

文章编号:1001-5078(2021)07-0865-06

· 激光应用技术 ·

全双工直接调制激光器光网络单元的优化研究

陈蕊蕊¹, 楚广勇^{1,2}

(1. 江南大学理学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省轻工业光电工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122)

摘要:光放大器是光通信的关键组成部分。对半导体光放大器的算法模型进行优化与测试, 系统的分析了建模运放的增益和噪声指数。测试结果表明, 半导体光放大器的最佳幅度调制条件是输入 -5 dBm 的功率与选择 100 mA 的偏置电流, 最佳相位调制条件是输入 -20 dBm 的功率与选择 100 mA 的偏置电流。分析并搭建了通信速率为 2.5 Gb/s 的 20 km 双向传输通信系统, 对半导体光放大器和分布反馈激光器集成的光网络单元进行了上行链路和下行链路的双向与单向传输测试。在前向误码率要求为 2.4×10^{-4} 时, 双向传输的上行接收灵敏度达到 -22.4 dBm, 下行接收灵敏度达到 -31.4 dBm; 单向传输的上行下行接收灵敏度分别达到 -22.7 dBm 和 -31.6 dBm。

关键词:光通信; 半导体光放大器; 增益; 噪声指数; 分布反馈激光器

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2021.07.007

Research on optimization of optical network unit of full-duplex direct modulation laser

CHEN Xin-rui¹, CHU Guang-yong^{1,2}

(1. School of Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu Provincial Research Center of Light Industrial Optoelectronic Engineering and Technology, Wuxi 214122, China)

Abstract: Optical amplification constitutes a key component of optical telecommunication. The gain and noise figure of the model operational amplifier are analyzed systematically by optimizing and testing the algorithm model of semiconductor optical amplifier. The results show that the optimal conditions for amplitude modulation or phase modulation is the bias current of 100 mA and input power of -5 dBm or -20 dBm, respectively. The 20 km bidirectional transmission communication system with a communication rate of 2.5 Gb/s is analyzed and built, the bidirectional and unidirectional transmission of upstream and downstream for optical network unit integrated with semiconductor optical amplifier and distributed feedback laser is tested. When forward bit error rate is 2.4×10^{-4} , the sensitivities reach -22.4 dBm and -31.4 dBm for bidirectional upstream and downstream, and the sensitivities reach -23.4 dBm and -23.8 dBm for unidirectional upstream and downstream, respectively.

Keywords: optical communication; semiconductor optical amplifier; gain; noise figure; distributed feedback laser

1 引言

通信系统对数据容量需求的爆炸式增长加速了

下一代无源光网络 2 (NGPON2) 的发展^[1-2]。受农村地区, 远距离办公等里程限制, 国际电信联盟

基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (No. BK20170199); 中央高校基础研究专项经费项目 (No. JUSRP11835); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (No. SJCX20_0762) 资助。

作者简介: 陈蕊蕊 (1997 -), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤通信方向。E-mail: 6191203001@stu.jiangnan.edu.cn

通讯作者: 楚广勇 (1986 -), 男, 副教授, 博士后, 硕士生导师, 主要研究方向为光纤通信方向。E-mail: cgy@jiangnan.edu.cn

收稿日期: 2020-10-20; **修订日期:** 2020-11-12

(ITU)和电气和电子工程师协会(IEEE)等标准化组织提出了覆盖范围更广的 PONS^[3-4],大范围网络传输需要光放大器来延长光线路终端(OLT)和光网络单元(ONUs)之间的距离^[5]。

选择体积小、使用寿命长、预算低的半导体光放大器(SOA)进行研究,SOA 在小尺寸和稍差的放大器性能之间提供了很好的平衡,可以应用于密集光路中与其他器件进行耦合和集成,适合 ONU 的无色应用^[6]。因此,准确地选择输入功率和偏置电流对于确定最佳运行条件以实现基于 SOA 的所需功能并利用其快速非线性特性是非常重要的。本文对 SOA 进行优化建模,系统地分析了 SOA 在不同输入功率和偏置电流下的性能特征,进一步搭建了一个基于 SOA 与分布反馈(DFB)激光器集成的 20 km 双向传输通信系统,测试并分析了该系统在通信速率为 2.5 Gb/s 下的频移键控(FSK)通信性能,有效展示了 SOA 在实际双向无源光传输网络的一个重要集成无色应用。

