

# 暗脉冲激光器的研究进展

晋晓曦 冉阳 李淼 邓瑞

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要** 暗脉冲激光在光波导中传输噪声小、损耗低,因此在信号处理方面比传统亮脉冲更有优势。介绍了暗脉冲激光器的国内外研究进展,重点介绍了经后期光学或电学整形产生暗脉冲和激光器直接产生暗脉冲的各种理论方案,最后对暗脉冲激光器的应用和发展前景进行了展望,并指出了目前还存在的问题。

**关键词** 激光器;暗脉冲;光学整形;电学整形;量子点激光器

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.090006

## Research Progress of Dark Pulse Laser

Jin Xiaoxi Ran Yang Li Miao Deng Rui

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** Dark pulses propagate with low noise and low loss in optic waveguides, so dark pulses have an advantage over bright pulses in signal processing. Research progress of dark pulse laser is reviewed. Emphases are placed on dark pulse output schemes based on optical shaping or electrical shaping, and dark pulse output directly from a laser cavity. And the applications and prospect related to dark pulse laser are presented. The remaining problems are pointed out.

**Key words** lasers; dark pulse; optical shaping; electrical shaping; quantum dot diode laser

**OCIS codes** 060.4510; 140.3430; 140.3510; 140.3538

## 1 引言

传统意义上的脉冲激光器的激光输出都是亮脉冲,即稳定连续光波背景下光强的突然显著上升。亮脉冲激光器的理论设计方案已十分成熟,相关技术已在通信、激光测距、光伏工业、精密加工、美容医疗、科学研究等领域得到广泛应用。然而,亮脉冲在光波导中进行传输时,对传输过程中产生的噪声和损耗极为敏感,其强度在传输过程中会逐渐降低;且在正常色散介质中,亮脉冲不能像孤子一样传输,非线性效应会造成脉冲光谱和时间上的展宽。亮脉冲在传输过程中的这些性质制约了相关技术的继续发展。

暗脉冲是与亮脉冲相对的概念,即稳定连续光波背景下光强的突然显著降落,其与传统的亮脉冲相比,不仅可以实现相同功能,而且具有噪声更低、损耗更小、传输速度更快等优点<sup>[1]</sup>,因此其在信号处理、长途通信、精密测量等领域都具有广泛的应用前景。Kivshar等<sup>[2]</sup>曾在1998年对暗脉冲当时的研究成果做了很好的总结。早在1988年,Krökel等<sup>[3]</sup>就利用了一个双频的Nd:YAG激光器,在脉宽100 ps,波长523 nm的脉冲背景下,将其调制耦合进入长为10 m的单模偏振光纤,最终产生了脉宽0.3 ps的暗脉冲。近几年来各国相关科研机构开展了关于暗脉冲激光器的理论研究,并取得了一些关键进展。2009年初,新加坡南洋理工大学Zhang等<sup>[4]</sup>研制出首台不经任何光学、电学调制而直接产生暗脉冲的激光器;2010年7月,美国标准技术研究院(NIST)和科罗拉多大学的科学家共同研制出一种新型的激光器——基于量子点技术的新型暗脉冲激光器<sup>[5]</sup>。

本文综述产生暗脉冲的技术方案并进行深入分析,在此基础上对暗脉冲激光器的未来发展和应用进行展望。

收稿日期:2012-03-28;收到修改稿日期:2012-05-14;网络出版日期:2012-06-26

作者简介:晋晓曦(1991—),女,本科生,主要从事新型激光器方面的研究。E-mail: jxxnudt@gmail.com

## 2 研究进展

与亮脉冲相比暗脉冲较难产生,现在已有产生暗脉冲(序列)的不同技术方案,其中大多数是基于使用脉冲整形的激光外部控制技术<sup>[7~12]</sup>。暗脉冲也可以通过在半导体放大器中注入亮脉冲产生,但是产生的脉冲序列并不稳定且最终衰减<sup>[13,14]</sup>。2009年,锁模光纤激光器产生暗脉冲见诸报道,该方案通过正常色散和调节非线性偏振旋转以得到反饱和吸收来产生暗脉冲<sup>[3]</sup>。产生暗脉冲激光输出的最新方案为使用被动锁模技术产生暗脉冲序列量子点半导体激光器,该方案不经过后期光学和电学整形,被认为是首次实现由半导体激光器产生稳定暗脉冲序列<sup>[5]</sup>。因而本文依据暗脉冲产生过程中是否经过脉冲整形,将产生暗脉冲的方案大致分为两大类:1)借助调制器、FBG等器件对激光进行后期整形而产生的暗脉冲,2)激光器直接产生的暗脉冲。

