

## 激光与光电子学进展

## 半导体光放大器的双向窄脉冲调制与消光比特性分析

江琳, 李威, 李映函, 程凌浩\*

暨南大学光子技术研究院, 广东 广州 510632

**摘要** 半导体光放大器(SOA)能稳定产生高消光比的窄脉冲光,在光纤传感领域得到了广泛应用,但目前大多方案仅采用单向调制的SOA产生脉冲光。为了进一步提高脉冲光的消光比,基于SOA能双向工作的特点提出了一种双向窄脉冲光调制的SOA系统。使用光纤反射镜对SOA单向调制输出的脉冲光进行反射,使反射光重新返回到SOA进行第二次脉冲光调制。实验结果表明:相比单向调制,在低输入功率下,双向调制最大可获得6.18 dB的额外增益;对于输入峰值功率为6 dBm的脉冲光,双向吸收能使泄漏光强度进一步减弱30 dB以上,整体吸收率达到72 dB以上。

**关键词** 光纤光学; 脉冲调制; 半导体光放大器; 消光比; 光纤传感

中图分类号 TP211+.6

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220815

## Bi-Directional Narrow Pulse Modulation and Extinction Ratio Analysis of Semiconductor Optical Amplifier

Jiang Lin, Li Wei, Li Yinghan, Cheng Linghao\*

*Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China*

**Abstract** Semiconductor optical amplifier (SOA) can be used to generate narrow optical pulse with steady high extinction ratio and has been widely used in the field of optical fiber sensing. However, most of current schemes only employ SOA in unidirectional modulation for pulse generation. Based on the feature that SOA can work in both directions, this paper proposes a bidirectional narrow pulse modulation of SOA to further enhance the extinction ratio of optical pulse. A fiber optic mirror is used to reflect the optical pulse generated by unidirectional modulation back to the SOA for the second pulse modulation. The experimental results show that compared with unidirectional modulation, bidirectional modulation achieves a maximum extra gain of 6.18 dB at low input optical power. For pulsed light with an input peak power of 6 dBm, the bidirectional absorption can further weaken the leakage light intensity by more than 30 dB, and the overall absorption rate reaches more than 72 dB.

**Key words** fiber optics; pulse modulation; semiconductor optical amplifier; extinction ratio; optical fiber sensing

## 1 引言

分布式光纤传感技术是光纤传感领域的重要组成部分,主要利用入射光波与光纤中各类粒子发生相互作用产生的散射信号与光纤周围温度/应变等扰动呈一定的线性关系。因此,可通过解调散射信号判断光纤所受外界参量的变化,从而实现全分布式传感<sup>[1-3]</sup>。分布式光纤传感技术被广泛应用于桥梁沿线检测、油气管道安全等领域<sup>[4-7]</sup>,但其发展也面临一些挑战,如传感距离和测量精度的提升。近年来,研究人员提出了多种技术用以提高分布式光纤传感系统各项性能参

数<sup>[8-15]</sup>。输入光纤中的探测脉冲光消光比(ER)是系统探测精度的一个重要影响因素。Afshar等<sup>[16]</sup>通过理论仿真证明,脉冲光的消光比会影响布里渊光时域分析(BOTDA)技术的传感性能,有限的消光比会导致最终参数的测量误差增大甚至错误。Lu等<sup>[17]</sup>从理论和实验两方面验证了提高脉冲消光比有助于改善布里渊光时域反射(BOTDR)技术的信噪比,从而提高系统的测量精度。结果表明,将消光比由25 dB改善至50 dB时,温度分辨率由5.6 °C提升至1.9 °C,信噪比提升了约8 dB,传感距离也得到一定提升。这表明探测脉冲光的消光比会直接影响传感系统的信噪比,从而

收稿日期: 2022-01-25; 修回日期: 2022-02-28; 录用日期: 2022-03-14; 网络首发日期: 2022-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(61875246)、广州市科技计划(201904020032)

通信作者: \*chenglh@ieee.org

影响整个系统的测量精度和传感距离。

传统分布式光纤传感系统中,多采用电光调制器(EOM)和声光调制器(AOM)对连续光进行调制以产生探测脉冲光。EOM主要利用外加电场作用于某些晶体材料产生的电光效应实现对输入连续光的调制,且EOM产生的脉冲光上升沿时间短,可达到ps量级,有利于传感空间分辨率的提高。但EOM的偏置电压工作点易受外界环境因素影响发生偏移,造成脉冲光消光比不稳定,实际应用时需复杂的算法和相关技术校正偏压点<sup>[18-20]</sup>。此外,EOM主要基于马赫-曾德尔干涉仪(MZI)原理,受加工工艺精度的限制,MZI两条干涉臂的分光比很难做到完全一致,常见的EOM消光比只能达到30~35 dB。Lu等<sup>[17]</sup>提出了两级EOM级联系统,将EOM调制后的探测脉冲光消光比提升至50 dB,但该系统的结构复杂且插入损耗大。AOM主要利用外加电场作用于声光器件产生的声光效应实现对输入连续光的调制,产生的脉冲光消光比高且比较稳定,一般能达到50 dB以上,但声波幅度较大且需要电-声换能,导致脉冲上升沿时间较长(一般大于10 ns),调制脉冲宽度最窄在20 ns左右,在分布式光纤传感中限制了系统空间分辨率的提高,不适用于高空间分辨率分布式传感系统<sup>[21]</sup>。

