

# 半导体锁模激光器的最新研究进展

王火雷<sup>1</sup> 孔亮<sup>2</sup> 潘教青<sup>1</sup> 徐天鸿<sup>4</sup> 计伟<sup>3</sup> 倪海桥<sup>1</sup> 崔碧峰<sup>3</sup> 丁颖<sup>2,5\*</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院半导体研究所, 北京 100083; <sup>2</sup> 邓迪大学工程物理和数学学院, 英国邓迪 DD1 4HN

<sup>3</sup> 北京工业大学, 光电子技术省部共建教育部重点实验室, 北京 100124

<sup>4</sup> 都灵理工大学电子与通信系, 意大利都灵 10129; <sup>5</sup> 集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100083

**摘要** 超短脉冲激光源在光纤通信、生物医学成像等方面具有重要的应用前景。半导体锁模激光器具有体积小、重量轻、效率高、价格便宜等一系列优点。因此半导体锁模激光器成为超短脉冲激光源的理想选择。通过对400 nm~2 μm范围各个波段半导体锁模激光器的最新研究报道进行分析和总结, 全面介绍了半导体锁模激光器的研究进展。

**关键词** 激光器; 半导体; 模式锁定; 超短脉冲

**中图分类号** TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.050001

## Recent Progress of Semiconductor Mode-Locked Lasers

Wang Huolei<sup>1</sup> Kong Liang<sup>2</sup> Pan Jiaoqing<sup>1</sup> Xu Tianhong<sup>4</sup> Ji Wei<sup>3</sup> Ni Haiqiao<sup>1</sup>  
Cui Bifeng<sup>3</sup> Ding Ying<sup>2,5</sup>

<sup>1</sup> Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

<sup>2</sup> School of Engineering, Physics and Mathematics, University of Dundee, Dundee DD1 4HN, UK

<sup>3</sup> Key Laboratory of Opto-Electronics Technology, Ministry of Education,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

<sup>4</sup> Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni, Politecnico di Torino, Turin 10129, Italy

<sup>5</sup> State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Beijing 100083, China

**Abstract** Ultrashort-pulse lasers are attractive sources for a number of applications including optical fiber communication and biomedical imaging etc. Semiconductor mode-locked lasers are excellent candidates for ultrashort pulse generation due to their advantages in compactness, weight, energy efficiency and cost. We give a comprehensive introduction to the latest progress of semiconductor mode-locked lasers based on an overall review of recent research reports for the semiconductor mode-locked lasers operating at the wavelength range from 400 nm to 2 μm.

**Key words** lasers; semiconductor; mode-locking; ultrashort pulse

**OCIS codes** 140.4050; 140.5960; 140.7090

## 1 引言

超短脉冲源可广泛用于高速取样<sup>[1]</sup>、模数转换<sup>[2]</sup>、微波和毫米波测量<sup>[3]</sup>、光纤通信以及生物成像<sup>[4]</sup>等领域。近年来超短光脉冲源也成为热门的研究对象, 比如皮秒脉冲源已经被设计成时钟分布<sup>[5]</sup>、光纤无线电设备<sup>[6]</sup>、超高速逻辑分析仪<sup>[7]</sup>、高速时钟捕获<sup>[8]</sup>、超快信号处理和光时分复用的传送设备。高强度超短脉冲源的非线性光学效应也被用于环境科学等研究领域。

**收稿日期**: 2012-12-02; **收到修改稿日期**: 2013-01-25; **网络出版日期**: 2013-05-06

**基金项目**: 集成光电子学国家重点联合实验室开放课题(2011KFB002)资助课题。

**作者简介**: 王火雷(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事半导体锁模激光器及其系统的应用等方面的研究。

E-mail: hlwang09@semi.ac.cn

**导师简介**: 潘教青(1973—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事化合物半导体材料生长和集成光电子器件制备等方面的研究。E-mail: jqpan@semi.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: y.ding@dundee.ac.uk

目前被广泛使用的超短光脉冲源主要是锁模的钛宝石固体激光器,这种激光器笨重且昂贵,并且控制脉冲重复频率和电子同步等脉冲特性也比较复杂。近年来,半导体锁模激光器因为其具有结构紧凑、高效和波长调谐灵活等一系列优点而成为超短脉冲源的研究热点,并且已经报道了很多有重要意义的研究。

半导体材料锁模以及半导体锁模激光器的研究在过去的 20 年的发展过程中一直保持持续增长的势头,已经从新兴研究课题逐渐发展成为热点研究课题,特别是近几年来在生物医学领域的非线性成像的应用研究突飞猛进,显示出非常好的应用和市场前景。随着近些年来对半导体锁模激光器以及光放大器的脉冲激光动态过程的深入研究,出光功率和脉冲能量迅速增长,例如在 400 nm 波段已达到 300 W 的峰值功率,因此半导体锁模激光器正在逐渐取代前述的固体脉冲激光光源,成为小型化、效率高、可携带和节能环保的新型脉冲光源。可以预计,一旦半导体锁模激光器的技术指标达到可以部分或者完全替代固体脉冲激光器的水平,其意义不仅仅在于会有极好的应用前景和巨大的市场,带来的节能环保效应也将推动绿色科技的发展和可持续发展战略的实现。

目前主要还只是国外的一些研究机构对全半导体锁模激光器以及系统进行研究和开发,比如美国的中佛罗里达大学、新墨西哥大学、海军研究实验室,日本的东北大学及索尼先进材料实验室,英国的邓迪大学、格拉斯哥大学、南安普敦大学,瑞士的苏黎世联邦理工大学等。意大利都灵理工大学对半导体锁模激光器的动态特性模拟以及大功率高速光放大器的优化设计有着较深入的研究。

然而目前国内的研究状况还停留在常规半导体激光器的性能改善方面。2006 年,北京工业大学李建军等<sup>[9]</sup>在 980 nm 波段当注入电流 2 A 时获得了高达 5 W 的输出功率。除此之外,国内对固体锁模激光器和光纤锁模激光器的研究也已经展开。2011 年,北京工业大学付洁等<sup>[10]</sup>成功实现 10 kHz 腔倒空锁模皮秒激光器。2012 年,天津大学石明威等<sup>[11]</sup>成功研制了大啁啾脉冲的展宽脉冲锁模的光纤激光器。最近国内的北京工业大学、中国科学院半导体研究所与英国邓迪大学合作,联合研制新型结构的高峰值功率半导体锁模激光器,已经取得了一些初步的研究成果。

典型的两段式单片半导体锁模激光器由增益区和可饱和吸收区两部分构成,两段中间的部分是电隔离槽,然而光波导在两段中间是连续的。在工作时,增益区加正向电流形成增益,而吸收区加反向偏压来控制可饱和吸收恢复时间,从而获得较窄的脉冲输出。

产生超短脉冲的一种简单有效的方法是被锁模。对于上述的典型的两段式单片半导体锁模激光器,如果不外加高频电调制信号,将构成被动锁模。这种模式锁定方法的基本原理是利用放在激光谐振腔内的可饱和吸收体来实现的。可饱和吸收体是一种非线性吸收介质,对谐振腔内激光的吸收或损耗随光场强度变化而变化。当光场较弱时吸收体对光的吸收很强,因此光的透射率很低,然而随着光场强度的逐渐增大,吸收体对光的吸收减弱,当达到吸收体饱和时,光可以以非常小的相对损耗通过可饱和吸收体,此时透射率接近 100%,因此强度越大的激光其相对损耗越小。可饱和吸收体的非线性可饱和吸收特性可以理解为光激发出电子空穴对,电子空穴分别分布在导带和价带中并随着光强的增强而增多,当光强达到一定程度时,由于电子和空穴在导带和价带的态密度有限,可被占据的状态数趋于饱和,则不能再吸收更多的光子,此外已经产生的电子空穴对需要一定时间才能复合产生光子,因而光的吸收随着光脉冲的增强而下降。由于上述的吸收体的吸收系数随着光强的增加而下降,所以高增益激光器所产生的高强度激光能使可饱和吸收体饱和。强的光场的透射率比弱的光场的大,只有很小一部分被吸收体所吸收,在没有发生模式锁定以前,假设腔内光子的分布是均匀的,但由于噪声的存在,光子分布还是有起伏的。由于吸收体有可饱和吸收的特性,强光的透射率大、损耗小,且其损耗可以通过增益区的放大得到补偿,所以初始的作为种子的光脉冲每经过吸收体和工作物质一次,其强弱信号的对比就改变一次,在腔内多次循环后,极大值与极小值之差会逐渐增大。脉冲的前沿不断变陡,而尖峰部分能有效通过,使得脉冲变窄。腔内的多纵模最终步调一致即具有固定相位关系,可以通过频率域分析来理解,开始时达到阈值所产生的激光涨落脉冲,经过可饱和吸收体的选择作用,只剩下高增益的中心波长及其边频,随后经过数次吸收体的吸收和工作物质的放大,边频信号又激发新的边频,如此反复,最终使得增益线宽内所有的纵向模式参与振荡并相互耦合,于是便得到一系列周期为  $2nL/c$  或重复频率为  $c/2nL$  的脉冲序列输出,这里  $c$  是光速, $L$  是激光器的腔长, $n$  是激光器的折射率。这种工作方式的激光器就被称为模式锁定或锁模激光器。

