

半导体脉冲激光器发展综述

丘焕然¹, 刘偲嘉², 甘育娇², 姜海明^{1*}, 朱铮涛¹, 谢康¹, 袁伟超¹, 唐常钦¹

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广州 510006; 2. 广州市自来水有限公司, 广州 510600)

摘要: 半导体脉冲激光器的结构、材料、加工工艺和驱动电源特性是其性能的重要影响因素, 结合脉冲宽度、输出功率和重复频率等技术指标, 综述了半导体脉冲激光器的发展与研究现状, 着重介绍了窄脉冲叠加直流偏置法、储能元件的应用、高速开关的级联或阵列、可编程逻辑器件的应用以及器件选型和布局创新这 5 种驱动电源性能提升方式, 并指出目前技术存在的不足。最后, 对半导体脉冲激光器的发展趋势进行了展望。

关键词: 半导体脉冲激光器; 脉冲宽度; 输出功率; 重复频率; 驱动电源

中图分类号: TN365 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2021)10-0001-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.10.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Overview of semiconductor pulse lasers development

QIU Huanran¹, LIU Sijia², GAN Yujiao², JIANG Haiming^{1*}, ZHU Zhengtao¹,
XIE Kang¹, YUAN Weichao¹, TANG Changqin¹

(1. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Guangzhou Water Supply Limited Company, Guangzhou 510600, China)

Abstract: The structure, material, processing technology and driving power characteristics of semiconductor pulse laser are important factors affecting its performance. Combined with the technical indexes such as pulse width, output power and repetition frequency, the development and research status of semiconductor pulse laser are summarized. This paper focuses on five ways to improve the performance of driving power supply, including narrow pulse superposition direct-current (DC) bias method, application of energy storage elements, cascade or array of high-speed switches, application of programmable logic devices, device selection and layout innovation, and points out the shortcomings of current technology. Finally, the development trend of semiconductor pulse laser is prospected.

Key words: semiconductor pulsed laser; pulse width; output power; repetition frequency; driving power

0 引言

半导体激光器具有体积小、结构简单、功耗低、光/电转换效率高和易于调制等特点, 在民用和军用方面有较好的应用前景^[1-5]。目前, 半导体激光器在通信、测距、加工和医疗等领域应用广泛^[6]。随着半导体光电子技术的发展, 各行业对半导体激光器的需求愈发强

烈, 对其性能的要求也越来越高。

半导体激光器的驱动源分连续型驱动和脉冲驱动 2 种模式。连续型驱动模式一般在激光二极管(LD)的阈值条件附近设置直流偏置, 调节驱动电流控制其输出, 在此过程中必须为 LD 增设反馈网络, 通过负反馈调节实时控制驱动电流, 确保 LD 稳定地工作; 脉冲驱动模式中的驱动源以特定脉宽、频率的信号驱动 LD, 对于脉冲电流纹波要求不高的场景, 一般无需增设上述反馈网络。因此, 脉冲驱动模式更具发展潜力。在脉冲驱动模式下, 由于驱动过程中只在 PN 结产生微弱的热效应, 故在半导体激光器输出功率较低的情况下可以不为其增设温控系统。与连续驱动模式相比, 脉冲驱动模式下的 LD 能承受的脉冲信号幅值较高, 导致 LD 输出光束的能量强度较大^[7]。因此, 研制具有较高技术指标要求(如研制脉冲参数、输出功率和

收稿日期: 2021-03-17。

基金项目: 国家自然科学基金项目(11874126)资助; 广东省“领军人才”项目(400180001)资助。

作者简介: 丘焕然(1995—), 男, 硕士研究生, 现就读于广东工业大学机电工程学院机械工程专业, 主要从事半导体激光器驱动电路研究, 参与了国家自然科学基金项目、“领军人才”微纳米光电子器件的设计、装备项目。

