

光通信链路中集成芯片的收发一体工作

罗俊伟, 刘凯*, 位祺, 黄永清, 段晓峰, 王琦, 任晓敏, 蔡世伟

北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

摘要 在 PIN 光电探测器(PIN-PD)结构的垂直方向上集成垂直腔面发射激光器(VCSEL)结构单元, 实现了收发一体式工作的集成光电芯片对, 可用于进一步提高光互连的性能。该集成光电芯片可以同时两个波段进行收发一体工作, 一端进行中心波长为 805 nm 的光信号的发送和中心波长为 850 nm 的光信号的接收, 另一端进行中心波长为 850 nm 的光信号的发送和中心波长为 805 nm 的光信号接收。仿真优化 805 nm 波长处光信号发送端的结构与性能, 理论分析结构中 VCSEL 单元和 PIN-PD 单元工作时的电学隔离和光学解耦, 最终证实本结构可以同时收发一体的工作。

关键词 光通信; 光电集成; 光电探测器; 激光器; 垂直腔面发射激光器; 光互连

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0806003

Integrated Chip for Simultaneous Transmission and Reception in Optical Communication Links

Luo Junwei, Liu Kai*, Wei Qi, Huang Yongqing, Duan Xiaofeng,
Wang Qi, Ren Xiaomin, Cai Shiwei

State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, 100876

Abstract This paper proposes an integrated optoelectronic chip pair that can simultaneously receive and transmit signals by integrating a vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) unit in the vertical direction of a PIN photodetector (PIN-PD) unit. The two units can transmit in two bands at the same time. In particular, one terminal can transmit and receive optical signals at the central wavelengths of 805 and 850 nm, respectively; the other terminal can transmit and receive optical signals at the central wavelengths of 850 and 805 nm, respectively. This study mainly introduces and optimizes the structure and performance of one end of the optical signal transmission at the wavelength of 805 nm and theoretically analyzes the electrical isolation and optical decoupling of the VCSEL and PIN-PD units, which further ensures that the structure can work as a transceiver at the same time.

Key words optics communications; integrated optoelectronics; photodetector; lasers; vertical cavity surface emitting lasers; optical interconnects

OCIS codes 060.2330; 140.3410; 130.0250; 040.5160

1 引 言

近年来,随着大数据和云计算技术的快速发展,通信网络中传输的数据量以指数级形式增长。数据量骤升也对作为数据传输和处理重要环节的数据中心提出了更高的要求,需要其具有更大的带宽和更快的数据处理速度。数据中心也正面临着从 10 GB/40 GB 向 25 GB/100 GB/400 GB 的升级发展^[1]。然而,数据中心的冷却能力有限,迫切需要降

低能耗。另外,数据中心的服务器和服务器顶部(TOR)交换机之间的链路对数据中心的传输速率有较大影响,而这一部分链路最为繁杂。因此传统的电互连方式由于具有功耗高、带宽小、延迟高、链路重构性有限等不足之处,不再适用于数据中心服务器和 TOR 交换机之间的连接^[2]。光互连由于具有功耗低、传输速度快、交换转变快速、可实现波分复用和并行连接等优点,成为现阶段数据中心链路中 TOR 交换机和服务器之间的主要连接方式。

收稿日期: 2019-03-13; 修回日期: 2019-03-27; 录用日期: 2019-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(61874147)

* E-mail: kliu@bupt.edu.cn

TOR 交换机和服务器的距离普遍小于 100 m,这正是基于垂直腔面发射激光器(VCSEL)的光互连技术的有效作用距离。并且相比于硅光子集成芯片技术,基于 VCSEL 的光互连技术具有更低的能耗^[3-4]、更少的应用成本,更适用于数据中心中应用需求最高的短距离光互连,所以 VCSEL 仍然是光互连发展方案的重点之一^[5-12]。

2013 年, Kern 等^[13]提出了基于 AlGaAs/GaAs 的 850 nm 波长 VCSEL 和 PIN 探测器(PIN-PD)的单片集成。此结构是将 VCSEL 和 PIN-PD 横向集成,如图 1 所示,在外延生长时将 PIN-PD 结构生长在 VCSEL 结构的上面,然后在器件的制作过程中通过刻蚀将 VCSEL 和 PIN-PD 结构横向隔离开,再将 VCSEL 结构上部的 PIN-PD 结构刻蚀干净,最终达到消除 PIN 对 VCSEL 性能影响的目的。这一结构的光探测器部分具有 3 μm 厚的本征层,其响应度达到 0.6 A/W 以上,并且具有很低的暗电

