

半导体光放大器研究进展

丁可可, 马宇航, 韦龙, 李再金*, 赵志斌, 曾丽娜, 李林, 乔忠良, 陈浩, 曲轶

海南师范大学物理与电子工程学院, 海南省激光技术与光电功能材料重点实验室, 海南 海口
Email: *lizaijin@126.com

收稿日期: 2020年12月8日; 录用日期: 2021年3月1日; 发布日期: 2021年3月8日

摘要

在光纤通信系统中, 随着传输速率的增加, 传统的O/E/O中继方式已经不能满足我们的需求, 而半导体光放大器可以直接进行光/光的转换。半导体光放大器主要是一种由半导体材料制造的光放大器, 半导体光放大器的快速发展主要得益于量子阱材料半导体光放大器的研制成功, 克服了偏振敏感的缺点。而量子点材料的研发和使用可提高半导体光放大器的传输效率和波形稳定性, 并且使噪声和串扰性能更加优化。本题主要是以半导体激光器为基础, 介绍了半导体光放大器的原理和结构、发展历程, 以及半导体光放大器的基本功能和应用。另外还探讨了半导体光放大器的最新国内外进展。半导体光放大器能直接放大光信号, 对信号的格式和速率具有高度的透明性, 使得整个系统更加简单灵活, 它的出现和实用化在光纤通信发展史上具有里程碑意义。

关键词

半导体光放大器, 全光信号处理, 非线性, 量子点

Research Progress of Semiconductor Optical Amplifier

Keke Ding, Yuhang Ma, Long Wei, Zaijin Li*, Zhibin Zhao, Lina Zeng, Lin Li, Zhongliang Qiao, Hao Chen, Yi Qu

Hainan Key Laboratory of Laser Technology and Optoelectronic Functional Materials, School of Physics and Electronic Engineering of Hainan Normal University, Haikou Hainan
Email: *lizaijin@126.com

Received: Dec. 8th, 2020; accepted: Mar. 1st, 2021; published: Mar. 8th, 2021

Abstract

In optical fiber communication systems, as the transmission rate increases, the traditional O/E/O

*通讯作者。

文章引用: 丁可可, 马宇航, 韦龙, 李再金, 赵志斌, 曾丽娜, 李林, 乔忠良, 陈浩, 曲轶. 半导体光放大器研究进展[J]. 光电子, 2021, 11(1): 8-16. DOI: 10.12677/oe.2021.111002

relay method can no longer meet our needs, and the semiconductor optical amplifier can directly perform optical/optical conversion. Semiconductor optical amplifiers are mainly optical amplifiers made of semiconductor materials. The rapid development of semiconductor optical amplifiers mainly benefits from the successful development of quantum well materials semiconductor optical amplifiers, which overcomes the disadvantage of polarization sensitivity. The development and use of quantum dot materials can improve the transmission efficiency and waveform stability of semiconductor optical amplifiers, and optimize the performance of noise and crosstalk. This topic is mainly based on semiconductor lasers. It introduces the principle and structure of semiconductor optical amplifier, the development process, and the basic functions and applications of semiconductor optical amplifiers. In addition, the latest domestic and foreign developments of semiconductor optical amplifiers are also discussed. The semiconductor optical amplifier can directly amplify the optical signal, and has a high degree of transparency to the signal format and rate, making the entire system simple and flexible. Its appearance and practicality is a milestone in the history of optical fiber communication.

