

# 超短脉冲增益开关半导体激光系统研究进展

陈河 陈胜平 侯静 杨丽佳

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要** 由增益开关半导体激光器和相应的注入锁定技术、脉冲压缩与整形技术、脉冲放大技术组成的激光系统可以产生高质量的皮秒级脉冲输出。近些年,相关技术领域新的研究进展使其产生的超短脉冲激光具有更高的输出功率、更窄的脉宽、更高的脉冲质量以及更灵活的可调谐性能,并因而得到更广泛的应用。对几方面技术最新的研究进展做了综述,总结了超短脉冲增益开关半导体激光系统的新应用,为其将来的研究提供参考。

**关键词** 激光器;增益开关;半导体激光器;注入锁定;脉冲压缩;脉冲功率放大

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.110001

## Research Progress on Ultrafast Gain-Switching Laser Diode System

Chen He Chen Shengping Hou Jing Yang Lijia

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

**Abstract** High quality picosecond laser pulse can be generated from gain-switching laser diode system, which is composed of gain-switching laser diode, injection locking technology, pulse compressing and reshaping technology, as well as pulse amplification technology. The recent research progress of gain-switching laser diode system prove that pulse with higher output power, narrower pulse width, higher pulse quality and more flexible tunability can be achieved with the system. As a result, ultrafast gain-switching laser diode system has been used in much more new fields. The research progress in the above technical aspects are reviewed, and the new applications of ultrafast gain-switching laser diode system are introduced briefly. This may offer a reference for the future research in this field.

**Key words** lasers; gain switching semiconductor laser; injection locking; pulse compressing; pulse power amplification

**OCIS codes** 140.5960; 140.7090; 320.5520; 140.4480

## 1 引言

增益开关半导体激光系统是一种产生高质量超短脉冲的简便方法。因其原理简单、重复频率连续可调、结构紧凑、性能可靠等独特优势,增益开关半导体激光系统已被广泛应用于高速光通信网络的搭建和光电采样检测系统等领域<sup>[1,2]</sup>。而且,随着其性能的不断改善,更多领域的应用潜力也逐渐被发掘出来。尤其是近些年,以增益开关半导体激光器(LD)为种子的光纤主振荡功率放大(MOPA)皮秒激光系统取得新的进展,高功率光纤放大器弥补了增益开关半导体激光器功率较低的缺陷,已成功应用于频率转换<sup>[3]</sup>、超连续谱产生<sup>[4]</sup>、光学参量放大<sup>[5]</sup>等领域,并且已成为目前广泛采用的锁模种子方案的有力替代方案。

本文遴选了国内外从1999年到2011年在增益开关半导体激光系统的研究与应用方面代表性的文献,

**收稿日期**: 2012-08-27; **收到修改稿日期**: 2012-09-03; **网络出版日期**: 2012-10-15

**基金项目**: 国家自然科学基金(10904173、61077076)资助课题。

**作者简介**: 陈河(1988—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光及光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: chenhe@gmail.com

**导师简介**: 杨丽佳(1962—),女,教授,硕士生导师,主要从事光纤激光及光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: yanglijia@sina.com

展示了增益开关半导体激光系统的基本原理、最新研究进展、最新应用以及尚待解决的问题,并对进一步的发展做出简单的预期。

## 2 基本原理

增益开关半导体激光器指用电流脉冲或高频正弦电流直接调制的半导体激光器。当注入电流低于阈值时,增益关闭,不发射激光;当注入电流高于阈值时,增益打开,激光器弛豫振荡产生的第一个尖峰通常功率很高而且脉宽很窄。如果使用窄脉宽或者高重复频率电流脉冲,容易得到 10~100 ps 的稳定激光输出。通过进一步的消啁啾和脉冲压缩措施可以实现皮秒到亚皮秒的输出。

如图 1 所示<sup>[6]</sup>,半导体激光器施加经过偏置  $I_0$  的脉冲电流,其中偏置  $I_0$  一般在半导体激光器阈值  $I_{th}$  附近,从而引起激光器内的载流子浓度  $n(t)$  急剧增加达到峰值  $n_i$ ,当载流子浓度超过阈值  $n_t$  时,激光产生,大量消耗载流子, $n(t)$  很快从峰值降到最低点  $n_f$ 。这个过程很快,其间会产生脉宽很窄的激光。