2 SOA 的理论建模与主要特性

以 SOA 宽带理论模型为基础,设定经典材料系数和几何参数^[7],从能带理论推导入材料增益因子,考虑放大自发辐射噪声与光信号的相互作用,模拟出一个 InP-InGaAsP 均匀掩埋脊形 SOA。

2.1 SOA 的工作结构与原理

SOA 的有源波导为 InGaAsP,衬底为 InP,整体结构如图 1 所示。泵浦电流为外来光子受激辐射所需的粒子束反转提供能源,让光子在有源区得到增益。有源层周围是低折射率的宽带隙材料,用来提

高受激辐射与光子注入效率。输入输出两端涂有抗反射涂层,能减少光腔反射,从而防止自激振荡。有源区掩埋在 InP 质基底内呈异质结结构,有利于将光束限制在有源区内,提高有源区载流子浓度。这种设计在第三通信窗口中具有出色的散热和光谱响应^[8]。

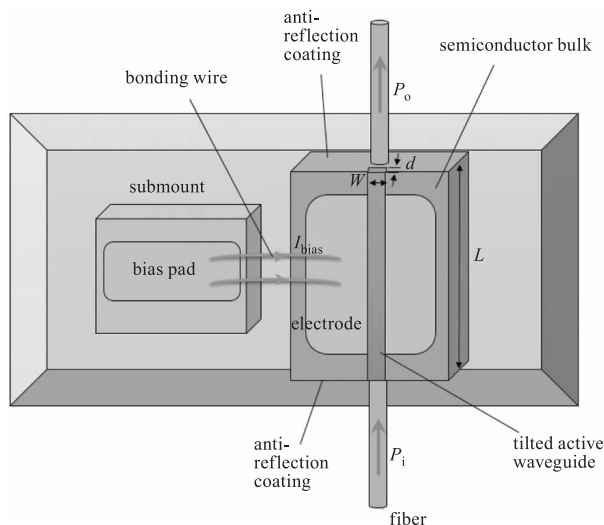


图 1 SOA 结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of SOA

2.2 SOA 的算法流程模型

为方便计算,假设所有偏置电流仅通过有源区且在有源区宽度上呈均匀分布。SOA 在空间中被离散化,以便对 SOA 模型方程实现数值求解。将 SOA 分成 Z 个部分,针对每个部分载流子浓度 $n(i)$ 的相对误差进行迭代判断,初始场和噪声光子密度为 0,采用牛顿迭代法求解初始载流子浓度。SOA 算法流程如图 2 所示。