* 通信作者: 姜海明(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为光纤通信、光电器件等。



丘焕然,刘偲嘉,甘育娇,等:半导体脉冲激光器发展综述

重复频率等)的窄脉冲半导体激光器具有重要的意义。本文综述半导体脉冲激光器的发展与研究现状,并对半导体激光器性能的提升方式进行介绍。

1 半导体脉冲激光器的发展与研究现状

目前,半导体激光器性能的提升方式主要有2种:一种是优化半导体激光器结构、材料和加工工艺;另一种是提升半导体激光器驱动电源特性^[9]。

1.1 半导体脉冲激光器在新材料、新结构和新工艺技术方面的发展

改良激光器与其驱动电路的结构、优化工艺技术和提升半导体材料的性能,可增强半导体激光器的各项性能指标,尤其是新型半导体材料的不断创新使其性能提升更具发展潜力。

改进激光器管芯结构,能有效提高激光器输出功率。2009年,中国科学院陈彦超等人^[10]将驱动电路与激光器管芯集成封装成整体的激光器模块,得到了脉宽为7 ns、最大光功率为176 W的大功率窄脉冲,其多管芯阵列排序示意图如图1所示。单管半导体激光器作为窄脉冲激光光源时输出光功率小,激光器多管芯组合虽能实现大功率输出,但其结构等效电路的参数提取困难。针对这一问题,2012年,长春理工大学辛德胜等人^[12]提出了提取驱动电路参数的一种简便方法——基于外特性测量法,并应用此方法设计了一种板载结构的半导体激光器驱动电路,得到脉宽为8.3 ns、输出功率为180 W的光脉冲。

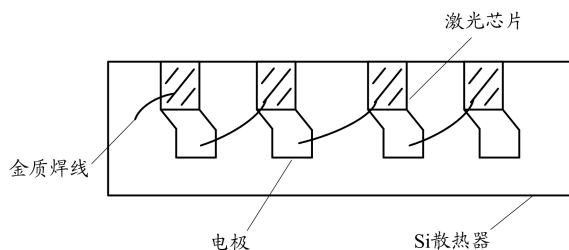


图1 多管芯阵列排列示意图

近年来,半导体锁模激光器在结构方面的研究也取得进展。2012年,STRAIN M J等人^[13]提出了一种紧凑的半导体锁模激光器(DBR MLL),其几何结构如图2所示,该结构主要由3个部分组成:可饱和吸收器(SA)、增益(GS)和分布式布喇格反射器(DBR)。采用DBR的频谱滤波在各种驱动条件下产生Q开关锁模,表现出了强大的无源开关锁模能力。锁模脉冲宽度约为3.5 ps,脉冲峰值功率与平均功率比高达121, Q开关在频率1~4 GHz连续可调。2014年,中国科学

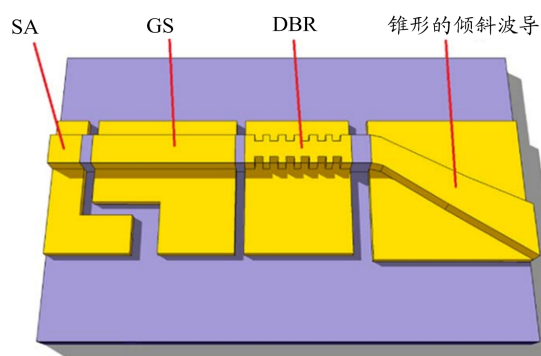


图2 三节式DBR MLL示意图

院与英国邓迪大学^[14]联合研制了针对760 nm波段的第一半导体锁模超短脉冲激光器——基于AlGaAs多量子阱结构的多节LD被动锁模,该激光器产生波段大约为766 nm的脉冲,其脉冲持续时间大约低至4 ps,在激光腔长度为1.8 nm、1.5 nm时,其对应的脉冲重复率分别为19.4 GHz、23.2 GHz。

随着加工技术的发展,工艺精度不断提高,有利于提升激光器性能。2016年,HE Y等人^[15]采取0.13 μm集成互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺,设计了全集成CMOS驱动电路,用超短电流脉冲直接调制LD的方法来生成皮秒激光脉冲,其模具显微图如图3所示。该CMOS驱动电路由压控环形振荡器、压控延迟线、异或电路和电流源4个子电路组成。其中,振荡器产生的初始方波与延时方波进行异或,异或电路因此产生超短电流脉冲;再将CMOS芯片封装后与印制电路板(PCB)上的LD互连,有效降低了寄生参数的影响。此激光源的输出光脉冲的脉宽为151 ps,重复频率为5.3 MHz,峰值功率为6.4 mW。

