

doi:10.13756/j.gtxyj.2023.02.011

光电器件研究与应用

孙元新,杨振强,贾华宇,等. 一种新型电吸收调制激光器的优化设计[J]. 光通信研究,2023(2):69-78.

Sun Y X, Yang Z Q, Jia H Y, et al. The Optimal Design of New Electro-absorption Modulated Laser[J]. Study on Optical Communications, 2023(2):69-78.

一种新型电吸收调制激光器的优化设计

孙元新^{1a}, 杨振强^{1a}, 贾华宇^{1a}, 余 洁², 李灯熬^{1b}

(1. 太原理工大学 a. 电气与动力工程学院; b. 信息与计算机学院, 太原 030000;

2. 武汉光迅科技股份有限公司, 武汉 430074)

摘要:针对传统选择性区域生长叠层双有源区电吸收调制激光器(SAG-DSAL-EML)在高频调制环境下的响应速度问题以及改善其远场发散角特性,文章提出利用掺铁掩埋技术对电吸收调制激光器(EML)结构进行优化,设计了 InGaAsP/InP 材料 1 310 nm 掺铁掩埋结构的 SAG-DSAL-EML 并制作样本芯片,新型 SAG-DSAL-EML 有源区变为台面结构,并在其两层外延生长掺铁 InP 层。同时,利用先进激光二极管模拟器(ALDS)软件和高频结构仿真(HFSS)软件对所设计掺铁掩埋结构的 EML 和调制器进行数值及仿真分析,结果表明,与传统多量子阱结构相比,SAG-DSAL-EML 阈值电流减少了 13%;与传统脊波导结构相比,掺铁掩埋结构的侧向限制能力提高 52%,激光远场横纵角度之差降低了 40%,具有更小的远场发散角;与传统 PNP 掩埋结构相比,掺铁掩埋结构的调制器在 -3 dB 的响应带宽提高了约 24%。对样本芯片进行测试,试验表明,SAG-DSAL-EML 的阈值电流为 14.5 mA,边模抑制比(SMSR)为 45.64 dB,70 mA 注入电流下,电吸收调制器 -3 dB 的响应带宽为 43 GHz,满足高速激光通信的基本要求。

关键词:电吸收调制激光器;台面结构;掺铁掩埋技术;调制带宽;远场发散角

中图分类号: TN242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2023)02-0069-10

The Optimal Design of New Electro-absorption Modulated Laser

SUN Yuan-xin^{1a}, YANG Zhen-qiang^{1a}, JIA Hua-yu^{1a}, YU Jie², LI Deng-ao^{1b}

(1. a. College of Electrical and Power Engineering; b. College of Information and Computer,

Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030000, China; 2. Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to solve the problem of response speed and improve the far-field divergence angle characteristics of the traditional Selective Area Growth-Duble Stack Active Laser-Electro-absorption Modulated Laser (SAG-DSAL-EML) in a high-frequency modulation environment, this paper uses the iron-doped buried technology to the Elector-absorption Modulated Laser (EML) structure was optimized, and the SAG-DSAL-EML with a 1 310 nm iron-doped buried structure of InGaAsP/InP material designed and a sample chip fabricated. The active area of the new SAG-DSAL-EML a mesa structure, and the two layers of the SAG-DSAL-EML epitaxially grown InP layer. At the same time, the laser part and modulator part of the designed iron-doped buried structure EML are numerically and simulated by Advanced Laser Diode Simulator (ALDS), and High Frequency Structure Simulator (HFSS). The results show that compared with the traditional multiple quantum well structure, the threshold current of the SAG-DSAL structure laser is reduced by 13% ompared with the traditional ridge waveguide structure, the lateral confinement capability of the iron-doped buried structure is improved by 52%. The difference is reduced by 40% and has a smaller far-field divergence angle ompared with the traditional PNP buried structure, the response bandwidth of the modulator with the iron-doped buried structure at -3 dB is increased by about 24%. The sample chip is tested, and the test shows that the threshold current of the laser is 14.5 mA, the Side-Mode Suppression Ratio(SMSR) is 45.64 dB response bandwidth of the electro-absorption modulator -3 dB is 43 GHz under the injection current of 70 mA, which meets the basic requirements of high-speed laser communication.

Key words: electro-absorption modulated laser; mesa structure; iron-doped buried technology; modulation bandwidth; far-field divergence angle

0 引 言

由于互联网和相关数据驱动应用的爆炸性增长,使低成本、高速率光纤通信系统需求大幅提升,集成电吸收调制激光器(Electro-absorption Modu-

lated Laser, EML)作为光纤通信的首选光源也成为当前研究热点^[1-3]。在 EML 制造技术中,选择性区域外延生长叠层双有源区(the Selective Area Growth-Double Stack Active Layer, SAG-DSAL)技术集成了对接生长技术、选择性区域外延技术和

收稿日期:2022-06-23; 修回日期:2022-08-01; 纸质出版日期:2023-04-10

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB2200900)

作者简介:孙元新(1996-),男,山东德州人。硕士,主要研究方向为半导体激光器。

通信作者:贾华宇,副教授。E-mail: jiahuayu@mail.xdttu.edu.cn

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

双有源区叠层技术的优点,具有非常好的发展前景^[4-5]。然而随着 100 和 400 Gbit/s 光网络的使用,在高频调制环境下,该类型激光器的响应速度仍有待提升,并且该类型激光器多采用脊波导结构,该结构是弱折射率波导,其侧向波导限制较弱,导致激光器的远场发散角较大,光场耦合效率较低^[6]。

为了解决上述问题,本文设计了铁掩埋波导结构的新型选择性区域生长叠层双有源区电吸收调制激光器(the Selective Area Growth and Double Stack Active Layer and Electro Absorption Modulated Laser, SAG-DSAL-EML),将传统 PNPN 掩埋中的 P-InP 层替换为半绝缘掺铁 InP 层,形成掺铁掩埋,可以减小激光器的远场发散角,同时掺铁 InP 层降低了调制器的结电容,使 EML 具有更高的调制带宽^[7-8]。基于以上思路,本文通过先进激光二极管模拟器(Advanced Laser Diode Simulator, ALDS)软件设计了 1 310 nm InGaAsP/InP 材料掺铁掩埋结构的新型 SAG-DSAL-EML,包括 SAG-DSAL-EML 有源区结构设计和掺铁掩埋波导结构设计。同时利用 ALDS 软件和高频结构仿真(High Frequency Structure Simulator, HFSS)软件分别对所设计的 SAG-DSAL-EML 中的激光器和调制器进行建模仿真,得出所设计 EML 的阈值特性、光场特性和高频响应特性等数据,并与传统脊波导结构 SAG-DSAL-EML 进行对比分析,验证所设计结构的优越性。同时制作样本芯片并进行特性测试。

1 1 310 nm 掺铁掩埋结构 SAG-DSAL-EML 的设计与制备

新型掺铁掩埋 SAG-DSAL-EML 结构如图 1 所示, SAG-DSAL-EML 中的有源区呈台面结构,并在两侧生长掺铁 InP 层,形成掺铁掩埋异质结波导结构。新型掺铁掩埋 SAG-DSAL-EML 设计包括