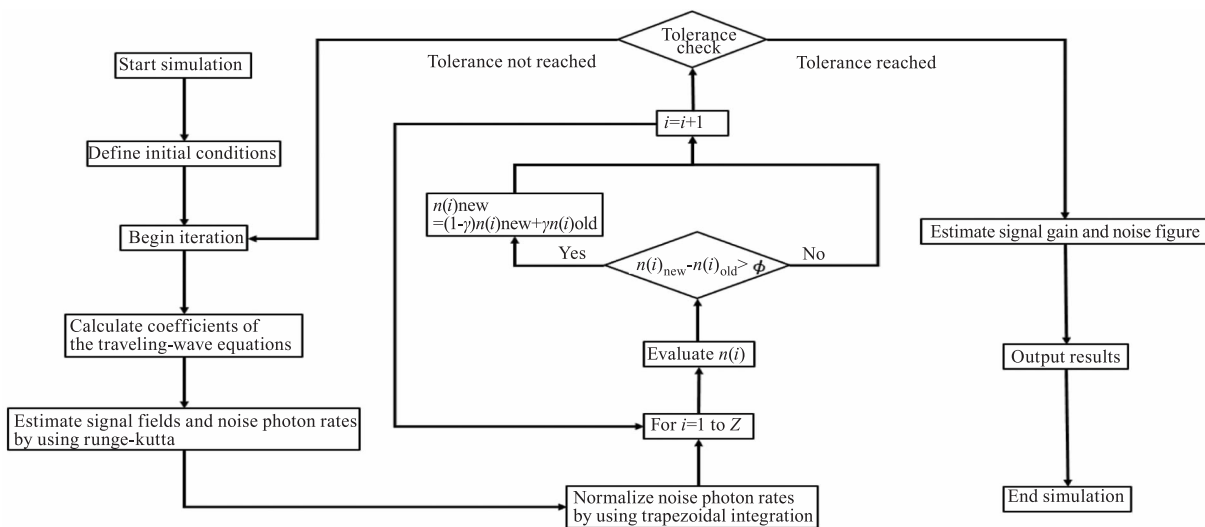


图 2 SOA 稳态模型算法

Fig. 2 SOA steady-state model algorithm

将新的载流子浓度减去上一次计算的载流子浓度,如果相对误差大于限定因子 ϕ ($\phi = 10^{-6}$),那么采用替归算法 $n(i)_{\text{new}} = (1 - \gamma)n(i)_{\text{new}} + \gamma n(i)_{\text{old}}$ 。替归系数 γ 为 0.4 时,迭代效率较高。继续迭代直到信号场,自发辐射噪声光子密度和载流子浓度迭代的变化率在期望误差的容忍范围内,得到收敛到载流子浓度的最佳值。整个过程使用一组耦合光场传播方程^[9]求得信号场和噪声光子密度,根据载流子浓度速率方程^[10]来更新载流子浓度。迭代停止后,依次推导增益 (Gain) 和噪声指数 (NF)。

2.3 SOA 的模拟结果与特性分析

图 3 是根据算法模型得到的 SOA 特性分析图。偏置电流很小而输入光功率很大时,SOA 的受激辐射比自发辐射弱,所以会出现增益为负现象,这里不予讨论。

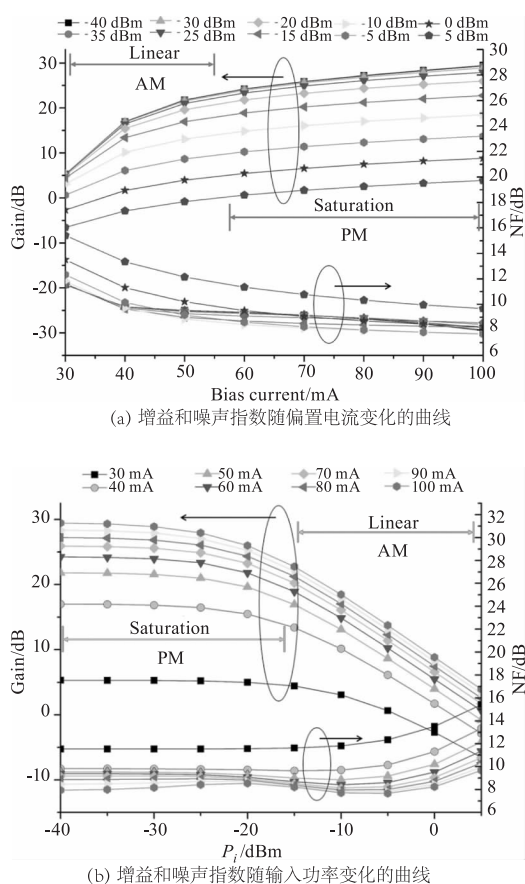


图 3 SOA 模型的特性分析图

Fig. 3 Characteristic analysis diagram of the SOA model

图 3(a) 是随偏置电流变化而变化的增益和噪声指数分析图。当偏置电流较小时,随注入电流增加,载流子密度增加,SOA 增益逐渐增大,此时

受激辐射加强,自发辐射的噪声功率相对减弱,噪声指数下降。当偏置电流增加到一定程度,受载流子浓度恢复时间的限制,增益受到抑制从缓慢上升至不变,此时受激辐射趋于稳定,噪声指数基本不变。