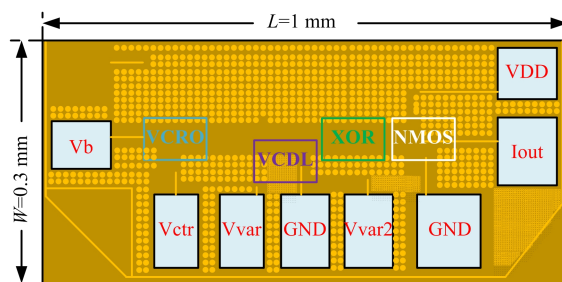


图3 模具显微图

2017年,华东师范大学和东京大学^[16]采用40 nm微电子工艺技术,联合设计了一种低成本的集成CMOS脉冲发生器,通过外围电路将CMOS脉冲发生器转换为最小脉宽为80 ps且可调的电动脉冲管,其可调谐输出电压为0.9~1.5 V,宽调谐范围可达270 ns。根据激光系统的增益开关特性,用此电脉冲直接驱动

半导体激光器,在电脉冲宽度调谐到大约为 1.5 ns 时,激光器能产生脉宽为 100 ps 的光脉冲。2016 年, HUIKARI J 等人^[17]对活性层厚度与约束因子之比 d_a/Γ_a 约为 3 μm 、条宽/腔长为 30 μm /3 mm 的体量子阱 LD 进行了测试,该半导体激光器能实现脉冲能量为 1 nJ 量级、脉冲长度为 100 ps、脉冲幅值为 6~8 A 和持续时间为 1 ns 的电流脉冲。2018 年,TAJFAR A 等人^[18]采用 160 nm 的单片集成工艺(BCD)技术,设计了一种高功率、高强度和单芯片集成的 LD 驱动器,该半导体激光驱动器能产生脉宽小于 1 ns、重复频率为 40 MHz 和峰值电流高达 20 A,且完全可编程的电脉冲;另外,他们还通过嵌入电流数/模转换(DAC)的方式,为 LD 提供其所需的阈值电流,改善 LD 的响应时间。2019 年,中国科学技术大学的 FENG B 等人^[19]提出了一种采用 130 nm CMOS 技术的可调幅度和脉宽的激光源驱动器,该驱动器能生成可调脉宽为 300 ps~3.8 ns、峰值电流为 70 mA 以及重复频率为 625 Mb/s 的电流脉冲。

1.2 半导体脉冲激光器在驱动电源性能提升方面的发展

提升半导体脉冲激光器驱动电源特性的方法主要有窄脉冲叠加直流偏置、储能元件的应用、高速开关的级联或阵列、可编程逻辑器件的应用以及器件的选型与布局创新等方法。

1.2.1 窄脉冲叠加直流偏置法

早期,研究人员通过窄脉冲叠加直流偏置的增益开关方法获得了超短脉冲。1997 年,天津大学的黄超等人^[20]通过增益开关的方法产生了超短光脉冲,该系统输出的光脉冲宽度达到了 ps 级别,但系统过于复杂,输出功率较低。2000 年,吉林大学的孙伟等人^[21]采用窄电流脉冲叠加在直流偏置的增益开关方法使半导体激光器产生皮秒脉冲,通过增大微波功率的方式获得更窄的脉冲,但功耗较高。

对于特定的电脉冲,激光器存在一最佳的直流偏置,若低于此偏置,激光器输出功率降低、脉宽变宽;若高于此偏置,由于弛豫振荡的影响,光脉冲会出现系列子脉冲,导致激光器输出光脉冲失真^[21-22]。由此可见,窄脉冲叠加直流偏置法虽然能获得 ps 级别的超短脉冲,但需要在最佳偏置电流情况下才能获得优良特性的光脉冲,有一定的局限性,且功耗高、输出功率低以及系统复杂等问题限制了其发展。