Keywords

Semiconductor Optical Amplifier, All-Optical Signal Processing, Non-Linear, Quantum Dots

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

半导体光放大器是一种把半导体激光器作为放大装置使用的器件，它的显著特点是可以直接进行光的转换，而不用经过光转换电，电再转换光的过程，并且具有大的增益带宽。另外，其工作波段可以覆盖 1.3~1.6 μm 波段。本文主要介绍了半导体光放大器的原理、发展历程和现状，以及主要功能和作用，着重介绍了半导体光放大器的非线性特性的全光信号处理。半导体光放大器又可以称为全光波长放大器，具有很大的增益带宽，增益平坦性较好，其结构简单、体积小、功耗小，可与其他光电器件集成，在发展大规模波分多路传输、或者光交换方式等新一代光技术方面具有很大应用，必会在全光通信网络中得到广泛应用。

2. 半导体光放大器

2.1. 半导体光放大器的原理

半导体光放大器的原理和特性都与半导体激光器相类似，都是基于受激辐射光放大的机制。由双异质结构成的激活区结构，运用电流注入法注入电子和空穴，通过从电子能量高的受激能级导带向低能级价带的跃迁实现光放大，它是粒子数反转放大发光，发光的媒介是非平衡载流子即电子空穴对。考虑像图 1 所示那样长度为 L 的放大器时，设光的输入功率为 P_{in} ，输出功率为 P_{out} ，被输入的光在图 1 所示的激活区传输，并通过受激发射放大，因为简单，所以，若增益系数 g 相对于距离 z 均匀近似的话，那么输出可用下式表示[1]。

$$P_{out} = P_{in} * \exp(\alpha g L) \quad (1)$$

式中， α 为传输的光能量被抑制在激活区的抑制比例系数[2]。

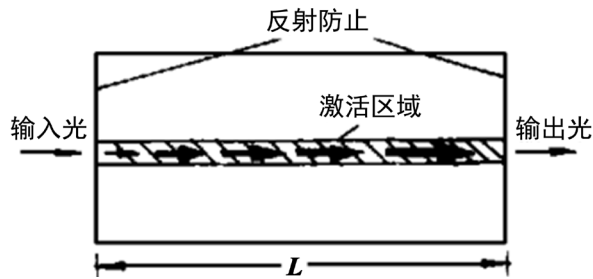


Figure 1. Semiconductor optical amplifier
图 1. 半导体光放大器

2.2. 半导体光放大器的分类

半导体光放大器有两种：一种是将通常的半导体激光器当作光放大器使用，称作 F-P 半导体激光放大器(FPA)；另一种是在 F-P 激光器的两个端面上涂有抗反射膜，消除两端的反射，以获得宽频带、高输出、低噪声[3]。

半导体激光器在法布里 - 珀罗腔体界面上的多次反射就称为 F-P 腔放大器。如图 2 所示，入射光从左端面进入，通过具有增益的有源层介质之后到达右端面，部分从端面反射，大部分从端面出射。反射光反向通过有源层至左端面，又经过一次放大，部分从左端面出射，其余部分又从左端面反射，再次通过有源层得到放大，如此反复，使反射光得到多次放大[4]。

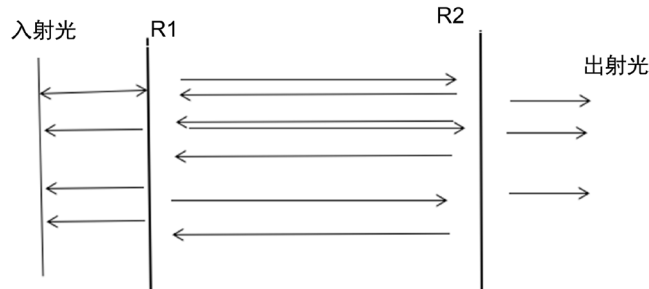


Figure 2. Semiconductor optical amplifier
图 2. F-P 半导体光放大器的工作原理

由于半导体激光器的两端面形成了 F-P (法布里 - 珀罗)谐振腔，它起到对光信号选择合适的波长并提供光学正反馈作用。而半导体光放大器与半导体激光器所不同的是，它没有谐振腔(半导体光放大器的 PN 结有源区两端面涂有抗反射膜，形成透明区，不发生反射)。因而，通过半导体光放大器的光波为行波。图 3 为行波半导体光放大器的工作原理示意图。