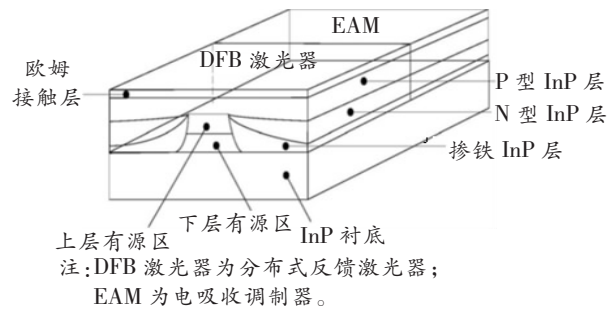


图 1 新型掺铁掩埋 SAG-DSAL-EML 结构示意图
Figure 1 Schematic of new type iron-doped buried SAG-DSAL-EML

有源区和波导结构设计两部分,通过 ALDS 软件的结构材料求解器和激光器性能仿真模块进行仿真计算,获得最优的有源区结构参数并对所设计的波导结构进行光场分布仿真,验证合理性。

1.1 SAG-DSAL 结构设计

SAG-DSAL 结构如图 2 所示, SAG-DSAL 包括上层有源区和下层有源区,上层有源区位于激光器部分,其设计按照 DFB 激光器的要求进行,而下层有源区则按照 EAM 调制器的要求进行设计^[9]。

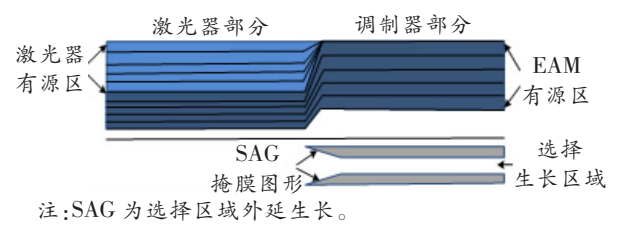


图 2 SAG-DSAL 结构示意图
Figure 2 Schematic of the active region structure

通过 ALDS 软件对 SAG-DSAL 进行建模,参照 SAG-DSAL-EML 对有源区波长的要求,以及阈值特性、边模抑制比(Side-Mode Suppression Ratio, SMSR)和平均光增益等参数确定最优的 SAG-DSAL 结构参数,包括量子阱个数、量子阱势垒层、势阱层厚度和有源区材料组分。

(1) 量子阱个数的选择

激光器部分腔长为 200 μm ,根据量子阱倍增规则,腔长与量子阱个数存在一个最优的关系,当腔长固定时,必存在一个最优的量子阱个数^[10-11]。不同量子阱个数下所设计 SAG-DSAL-EML 部分的平均发送光功率 P 与注入电流(Power current Intensity, PI)特性、有源区光增益和 SMSR 特性分别如图 3 和 4 所示。

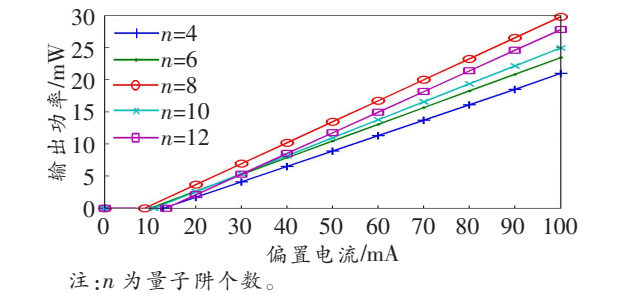


图 3 不同阱数下的 PI 特性
Figure 3 PI characteristics at different well numbers

由图可知,随着量子阱个数的增加,激光器的阈值电流先减小后增加;输出光功率、SMSR 和有源区平均增益先增大后减小。当量子阱个数为 8 时,激光器阈值电流最小且输出光功率最大, SMSR 最高、

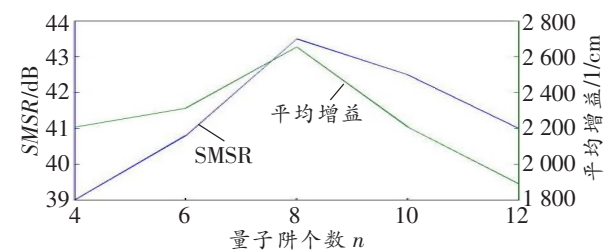


图 4 不同阱数下的 SMSR 和平均增益
Figure 4 SMSR and average gain at different well numbers
平均增益最大,因此, $n=8$ 为最优的量子阱个数。

(2) 量子阱厚度设计

SAG-DSAL-EML 量子阱有源区是由多个势阱层和势垒层交替构成的。当势阱层和势垒层很薄时,容易造成载流子的泄漏,使量子阱的增益系数降低,阈值电流增大,发光效率也随之降低,而随着势阱层和势垒层厚度逐渐增加,会产生应力积累,阻碍载流子的运输,也会降低激光器的发光效率^[12-13]。在选取有源区的量子阱个数为 8 不变的情况下,不同势阱层和势垒层厚度下 SAG-DSAL-EML 部分的 PI 特性和 SMSR 特性如图 5 所示。

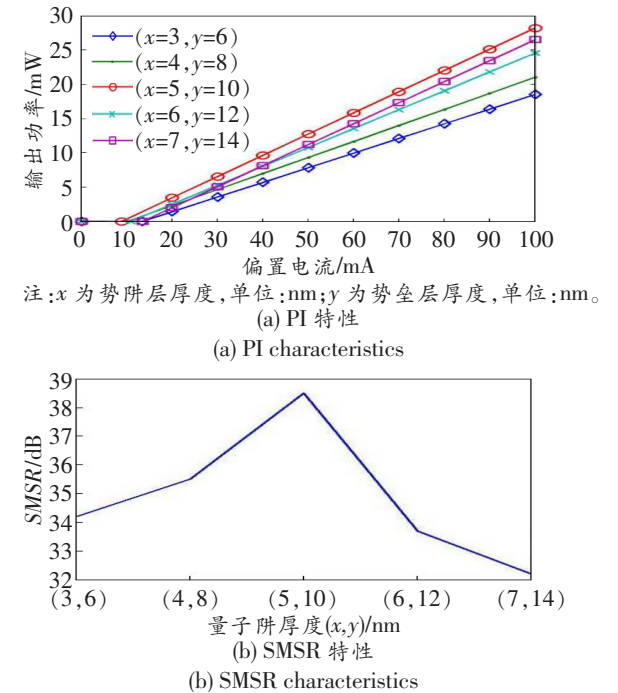


图 5 不同量子阱厚度下的激光器特性
Figure 5 Characteristics of lasers at different quantum well thicknesses

由图可知,随着势阱层和势垒层厚度的增加,激光器的阈值电流先减小后增加,输出光功率和 SMSR 先增大后减小。当势阱层厚度为 5 nm,势垒层厚度为 10 nm 时,阈值电流最小、单纵模特性最好、输出功率最大,为最优的量子阱厚度。