### 2.1 后期整形法

后期整形法产生暗脉冲的方案主要有以下几种:通过电光调制器进行连续激光光束的强度调制<sup>[6]</sup>、在正常色散递减光纤中拍频信号的非线性变换<sup>[7]</sup>、线性环形镜间的电光相位调制<sup>[8]</sup>和锁模亮脉冲序列的被动过滤[包括空间光阑<sup>[9,10]</sup>、光纤布拉格光栅(FBG)<sup>[11]</sup>以及主动调频(FM)锁模技术<sup>[12]</sup>三种方式]。该类理论方案的特点是:在全正常色散介质中,借助调制器、FBG等器件实现锁模,从而实现产生暗脉冲激光输出。

本文将主要从通过相位调制器调制、通过FBG和通过干涉产生暗脉冲等几种方案介绍经后期电学或光学整形产生暗脉冲的方案。

#### 2.1.1 通过相位调制器调制产生暗脉冲

1973年,Hasegawa指出孤子在光纤通信中有应用的可能,1980年,研究人员在单模光纤中首次观测到了亮脉冲,而暗脉冲则在很长一段时间仍停留在数学的层面上。1987年,Emplit等<sup>[15]</sup>首先尝试研究暗脉冲在光纤中的传播。他们利用光谱过滤技术产生了奇对称的暗脉冲。由于使用了相对较“长”的暗脉冲(约5 ps,600 nm),该实验并不能证实暗孤子的传播特性,但观察到了暗脉冲有和基本暗孤子相似的一些特性。由于实验中孤子传输的特征长度(约220 m)比光纤的衰减长度(约140 m)长,光纤中的损耗不能被忽略,因此这个实验并不能为暗孤子的传输提供足够的证据。

1988年,Krökel等<sup>[9]</sup>第一个证明了暗脉冲的传输。在他们的实验中,甚至一对对称的小振幅的暗脉冲也可以像光孤子一样一致地、准确无误地传输。利用一个双频的Nd:YAG激光器,在脉宽100 ps,波长523 nm的脉冲背景下,将其耦合进入长为10 m的单模保偏光纤,最终产生了脉宽0.3 ps的暗脉冲。在高功率(大于9 W)时,输入的脉冲会演变成一对具有相对于背景脉冲相反速度的暗脉冲,他们的实验结果和薛定谔方程的数值结果吻合很好。其实验结果如图1所示<sup>[3,16]</sup>。

1988年,Weiner等<sup>[9]</sup>利用脉冲裁剪技术第一次成功实现了孤立暗脉冲的传输。这和基本暗脉冲的形成相一致,都是通过一个1.4 m长的单模光纤实现的。实验结果示于图2。图2(a)为输入脉冲的强度的互相关,在低功率时(峰值输入功率为1.5 W),传播接近线性。随着功率的增加,由于非线性效应和色散的相互作用,背景脉冲将被展宽,并且轮廓趋于方形,与此同时,输出脉冲的脉宽变窄。图2(b)~(e)即为功率逐渐增加的情况。当到达300 W的峰值功率时,输出暗脉冲的脉冲宽度和输入脉冲的脉冲宽度本质上是一样的<sup>[9,16]</sup>。

虽然对这些孤立脉冲传输的研究证实了暗脉冲的一些基本特性,但一系列暗脉冲的产生对于其在光通信中的现实应用则是更为重要的。早期的暗脉冲串实验是通过在正常色散的光纤中施加两个在时间上有一定延迟的脉冲,让它们相互碰撞来产生暗脉冲的。

1992年,Rothenberg等<sup>[17]</sup>首次在实验中实现了暗脉冲串的产生。他们用染料激光器产生了一个脉宽2 ps的脉冲,再运用干涉仪将其分离为一对输入脉冲对,最后耦合入100 m长的光纤进行传输。通过改变脉冲对之间的分离率和功率,他们观测到了近正弦调制所带来的类暗孤子结构的变化。使用这种技术得到的暗脉冲很接近期望得到的暗脉冲。1994年,Williams等将研究工作延伸到了获得高重复频率的暗脉冲串(高达60 GHz),并且将这些暗脉冲串传播到了2 km远的距离<sup>[2]</sup>。

1995年,Smith等<sup>[18]</sup>提出了产生暗脉冲的新方法,并申请了国际专利“Dark pulse generation”,其设计方案如图3所示。光脉冲发生器由一个产生暗脉冲的调频锁模激光器组成。激光器包括一个谐振腔和一段