1.2.2 储能元件的应用

1992 年,重庆大学的刘葵等人^[23]采用 NPN-PNP 互补隔离法将场效应管的脉冲触发信号压窄,并选取合理的电容容值,根据电容快速充电/放电原理,使激

光器输出脉冲光,该驱动电路能得到脉宽为 50 ns、0~20 A 连续可调的驱动电流。2011 年,苏州大学的陈祚海等人^[24]选用高频晶体管作为快速开关,采用电容和电感作为储能电路,电容储存能量为 LD 受激输出光脉冲,其调制频率为 52 MHz、脉冲占空比小于 12.5%,输出光功率为 15 mW。

此后,研究人员通过结合直流偏置的方法,对上述技术进行了改进。2011 年,中国科学院上海光学精密机械研究所的杨燕等人^[25]采用高速 CMOS 触发脉冲驱动金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET),通过控制 MOSFET 的导通关断和电容充电放电产生快速的电压跳变,LD 受激输出脉冲光,其驱动电路主回路如图 4 所示。控制电源 V_1 、电容和限流电阻的值即可控制脉冲的脉宽与峰值电流。驱动电路中电源 V_2 用来提供偏置电流,通过改变偏置电流值达到平滑激光脉冲波形的目的。该驱动电路能得到脉宽为 2.2~4.9 ns、重复频率为 0~50 kHz 和峰值电流为 0~72 A 的电脉冲。因此,通过合理地选择储能元件,能有效提升半导体激光器驱动电路的输出功率,但缺点是脉冲宽度无法连续可调,该驱动电路的电源 V_1 需几百伏,功耗高。

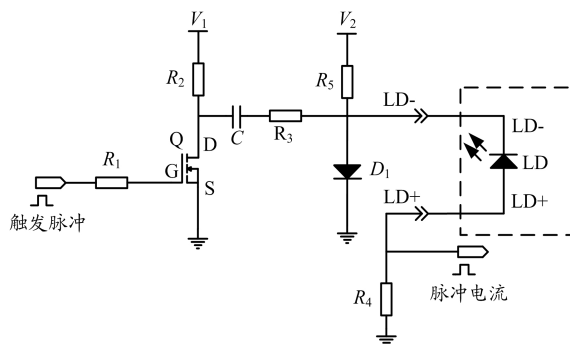


图 4 驱动电路主回路

1.2.3 高速开关的级联或阵列

研究人员采取高速开关级联或阵列的方法,有效解决了上述储能元件虽能输出大功率但脉宽不可调的问题。

2005 年,天津工业大学的朱娜等人^[26]根据晶体管的雪崩效应,通过两级雪晶体管阵列,获得了脉宽为 7 ns、峰值电流为 6 A 的大电流窄脉冲,但此方法的供电电源电压需达到上百伏,功耗大的缺点限制了其发展应用。在此基础上,天津工业大学的刘旭升等人^[3]对此行了改进,通过采用多个雪崩晶体管级联的方法,获得了半峰全宽为 1.51 ns、峰值电流为 12.5 A 和重复频率为 100 kHz 的大电流窄脉冲,但供电电源采用 400 V 高压直流电源,仍然存在功耗大的问题。

2008年,中国科学院的张寿棋等人^[27]研制了脉宽为10 ns、峰值电流为20 A和重复频率为1 MHz的连续可调脉冲,该驱动电路通过双晶体管构成推挽输出,形成常开常闭门对管驱动高速MOSFET,有效提高了带负载能力,其供电电源电压只需30 V,解决了大电压、大功耗的问题。为了获得更低功耗的驱动电路,2009年,NISSINEN J等人^[28]提出了一种CMOS电流脉冲发生器,其电路结构图如图5所示,该发生器采用0.35 μm 的CMOS工艺,由4个平行的n型金属氧化物半导体晶体管组成,通过缩放驱动缓冲链实现快速切换,获得了脉冲峰值为1 A、上升时间小于1 ns和脉冲宽度为2.5 ns的高速电流脉冲。这些步进式控制信号和简单的脉冲整形技术的供电电压低至5 V,功耗极低。