为了得到消光比稳定且上升沿时间短的脉冲光,人们提出使用半导体光放大器(SOA)实现脉冲光的调制。SOA调制主要通过外加电场控制泵浦电流的通断,而泵浦电流决定了半导体有源层中载流子能否实现反转,从而控制入射光的放大与吸收,实现脉冲光输出。相比EOM和AOM调制,SOA输出脉冲光的消光比稳定<sup>[22-24]</sup>,上升沿时间小于1 ns且消光比在40 dB以上,从而在实现窄脉冲的同时维持高消光比,提升传感系统的性能。分布式光纤传感领域多采用双端输入输出器件SOA产生单向脉冲光<sup>[22-26]</sup>,但SOA也有单端输入输出型,即反射型SOA(RSOA),此类SOA多用于光通信网络中<sup>[27-30]</sup>。RSOA输出端面上的反射涂层可使调制脉冲光反射重新进入SOA,实现脉

冲光的两次调制。相比EOM和AOM两级级联系统,这种两次调制脉冲光的结构更简单且损耗较低。

目前RSOA产品多针对光通信领域,且RSOA器件内部有源层和无源层的宽度等结构参数也会发生改变,不适用于分布式光纤传感领域,而基于普通SOA双向工作特点实现脉冲光两次调制的相关研究较少。因此,本文提出了一种双向脉冲调制的SOA系统,以模拟RSOA的反射面结构。在双端SOA的输出端连接光纤反射镜,使第一次脉冲光反射重新进入SOA内进行二次脉冲调制,最终输出往返两次调制的脉冲光。从脉冲光消光比与SOA调制原理出发,提出双向SOA系统架构并建立了系统性能验证实验,重点分析了双向SOA系统相较于单向SOA系统在放大脉冲光峰值功率和吸收泄漏光强度上的提升情况,同时分析了系统性能的影响因素,总结了双向SOA系统应用的最佳条件以及消光比的改进情况。

## 2 基本原理

### 2.1 脉冲消光比与SOA调制

脉冲消光比是衡量调制脉冲光质量的参数之一,指脉冲光输出平均功率“1”与“0”之比,单位为dB。SOA主要由无源层(Passive layer)和有源层(Active layer)构成:当注入的泵浦电流大于阈值电流时,有源层的载流子发生受激辐射并产生与入射光相同的光子,实现入射光的放大;无泵浦电流或注入的泵浦电流小于阈值电流时,入射光被吸收<sup>[31]</sup>。因此,可通过控制泵浦电流的通断实现连续光到脉冲光的转换。图1为SOA调制脉冲光的过程。功率为 $P_0$ 的连续光(CW)进入SOA中,通过控制泵浦电流的通断(Drive switch)使连续光在泵浦电流有效的脉冲宽度(PW)内完成放大,放大后脉冲的功率为 $P_0G$ 。其中, $G$ 为增益系数。无泵浦电流时间内连续光被吸收,由于调制器件特性,连续光无法被完全吸收,存在泄漏光,对应的功率为 $P_0A$ 。其中, $A$ 为吸收系数。输出脉冲光的消光比可表示为

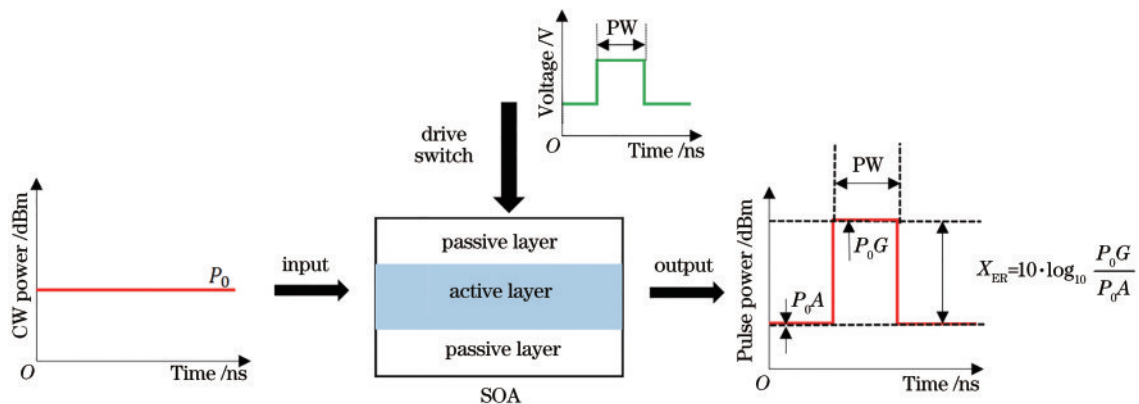


图1 SOA调制脉冲的机理

Fig. 1 Principle of the SOA modulation pulse

$$X_{ER} = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_0 G}{P_0 A} = 10 \cdot \log_{10} \frac{G}{A} \quad (1)$$

脉冲的消光比与增益系数  $G$  和吸收系数  $A$  密切相关。为了尽可能地提高脉冲光的散射强度,增益系数  $G$  应尽可能大。泄漏光在时间上远远大于脉冲宽度,即泄漏光引起的散射光是传感系统中相当长一段光纤中的散射光,并在接收端累积起来成为一种背景噪声。为了减小泄漏光强度,降低背景噪声,吸收系数  $A$  应越小越好。因此,如何提高 SOA 的增益系数并减小其吸收系数,增大脉冲光的峰值功率和减小泄漏光的强度,对提升脉冲光的消光比具有重要意义。