图 3(b) 是随输入功率变化而变化的增益和噪声指数分析图。当输入光功率较小时,消耗的载流子数目较少,SOA 能充分放大光信号,受激辐射和自发辐射相应增加,增益和噪声指数基本不变;随着输入光功率的增加,有源区的载流子消耗速率加快,载流子浓度在较低的水平上达到新的平衡,SOA 放大能力减弱,从而增益下降^[11]。当 SOA 逐渐饱和时,自发辐射随着输入信号功率的增大而减小,输出信噪比增大,噪声指数减小。随着输入功率的增大,由于光纤非线性效应^[12],SOA 达到强增益饱和,输出噪声值迅速增大,输出信噪比减小,噪声指数增大。

必须排除两个区域才能实现 SOA 的最佳性能。如果信号的输入功率太低 ($P_i < -20$ dBm),与信号光子速率相比,噪声光子速率相当高,信号以小信号增益放大,但不会达到高输出功率水平。与信号输出功率接近饱和的情况相比,噪声的输出更多。而高输入功率的信号 ($P_i > 0$ dBm) 是低增益放大,放大器会增加噪声。在这两个边界之间,对于中等或高偏置电流,可以获得低分贝的噪声指数,保证工作在透明阈值以上,SOA 在这个区间内实现最佳性能。从图 3(b) 可得 $P_i = -20$ dBm, $I_{\text{bias}} = 100$ mA 是最佳相位调制点, $P_i = -5$ dBm, $I_{\text{bias}} = 100$ mA 是最佳幅度调制点。

图 4(a)、(b) 展示了在输入功率为 -20 dBm 和 -5 dBm 时,SOA 在不同偏置电流下的增益平坦度。在 1540 nm 到 1560 nm 之间,模拟的 SOA 增益平坦性良好,噪声指数较低,能满足基于 SOA 的各种应用需求,可作放大器、调制器、光开关等用途^[13-14]。随偏置电流的增加,不同波长间的增益方差变小,增益平坦度增加。

3 DFB-SOA 在双向光传输网络的应用

DFB 激光器采用折射率周期性变化的结构实现谐振腔的反馈,通过直接调制产生频率调制或频移键控信号,有着高输出功率和优秀的单纵模特性,受到国内外的广泛关注与研究^[15-16]。将 SOA 与

DFB 激光器集成, SOA 能放大 DFB 的光信号, 补偿信号通过光纤传播时的衰减, 扩大 PON 的延展范围。

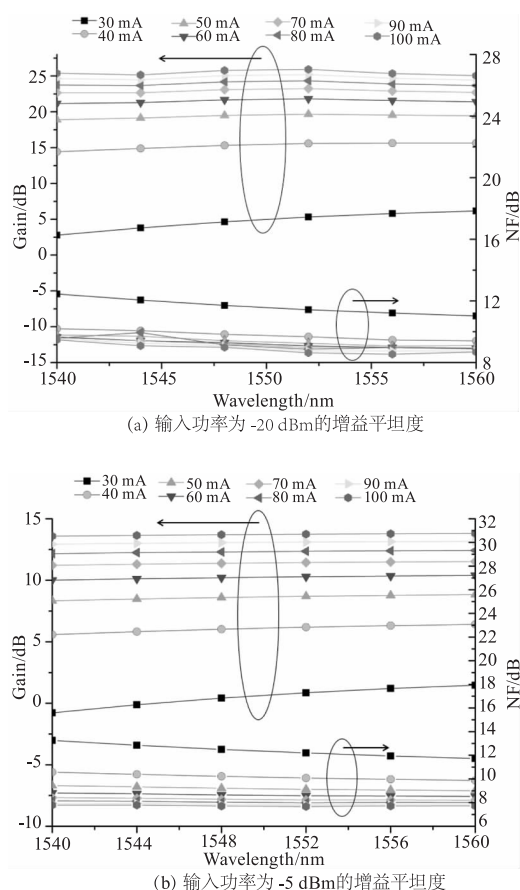
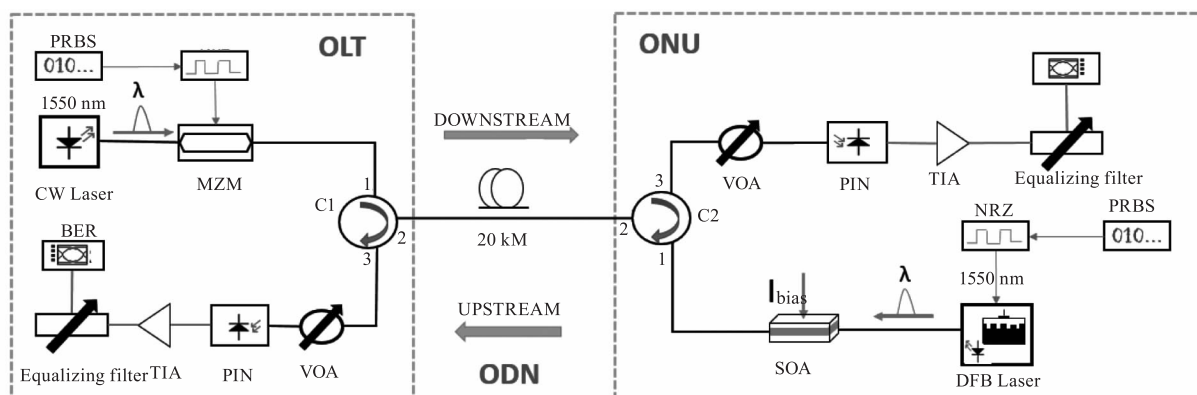


