

## 基于半导体光放大器的明暗激光脉冲研究

冒燕<sup>1,3</sup>, 童杏林<sup>1</sup>, 史一凡<sup>2</sup>, 徐小强<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学 光纤传感技术与网络国家工程研究中心, 武汉 430070;

2. 武汉理工大学 自动化学院, 武汉 430070; 3. 武汉理工大学 威海研究院, 山东 威海 264300)

**摘要:**为了解决激光明脉冲在光通信和光纤传感等领域的应用瓶颈,设计了一种基于半导体光放大器(SOA)的锁模光纤环形激光器,该激光器由 SOA、偏振控制器、滤波器和起偏器等构成。分析了横电/横磁(TE/TM)模式光场经历 SOA 时的增益比值和相位差的变化机理,研究了环腔内总色散管理与 SOA 动态增益的关系,获得了稳定输出的明脉冲和暗脉冲,以及 2 种类型脉冲的动态演变过程。实验结果表明:当 SOA 的工作电流为 242 mA 时,成功获得脉冲重复频率均为 14.83 MHz、脉宽为 1.1 ns 的明脉冲和脉宽为 0.95 ns 的暗脉冲,并验证了在相同工作电流时,暗脉冲的强度显著大于明脉冲的强度。

**关键词:** 半导体光放大器; 明脉冲; 暗脉冲; 被动锁模; 非线性极化旋转

**中图分类号:** TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)05-0102-06

**DOI:** 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.05.017

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

Study on bright and dark laser pulses  
based on semiconductor optical amplifierMAO Yan<sup>1,3</sup>, TONG Xinglin<sup>1</sup>, SHI Yifan<sup>2</sup>, XU Xiaoqiang<sup>2</sup>

(1. National Engineering Research Center of Fiber Optic Sensing Technology and Networks,

Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Automation, Wuhan University of Technology,

Wuhan 430070, China; 3. Weihai Research Institute, Wuhan University of Technology, Weihai Shandong 264300, China)

**Abstract:** To address the application bottlenecks of bright laser pulses in optical communications and fiber optic sensing, a mode-locked fiber ring laser based on semiconductor optical amplifiers(SOA) is designed. This laser consists of an SOA, a polarization controller, a filter, and a polarizer. The mechanism of the gain ratio and phase difference changes in transverse electric/transverse magnetic(TE/TM) mode optical fields when passing through SOA is analyzed. The relationship between total dispersion management within the ring cavity and dynamic gain of SOA is investigated, resulting in stable output of bright pulses and dark pulses, as well as the dynamic evolution process of both types of pulses. The experimental results show that when the operating current of SOA is 242 mA, bright pulses with a pulse width of 1.1 ns and dark pulses with a pulse width of 0.95 ns are successfully obtained at repetition rates of 14.83 MHz, respectively. It is also verified that under the same operating current conditions, the intensity of the dark pulses significantly exceeds that of the bright pulses.

**Key words:** semiconductor optical amplifier, bright pulse, dark pulse, passively mode-locked laser, nonlinear polarization rotation

**收稿日期:** 2024-06-20.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(批准号:61275052、U2340226)资助; 湖北省自然科学基金项目(批准号:2022CFB385)资助; 山东省自然科学基金项目(批准号:ZR2020MF111)资助。

**作者简介:** 冒燕(1978—),男,江苏如皋人,博士,副教授,主要研究方向为超快激光技术、光纤传感技术、自动控制技术。曾荣获科技进步奖(省部级)二等奖 1 项、三等奖 3 项,教育部技术发明奖二等奖 1 项,中国石油和化工自动化业协会技术发明一等奖 1 项。



## 0 引言

与连续波激光器相比,光纤脉冲激光器具有峰值功率高、重复频率和脉冲宽度可控等特点<sup>[1-2]</sup>,近二十年来得以迅速发展,在光通信、基础物理、光加工与雕刻、光纤传感器、外科手术等诸多领域得到了广泛的应用<sup>[3-8]</sup>。通常情况下,“脉冲”指的是明脉冲,即在微弱而稳定的连续光波(CW)背景下,光强度突然显著增加<sup>[9-10]</sup>。除了明脉冲之外,脉冲激光还包括暗脉冲<sup>[11]</sup>。暗脉冲具有在光纤中传输损耗低、在噪声背景下稳定性