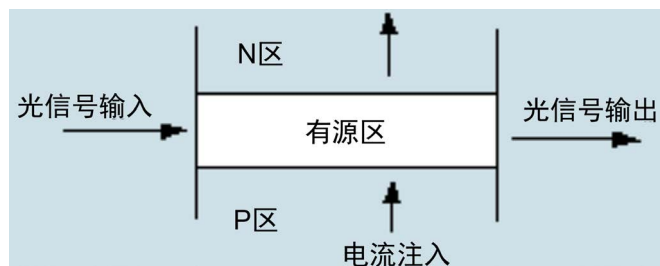


Figure 3. Working principle of travelling wave semiconductor optical amplifier
图 3. 行波半导体光放大器的工作原理

当向半导体光放大器中注入正向电流，并达到一定值时，N区自由电子增多并不断进入PN结中与空穴复合，以光子形式释放能量。该光子在输入光信号的感应下形成受激辐射，使释放出的光子和入射光子同频、同向、同相位、同偏振方向、同模式并在光子不断前进中继续受感应而产生受激辐射，进而产生更多的新的光子，使输入光信号得到放大。放大器的增益是沿着有源区的长度按指数增长的，而且注入电流越大，产生的光子数越多[5]。

2.3. 半导体光放大器的特性

半导体光放大器增益特性，半导体光放大器的增益饱和现象是，在注入电流恒定时，输入信号光功率较小时，随着输入光功率的增加，输出光功率相应增加，增益为常数，但当输入光功率较高时，增益就会出现饱和甚至发生下降。这是因为大的输入光信号使过量的载流子参加受激辐射复合而得不到及时补充。其实在半导体光放大器中还存在着一种不太被重视的增益饱和现象。在输入光信号一定时，半导体光放大器的增益随着注入电流的增加而增加，输出功率也相应的增加，但注入电流增加到某一个值后再增加，增益不但不增加反而下降。这种饱和现象是由于受到载流子增益恢复时间限制造成的[6]。

半导体光放大器的偏振特性主要是指放大器对输入信号光的偏振态敏感，对不同的偏振态的增益不相同，没有经过特殊设计的半导体光放大器对TE模、TM模的增益可相差5~8 dB，而且会使增益的有效带宽减小，这当然是光纤通信中不希望见到的[7]。

3. 半导体光放大器的功能与应用

3.1. 线性放大效应

半导体光放大器最重要的功能是线性放大，主要是实现放大作用，其在通信系统中可用作功率放大器，线路放大器和前置放大器。在发射端，把半导体光放大器用作功率放大器，以便增强系统发射端的输出功率，这可以大幅度的增大系统干线的中继距离。在传输线路中，半导体光放大器可以作为线性中继放大器使用，使传输再生中继距离再次得到飞跃性的延长。在接收端，半导体光放大器可以用作前置放大器，从而可以大幅度改善接收端接收机的灵敏度。半导体光放大器的饱和增益特性将会导致其每比特的增益与之前的比特序列有关，小信道之间的码型效应又可以称为交叉增益调制效应，这种技术是利用多信道间的交叉增益调制效应的统计平均，并在其间引入一中等强度连续波以便保持光束，也称之为水库信道，以便压缩放大器总的增益，进而降低信道间的交叉增益调制效应。还有一种方法是采用钳制增益半导体光放大器，这将有效地增强半导体光放大器的饱和功率，但增益调制半导体光放大器饱和后发生的弛豫振荡将会使该技术的比特率限制在10 Gbit/s左右[8]，如表1所示。

Table 1. Linear application of semiconductor optical amplifier

表 1. 半导体光放大器的线性应用

器件	工作原理	应用
半导体光放大器	线性应用	线性放大器、功放、前放 半导体光放大器环形腔用于微波滤波 半导体光放大器环形腔用于多波长产生 反射式半导体光放大器用于接入网中放大光信号光开关矩阵 基于半导体光放大器光开关的可控之光延时 反射式半导体光放大器的直接调制实现加载信息