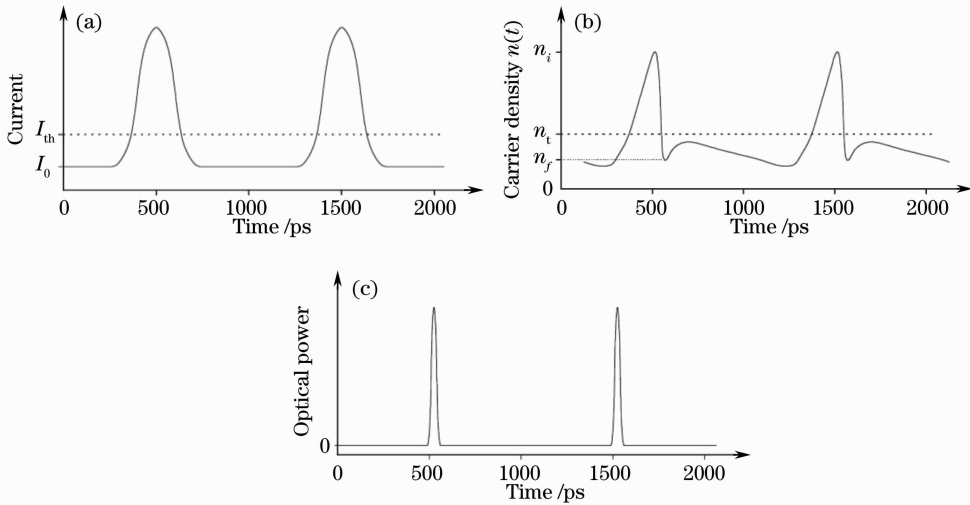


图 1 增益开关过程示意图<sup>[6]</sup>。(a)激光器的激励电流;(b)腔内载流子浓度变化;(c)输出光功率变化

Fig. 1 Process of gain-switching<sup>[6]</sup>. (a) Pump current of the laser; (b) variation of carrier density; (c) variation of output optical power

可以利用一个联系载流子浓度  $n$  和光子数浓度  $S$  的速率方程组来分析增益开关脉冲形成的动态过程<sup>[7]</sup>,表达式如下:

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = \frac{j(t)}{ed} - g_0(n - n_t)S - \frac{n}{\tau_s} \\ \frac{dS}{dt} = \Gamma g_0(n - n_t)S - \frac{S}{\tau_{ph}} + \frac{\beta \Gamma n}{\tau_s} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $n_t$  为载流子浓度阈值, $g_0$  为微分增益系数, $\beta$  为自发辐射因子, $e$  为电子电荷, $d$  为有源层厚度, $j(t)$  为注入电流密度, $\Gamma$  为光场限制因子, $\tau_s$  和  $\tau_{ph}$  分别为载流子和光子寿命。(1) 式是一个单模速率方程组,它没有考虑光子密度在腔内各个模式的分配情况,不过由(1) 式很容易得到多模速率方程组。对于各种产生超短光脉冲的技术,比如增益开关、Q 开关以及锁模等,(1)式都是适用的。

一般来讲,一个完整的增益开关半导体激光系统可能包括 5 个部分,如图 2 所示。1) 驱动电路,产生一定频率的脉冲或正弦信号,用来调制半导体,产生增益开关效应,信号的幅值、直流偏置、调制深度直接影响着输出的光信号;2) 半导体激光器,其类型、参数、结构和封装等因素对增益开关的发生和脉冲质量有直接影响;3) 注入锁定部分,有自注入、外注入、互注入等方式,注入锁定可以起到稳定运行波长、减小脉冲时域抖动和提高边模

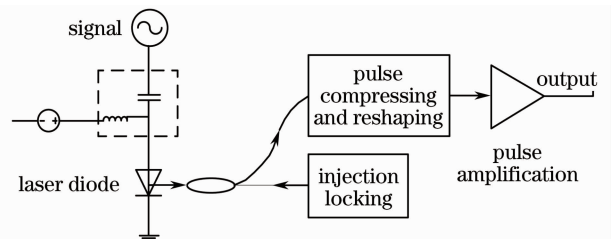


图 2 增益开关半导体激光系统结构示意图

Fig. 2 Structure of gain-switching laser diode system

抑制比等作用;4) 脉冲压缩及整形部分。事实上,激光器直接产生的脉冲宽度是比较宽的,而且脉冲产生过程中引入的啁啾会导致波形不对称,此外输出脉冲还会伴有较大的基底和二次脉冲,而脉冲压缩及整形部分可以解决这些问题;5) 功率放大部分,用来将直接输出的低功率脉冲进行功率放大,增强实用性,比较典型的方案是采用成熟的光纤主振荡功率放大(FMOPA)技术来实现。

### 3 最新研究进展及应用

近些年,对增益开关半导体激光系统的研究主要集中在5个方面:1) 通过改进激光器结构和调制方式来实现更高输出功率和更好的频率响应特性,以及对增益开关半导体激光器输出脉冲的特性测量方法的研究;2) 对增益开关半导体激光器的注入锁定及波长调谐,包括自注入、外注入、互注入等技术;3) 对增益开关半导体激光器输出脉冲的消啁啾脉冲压缩;4) 对其输出脉冲进行放大,进而应用于非线性光学领域;5) 超短脉冲增益开关半导体激光系统的新应用。同时,对新型量子阱半导体激光器、量子点半导体激光器以及垂直腔面发射结构半导体激光器等相关研究比较热门。

#### 3.1 增益开关半导体激光产生及特性测量

1.3  $\mu\text{m}$  和 1.5  $\mu\text{m}$  通信波段的增益开关半导体激光器在20世纪80、90年代开始被广泛研究,尤其是分布反馈(DFB)和法布里-珀罗(FP)结构半导体激光器的增益开关特性在理论和实验上都有了比较成熟的研究结果。近年一些新的或改进的结构和驱动方式被用于半导体激光器的增益开关运转来产生超短脉冲,得到了新的实验结果。