流和大约 8 GHz 的 3 dB 带宽,激光器部分的小信号带宽也达到了 12.5 GHz。从结构来看,此设备能够满足收发一体的芯片要求,并且可以用于单纤双向的光互连链路,但是其带宽较低,并且和其他横向集成芯片一样,横向集成具有封装方案复杂、成本高等缺陷。另外在单纤双向的方案中使用此结构还有一个缺陷,即光纤耦合问题,VCSEL 具有圆形光斑、光纤耦合效率高等优点,但是此结构的耦合方案是在 VCSEL 和 PIN 结构中取一个耦合的折中,势必会降低 VCSEL 耦合的优势,并且会降低整个结构的光纤耦合效率。2014 年 Shen 等^[14]将 VCSEL 和 PIN-PD 封装起来,使光波导横向集成在位于同一平面的结构。此结构同样具有收发一体的通信功能,但是其也具有与横向集成相同的问题(封装成本高、器件尺寸较大),而且需使用额外的光纤耦合,并未满足单纤双向的链路要求。

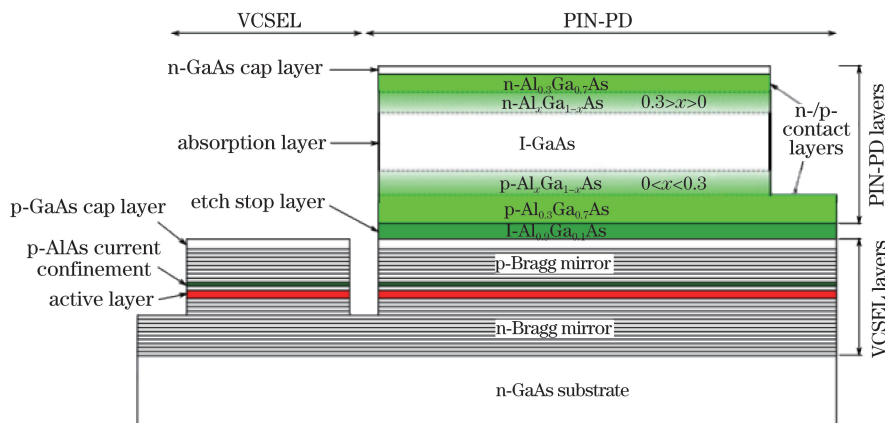


图 1 VCSEL 和 PIN 单片集成结构图^[13]

Fig. 1 Structure diagram of VCSEL and PIN monolithic integration^[13]

本课题组将 VCSEL 和 PIN-PD 在垂直方向上集成^[15]。因该结构具有光纤耦合效率高、可实现单纤耦合、封装方案简易、成本低、功耗小等优势,因此本文对此垂直集成器件作结构和性能的进一步优化。

2 结构设计

本文提出的结构如图 2 所示,结构上部分为 VCSEL 单元,下部分为 PIN-PD 单元。此结构为双端通信器件对,一端发送中心波长为 850 nm 的光信号探测中心波长为 805 nm 的光信号,另一端发送中心波长为 805 nm 的光信号探测中心波长为 850 nm 的光信号,在前期工作中已经设计出了可以实现双端通信的器件对结构^[15]。但是前期设计的

中心波长为 805 nm 的光信号发送端器件的材料和结构特性导致其在工作波段附近的稳定性和可靠性较差,因此本文将通过特定的设计来提高 VCSEL 单元工作的可靠性和稳定性。

本文提出的集成结构有两个主要的设计目标:一是 VCSEL 单元的结构设计,目标是实现以 GaAs 材料为量子阱的 VCSEL 结构,通过进一步优化结构使 VCSEL 单元的阈值电流和 3 dB 带宽等性能达到预期目标;二是通过特殊的优化设计使得 VCSEL 和 PIN-PD 两部分在光学和电学上实现解耦,进而达到两个结构可以同时接收和发送光信号的目标。