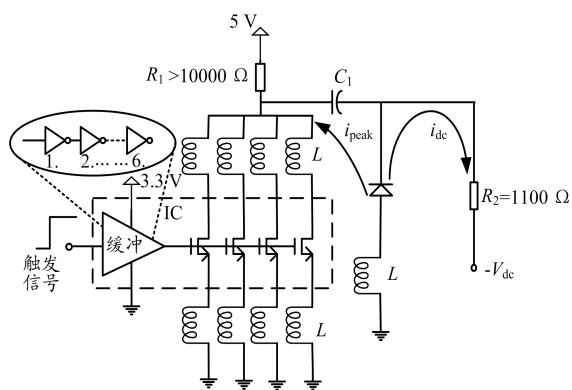


图5 电路结构图

为了实现脉宽更窄的光脉冲。2010年,中国电子科技集团公司第三十四研究所的辛耀平等人^[29]将任意波形发生器作为脉冲信号发生源,电路上应用单极差分放大器、源极跟随器和高速电流开关,研制了脉宽小于2 ns、峰值输出功率mW级的高速脉冲激光器。其中,高速电流开关由4个双极型三极管与1个场效应管组成,通过双极型三极管产生的负电容能近似中和与其级联的三极管的密勒电容,提高了其频率特性,极大缩短了开关时间。但是,电路级联场效应晶体管(FET)数量往往存在限制。2014年,中国科学院西安光学精密机械研究所的林平等人^[30]突破了这一技术难题,将33路GaAs FET级联设计成整形电脉冲产生电路,用电脉冲直接驱动半导体激光器,可产生脉宽为10 ns、时域调节精度为330 ps的任意形状整形激光脉冲。同年,为了实现更大电流的输出,北京大学的陈彦超等人^[31]以MOSFET为开关器件,将雪崩晶体管作为驱动器,设计了大电流窄脉冲的半导体激光器驱动电

路,该电路通过将多个晶体管构成的脉冲发生单元并联,满足了大电流的要求,其中预触发的设计解决了上述并联方式带来的脉宽宽度问题;该驱动电路在供电电压为195 V条件下,能产生脉宽为8.6 ns、脉冲幅值为124 A的脉冲电流。针对上述大电压的问题,2019年,中国科学院的WEN S等人^[32]提出了将雪崩晶体管作为预开关器件的方法,有效提高了输出功率、减小了脉冲宽度和上升沿,该驱动器实现了小电压供电、大功率输出的功能。

1.2.4 可编程逻辑器件的应用

随着可编程器件的高速发展,由于其具有集成度高、灵活性大的特点,且触发脉冲具有上升沿快、频率高和脉宽窄且连续可调等优良性能,使得半导体脉冲激光器更具发展潜力。可编程逻辑器件的应用,有效解决了功耗高的问题。部分可编程逻辑器件应用于半导体脉冲激光器的发展现状如表1所示。

表1 可编程逻辑器件应用于半导体脉冲激光器的现状

主要技术方法	技术指标	文献
直接数字频率合成原理,现场可编程门阵列(FPGA)产生触发脉冲信号驱动雪崩晶体管	得到脉宽宽度为3 ns、峰值电压为9 V和频率可调的驱动脉冲	[33]
高速FPGA实现对半导体激光器重复频率、脉冲宽度和脉冲峰值的控制	得到脉宽最小为1.5 ns、重复频率最大为1 MHz和光功率优于200 mW的理想半导体激光器脉冲种子源	[34]
采用复杂可编程逻辑器件(CPLD)作为时序产生电路	具有低功耗、体积小特点,该电路能产生脉冲宽度几十纳秒、峰值电压大于20 V的驱动电压	[35]
将FPGA作为逻辑数字信号芯片输出脉冲,通过功率放大和脉冲整形后,驱动开关模块输出脉冲电流	获得了峰值电流为20 A,重复频率为10 Hz~1 MHz、脉宽为16 ns~1 μs 连续可调的高速窄脉	[36]
短脉冲发生器和短脉冲驱动组成高速电路,其短脉冲发生器由CPLD、电平转换器、可编程延迟芯片和与门芯片组成,输出触发脉冲控制MOSFET开关短脉冲	获得了脉宽为538 ps~10 ns、重复频率为500 kHz~100 MHz连续可调、输出功率为537 μW 的光脉冲	[37]
采用CPLD输出参数可调的初级脉冲信号,经后级电路压缩和整形处理后,驱动激光器的驱动芯片产生触发脉冲信号	获得了重复频率为1 Hz~100 MHz连续可调、脉宽最小为10 ns的光脉冲	[38]

