现象。因此在实际光纤传输中,为了降低光反射对信号的影响,往往需要使用分立的光纤隔离器。目前,市面上一般将隔离器集成在LC光接口里,但这样会增加光接口的长度,而这很难应用到大规模高集成度的光电子芯片中。因此研究片上波导隔离器是十分有必要的。

2.3 100 G单片集成三维封装技术

三维封装是继二维封装之后提出来的新概念,目的是为解决更加小型化的集成芯片的封装问题,尤其是针对单片集成芯片的耦合封装。单片集成的光子芯片上功能元件众多,动辄几十个到几百个分立的功能部

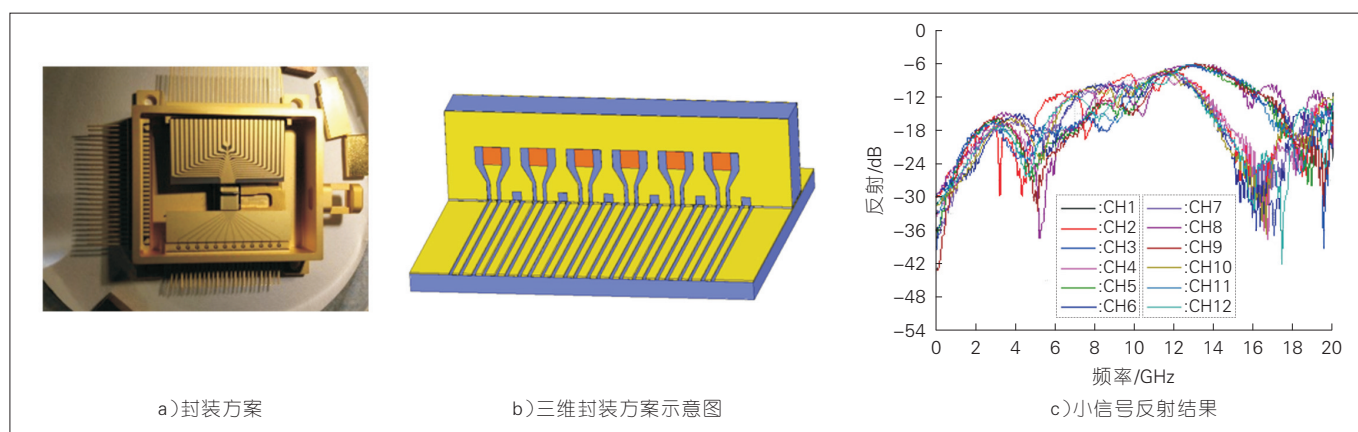
分;而集成芯片本身尺寸仅在百微米到几个毫米的量级,并行芯片间隔非常小;每个功能元件有时又不止一个电极,电极排布极其紧凑,电极功能也是多种多样。以多通道电吸收调制激光器阵列模块为例,激光器需要为其提供偏置电流的电极,调制器需要为其提供工作电压和高频调制加载的电极,器件的调谐电阻需要为其提供控制电流的电极;就整体模块化封装而言,还需要温度传感与控制系统的若干电极。数量繁多的电极引出键合引线十分密集,极易引起信道间的串扰。高频传输线的布局也是一个难点,布线的时候不如分立芯片灵活,极有可能出现长度多变,多种结构相互转换的情况。传输线过长容易产生谐振,电极弯曲会造成一定的场辐射,电极之间的互连也必然存在模场失配和阻抗失配的问题。以

上的因素都将导致高频微波信号的损耗和串扰,恶化激光器阵列模块的性能,需要在设计时加以重点考虑。

为了解决单片集成芯片的封装问题,中科院半导体所在2014年提出三维封装概念并完成了一款12通道电吸收调制激光器阵列^[3]。创造性地设计了三维匹配电阻阵列结构,再结合底面传输线阵列、采用植球技术,形成良好的立体式机械过渡与电学连接,如图4所示。经测试,匹配电路单元在20 GHz范围内,反射 S_{11} 在-10 dB以下;在40 GHz的范围内,反射系数 S_{11} 均在-6 dB以下,阻抗匹配状况良好且一致性好。对该封装结构进行管芯级测试,预计可以满足每通道10 GHz的多通道并行传输。