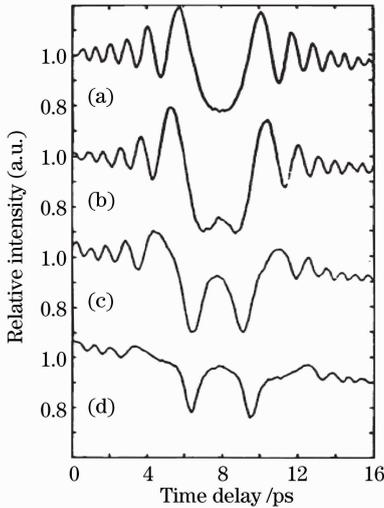


图 1 Krökel 暗脉冲传输实验结果

Fig. 1 Transmission results of Krökel's dark pulse

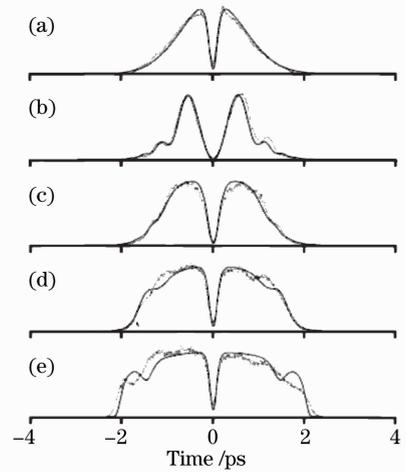


图 2 利用脉冲裁剪技术实现孤立暗脉冲传输

Fig. 2 Single dark soliton propagation using a pulse tailoring technique

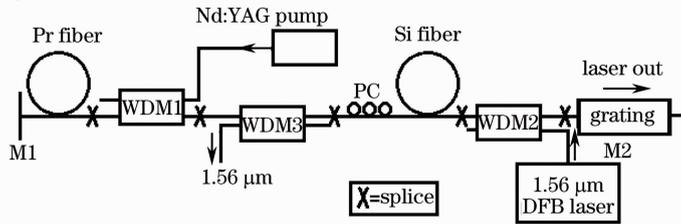


图 3 “Dark pulse generation”原理图

Fig. 3 Schematic of "Dark pulse generation"

掺  $\text{Pr}^{3+}$  氟化物的光纤。激光器的输出由一个相位调制器锁模输出，相位调制器包括在腔中的石英光纤[用来接收从分布反馈(DFB)激光器输出的调制脉冲]，从而改变光纤的折射率和交叉相位调制激光输出。

该方案提出的光脉冲发生器包含一个光源，一个调制器，一个调制信号源，通过相位调制结合光纤的色散效应来产生暗脉冲输出。“Dark pulse generation”通过非线性效应[Kerr 效应，有时被公认为交叉相位调制(XPM)]产生暗脉冲：相位调制会导致石英光纤的折射率改变，从而产生正向相位调制；通过调制脉冲重复频率使之与腔内振荡频率一致来实现锁模。此时，暗脉冲就从激光器中产生了。

同年，Nakazawa 等<sup>[6]</sup>基于一个快速推挽式的铌酸锂光电调制器产生了脉宽 50 ps 的暗脉冲。一个不归零(NRZ)数据和一个计时数据相结合构成了一个“and”通道，这个“and”数据流通过启动型双稳态触发器变成 Q 和  $\bar{Q}$  的输出，用以驱动马赫-曾德尔(MZ)干涉仪。系统结构和实验结果如图 4 所示。该实验证实了暗脉冲串可用于编码以及探测伪随机数据。

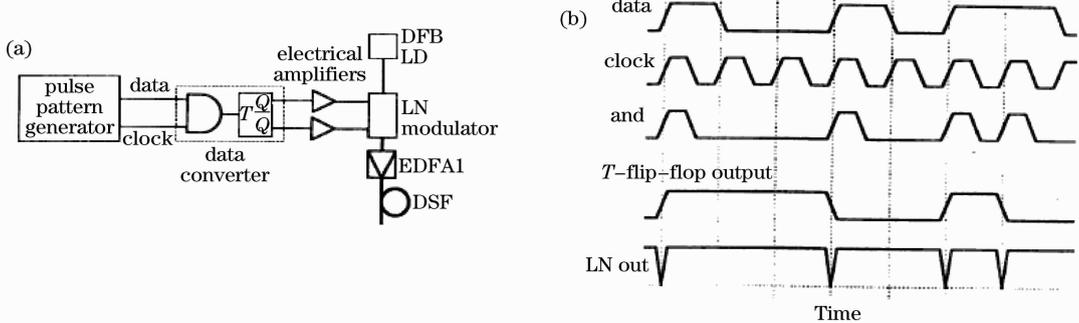


图 4 基于快速推挽式铌酸锂光电调制器产生暗脉冲。(a)系统结构;(b)实验结果

Fig. 4 Dark pulse generation based on a fast lithium niobate (LN) push-pull electro-optic modulator.