(3) 有源区材料组分的确定

为了满足所设计 1 310 nm EML 的波长匹配以及达到 SAG-DSAL 能带结构透明设计的要求,保证有源区量子阱个数为 8,量子阱势阱层和势垒层厚度分别为 5 和 10 nm 不变的情况下,通过 ALDS 软件对不同材料组分的有源区进行光谱分析可知,当上层多量子阱有源区的势阱材料为 $\text{In}_{0.905}\text{Ga}_{0.095}\text{As}_{0.532}\text{P}_{0.468}$,应变为压应变 1.05%,势垒层材料为 $\text{In}_{0.819}\text{Ga}_{0.181}\text{As}_{0.395}\text{P}_{0.605}$;下层多量子阱有源区的势阱材料为 $\text{In}_{0.735}\text{Ga}_{0.265}\text{As}_{0.581}\text{P}_{0.419}$,应变为压应变 0.02%,势垒层材料为 $\text{In}_{0.819}\text{Ga}_{0.181}\text{As}_{0.395}\text{P}_{0.605}$ 时,激光器有源区的激光波长和 EAM 部分有源区的激光波长如图 6 所示。

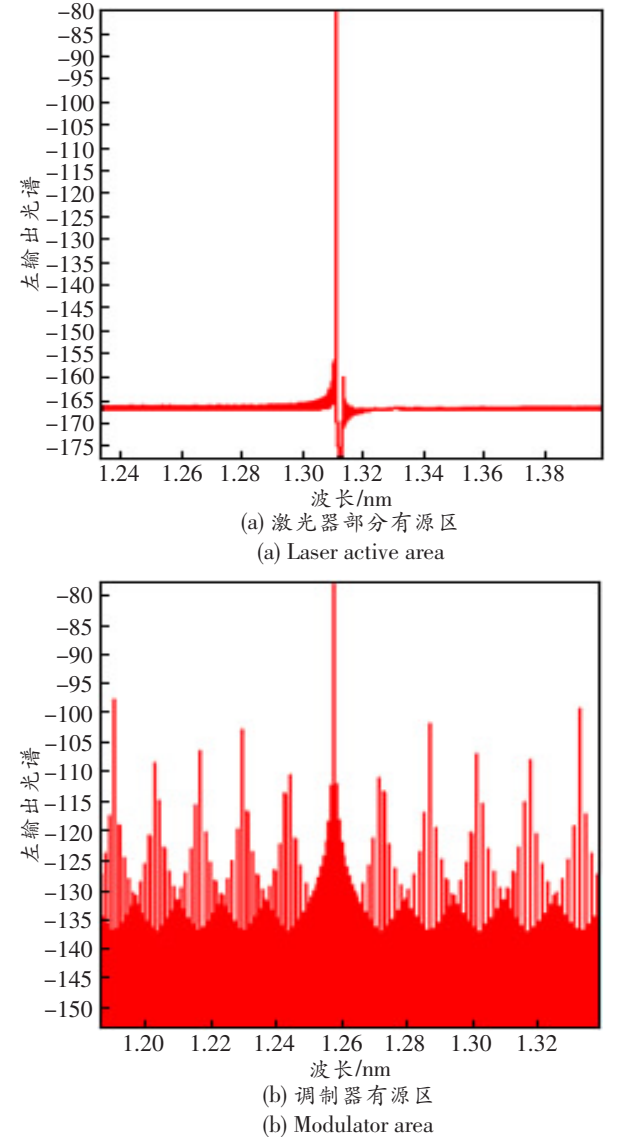


图 6 激光波长
Figure 6 Laser wavelength

由图可知,激光器有源区的激光波长为 1 310 nm,调制器有源区的激光波长为 1 260 nm,

激光器激射波长比调制器有源区的波长长 50 nm，达到了 EML 波长匹配的要求。同时，对激光器部分 SAG-DSAL 结构中的上层和下层有源区进行光谱分析，结果如图 7 所示。由图可知，上层有源区激

射波长为 1 310 nm，下层有源区激射波长为 1 200 nm，上下有源区之间波长差为 110 nm，也达到了上下有源区能带透明设计的要求。

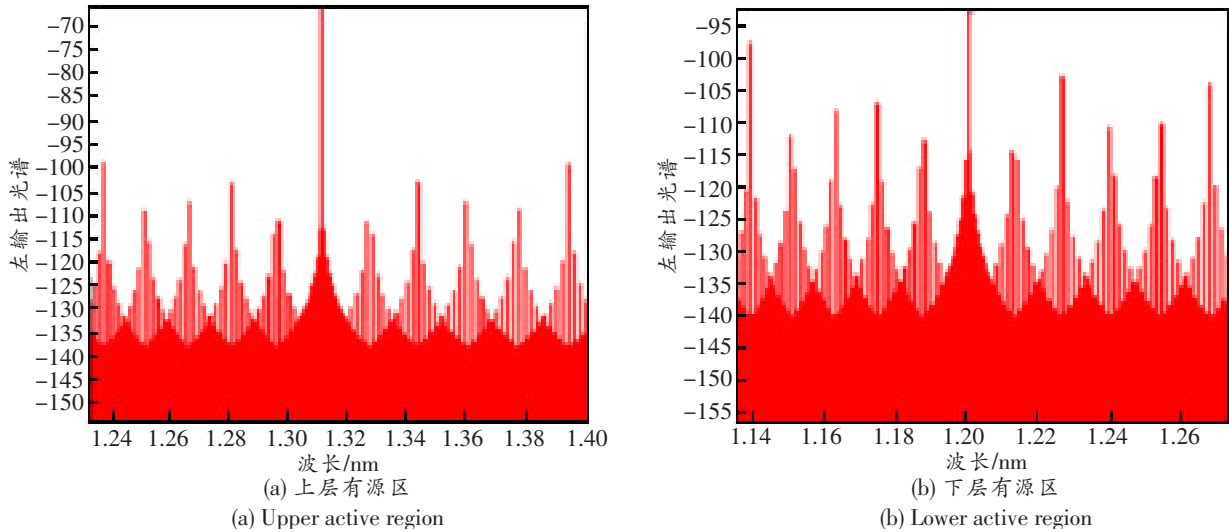


图 7 激射波长
Figure 7 Laser wavelength

综上所述，所设计 1 310 nm 的 SAG-DSAL-EML 结构参数如表 1 所示。

表 1 1 310 nm 掺铁掩埋结构 SAG-DSAL-EML 结构参数
Table 1 Active region parameters of iron-doped buried SAG-DSAL-EML

有源区	量子阱个数	$\text{In}_{1-m}\text{Ga}_m\text{As}_n\text{P}_{1-n}$	厚度/nm	掺杂浓度/ cm^{-3}
上层有源区	$\text{InGaAsP}(\text{势垒层}) \times 5$	(0.181,0.395)	10	不掺杂
下层有源区	$\text{InGaAsP}(\text{势阱层}) \times 4$	(0.095,0.532)	5	不掺杂
上层有源区	$\text{InGaAsP}(\text{势垒层}) \times 4$	(0.181,0.395)	10	不掺杂
下层有源区	$\text{InGaAsP}(\text{势阱层}) \times 4$	(0.265,0.581)	5	不掺杂