半导体锁模激光器除了追求更短的脉冲宽度外,对重复频率<sup>[12]</sup>、激光波长<sup>[13]</sup>、时序抖动<sup>[14]</sup>以及对激光波长和重复频率的调谐<sup>[15]</sup>都要进行控制。为了实现这种目的,现在常见的有多种不同的腔结构,包括法布里-珀罗(F-P)腔<sup>[16]</sup>、环形腔<sup>[17]</sup>和分布式布拉格反射镜(DBR)<sup>[18]</sup>。另外还有一种外腔结构,外腔的镜面可以是普通平面镜,输出耦合器或者布拉格光栅等<sup>[19]</sup>,外腔结构的锁模激光器非常适合宽范围的波长和重复频率调谐。所有这些装置有主动、被动和混合等锁模方式。此外,值得一提的是还有一种被称为碰撞脉冲的锁模方式<sup>[20]</sup>,即两个传播方向相对的光脉冲在谐振腔中间的可饱和吸收区相遇,产生相干作用,通过碰撞脉冲锁模方式可以得到更窄的光脉冲以及更高的重复频率。对于不同波段的半导体锁模激光器,所采用的结构及锁模方式各有不同。

本文对 400 nm~2  $\mu\text{m}$  波长范围内的半导体锁模激光器的最新研究报道进行分析和总结,全面介绍这种激光器的研究进展。

## 2 蓝紫光半导体锁模激光器

目前的蓝紫光激光器研究波长主要集中在 400~410 nm。常用增益(有源)区的材料为 GaN/InGaN 体系,并采用 InGaN 多量子阱结构来制作。日本的东北大学和索尼公司以及美国的加利福尼亚大学等研究单位已经对蓝紫光锁模半导体激光器开展了一系列研究。

半导体光脉冲源对实现下一代三维(3D)光存储系统以及高分辨率生物成像、纳米加工具有重要意义<sup>[21,22]</sup>。但这通常要求脉冲源要有高的峰值功率。脉冲峰值功率  $P_{\text{peak}} = E/\tau_p$ ,其中  $E$  为光脉冲能量, $\tau_p$  为光脉冲周期。通常单横模的激光二极管(LD)发射的脉冲能量所能达到的极限是 100 pJ,这是因为在激光二极管中的载流子寿命大约只有 1 ns,即光能存储时间较短<sup>[23]</sup>。因此,为了获得高的峰值功率,需要减小脉冲宽度。

2001年,美国加州大学圣巴巴拉分校的 Gee 等<sup>[24]</sup>在半导体光放大器(SOA)上加上防反射涂层材料获得了短周期的脉冲。制作出的 409 nm 锁模激光器性能为:平均功率 2 mW,脉冲宽度 30 ps。当在 GaInN 激光器中加入半导体吸收体后可以大大减小脉冲宽度。2009年,日本东北大学 Yoshita 等<sup>[25]</sup>首次在 GaInN 激光二极管中加入内部饱和吸收层来实现模式锁定,并且获得了 840 MHz 重复频率、20 ps 脉冲宽度、0.4 W 峰值功率的半导体锁模激光器。2010年,日本东北大学 Yoshita 等采用一个更强的饱和吸收体将脉冲宽度降到 3 ps<sup>[22]</sup>。

除此之外,改变波导结构可以增加有源区面积从而获得更高的脉冲输出功率。2011年,索尼公司先进材料实验室 Oki 等<sup>[26]</sup>采用喇叭波导结构获得了 1.6 ps 脉冲宽度、20 W 峰值功率、1 GHz 重复频率的脉冲。并证明喇叭波导结构获得的脉冲功率是直波导结构所获得脉冲功率的 6 倍。2010年,日本东北大学 Kuramoto 等<sup>[27]</sup>在 GaInN 激光二极管中引入一个电子阻挡层从而获得了有更短周期的光脉冲,采用纳秒级电激励后,获得了估计峰值功率 55 W、脉冲宽度 15 ps 的光脉冲,然而报道者认为此光脉冲是一种产生机理尚未弄清的类型调 Q 机制,不属于真正意义的模式锁定。因此,脉冲的形成机制以及脉冲重复频率的稳定性等与前述的被动锁模也大不相同。2010年,日本东北大学的 Koda 等<sup>[21]</sup>通过采用外腔结构被动锁模激光二极管(MLLD)并结合喇叭波导结构 SOA 有效地放大光脉冲,最终产生了 100 W 的峰值功率。2011年,索尼先进材料实验室 Koda 等<sup>[28]</sup>在 GaInN 锁模激光器中应用喇叭波导结构同时加入结构优化的喇叭波导 SOA,利用此主振功率放大器(MOPA),最终获得了 1 GHz 重复频率、300 W 峰值功率的脉冲。

最近几年蓝紫光半导体锁模激光器所获得的主要性能汇总如表 1 所示。

表 1 蓝紫光半导体锁模激光器性能对比

Table 1 Performance comparison of blue-violet semiconductor mode-locked (ML) lasers

ML type	Wavelength / nm	Pulse width / ps	Peak power / W	Repetition rate / GHz	Time bandwidth product	Reference
Passive	405	1.6	20	1	0.73	[26]
Passive	404	1.9	300	1	2.8	[28]
Passive	404	3	3	1	1.1	[22]
Passive	404	3	0.2	—	1.2	[29]
Hybrid	404	20	0.4	0.84	15	[25]
Active	409	30	—	—	1.2	[24]

### 3 750~900 nm 锁模半导体激光器

对于超短脉冲源,实现脉冲宽度的最小化和脉冲功率的最大化一直是所有研究者追求的目标。对于800~870 nm波段的锁模半导体激光器,包括贝尔实验室、索尼公司和美国海军研究实验室等很多研究机构已经做了大量研究。此波段的激光器材料主要是采用 AlGaAs/GaAs 体系。

早在1989年,日本 NTT 传输系统实验室的 Masuda 等<sup>[30]</sup>采用10条纹激光阵列和外加射频正弦波信号在810 nm波段获得了26 ps脉冲宽度、801 MHz重复频率的有源锁模。通过改善条纹激光阵列结构可以大大优化所获得脉冲的性能。1992年,美国麻省理工学院(MIT)的 Pang 等<sup>[31]</sup>利用40条纹激光阵列在800 nm波段获得了650 fs的更短脉宽的有源锁模。要减小脉冲的脉宽,在锁模激光器中加入饱和吸收体就可以实现。1993年,MIT 林肯实验室 Adams 等<sup>[32]</sup>利用多量子阱饱和吸收体在830 nm波段获得了15 ps脉冲宽度、593 MHz重复频率、1 W峰值功率的混合模式锁定脉冲。除此之外,外部脉冲压缩技术可以使脉冲宽度减小到几百飞秒。1993年,巴黎第十一大学 Stelmakh 等<sup>[33]</sup>通过离子注入的饱和吸收体并采用脉冲压缩技术最终获得了230 fs脉宽的脉冲,此混合锁模的最高峰值功率为25 W。

早期直接从窄条纹半导体激光器获得的锁模脉冲平均功率往往限制在10 mW,脉冲能量限制在10 pJ,峰值功率限制在1 W。利用高饱和输出功率的行波波导可以有效增加脉冲输出功率。早在1990年,贝尔通信实验室 Delyyett 等<sup>[34]</sup>就已制作了薄有源区条形 AlGaAs 行波放大器,获得了15 ps脉冲宽度、50 mW平均功率、3 W峰值功率的脉冲。1993年,加州大学圣巴巴拉分校的 Mar 等<sup>[35]</sup>利用锥形波导结构半导体放大器很好地改善了脉冲性能,并在830 nm波段获得了3 GHz重复频率、61 mW平均功率、5 W峰值功率、21 pJ的脉冲序列。1994年,美国海军研究实验室 Goldberg 等<sup>[36]</sup>利用锥形条波导半导体放大器和一个附加的分立窄条增益单元,通过有源锁模的方式在855 nm波段获得了12 ps脉冲宽度、16 W峰值功率、0.5 nJ脉冲能量的脉冲序列。