1.2.5 器件选型和布局创新

随着光电子器件的飞速发展,对芯片集成度的要求愈来愈高,高性能的器件与布局的创新成为半导体激光器驱动源特性提升的重要手段。

2010年,天津航技术物理研究所的王金花等人^[39]通过提高电源电压、PCB合理布局布线、元器件合理选择以及开发激光器组件等方法,有效提升了激光发射的光脉冲前沿速度,得到了脉宽小于5 ns、脉冲前沿小于2 ns和输出功率大于100 W的大功率窄脉冲,在激光引信应用中提高了其测距精度与抗云雾干扰能力。

2013年,中国工程物理研究院的王卫等人^[40]为了稳定驱动砷化镓光导开关,通过分析MOSFET的导通特性,采用合理的高速MOSFET设计了大功率半导体激光器窄脉冲驱动电路,为激光器提供了脉宽为15 ns、抖动均方根小于200 ps和输出功率可达75 W的脉冲电流。若通过改进脉冲发生电路,得到优质的初始触发脉冲,激光器能输出脉宽更小的光脉冲。同年,林肯实验室的SIRIANI D F等人^[41]研制了瓦特级、纳秒脉冲半导体激光器与集成驱动器,将激光器和低电感电容器阵列(LICA)直接焊接到定制的5 mm×5 mm的BiCMOS驱动器芯片上,其激光驱动器配置如图6所示。在5 ns的窗口中向平板耦合光波导激光器(SCOWL)提供大约为10 A的电流,从而产生大于1 W的高功率光脉冲。通过光纤布喇格光栅保持SCOWL的稳定,从而实现窄的光谱线宽发射,同时对激光器施加预偏置,达到了抑制法布里-珀罗(F-P)模式激光的目的,并在窄光谱带宽内产生矩形光脉冲。

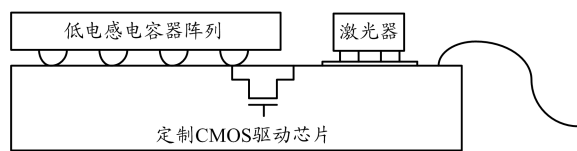


图6 激光驱动器配置图

2015年,北京交通大学光信息科学与技术研究所的李永亮等人^[42]以iC-HG为驱动芯片设计了脉冲为980 nm激光器的高性能驱动电路,该电路使激光器既能输出连续光也能输出脉冲光,脉宽最小为10 ns,直流光功率可达180 mW,脉冲峰值输出功率可达160 mW,脉宽和激光功率实现了连续可调。

2020年,中国电子科技集团公司第十三研究所的张厚博等人^[9]研制了一种16线集成半导体窄脉冲激光器模块,该模块主要由高密度排列的激光器芯片、集成驱动电路和光电混合集成封装结构组成。其中,窄脉冲驱动电路采用新型的GaN功率器件。与传统的

MOSFET相比,该器件开关损耗、结电容等寄生参数较小,具有更快的开关速度。由于激光器芯片的高密度排列、集成封装和高精度贴片工艺的使用,极大地减小了模块的体积,实现了16线单独控制,得到脉宽为6 ns、高功率为70 W、功耗低至4 W的高性能模块。16线模块整体结构与光脉冲波形如图7所示。该模块可朝着更多线束、更窄脉宽和更高功率的方向发展。

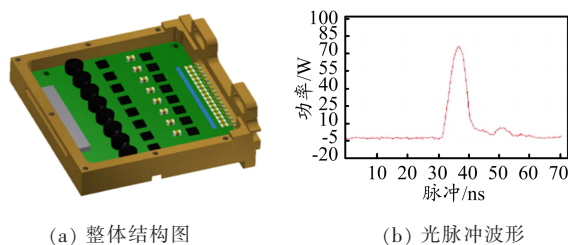


图7 16线模块整体结构与光脉冲波形图

2 结束语

综上所述,半导体脉冲激光器主要通过优化激光器结构、材料和加工工艺及改进驱动电源特性的2种方式实现性能提升。本文主要对这2种方式的半导体脉冲激光器发展情况进行总结与分析,着重介绍了提升驱动电源特性的5种方法。目前,脉冲宽度在5~10 ns的技术相对成熟,ps级脉宽已成为该领域的必然发展趋势。但是,激光器在追求大功率的同时往往存在功耗高的问题,仍需进一步研究和解决。随着数字化与半导体光电子技术的发展,各领域对半导体脉冲激光器需求愈来愈大,因此研究大功率、窄脉冲、低功耗和小型化半导体脉冲激光器具有重大意义。