2.1 VCSEL 和 PIN-PD 设计

VCSEL 结构由两个高反射率的分布式布拉格

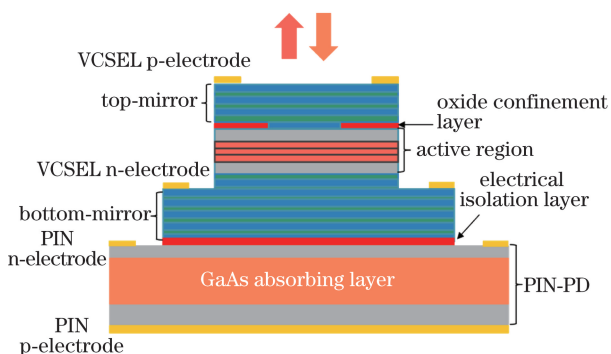


图 2 集成器件结构图

Fig. 2 Structure of the proposed integrated optoelectronic chip

反射镜(DBR)、一个光学谐振腔以及有源区组成。顶部分布式布拉格反射镜 Top-Mr 是由 23.5 对 p 型掺杂的 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.90}\text{Ga}_{0.10}\text{As}$ 组成,底部分布式布拉格反射镜 Bottom-Mr 是由 34.5 对 n 型掺杂的 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.90}\text{Ga}_{0.10}\text{As}$ 组成。为了同时在两个不同波段分别实现高反射率和高透射率,将顶部 DBR 特殊设计为非周期的 DBR。两个 DBR 形成的光学谐振腔腔长为 $3\lambda/2$ 个光学厚度, λ 为 VCSEL 激光的中心波长,其由有源区和有源区两侧的限制层组成。限制层为低掺杂的 $\text{Al}_{0.30}\text{Ga}_{0.70}\text{As}$,有源区由 4 对 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.30}\text{Ga}_{0.70}\text{As}$ 量子阱结构组成,其激光中心波长为 805 nm。在顶镜 Top-Mr 与谐振腔之间是厚度为 30 nm 的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 层,该层在 VCSEL 台面经过后续湿氮氧化步骤之后,形成具有较低空穴迁移率的电流限制孔。

VCSEL 结构设计的第一个重点问题是量子阱结构的设计。文献[16]中使用低 Al 组分的 AlGaAs 材料作为量子阱,但是含铝有源区容易氧化和产生暗线缺陷,腔面光学灾变功率密度不高,从而限制激光器的功率和寿命,且不利于提高器件的可靠性。文献[17]中采用 GaAs 量子阱结构,可进一步提高所设计结构中 VCSEL 单元工作的稳定性,但是没有继续进行结构的优化探索。本文采用 GaAs 材料作为量子阱,探究了量子阱结构的势阱宽度相同时不同势垒宽度对于增益谱的影响。图 3 所示为不同势垒厚度下的增益谱,随着势垒厚度的增加,结构的光限制因子也会增大,因此增益峰值也逐渐升高;但当势垒厚度增加到一定程度时,多量子阱的隧穿效应也会受到影响。由图 3 可知:当势垒厚度由 4 nm 增加至 8 nm 时,增益谱峰值不断升高;再继续增加势垒厚度,增益谱峰值则无明显变化。