### 2.2 双向 SOA 系统

SOA 具有双端输入输出(光端口既能作为输入端

口也可作为输出端口)的特点,能实现双向工作。本研究在双端 SOA 的输出端连接一个光纤反射镜,使 SOA 第一次输出的脉冲光反射重新进入 SOA,进行第二次脉冲调制,实现脉冲光双向调制 SOA 系统。具体工作原理如图 2 所示。其中,连续光由入射口 A 进入 SOA 进行第一次调制,调制输出的脉冲光从出射口 B 输出。单次调制脉冲光(Modulated pulse light)经光纤反射镜(FOM)反射,产生的反射脉冲光(Reflected pulse light)再次进入 SOA 的有源层完成二次调制,最后从 SOA 入射口 A 输出脉冲光。因此,连续光进入双向 SOA 系统经过了两次放大和吸收,对应的放大倍数和吸收倍数得到了进一步增加,进而提升了脉冲消光比。

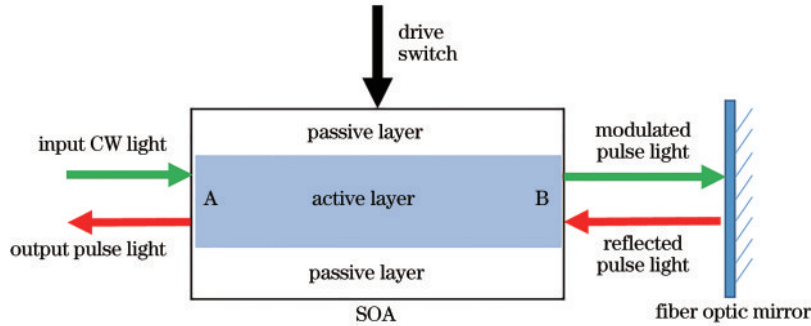


图 2 双向 SOA 系统的结构

Fig. 2 Structure of bi-directional SOA system

为了保证反射脉冲光重新进入 SOA 时均处于 SOA 的“放大”时间,双端 SOA 输出 B 端与光纤反射镜间的距离理想状态下应该为 0,在工艺条件具备时,可将光纤反射镜作为双端 SOA 输出端面的反射涂层,成为一个单端 SOA,实现无延迟的反射,避免反射脉冲光在光纤上往返时间消耗,缩短调制脉冲宽度。而目前生产商提供的单端输入输出 SOA 多用于光通信领域,适用于光纤传感领域的产品较少。因此,受限干实验条件,将双端 SOA 输出 B 端与光纤反射镜的最小距离控制在 2 m,但依然可以验证双向系统在消光比上的提升能力。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 脉冲光的放大特性实验与结果分析

图 3 为研究双向 SOA 系统脉冲光放大特性的实验结构图。该系统采用超窄线宽可调谐激光器(中心波长为 1550.1 nm)作为光源产生连续光,并通过光衰减器(OA)输入三端口环形器(CIR)1 口。SOA (INPHENIX IPSAD1502)连接在 CIR 的 2 口,将连续光调制为脉冲光。其中,任意波形发生器(AWG)用以产生周期为 1  $\mu$ s,脉冲宽度为 40 ns 的电脉冲作为 SOA 驱动以控制脉冲光的调制,并为后期采集提供同步触

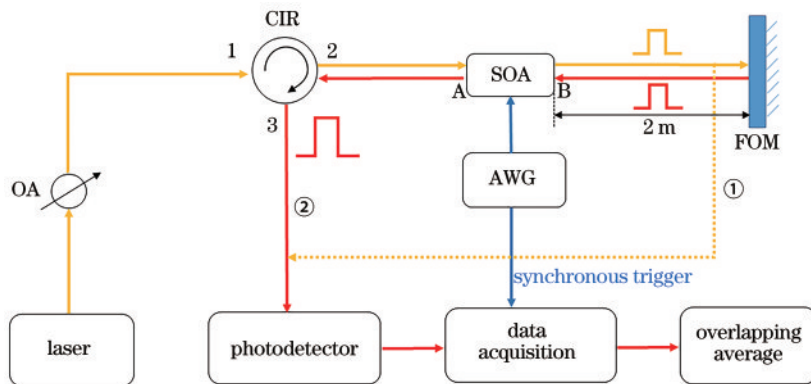


图 3 双向放大 SOA 系统的实验结构

Fig. 3 Experiment structure of bi-directional amplification SOA system



发信号。SOA 调制输出的脉冲光经 FOM 反射重新进入 SOA 被调制,由 SOA 的 A 端输出二次调制脉冲光,经由环形器 3 口输出。光电探测器(PD)将输出光信号转换为电信号,后期电信号通过数据采集模块 National Instruments PXIe-5162 以 250 MHz 的采样频率完成信号采样,采集 100 万组脉冲并经过叠加平均降低噪声以提高信号幅度的分辨精度。为了与单向 SOA 调制进行对比,探测测试点为两个,分别为单向调制脉冲光和双向调制脉冲光,对应图 3 中的①和②。