在边发射结构的半导体激光器方面,Tarakanov等<sup>[8]</sup>在2004年提出一种可以实现内增益调制的半导体激光器结构,来实现高功率皮秒脉冲产生,但未见实验报道。2008年,Kono等<sup>[9]</sup>让一个405 nm的单模GaInN蓝光激光二极管运行在高强度的增益开关模式下,产生峰值功率高达12 W,脉冲宽度10 ps的脉冲输出,是目前单横模GaInN激光二极管产生的最高峰值功率。2009年,Oki等<sup>[10]</sup>使用含有饱和吸收层的AlGaInN自脉冲增益开关半导体激光器产生峰值功率10 W,脉宽20 ps,波长410 nm的脉冲激光。同年,Anandarajah等<sup>[11]</sup>使用离散模半导体激光器增益开关产生脉冲抖动仅800 fs,边模抑制比高达60 dB,波长1.55  $\mu\text{m}$ 的脉冲输出,远高于同等条件下的商业DFB半导体激光器。

同时,垂直腔面发射激光器(VCSEL)由于其固有的低阈值、高带宽、单模运转以及和光纤耦合容易等优势近些年也被用于在增益开关模式下产生超短脉冲。比如,2007年,Nakazawa等<sup>[12]</sup>用10 GHz的正弦信号驱动AlGaAs VCSEL,产生重复频率10 GHz,脉宽8.7 ps,波长850 nm,平均功率约3.4 mW的单模脉冲输出;2009年,Koizumi等<sup>[13]</sup>使用基于InGaAs的VCSEL产生重复频率10 GHz,脉宽11.5 ps,波长1.1  $\mu\text{m}$ ,平均功率最高0.8 mW的脉冲输出;2010年,Consoli等<sup>[14]</sup>使用一个商业VCSEL产生了波长1.55  $\mu\text{m}$ 重复频率1~3 GHz,脉宽55 ps,平均功率最高约3.8 mW,脉冲时间带宽积0.91~2.20的脉冲输出。

此外,一些新的测量方法被用于增益开关半导体激光器输出特性的研究,更准确更详尽的特性参数通过更好的方法得出,被用于改进理论和指导后续的脉冲质量改善实验。

2003年,Wada等<sup>[15]</sup>对增益开关FP腔半导体激光器(FP-LD)的相干特性进行了研究,得到常见商业增益开关FP-LD的相干长度在平均功率1~15 mW条件下为120~140  $\mu\text{m}$ 的结论。2006年,Chin等<sup>[16]</sup>使用干涉性双光子吸收自相关仪对增益开关脉冲激光的啁啾特性进行测量,并根据测量结果对其啁啾进行色散补偿。2008年,Vu等<sup>[17]</sup>利用基于电光调制的频率分辨光学开关法(FROG)对低功率1.06  $\mu\text{m}$ 的增益开关FP-LD的脉冲特性,尤其是啁啾特性,进行了全面测量,并根据结果设计了用于啁啾补偿的啁啾布拉格光栅,其实验装置结构图如图3所示。2010年,Wada等<sup>[18]</sup>提出一种方法,可以仅仅根据增益开关半导体激光器输出脉冲的二次谐波功率谱来推算出输出脉冲的时域频域特性,包括波形和啁啾特性,与实验测量的结果吻合较好。2011年,Consoli等<sup>[19]</sup>提出一种“光学超快微分相位重建法”并用它测量了增益开关半导体激光器输出脉冲的时域啁啾特性,其实验装置结构图如图4所示。

#### 3.2 增益开关半导体激光器的注入锁定和波长调谐

对增益开关半导体激光器进行注入锁定,包括外光注入、自注入、互注入等,可以起到提高边模抑制比(SMSR)、降低脉冲抖动、调谐激光波长等作用,对高速光通信方面的应用很重要。对增益开关半导体激光

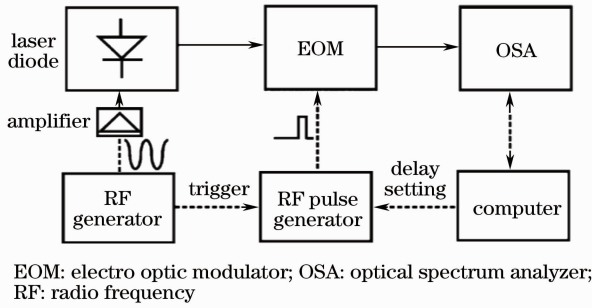


图 3 基于电光调制的频率分辨光学开关法增益开关 FP-LD 的啁啾特性测量<sup>[17]</sup>

Fig. 3 Chirp characteristics measurement of gain-switching FP-LD using electrooptic modulation-based linear FROG<sup>[17]</sup>