注： m 和 n 为 0~1 之间的数，代表厚度，单位为 nm。

1.2 掺铁掩埋波导结构设计

所设计掺铁掩埋 SAG-DSAL-EML 波导结构如图 8 所示，掺铁掩埋波导结构包括分别限制异质层(GRINSCH)、间隔层、包层、N-InP 阻断层、掺铁 InP 层以及盖帽层。其中 GRINSCH 层为渐变折射率层，夹在有源区上下两侧，可以避免有源区内的光子发生光波倏逝波尾效应而穿透到重掺杂的包层，导致在包层产生强的自由载流子吸收，降低发光效率。而间隔层和包层可以阻挡纵向上的载流子泄漏，加强对光场的限制。所引入的掺铁 InP 层不仅可以加强光场的侧向限制，还可以消除集成器件中各部分之间的电学干扰，在实现电学隔离的同时也能保持光波导结构的完整性^[14]。N-InP 阻断层的作用是避免 P-InP 包层与掺铁 InP 层之间 Zn 和 Fe 的相互扩散。所设计掺铁掩埋结构 SAG-DSAL-EML 的波导结构横截面结构参数如表 2 所示。

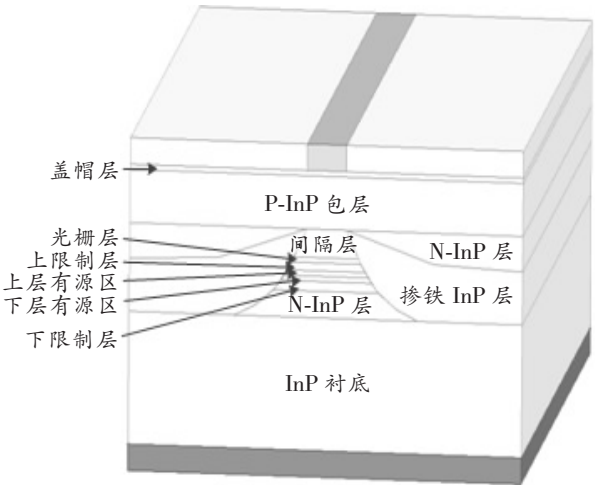


图 8 掺铁掩埋 SAG-DSAL-EML 波导结构
Figure 8 Laser partial waveguide structure of iron-doped buried EML

表 2 掺铁掩埋结构 SAG-DSAL-EML 横截面结构参数

Table 2 Partial cross-sectional structural parameters of iron-doped buried SAG-DSAL-EML

层结构	材料	$\text{In}_{1-m}\text{Ga}_m\text{As}_n\text{P}_{1-n}$	厚度/nm	掺杂浓度/ cm^{-3}
欧姆接触层	P-InGaAs	(0,0)	200	1×10^{19}
包层	P-InP	(0,0)	1 100	1×10^{18}
阻挡层	N-InP	(0,0)	330	1×10^{18}
间隔层	P-InP	(0,0)	500	5×10^{17}
上限制层	P-InGaAsP	(0,181,0.395)	100	5×10^{17}
有源区	InGaAsP×5(势垒层)	(0,181,0.395)	15	不掺杂
	InGaAsP×4(势阱层)	(0.265,0.581)	9	不掺杂
下限制层	N-InGaAsP	(0,181,0.395)	60	5×10^{17}
缓冲层	N-InP	(0,0)	160	1×10^{18}
掺铁 InP 层	Fe-InP	(0,0)	600	1×10^{18}
衬底	N-InP	(0,0)	10 000	3×10^{18}

为了验证所设计波导结构的合理性,通过 ALDS 软件对激光器和调制器进行光场分析,如图 9 所示,其光场都被限制在有源区附近,表明所设计波导结构对 EML 光场起到了较好的横向限制。

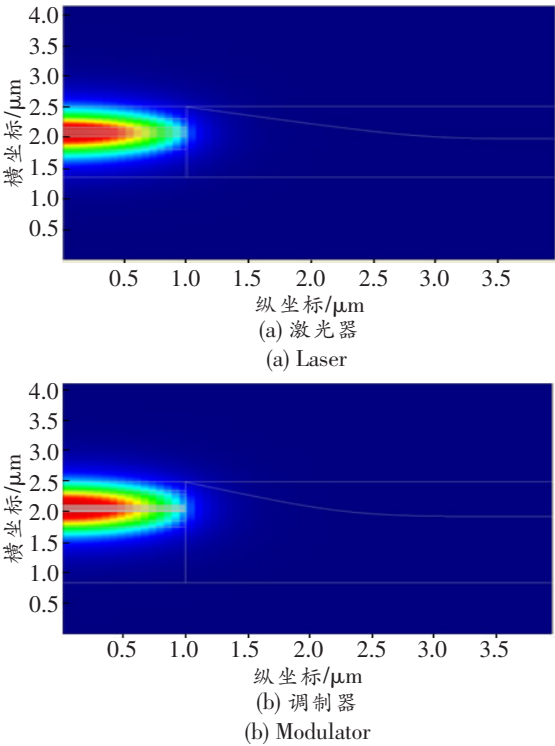


图 9 EML 横向光场分布

Figure 9 The cross-sectional optical field distribution of the laser part of the EML

1.3 芯片制备

本文所设计的基于 InGaAsP/InP 材料的 1 310 nm 掺铁掩埋结构 SAG-DSAL-EML 的制作工艺流程如图 10 所示。

本文所设计 EML 衬底晶向为[100]的 N 型 InP 衬底,对于 SAG-DSAL-EML 来说,SAG 掩膜

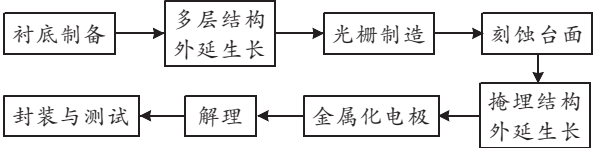


图 10 SAG-DSAL-EML 制作工艺流程图
Figure 10 Manufacturing process flow chart of SAG-DSAL-EML

图形位于调制器区域,因此需要在衬底的调制器部分制作掩膜图形,具体做法是在 N-InP 衬底上涂敷光刻胶,利用等离子体增强化学的气相沉积(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)法工艺沉积约 0.2 μm 厚度的 Si₃N₄,然后沿着晶向为[110]的方向光刻出相应 SAG 掩膜图形,如图 11 所示^[15]。

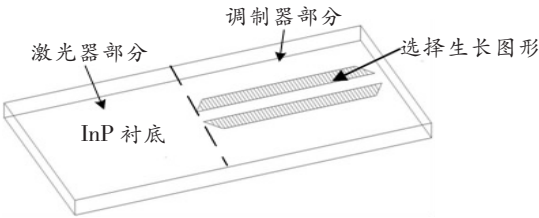


图 11 SAG 掩膜生长图形

Figure 11 Mask growth pattern of SAG

芯片多层结构外延生长所采用的工艺为金属有机化学气相外延(Metal Organic Chemical Vapor Phase Epitaxy, MOVPE)工艺,生长时 InGaAsP 材料的源为 TECa、TEIn、AsH₃ 和 PH₃,P 型掺杂剂为 DEZn,n 型掺杂剂为 H₂S^[16]。在 InP 衬底上通过 MOVPE 工艺依次外延生长缓冲层、限制层、调制器有源区、激光器有源区、上限制层和光栅层,各层参数如表 2 所示^[17]。在光栅的制作阶段,采用反应离子刻蚀技术和选择性湿法相结合的工艺,仅在激光器部分刻蚀光栅。根据选择生长图形,将