图 4 为 SOA 输入端 A 口输入连续光功率为 -25 dBm 时,双向 SOA 系统调制脉冲光与单向 SOA 系统调制的脉冲光。可以发现,单向 SOA 的峰值功率约为 0.25 mW,双向 SOA 调制脉冲光的峰值功率约为 0.75 mW,峰值功率为单向 SOA 的 3 倍。这表明经过 SOA 的再次放大,脉冲光峰值功率也得到进一步放大。双向 SOA 与单向 SOA 系统的同步触发脉冲时刻一致,但两个采集点光纤的距离延时不一致,两个调制脉冲光存在的延时  $t_1=10$  ns,但该延时不会影响实验结果。此外,双向调制存在一段峰值功率约为 0.11 mW 的脉冲光,持续时间  $t_2=20$  ns,之后才出现二次调制脉冲光,持续时间  $t_3=20$  ns。原因是在驱动脉冲控制下 SOA 刚进入放大状态时,光路的反方向上还没有脉冲光被反射回来,此时光路反方向上 SOA 放大的是自发辐射且通过 CIR 的 3 口输出。根据光纤中的时间-距离对应关系<sup>[32]</sup>计算出该段持续时间的光纤距离恰好对应 SOA 与 FOM 的光纤距离(2 m),因此,可通过缩短 SOA 与 FOM 的距离消除该部分自发辐射光。由于驱动脉冲的总宽度为 40 ns,SOA 和 FOM 间的光纤延迟为 20 ns,尽管正向光路上第一次调制产生了 40 ns 的光脉冲,经过反射后仅有 20 ns 的光脉冲能在反向光路上被再次放大,剩余 20 ns 的光脉冲则被 SOA 吸收,导致往返两次放大的光脉冲宽度缩短到 20 ns。同样,

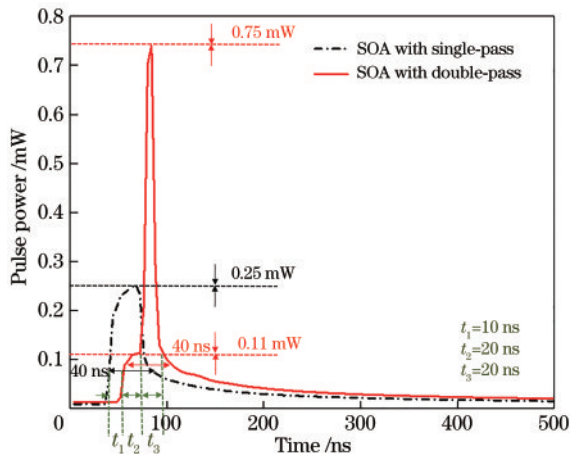


图 4 双向 SOA 调制脉冲光与单向 SOA 调制脉冲光对比  
Fig. 4 Modulated pulse light between double-pass and single-pass SOAs

这种现象也可以通过缩短 SOA 与 FOM 的距离避免。

图 5 为双向 SOA 与单向 SOA 输出脉冲光增益随输入光功率的变化曲线。可以发现:在输入光功率较小时,双向 SOA 增益一直大于单向,且二者的差值较大,在 -25 dBm 附近时最大,为 6.18 dB;随着输入功率的增大,双向 SOA 与单向 SOA 的增益都会逐渐降低,在 0 dBm 附近开始进入衰减区。这主要受限于 SOA 的饱和输出等因素<sup>[33]</sup>:输入功率增加到一定大小时,SOA 载流子也被迅速消耗,不能保障光子的受激辐射,导致两者的增益均呈下降趋势;当入射光功率小于 -5 dBm 时,双向 SOA 中第二次进入 SOA 内的反射脉冲光功率均小于 0 dBm,处于 SOA 增益区,对反射脉冲光放大时双向 SOA 的增益大于单向 SOA 增益,且由于 SOA 的饱和输出特性,两者的增益差值逐渐减小;当输入功率大于 -5 dBm 时,第二次进入 SOA 内的反射脉冲光功率大于 0 dBm,SOA 处于衰减区,进一步减弱了反射脉冲光的输出,此时双向 SOA 的增益小于单向 SOA 的增益。因此根据 SOA 的增益饱和特性,提高脉冲消光比需要更大饱和输出的 SOA,这也表明实验中采用的 SOA 器件在双向系统中更适用于低功率段。

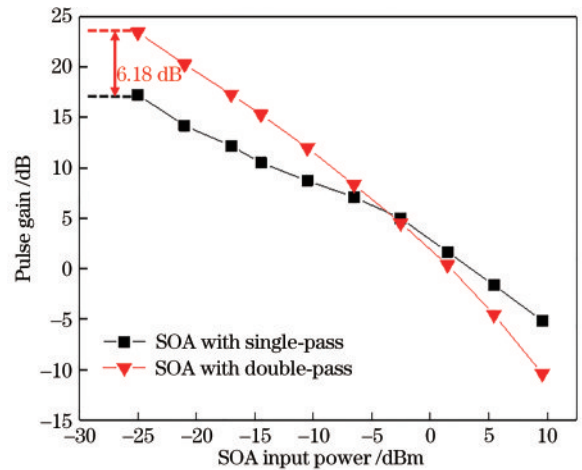


图 5 双向 SOA 调制与单向 SOA 调制增益对比  
Fig. 5 Pulse gain between double-pass and single-pass SOAs

图 6 为脉冲宽度以及 SOA 泵浦电流大小对双向 SOA 增益曲线的影响。图 6(a)为 SOA 泵浦电流大小为 120 mA,脉冲宽度分别为 40、50、60、70、300 ns 时双向 SOA 的增益曲线。可以发现:随着输入光功率的增大,由于 SOA 增益饱和,5 条曲线均呈下降趋势;在相同输入光功率下,随着脉冲宽度的增加,脉冲曲线间的差值逐渐减小,相邻曲线间的差值在 0.5 dB 上下波动。考虑到实验误差,增益会更小,因此,针对双向 SOA 系统,基本可认为脉冲宽度对增益特性的影响不大。实验中采用 SOA 的标准泵浦电流为 120 mA,因此选取该值上下 20 mA 的电流进行分析。图 6(b)为