3.2. 非线性效应

半导体光放大器中的非线性效应包括交叉增益调制(XGM)效应、交叉相位调制(XPM)效应和四波混

频(FWM)效应。半导体光放大器中的非线性效应对于放大应用是没有用处的,但利用全光信号处理技术的非线性效应却可以研发出许多新的光通信器件[9]。

随着光纤通信向城域网、接入网的方向的发展,光上下路复用(OADM)技术、光交叉连接(OXC)技术等系统的组建,基于半导体光放大器非线性效应应用的全光信号的处理,特别是光开关受到了越来越多的重视。此外,利用半导体光放大器的非线性效应的应用还可以实现 RZ 和 NRZ 之间的相互转换,利用 FWM、XPM 可以实现了 OTDM 到 WDM 的转换,利用 XGM 可以实现 WDM 到 OTDM 的转换,同时可以实现 NRZ 到 RZ 的转换。因此半导体光放大器将成为光通信领域 WDM, TDM, ADM, OXC 和 ATM 等光信号传输、处理的核心部件[10]。半导体光放大器的非线性应用如表 2 所示。

Table 2. Nonlinear application of semiconductor optical amplifier

表 2. 半导体光放大器的非线性应用

器件	工作原理	应用
半导体光放大器	非线性应用	全光波长变换 基于波长转换实现可调光延时 基于 ASE 的 SGM 实现微波滤波, 全光逻辑门及复杂逻辑运算 全光解复用 全光采样 半导体光放大器环形腔用于全光时钟恢复 基于 FWM 效应的慢光效应 基于 XPM 或者 XGM 效应的 UWB 信号产生 全光码型转换 基于 XPM 或者 XGM 效应的全光微分运算

3.3. 集成

半导体光放大器的另外一个最大的优点是它易于集成化且能够提供比较大的增益,其集成的应用,第一,其可以实现半导体光放大器功能的集成。例如,由于半导体光放大器提供的消光比较大,提供的开关时间比较快等特点,特别是其可以补偿光纤链路中的插入损耗,使得基于半导体光放大器的光开关阵列、半导体光放大器与光分支波导组合构成的矩阵光开关收到了人们的广泛关注,利用半导体光放大器与 M-Z 波导集成可以实现基于交叉相位调制效应的波长转换的功能。第二,利用半导体光放大器的集成特性可以降低原有器件的增益损耗,改善系统器件的特性。如取样光栅 DBR 激光器中集成了半导体光放大器以便使该光源的输出功率增加,从而使系统性能得到明显改善。电吸收调制器中集成半导体光放大器则可以实现无损操作,并可以使带宽增至 40 GHz [11]。

3.4. 波长变换器

全光波长变换器被认为是下一代 WDM 网络中最关键的功能器件之一,与最早发展起来的光电波长变换器相比,使用全光波长变换器可以增加波长路由的灵活性;同时有可能节省成本。对波长变换器的要求有:快速响应;大的光谱宽;低功率损耗;低偏振相关性;高的输入功率动态范围;高的输出光信噪比;机械稳定性和操作简单。采用半导体光放大器制作波长变换器可以满足上面的要求[12]。

3.5. 压缩整形

光脉冲的压缩与整形是光时分复用技术的基础,当光时分复用系统传输速率越高,方所需光脉冲宽度越窄。可以通过利用半导体光放大器在宽度上的优势来满足光时分复用系统的要求。对于几十或数百 Gb/s 的 OTDM 系统,则要求光脉冲的宽度为皮秒或亚皮秒量级。而一般的高重复频率超短光脉冲源直接