几十毫瓦的输出功率还远远达不到超短脉冲的应用要求。为了提高输出功率,可以在外部对脉冲功率采用多次放大以及压窄脉冲技术。2007年,索尼公司 Kuramoto 等<sup>[37]</sup>利用锁模激光二极管和两级激光放大器在800 nm波段获得了5 ps脉冲宽度、500 MHz重复频率、100 W峰值功率的光脉冲源,并成功应用于双光子激发荧光生物成像。2008年,德国波鸿鲁尔大学 Schlauch 等以及德国 FBH 的 Klebr 等<sup>[38]</sup>利用两段式激光二极管以及外腔构造,在830 nm波段获得了在重复频率330 MHz下,平均功率28 mW、脉宽为5.6 ps的脉冲序列,外腔激光器对应的脉冲峰值功率约15 W(采用洛伦兹拟合),再经过一个锥形光放大器放大和一个紧凑的外部脉冲压缩光路后获得了513 mW平均功率、600 fs脉冲宽度的脉冲序列,最终系统对应的峰值功率达到了2.5 kW,此峰值功率被认为是目前全半导体二极管飞秒激光系统所获得的最高峰值功率。该峰值功率水平已经达到了非线性生物医学成像、激光微纳手术等应用的要求。尽管整体系统的稳定性以及脉冲的质量还需要进一步研究与优化,但是此结果已显示出全半导体超快激光系统替代传统的复杂、昂贵且笨重的固体超快激光系统的潜力和必然性。

最近几年750~900 nm波段半导体锁模激光器所获得的主要性能汇总如表2所示。

表2 750~900 nm波段半导体锁模激光器性能对比

Table 2 Performance comparison of 750~900 nm semiconductor mode-locked lasers

ML type	Wavelength / nm	Pulse width / ps	Average power / mW	Peak power/W	Repetition rate /GHz	Time bandwidth product	Reference
Passive	840	0.23	4	25	0.4	0.49	[33]
Passive	830	0.6	500	2500 (with tapered amplifier and pulse compression)	0.33	1.138	[38]
Passive	800	0.65	—	5.6	0.451	0.47	[31]
Passive	830	4.1	61	5	3	—	[35]
Hybrid	800	5	270	100 (with SOA)	0.5	1.32	[37]
Active	855	12	—	16	65	0.8	[36]
Active	870	15	50	3	15	—	[34]
Hybrid	830	15	9	1	0.593	8.1	[32]
Active	810	26	—	—	0.801	—	[30]
Passive	795	0.71	48	9.8	6.86	—	[39]

## 4 900~1.1 $\mu\text{m}$ 波段半导体锁模激光器

目前半导体锁模激光器进展主要表现为在大的重复频率范围内改善脉冲宽度和脉冲功率。900 nm~1.1  $\mu\text{m}$  波段的半导体锁模激光器主要由 InGaAs/AlGaAs 量子阱结构组成。英国南安普敦大学和瑞士苏黎世联邦理工大学等诸多研究机构已经对此波段的半导体锁模激光器进行了一系列的研究。英国的邓迪大学联合北京工业大学、中国科学院半导体研究所也开始了此波段的半导体锁模激光器的研究工作。

在半导体锁模激光器中,功率和能量往往由它们的饱和能量所决定。饱和能量  $E_{\text{sat}} = h\nu\Delta/\alpha\Gamma$ ,  $h\nu$  为光子能量,  $\Delta$  为有源区面积,  $\alpha$  为微分增益,  $\Gamma$  为限制因子。所以,通过增加有源区面积或者减小限制因子,就可以提高平均功率和脉冲能量。半导体激光器有源区面积可以通过以下两种途径来增加:一是使用前述的喇叭波导,二是利用垂直腔面发射结构,然后后者需要外部的光抽运。1994年,加州大学圣巴巴拉分校的 Mar 等<sup>[35]</sup>利用锁模 MOPA 得到了高平均功率和脉冲能量的脉冲。其脉冲宽度为 4.2 ps、平均功率为 296 mW、峰值功率为 28.1 W、脉冲能量为 118 pJ。

影响脉冲形状性能的关键因素就是增益段的饱和能量与吸收段的饱和能量之比  $\sigma$ 。 $\sigma$  越大,脉冲宽度越小。1995年,Mar 等<sup>[40]</sup>利用均匀波导激光器获得了脉冲宽度为 3.5 ps、脉冲能量为 1.8 pJ 的脉冲序列;而相同的激光器利用喇叭吸收区可以获得更高的脉冲能量 4.1 pJ(因为增加了吸收能量)、但脉冲宽度有所增加 4.2 ps(因为  $\sigma$  的减小)。他们为了同时改善饱和能量和  $\sigma$ ,采用喇叭增益段器件,获得了脉冲能量为 6.8 pJ、峰值功率超过 2 W、脉冲宽度为 3.3 ps 的输出。这也证明了相对于均匀波导,在增益区采用喇叭波导可以同时改善脉冲能量和脉冲宽度。

在最近几年,研究发现垂直外腔面发射半导体激光器(VECSEL)可以获得更大的模式区域,特别是当应用光抽运的时候。这样,空间均衡的激射就容易达到。一个基模尺寸经过适当设计的外腔可以支持单横模运作。所以在过去几年中 VECSEL 引起了研究者的广泛兴趣。2000年,英国南安普敦大学 Hoogland 等<sup>[41]</sup>利用被动锁模 VECSEL 激光器获得了 22 ps 脉冲宽度的脉冲。在 2002年,英国南安普敦大学 Garnache 等<sup>[42]</sup>利用 VECSEL 获得了小于 500 fs 脉宽的脉冲。2002年,瑞士苏黎世联邦理工大学 Haring 等<sup>[43]</sup>利用带有半导体饱和吸收镜的外腔进行锁模,利用光抽运被动锁模 VECSEL 获得了 950 mW 平均功率、15 ps 脉冲宽度、6 GHz 重复频率的脉冲。

但是这些实验中的脉冲往往有很强的啁啾,在 VECSEL 激光腔中使用内腔式标准具可以大大减小脉冲的啁啾。除了限制带宽外,标准具也能帮助优化波长依赖的增益参数和色散。在 2004年,瑞士苏黎世联邦理工大学 Lorenser 等<sup>[44]</sup>在 VECSEL 模式锁定中引入正色散的光孤子脉冲整形机理,在低啁啾时产生短脉冲。借助内腔色散控制,可以实现傅里叶变换极限的脉冲序列,在 4 GHz 重复频率下平均输出功率为 2.1 W<sup>[45]</sup>和在 10 GHz 重复频率下平均输出功率 1.4 W<sup>[46]</sup>。

以前由增益区和饱和吸收体集成在单个晶片上构成的模式锁定集成外腔面发射激光器(MIXSEL)平均功率往往受限在 200 mW 以内。2010年,瑞士苏黎世联邦理工大学 Rudin 等<sup>[47]</sup>应用优化的量子点作为饱和吸收体的 MIXSEL 结构获得了更高功率的脉冲。脉冲性能为脉宽 28 ps、重复频率为 2.5 GHz、平均输出功率为 6.4 W。这是因为量子点吸收材料有一个足够低的饱和能量而稳定锁模需要吸收区有比增益区更短的饱和时间(换句话说吸收区有比增益区更低的饱和能量)。量子点的低饱和能量特性甚至可以在很低的脉冲能量和很高的脉冲重复频率下支持稳定的模式锁定。50 GHz、3.3 ps 的脉冲序列证明了在半导体增益区和饱和区的瞬间动力学特性可以支持在更高的重复频率下产生脉冲<sup>[48]</sup>。这将可以生产低成本且坚固耐用的单片式脉冲激光源,这种激光源具有在重复频率和输出功率上极其优越的性能。

除此之外,还有很多改善脉冲性能以及提高脉冲能量的方法。2005年,美国中佛罗里达大学超快光子研究组的 Kim 等<sup>[49]</sup>采用极端啁啾脉冲放大(X-CPA)方法克服了超快脉冲半导体光放大器饱和吸收能量的限制,获得了 590 fs 的脉宽和 1.4 kW 的峰值功率。2007年,美国林肯实验室 Gopinath 等<sup>[50]</sup>利用平板耦合光波导激光器(SCOWL)获得了 62 pJ 脉冲能量、489 mW 平均功率、7.92 GHz 重复频率的脉冲。

最近几年 900 nm~1.1  $\mu\text{m}$  波段半导体锁模激光器所获得的主要性能汇总如表 3 所示。表中 Ext 表示外腔,Mon 表示单片集成。