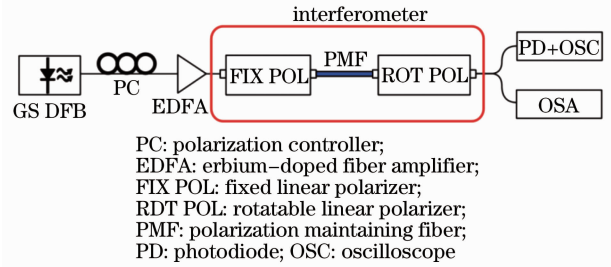


图 4 光学超快微分相位重建法的增益开关半导体激光器啁啾特性测量方案<sup>[19]</sup>

Fig. 4 Chirp measurement of gain-switching (GS) semiconductor laser using a polarization based optical differentiator<sup>[19]</sup>

器进行注入锁定的相关研究最早始于 20 世纪 80 年代,近些年通过结构的改进,拥有更高的 SMSR 和更低的脉冲抖动以及多波长运转、波长可调谐等特性的增益开关半导体激光器相继实现,不断满足日益提升的高速光通信网络的需求。

2002 年,Zhang 等<sup>[20]</sup>使用两个光纤布拉格光栅(FBG)和一个种子 FP-LD 对皮秒增益开关 FP-LD 进行注入锁定,得到可调谐的双波长皮秒激光输出。

2003 年,太原理工大学王云才<sup>[21]</sup>采用增益开关半导体激光器作为注入种子光源来降低增益开关 DFB 和 FP 半导体激光器的脉冲抖动,增益开关 FP-LD 脉冲抖动由 1~2 ps 降低至 830 fs,增益开关 DFB-LD 脉冲抖动由 12 ps 降低至 1~8 ps。

同年,Maguire 等<sup>[22]</sup>使用两个 FP-LD 利用互注入技术实现 SMSR(50 dB 以上)波长可调谐的增益开关皮秒激光输出。

2004 年,Peng 等<sup>[23]</sup>使用掺铒光纤放大器(EDFA)同时作为外部注入光源和光放大器,结合可调谐滤波器,得到了 SMSR(32 dB 以上)的可调谐皮秒激光输出。

同年,Clarke 等<sup>[24]</sup>通过外部光注入包含两个 FP-LD 的增益开关光源以及可调谐 FBG,得到超过 60 dB 的 SMSR 和 65 nm 的波长调谐范围。

2007 年,Vu 等<sup>[25]</sup>对自注入和外光注入两种注入锁定技术下增益开关半导体激光器的输出特性进行了比较,得到效果相近的结论。

### 3.3 增益开关半导体激光器输出脉冲的消啁啾脉冲压缩

增益开关半导体激光器产生的脉冲一般较宽,并且频域上有较大的基底,时域上伴有弛豫振荡产生的二

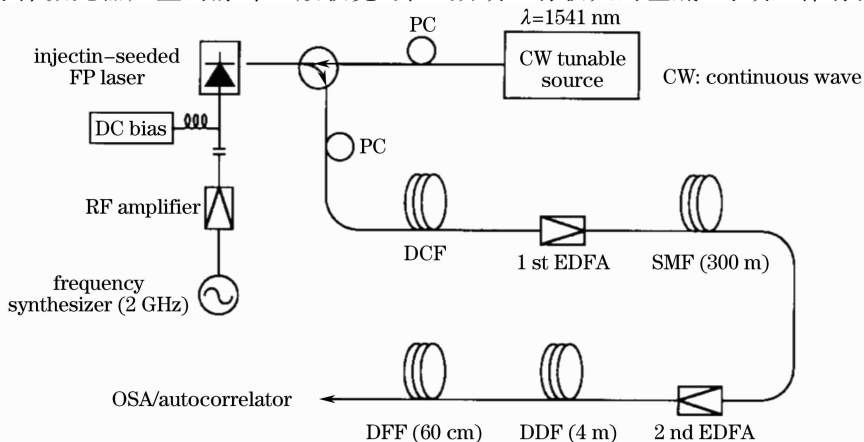


图 5 四级压缩方案实验结构图<sup>[26]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of the four-stage compressing technique<sup>[26]</sup>

次脉冲。由于增益开关过程中腔内光子密度的剧烈起伏,脉冲常伴有较大的频率啁啾。通过采用啁啾补偿、脉冲压缩等技术,可以使增益开关半导体激光器满足光通信系统对短脉冲光源的要求。

1999年,Matsui等<sup>[26]</sup>根据光纤非线性效应机理,使用由色散平坦光纤(DFP)、色散渐减光纤(DDF)、色散补偿光纤(DCF)和单模光纤(SMF)组成的四级孤子压缩技术将脉宽10 ps的可调谐增益开关1.3  $\mu\text{m}$  DFB半导体激光脉冲压缩到20 fs左右,其实验装置结构图如图5所示。

2005年,Sato等<sup>[27]</sup>使用级联数个不同延时差的光纤耦合器的方案对增益开关皮秒脉冲进行消啁啾。

2006年,Anandarajah等<sup>[28]</sup>使用外光注入和非线性啁啾光栅得到脉宽3.5 ps、时间带宽积0.45接近傅里叶变换极限的脉冲输出。

2008年,Wada等<sup>[29]</sup>使用光纤Sagnac干涉仪实现了对多模增益开关半导体激光器输出皮秒脉冲的余峰消除和脉宽压缩,将脉宽33 ps有较大拖尾的脉冲压缩到20 ps并明显减小脉冲拖尾。