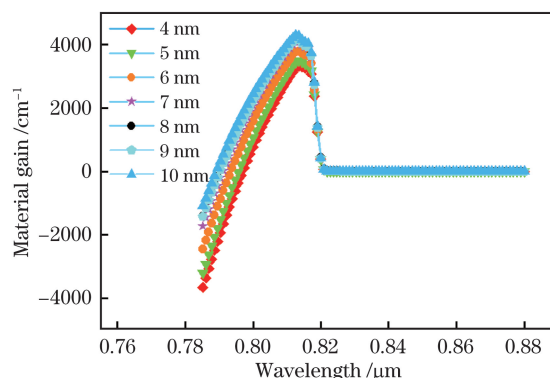


图 3 VCSEL 不同势垒厚度时增益谱

Fig. 3 Gain spectra for different barrier thicknesses of VCSEL

VCSEL 结构设计的第二个重点问题是特殊设计优化阈值特性。一方面如上文所述设计量子阱结构使其增益增加,阈值特性会随着增益增加而逐渐优化。另一优化阈值特性的方面是设计其氧化孔径。氧化孔径的尺寸决定了有源区面积的大小,当氧化孔径减小时有源区面积减小,阈值电流降低。但是氧化尺寸过小,也会影响输出功率,并且电流分布小于光场分布区域,载流子的分布和光场分布无法达到一致,导致阈值电流升高。而氧化孔径尺寸增大可以在较大范围内提供电流,因此阈值电流会降低。但是过大的尺寸也会引起载流子和电流的扩展,从而引起基模变宽,并且较大的尺寸也会由于需要大电流才能到达阈值而产生有源区温度升高的问题。因此,对于性能良好的 VCSEL 结构来说,设计合适的氧化孔径尺寸是很有必要的。本文设定 VCSEL 单元半径为 $12\ \mu\text{m}$,仿真计算其氧化孔径的半径从 $2.5\ \mu\text{m}$ 增加到 $3.5\ \mu\text{m}$ 的阈值电流和斜率效率,结果如图 4 所示,当氧化孔径的半径为 $3\ \mu\text{m}$ 时,阈值电流为 1.0 mA,斜率效率为 $0.695\ \text{W/A}$ 。

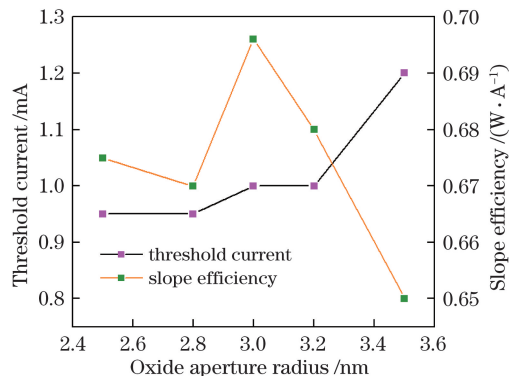


图 4 不同氧化孔径尺寸下 VCSEL 的阈值电流和斜率效率

Fig. 4 Threshold current and slope efficiency for different oxidized sizes of VCSEL

PIN-PD 单元结构是由 $2.1 \mu\text{m}$ 厚的未掺杂的 GaAs 吸收层嵌入在 p 掺杂和 n 掺杂的 $\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}$ 组成。对于探测器来说,暗电流是表征器件性能的一项重要指标,因此在结构设计时需降低器件暗电流。由于材料的内部缺陷和杂质,耗尽区常常也会存在载流子的产生与复合,即产生-复合暗电流^[18]。本结构的设计中采用晶格匹配的材料以及本征层材料未掺杂的方式,减少了这一部分暗电流。另外,由于 VCSEL 单元的 p 区 DBR 串联电阻较大,在大电流注入情况下,器件发热较为严重,这会使耗尽区之外热产生的少数载流子因空间上存在浓度差而通过扩散进入耗尽区,从而在较大程度上增加了 PD 的暗电流。因此接触层重掺杂,使得只有非常少量的少数载流子能扩散并通过耗尽层被外电路收集,从而减小了器件发热产生的暗电流^[19]。

2.2 电学解耦

这一问题的解决是通过在 VCSEL 单元和 PIN-PD 单元之间插入一层 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 外延层实现的,此外延层在器件的制作过程中通过湿法氧化形成 Al_2O_3 层,能够实现 VCSEL 单元和 PIN-PD 单元工作时的电学解耦。

2.3 光学解耦

光学解耦是通过设计两个单元的波分复用工作光谱和特殊设计 VCSEL 的两个 DBR 来实现的。波分复用工作光谱是指器件的 VCSEL 单元发送波段的中心波长为 805 nm ,而 PIN-PD 单元接收波段的中心波长为 850 nm 。采用窗口效应,实现在不同波段的收发工作,国际上已有类似的研究,在文献^[20]中,研究人员使用光环行器来控制发送上行光信号的波段中心波长为 1310 nm 和接收下行光信号的波段中心波长为 1550 nm 。其中 PD 所选用的 III-V 族吸收材料的截止波长为 1370 nm ,该波长对接收的光信号为透明的,以此实现同一器件的收发一体。VCSEL 单元 DBR 部分的特殊设计是指:其在 805 nm 附近 10 nm 范围内的反射率高达 99% 以上,而在 850 nm 附近 10 nm 范围内的反射率低于 10% ,如图 5 所示。此设计一方面可保证传输过来的中心波长为 850 nm 的光在 VCSEL 中达到一个高透的效果从而能够顺利进入 PIN-PD 中得到探测,另一方面是 VCSEL 单元激励的中心波长为 805 nm 的光信号能够因其具有很高的反射率不会进入 PIN-PD 单元中产生影响。综上可得,VCSEL 单元工作在 805 nm 中心波长范围内,