图 4 SOA 模型的增益平坦度曲线

Fig. 4 The gain flatness curves of the SOA model



ODN - 光分配网络; CW Laser - 连续波激光器; C1, C2 - 循环器; VOA - 可变光衰减器; PIN - PIN 二极管; TIA - 跨阻抗放大器

图 5 基于 DFB-SOA 激光器的 ONU 的 2.5 Gb/s 双向传输

Fig. 5 The DFB-SOA laser based ONU for 2.5 Gb/s bidirectional transmission

图 6(c) 为基于 DFB-SOA 的双向传输在单模光纤为 0 和 20 km 两种情况下的系统通信误码率测试结果。在通信速率为 2.5 Gb/s, 前向误码率

3.1 基于 DFB-SOA 的 20 km 2.5 Gb/s 双向传输的设计和分

图 5 显示了在 2.5 Gb/s 数据速率下, 使用伪随机二进制序列 (PRBS) 测量以 DFB-SOA 激光器为上行发射机的 20 km 双向传输网络性能的实验框架。下行传输在 OLT 使用外调制, PRBS 经过标准不归零脉冲 (NRZ) 发生器转换为电信号, 通过马赫-曾德尔调制器 (MZM) 加载到连续光波上, 成为入纤所需的载有“信息”的光信号。通过 20 km 标准单模光纤 (SSMF) 传输后, 光信号通过光电探测器和均衡滤波器转换成低噪声电信号。最后, 从误码率分析器中检测得到最终输出信号的误码率。上行传输是在 ONU 使用直接调制, 数据信号通过 DFB-SOA 集成激光器内调制加载到光载波上, DFB 激光器的泵浦电流为 120 mA, 峰峰值电流为 50 mA, SOA 的增益为 25 dB, 噪声指数为 8 dB, 其他与下行传输结构一致。

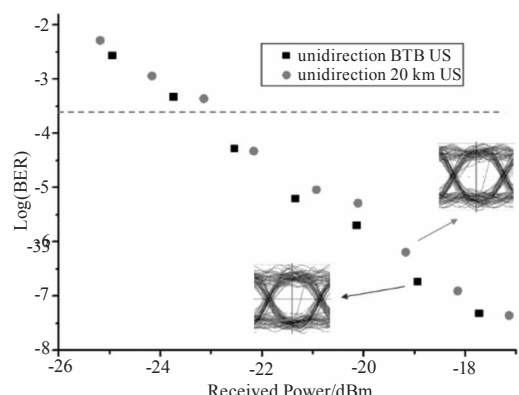
3.2 基于 DFB-SOA 的 20 km 2.5 Gb/s 双向传输结果与讨论