2010年,Lamela等<sup>[30]</sup>使用基于光子晶体光纤(PCF)和非线性半导体光放大器(SOA)的非线性光纤环形镜从时域、频域两方面改善了增益开关半导体激光的脉冲质量,其实验装置结构图如图6所示。

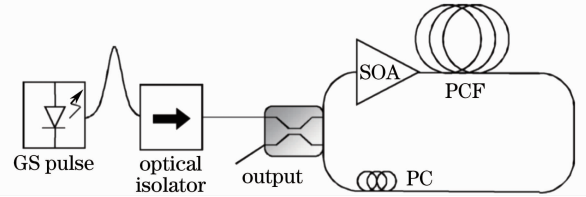


图6 非线性光纤环形镜压缩方案<sup>[30]</sup>

Fig. 6 Schematic diagram of the highly nonlinear optical loop mirror for pulse compressing<sup>[30]</sup>

### 3.4 增益开关半导体激光器输出脉冲的放大

近年来,得益于大模场面积双包层光纤和先进抽运技术的应用,高功率连续(CW)光纤激光器发展迅猛,目前已经达到单根万瓦级单模输出<sup>[31]</sup>,然而飞秒、皮秒量级的超短脉冲激光器的平均功率还远远落后,仅在千瓦量级<sup>[31]</sup>,而且需要复杂的放大系统,很难做到全光纤化。其中的主要限制因素就是放大过程中高功率所带来的严重的非线性效应,如自相位调制、各类非弹性散射等。虽然很多致力于减弱非线性效应的措施被用来提高超短脉冲的峰值功率,而且取得了一定的效果,但这些措施作用是有限的,而且增加了系统的复杂性和成本,同时也不利于激光器的全光纤化发展。要得到高功率超快激光输出,更直接的方法就是,在保持一定水平的峰值功率的同时,提高脉冲的重复频率。而对于利用调Q和被动锁模产生超短脉冲的一般方法,重复频率一般只能达到数百兆赫兹量级,要产生重复频率吉赫兹量级的超短脉冲,需要采用一些特殊的锁模技术,如主动谐波锁模技术和重复频率倍增技术。而且对于谐振腔结构的锁模技术,重复频率一般与腔长直接相关,限制了重复频率的可调谐能力。相比而言,增益开关技术是产生高重复频率、可变重复频率皮秒脉冲的更简单更稳定的方法,具有结构紧凑、成本低、稳定性高、重复频率连续可调等优势。

2006年,Dupriez等<sup>[32]</sup>首次将重复频率1 GHz,波长1.06  $\mu\text{m}$ 的增益开关皮秒激光放大到300 W量级。系统中使用了外光注入和啁啾光纤布拉格光栅(CFBG)来选模和压缩脉冲,其实验装置结构图如图7所示。

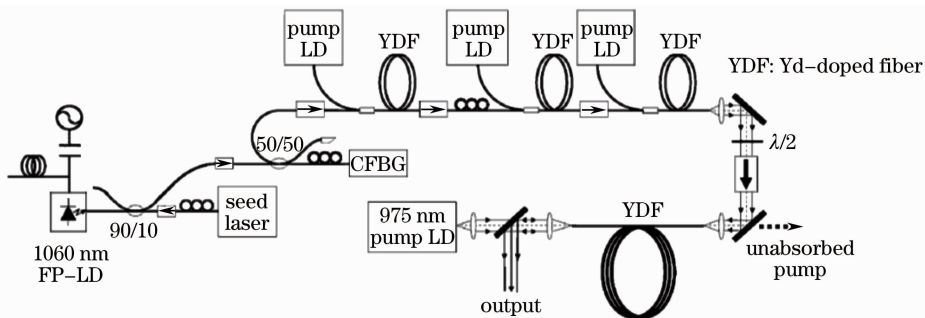


图7 文献[32]的脉冲放大实验结构图

Fig. 7 Schematic diagram of pulse amplification experimental setup in Ref. [32]

2010年,Chen等<sup>[33]</sup>使用以1060 nm增益开关FP-LD为种子的掺镱光纤(YDF)MOPA方案,产生重复频率和脉宽(1~21 ps)可调谐,平均功率最高100 W,脉冲能量可达1.7  $\mu\text{J}$ 的偏振脉冲激光输出,其实验装置结构图如图8所示。

同年,中国科学院西安光学精密机械研究所Liu等<sup>[34]</sup>将商业增益开关半导体激光放大产生重复频率

1 MHz, 平均功率 10 W, 脉宽 150 ps 的可调谐脉冲输出, 其实验装置结构图如图 9 所示。

2011 年, Kanzelmeyer 等<sup>[35]</sup> 将一个重复频率 1 MHz, 波长 1040 nm 的商业增益开关半导体激光器用全光纤设备放大, 产生脉宽 40 ps, 峰值功率达 270 kW 的脉冲输出, 并通过声光调制器研究了放大过程中被放大的自发辐射光, 其实验装置结构图如图 10 所示。