PIN-PD 单元工作在 850 nm 中心波长范围内,并且 805 nm 波长光信号在 VCSEL 单元中具有很高的反射率,而 850 nm 波长光信号在 VCSEL 单元中具有很高的透射率,因此 VCSEL 单元和 PIN-PD 单元在光学上可以实现相互解耦。

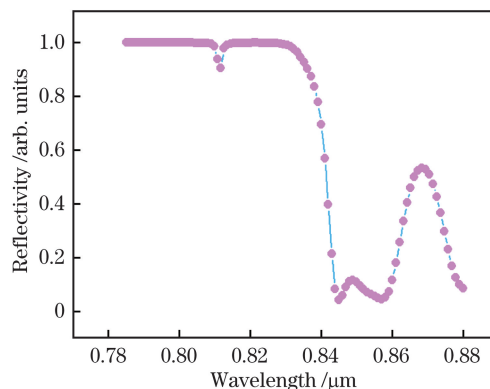


图 5 VCSEL 反射谱

Fig. 5 Reflection spectrum of VCSEL

3 结构特性

本文所提出的集成芯片的性能由 Silvaco Atlas 软件仿真得到。在仿真中,采用有效频率法^[21]和自洽二维模型^[22],主要包括迁移率模型、复合模型、增益模型和费米-狄拉克统计模型等。其中各模型所采用的计算方法与参数来源于文献^[22]。器件的仿真结构如图 2 所示,VCSEL 单元的尺寸设为半径 $12 \mu\text{m}$,Top-Mr 下的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 层经过工艺湿法氧化转化成 Al_2O_3 ,在 VCSEL 中心形成直径为 $6 \mu\text{m}$ 的电流限制窗口。PIN-PD 的半径设为 $15 \mu\text{m}$ 。VCSEL 单元和 PIN-PD 单元的电极设置如图 2 所示,VCSEL 的底电极和 PIN-PD 的顶电极接地。

3.1 VCSEL 特性

VCSEL 的静态特性和动态特性仿真结果如图 6 所示。仿真时 VCSEL 的偏置电流由 0 mA 增加到 12.5 mA ,由图 6(a)可以得出,VCSEL 单元的阈值电流为 1.0 mA ,斜率效率为 0.695 W/A 。进一步分析 VCSEL 的动态特性,在 VCSEL 上加一个 0.05 V 的脉冲电压,然后再对其产生的响应结果进行快速傅里叶变换,得到其响应曲线。由于 VCSEL 单元的响应频率和弛豫振荡频率几乎是对应的,在对应弛豫振荡频率处表现为峰值,当频率高于弛豫振荡频率时,响应曲线便会下降。响应曲线如图 6(b)所示,VCSEL 的 3 dB 带宽为 15 GHz 。由于本芯片为垂直集成结构,其串联电阻也会较高,然

而较高的串联电阻会增加电路的 RC(电阻和电容乘积)时间常数,因此减小了 VCSEL 单元 3 dB 带宽^[23]。由于 VCSEL 的带宽小于 PD 的带宽,集成芯片的带宽主要受 VCSEL 端带宽限制,因此集成器件的工作带宽也会受限减小。

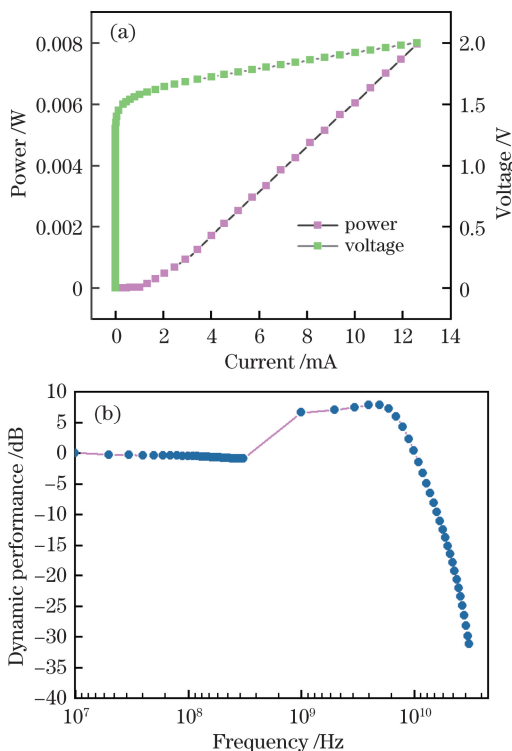


图 6 VCSEL 单元特性。(a)静态特性;(b)动态特性
Fig. 6 VCSEL unit's performances.
(a) Static performance; (b) dynamic performance