SAG-DSAL-EML 有源区腐蚀为台面结构,宽度为 $2\text{ }\mu\text{m}$, 腐蚀深度一直到衬底层。接下来通过 MOVPE 工艺进行二次外延,外延生长包括半绝缘掺铁 InP 层、浓度为 $1\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 的 N-InP 阻挡层、浓度为 $1\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 的 P-InP 包层以及掺杂浓度为 $1\times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ 的 P-InGaAsP 欧姆接触层,各层的厚度如表 2 所述。所设计 SAG-DSAL-EML 的掺铁掩埋结构显微镜图如图 12 所示。

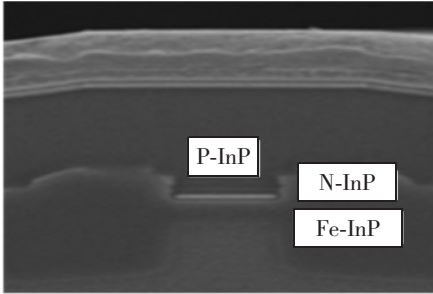
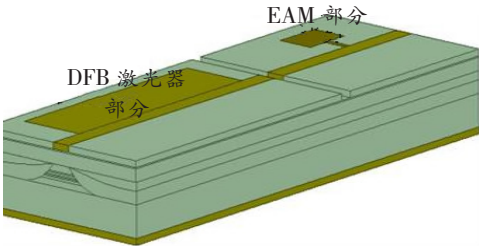


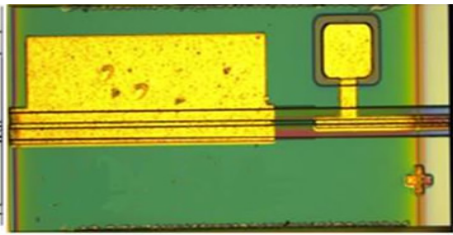
图 12 掺铁掩埋结构显微镜图

Figure 12 Microscopic image of iron-doped buried structure

电极的 P 面材料为 Zn-Au, N 面材料为 Au-Sn, 利用这些材料使器件表面金属化,完成电极的金属化制备。通过解理将芯片分解为单个管芯(bar 条),再经过镀膜、耦合和封装,完成样本芯片的制作。EML 样本芯片如图 13 所示,芯片的电极结构为共面波导电极。



(a) EML 三维结构图
(a) 3D structure diagram of EML



(b) 芯片电极结构示意图
(b) Schematic of sample chip

图 13 EML 样本芯片

Figure 13 EML sample chip

2 仿真分析与讨论

2.1 PI 特性仿真与分析

利用 ALDS 软件对所搭建的 SAG-DSAL-EML

模型进行阈值和稳态分析,并与波导结构相同的传统多量子阱 DFB 激光器进行对比,结果如图 14 所示。由图可知,在相同的波导结构下,SAG-DSAL 结构的激光器阈值电流为 8.8 mA ,传统多量子阱结构的激光器阈值电流为 10.1 mA ,阈值电流降低了 13% 。这是因为 SAG-DSAL 的上下有源层能带结构透明设计,使得有源区产生的光子被下层有源区吸收的概率大大减少,减少了内部损耗 a_i ,另外能带结构透明设计使得注入电流能快速集中到上层有源区内,提高了有源区的微分增益系数 a_g ,激光器阈值电流 J_{th} 的表达式为

$$J_{th} = \frac{J_0}{\eta} + \frac{a_i}{\eta a_g} + \frac{(1-\Gamma)a_c}{\Gamma \eta a_g} + \left(\frac{1}{\eta \Gamma a_g}\right) \left(\frac{1}{L}\right) \lg\left(\frac{1}{R}\right), \tag{1}$$

式中: J_0 为注入电流密度; η 为量子效率; a_i 为腔内损耗,来源于增益介质对光子的吸收; Γ 为光场限制因子; a_c 为辐射渗入包层的损耗系数; a_g 为微分增益系数,该值反映了能带边载流子浓度增加的速率; L 为腔长; R 为腔面反射率^[17]。由式(1)可知, a_i 减小和 a_g 增大都使得激光器的阈值电流减小。

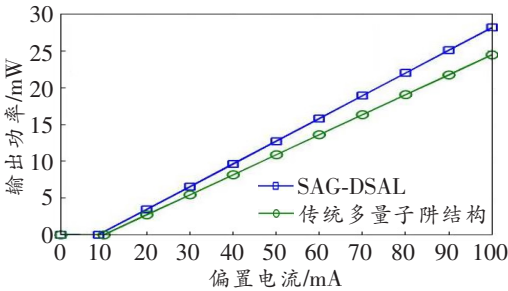


图 14 SAG-DSAL 结构与传统多量子阱结构 PI 特性对比

Figure 14 Comparison of PI characteristics between SAG-DSAL structure and traditional multiple quantum well structure

2.2 光场特性分析

图 15 所示为在有源区同一位置,掺铁掩埋结构与传统脊波导结构的横向光场模式分布情况,其中红色线为掺铁掩埋结构,绿色线为脊波导结构。由图可知,在有源区的同一位置,掺铁掩埋结构比脊波导结构的光模分布更为集中,以线段的近似斜率来表示波导结构对光场的限制能力,掺铁掩埋结构的斜率近似为 0.31 ,脊波导结构的斜率近似为 0.15 ,提高了 52% ,表明掺铁掩埋结构对光场的限制能力更强。

图 16 所示为 SAG-DSAL 的掺铁掩埋结构激光器和脊波导结构激光器的远场分布情况。由图可

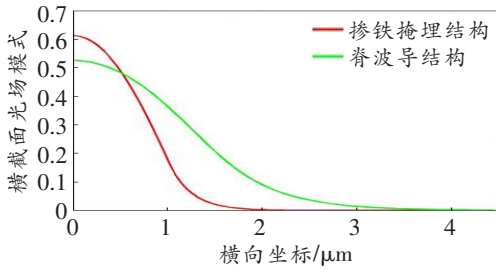


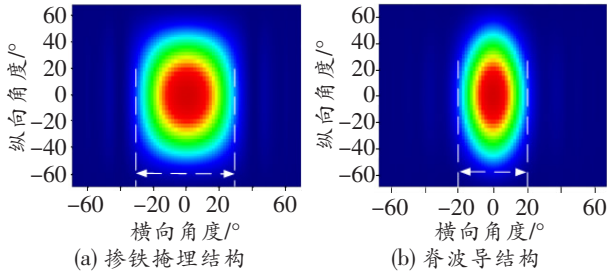
图 15 横向光场模式对比图

Figure 15 Comparison chart of horizontal light field mode

知,掺铁掩埋结构激光远场的横向和纵向角度差 30° ,而脊波导结构激光远场的横向和纵向角度差 50° ,与脊波导结构相比,掺铁掩埋结构激光远场的横向和纵向角度之间的差值减少了 20° ,降低了 40% ,光斑更接近一个圆,表明掺铁掩埋结构可以减少激光器的远场发散角。根据狭缝衍射原理,激光器的垂直发散角 $\theta_\perp$ 的表达式为