(a) Schematic; (b) results

### 2.1.2 通过 FBG 产生暗脉冲

FBG 是一种在光纤通信系统<sup>[19,20]</sup>和光纤激光器<sup>[21,22]</sup>中广泛使用的重要光学元件。在光纤激光器中,FBG 的多功能性使得它能作为特定波长的滤波器和法布里-珀罗(F-P)光纤腔内的宽带反射器。借助 FBG 可以产生暗脉冲激光。

2001 年 4 月,Sylvestre 等<sup>[23]</sup>借助 FBG 实现了耗散四波混频(DFWM)被动锁模,实验产生了重复频率为 80 GHz 的暗脉冲激光输出,其实验原理如图 5 所示。DFWM 技术可使锁模在全反常或全正常腔色散中实现,从而产生相应的亮脉冲或暗脉冲。利用该技术产生的暗脉冲为重复频率极高的脉冲,在未来的高比特率电信应用方面有巨大潜力,因而 DFWM 技术高效且前景光明。DFWM 锁模技术是基于激光器腔内双峰值带通滤波器的出现而得以实现的。激光器重复频率的控制通过选择滤波器两峰值之间的频率分量得以实现。理论研究表明:由于增益色散的存在,有效锁模不需要相位匹配就可实现。调制色散和增益散射的相关量以及腔内功率也能够控制产生的脉冲序列的传号占空比(或称标记占空比)<sup>[24]</sup>。

该实验在环形腔激光器中实现,双峰值带宽滤波器是 DFWM 锁模的关键器件,实验中用一个非线性调频 FBG 通过环形器连接到环形腔中实现。FBG 滤波器设定了激光器的工作波长为 1547 nm 左右,这样色散补偿光纤(DCF)表现出正常色散,即色散  $D = -19.2 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ,因而激光器可以在暗脉冲机制下工作。

然而,该技术的实现方案还存在一定的缺陷:由于光腔并非全由保偏器件构成,激光器受到偏振态不稳定性影响,从而导致脉冲序列只在几秒时间范围内稳定。可以使用更短的腔和全保偏器件来控制这种不稳定性。该设计方案中的激光器的性能可以通过使用满足要求的对称双峰值特性的光纤光栅以及用以解决超模噪声抑制的高精度腔内 F-P 滤波器来进一步提升。

2008 年,Sylvestre 等<sup>[24]</sup>提出一种通过被动锁模在光纤激光器中产生倍增重复频率的脉冲序列的简便技术。该技术通过使用双通道 FBG 和光腔内的 F-P 滤波器,加入更高阶被动锁模而实现。实验产生了重复频率为 60 GHz 的连续暗脉冲序列,是 F-P 自由光谱范围的 4 倍。其原理如图 6 所示。

### 2.1.3 通过干涉相干相消产生暗脉冲

早在 1977 年,Bennett 等<sup>[25]</sup>就提出了利用当时的光束合成技术产生暗脉冲的方案,并申请了专利。该方案通过双光子吸收室,用其中一束锁模光来调制另外一束连续光,产生期望得到的暗脉冲。方案原理如图 7 所示。

当时有很多器件可以接收两路或更多激光输入并进行频率转换或不同频率混合。作为首个借助锁模激光脉冲在双光子吸收室中调制连续激光束产生暗脉冲的方案,它实现暗脉冲输出的器件对于连续光束而言更像是快门,而不是一个混合或转换频率的器件。该方案产生的暗脉冲的脉宽与锁模脉冲的脉宽十分接近,可达到皮秒量级。这样,经过吸收单元通道后,连续波就变成了复制锁模脉冲序列的暗脉冲<sup>[25]</sup>。

2009 年,湖南大学邵宇丰<sup>[26]</sup>提出了一种采用相位调制器和 MZ 干涉仪产生暗脉冲归零(RZ)码的新方

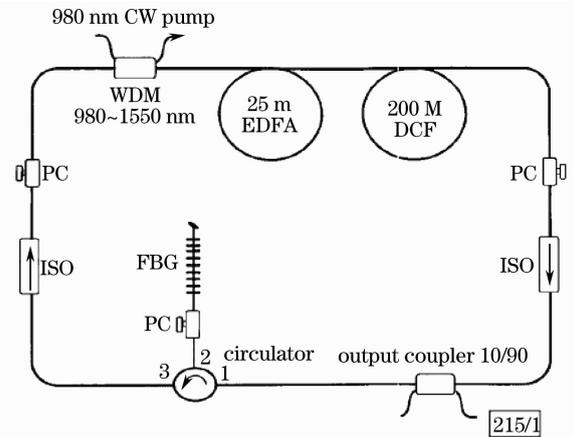


图 5 基于 DFWM 技术借助 FBG 实现暗脉冲激光输出原理图

Fig. 5 Schematic of dark pulse output based on DFWM mode locking by using a non-chirped FBG