3.2 PIN-PD 特性

PIN-PD 单元偏压设置为 -2 V,输入光强为 700 W/cm²,交流小信号的输入光强为 70 W/cm²。由图 7 可知,在此条件下,PIN-PD 的 3 dB 带宽约为 21 GHz。本集成芯片所设计的 PIN-PD 单元要求其量子效率在工作波长范围内必须高于 70%,才能保证其正常工作,此部分计算分析在下文详细说明。

3.3 集成器件特性

本文所提出结构的第二个主要设计目标在于两个单元工作时光学上和电学上的解耦,因此继续仿真 VCSEL 单元和 PIN-PD 单元直流情况下的光学隔离特性和电学隔离特性,以及交流高频小信号下的隔离特性,以保证两个单元部分能够独立工作。

3.3.1 光学隔离特性

本集成芯片的光响应特性如图 8 所示。输入光强设置为 10 W/cm²,波长变化范围为 0.79 ~ 0.88 μm,VCSEL 单元偏压设置为 0,PIN-PD 单元

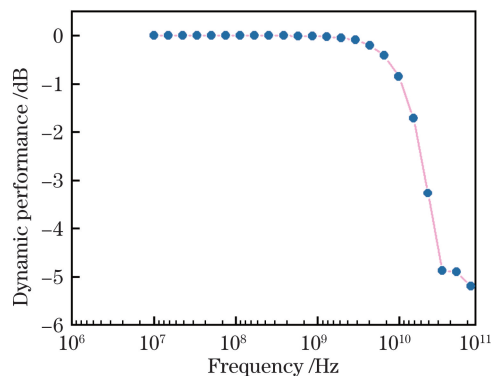


图 7 集成器件 PIN-PD 单元动态特性
Fig. 7 PIN-PD units' dynamic performance of the integrated chip pair

偏压设置为 -2 V。由图 8 可以得出,PIN-PD 在 840 nm 到 860 nm 范围内的量子效率都高于 70%,在 854 nm 处量子效率达到了 80%。此时,VCSEL 在此区间内的量子效率几乎为 0。由于 VCSEL 单元的工作波长在 805 nm 附近,而 PIN-PD 单元工作中心波长为 850 nm,从光学的角度分析可知 VCSEL 单元和 PIN-PD 单元工作时不会互相影响。

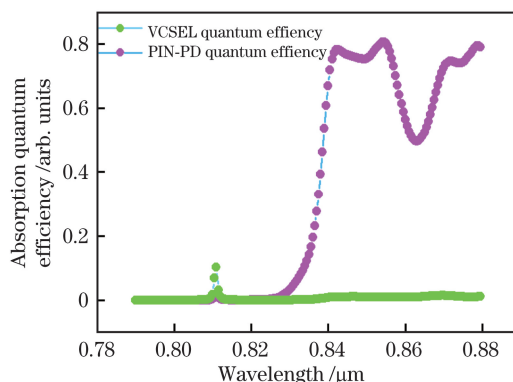


图 8 集成器件光响应特性谱
Fig. 8 Spectral photo-response performances of the integrated chip

3.3.2 电学隔离特性

本结构在 VCSEL 单元和 PIN-PD 单元之间嵌入 Al₂O₃层作为电学隔离层,以此实现直流条件下两单元互相隔离的目的。电流密度分布如图 9 所示,两单元在电学上完全能够实现隔离工作。

3.3.3 交流高频小信号下的隔离特性

本集成芯片的电隔离特性计算结果如图 10 所示。根据 PIN-PD 单元动态特性分析,将 VCSEL 光响应电流和 PIN-PD 光响应电流相比得到两单元的隔离度特性如图 10(a)所示。由图 10(a)可知,当隔离度设置为 -20 dB 时,PIN-PD 带宽为 20 GHz。进一步将 PIN-PD 单元光响应电流和