产生的光脉冲往往较宽,必须采取光脉冲压缩技术后才能满足高速光通信的要求。在非线性光学环境中,采用具有罗伦兹分布的光脉冲与半导体光放大器的放大脉冲的交叉相位调制(XPM)效应,可以对半导体光放大器的放大光脉冲进行有效的压缩和整形。可以得到脉冲宽度窄、基本无基座和较高峰值功率等优点的高质量超短飞秒级光脉冲,如此的信号光脉冲对提高光纤通信系统的传输容量和传输距离,降低码间干扰等有着显著的意义[13][14]。

4. 半导体光放大器的进展

现如今,量子点半导体光放大器的研究是半导体光放大器的新的方向和突破,相比传统半导体光放大器而言,量子点半导体光放大器的模式效应和波形稳定性,减少增益恢复时间以及高的传输速率都有很大进步。反射型半导体光放大器结构在未来的光子网络中用于超快信号处理具有很大的研究空间和发展潜力。

4.1. 发展历程

在60年代首先进行了GaAs同质结行波半导体放大器的研究,开创了半导体光放大器研究的先河,确立了半导体光放大器的基本理论。在1973年至1975年间,开始从光纤通信应用要求出发,研究双异质结结构和F-P光放大器的特性并取得重要进展。1977年,Dupuis RD.等人提出通过金属有机化学气相沉积(MOCVD)生长高效GaAlAs/GaAs异质结构半导体。1984年,W. D. Laidig等7人提出在室温条件下工作的应变层量子阱注入激光器,进入90年代以后,随着半导体工艺水平的不断提高,半导体光放大器的研制也更加成熟,特别是应变量子阱以及超晶格技术的发展,相应的应用和性能得到了全面和大幅度的提升,特别是在偏振灵敏度、小信号增益、输出功率、噪声指数等方面[15]。

4.2. 量子点半导体光放大器的最新进展

2011年,余建兴进行了量子点半导体光放大器交叉增益调制效应(XGM)的全光逻辑门研究。结果表明:量子点半导体光放大器具有快速增益恢复特性,提高注入电流或减小载流子从润湿层到激发态的弛豫时间都可以缩短载流子恢复的时间,加快量子点半导体光放大器的恢复进程[16]。2015年,刘长深进行了单端量子点半导体光放大器的动态特性研究。对于基于单端量子点半导体光放大器的XGM全光或非门,通过模拟得出改变输入光脉冲序列组合不会影响全光逻辑或非作用效果,另外也证明了降低输入光信号脉宽可以消除超高速光逻辑或非门码型效应的方法[17]。2020年3月,密术超进行了基于量子点半导体光放大器级联XGM与XPM波长转换的研究,研究了基于量子点半导体光放大器级联XGM与XPM波长转换特性,分别分析了影响其Q因子、消光比和转换效率的因素,并与XGM的消光比和XPM的转换效率进行对比。通过仿真得到级联结构的消光比和转换效率都明显高于XGM的消光比和XPM的转换效率[18]。2020年6月,Seyed Mohsen Izadyar等人,研究了量子点半导体光放大器的第二激发态下超高速交叉增益调制。结果表明,在相同泵浦功率下,更高的注入电流密度和较低的载流子弛豫寿命,模式效应和波形畸变几乎消失。在第二激发态(ES2)的存在下,增益恢复时间可以进一步缩短,可以实现高达160 Gbps的快速XGM,使超高比特率XGM成为可能[19]。

4.3. 反射型半导体光放大器的最新进展

2020年6月,邓灿冉等人进行了反射型半导体光放大器建模与模拟,实验结果表明反射半导体光放大器在偏置电流大于130 mA时增益稳定在26 dB以上,噪声指数稳定在11 dB。且在偏置电流不变时,低输入功率-30 dBm时,反射半导体光放大器处于最佳工作区间[20]。2020年8月,Zoe V. Rizou等人首次实验证明了采用双折射光纤环提高直调反射半导体光放大器性能的可行性。双折射光纤环路作为一个