参考文献:

- [1] 荆云波.窄脉冲半导体激光器驱动电源技术研究[D].长春:长春工业大学,2017.
- [2] 刘锋.脉冲半导体激光测距机的研制及应用[J].红外与激光工程,2003,32(2):118-122.
- [3] 刘旭升,林久令,张海明,等.纳秒脉冲半导体激光驱动器的研究[J].激光技术,2006,30(4):445-448.
- [4] 李明月,何君.国外军用大功率半导体激光器的发展现状[J].半导体技术,2015,40(5):321-327.
- [5] 张厚博,王晓燕,崔璐,等.16线集成窄脉冲半导体激光器模块的研制[J].半导体技术,2020,45(9):696-700.
- [6] XIAO J T, DA P Z, JOSEPH M, et al. Research and implementation of 100 A pulsed current source pulse edge compression [J]. Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2016, 23(2): 73-78.
- [7] 韩团军,韦平平,黎高峰.基于FPGA的高精度半导体激光器温度控

丘焕然,刘偲嘉,甘育娇,等:半导体脉冲激光器发展综述

制系统设计[J]. 激光杂志,2018,39(9):47-50.

[8] 金银花,许文海,杨明伟,等. 改善半导体激光器驱动电源性能的研究[J]. 光电子技术,2005,25(1):44-47,62.

[9] WU L B. The design of semiconductor laser driver and simulation analysis of constant current drive circuit based on multisim 10 [J]. Advanced Materials Research, 2014(1061-1062): 1043-1048.

[10] 宁永强,陈泳屹,张俊,等. 大功率半导体激光器发展及相关技术概述[J]. 光学学报,2021,41(1):191-200.

[11] 陈彦超,赵柏秦,李伟. 用于纳秒级窄脉冲工作的大功率半导体激光器模块[J]. 光学精密工程,2009,17(4):695-700.

[12] 辛德胜,张剑家,程勇杰. 大功率窄脉冲半导体激光光源等效电路参数研究[J]. 兵工学报,2012,33(12):1485-1492.

[13] STRAIN M J, ZANOLA M, MEZŐSI G, et al. Ultrashort Q-switched pulses from a passively mode-locked distributed Bragg reflector semiconductor laser[J]. Optics letters, 2012, 37(12): 4732-4734.

[14] WANG H, KONG L, FORREST A, et al. Ultrashort pulse generation by semiconductor mode-locked lasers at 760 nm [J]. Optics Express, 2014, 22(21): 25940-25946.

[15] HE Y, LI Y, YADID-PECHT O, et al. A compact picosecond pulsed laser source using a fully integrated CMOS driver circuit: proceedings of SPIE[C]. San Francisco: SPIE, 2016.

[16] CHEN S, DIAO S, LI P, et al. Broadband tunable integrated CMOS pulser with 80-ps minimum pulse width for gain-switched semiconductor lasers [EB/OL]. [2021-03-17]. <https://www.nature.com/articles/s41598-017-07138-3/>.

[17] HUIKARI J, AVRUTIN E, RYVKIN B, et al. High-energy sub-nanosecond optical pulse generation with a semiconductor laser diode for pulsed TOF laser ranging utilizing the single photon detection approach[J]. Optical review(Tokyo, Japan), 2016, 23(3): 522-528.

[18] TAJFAR A, ZAMPROGNO M, VILLA F, et al. A 20 a sub-nanosecond integrated CMOS laser diode driver for high repetition rate SPAD-based direct time-of-flight measurements [C]//2018 International Conference on Computing, Electronics & Communications Engineering (iCCECE), Aug. 16-17, 2018, Southend, UK. New York: IEEE, 2018: 272-276.

[19] FENG B, LIANG F, WANG X, et al. A laser source driver with adjustable amplitude and pulse-width in 130-nm CMOS technology for quantum key distribution experiments[EB/OL]. [2021-03-17]. <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5100318>.