表3 900 nm~1.1 μm 波段半导体锁模激光器性能对比

Table 3 Performance comparison of 900 nm~1.1 μm semiconductor mode-locked lasers

Cavity type	ML type	Wavelength / nm	Number of QW	Pulse	Average	Peak	Repetition	Time	Reference
				width / ps	power / mW	power / W	rate / GHz	Bandwidth Product	
Ext	Passive	940	3	4.2	296	28.1	2.5	—	[35]
Mon	Passive	980	3	16	489	3.86	7.92	—	[50]
Ext	Passive	940	3	3.3	9.1	2	—	—	[40]
Ext	Passive	957	7	4.7	2100	—	4	—	[45]
Ext	Passive	950	5	15	950	—	6	0.65	[43]
Ext	Passive	980.3	7	9.7	55	—	21	1	[44]
Mon	Passive	959.6	7	4.7	25	—	30	0.5	[44]
Ext	Passive	920	2	7	—	3.6	4.1	1.2	[51]
Ext	Passive	1030	12	22	21.6	—	4.4	1.5	[41]
Ext	Passive	1030	6	0.486	30.3	—	10	0.32	[52]
Ext	Passive	980	1	15	—	—	15	0.8	[53]
Ext	Passive	980	—	57	40	1	1.1	—	[54]
Ext	Passive	1040	6	0.477	100	152	1.21	—	[42]
Ext	Passive	960	7	3.3	100	—	50	0.39	[48]
Ext	Harmonic	1035	—	0.4	300	—	175	—	[55]
Ext	Passive	980	1	50	—	—	6	—	[56]
Ext	Harmonic	1030	3	0.11	31	—	92	0.31	[57]
Ext	Collision pulse	975	75	0.59	—	1400	—	—	[49]
Ext	Passive	960	7	28	6400	—	2.5	—	[47]
Ext	Passive	999	—	0.335	120	315	1	—	[58]
Ext	Passive	980	2	10	39.3	4.1	0.955	—	[59]

## 5 1.1~1.3 μm 锁模半导体激光器

超短脉冲源在包括生物成像在内的多个方面具有很多用途,这就要求脉冲在波长、重复频率、脉冲宽度和脉冲功率等方面具有优良性能。此波段的半导体锁模激光器主要采用 InAs/GaAs 量子点结构,适合于较深层的生物医学成像应用(波长越长,穿透肌体组织的深度就越深,同时由于光子能量低,对肌体的损伤也越小)。因为量子点材料具有超快增益动力学以及易饱和的增益和吸收等特点<sup>[60]</sup>,所以量子点锁模激光器(QD-MLL)与量子阱锁模激光器(QW-MLL)相比具有很多优点。此外,量子点激光器有低阈值电流密度、低噪声、低光损耗以及外腔构造可以实现脉冲重复频率以及波长的宽范围调制等优点<sup>[61,62]</sup>。

模式锁定反馈类型一般可分为单片集成锁模和外腔反馈锁模。单片集成锁模激光二极管(MMLD)指包括增益区和饱和吸收区的整个光学共振器组件集成于一个单一的芯片上。外腔锁模半导体激光器(ECML)包括两部分组成:用于减少背面反射的弯波导和外反射镜。基于量子阱结构的 MMLD 在很多应用领域具有良好的性能,比如产生短脉冲、高速率光学通信、微波信号产生和光学互连等。基于量子点增益介质的 MMLD 具有比基于量子阱的 MMLD 更好的性能。其较广的增益带宽和较小的线宽增强因子使其成为产生低噪声超短脉冲的最佳选择。与传统的 QW 激光器相比,QD-MMLD 由于低的内部吸收损失,使其在低于 10 GHz 的重复频率时仍然可以工作。2005 年,美国齐亚激光公司 Zhang 等<sup>[63]</sup>通过单片集成两段式被动锁模量子点激光器获得了 5 GHz 重复频率、290 mW 峰值功率、10 ps 脉宽的脉冲。但是,由于设备制造的限制,所以很难获得更低的重复频率。2011 年,美国新墨西哥大学 Li 等<sup>[60]</sup>做成全有源材料单片集成被动锁模量子点激光器获得了 2.1 GHz 重复频率、15.4 ps 脉宽的脉冲。这是目前在单片激光器中获得的最低重复频率。利用外腔反馈锁模激光器可以有效解决在低重复频率下工作的问题。ECML 相对于 MMLD 有很多优点,比如重复频率的可调谐性和灵活性,并允许包含用其他光学元素设计的腔。ECML 在改善噪声性能方面与 MMLD 相比有很大优势,因为 ECML 在相同的重复频率时可以减少有源区波导的长度。

2005年,美国佛罗里达大学 Choi 等<sup>[64]</sup>首次使用外腔锁模量子点两段式激光器外加一个光放大器获得了1.2 ps脉宽、1.46 pJ 脉冲能量、1.22 W 峰值功率的脉冲。2010年,邓迪大学的 Ding 等<sup>[65]</sup>采用单一的外腔锁模量子点两段式激光器获得了最高1.5 W 峰值功率以及最大25 pJ 脉冲能量的脉冲序列。

2001年,美国新墨西哥大学 Huang 等<sup>[66]</sup>通过在量子点激光器腔内集成量子点饱和吸收体,获得了7.4 GHz重复频率、17 ps 脉宽的脉冲序列,并且他们证明通过多量子点层以及改善腔的设计,可以进一步改善脉冲特性。目前,集成的量子点锁模激光器重复频率可达到240 GHz<sup>[67]</sup>。2004年,剑桥大学 Thompson 等<sup>[68]</sup>首次获得了18 GHz 的重复频率的脉冲。2005年,英国圣安德鲁斯大学 Rafailov 等<sup>[69]</sup>利用两段式量子点激光器获得了21 GHz 重复频率、390 fs 脉宽的脉冲。但是要用短腔长(小于500 μm)量子点激光器获得高重复频率(大于100 GHz)是很困难的,因为量子点材料稀疏会导致低模态增益。碰撞脉冲锁模(CPM)则很好解决了这个问题,因为 CPM 在一个固定腔长里可以有双倍甚至多倍的锁模频率。CPM 可以产生超短的脉冲并可实现稳定的锁模。2005年,美国剑桥大学 Thompson 等<sup>[70]</sup>首次使用碰撞脉冲获得了7 ps 脉宽、20 GHz 重复频率的脉冲。他们的研究证明了量子点激光器可以获得高的重复频率。

如前所述,利用喇叭形波导不仅可以提高输出功率,还可以增强吸收体的饱和能量。2006年,Thompson 等<sup>[71]</sup>利用喇叭形波导激光器实现了24 GHz 重复频率、780 fs 脉宽、500 mW 峰值功率的脉冲序列。2012年,英国邓迪大学的 Nikitichev 等<sup>[72]</sup>利用增益波导结构,结合喇叭形波导,获得了重复频率10 GHz、脉宽1.26 ps、峰值功率17.7 W 的脉冲序列。此结果代表单片集成量子点锁模半导体激光器的最高峰值功率,其功率水平已经达到非线性成像的阈值水平,初步的双光子成像实验结果表明已经可以获得略显模糊的图像。进一步增加脉冲峰值功率无疑可以得到清晰的图像。

像微机械加工、双光子成像和激光雷达等应用往往要求脉冲具有高的能量和低的重复频率。比如双光子成像脉冲质量可用品质因子(FOM)  $f_m$  定义:  $f_m = \frac{P_{\text{avg}}^2}{f_{\text{rep}} \Delta\tau}$ ,  $P_{\text{avg}}$  为脉冲平均功率,  $f_{\text{rep}}$  为重复频率,  $\Delta\tau$  为脉冲宽度。FOM 越大,则光脉冲性能对于双光子成像效果越好。

实现半导体激光器重复频率从兆赫兹量级到吉赫兹量级的调谐对非线性生物医学成像具有重要意义。量子点外腔被动锁模激光器(QD-ECMLL)是这种应用的很好选择<sup>[73]</sup>,因为量子点激光器有低阈值电流密度、低噪声、低光损耗以及外腔设备可以实现脉冲重复速率调制的优点。英国邓迪大学的 Ding 等<sup>[19,63,66,75,76]</sup>对可调谐量子点锁模激光器进行了大量研究。2010年,他们已经实现了重复频率由1.14 GHz 到2.4 GHz 可调谐的高功率脉冲,在1.14 GHz 重复频率时脉冲平均功率为23.2 mW,峰值功率为1.5 W,脉宽13.6 ps<sup>[65]</sup>;2011年他们获得了重复频率由1 GHz 到191 MHz 调谐的高功率脉冲<sup>[62]</sup>,并利用高次谐波获得了200 MHz 到6.8 GHz 的调谐范围<sup>[74]</sup>。2012年他们利用由外腔被动锁模激光器和锥形半导体放大器组成的一个可调谐 MOPA 光脉冲源,实现了1187~1283 nm 波长可调谐,其锁模发射脉冲峰值功率为4.39 W<sup>[19]</sup>。对于固定波长的 QD-MOPA,他们获得了超过30 W 的峰值功率,并且首次将来自全半导体的1.26 μm 波长的脉冲激光系统应用于双光子成像并获得了很好的成像效果<sup>[75]</sup>。

除了常用的量子点锁模激光器外,2006年,瑞士苏黎世联邦理工大学 Rutz 等<sup>[76]</sup>首次使用808 nm 半导体激光器抽运被动锁模 GaInNAs 垂直腔面发射激光器在1308 nm 时获得了57 mW 平均功率、6.1 GHz 重复频率、18.7 ps 脉宽的脉冲。