与反射半导体光放大器电光响应斜率相反的光滤波器, 抵消了仅 0.89 GHz 的有限反射半导体光放大器调制带宽。通过适当地调整其失谐, 双折射光纤回路可以调整由于光纤失谐而产生的物理光谱成分[21]。2020年11月, Safari Anzabi Khalil 等人提出在折叠式马赫-曾德尔干涉仪中使用基于量子点的反射半导体光放大器提高全光异或门的性能, 基于量子点半导体光放大器的结构在未来光子网络中用于超快信号处理的巨大潜力[22]。

5. 半导体光放大器的非线性特性的全光信号处理

全光信号处理主要包括全光波长变换、光时钟再生、全光逻辑门、光信号的码型转换和全光缓存。目前全光信号处理技术常利用 III-V 组材料、硅或石英、聚合物等光学材料的非线性特性实现光信号的全光处理[23]。

近年来全光信号处理研究热点主要集中在光纤、半导体光放大器、硅波导等器件上。其中基于半导体光放大器的全光信号处理技术可以利用交叉增益调制(XGM), 交叉相位调制(XPM), 交叉偏振调制(XSM), 四波混频(FWM)等多种非线性效应实现高速信号处理, 并且可以集成, 从而减小体积和功耗, 节省成本和提高可靠性[24]。

5.1. 全光波长变换

波长变换是可重构, 无阻塞 WDM 光网络重要组成部分。与光电光波长变换相比, 基于半导体光放大器的全光波长变换具有结构简单、速度快、对信号码型透明等诸多优点[25]。国内外已有大量基于半导体光放大器的全光波长变换研究结果报道, 大部分主要利用半导体光放大器的 XGM, XPM 和 FWM 效应。XGM 效应是由于强度调制信号进入半导体光放大器消耗载流子而导致增益饱和从而对半导体光放大器的增益进行调制, 此时输入半导体光放大器的另一波长的连续光强度就会受到调制。而 XPM 效应是由于强度调制信号进入半导体光放大器改变载流子浓度从而对半导体光放大器的折射率进行调制, 此时输入半导体光放大器的另一波长的连续光相位就会受到调制, 通过干涉可以解调出强度调制信号。FWM 效应是由于强度调制信号对半导体光放大器的折射率进行调制而形成光栅, 此时输入半导体光放大器的另一波长的连续光就被光栅散射而产生混频波长的信号光[26]。

5.2. 全光信号再生

光网络中, 随着传输距离增加, 光信号会受到衰减、色散、噪声、时间抖动和串扰等影响而恶化。因此, 在长距离传输中, 必须弥补恶化的光信号, 从而保证传输信息的准确性。全光信号再生指的是, 再放大, 再整形, 再定时。再放大就可以由 EDFA, 半导体光放大器和拉曼放大器(RA)等光放大器来完成[27]。

5.3. 全光逻辑门

光信号的全光解复用、交换、缓存、码型识别、标记扫描和包头提取等处理需要逻辑门器件, 而电子器件带宽已不足以处理高速光信号, 因此全光逻辑门成为高速光信号处理的关键。利用半导体光放大器的 XGM、XPM、XPOIM 和 FWM 等非线性效应可以实现 AND、NOT、OR、XOR、NAND 以及 XNOR 等全光逻辑门[28]。

5.4. 非线性全光信号处理技术的研究概况

B. Glance 等人于 1992 年报道基于半导体光放大器中交叉增益调制效应的全光波长变换。Y. Liu 等人于 2003 年利用半导体光放大器的非线性偏振旋转(NPR)效应实现了 10 Gbit/s 信号的正相全光波长变换。G. Contestabile 等人于 2005 年实现了基于半导体光放大器非线性偏振旋转效应的 40 Gbit/s 信号的单波长