[20] 黄超,倪文俊,赵玉强,等. 高速半导体激光器超短光脉冲产生及脉宽测试[J]. 天津大学学报,1997(3):80-83.

[21] 孙伟,张大明,李德辉,等. 半导体激光器短电脉冲调制光脉冲的产生与控制[J]. 吉林大学自然科学学报,2000(4):47-50.

[22] 康俊,李明中,隋展,等. 电脉冲调制下半导体激光器保真输出研究[J]. 激光技术,2002,26(4):287-289.

[23] 刘龚,邹健,谢培玉,等. 半导体激光器(LD)的大电流窄脉冲驱动源[J]. 压电与声光,1992(6):25-27.

[24] 陈祚海,陈伟元. 高速窄脉冲激光器驱动电路设计 [J]. 科技信息, 2011(17):548-549.

[25] 杨燕,俞敦和,吴姚芳,等. 新型窄脉冲半导体激光器驱动电源的研制[J]. 中国激光,2011,38(2):24-29.

[26] 朱娜,林久令,王广济,等. 雪崩晶体管在纳秒脉冲驱动电路中的应用[J]. 光电子技术与信息,2005,18(6):29-32.

[27] 张寿祺,楼祺洪,周军,等. 连续可调纳秒脉冲 LD 驱动电源的研制[J]. 激光技术,2008,32(4):396-398.

[28] NISSINEN J, KOSTAMOVAARA J. A 1 A laser driver in 0.35 μm complementary metal oxide semiconductor technology for a pulsed time-of-flight laser rangefinder[EB/OL]. [2021-03-17]. <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.3242275>.

[29] 辛耀平,余志强,黄涌,等. 高速纳秒脉冲激光器驱动电源的设计[J]. 广西通信技术,2010(4):39-42.

[30] 林平,刘白玉,蔡永胜,等. 基于半导体激光器的脉冲整形技术[J]. 红外与激光工程,2014,43(1):103-107.

[31] 陈彦超,冯永革,张献兵. 用于半导体激光器的大电流纳秒级窄脉冲驱动电路[J]. 光学精密工程,2014,22(11):3145-3151.

[32] WEN S, WANG M, XIE J, et al. Large current nanosecond pulse generating circuit for driving semiconductor laser diode[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2019, 61(4): 867-872.

[33] SHU Y, OU-YANG X, LIU B Y, et al. Pulse driver circuit for directly modulated semiconductor laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(3): 519-522.

[34] 苏君,邱琪,谢军,等. 1.064 μm 半导体激光脉冲种子源的设计[J]. 应用光学,2008(6):967-969.

[35] 何成林. 半导体激光器驱动电路设计 [J]. 科学技术与工程,2009,9(21):6532-6535.

[36] CUI Z, NIE J, CHEN W, et al. Design and implementation of programmable semiconductor pulse seed laser used in MOPA[C]//Communications & Photonics Conference & Exhibition, Dec. 8-12, 2010, Shanghai, China. New York: IEEE, 2011: 180-181.

[37] WANG X, WANG B, WANG J, et al. Compact sub-nanosecond pulse seed source with diode laser driven by a high-speed circuit [J]. Optics communications, 2018, 416: 84-88.

[38] 覃良标,鲁正,陈昉,等. 一种半导体激光脉冲种子源的设计与实现[J]. 广东通信技术,2020,40(6):64-67.

[39] 王金花,姚宏宝,刘子星. 高功率窄脉冲激光发射电路分析[J]. 红外与激光工程,2010,39(6):1049-1054.

[40] 王卫,夏连胜,谌怡,等. 大功率半导体激光器脉冲驱动电源研制[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2013,11(1):152-156.

[41] SIRIANI D F, SMITH G M, JORDY G, et al. Watt-class, nanosecond-pulse semiconductor laser with integrated driver[EB/OL]. [2021-03-17]. https://www.osapublishing.org/viewmedia.cfm?uri=CLEO_SI-2013-CF1F.5&seq=0.

[42] 李永亮,刘岚岚,吴重庆,等. 980 nm 高速脉冲激光光源的研制[J]. 光学与光电技术,2015,13(5):28-32.