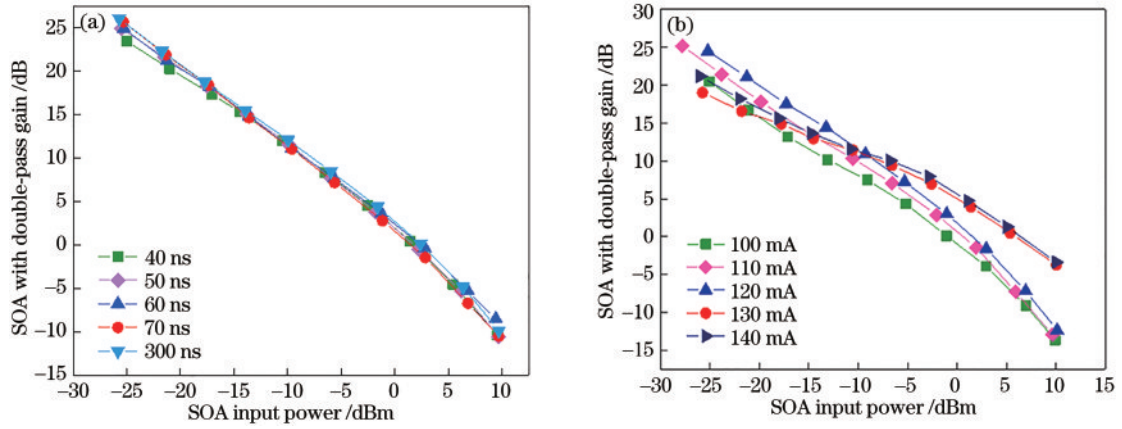


图 6 双向 SOA 系统的增益曲线。(a)增益与脉冲宽度的关系;(b)增益与泵浦电流的关系

Fig. 6 Gain curve of a bidirectional SOA system. (a) Relationship between gain and pulse width; (b) relationship between gain and pump current

脉冲宽度为 40 ns, SOA 泵浦电流分别为 100、110、120、130、140 mA 时双向 SOA 的增益曲线。可以发现,随着输入光功率的增加,5 条曲线均呈下降趋势。但在同一输入光功率下,不同泵浦电流曲线间的差值较大:当 SOA 泵浦电流在 100~120 mA 时,增益随泵浦电流的变化线性变化,相邻曲线间的差值在 2.5 dB 上下波动;泵浦电流继续增大时,由于载流子浓度确定,增益的提升效果不明显且逐渐趋于饱和。整体上泵浦电流对于增益的影响较大。这表明泵浦电流是双向 SOA 系统性能的影响因素之一,且最佳工作泵浦电流为 120 mA 左右。综上所述,双向 SOA 系统增益特性与泵浦电流的大小有关,与脉冲宽度的关系不大。

### 3.2 连续光的吸收特性实验与结果分析

由于图 3 中直接探测的系统噪声较大,SOA 吸收后的残留光基本被系统噪声淹没,图 4 中的基线不能

直接表征残留光的强度。为了提高对微弱残留光信号的探测能力,进一步采用相干探测方案研究系统的吸收特性。由图 4 可知,双向调制后的脉冲宽度较单向调制后的脉冲宽度缩短了 20 ns,即有部分放大后的脉冲被 SOA 吸收了,这表明 SOA 能在放大状态和吸收状态之间以 ns 量级的速度快速切换。但脉冲的吸收紧随脉冲放大,吸收后的残留光受放大后高强度脉冲光的影响,难以准确定量分析吸收过程。因此,在分析吸收特性时,将 SOA 与 FOM 的距离由 2 m 延长至 18 m 以减小高强度脉冲光的影响,保证反射光进入 SOA 时均处于吸收状态,实验结构如图 7(a)所示。激光器输出光经分束比为 50:50 的保偏耦合器(coupler 1)分为两路,一路作为参考光,另一路经 CIR 进入 SOA 输入端,SOA 将输入连续光调制为脉冲光。其中:AWG 用以产生周期为 1 μs,脉冲宽度为 70 ns 的电