好、在脉冲内受激励曼散射影响小,以及在光纤损耗存在时缓慢增宽等优点<sup>[12-13]</sup>。在光通信应用方面,暗脉冲可用于改善光纤通信并发展红外通信,降低长途通信中产生的噪声或错误,相对于常见的明脉冲有着更好的通信特性。在光学传感应用方面,暗脉冲作为光纤传感系统的脉冲光源,能够改善光学传感信号的信噪比,提高系统的测量精度和稳定性。由于暗脉冲激光器技术属于全新的研究领域,对其应用研究仍在持续进行中<sup>[14]</sup>。

近年来,人们高度关注如何在基于半导体光放大器(SOA)的光纤激光器中产生暗脉冲。由于 SOA 具有非均匀增宽特性,因此它可以作为被动锁模光纤激光器中的增益介质。同时,基于 SOA 的光纤环形激光器具有光学双稳性,并且在特定条件下 2 种双稳态可以相互切换<sup>[15]</sup>,这使其成为产生暗脉冲(如域壁孤子)的良好候选者。2012 年,WANG J Y 等人<sup>[16]</sup>采用 SOA 作为增益介质设计了 3 种不同结构的激光器。在“8”字型和“σ”型腔光纤激光器中,通过利用单模光纤(SMF)在 1.3 μm 零色散波长处的 SOA 增益动态与非线性相互作用增强特性,以及 2 个子腔之间的干涉效应,成功产生了暗脉冲;而在单环腔结构中,则仅获得了明脉冲。同样地,在 2015 年和 2016 年,PAN H G 等人<sup>[17-18]</sup>通过利用 2 个子腔之间的干涉效应,以及交叉相位调制(XPM)和交叉增益调制(XGM)锁模机制,相继证明了在具有双子腔结构的“8”字型和反馈型的 SOA 激光器中能够产生时间宽度可变的暗脉冲。2017 年,他们研究了基于 SOA 的调 Q 光纤激光器中的明脉冲和暗脉冲<sup>[19]</sup>,通过改变偏振控制器的设置,获得不同脉冲宽度和频率重复率的明脉冲或暗脉冲。综上所述,基于 SOA 的光纤激光器产生暗脉冲主要通过设计 2 个子腔来实现。此外,尽管利用 SOA 在单腔激光器中通过调 Q 技术也能产生暗脉冲,但这些暗脉冲的包络呈现三角波形,并且在没有显著背景噪声的情况下,其强度下降不明显。同时,调 Q 脉冲的稳定性也不如被动锁模脉冲。

因此,本文设计一种基于 SOA 的锁模光纤环形激光器,以获得稳定的明脉冲和暗脉冲。

## 1 实验装置及原理

基于 SOA 的锁模光纤环形激光器的原理结构如图 1 所示,整个腔长约为 14.9 m。为了增强输出脉冲激光的稳定性,环形腔中的光学器件之间采用了保偏(PM)光纤进行熔接。SOA(IPSAD1501)作为增益介质,

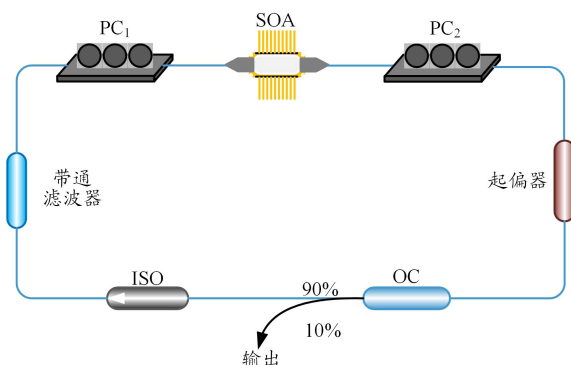


图 1 基于 SOA 的锁模光纤环形激光器的原理结构

是被动锁模激光器中最关键的光学器件,且考虑到 SOA 是一个极化敏感器件,因此本文将其置于 2 个偏振控制器(PC)之间,以实现非线性极化旋转。光纤隔离器(ISO)确保激光传输方向的单一性,而带通滤波器则使锁模激光器能在中心波长为 1 550 nm 的 5 nm 宽带内工作。消光比为 27 dB 的偏振光束分束器(PBS)被用作腔内的起偏器,而 90:10 光纤耦合器(OC)的 10% 输出端则作为光谱和时域波形的监测点。