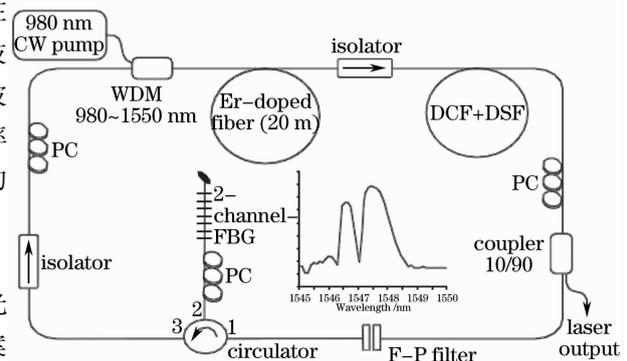


图 6 基于被动锁模借助双通道 FBG 和 F-P 滤波器实现暗脉冲激光输出原理图

Fig. 6 Schematic of dark pulse output based on passive mode locking by using 2-channel FBG and F-P filter

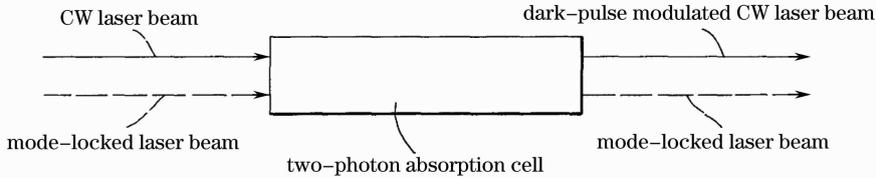


图 7 借助双光子吸收室实现光束合成产生激光暗脉冲方案原理图

Fig. 7 Schematic of dark pulse output based on controlling the absorption in a two-photon cell

案,其原理如图 8 所示。通过对调制和编解码过程的理论分析,证明了该方案产生的暗脉冲归零码信号的占空比和消光比可调。首先用非归零码二进制信号通过相位调制器去调制连续光载波的相位,然后将产生的光信号输入 MZ 干涉仪的一个输入端( $i_1$ ),同时 MZ 干涉仪的另一个输入端( $i_2$ )接光置零信号,在干涉仪输出端( $o_1$ )将产生一路亮脉冲归零码信号,在另一输出端( $o_2$ )将产生一路暗脉冲归零码信号。实验结果表明,该方案产生的暗脉冲归零码信号有较高的频谱效率,可以增加光传输系统的通信容量,而且也适用于长距离通信。

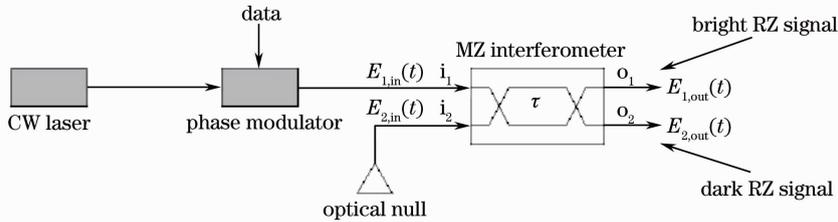


图 8 借助相位调制器和 MZ 干涉仪产生激光暗脉冲方案原理图

Fig. 8 Schematic of dark laser output based on phase modulator and MZ interferometer

## 2.2 激光器直接产生暗脉冲的理论方案

由于暗孤子是连续强度下的一个“下陷”,因此,作为信息的载体较难产生。一般地,暗孤子理论上具有  $\tanh$  函数形式,然而在实验上,暗脉冲背景的宽度却是有限的。这在数学上对应  $\text{sech}$  函数与  $\tanh$  函数的乘积,这样的乘积可以描述具有有限背景宽度的暗脉冲。但这样的方程不是非线性薛定谔方程的解。这样对具有有限背景宽度的暗脉冲的传输问题的研究陷入被动,但如果非均匀光纤中考虑此问题,这种被动情况可能改变。

基于此,2008 年,首次有实验报道从一个带有可饱和吸收器的量子点半导体激光器获得激光暗脉冲;2009 年,暗脉冲光纤激光器成功由一个腔内带有起偏器的色散掺铒光纤放大器制成;2010 年,美国科学家成功研制出可稳定产生暗脉冲的量子点半导体激光器。