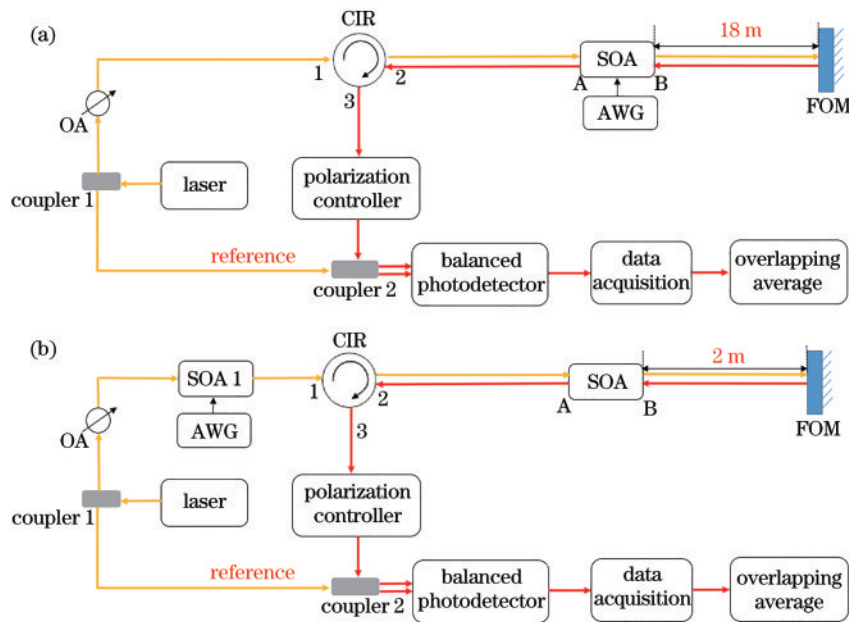


图 7 SOA 吸收特性的实验结构。(a)单向吸收;(b)双向吸收

Fig. 7 Experimental structure of SOA absorption characteristics. (a) Unidirectional absorption; (b) bi-directional absorption



脉冲作为 SOA 驱动以控制脉冲光的调制;SOA 调制输出的脉冲光经 18 m 延迟光纤后被 FOM 反射,再重新进入原来的 SOA 被吸收。吸收后的光经环形器 3 口输出,并由偏振控制器控制偏振态,与参考光通过  $2 \times 2$  保偏耦合器 2 混频后经平衡探测器进行光电探测。同样,对采集的 100 万组脉冲信号进行叠加平均降低系统噪声以提高系统对微弱信号的检测能力。

图 8 为环形器 3 口输出的探测结果以及 SOA 末端未连接 FOM 时的探测结果。可以发现,连接和未连接 FOM 时,在探测结果开始端均存在一段脉冲宽度为 70 ns、强度为 0.053 mW 的输出光。原因是 SOA 自发辐射光在 SOA 放大状态中被放大输出,且此时 SOA 反向光路上无光输入。110 ns 后,SOA 处于吸收状态,相对于未连接 FOM 的 SOA 系统,连接 FOM 的探测结果中存在一段差值为  $3.0 \times 10^{-4}$  mW ( $-35$  dBm)、宽度为 70 ns 的微弱脉冲光。微弱脉冲光与自发辐射光的时间延迟为 180 ns,对应 SOA 与 FOM 间 18 m 的光纤距离。这表明微弱脉冲光来源于 SOA 单向调制输出后的脉冲光经 FOM 反射进入 SOA 被吸收后的残留光。同时,测量得到 SOA 产生的单向调制脉冲光峰值功率约为 6 dBm,因此 SOA 的单向吸收率约为 41 dB。此外,放大后的自发辐射光与吸收后的微弱脉冲光间隔为 110 ns,表明 SOA 能在 ns 量级迅速完成放大状态到吸收状态的转换。而分布式传感系统中,脉冲宽度一般在 ns 量级,脉冲间隔则在数十  $\mu$ s 量级,且脉冲间隔远大于 SOA 的状态切换时间,因此可认为分布式光纤传感系统中 SOA 的放大和吸收两个过程是相对独立的,可独立测量分析 SOA 的动态消光比。

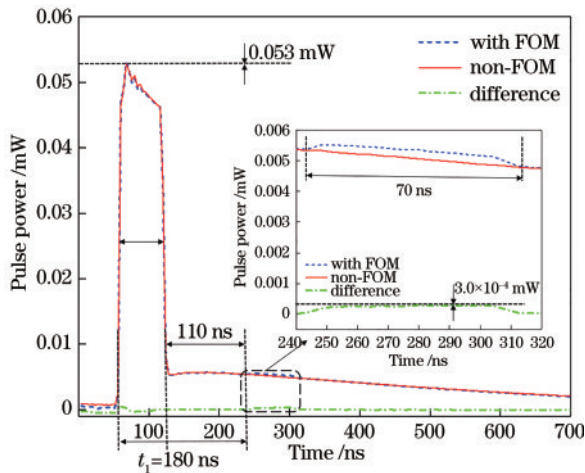


图 8 SOA 有无 FOM 连接时环形器 3 口的探测结果

Fig. 8 Detection results of circulator port 3 when SOA is connected with or without FOM

对于图 7(b)中的实验:SOA 1 产生脉冲宽度为 100 ns、峰值功率为 6 dBm 的高强度脉冲光。SOA 未加脉冲电流驱动时,工作在吸收状态。高强度脉冲光

经 CIR 进入 SOA 被单次吸收,该吸收光经 FOM 完成反射,返回 SOA 被二次吸收,二次吸收脉冲光最终由 CIR 3 口输出。图 9 为 SOA 1 输出脉冲光与经 SOA 两次吸收后的输出结果。其中,输出光功率相对于 SOA 1 输出脉冲光峰值功率进行了归一化处理,以显示相对功率大小。SOA 1 电路阻抗失配等因素导致脉冲光下降沿比较缓慢,但并不影响整体测量结果。可以发现:SOA 1 输出脉冲光经第一次 SOA 吸收,峰值功率衰减了约 42 dB,与图 8 中 SOA 的单次吸收率接近;单向吸收光经反射重新进入 SOA 被二次吸收,光峰值功率再次减小 30 dB 以上,整体吸收率达到了 72 dB 以上。这表明双向吸收能进一步减弱泄漏光强度。