输出光谱通过分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪(AQ6370D)进行分析。明暗脉冲的时域特性则通过带宽为 15 GHz 的商用 InGaAs PIN 光电探测器(ET-3500F)和采样率为 80 GS/s 的数字示波器(DSA-X 92 004A)进行可视化分析。

### 1.1 非线性偏振旋转效应原理

在 SOA 中,光场传输时一般同时存在横电(TE)和横磁(TM)模式。为了便于问题的讨论,在传输坐标系中,本文将光场的 TE 模式方向设定与 x 轴一致,而 TM 模式方向设定与 y 轴一致,z 轴则代表行波方向。SOA 中 TE 模式和 TM 模式的示意图如图 2 所示。假设 SOA 输入光的初始状态表示为

$$E_0 = E \sin \theta \exp(i\varphi_0) u_{TE} + E \sin \theta \exp(i\varphi_0) u_{TM} \quad (1)$$

其中, $E$  是光的强度, $\theta$  为光场与 y 轴的夹角, $\varphi_0$  为光的初始相位, $u_{TE}$  和  $u_{TM}$  分别是 x 轴和 y 轴的单位矢量。

经过长度为  $L$  (SOA 在行波方向的物理长度) 的有

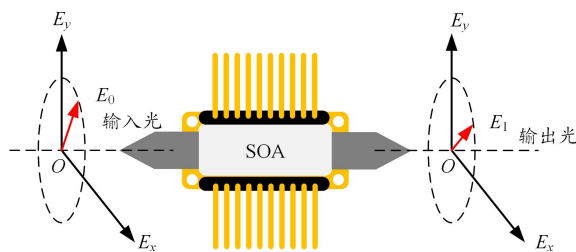


图 2 SOA 中 TE 模式和 TM 模式示意图

冒燕,童杏林,史一凡,等:基于半导体光放大器的明暗激光脉冲研究

源区后,由于 TE 和 TM 模式具有不同的有效折射率,因此两者的光场会经历不同的变化,输出的光场可表示为

$$E_i = GE \sin \theta e^{i\Delta\varphi_{TE}} + E \cos \theta e^{i\Delta\varphi_{TM}} \quad (2)$$

其中,  $G$  是 TE 模式与 TM 模式的单程增益比,  $\Delta\varphi_{TE}$ 、 $\Delta\varphi_{TM}$  分别为 TE、TM 模式的相移,其定义如下:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_{TE} = \frac{2\pi L n_{TE}}{\lambda} \\ \Delta\varphi_{TM} = \frac{2\pi L n_{TM}}{\lambda} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\lambda$  为光信号的波长,  $n_{TE}$  和  $n_{TM}$  分别为 TE 和 TM 模的模式折射率。

2 个模式间的相移差为

$$\Delta\varphi_{TE-TM} = \Delta\varphi_{TE} - \Delta\varphi_{TM} \quad (4)$$

由式(2)和式(4)可以看出,输出信号的偏振态由模式间的单程增益比  $G$  和模式间的相移差的大小  $\Delta\varphi_{TE-TM}$  共同决定。

通过以上分析可知,引起 SOA 中的光场发生偏振旋转的主要原因有 2 个方面<sup>[20]</sup>。首先,TE 和 TM 这 2 种模式在经过 SOA 后会获得不同的增益,导致两者的增益比值发生变化,从而引起输出光的偏振状态的变化。其次,SOA 本身的固有双折射特性及其作为光源时引入的附加双折射,使得 TE 和 TM 模式在 SOA 中经历不同的折射率,这导致了 2 种模式的相位差异。因此,当光波经过 SOA 时,会产生非线性偏振旋转效应。在整个传输过程中,自相位调制(SPM)和 XPM 效应对 2 个正交偏振分量的作用导致其偏振状态不断地发生非线性演化。通过调节 SOA 输入端的 PC,可以使得脉冲中心部分保持线性偏振。这样,脉冲中间强度较高的部分能够完全通过 SOA,而每循环一次,腔内的脉冲就会发生一次微小的窄化过程。由于 SOA 的偏振依赖特性,2 个不同强度的正交线性偏振分量会导致不同的非线性相移,从而改变脉冲的偏振状态。SOA 与两端的 PC 形成一个等效的饱和和吸收体,从而实现锁模功能。