3 结束语

5G时代的开启将极大刺激光模



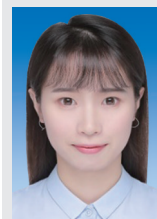
▲图4 针对12通道电吸收调制器的封装方案及测试结果

块产业的需求,在现有的封装工艺和基础上,研制出高带宽的单管激光器模块以及超小型高集成度的阵列激光器模块是科研界和产业圈亟待解决的问题。本文中,我们回顾了芯片封装的发展历程,指出了芯片封装的发展方向,从针对单管芯片的一维封装发展到针对阵列芯片的二维、三维封装,结合芯片结构以及指标需求来合理制定具体的封装方案。我们预计:随着倒装焊技术的成熟,未来的封装形式将结合倒装焊技术和多维度封装技术,进一步降低封装引入的寄生效应,扩大工艺操作的冗余度,压缩封装的成本。目前针对5G应用中大量部署的25 G、100 G光模块,国家还需要不断提高科研水平以及完善科研成果到产业链的平滑过渡,完成最终5G通信的大规模部署,满足前传、中传、后传网络不同应用场景下不同程度光接口的业务需求。

参考文献

- [1] 祝宁华. 光电子器件微波封装和测试[M]. 北京:科学出版社, 2009
- [2] EBBERG A, AURACHER E, BORCHERT B, et al. 10 Gbit/s Transmission Using Directly Modulated Uncooled MQW Ridge Waveguide DFB Lasers in TO Package[J]. Electronics Letters, 2000, 36(17): 1476–1477. DOI: 10.1049/el:20001077
- [3] OKAYASU M, ISHIIHARA N, TOHNO S. 10 Gbit/s 1.3 μm DFB-LD Module in 0.5 cc Ceramic Package for LAN/MAN Applications [J]. Electronics Letters, 2001, 37(5):303–304
- [4] LIU Y, ZHANG Z, LIU J, et al. 30-GHz Directly Modulation DFB Laser with Narrow Linewidth[C]// Asia Communications and Photonics Conference, 2015. DOI: 10.1364/ACPC.2015.AM1B.3
- [5] ZHANG Z, LIU Y, BAI J, et al. Ultra-Wideband Butterfly Directly Modulated Semiconductor Lasers [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 1503309. DOI: 10.1109/JPHOT.2017.2703846
- [6] OKUDA H, HIRAYAMA Y, FURUYAMA H, et al. Five-Wavelength Integrated DFB Laser Arrays with Quarter-Wave-Shifted Structures[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2003, 23: 843–848
- [7] YAMAGUCHI M, SASAKI T, ASANO H, et al. Semiconductor Photonic Integrated Circuit for High-Density WDM Light Source[C]// 12th IEEE International Conference on Semiconductor Laser. USA: IEEE, 2002:160–161. DOI: 10.1109/ISLC.1990.764471
- [8] MASTUO S, KAKISUKA T, SEGAWA T, et al. 4 $\times$ 25 Gb/s Frequency-Modulated DBR Laser Array for 100-GbE 40-km Reach Application [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(7): 1494–1496. DOI: 10.1109/LPT.2008.927896
- [9] KANAZAWA S, KOBAYASHI W, UEDA Y, et al. 30-km Error-Free Transmission of Directly Modulated DFB Laser Array Transmitter Optical Sub-Assembly for 100-Gb Application[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, (34): 3646–3652. DOI: 10.1109/JLT.2016.2520942
- [10] KWON K, HAN Y T, LEEM Y A, et al. A (10 times 10) –Gb/s DFB-LD Array Integrated With PLC-Based AWG for 100-Gb/s Transmission [J]. Photonics Technology Letters IEEE, 2014, 26:2177–2180
- [11] ZHU N H, LIU Y, ZHANG S J, et al. Bonding-Wire Compensation Effect on the Packaging Parasitics of Optoelectronic Devices[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2006, 48 (1): 76–79. DOI:10.1002/mop.21266
- [12] ZHANG Z, LIU Y, AN J, et al. 112 Gbit/s Transmitter Optical Subassembly Based on Hybrid Integrated Directly Modulated Lasers [C]//Chinese Optics Letters, 2018, 16: 062501
- [13] ZHANG Z, LIU Y, WANG J, et al. Three-Dimensional Package Design for Electro-Absorption Modulation Laser Array[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(2):1–12. DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2540360

作者简介



张一鸣, 中国科学院半导体研究所在读博士; 主要研究领域为高速光电子器件集成开发及系统应用; 先后参与多个自然科学基金和科技部“863”等国家科研项目; 在2017CIOP国际会议上完成邀请报告; 已发表论文5篇。



刘宇, 中国科学院半导体研究所博士生导师; 主要研究领域为高速光电子器件的微波测试、封装设计以及高速光模块的关键技术研究, 具体包括通信用激光器、探测器、调制器及集成器件的测试和封装, 高速光通信收发模块及ROF器件的研发; 主持了多项自然科学基金、“863”课题等科研项目, 发表论文30余篇, 申请发明专利10余项。



张志珂, 北京大学博士后; 主要研究领域为高速光电子器件的微波封装设计, 光通信系统以及硅基集成芯片设计与研究; 先后参与多个自然科学基金和科技部“863”等国家科研项目; 在ACP、ICOON等国际会议上完成学术报告; 已发表论文20余篇。