### 2.2.1 暗脉冲半导体激光器

2008 年,第一个暗脉冲激光由带可饱和吸收器的量子点半导体激光器产生。这种可产生暗脉冲序列的腔外量子点激光器,由多量子阱可饱和布拉格反射器(SBR)被动控制,其实验原理和时域特性分别如图 9(a),(b)所示。该方案产生的暗脉冲在波长为 1168 nm 时脉宽为 92 ps,暗脉冲的调制深度为 70%<sup>[27]</sup>。

### 2.2.2 暗脉冲锁模光纤激光器

2009 年,暗脉冲光纤激光器成功由一个腔内带有起偏器的色散掺铒光纤(EDF)放大器制成。新加坡南

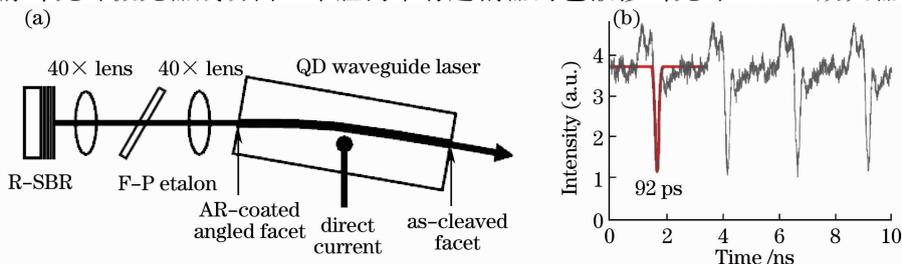


图 9 带有可饱和和反射器的量子点半导体激光器。(a)实验原理;(b)时域特性

Fig. 9 External cavity quantum dot laser with saturable Bragg reflector. (a) Schematic; (b) time domain response

洋理工大学 Zhang 等<sup>[4]</sup>称“首次利用最简单的激光器,没有任何外界调制器、FBG 等,只有增益光纤以及正色散的单模光纤直接输出稳定的暗脉冲”。

该方案通过正常色散和调节非线性偏振旋转以得到反饱和和吸收来产生暗脉冲。图 10 为该方案暗脉冲激光器示意图和暗脉冲状态。通过仔细控制抽运强度和偏振器的方向,输出可减为一个单暗脉冲,分析表明暗脉冲有双曲正切轮廓,其典型脉宽为 8 ps。

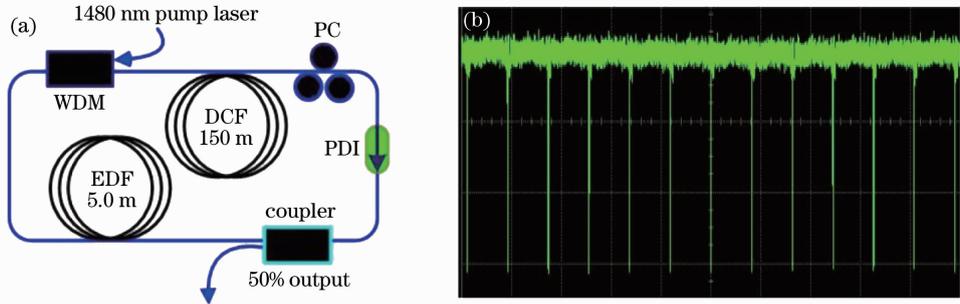


图 10 暗脉冲锁模光纤激光器。(a)方案原理;(b)时域特性

Fig. 10 Mode locked dark pulse fiber laser. (a) Schematic; (b) time domain response

### 2.2.3 基于量子点技术的暗脉冲激光器

美国 NIST 和科罗拉多大学的科学家共同研制出一种新型激光器<sup>[1,5]</sup>,这种基于量子点技术的激光器发射出黑夜般的光脉冲,脉宽仅为 90 ps,有望用于红外通信和测量,并很可能应用于军事领域。暗脉冲在信号处理方面可能很有用,因为与亮脉冲不同,暗脉冲的传输通常没有损耗。这是美国科学家第一次利用这种新技术通过半导体激光器谐振腔直接产生暗脉冲,而没有经过后期的电学和光学整形。在这种新型激光器中,量子点的尺寸都约为 10 nm,从而发出相同频率的光,其稳定性依赖于量子点不同寻常的动力学特征。发出光后,量子点迅速(约在 1 ps 内)恢复能量,但在光腔内的量子点获得的外部能量输入却非常慢(约需 200 ps),这就导致了总体能量增益逐渐低于总体能量损失。最终,激光器达到一个稳定的、重复的、简单的强度降落状态,即从连续抽运光降了大约 70%。总的来说,半导体激光器被认为有很多先进应用,例如基于光频的下一代原子钟,因为大型激光器花费巨大且结构复杂<sup>[1]</sup>。

该方案的实验原理如图 9 所示。当电流超过 110 mA 时可以很清晰地观察到暗脉冲序列。该方案产生的暗脉冲脉宽为 90 ps,其调制深度约为 70%<sup>[5]</sup>。