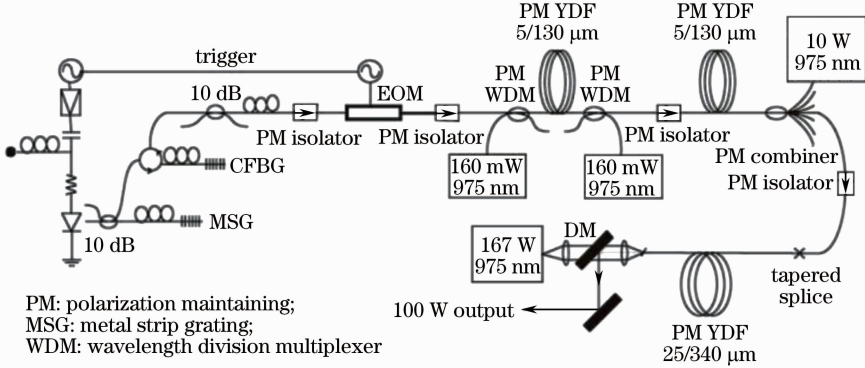


图 8 文献[33]的脉冲放大实验结构图

Fig. 8 Schematic diagram of pulse amplification experimental setup in Ref. [33]

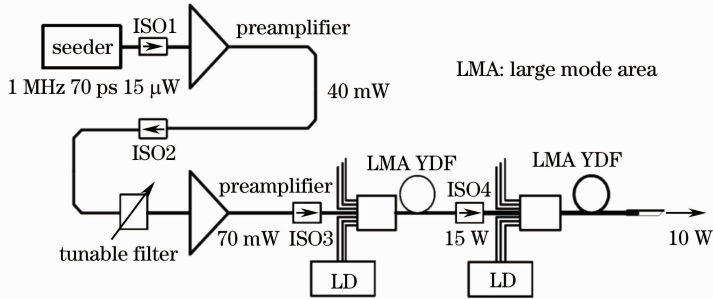


图 9 文献[34]的脉冲放大实验结构图

Fig. 9 Schematic diagram of pulse amplification experimental setup in Ref. [34]

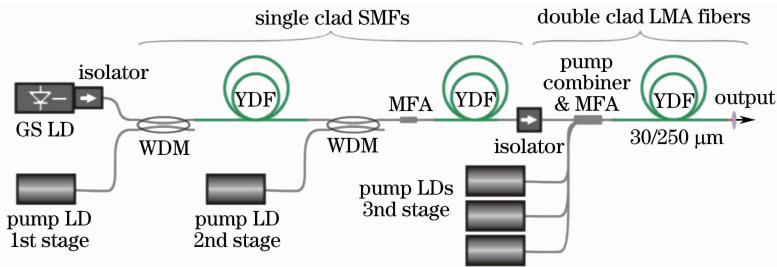


图 10 文献[35]的脉冲放大实验结构图

Fig. 10 Schematic diagram of pulse amplification experimental setup in Ref. [35]

### 3.5 超短脉冲增益开关半导体激光系统新应用

由于增益开关半导体激光系统的性能不断改善, 在传统的通信领域之外, 近年来很多应用都因为其简单稳定、可调谐性强的特性而使用了该系统。如频率转换、抽运光学参量振荡器、通过光子晶体光纤产生超连续谱等。

2002 年, Chae 等<sup>[36]</sup> 提出一种简单稳定的在频域测量单模光纤色散的方法, 其中所用的光源就是一台多波长皮秒增益开关 FP-LD。

2005 年, Bookey 等<sup>[37]</sup> 研究了一个运行于 1548 nm 和 1549 nm, 重复频率 1 GHz 的双波长增益开关 FP-LD 的输出特性, 并将其用于抽运探针的光源。

2006 年, Yokoyama 等<sup>[38]</sup> 使用 1.55 μm 的增益开关半导体激光放大倍频产生 0.77 μm, 峰值功率 1.5 kW, 脉宽 5 ps 的脉冲激光输出, 并成功用于双光子生物成像。

2007年,Andachi等<sup>[39]</sup>将两个可调谐增益开关半导体激光器用于光纤光腔振荡光谱技术,用来实现高精度气体浓度检测,收到了很好的效果。

2010年,Sato等<sup>[40]</sup>将一个1550 nm增益开关半导体激光器输出的皮秒激光经过光纤放大后再经过四倍频得到了峰值功率近千瓦,脉宽6 ps,波长390 nm的紫外脉冲光输出。

同年,Kienle等<sup>[41]</sup>用一个光纤放大的增益开关半导体激光器产生的皮秒脉冲抽运光学参量振荡器,产生重复频率114.8~918.4 MHz,1.54  $\mu\text{m}$ 波长平均功率7.3 W,3.4  $\mu\text{m}$ 波长平均功率3.1 W的输出。

同年,Chen等<sup>[42]</sup>使用一个以增益开关半导体激光器为种子源的光纤MOPA系统产生峰值功率40 kW,脉宽21 ps的脉冲输出,并将脉冲激光打入高非线性光子晶体光纤,产生了功率39 W,谱宽1850 nm的可见光超连续谱。

2011年,Zhou等<sup>[43]</sup>基于一个外注入的增益开关FP-LD实现可调谐范围40 nm的光学频率梳,包含8个独立的10 GHz相干边带,并且每个梳齿的线宽都小于100 kHz,方案简单可行。