图 6(a) (b) 显示了 2.5 Gb/s 的单向传输在单模光纤为 0 和 20 km 两种情况下的传输误码率 (BER) 与接收光功率的关系。前向误码率为 2.4×10^{-4} 时^[17], 单向上行传输在背对背 (BTB) 的灵敏度为 -23.4 dBm, 在 20 km 的灵敏度为 -22.7 dBm; 单向下行传输在 BTB 的灵敏度为 -32.2 dBm, 在 20 km 的灵敏度为 -31.6 dBm。

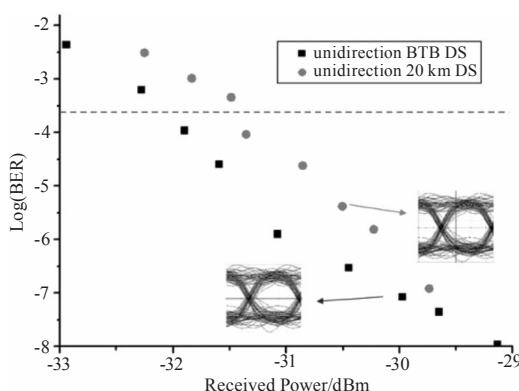
为 2.4×10^{-4} 的条件下, BTB 传输的上行灵敏度为 -23.1 dBm, 下行灵敏度为 -31.7 dBm。经过 20 km 光纤传输后的上行灵敏度为 -22.4 dBm,

下行灵敏度为 -31.4 dBm。

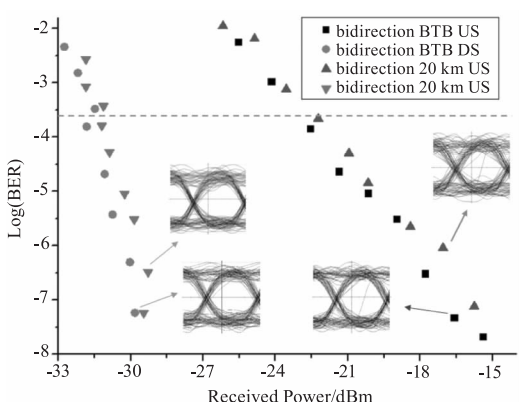
与 BTB 的双向传输相比,20 km 的双向上游功率损耗为 0.7 dB,双向下游功率损耗为 0.3 dB,证明 20 km 的光纤色散对整个系统产生的影响很小。同 20 km 的单向传输相比,瑞利后向散射会限制光接入网的接收灵敏度,20 km 的双向上游的功率损耗为 0.3 dB,双向下游的功率损耗为 0.2 dB,瑞利后向散射对此系统的影响不大。



(a) 20 km和BTB在上行单向传输的误码率曲线



(b) 20 km和BTB在下行单向传输的误码率曲线



(c) 20 km和BTB在上行和下行双向传输的误码率曲线

图6 基于DFB-SOA的2.5 Gb/s单向与双向光传输网络的误码率分析图

Fig.6 BER analysis diagram of 2.5 Gb/s unidirectional and bidirectional optical transmission network based on DFB-SOA

4 结论

本文通过算法建模优化了实际 SOA 的工作性能,系统的测试并分析了影响 SOA 增益与噪声指数的诸多因素。测试结果表明 SOA 在 1540 nm 到 1560 nm 的增益平坦度良好,可满足基于 SOA 的不同功能需求,该 SOA 的最佳幅度调制点是输入功率为 -5 dBm,偏置电流为 100 mA,最佳相位调制点是输入功率为 -20 dBm,偏置电流为 100 mA。将 SOA 与 DFB 激光器集成放入 20 km 2.5 Gb/s 双向无源光网络的 ONU 中作上行信号源,前向误码率为 2.4×10^{-4} 时,双向传输的上行下行灵敏度分别可达到 -22.4 dBm 与 -31.4 dBm,光纤色散与瑞利后向散射对此系统的影响很小,为今后 SOA 在实际 ONU 端的优化设计提供了理论指导。