## 3 暗脉冲的优势与应用

与传统的亮脉冲相比,暗脉冲有更多的优点,主要可概括为“实现相同功能、噪声更低、损耗更小、传输速度更快”。首先,暗脉冲能够实现亮脉冲所能实现的所有功能;其次由于暗孤子对噪声没有亮孤子敏感,因而暗脉冲与亮脉冲相比具有更好的通信特征,可用于降低在长途通信中产生的噪声;第三,暗孤子对光纤损耗也没有亮孤子敏感,当暗脉冲经过光纤时,其强度不会降低或散开,因而可改善光纤通信;此外,暗脉冲在光纤中的传输速度比亮脉冲更快<sup>[1]</sup>。

由于上述众多优势,暗脉冲激光器的可能应用领域如下:

1) 利用暗脉冲的“开”“关”状态可以设计实用的光开关,从而在光纤环路、自动测量、光纤网络远程监控、光路切换、系统监测、实验室研发、动态配置分插复用、光路监控系统、光环路保护切换实验、光纤传感系统、光器件测试与研究等领域有着广泛的应用。

2) 当暗脉冲经过光纤时,其强度不会降低或散开,几乎和产生光脉冲一样,因而暗脉冲可降低在长途通信中所产生的噪声或错误,相对于常见的亮脉冲有着更好的通信特征,可用于改善光纤通信。

3) 对于正常色散,亮脉冲不能像孤子一样传播,并且群速度色散和非线性系数的相互作用会造成传播脉冲光谱和时间上的展宽。对于正常色散下的薛定谔方程,其解为暗脉冲孤子,利用它产生了当时(1988 年)最短的激光脉冲。这将会构成一种基本的光纤光栅脉冲压缩机,在精密测量和信息科学等领域都展现出诱人的前景<sup>[9]</sup>。

## 4 结束语

暗脉冲激光的主要优势是在光波导传输中噪声更小、损耗更少,故其在信号处理方面很有应用前景。暗脉冲可用于改善光纤通信和发展红外通信,降低在长途通信中所产生的噪声或错误,更重要的是其强度不会降低或散开,相对于常见的亮脉冲有着更好的通信特征,可以用于沿海岛屿间的辅助通信、室内通信、近距离遥控、飞机内广播和航天飞机内宇航员间的通信等。暗脉冲是连续光波的骤降形成的,连续波的背景可以提供单束强光梳光线,即在产生一系列暗脉冲的同时也产生了频率梳,这样的频率梳可以提高电磁频谱的光学部分的精度,从而制造出精度更高的原子钟,只要暗脉冲激光器可以做到体积小、结构简单,原子钟就可以得到更广泛的应用<sup>[28]</sup>。暗脉冲作为短脉冲,现已知的最短脉宽为 90 ps,如果得到的脉冲脉宽短至皮秒甚至飞秒量级时,则可以向超短脉冲发展,超短脉冲的光谱可以展得很宽,脉冲强度可以提得较高,应用范围可延伸到精密材料加工、微型机械、多光子荧光显微镜、飞秒化学、太赫兹波的产生和探测等方面<sup>[29]</sup>。现在面临的问题是,现有的暗脉冲产生方案,装置结构过于繁琐,输出暗脉冲不够稳定,很难使其得到广泛应用。虽然现已报道的暗脉冲激光器相对较少,但是暗脉冲优秀的性能值得进一步研究探索。

随着脉冲激光器在社会生产生活各个领域的广泛应用,新型的暗脉冲激光器的应用前景也备受科学界关注。但是,暗脉冲激光器的一些设计方案和相应的物理本质还需要理论方面的进一步提升,产生暗脉冲的理论方案还需要进一步创新,暗脉冲激光器的应用前景还需要通过对暗脉冲与传统亮脉冲相比的优势进行更加深入的探讨和论证来证实。对于在很多方面仍旧充满谜团的暗脉冲激光器而言,诸如此类的有益探索,都将为其进一步发展产生推动作用。