## 4 结束语

事实上,增益开关半导体激光器产生超短脉冲作为一种存在已久的简单技术,它的一些固有缺陷一直限制着其性能和更广泛的应用。比如较强的啁啾、抖动和较差的频谱分布,以及功率输出较低。然而,随着近些年相关的消啁啾、注入锁定和放大技术的发展,这些技术与增益开关半导体激光器组成的脉冲激光系统的性能不断提升,使它固有的结构紧凑、性能可靠等优势日益凸显,已经开始被广泛应用于科研和工程的很多新领域,尤其是与高功率光纤放大器结合的高功率脉冲光源有广泛的应用前景。

同时,当前的相关研究还大多集中于1.3  $\mu\text{m}$ 和1.5  $\mu\text{m}$ 的通信波段,中远红外和可见光波段的相关研究较少,对一些新结构半导体激光器的增益开关特性的研究也不是很深入,一些应用领域对增益开关半导体脉冲激光的质量还有更高的要求。超短脉冲增益开关半导体脉冲激光系统的发展还有很大空间。

## 参 考 文 献

- 1 L. Pancheri, D. Stoppa. A low-cost picosecond laser module for time-resolved optical sensing applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, **11**(6): 1380~1381
- 2 A. Kaszubowska-Anandarajah, L. P. Barry. UWB system based on gain-switched laser[C]. 2006 International Topical Meeting on Microwaves Photonics, 2006. 163~166
- 3 K. K. Chen, S. Alam, J. R. Hayes. 56-W frequency-doubled source at 530 nm pumped by a single-mode, single-polarization, picosecond, Yb-doped fiber MOPA[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(12): 1613~1616
- 4 K. K. Chen, S. Alam, J. H. V. Price *et al.*. Picosecond fiber MOPA pumped supercontinuum source with 39 W output power[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(6): 5426~5432
- 5 F. Kienle, K. K. Chen, A. Shaif-Ul *et al.*. High-power, variable repetition rate, picosecond optical parametric oscillator pumped by an amplified gain-switched diode[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(8): 7602~7610
- 6 P. P. V. Ev, I. H. White, J. Gowar. Fast phenomena in semiconductor lasers[J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2000, **63**(12): 1997~2042
- 7 K. Y. Lau. Gain switching of semiconductor injection lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **52**(4): 257~259
- 8 Y. A. Tarakanov, D. S. Ilyushenkov, V. M. Chistyakov *et al.*. Picosecond pulse generation by internal gain switching in laser diodes[J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **95**(5): 2223~2229
- 9 S. Kono, T. Oki, T. Miyajima *et al.*. 12 W peak-power 10 ps duration optical pulse generation by gain switching of a single-transverse-mode GaInN blue laser diode[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(13): 131113
- 10 T. Oki, S. Kono, M. Kuramoto *et al.*. Generation of over 10-W peak-power picosecond pulses by a gain-switched AlGaInN-based self-pulsating laser diode[J]. *Appl. Phys. Express*, 2009, **2**(3): 1633~1636
- 11 P. M. Anandarajah, L. P. Barry, A. Kaszubowska *et al.*. Highly coherent picosecond pulse generation with sub-ps jitter and high SMSR by gain switching discrete mode laser diodes at 10 GHz line rate[C]. 2009 Conference on Optical Fiber Communication, 2009. 2562~2564
- 12 M. Nakazawa, H. Hasegawa, Y. Oikawa. 10-GHz 8, 7-ps pulse generation from a single-mode gain-switched AlGaAs VCSEL at 850 nm[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(13-16): 1251~1253