## 1.2 基于 SOA 光功率控制的色散管理

当激光腔的偏振态改变时,腔损耗也随之改变,此时 SOA 的动态增益特性为明/暗脉冲形成提供了条件。当光信号通过 SOA 时,动态增益等于输出光与输入光的强度比值,其数学表达式为

$$G_d = \left| \frac{E_i^2(L, t)}{E_0} \right| = \exp(-2\beta L) \quad (5)$$

其中,  $t$  是激光的传输时间,  $\beta$  是增益。

根据  $k-k$  关系<sup>[21]</sup>,求出经过 SOA 后的光信号相移总量  $\varphi$ ,然后可以推导出 SOA 的色散系数

$$D = -\frac{\lambda^2 \beta}{4\pi c L G_d} \times \left[ \frac{d^2 G_d}{d\lambda^2} G_d - \left( \frac{dG_d}{d\lambda} \right)^2 \right] + \frac{\lambda \beta}{2\pi c L G_d} \frac{dG_d}{d\lambda} \quad (6)$$

其中,  $\beta$  是线宽增强因子,  $c$  是光速。

由式(6)可知,当 SOA 的动态增益改变时,SOA 的色散(无论是正色散还是负色散)也随之改变。在图 1 所示的环形腔内,总的色散量是由正色散量和负色散量之和构成的。除了 SOA 之外,其它所有部件都是负色散器件,并且这些负色散值是固定的。因此,唯一能引起总色散量变化的因素就是 SOA 的动态色散特性。

## 2 实验结果和分析

### 2.1 利用非线性偏转效应生成明暗脉冲

当 SOA 的工作电流调节到阈值 191 mA 时,缓慢旋转 SOA 两端的 PC,可以在环形腔的输出端产生稳定的明脉冲。通过示波器监测到的明脉冲序列如图 3(a)所示,明脉冲的重复间隔脉宽约为 67.4 ns,对应的脉冲重复频率为 14.83 MHz,这与 14.9 m 长激光腔的纵向模式频率间隔一致,也与图 3(b)所示的射频(RF)频谱相符合。由图 3(c)可知,明脉冲的脉冲宽度约为 1.1 ns。由图 3(d)所示的脉冲光谱图可知,锁模后的明脉冲光谱在波长 1 547.7、1 553.3 nm 处存在峰值,这是因为基于 SOA 的光纤环形激光器具有光学双稳态特性,且这 2 种双稳态可以相互切换<sup>[18]</sup>。当 SOA 电流达到一定阈值时,输出激光的光谱演化为双峰状态。

将 SOA 的工作电流随机调节至 242 mA,通过仔细调整 PC<sub>1</sub> 和 PC<sub>2</sub> 的偏振状态,可以成功地产生明脉冲或暗脉冲。通过示波器观察到的明脉冲和暗脉冲序列分别如图 4(a)和图 4(b)所示。这 2 种脉冲的重复频率均为 14.83 MHz。明脉冲的脉冲宽度约为 0.93 ns,如图 4(c)所示,用光强计测量出其平均功率为 47.3 μW。暗脉冲的宽度约为 0.95 ns,如图 4(d)所示,用光强计测量出其平均功率为 2.41 mW。

### 2.2 基于色散管理的明暗脉冲生成实验

基于全光纤色散管理的锁模激光器的总色散量是不可变的,因为一旦激光器设计完成,其腔内的光纤长度就无法随意更改。而基于光功率控制的色散管理技术利用了 SOA 动态可变的色散特性,不仅创造了暗脉冲的生成条件,还控制脉冲宽度的变化。因此,当