最近几年1.1~1.3 μm 波段半导体锁模激光器所获得的主要性能汇总如表4所示。

表4 1.1~1.3 μm 波段半导体锁模激光器性能对比

Table 4 Performance comparison of 1.1~1.3 μm semiconductor mode-locked lasers

Cavity type	ML type	Wavelength / nm	Number of QD	Pulse	Average	Peak	Repetition	Time	Reference
				width / ps	power / mW	power / W	rate / GHz	Bandwidth Product	
Mon	Passive	1.24	6	20.2	12	0.283	2.1	1.52	[60]
Ext	Passive	1.26	10	—	294	26.3	1.1	—	[75]
Ext	Passive	1.26	10	—	208.2	30.3	0.648	—	[75]
Mon	Passive	1.3	2	17	—	—	7.4	3.1	[66]

Cavity type	ML type	Wavelength / nm	Number of QD	Pulse width / ps	Average power / mW	Peak power / W	Repetition rate / GHz	Time Bandwidth Product	Reference
Ext	—	1.26	5	0.39	25	3	21	—	[69]
Mon	Collision pulse	1.1	3	7	—	—	20	0.54	[70]
Ext	Passive	1.27	10	13.6	23.2	1.5	1.14	—	[65]
Ext	Passive	1.3	10	1.2	7.2	1.22	5	6	[64]
Mon	Passive	1.3	10	10	—	—	18	0.315	[68]
Mon	Hybrid	1.1	3	—	—	—	10	—	[77]
—	Passive	1.3	5	3	—	—	50	—	[78]
Ext	Passive	1.3	5 MQW	18.7	57	—	6.1	—	[76]
Mon	Passive	1.26	10	1.26	222.7	17.7	10	1.33	[72]

## 6 1.55 $\mu\text{m}$ 波段半导体锁模激光器

此波段半导体锁模激光器目前主要采用 AlGaInAs/InP、GaInNAsSb/GaAs、InGaAsP/InP 等材料体系,主要适用于高速光纤通信。目前英国格拉斯哥大学等研究机构对此波段半导体锁模激光器进行了一系列的研究。

此波段的单片集成锁模半导体激光器由于其体积小、性能稳定、功耗低、易于与其他 InP 基有源和无源光子器件集成以及廉价等一系列优点而变得具有较高的商业价值,特别适合下一代高速光纤通信系统的光源以及时钟恢复等应用。高的脉冲重复频率、低的时间抖动以及小的远场发散角是此波段半导体锁模激光器所期待获得的特性。DBR 不仅可以用于控制谱宽及中心波长,还可以用于调谐脉冲重复频率<sup>[15]</sup>。2007 年,10 GHz 重复频率带有面刻蚀布拉格光栅的有源单片集成锁模激光器已经被实现<sup>[79]</sup>。DBR 的带隙通常比有源区更宽,从而可以减少直接带间吸收,DBR 可通过选择刻蚀和二次生长过程来完成。

格拉斯哥大学 Hou 等<sup>[81~85]</sup>主要采用 AlGaInAs/InP 材料体系对此波段的半导体锁模激光器进行研究。2010 年他们通过集成一个面刻蚀布拉格反射镜使散射损耗最小,并获得了 40 GHz 重复频率的脉冲<sup>[80]</sup>。之后,他们通过优化设计及使用量子阱混杂(QWI)技术,利用这种装置较低的散射损失和较低的吸收,获得了 10 GHz 重复频率、2.99 ps 脉宽的脉冲<sup>[81]</sup>。后来他们利用谐波锁模并证明谐波锁模可以产生更高重复频率的脉冲。2010 年,他们用—个由深刻蚀的腔内反射器(ICR)形成的复合腔组成的谐波锁模 AlGaInAs 激光器产生了 160 GHz 脉冲<sup>[82]</sup>。2011 年,他们在三层量子阱有源区中加入—个无源远场降低层获得了 10 GHz 重复频率的脉冲<sup>[83]</sup>。由于 3 个量子阱有源区有比常规的五个量子阱有源区的光限制因子更低,因此可以显著提高输出功率,并且可以减小垂直方向的远场发散角。

碰撞脉冲模式锁定激光器相对其他类型锁模激光器有很多优点,比如可以产生更稳定和性能更好的脉冲形貌以及提高脉冲重复频率。2011 年,他们通过脉冲碰撞锁模获得了 80 GHz 重复频率、910 fs 脉宽的脉冲<sup>[84]</sup>。

2008 年,新墨西哥大学 Xin 等<sup>[85]</sup>首次使用 GaAs 基以及单个 GaInAsSb 量子阱作为有源区制作 1.55  $\mu\text{m}$  被动锁模半导体激光器,获得了 13.2 GHz 重复频率、26 ps 脉宽的脉冲,首次实现了 1.55  $\mu\text{m}$  波段的 GaAs 基半导体锁模激光器。

除此之外,其他材料体系也被用于此波段半导体锁模激光器。2008 年,法国科学研究中心(CNRS) Merghem 等<sup>[86]</sup>用单个 InGaAsP/InP 量子阱作为有源区在 1.54  $\mu\text{m}$  波长时被动锁模获得了 860 fs 脉宽、21.31 GHz 重复频率的脉冲。

最近几年 1.55  $\mu\text{m}$  波段半导体锁模激光器所获得的主要性能汇总如表 5 所示。



表 5 1.55  $\mu\text{m}$  波段半导体锁模激光器性能对比Table 5 Performance comparison of 1.55  $\mu\text{m}$  semiconductor mode-locked lasers

ML type	Repetition rate /GHz	Pulse width /ps	Time bandwidth product	Wavelength / nm	Number of QW	Reference
Active	4.4	9	9.6	1565	6	[87]
Active	8.6	6.2	7	1565	6	[88]
Active	16.3	2	1.2	1593	4	[89]
Active	20	4	0.5	1555	2	[90]
Active	50	3.2	1	1552	2	[91]
Hybrid	8.6	4.4	7	1565	6	[88]
Hybrid	4.9	8	0.3	1565	6	[92]
Hybrid	33	5.3	0.35	1550	3	[93]
Hybrid	33	7.1	0.47	1550	3	[94]
Hybrid	10	8	0.35	1554	8	[95]
Hybrid	20	0.79	0.39	1557	6	[96]
Passive	8.6	5.5	7	1565	6	[88]
Passive	80	5.4	0.65	1534	3	[97]
Passive	40	3.5	0.43	1557	5	[98]
Passive	8.68	8.3	0.62	1554	5	[99]
Passive	37	6	0.48	1552	5	[100]
Passive	40	4.2	0.44	1550	3	[101]
Passive	30	1.49	—	1530	5	[102]
Passive	40	4.3	0.54	1550	3	[103]
Passive	21.31	0.86	0.57	1540	1	[86]
Passive	13.2	26	—	1550	1	[85]
Collision pulse	80	1.28	0.34	1532	5	[104]
Collision pulse	300	1	0.43	1538	5	[105]
Collision pulse	40	1.1	0.34	1545	5	[106]
Collision pulse	80	0.83	0.31	1545	5	[106]
Collision pulse	160	1	0.34	1545	5	[106]
Collision pulse	350	0.64	0.32	1545	5	[106]

## 7 2 $\mu\text{m}$ 半导体锁模激光器

目前所用的 AlGaIn/AsSb 材料体系可以产生 2.0~2.7  $\mu\text{m}$  波段的激光器,但是这种材料体系输出光束质量差并且相对功率也比较低。而用 GaSb 材料体系可以有效解决这些问题。GaSb 材料体系可以用来制作 2~4  $\mu\text{m}$  波段的半导体激光器,在光谱学、传感、医疗和军事方面具有重要用途。此波段的锁模激光器目前主要由芬兰坦佩雷理工大学的 Härkönen 等<sup>[107~109]</sup>在研究。

2008 年,Härkönen 等<sup>[107]</sup>利用 1.57  $\mu\text{m}$  激光器抽运,加上调制器和光纤放大器,主动锁模获得了 157 ps 脉宽、12.5 GHz 重复频率、80 mW 平均功率的脉冲。为了得到性能更好的脉冲,利用被动锁模产生超短脉冲可以有效解决这个问题。但没有合适的半导体饱和吸收体一直在限制着被动锁模技术的发展。2010 年,他们利用 3 个量子阱 InGaSb/GaSb 饱和吸收镜在 1.95  $\mu\text{m}$  波段获得了 881.2 MHz 重复频率、30 pJ 脉冲能量、1.1 ps 脉宽的脉冲<sup>[108]</sup>。2011 年,他们又通过改善饱和吸收镜及增益结构在 1960 nm 波段获得了 890.4 MHz 重复频率、25 mW 输出功率、384 fs 脉宽的脉冲<sup>[109]</sup>。