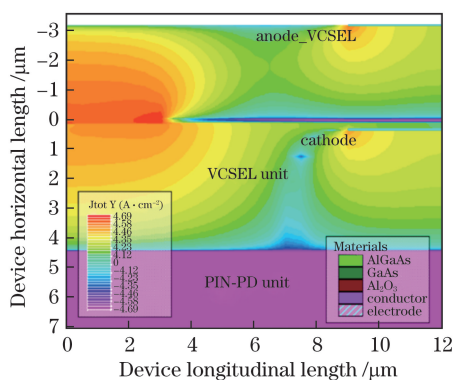


图 9 集成芯片在 VCSEL 单元和 PIN-PD 单元同时工作时的电流密度分布

Fig. 9 Current density distribution of the integrated optoelectronic chip while the VCSEL unit and the PIN-PD unit working simultaneously

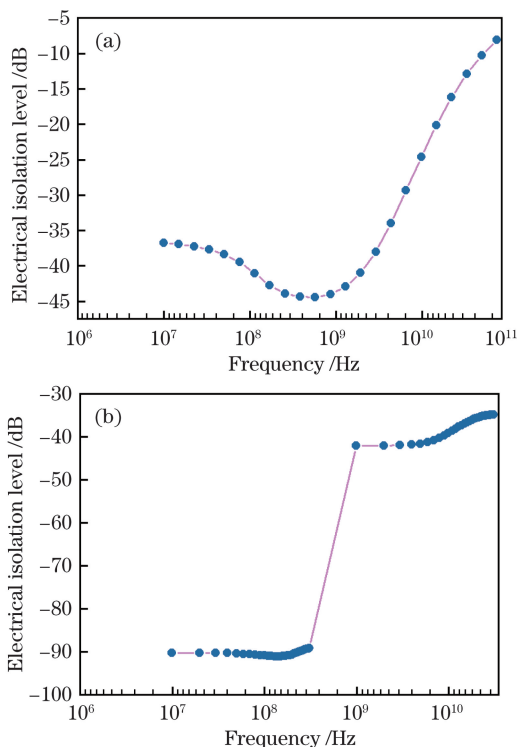


图 10 集成芯片的电学隔离度。(a) PIN-PD 单元对 VCSEL 单元隔离度；(b) VCSEL 单元对 PIN-PD 单元隔离度

Fig. 10 Electrical isolation of integrated chip. (a) PIN-PD unit isolation versus VCSEL unit; (b) VCSEL unit isolation versus PIN-PD unit

VCSEL 单元驱动电流相比得出两部分的隔离度，如图 10(b)所示。由图 10(b)可知，当隔离度设置为 -35 dB 时，VCSEL 单元 3 dB 带宽为 20 GHz。根据计算，当固定 VCSEL 单元输出光功率为 7 mW 时，此输出光在 PIN-PD 单元产生的光噪声为 2.91×10^{-11} mW，此时信噪比为 41.9 dB。在固定输

入光功率为 7 mW 时，输入的光信号在 VCSEL 单元产生的噪声信号为 3.6×10^{-11} mW，输入光与产生的光学噪声信噪比为 28.9 dB。

4 结 论

提出一种可以同时进行接收和发送光信号的芯片结构，此结构由一个 VCSEL 单元集成在 PIN-PD 单元上实现，两结构单元之间插入一层 Al_2O_3 层，以实现电学隔离。两单元光学的解耦是通过波分复用的设计实现的，VCSEL 单元工作在中心波长为 805 nm 的波段，PIN-PD 工作在中心波长为 850 nm 的波段。由仿真芯片结构的特性可知，VCSEL 的阈值电流为 1.0 mA，斜率效率为 0.695 W/A。PIN-PD 在 850 nm 处的吸收量子效率为 76%，在 20 nm 宽的范围量子效率高于 70%，能够满足工作要求。另外，根据动态特性分析，VCSEL 的 3 dB 带宽约为 15 GHz，PIN-PD 的 3 dB 带宽为 21 GHz。综上，本集成芯片的两结构单元可以实现在光学和电学上的解耦并且能够完成收发一体的工作。