和多波长正相全光波长变换。C. Meuer 等人于 2011 年利用量子点半导体光放大器中的强四波混频效应实现了 40 Gbit/s 非归零码信号的无误码双通道全光波长变换。2009 年,北京邮电大学的研究小组利用单个半导体光放大器的非简并四波混频效应实现了 40 Gbit/s 多功能光信号格式转换方案。2012 年,他们又利用半导体光放大器四波混频效应实现了 40 Gbit/s QPSK 信号的全光异或门(XOR)。北京交通大学的研究小组也提出了减小基于半导体光放大器全光波长变换中的码型效应的多种有效方法[29]。

6. 总结

光通信技术中,光放大技术是支撑技术之一,光放大器技术随系统的要求不断向前发展。掺杂光纤放大器、半导体光放大器、拉曼放大器,这些放大器随不同的系统要求,以各种形式应用在不同的系统节点。半导体光放大器是采用应变量子阱结构的 PN 结器件,近几年又研究了量子点半导体光放大器,量子点半导体光放大器具有高增益、低温度灵敏性的特点。量子阱和量子点半导体光放大器的研究克服了半导体光放大器的噪声和串扰大、稳定性差等缺点。目前半导体光放大器的性能已经有了很大提高,特别是在发展波分多路传输,或者光交换方式等新一代光技术方面。随着信息产业的发展,新技术的开发和研究必然会使半导体光放大器技术持续发展和繁荣。

基金项目

海南省重大科技计划项目(ZDKJ2019005)、海南省基础与应用基础研究计划(自然科学领域)高层次人才项目(2019RC190, 2019RC192)、海南省自然科学基金(2018CXTD336, 618QN241)资助、海南省高等学校科学研究项目(Hnky2020ZD-12, Hnky2020-24)、海南省科协青年科技英才学术创新计划项目(QCXM201810)、国家自然科学基金项目(61864002, 61964007)和中国工程科技发展战略项目(19-HN-XZ-07)。

参考文献

- [1] 邓灿冉,朱益清,徐贵勇,张士勋,杨国锋,李璟文,胡立发,楚广勇. 反射型半导体光放大器建模与模拟[J]. 应用激光, 2020, 40(3): 532-538.
- [2] 江涛,陈艳. 半导体光放大器[J]. 激光与光电子学进展, 2000(8): 40-45.
- [3] 杨祥林. 光放大器及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000: 20-26.
- [4] 冯先成,段文潇,李寒. 增益半导体光放大器的特性[J]. 强激光与粒子束, 2012(6): 81-82.
- [5] 龙柏. 半导体光放大器及其应用[J]. 世界产品与技术, 2002(7): 38-40.
- [6] 陈旭,胡哲纲,许胜祥,阳奇. 集成双波导量子阱结构半导体光放大器的增益特性研究[J]. 电子世界, 2020(9): 27-28.
- [7] 崔迎超,张书练,冯金垣. 半导体光放大器的增益特性和偏振特性[J]. 激光技术, 2005(5): 462-465+483.
- [8] 魏澎,李勇超. 光放大器的原理及应用分析[J]. 邮电设计技术, 2003(4): 15-21.
- [9] 努尔买买提,徐天翔,陈立功,张尚剑,刘永. 基于半导体光放大器的全光信号处理研究进展[J]. 激光杂志, 2012, 33(3): 1-4.
- [10] 孙志峰,王会洪,李雪宁,张敏明,唐志红,李晓磊,刘弘扬,皮逸翔. 基于 SOA 的全光波长转换系统的研究[J]. 光通信技术, 2015, 39(12): 19-21.
- [11] 杨慧敏. 半导体光放大器的应用[J]. 科技视界, 2012(19): 12+21.
- [12] 李保海,吴重庆,付松年,张勇. 半导体光放大器的研究进展与新应用[J]. 光通信技术, 2004(4): 18-21.
- [13] 战高峰. 半导体光放大器在光纤通信中的应用[J]. 黑龙江科学, 2014, 5(7): 256.
- [14] Anderson, N.G., Laidig, W.D., Lee, G., Lo, Y. and Ozturk, M. (1984) Luminescence Properties of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs}$ Strained-Layer Superlattices. *MRS Proceedings*, **37**, Online. <https://www.cambridge.org/core/journals/mrs-online-proceedings-library-archive/article/abs/luminescence-properties-of-inxgalxsgaas-strainedlayer-superlattices/597F9563621ABC1ACA3309327FF61970>