参考文献:

- [1] Luo M, Wu DY, Li WZ, et al. 100 Gb/s (4×25 Gb/s) real-time coherent UDWDM-PON with a large power budget [J]. Opt Commun Netw, 2020, 12(2): A204-A213.
- [2] Kim K, Doo K-H, Lee HH, et al. High speed and low latency passive optical network for 5G wireless systems [J]. Lightwave Technol, 2019, 37(12): 2873-2882.
- [3] Khotimsky DA. NG-PON2 transmission convergence layer: a tutorial [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(5): 1424-1432.
- [4] DeSanti C, Du L, Guarin J, et al. Super-PON: an evolution for access networks [Invited] [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2020, 12(10): 66-77.
- [5] Taguchi K, Asaka K, Fujiwara M, et al. Field trial of long-reach and high-splitting λ -tunable TWDM-PON [J]. Light. Technol, 2016, (34): 213-221.
- [6] Goki P N, Imran M, Porzi C, et al. Lossless WDM PON photonic integrated receivers including SOAs [J]. Appl Sci-Basel, 2019, 9(12): 14.
- [7] Connelly MJ. Wideband semiconductor optical amplifier steady-state numerical model [J]. IEEE J Quantum Electron, 2001, 37(8): 1103.
- [8] Kharraz OM, Supa'at ASM, Atieh A, et al. Enhanced gain saturation model of non-linear semiconductor optical amplifiers [J]. Iet Optoelectronics, 2018, 12(6): 263-268.
- [9] Cui L, Wang H, Li W, et al. Study on gain recovery time of wavelength conversion based on single-port-coupled QD-SOA [J]. Laser Technology, 2016, 40(5): 742-745. (in Chinese)

- 崔乐乐,王海龙,李雯,等. 基于单端 QD-SOA 波长转换增益恢复特性研究[J]. 激光技术, 2016, 40(5): 742 – 745.
- [10] Connelly M J. Dynamic model of slow light in a tensile-strained semiconductor optical amplifier[J]. Optical and Quantum Electronics, 2014, 46(10): 1247 – 1252.
- [11] Miao Qingyuan. Research on integrated twin-guide semiconductor optical amplifier and scalable active optical switch matrix [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006: 63 – 68. (in Chinese)
- 缪庆元. 集成双波导 SOA 和可扩展型有源光开关矩阵的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006: 63 – 68.
- [12] Dong Jianji. High-speed all-optical signal processing based on semiconductor optical amplifiers and optical filters [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008: 18 – 29. (in Chinese)
- 董建绩. 基于半导体光放大器和光学滤波器的高速全光信号处理[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008: 18 – 29.
- [13] Pham C, Dupont F, Brenot R, et al. Modulation of a high power semiconductor optical amplifier for free space communications [J]. J Lightwave Technol, 2020, 38(7): 1836 – 1843.
- [14] Mojaver H R, Tolstikhin V, Gargallo B, et al. 8 × 8 SOA-based optical switch with zero fiber-to-fiber insertion loss [J]. Opt Lett, 2020, 45(16): 4650 – 4653.
- [15] Andriolli N, Bontempi F, Contestabile G. InP monolithically integrated transmitters based on high speed directly modulated DFB lasers[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2020, 26(5): 1 – 6.
- [16] Yang H Y, Hu F R, Zheng H Y, et al. Design and analysis of ZnO signal-crystal DFB laser diode[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(9): 1045 – 1048. (in Chinese)
- 杨海艳, 胡芳仁, 郑煌晏, 等. 氧化锌单晶 DFB 半导体激光器的设计与分析[J]. 激光与红外, 2015, 45(9): 1045 – 1048.
- [17] Shindo T, Fujiwara N, Kanazawa S, et al. High power and high speed SOA assisted extended reach EADFB laser (AXEL) for 53-Gbaud PAM4 Fiber-Amplifier-Less 60-km optical link [J]. J Lightwave Technol, 2020, 38(11): 2984 – 2991.