参 考 文 献

- [1] Elby S. Evolution of networks to meet the explosion of cloud services[C] // Optical Fiber Communication Conference 2015, March 22-26, 2015, Los Angeles, California. Washington, D.C.: OSA, 2015: Tu2H.5.
- [2] Fayyaz M, Aziz K. Classification of optical interconnects in data center networks[C] // 2014 12th International Conference on Frontiers of Information Technology, December 17-19, 2014, Islamabad, Pakistan. New York: IEEE, 2014: 61-66.
- [3] Lü Z C, Wang Q, Yao S, *et al.* 4×15 Gbit/s 850 nm vertical cavity surface emitting laser array[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0514001.
吕朝晨, 王青, 尧舜, 等. 4×15 Gbit/s 850 nm 垂直腔面发射激光器阵列[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0514001.
- [4] Feng Y, Hao Y Q, Wang X T, *et al.* Structural optimization and fabrication of 850 nm vertical-cavity surface-emitting laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0301005.
冯源, 郝永芹, 王宪涛, 等. 850 nm 垂直腔面发射激光器结构优化与制备[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0301005.
- [5] Zhou Z P, Tu Z J, Li T T, *et al.* Silicon photonics for advanced optical interconnections[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(4): 928-933.
- [6] Michalzik R, Kern A, Wahl D. Bidirectional multimode fiber interconnection[J]. Proceedings of

- SPIE, 2012, 8176: 827601.
- [7] Aziz K, Fayyaz M. Optical interconnects for data center networks[M]//Khan S, Zomaya A. Handbook on data centers. New York: Springer, 2015: 449-483.
- [8] Aleksic S. The future of optical interconnects for data centers: a review of technology trends [C] // 2017 14th International Conference on Telecommunications (ConTEL), June 28-30, 2017, Zagreb, Croatia. New York: IEEE, 2017: 41-46.
- [9] Kern A, Paul S, Schwarz W, *et al.* Bidirectional multimode fiber interconnection at Gb/s data rates with monolithically integrated VCSEL-PIN transceiver chips[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(15): 1058-1060.
- [10] Song Y M, Choi H J, Lee Y T, *et al.* Reflective displacement sensors with monolithically integrated VCSELs and RCEPDs[J]. Electronics Letters, 2015, 51(10): 782-783.
- [11] Kachris C, Tomkos I. A roadmap on optical interconnects in data centre networks[C]//2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), July 5-9, 2015, Budapest. New York: IEEE, 2015: We. A3.1.
- [12] Tatum J A, Gazula D, Graham L A, *et al.* VCSEL-based interconnects for current and future data centers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(4): 727-732.
- [13] Kern A, Al-Samaneh A, Wahl D, *et al.* Monolithic VCSEL-PIN photodiode integration for bidirectional optical data transmission[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4): 6100313.
- [14] Shen P K, Chen C T, Li S L, *et al.* Three-dimensional integrated optical interconnect with laser and photodetector on SOI substrate[C]//Technical Digest of the Eighteenth Microoptics Conference, October 27-30, 2014, Tokyo, Japan. New York: IEEE, 2014: 14034244.
- [15] Liu K, Fan H Z, Huang Y Q, *et al.* A pair of integrated optoelectronic transceiving chips for optical interconnects[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(9): 091301.
- [16] Wang J, Ma X Y, Zheng K, *et al.* High injection efficiency high power 808 nm quantum well semiconductor laser structure: CN1901301A [P]. 2007-01-24.
王俊, 马晓宇, 郑凯, 等. 高注入效率大功率 808 nm 量子阱半导体激光器结构: CN1901301A[P]. 2007-01-24.
- [17] 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.
- [18] Wohlmuth W A, Seo J W, Fay P, *et al.* A high-speed ITO-InAlAs-InGaAs Schottky-barrier photodetector[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(10): 1388-1390.
- [19] Hurst J B. Molecular-beam epitaxial growth of low-dark-current avalanche photodiodes[D]. Austin: University of Texas at Austin, 2007.
- [20] Zhang J, de Groote A, Abbasi A, *et al.* Silicon photonics fiber-to-the-home transceiver array based on transfer-printing-based integration of III-V photodetectors[J]. Optics Express, 2017, 25(13): 14290-14299.
- [21] Wenzel H, Wunsche H J. The effective frequency method in the analysis of vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1997, 33(7): 1156-1162.
- [22] Li Z M, Dzurko K M, Delage A, *et al.* A self-consistent two-dimensional model of quantum-well semiconductor lasers: optimization of a GRIN-SCH SQW laser structure[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(4): 792-803.
- [23] Lear K L, Al-Omari A N. Progress and issues for high-speed vertical cavity surface emitting lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6484: 64840J.