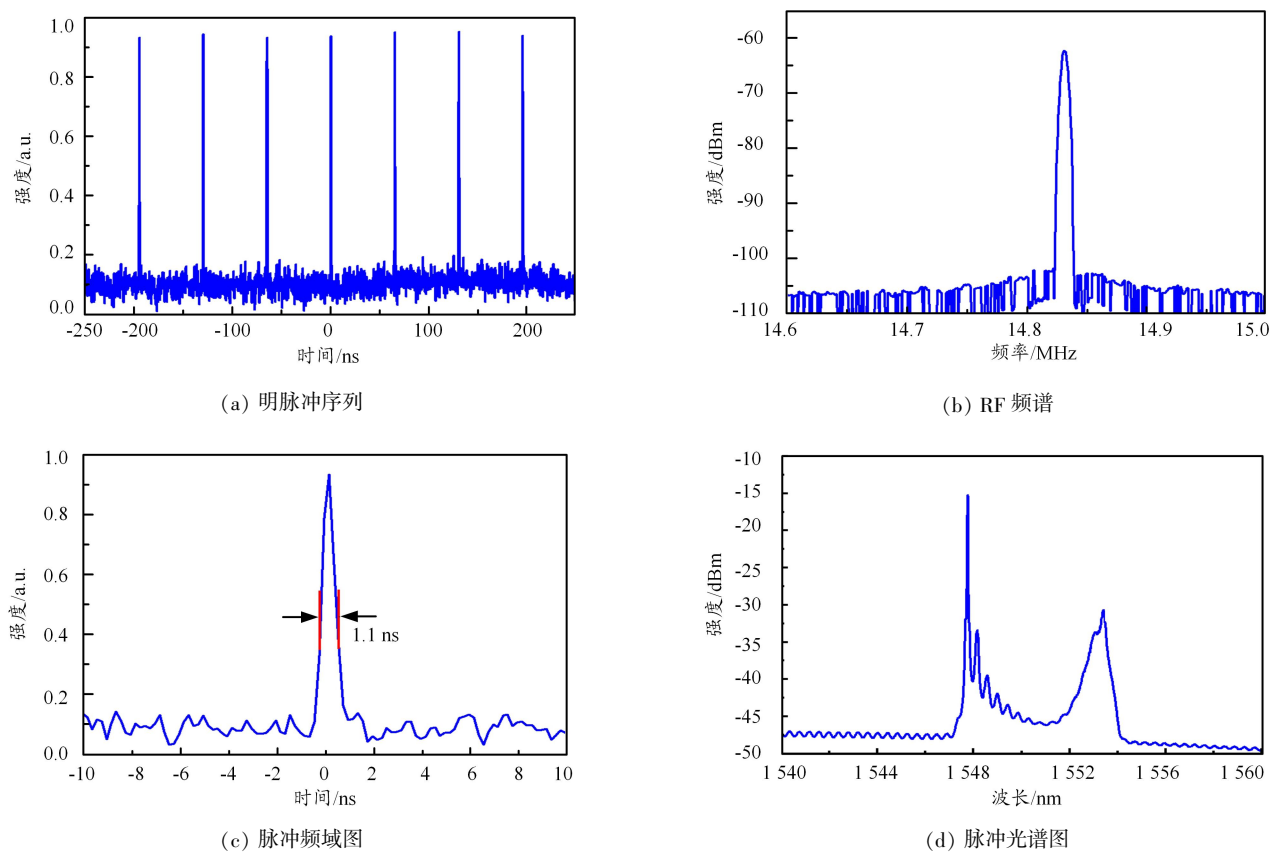


图3 明脉冲的时域波形、RF 频谱和双峰光谱

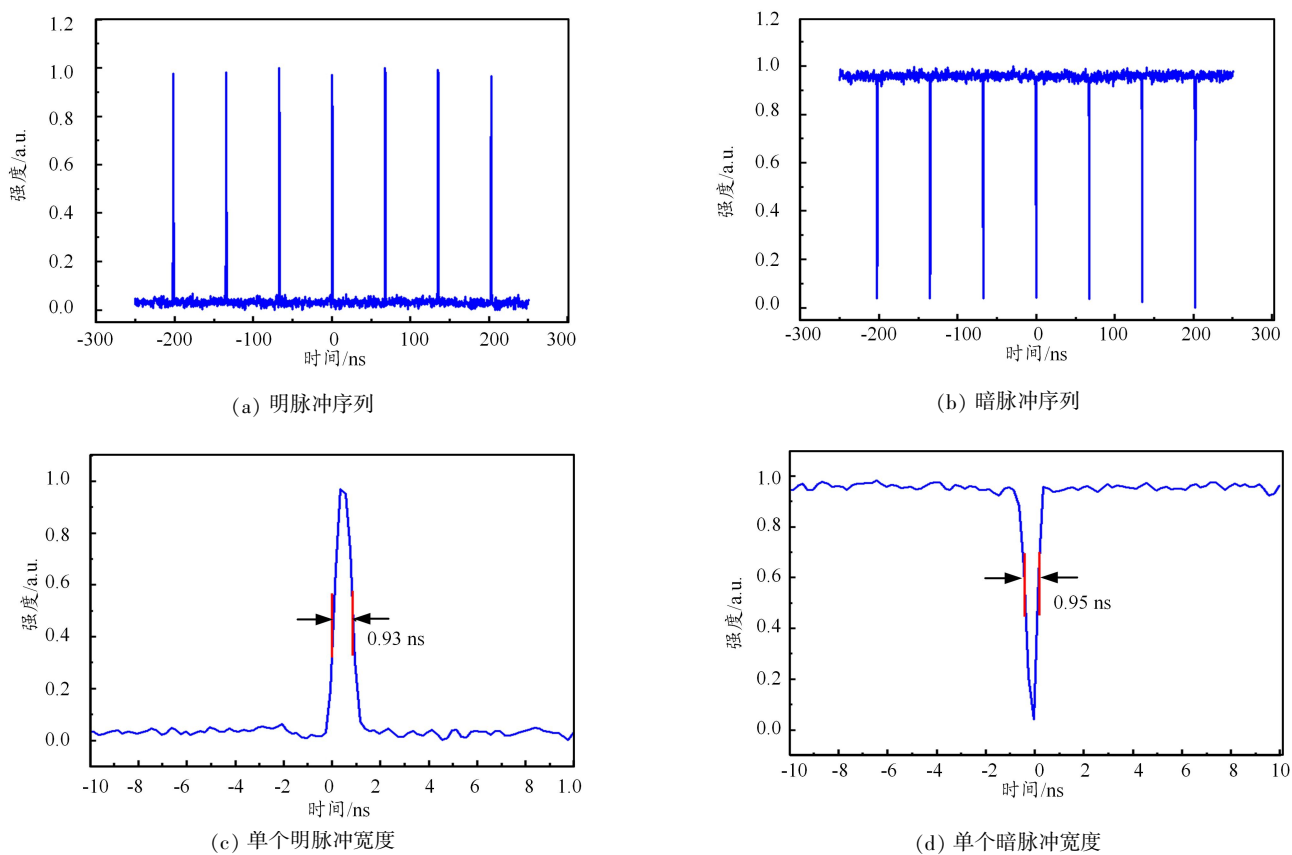


图4 明/暗脉冲序列和单个脉冲宽度



冒燕,童杏林,史一凡,等:基于半导体光放大器的明暗激光脉冲研究

激光腔的增益发生变化时,明脉冲或暗脉冲的宽度也会相应地发生变化。当激光腔的增益改变到临界值时,即会发生明脉冲与暗脉冲之间的演变。

在实验中,本文通过仔细调整 2 个 PC,可以观察到暗脉冲到明脉冲的演变过程。根据图 1 的原理结构,当 SOA 的工作电流为 240.3 mA 时,通过改变腔内的偏振态,可以轻松地获得稳定的暗脉冲。在这种情况下,断开 PC<sub>2</sub> 的连接,使用消光比计测量其消光比,测得 PC<sub>2</sub> 的消光比为 12.6 dB;接着,将 PC<sub>1</sub> 的消光比从 1.6 dB 调整到 1.4 dB,观察到暗脉冲逐渐变宽,最终转变为明脉冲。

当激光脉冲在 SOA 中传输时, TM 和 TE 模式会获得不同的增益。TE 和 TM 模式之间的增益比差异导致入射光的偏振状态发生变化,这归因于 SOA 本身的双折射特性。因此,通过将偏振控制器 PC<sub>1</sub> 与 PBS 的轴线适当对准,可以使脉冲的部分前后沿被 PBS 阻挡。在这个过程中,明脉冲的脉冲持续时间会发生变化。随着明脉冲的加宽,2 个相邻明脉冲的重叠部分形成凹陷,产生暗脉冲。因此,暗脉冲是由明脉冲的产生、双折射以及腔内偏振效应的共同作用形成的。