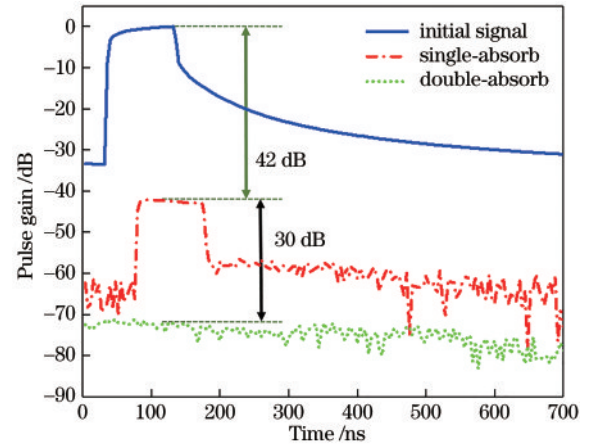


图 9 双向吸收与单向吸收 SOA 系统的脉冲光增益

Fig. 9 Pulsed light gain of bi-directional absorption and unidirectional absorption SOA systems

## 4 结 论

利用 SOA 能够双向工作的特性提出了一种双向 SOA 脉冲光调制技术。实验结果表明,双向脉冲调制能实现输入光的二次放大和吸收。在低输入光功率下,SOA 脉冲光的双向增益较单向 SOA 最大提升了 6.18 dB,且该增益特性与脉冲宽度无关,与 SOA 泵浦电流和增益饱和功率相关。在吸收特性方面,双向吸收能进一步削弱泄漏光强度,将峰值功率为 6 dBm 的脉冲光输入 SOA,双向吸收较单向吸收增加了 30 dB 以上,整体吸收率达到了 72 dB 以上。结合放大过程的额外增益和吸收过程中的额外吸收可以发现,相比单向 SOA 系统,双向 SOA 系统对于窄脉冲调制在理论上能使消光比提升 36.18 dB 以上。因此,采用双向 SOA 脉冲调制产生更高消光比的脉冲光,对于提高分布式光纤传感系统的性能具有一定意义。此外,本研究也表明,将双端 SOA 的一个输出端面镀全反射膜构成的单端 SOA 能实现更高消光比的脉冲光,后续还将进一步研究双向调制 SOA 运用于分布式光纤传感系统时的性能改善情况。

## 参 考 文 献

- [1] Adachi S. Distributed optical fiber sensors and their applications[C]//2008 SICE Annual Conference, August 20-22, 2008, Chofu, Japan. New York: IEEE Press, 2008: 329-333.
- [2] Dakin J P. Distributed optical fiber sensors[J]. Proceedings of SPIE, 1993, 10266: 102660B.
- [3] Jia X H, Rao Y J, Wang Z N, et al. Distributed Raman amplification using ultra-long fiber laser with a ring cavity: characteristics and sensing application[J]. Optics Express, 2013, 21(18): 21208-21217.
- [4] Webb G T, Vardanega P J, Hoult N A, et al. Analysis of fiber-optic strain-monitoring data from a prestressed concrete bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(5): 05017002.
- [5] 周琰, 靳世久, 张昶超, 等. 管道泄漏检测分布式光纤传感技术研究[J]. 光电子·激光, 2005, 16(8): 935-938.  
Zhou Y, Jin S J, Zhang Y C, et al. Study on the distributed optical fiber sensing technology for pipeline leakage detection[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2005, 16(8): 935-938.
- [6] 韩玲娟, 王强, 杨其华, 等. 基于分布式光纤传感的水下输气管道泄漏检测与定位分析[J]. 传感技术学报, 2015, 28(7): 1097-1102.  
Han L J, Wang Q, Yang Q H, et al. Leak detection and localization analysis of underwater gas pipeline based on distributed fiber optic sensing[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28(7): 1097-1102.
- [7] 吴永红, 朱莎, 许蔚, 等. 分布式光纤裂缝传感工程应用研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 090002.  
Wu Y H, Zhu S, Xu W, et al. Progress in distributed optical fiber crack sensing engineering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 090002.
- [8] 饶云江. 长距离分布式光纤传感技术研究进展[J]. 物理学报, 2017, 66(7): 074207.  
Rao Y J. Recent progress in ultra-long distributed fiber-optic sensing[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7): 074207.
- [9] 尚盈, 王昌. 分布式光纤传感技术综述[J]. 应用科学学报, 2021, 39(5): 843-857.  
Shang Y, Wang C. Review of distributed optical fiber sensing technology[J]. Journal of Applied Sciences, 2021, 39(5): 843-857.
- [10] 中电 41 所. AV6419 光纤应力分布测试仪[EB/OL]. [2021-12-10]. <https://wenku.baidu.com/view/72ea4d5302768e9950e73802.html>.  
The 41 Institute of CETCST. AV6419 optical fiber stress distribution tester[EB/OL]. [2021-12-10]. <https://wenku.baidu.com/view/72ea4d5302768e9950e73802.html>.
- [11] 睿科光电. 分布式光纤传感产品介绍[EB/OL]. [2021-12-10]. <http://www.realphotonics.com/process.html>.  
Realphotonics. Introduction to distributed optical fiber sensing products[EB/OL]. [2021-12-10]. <http://www.realphotonics.com/process.html>.
- [12] 南京法艾博光电科技有限公司. Ada-3032D 分布式光纤应变/温度监测仪[EB/OL]. [2021-12-10]. <http://www.fib-tech.com/content/?112.html>.  
Nanjing fiber photonics technology Co., Ltd. Ada-3032D distributed optical fiber strain/temperature monitor[EB/OL]. [2021-12-10]. <http://www.fib-tech.com/content/?112.html>.
- [13] 张旭苹, 丁哲文, 洪瑞, 等. 相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106004.  
Zhang X P, Ding Z W, Hong R, et al. Phase sensitive optical time-domain reflective distributed optical fiber sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106004.
- [14] 王一凡, 刘庆文, 李赫, 等. 基于瑞利图形相关的光纤分布式动态应变传感器[J]. 中国激光, 2021, 48(11): 1110002.  
Wang Y F, Liu Q W, Li H, et al. Distributed fiber-optic dynamic strain sensor based on spectra correlation of Rayleigh backscattering[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1110002.
- [15] 刘靖阳, 王涛, 张倩, 等. BOTDA 系统温度应变双参量传感技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 1306021.  
Liu J Y, Wang T, Zhang Q, et al. Research progress on temperature-strain dual-parameter sensing in BOTDA system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306021.
- [16] Afshar S, Ferrier G A, Bao X Y, et al. Effect of the finite extinction ratio of an electro-optic modulator on the performance of distributed probe-pump Brillouin sensor systems[J]. Optics Letters, 2003, 28(16): 1418-1420.
- [17] Lu Y G, Yao Y G, Zhao X D, et al. Influence of non-perfect extinction ratio of electro-optic modulator on signal-to-noise ratio of BOTDR[J]. Optics Communications, 2013, 297: 48-54.
- [18] Bui D T, Nguyen C T, Ledoux-Rak I, et al. Instrumentation system for determination and compensation of electro-optic modulator transfer function drift[J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(12): 125105.
- [19] 张旭苹, 张凯, 王顺. 布里渊光时域反射计中电光调制器的调制特性与控制[J]. 光电子·激光, 2012, 23(1): 15-20.  
Zhang X P, Zhang K, Wang S. Modulation performance and control of electro-optic modulator for the distributed Brillouin sensing system[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2012, 23(1): 15-20.
- [20] Snoddy J, Li Y, Ravet F, et al. Stabilization of electro-optic modulator bias voltage drift using a lock-in amplifier and a proportional-integral-derivative controller in a distributed Brillouin sensor system[J]. Applied Optics, 2007, 46(9): 1482-1485.
- [21] Lu Y L, Zhu T, Chen L, et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(22): 3243-3249.
- [22] Mathlouthi W, Lemieux P, Salsi M, et al. Fast and