$$\theta_\perp = \frac{4.05(\bar{n}_2^2 - \bar{n}_1^2)d}{\lambda}, \quad (2)$$

式中: $\bar{n}_2$ 和 $\bar{n}_1$ 分别为有源层和限制层的折射率; d 为有源区的厚度; λ 为激光波长^[18-19]。掺铁掩埋技术通过在有源区两侧生长掺铁的 InP 层,提高了侧向限制层的折射率 $\bar{n}_1$,由式(2)可知,可使得发散角变小。



(a) Iron-doped buried structure (b) Ridge waveguide structure

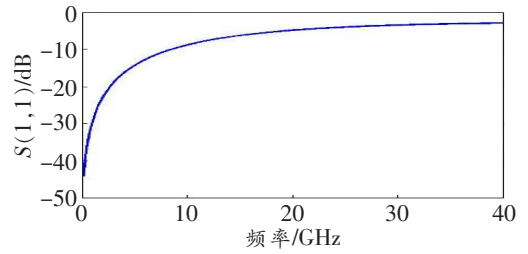
图 16 激光远场分布

Figure 16 Laser far-field distribution

2.3 高频特性仿真分析

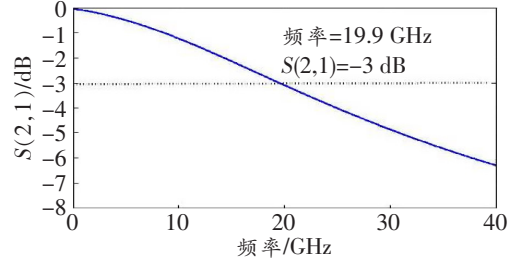
在 HFSS 软件中,对所搭建 SAG-DSAL-EML 集总电极的 EAM 模型进行高频分析,结果如图 17 所示。由图 17(b)可知,集总电极的掺铁掩埋结构 EAM 在 -3 dB 的调制带宽为 19.9 GHz。

将 S 参数代入到 EAM 的等效电路中进行参数拟合,等效电路如图 18 所示。 S_{11} 和 S_{21} 的拟合曲线如图 19 所示,其中红色线 $S(1,1)$ 和 $S(2,1)$ 为拟合的 S 参数,蓝色线 $S(3,3)$ 和 $S(4,3)$ 为 HFSS 软件提供的 S 参数,两者之间拟合误差为 1% 。通过拟合得到集总电极掺铁掩埋结构 EAM 的结电容为



(a) S11 参数

(a) Parameters of S11



(b) S21 参数

(b) Parameters of S21

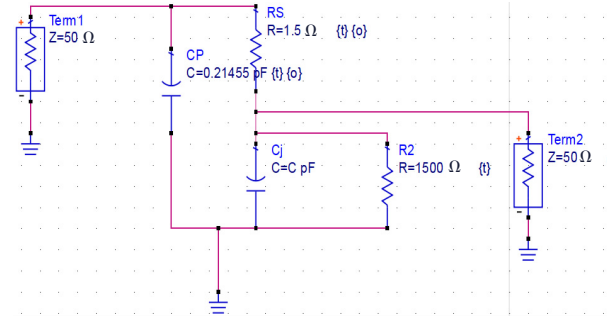
注: S_{11} 为端口 2 匹配时,端口 1 的反射系数;

S_{21} 为端口 2 匹配时,端口 1 到端口 2 的正向传输系数。

 图 17 HFSS 仿真调制器部分的 S 参数

 Figure 17 S parameters of HFSS simulation modulator

0.09 pF,串联电阻为 2.45Ω ,寄生电容为 0.2 pf。



注:CP 为寄生电容;RS 为体电阻和欧姆电阻组成的串联电阻;Cj 为结电容^[20];Term 为编号;Z 为阻抗,R2 与光功率有关,随着输入光功率的增大,R2 逐渐减小。

图 18 ADS 软件中调制器等效电路图

Figure 18 Equivalent circuit diagram of modulator

为了验证掺铁掩埋技术对器件频率响应的影响,在先进设计系统(Advanced Design system, ADS)软件中,对不同结电容的 EAM 等效电路进行 S 参数仿真,结果如图 20 所示。由图可知,随着结电容的增加,调制器 -3 dB 的调制带宽逐渐降低。将搭建的集总电极掺铁掩埋 EAM 模型中的掺铁 InP 层替换成掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 P-InP 层,其他结构和材料参数不变,通过 S 参数高频仿真与等效电路提取,得到 PNP 掩埋结构 EAM 的结电容为 0.19 pF。由图 20 可知,传统 PNP 掩埋结构 EAM 在 -3 dB 时的响应频率为 15 GHz,通过对比分析可知掺铁掩埋结构比传统 PNP 掩埋结构

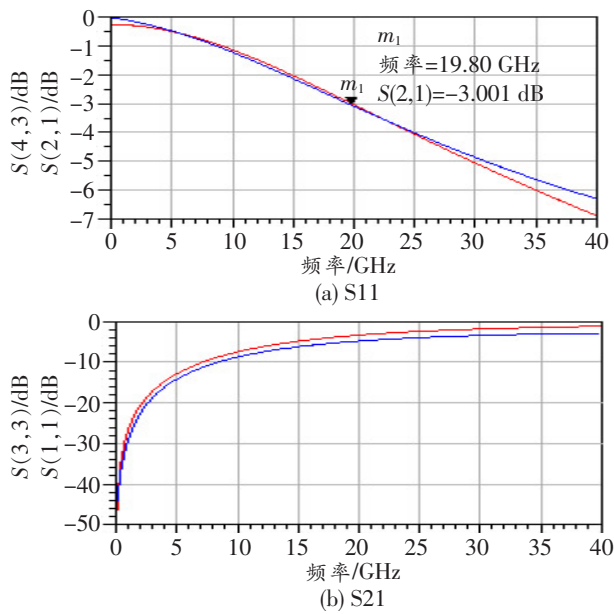
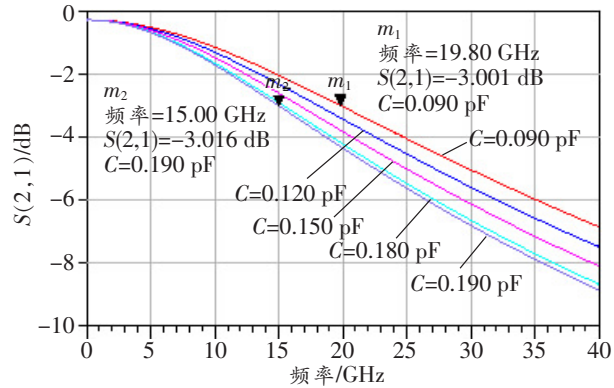