## 参 考 文 献

- 1 John Wallace. Laser from NIST/JILA Directly Produces Picosecond Dark Pulses[EB/OL]. <http://www.laserfocusworld.com/articles/2010/06/laser-from-nist-jila.html>, June 10, 2010
- 2 Yuri S. Kivshar, Barry Luther-Davies. Dark optical solitons: physics and applications[J]. *Phys. Rep.*, 1998, **298**(2-3): 81~197
- 3 D. Krifikel, N. J. Halas, G. Giuliani *et al.*. Dark-pulse propagation in optical fibers[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, **60**(1): 29~32
- 4 H. Zhang, D. Y. Tang, L. M. Zhao *et al.*. Dark pulse emission of a fiber laser[J]. *Phys. Rev. A*, 2009, **80**(4): 045803
- 5 M. Feng, K. L. Silverman, R. P. Mirin *et al.*. Dark pulse quantum dot diode laser[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(13): 13385~13395
- 6 M. Nakazawa, K. Suzuki. Generation of a pseudorandom dark soliton data train and its coherent detection by one-bit-shifting with a Mach-Zehnder interferometer[J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(13): 1084~1085
- 7 D. J. Richardson, R. P. Chamberlin, L. Dong *et al.*. Experimental demonstration of 100 GHz dark soliton generation and propagation using a dispersion decreasing fiber[J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(16): 1326~1327
- 8 O. G. Okhotnikov, F. M. Araujo. Pulse generation through optical switching in phase driven loop mirror[J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(25): 2197~2198
- 9 A. M. Weiner, J. P. Heritage, R. J. Hawkins *et al.*. Experimental observation of the fundamental dark soliton in optical fibers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, **61**(21): 2445~2448
- 10 M. Haelterman, P. Emplit. Optical dark soliton trains generated by passive spectral filtering technique[J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(4): 356~357
- 11 P. Emplit, M. Haelterman, R. Kashyap *et al.*. Fiber Bragg grating for optical dark soliton generation[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(8): 1122~1124
- 12 D. M. Pataca, M. L. Rocha, R. Kashyap *et al.*. Bright and dark pulse generation in an optically mode locked fiber laser at 1.3  $\mu\text{m}$ [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(1): 35~36
- 13 M. Kauer, J. R. A. Cleaver, J. J. Baumberg *et al.*. Femtosecond dynamics in semiconductor lasers: dark pulse formation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(13): 1626~1628
- 14 J. Zimmermann, S. T. Cundiff, G. von Plessen *et al.*. Dark pulse formation in a quantum-dot laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(1): 18~20
- 15 Ph. Emplit, J. P. Hamaide, F. Reynaud *et al.*. Picosecond steps and dark pulses through nonlinear single mode fibers[J]. *Opt. Commun.*, 1987, **62**(6): 374~379

- 16 J. R. Taylor. Optical Solitons Theory and Experiment[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 390~394
- 17 J. E. Rothenberg, H. K. Heinrich. Observation of the formation of dark-soliton trains in optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(4): 261~263
- 18 Kevin Smith, Daniel Pataca, Rocha Monica De Lacerda. Dark Pulse Generation[P]. International Patent WO 96/06471, Feb. 29, 1996
- 19 B. J. Eggleton, J. A. Rogers, P. S. Westbrook *et al.*. Electrically tunable power efficient dispersion compensating fiber Bragg grating[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(7): 854~856
- 20 S. Kim, B. Lee. Recirculating fiber delay-line filter with a fiber Bragg grating [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(23): 5469~5471
- 21 X. Xu, Y. Dai, X. Chen *et al.*. Chirped and phase-sampled fiber Bragg grating for tunable DBR fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(10): 3877~3882
- 22 Y. G. Han, F. Fresi, L. Poti *et al.*. Continuously spacing-tunable multiwavelength semiconductor optical amplifier based fiber ring laser incorporating a superimposed chirped fiber Bragg grating[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(9): 1032~1034
- 23 T. Sylvestre, S. Coen, O. Deparis *et al.*. Demonstration of passive mode locking through dissipative four-wave mixing in fibre laser[J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(14): 881~882
- 24 T. Sylvestre. Pulse repetition rate multiplication in fibre laser using higher-order passive modelocking[J]. *Electron. Lett.*, 2008, **44**(21): 1240~1242
- 25 Robert James Bennett, Daniel Richard Grischkowsky. Laser Modulator for Producing Dark-Pulses[P]. US Patent 4036554, July 19, 1977
- 26 Shao Yufeng. Generation and Transmission of Novel Modulation Formats for High-Speed Optical Communication[D]. Changsha: Hunan University, 2009. 28  
邵宇丰. 高速光通信中新型调制码的产生及传输[D]. 长沙: 湖南大学, 2009. 28
- 27 Mingming Feng, Steven T. Cundiff, Richard P. Mirin *et al.*. Dark Pulse Diode Laser[C]. CLEO, 2008, CThP1
- 28 W. H. Oskay, S. A. Diddams, E. A. Donley *et al.*. Single-atom optical clock with high accuracy[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**(2): 020801
- 29 Heinrich Endert, Almantas Galvanauskas, Gregg Sucha *et al.*. Novel ultrashort pulse fiber lasers for micromachining applications[J]. *RIKEN Review*, 2002, **43**: 23~27