- [15] 刘志勇. 基于半导体光放大器的光纤激光器研究[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2019: 1-2.
- [16] 余建兴. 基于量子点半导体光放大器交叉增益调制效应的全光逻辑门研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2011: 8-16.
- [17] 刘长深. 单端量子点半导体光放大器的动态特性研究[D]: [硕士学位论文]. 济宁: 曲阜师范大学, 2015: 36-40.
- [18] 密术超. 基于量子点 SOA 级联 XGM 与 XPM 波长转换的研究[D]: [硕士学位论文]. 济宁: 曲阜师范大学, 2020: 54-70.
- [19] Izadyar, S.M., Razaghi, M. and Hassanzadeh, A. (2020) Quantum Dot Semiconductor Optical Amplifier: Investigation of Ultra. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **53**, 23-27. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab8c7b>
- [20] 施伟伟, 张汉一, 吴克璞, 等. 基于半导体光放大器的波长转换新方案研究[J]. 光通信技术, 2004, 28(8): 43-45.
- [21] Rizou, Z.V., Zoiros, K.E., Rampone, T. and Sharaiha, A. (2020) Reflective Semiconductor Optical Amplifier Direct Modulation Capability Enhancement Using Birefringent Fiber Loop. *Applied Sciences*, **10**, 324-543. <https://doi.org/10.3390/app10155328>
- [22] Safari-Anzabi, K., Habibzadeh-Sharif, A., Connelly, M.J. and Rostami, A. (2021) Performance Enhancement of an All-Optical XOR Gate Using Quantum-Dot Based Reflective Semiconductor Optical Amplifiers in a Folded Mach-Zehnder Interferometer. *Optics and Laser Technology*, **135**, 400-451. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106628>
- [23] Matsumoto, M. and Morioka, Y. (2009) Fiber-Based All-Optical Regeneration of DPSK Signals Degraded by Transmission in a Fiber. *Optics Express*, **17**, 6913-6919. <https://doi.org/10.1364/OE.17.006913>
- [24] Dong, J.J., Zhang, X.L., Fu, S.N., Xu, J., Bu, P.S. and Huang, D.X. (2008) Ultrafast All-Optical Signal Processing Based on Single Semi-Conductor Optical Amplifier and Optical Filtering. *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **14**, 630-676. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2008.916248>
- [25] Nuzman, C., Leuthold, J., Ryf, R., Chandrasekhar, S., Giles, C. and Neilson, D. (2003) Design and Implementation of Wave Length-Flexible Network Nodes. *Journal of Light Wave Technology*, **21**, 648-663. <https://doi.org/10.1109/JLT.2003.809687>
- [26] Nielsen, M.L., Mork, J., Suzuki, R., Sakaguchi, J. and Ueno, Y. (2006) Experimental and Theoretical Investigation of the Impact of Ultra-Fast Carrier Dynamics on High-Speed SOA Based All Optical Witches. *Optics Express*, **14**, 331-347. <https://doi.org/10.1364/OPEX.14.000331>
- [27] Von Lerber, T., Honkanen, S., Tervonen, A., Ludvigsen, H. and Küppers, F. (2009) Optical Clock Recovery Methods: Review. *Optical Fiber Technology*, **15**, 363-373. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2009.03.006>
- [28] Stubkjaer, K.E. (2000) Semiconductor Optical Amplifier Based All-Optical Gates for High-Speed Optical Processing. *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **6**, 1428-1435. <https://doi.org/10.1109/2944.902198>
- [29] 李鑫. 基于半导体光放大器的全光相位调制研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2019: 23.