## 8 结束语

对 400 nm~2  $\mu\text{m}$  波段的半导体锁模激光器进行了全面总结。从发展趋势上看,尽管光抽运 VECSEL 可以获得千瓦级峰值功率,但其相对复杂的结构和低成本以及相对大的体积将可能限制其广泛应用。而边

发射的电注入型半导体锁模激光器有更小的体积、更加紧凑的结构以及低成本,将是未来发展的重点。对于三种不同的锁模方式(主动、被动以及混合锁模),显然被动锁模将是未来发展和应用的首选,特别是在生物医学、生命科学研究领域。其原因在于被动锁模无需外加射频信号,使得其具有便携性和低成本。另外,随着技术的发展,被动锁模的噪声特性也在不断改善。通过外腔结构、光的自注入反馈等技术,目前已经可以获得极窄的射频线宽,并且完全可以满足生物医学的非线性成像、微纳手术等应用的要求。主动锁模和混合锁模将适用于对于时间抖动等要求极高的场合,尤其是在光纤通信的一些应用领域,而这两种锁模方式的主要缺点是需要外加射频信号。从目前的发展水平看,400 nm 附近波段的蓝紫光半导体锁模激光器已经获得了相当高的输出功率,其峰值功率已经达到了实际应用水平,预计在不久的将来将会出现相关产品,例如用于活体细胞成像的高透射率非线性显微镜光源等。相比之下,橙光、黄光、绿光的超短光脉冲目前还只能通过晶体倍频来获得。对于红光波段,英国邓迪大学和中国科学院半导体研究所合作,首次成功地通过被动锁模激光器获得了 760 nm 附近波段的皮秒脉冲激光,然而出光功率还需要通过 MOPA 系统进行提升。对于近红外波段如 850、980、1040 nm,由于其材料特性的原因,较容易获得大功率激光,因此也将很容易获得能达到实际应用水平的脉冲激光,这将是未来部分替代钛宝石固体脉冲激光器的首选。对于 1.2~1.3  $\mu\text{m}$  波段的量子点被动锁模激光器,其峰值功率也基本上能够满足非线性成像的要求。由于此波段对生物组织的透射深度较深,光子能量低,因此有希望研究较深的肌体组织以及产生更小的光损伤,适合非侵入式双光子成像等。随着激光波长的进一步加长,水吸收变得严重,因此 1.55  $\mu\text{m}$  附近波段的锁模脉冲激光将主要用于光通信相关的领域。更长波长的脉冲激光将可能利用其很强的水吸收特性,开发出如无痛采血、激光注射等新技术,其在光谱学、传感、医疗和军事等方面的用途还处于研究探索阶段。综上所述,不同波长的半导体锁模激光将适合于不同的应用领域,由于其材料特性以及制备工艺的差异,最终获得的功率水平差异较大。但是可以看出,如果想要获得较高的峰值功率,一般多采用外腔结构并通过半导体光放大器倍增出光功率,如何能更好地集成这两者也将是未来的一个重要研究方向。另外值得一提的是单片结构的喇叭口型半导体锁模激光器也是实现高峰值功率和窄脉冲的一个途径,被各个波段的锁模激光所广泛采用。随着对半导体锁模激光器越来越多的研究,其产生的脉冲性能也得到进一步改善,另外半导体锁模激光器覆盖的波段范围也将进一步拓宽。相信在不久的将来半导体锁模激光器在光纤通信、生物医学成像等方面的大规模应用必将实现。

### 参 考 文 献

- 1 B. Kolner, D. Bloom. Electrooptic sampling in GaAs integrated circuits[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, **22**(1): 79~93
- 2 P. W. Juodawlkis, J. C. Twichell, G. E. Betts *et al.*. Optically sampled analog-to-digital converters[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 2001, **49**(10): 1840~1853
- 3 T. Nagatsuma, M. Shinagawa, N. Sabri *et al.*. 1.55  $\mu\text{m}$  photonic systems for microwave and millimeter-wave measurement[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 2001, **49**(10): 1831~1839
- 4 R. Hellwarth, P. Christensen. Nonlinear optical microscope using second harmonic generation[J]. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(2): 247~248
- 5 P. J. Delfyett, D. H. Hartman, S. Z. Ahmad. Optical clock distribution using a mode-locked semiconductor laser diode system[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(12): 1646~1649
- 6 A. J. C. Vieira, P. R. Herzfeld, A. Rosen *et al.*. A mode-locked microchip laser optical transmitter for fiber radio[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 2001, **49**(10): 1882~1887
- 7 K. Vlachos, N. Pleros, C. Bintjas *et al.*. Ultrafast time-domain technology and its application in all-optical signal processing[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(9): 1857~1868
- 8 T. Ohno, K. Sato, R. Iga *et al.*. Recovery of 160 GHz optical clock from 160 Gbit/s data stream using modelocked laser diode[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(4): 265~267
- 9 Li Jianjun, Han Jun, Deng Jun *et al.*. Tunnel regeneration high-power semiconductor laser with four active regions[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12): 1819~1822
- 李建军, 韩 军, 邓 军 等. 隧道再生四有源区大功率半导体激光器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(12): 1819~1822
- 10 Fu Jie, Pang Qingsheng, Chang Liang *et al.*. Research on cavity-dumping mode-locked laser of picosecond at 10 kHz[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0314002
- 付 洁, 庞庆生, 常 亮 等. 10 kHz 腔倒空锁模皮秒激光器研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0314002

- 11 Shi Mingwei, Liu Bowen, Wang Sijia *et al.*. Generation of giant-chirp laser pulses in a stretched-pulse mode-locked fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0202007  
石明威, 刘博文, 王思佳 等. 输出大啁啾脉冲的展宽脉冲锁模光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0202007
- 12 K. Byoung-Sung, C. Yunchul, K. Sen-Ho. Dynamic analysis of mode-locked sampled-grating distributed Bragg reflector laser diodes[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1999, **35**(11): 1623~1629
- 13 R. Kaiser, B. Huttli, C. Kindel *et al.*. Effects of on-chip wavelength tuning on pulse and noise characteristics of monolithic mode-locked 40 GHz SIPBH DBR lasers[C]. IEEE 19th International Semiconductor Laser Conference, 2004. 95~96
- 14 K. Yvind, D. Larsson, L. J. Christiansen *et al.*. Low-jitter and high-power 40-GHz all-active mode-locked lasers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 975~977
- 15 I. Ogura, H. Kurita, T. Sasaki *et al.*. Precise operation-frequency control of monolithic mode-locked laser diodes for high-speed optical communication and all-optical signal processing[J]. *Opt. Quant. Electron.*, 2001, **33**(7): 709~725
- 16 Z. G. Lu, J. R. Liu, S. Raymond *et al.*. 312-fs pulse generation from a passive C-band InAs/InP quantum dot mode-locked laser[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(14): 10835~10840
- 17 Y. Barbarin, E. A. J. M. Bente, M. J. R. Heck *et al.*. Characterization of a 15 GHz integrated bulk InGaAsP passively modelocked ring laser at 1.53  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(21): 9716~9727
- 18 R. Kaiser, B. Huttli. Monolithic 40-GHz mode-locked MQW DBR lasers for high-speed optical communication systems [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2007, **13**(1): 125~135
- 19 D. Ying, A. Alhazime, D. Nikitichev *et al.*. Tunable master-oscillator power-amplifier based on chirped quantum-dot structures[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2012, **24**(20): 1841~1844
- 20 C. Ji, N. Chubun, R. G. Broeke *et al.*. Synchronized transform-limited operation of 10-GHz colliding pulse mode-locked laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(4): 625~627
- 21 R. Koda, T. Oki, T. Miyajima *et al.*. 100 W peak-power 1 GHz repetition picoseconds optical pulse generation using blue-violet GaInN diode laser mode-locked oscillator and optical amplifier[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(2): 021101
- 22 T. Oki, K. Saito, H. Watanabe *et al.*. Passive and hybrid mode-locking of an external-cavity GaInN laser diode incorporating a strong saturable absorber[J]. *Appl. Phys. Express*, 2010, **3**(3): 032104
- 23 H. Watanabe, T. Miyajima, M. Kuramoto *et al.*. 10-W peak-power picosecond optical pulse generation from a triple section blue-violet self-pulsating laser diode[J]. *Appl. Phys. Express*, 2010, **3**(5): 052701
- 24 S. Gee, J. E. Bowers. Ultraviolet picosecond optical pulse generation from a mode-locked InGaN laser diode[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(13): 1951~1952
- 25 M. Yoshita, M. Kuramoto, M. Ikeda *et al.*. Mode locking of a GaInN semiconductor laser with an internal saturable absorber[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(6): 061104
- 26 T. Oki, R. Koda, S. Kono *et al.*. Direct generation of 20 W peak power picosecond optical pulses from an external-cavity mode-locked GaInN laser diode incorporating a flared waveguide[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **99**(11): 111105
- 27 M. Kuramoto, T. Oki, T. Sugahara *et al.*. Enormously high-peak-power optical pulse generation from a single-transverse-mode GaInN blue-violet laser diode[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(5): 051102
- 28 R. Koda, T. Oki, S. Kono *et al.*. 300 W peak power picosecond optical pulse generation by blue-violet GaInN mode-locked laser diode and semiconductor optical amplifier[J]. *Appl. Phys. Express*, 2012, **5**(2): 022702
- 29 K. Saito, H. Watanabe, T. Miyajima *et al.*. Mode locking of an external-cavity bisection GaInN blue-violet laser diode producing 3 ps duration optical pulses[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(3): 031112
- 30 H. Masuda, A. Takada. Picosecond optical pulse generation from mode-locked phased laser diode array[J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(21): 1418~1419
- 31 L. Y. Pang, J. G. Fujimoto, E. S. Kintzer. Ultrashort-pulse generation from high-power diode arrays by using intracavity optical nonlinearities[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(22): 1599~1601
- 32 L. E. Adams, E. S. Kintzer, M. Ramaswamy *et al.*. Mode locking of a broad-area semiconductor laser with a multiple-quantum-well saturable absorber[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(22): 1940~1942
- 33 N. Stelmakh, J. M. Lourtioz. 230 fs, 25 W pulses from conventional mode-locked laser diodes with saturable absorber created by ion implantation[J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(2): 160~162
- 34 P. J. Delfyett, C. H. Lee, G. A. Alphonse *et al.*. High peak power picosecond pulse generation from AlGaAs external cavity mode-locked semiconductor laser and traveling-wave amplifier[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**(10): 971~973
- 35 A. Mar, R. Helkey, J. Bowers. Mode-locked operation of a master oscillator power amplifier[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(9): 1067~1069
- 36 L. Goldberg, D. Mehuys, D. Welch. High power mode-locked compound laser using a tapered semiconductor amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(9): 1070~1072
- 37 N. K. Masaru Kuramoto, Hengchang Guo, Yuji Furushima *et al.*. Two-photon fluorescence bioimaging with an all-semiconductor laser picosecond pulse source[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(18): 2726~2728
- 38 T. Schlauch, M. Li, M. R. Hofmann *et al.*. High peak power femtosecond pulses from modelocked semiconductor laser