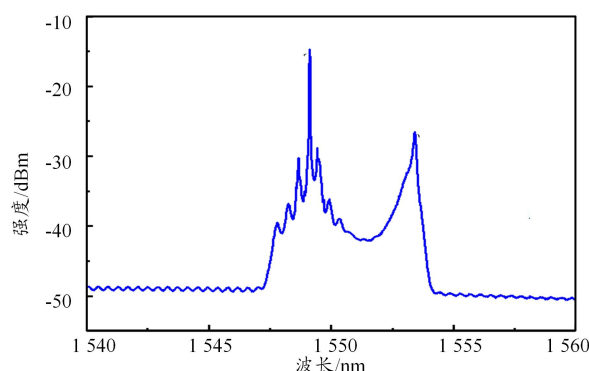
### 2.3 暗脉冲与明脉冲的强度对比实验

为了验证在相同的 SOA 工作电流下,获得的暗脉冲强度大于明脉冲强度,本文预先设定了 SOA 的工作电流范围,并在 230~265 mA 内测量了同一电流时 2 种锁模脉冲的平均强度。测得的明脉冲和暗脉冲强度与 SOA 工作电流的统计数据如表 1 所示。可以看出,暗脉冲的平均强度远大于明脉冲的平均强度。

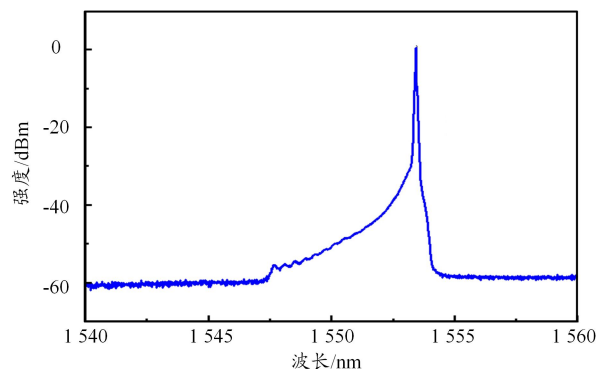
表 1 不同 SOA 工作电流下的明/暗脉冲的平均强度值

| 工作电流/mA | 明脉冲平均强度/dBm | 暗脉冲平均强度/dBm |
|---------|-------------|-------------|
| 230     | -8.57       | 3.56        |
| 235     | -8.43       | 3.74        |
| 240     | -7.99       | 3.83        |
| 245     | -7.97       | 4.17        |
| 250     | -8.38       | 4.29        |
| 255     | -7.99       | 4.43        |
| 260     | -7.94       | 4.5         |
| 265     | -7.61       | 4.58        |

当 SOA 工作电流为 260 mA 时,明脉冲和暗脉冲的光谱分别如图 5(a)和图 5(b)所示。可以看出,明脉冲和暗脉冲在光谱图中有一个波长相同的尖峰,该尖峰的中心波长为 1 553.4 nm。因此,可以认为明脉冲的光谱是在暗脉冲的光谱左侧叠加了一个中心波长为



(a) 明脉冲



(b) 暗脉冲

图 5 明/暗脉冲的光谱图

1 549.1 nm 的额外尖峰。

本文通过多次实验发现,随机改变腔内的泵浦功率和偏振态等条件,光谱中出现的 2 个尖峰的中心波长通常位于 1 549.1 nm 或 1 553.4 nm 附近。当明脉冲转变为暗脉冲时,由于不同偏振态的竞争破坏了这 2 个波长间的平衡,导致光谱从双峰状态演变为单峰。这是因为在基于 SOA 的光纤激光器中存在着光学双稳态现象,即在相同的 SOA 工作电流下可以存在 2 个不同的中心波长。

### 3 结束语

本文设计了一种基于 SOA 的锁模光纤环形激光器,利用 SOA 的偏振依赖特性,通过调节 PC 来改变腔内的偏振态,从而实现了明脉冲和暗脉冲的生成。研究发现,位于 SOA 两侧 PC 的消光比对于这一现象至关重要。本文揭示了暗脉冲形成与偏振态之间的内在联系,为理解不同激光腔结构中暗脉冲的物理机制提供了理论基础。这些研究成果在光纤通信和光纤传感领域具有重要的应用前景,例如,将暗脉冲激光应用于基于时分复用的准分布式光纤阵列传感系统中,能够有效提升系统的探测距离和定位精度。