- 13 K. Koizumi, M. Yoshida, M. Nakazawa. 10-GHz 11.5-ps pulse generation from a single-mode gain-switched InGaAs VCSEL at 1.1  $\mu\text{m}$ [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(22): 1704~1706
- 14 A. Consoli, I. Esquivias, F. J. L. Hernandez *et al.*. Characterization of gain-switched pulses from 1.55- $\mu\text{m}$  VCSEL[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(11): 772~774
- 15 K. Wada, K. Hirata, M. Yoshida *et al.*. A gain-switched laser diode as a low-coherence light source[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **228**(1-3): 49~54
- 16 S. H. Chin, Y. J. Kim, H. S. Song *et al.*. Complete chirp analysis of a gain-switched pulse using an interferometric two-photon absorption autocorrelation[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(29): 7718~7722
- 17 K. T. Vu, A. Malinowski, M. A. F. Roelens *et al.*. Full characterization of low-power picosecond pulses from a gain-switched diode laser using electrooptic modulation-based linear FROG[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(5-8): 505~507
- 18 K. Wada, T. Matsuyama, D. Noritake *et al.*. Numerical investigation of method of reconstructing gain-switched picosecond pulses from laser diodes without autocorrelation measurements[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2010, **49**(3): 163~166
- 19 A. Consoli, J. M. G. Tijero, I. Esquivias. Time resolved chirp measurements of gain switched semiconductor laser using a polarization based optical differentiator[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(11): 10805~10812
- 20 M. Zhang, D. N. Wang, H. Li *et al.*. Tunable dual-wavelength picosecond pulse generation by the use of two Fabry-Perot laser diodes in an external injection seeding scheme[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(1): 92~94
- 21 Wang Yuncai. Experimental study on the timing jitter of gain-switched laser diodes with photon injection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(9): 2190~2193  
王云才. 增益开关半导体激光器在外光注入下脉冲抖动的实验研究[J]. *物理学报*, 2003, **52**(9): 2190~2193
- 22 P. J. Maguire, P. Anandarajah, L. P. Barry *et al.*. Generation of wavelength tunable optical pulses with SMSR exceeding 50 dB by self-seeding a gain-switched source containing two FP lasers[C]. LEOS, 2003. 471~472
- 23 P. C. Peng, W. R. Peng, J. H. Lin *et al.*. Generation of wavelength-tunable optical pulses using EDFA as external-injection light source and amplifier for Fabry-Perot laser diode[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(11): 2553~2555
- 24 A. M. Clarke, P. M. Anandarajah, L. P. Barry. Generation of widely tunable picosecond pulses with large SMSR by externally injecting a gain-switched dual laser source[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(10): 2344~2346
- 25 K. T. Vu, A. Malinowski, M. F. Roelens *et al.*. Detailed comparison of injection-seeded and self-seeded performance of a gain-switched laser diode[C]. CLEO/QELS, 2007. 2322~2323
- 26 Y. Matsui, M. D. Pelusi, A. Suzuki. Generation of 20-fs optical pulses from a gain-switched laser diode by a four-stage soliton compression technique[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(10): 1217~1219
- 27 H. Sato, H. Yoshioka, K. Wada *et al.*. Pulse compression of chirped-pulse from gain-switched laser diode using cascade-connected fiber couplers[C]. CLEO, 2005. 1063~1066
- 28 P. M. Anandarajah, C. Guignard, A. Clarke *et al.*. Optimized pulse source employing an externally injected gain-switched laser diode in conjunction with a nonlinearly chirped grating[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2006, **12**(2): 255~264
- 29 K. Wada, S. Takamatsu, H. Watanabe *et al.*. Pulse-shaping of gain-switched pulse from multimode laser diode using fiber Sagnac interferometer[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(24): 19872~19881
- 30 H. Lamela, C. de Dios. Experimental investigation on the quality improvement of low-power gain-switching diode laser picosecond pulses using a compact highly nonlinear optical loop mirror[J]. *Opt. Engng.*, 2010, **49**(5): 055004
- 31 M. E. Fermann, I. Hartl. Ultrafast fiber laser technology[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(1): 191~206
- 32 P. Dupriez, A. Piper, A. Malinowski *et al.*. High average power, high repetition rate, picosecond pulsed fiber master oscillator power amplifier source seeded by a gain-switched laser diode at 1060 nm[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(9-12): 1013~1015
- 33 K. K. Chen, J. H. V. Price, S. U. Alam *et al.*. Polarisation maintaining 100 W Yb-fiber MOPA producing  $\mu\text{J}$  pulses tunable in duration from 1 to 21 ps[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(14): 14385~14394
- 34 H. Liu, C. Gao, J. Tao *et al.*. Compact tunable 10 W picosecond source based on Yb-doped fiber amplification of gain switch laser diode[C]. Proc. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2010. 379~382
- 35 S. Kanzelmeyer, H. Sayinc, T. Theeg *et al.*. All-fiber based amplification of 40 ps pulses from a gain-switched laser diode



- [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(3): 1854~1859
- 36 J. H. Chae, Y. T. Lee. A novel chromatic dispersion measurement method in frequency domain using a multi-wavelength optical pulse train generated by Fabry-Perot laser diode[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **206**(1-3): 1~6
- 37 H. T. G. Bookey, A. K. Kar. Characterisation and optimisation of a dual-channel picosecond gain-switched DFB laser system for use as a pump-probe source[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **248**(1-3): 229~239
- 38 H. Yokoyama, H. C. Guo, T. Yoda *et al.*. Two-photon bioimaging with picosecond optical pulses from a semiconductor laser[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(8): 3467~3471
- 39 M. Andachi, T. Nakayama, M. Kawasaki *et al.*. Fiber-optic ring-down spectroscopy using a tunable picosecond gain-switched diode laser[J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **88**(1): 131~135
- 40 A. Sato, S. Kono, K. Saito *et al.*. A high-peak-power UV picosecond-pulse light source based on a gain-switched 1.55  $\mu\text{m}$  laser diode and its application to time-resolved spectroscopy of blue-violet materials[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(3): 2522~2527
- 41 F. Kienle, K. K. Chen, S. U. Alam *et al.*. A picosecond optical parametric oscillator synchronously pumped by an amplified gain-switched laser diode[C]. CLEO/QELS, 2010, CThZ7
- 42 K. K. Chen, S. Alam, J. H. V. Price *et al.*. Picosecond fiber MOPA pumped supercontinuum source with 39 W output power[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(6): 475~481
- 43 R. Zhou, S. Latkowski, J. O. Carroll *et al.*. 40 nm wavelength tunable gain-switched optical comb source[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(26): B415~B420