- efficient dynamic WDM semiconductor optical amplifier model[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(11): 4353-4365.
- [23] 张瑜, 王东, 白清, 等. 基于 SOA 脉冲调制的 BOTDR 应变检测系统[J]. *传感技术学报*, 2017, 30(12): 1954-1958.
- Zhang Y, Wang D, Bai Q, et al. BOTDR strain detection system based on SOA pulse modulation[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2017, 30(12): 1954-1958.
- [24] 薛博, 白清, 张瑜, 等. 高消光比脉冲光调制提升 BOTDR 系统性能研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(11): 84-89.
- Xue B, Bai Q, Zhang Y, et al. Research on improving performance of BOTDR system using high extinction ratio pulse modulation[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(11): 84-89.
- [25] Martins H F, Martin-Lopez S, Corredera P, et al. Coherent noise reduction in high visibility phase-sensitive optical time domain reflectometer for distributed sensing of ultrasonic waves[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(23): 3631-3637.
- [26] 饶云江, 苒亮, 贾新鸿, 等. 基于拉曼放大和半导体光放大的 BOTDA[J]. *电子科技大学学报*, 2012, 41(4): 621-625.
- Rao Y J, Chang L, Jia X H, et al. Brillouin optical time domain analysis system based on Raman amplification and semiconductor optical amplifier[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2012, 41(4): 621-625.
- [27] Cho K Y, Takushima Y, Chung Y C. 10-Gb/s operation of RSOA for WDM PON[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(18): 1533-1535.
- [28] Yeh C H, Chow C W, Wang C H, et al. A self-protected colorless WDM-PON with 2.5 Gb/s upstream signal based on RSOA[J]. *Optics Express*, 2008, 16(16): 12296-12301.
- [29] 刘松, 王海龙, 陈廷廷. 端面反射率对单端反射半导体光放大器的影响[J]. *通信技术*, 2015, 48(2): 161-164.
- Liu S, Wang H L, Chen T T. Impact of facet reflectivity on single-port coupled SOA[J]. *Communications Technology*, 2015, 48(2): 161-164.
- [30] 董建绩, 张新亮, 王颖, 等. 基于单端 SOA 波长转换器的消光比特性分析[J]. *激光技术*, 2005, 29(1): 14-17.
- Dong J J, Zhang X L, Wang Y, et al. Extinction ratio characteristics of wavelength converters based on single-port-coupled SOA[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(1): 14-17.
- [31] El Aziz A, Ng W P, Ghassemlooy Z, et al. Characterization of the semiconductor optical amplifier for amplification and photonic switching employing the segmentation model[C]//2008 2nd ICTON Mediterranean Winter, December 11-13, 2008. Marrakech, Morocco. New York: IEEE Press, 2008.
- [32] 张旭苹. 全分布式光纤传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- Zhang X P. Fully distributed optical fiber sensing technology[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [33] 蒋中. 半导体光放大器动态特性的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- Jiang Z. Investigation on dynamic characteristic of semiconductor optical amplifier[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.