## 参考文献:

- [1] WANG X, ZHOU P, WANG X L, et al. 2  $\mu\text{m}$  bright-dark pulses in Tm-doped fiber ring laser with net anomalous dispersion[J]. Applied Physics Express, 2014, 7(2): 022704-1-022704-4.
- [2] PENG, J S. ZHAN L, GU Z C, et al. Direct generation of 128-fs Gaussian pulses from a compensation-free fiber laser using dual mode-locking mechanisms[J]. Optics Communications, 2012, 285(5): 731-733.
- [3] POPA D, SUN Z, HASAN T, et al. Graphene Q-switched, tunable fiber laser[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(7): 073106-1-073106-3.
- [4] ALAVI S E, SOLTANIAN M R K, AMIRI I S, et al. Towards 5G: a photonic based millimeter wave signal generation for applying in 5G access fronthaul[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 19891-1-19891-11.
- [5] SKRUIBIS J, BALACHNINAITE O, BUTKUS S, et al. Multiple-pulse laser-induced breakdown spectroscopy for monitoring the femtosecond laser micromachining process of glass[J]. Optics and Laser Technology, 2019, 111: 295-302.
- [6] ZHANG J R, GUAN K, ZHANG Z, et al. In vitro evaluation of ultrafast laser drilling large-size holes on sheepshank bone[J]. Optics Express, 2020, 28(17): 25528-25544.
- [7] LYU C Y, ZHAN R J. STOP model development and analysis of an optical collimation system for a tactical high-energy laser weapon[J]. Applied Optics, 2021, 60(13): 3596-3603.
- [8] CAI S, SONG J Chao, WANG Y Y, et al. Pulsed laser ablation CFRP material process optimization[J]. Laser Technology, 2024, 48(1): 83-91.
- [9] ZHANG H, TANG D, ZHAO L, et al. Dark pulse emission of a fiber laser[J]. Physical Review A, 2009, 80: 045803-1-045803-16.
- [10] MAO D, WANG H Q, ZHANG H Z, et al. Synchronized multi-wavelength soliton fiber laser via in-tracavity group delay modulation [J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 6712-1-6712-8.
- [11] WANG X F, HE Y P, PAN J M. Generation and evolution of bright-dark pulses in a thulium/holmium co-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. Optoelectronics Letters, 2023, 19(12): 0710-0715.
- [12] TRIKI H, SUN Y Z, ZHOU Q, et al. Dark solitary pulses and moving fronts in an optical medium with the higher-order dispersive and nonlinear effects[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2022, 164: 112622-1-112622-6.
- [13] SONG Y F, SHI X J, WU C F, et al. Recent progress of study on optical solitons in fiber lasers[J]. Applied Physics Reviews, 2019, 6(2): 021313-1-021313-11.
- [14] WANG G M, SHENG Q Y, TANG S Q, et al. Evolution between bright and dark pulses in a MoxW1-xTe2 based fiber laser[J]. Optics Express, 2023, 31(16): 26145-26155.
- [15] XU L, WANG B C, BABY V, et al. Optical spectral bistability in a semiconductor fiber ring laser through gain saturation in an SOA[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(2): 149-151.
- [16] WANG J Y, LIN K H, CHEN H R. Generation of optical waveforms in 1.3- $\mu\text{m}$  SOA-based fiber lasers[J]. Laser Physics, 2012, 22(1): 216-220.
- [17] PAN H G, ZHANG A L, TONG Z R. Dark pulse laser with tunable width based on SOA and feed-back[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(8): 930-932.
- [18] PAN H G, YU J L, WANG W R, et al. Dark pulse optical fiber laser based on semiconductor optical amplifier[J]. Optical Engineering, 2015, 54(1): 1-5.
- [19] PAN, H G, ZHANG, A L, TONG Z R. Generation of dark and bright pulses in an SOA-based Q-switched fiber laser[J]. Laser Physics, 2017, 27(8): 085006-1-085006-4.
- [20] PAN H G, YU J L, WANG W R, et al. Pulse width tunable dark pulse laser based on semiconductor optical amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0514003-1-0514003-6.
- [21] ZILKIE A J, MEIER J, MOJAHEDI M, et al. Time-resolved linewidth enhancement factors in quantum dot and higher-dimensional semiconductor amplifiers operating at 1.55  $\mu\text{m}$ [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(11): 1498-1509.