- in external cavity[J]. *Electron. Lett.*, 2008, **44**(11): 678~679
- 39 G. Tandoi, C. N. Ironside, J. H. Marsh *et al.*. Output power limitations and improvements in passively mode locked GaAs/AlGaAs quantum well lasers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2012, **48**(3): 318~327
- 40 A. Mar, R. Helkey, W. X. Zou *et al.*. High-power mode-locked semiconductor lasers using flared waveguides[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **66**(26): 3558~3560
- 41 S. Hoogland, S. Dhanjal, A. C. Tropper *et al.*. Passively mode-locked diode-pumped surface-emitting semiconductor laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(9): 1135~1137
- 42 A. Garnache, S. Hoogland, A. C. Tropper *et al.*. Sub-500-fs soliton-like pulse in a passively mode-locked broadband surface-emitting laser with 100 mW average power[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(21): 3892~3894
- 43 R. Haring, R. Paschotta, A. Aschwendan *et al.*. High-power passively mode-locked semiconductor lasers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2002, **38**(9): 1268~1275
- 44 D. Lorensen, H. J. Unold, D. J. H. C. Maas *et al.*. Towards wafer-scale integration of high repetition rate passively mode-locked surface-emitting semiconductor lasers[J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**(8): 927~932
- 45 A. Aschwendan, D. Lorensen, H. J. Unold *et al.*. 2. 1-W picosecond passively mode-locked external-cavity semiconductor laser[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(3): 272~274
- 46 A. Aschwendan, D. Lorensen, H. J. Unold *et al.*. 10 GHz passively mode-locked external-cavity semiconductor laser with 1.4 W average output power[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(13): 131102
- 47 B. Rudin, V. J. Wittwer, D. J. H. C. Maas *et al.*. High-power MIXSEL: an integrated ultrafast semiconductor laser with 6.4 W average power[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(26): 27582~27588
- 48 D. Lorensen, D. J. H. C. Maas, H. J. Unold *et al.*. 50-GHz passively mode-locked surface-emitting semiconductor laser with 100-mW average output power[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2006, **42**(8): 838~847
- 49 K. Kim, S. Lee, P. Delfyett. 1.4 kW high peak power generation from an all semiconductor mode-locked master oscillator power amplifier system based on extreme chirped pulse amplification (X-CPA)[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(12): 4600~4606
- 50 J. T. Gopinath, B. Chann, R. K. Huang *et al.*. 980-nm monolithic passively mode-locked diode lasers with 62 pJ of pulse energy[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(12): 937~939
- 51 S. Schwertfeger, A. Klehr, A. Liero *et al.*. High-power picosecond pulse generation due to mode-locking with a monolithic 10-mm-long four-section DBR laser at 920 nm[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(23): 1889~1891
- 52 S. Hoogland, A. Garnache, I. Sagnes *et al.*. 10-GHz train of sub-500-fs optical soliton-like pulses from a surface-emitting semiconductor laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(2): 267~269
- 53 K. Jasim, Q. Zhang, A. V. Nurmikko *et al.*. Picosecond pulse generation from passively modelocked vertical cavity diode laser at up to 15 GHz pulse repetition rate[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(1): 34~36
- 54 K. Jasim, Z. Qiang, A. V. Nurmikko *et al.*. Passively modelocked vertical extended cavity surface emitting diode laser [J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(4): 373~375
- 55 K. G. Wilcox, A. H. Quarterman, V. Apostolopoulos *et al.*. 175 GHz, 400-fs-pulse harmonically mode-locked surface emitting semiconductor laser[J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(7): 7040~7045
- 56 Z. Qiang, K. Jasim, A. V. Nurmikko *et al.*. Operation of a passively mode-locked extended-cavity surface-emitting diode laser in multi-GHz regime[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(3): 885~887
- 57 P. Klopp, U. Griebner, M. Zorn *et al.*. Pulse repetition rate up to 92 GHz or pulse duration shorter than 110 fs from a mode-locked semiconductor disk laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **98**(7): 071103
- 58 K. G. Wilcox, A. H. Quarterman, H. Beere *et al.*. High peak power femtosecond pulse passively mode-locked vertical-external-cavity surface-emitting laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(14): 1021~1023
- 59 Ying Ding, W. Ji, Jingxiang Chen *et al.*. 980-nm external-cavity passively mode-locked laser with extremely narrow RF linewidth[C]. *SPIE*, 2013, **8640**: 86401U
- 60 L. Yan, M. Breivik, F. Cheng-Yong *et al.*. A low repetition rate all-active monolithic passively mode-locked quantum-dot laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(14): 1019~1021
- 61 D. I. Nikitichev, K. A. Fedorova, Y. Ding *et al.*. Broad wavelength tunability from external cavity quantum-dot mode-locked laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, **101**(12): 121107
- 62 Y. Ding, M. A. Cataluna, D. Nikitichev *et al.*. Broad repetition-rate tunable quantum-dot external-cavity passively mode-locked laser with extremely narrow radio frequency linewidth[J]. *Appl. Phys. Express*, 2011, **4**(6): 062703
- 63 L. Zhang, L. S. Cheng, A. L. Gray *et al.*. Low timing jitter, 5 GHz optical pulses from a monolithic two-section passively mode-locked 1250/1310 nm quantum dot laser for high speed optical interconnects[C]. *OFC*, 2005. OWM4
- 64 M. -T. Choi, W. Lee, J. -M. Kim *et al.*. Ultrashort, high-power pulse generation from a master oscillator power amplifier based on external cavity mode locking of a quantum-dot two-section diode laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(22): 221107
- 65 Y. Ding, D. I. Nikitichev, I. Krestnikov *et al.*. Quantum-dot external-cavity passively modelocked laser with high peak power and pulse energy[J]. *Electron. Lett.*, 2010, **46**(22): 1516~1518