图 19 S 参数拟合曲线

Figure 19 S- parameter fitting image

EAM 的调制带宽提高了 24%。



注:C 为结电容,HFSS 软件仿真得到 S 参数后,由 ALDS 软件提取等效电路后进行拟合得到结电容。

图 20 不同结电容下调制器的频率响应

Figure 20 Frequency response of modulator under different junction capacitance

3 芯片测试

3.1 PI 特性测试

测量芯片 P-I-V 曲线,结果如图 21 所示。常温下,设备阈值电流为 14.5 mA,在将激光器驱动到饱和区之前,在 100 mA 的注入电流下,输出功率达到 7.45 mW。当注入电流为 14.5 mA 时,斜率效率 $dP/dI \approx 0.17$ W/A,外量子效率 η_{ex} 为 17.8%。

3.2 光场特性

EML 芯片激光器部分的激光光谱如图 22 所示,在 70 mA 的注入电流下,激光波长为 1 310 nm,获得了 45.64 dB 的高 SMSR。图 23 所示为 EML

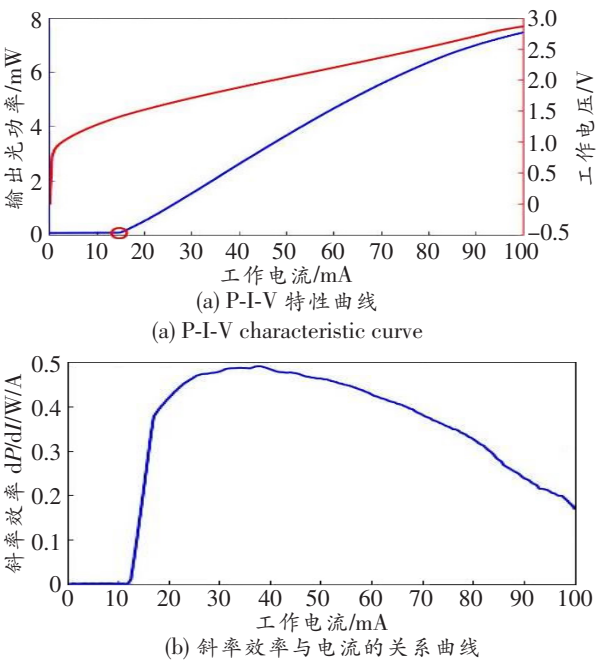


图 21 阈值特性

Figure 21 Threshold value characteristics

的静态消光比特性,当施加到 DFB 部分的偏置电流为 70 mA 时,偏置电压从 0 扫描到 -3 V,调制器可获得 16 dB 的静态消光比。

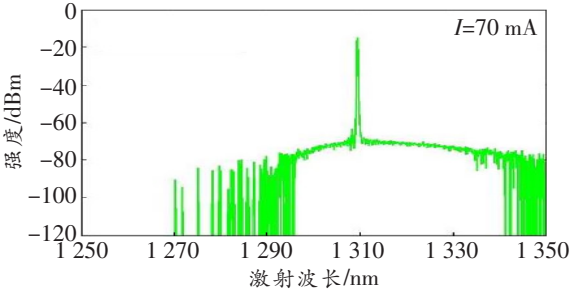


图 22 70 mA 注入电流下激光器部分激光光谱图

Figure 22 The laser spectrum of the part of laser at 70 mA injection current

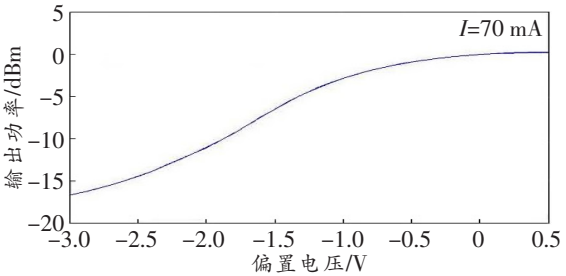


图 23 静态消光比

Figure 23 Measured static extinction ratio

3.3 高频特性

图 24 所示为 EML 偏置电流为 70 mA,调制器反向偏压为 0、-0.3、-0.6 和 -0.9 V 时的高频响

应。由图可知,当 $I = 70 \text{ mA}$, EAM 偏置电压为 -0.9 V 时, -3 dB 的响应频率为 43 GHz , 调制带宽超过 40 GHz , 具有较高的调制带宽。

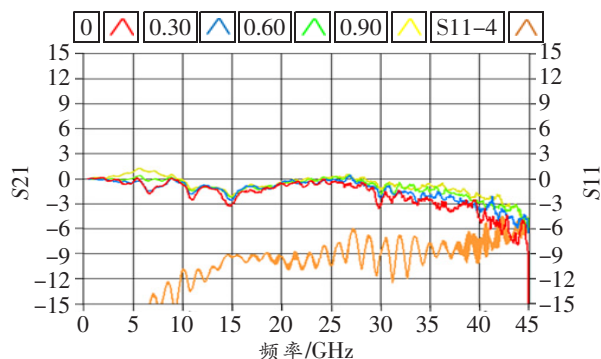


图 24 高频响应曲线

Figure 24 High frequency response curve

4 结束语

本文利用掺铁掩埋技术设计了 InGaAsP/InP 材料体系的 $1\ 310 \text{ nm}$ 掺铁掩埋结构 SAG-DSAL-EML, 并制作了样品芯片, 通过对所设计的新型 SAG-DSAL-EML 的仿真研究可知, 掺铁掩埋结构的激光远场横纵角度之差降低了 40% , 调制器在 -3 dB 的响应带宽提高约 24% , 表明掺铁 InP 层的引入实现了光场限制, 改善了芯片的远场发散角特性, 有效提高了调制器的高速频率响应特性, 为解决 SAG-DSAL 结构在高频调制环境下响应速度问题提供了一种新的途径。通过对样本芯片测试可知, 所设计新型掺铁掩埋结构 SAG-DSAL-EML 的阈值电流较低, 调制带宽超过 40 GHz , 各项性能参数良好, 能满足高速光通信的基本要求。

参考文献:

- [1] Theurer M A D. Electroabsorption Modulated Lasers and Hybridly Integrated Lasers for Communication and Sensing[M]. Charlottenburg: Technische Universitaet Berlin (Germany), 2021.
- [2] Cano I N, Nasset D, Brenot R. 25-Gb/s Laser Modulated EML with High Output Power[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(8):489-491.
- [3] 庄圆. 扩展传输距离的 V 型腔可调谐激光器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- Zhuang Y. The Study of V-cavity Tunable Laser with Extended Transmission Distance[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [4] Sun C, Yang S, Xiong B, et al. Progress in High-Speed Electroabsorption Modulated Lasers[J]. Chinese Jour-