- 66 X. Huang, A. Stintz, H. Li *et al.*. Passive mode-locking in 1.3  $\mu\text{m}$  two-section InAs quantum dot lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(19): 2825~2827
- 67 M. G. Thompson, A. R. Rae, X. Mo *et al.*. InGaAs quantum-dot mode-locked laser diodes[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2009, **15**(3): 661~672
- 68 M. G. Thompson, K. T. Tan, C. Marinelli *et al.*. Transform-limited optical pulses from 18 GHz monolithic modelocked quantum dot lasers operating at  $\sim 1.3 \mu\text{m}$ [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(5): 346~347
- 69 E. U. Rafailov, M. A. Cataluna, W. Sibbett *et al.*. High-power picosecond and femtosecond pulse generation from a two-section mode-locked quantum-dot laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(8): 081107
- 70 M. G. Thompson, C. Marinelli, X. Zhao *et al.*. Colliding-pulse modelocked quantum dot lasers[J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(5): 248~250
- 71 M. G. Thompson, A. Rae, R. L. Sellin *et al.*. Subpicosecond high-power mode locking using flared waveguide monolithic quantum-dot lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(13): 133119
- 72 D. Nikitichev, Y. Ding, M. Cataluna *et al.*. High peak power and sub-picosecond Fourier-limited pulse generation from passively mode-locked monolithic two-section gain-guided tapered InGaAs quantum-dot lasers[J]. *Laser Phys.*, 2012, **22**(4): 715~724
- 73 H. Yokoyama, A. Sato, H. C. Guo *et al.*. Nonlinear-microscopy optical-pulse sources based on mode-locked semiconductor lasers[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(22): 17752~17758
- 74 Y. Ding, D. Nikitichev, I. Krestnikov *et al.*. Fundamental and harmonic mode-locking with pulse repetition rate between 200 MHz and 6.8 GHz in a quantum-dot external-cavity laser[C]. CLEO/EQEC, 2011. CF\_P23
- 75 Y. Ding, R. Aviles-Espinosa, M. A. Cataluna *et al.*. High peak-power picosecond pulse generation at 1.26  $\mu\text{m}$  using a quantum-dot-based external-cavity mode-locked laser and tapered optical amplifier[J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(13): 14308~14320
- 76 A. Rutz, V. Liverini, D. J. H. C. Maas *et al.*. Passively modelocked GaInNAs VECSEL at centre wavelength around 1.3  $\mu\text{m}$ [J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(16): 926~927
- 77 M. G. Thompson, C. Marinelli, K. T. Tan *et al.*. 10 GHz hybrid modelocking of monolithic InGaAs quantum dot lasers[J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(15): 1121~1122
- 78 M. Kuntz, G. Fiol, M. Lämmlin *et al.*. Direct modulation and mode locking of 1.3  $\mu\text{m}$  quantum dot lasers[J]. *New J. Phys.*, 2004, **6**: 181
- 79 D. Larsson, K. Yvind, J. M. Hvam. Long all-active monolithic mode-locked lasers with surface-etched Bragg gratings[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(21): 1723~1725
- 80 H. Lianping, R. Dylewicz, M. Haji *et al.*. Monolithic 40 GHz passively mode-locked AlGaInAs-InP 1.55  $\mu\text{m}$  MQW laser with surface-etched distributed Bragg reflector[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(20): 1503~1505
- 81 H. Lianping, M. Haji, R. Dylewicz *et al.*. 10-GHz mode-locked extended cavity laser integrated with surface-etched DBR fabricated by quantum-well intermixing[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(2): 82~84
- 82 L. Hou, M. Haji, R. Dylewicz *et al.*. 160 GHz harmonic mode-locked AlGaInAs 1.55  $\mu\text{m}$  strained quantum-well compound-cavity laser[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(23): 3991~3993
- 83 H. Lianping, M. Haji, Q. Bocang *et al.*. 10-GHz AlGaInAs/InP 1.55  $\mu\text{m}$  passively mode-locked laser with low divergence angle and timing jitter[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(15): 1079~1081
- 84 L. P. Hou, M. Haji, C. Li *et al.*. 80-GHz AlGaInAs/InP 1.55  $\mu\text{m}$  colliding-pulse mode-locked laser with low divergence angle and timing jitter[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2011, **8**(7): 535~540
- 85 Y. C. Xin, C. Y. Lin, Y. Li *et al.*. Monolithic 1.55  $\mu\text{m}$  GaInNAsSb quantum well passively modelocked lasers[J]. *Electron. Lett.*, 2008, **44**(9): 581~582
- 86 K. Merghem, A. Akrouf, A. Martinez *et al.*. Short pulse generation using a passively mode locked single InGaAsP/InP quantum well laser[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(14): 10675~10683
- 87 G. Raybon, P. B. Hansen, U. Koren *et al.*. Two contact, 1 cm long, monolithic extended cavity laser actively mode-locked at 4.4 GHz[J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(24): 2220~2221
- 88 P. B. Hansen, G. Raybon, U. Koren *et al.*. InGaAsP monolithic extended-cavity lasers with integrated saturable absorbers for active, passive, and hybrid mode locking at 8.6 GHz[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(13): 1445~1447
- 89 K. Sato, K. Wakita, I. Kotaka *et al.*. Monolithic strained-InGaAsP multiple-quantum-well lasers with integrated electroabsorption modulators for active mode locking[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(1): 1~3
- 90 K. Sato, I. Kotaka, Y. Kondo *et al.*. Actively mode-locked strained-InGaAsP multiquantum-well lasers integrated with electroabsorption modulators and distributed Bragg reflectors[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1996, **2**(3): 557~565
- 91 K. Sato, I. Kotaka, Y. Kondo *et al.*. Active mode locking at 50 GHz repetition frequency by half-frequency modulation of monolithic semiconductor lasers integrated with electroabsorption modulators[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(18): 2626~2628
- 92 P. B. Hansen, G. Raybon, U. Koren *et al.*. Monolithic semiconductor soliton transmitter[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(2): 297~301

- 93 T. Hoshida, L. Hai-Feng, M. Tsuchiya *et al.*. Subharmonic hybrid mode-locking of a monolithic semiconductor laser[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 1996, **2**(3): 514~522
- 94 T. Hoshida, H. F. Liu, M. Tsuchiya *et al.*. Extremely low-amplitude modulation in a subharmonically hybrid mode-locked monolithic semiconductor laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(9): 1160~1162
- 95 E. Zielinski, E. Lach, J. Bouayad-Amine *et al.*. Monolithic multisegment mode-locked DBR laser for wavelength tunable picosecond pulse generation[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1997, **3**(2): 230~232
- 96 S. Arahira, Y. Katoh, Y. Ogawa. 20 GHz subpicosecond monolithic modelocked laser diode[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(5): 454~456
- 97 S. Arahira, Y. Matsui, T. Kunii *et al.*. Optical short pulse generation at high repetition rate over 80 GHz from a monolithic passively modelocked DBR laser diode[J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(11): 1013~1015
- 98 S. Arahira, Y. Matsui, T. Kunii *et al.*. Transform-limited optical short-pulse generation at high repetition rate over 40 GHz from a monolithic passive mode-locked DBR laser diode[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(12): 1362~1365
- 99 S. Arahira, Y. Ogawa. Passive and hybrid modelockings in a multi-electrode DBR laser with two gain sections[J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(10): 808~809
- 100 H. F. Liu, S. Arahira, T. Kunii *et al.*. Generation of wavelength-tunable transform-limited pulses from a monolithic passively mode-locked distributed Bragg reflector semiconductor laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(10): 1139~1141
- 101 L. Hai-Feng, S. Arahira, T. Kunii *et al.*. Tuning characteristics of monolithic passively mode-locked distributed Bragg reflector semiconductor lasers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1996, **32**(11): 1965~1975
- 102 M. J. Strain, P. M. Stolarz, M. Sorel. Passively mode-locked lasers with integrated chirped Bragg grating reflectors[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2011, **47**(4): 492~499
- 103 J. Akbar, L. Hou, M. Haji *et al.*. High average power (200 mW) 40 GHz mode-locked DBR lasers with integrated tapered optical amplifiers[C]. CLEO, 2012. CW1N.7
- 104 M. C. Wu, Y. K. Chen, T. Tanbun-Ek *et al.*. Tunable monolithic colliding pulse mode-locked quantum-well lasers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(10): 874~876
- 105 Y. K. Chen, M. C. Wu, T. Tanbun-Ek *et al.*. Multicolor single-wavelength sources generated by a monolithic colliding pulse mode-locked quantum well laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(11): 971~973
- 106 Y. K. Chen, M. C. Wu, T. Tanbun-Ek *et al.*. Subpicosecond monolithic colliding-pulse mode-locked multiple quantum well lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(12): 1253~1255
- 107 A. Härkönen, J. Rautiainen, L. Orsila *et al.*. 2  $\mu\text{m}$  mode-locked semiconductor disk laser synchronously pumped using an amplified diode laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(13-16): 1332~1334
- 108 A. Härkönen, J. Paajaste, S. Suomalainen *et al.*. Picosecond passively mode-locked GaSb-based semiconductor disk laser operating at 2  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(24): 4090~4092
- 109 A. Härkönen, C. Grebing, J. Paajaste *et al.*. Modelocked GaSb disk laser producing 384 fs pulses at 2  $\mu\text{m}$  wavelength [J]. *Electron. Lett.*, 2011, **47**(7): 454~456