- nal of Lasers, 2020, 47(7):0701002.
- [5] Deng Q, Liang S, Zhu H, et al. Low Chirp Electroabsorption-modulated DFB Laser Fabricated by Combining Selective-area Growth and Double-stack Active Layer Techniques[C]//Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XXII. CA, USA: International Society for Optics and Photonics, 2018: 105352D-1-105352D-8.
- [6] 李洵, 陈四海, 黄黎蓉, 等. 光电子器件设计、建模与仿真: Optoelectronic Devices Design, Modeling, and Simulation[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- Li X, Chen S H, Huang L R. Optoelectronic Devices Design, Modeling, and Simulation[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [7] 熊永华, 万枫, 王任凡. 一种电吸收调制激光器及其制造方法: 中国, 201710108949. 7[P]. 2019-07-26.
- Xiong Y H, Wan F, Wang R F. The Invention Relates to an Electro-absorption Modulation Laser and a Manufacturing Method Thereof: China, 201710108949. 7 [P]. 2019-07-26.
- [8] Sun Y, Jia H, Xiong Y, et al. Optimal Design of High-Speed Electro-Absorption Modulated Laser based on Double Stack Active Layer Structure[C]//2021 IEEE 6th Optoelectronics Global Conference (OGC). Shenzhen, China: IEEE, 2021:10-14.
- [9] Deng Q, Zhu H, Xie X, et al. Low Chirp EMLs Fabricated by Combining SAG and Double Stack Active Layer Techniques[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2):1-7.
- [10] Chang J Y, Kuo Y K, Tsai M C. Correlation of Barrier Material and Quantum-well Number for InGaN/(In) GaN Blue Light-emitting Diodes[J]. Physica Status Solidi (a), 2011, 208(3):729-734.
- [11] 尹晋宏, 贾华宇, 李灯熬, 等. AlGaInAs/InP 多量子阱激光器的量子阱数的优化[J]. 激光杂志, 2017, 38(9): 9-13.
- Yin J H, Jia H Y, Li D A. Optimization of Quantum Well Number in AlGaInAs/InP Multiple Quantum Well Lasers[J]. Laser Journal, 2017, 38(9):9-13.
- [12] 赵霞飞, 贾华宇, 李灯熬, 等. InGaAsP/InP 激光器结构与量子阱数的优化[J]. 激光杂志, 2017, 38(5):6-10.
- Zhao X F, Jia H Y, Li D A. Optimization of InGaAsP/InP Laser Structure and Quantum Well Number[J]. Laser Journal, 2017, 38(5):6-10.
- [13] 贾华宇, 赵霞飞, 李灯熬, 等. 一种大功率直调激光器: 中国, China, 201610895493. 9[P]. 2017-01-11.
- Jia H Y, Zhao X F, Li D A. A High-power Direct-modulation Laser: China, 201610895493. 9 [P]. 2017-

01-11.

[14] 许国阳,颜学进,朱洪亮,等. 半绝缘 InP 的优化生长条件以及掩埋的 1.55 μm 激光器[J]. 半导体学报, 2000(2):188—191.

Xu G Y, Yan X J, Zhu H L. The Optimal Growth Conditions of Semi-insulated InP and the Buried 1.55 μm Laser Were Investigated[J]. Journal of Semiconductors, 2000(2):188—191.

[15] 王恒,朱洪亮,潘教青,等. 选择区域外延叠层行波电吸收调制激光器的制作方法:中国, CN101471541A [P]. 2011-01-26.

Wang H, Zhu H L, Pan J Q. The Fabrication Method of the Region Epitaxial Multilayer Traveling-wave Electro-absorption Modulation Laser is Selected; China, CN101471541A[P]. 2011-01-26.

[16] Ahmad Z, Chao R L, Hung Y J, et al. High-Speed Electro-Absorption Modulated Laser at 1.3 μm Wavelength based on Selective Area Growth Technique [C]//2019 IEEE Photonics Conference (IPC). TX USA:IEEE, 2019: 1—2.

[17] Stegmüller B, Hanke C. Integrated 1.3- μm DFB Laser Electroabsorption Modulator based on Identical MQW Double-stack Active Layer with 25-GHz Modulation Performance [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(8):1029—1031.

[18] Harrison P, Valavanis A. Quantum wells, Wires and Dots: Theoretical and Computational Physics of Semiconductor Nanostructures[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.

[19] 齐军. 基于侧向微结构的 1 064 nm 半导体激光器模式特性研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2021.

Qi J. Study of 1 064 nm Semiconductor laser mode characteristics based on lateral microstructure [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021.

[20] 陈铭. 与 V 型耦合腔波长可调谐激光器集成的电吸收调制器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.

Chen M. Study on Electro-absorption Modulator Integrated with V-type Coupled Cavity Wavelength Tunable Laser[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.

~~~~~

(上接第 33 页)

[3] 倪磊,达新宇,胡航,等. 基于改进 Logistic 相位扰码的抗截获通信[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(6):35—40.

Ni L, Da X Y, Hu H, et al. Research on Anti-interception Communication based on Improved Logistic Phase Scrambling[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2019, 47(6):35—40.

[4] 谭业腾,蒲涛,郑吉林,等. 基于光编/解码技术的抗截获通信系统研究[J]. 光学学报, 2020, 40(9):32—39.

Tan Y T, Pu T, Zheng J L, et al. Anti-Interception Communication System based on an Optical Encoding/Decoding Technology[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9):32—39.

[5] 扶龙香,贺少波,王会海,等. 离散忆阻混沌系统的 Simulink 建模及其动力学特性分析[J]. 物理学报, 2022, 71(3):42—51.

Fu L X, He S B, Wang H H, et al. Simulink Modeling and Dynamic Characteristics of Discrete Memristor Chaotic System[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(3): 42—51.

[6] 阳艳竹,黄锐,刘翠海. 基于跳频和调制跳变提高潜艇隐蔽通信能力的思考[J]. 数字技术与应用, 2019, 37(3):224—225.

Yang Y Z, Huang R, Liu C H. Thoughts on Improving the Concealment Communication Capability of Submarine based on Frequency Hopping and Modulation Hopping[J]. Digital Technology and Application, 2019, 37(3):224—225.

[7] 王识,邢甜甜,王俊华,等. 光纤通信物理层抗截获技术综述[J]. 光通信技术, 2018, 42(12):10—14.

Wang S, Xing T T, Wang J H, et al. Overview of Anti-interception Techniques for Physical Layer of Optical Fiber Communication[J]. Optical Communication Technology, 2018, 42(12):10—14.

[8] 黄铃,徐键卉,陈丽花,等. 基于非重叠到达角的分布式大规模 MIMO 的抗截获传输方法[J]. 通信技术, 2021, 54(8):1827—1832.

Huang L, Xu J H, Chen L H, et al. Distributed Massive MIMO and Anti-interception Transmission Methods based on Non-overlapping Angle of Arrival[J]. Communications Technology, 2021, 54(8):1827—1832.

[9] 蒋东华,朱礼亚,沈子懿,等. 结合二维压缩感知和混沌映射的双图像视觉安全加密算法[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(2):139—148.

Jiang D H, Zhu L Y, Shen Z Y, et al. A Double Image Visual Security Encryption Algorithm Combining 2D Compressive Sensing and Chaotic Mapping [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(2): 139—148.