

引用格式: LIU Yuxiang, ZHANG Ruikang, WANG Huan, et al. 25-GHz Semiconductor Mode-locked Laser with Subpicosecond Pulse Output in the 1.5- μm Band (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(2):0251211

刘宇翔,张瑞康,王欢,等. 1.5- μm 波段 25-GHz 重频亚皮秒脉冲输出半导体锁模激光器(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(2): 0251211

1.5- μm 波段 25-GHz 重频亚皮秒脉冲输出 半导体锁模激光器(特邀)

刘宇翔^{1,2,3},张瑞康^{1,2,3},王欢^{1,2,3},陆丹^{1,2,3},赵玲娟^{1,2,3}

(1 中国科学院半导体研究所 材料重点实验室,北京 100083)

(2 中国科学院大学 材料与光电研究中心,北京 100049)

(3 低维半导体材料与器件北京市重点实验室,北京 100083)

摘要:针对高速光采样、光频梳以及光通信系统应用,研制了 1.5 μm 波段高重频超短脉冲输出半导体锁模激光器。基于 AlGaInAs/InP 材料体系,采用两段式单片集成锁模结构,引入稀释波导结构,综合降低光限制因子、提升材料饱和能量、降低腔内损耗,从而降低有源区色散对脉冲的影响并提升脉冲峰值功率,最终在 1.5 μm 波段实现了重复频率 24.3 GHz、脉冲宽度 680 fs 的亚皮秒光脉冲输出,脉冲光谱宽度为 7.2 nm,脉冲峰值能量为 525 mW。

关键词:半导体激光器;锁模激光器;单片集成;超短脉冲;稀释波导

中图分类号:TN248.4

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225102.0251211

0 引言

超短光脉冲源在光模数转换(Analog-Digital Conversion, ADC)^[1]、光纤通信^[2]、光生 THz 通信^[3]、微波光子学^[4]等系统中均有重要应用。锁模技术是产生超短脉冲的常用手段,可以利用多种类型的锁模激光器,如固体锁模激光器、光纤锁模激光器以及半导体锁模激光器等产生不同重复频率的短脉冲输出。其中,固体锁模激光器多用于产生 MHz 量级重频飞秒超短脉冲,光纤锁模激光器用于产生 MHz 至几十 GHz 量级重频皮秒脉冲,而半导体锁模激光器主要用于产生 10 GHz 以上重频皮秒脉冲。在光 ADC 以及光纤通信系统中,通常希望采样光源或多波长光源兼具高重频、短脉冲、小体积、低成本以及可批量生产的特点。半导体锁模激光器正是满足上述要求的理想光源。

典型的半导体锁模激光器包括一个增益区和一个饱和吸收(Saturable Absorber, SA)区。增益区为光信号提供放大,SA 区作为一个与光功率相关的开关窗,对低于饱和光功率的信号强烈吸收,而对高于其饱和光功率的信号基本透明。当光脉冲在包含增益区和 SA 区的谐振腔内往复振荡时,脉冲不断放大、脉冲宽度不断被压缩,最终输出振荡频率与腔长成反比的短脉冲序列。重复频率、脉冲宽度和峰值功率是锁模激光器的三个基础参数。半导体锁模激光器的重复频率一般在几 GHz 到上百 GHz 之间,脉冲宽度通常为皮秒量级,峰值功率大多在百毫瓦量级。当脉冲在半导体材料中传输时,受增益带宽、增益色散^[5]以及自相位调制效应^[6]影响,脉冲会出现展宽、压缩、光谱畸变等现象。特别是对于低重频(<10 GHz)的半导体锁模激光器,由于腔长较长,当采用全有源结构时,增益色散会导致较为严重的脉冲展宽,往往需要集成无源波导来降低有源材料中增益色散的影响^[7]。

为得到性能优异的半导体锁模激光器,需要对材料体系、材料结构、有源区和饱和吸收区结构以及腔内

基金项目:重点研发计划(No.2019YFB2203800)

第一作者:刘宇翔(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向为 InP 基光子集成芯片。Email: liuyuxiang@semi.ac.cn

共同第一作者:张瑞康(1973-),男,副研究员,博士,主要研究方向为半导体激光器、光子集成等。Email: rkzhang@semi.ac.cn

导师(通讯作者):陆丹(1978-),男,研究员,博士,主要研究方向为半导体激光器、光子集成等。Email: ludan@semi.ac.cn

收稿日期:2021-10-22;录用日期:2021-12-03

<http://www.photon.ac.cn>

损耗做综合优化。InGaAsP/InP和AlGaInAs/InP是两种常用的材料体系。研究表明,AlGaInAs/InP具有更好的温度特性、饱和功率特性以及脉冲特性^[8],英国格拉斯哥大学采用AlGaInAs/InP材料体系、5对应变量子阱的两段式锁模结构,实现了40 GHz、700 fs的短脉冲序列输出^[8]。他们还通过减少量子阱个数为3对,并增加远场缩减层、增加半导体光放大器放大的方案实现了40 GHz重频、4 ps脉冲宽度、550 mW峰值功率的大功率锁模激光器输出^[9]。中国科学院半导体研究所同样采用AlGaInAs/InP材料体系,通过优化SA区的长度,采用碰撞锁模结构,实现了80 GHz重复频率的脉冲输出,脉冲宽度1.75 ps、峰值功率188 mW^[10]。

通常,高重频半导体锁模激光器更容易实现较窄的脉冲宽度,目前实现1 ps以下脉冲输出的半导体锁模激光器腔长一般多在1 mm以下,也即重复频率40 GHz以上。在光ADC应用中,为了兼容电处理速度,往往希望对重复频率较低(如10 GHz~25 GHz)的超短脉冲进行时分复用,从而实现高重频(如40~100 GHz)的采样脉冲。然而低重频锁模激光器腔长较长,腔内增益色散影响严重,脉冲宽度多在数皮秒量级。

本文研制了25 GHz重复频率亚皮秒输出的半导体锁模激光器。通过采用AlGaInAs/InP应变量子阱并引入下稀释波导层来提升材料饱和能量、降低腔内损耗以及有源区色散的影响,并通过优化SA区的长度来兼顾高功率与窄脉冲输出。最终在1.5 μm波段,利用两段式锁模结构,在1.7 mm腔长下实现了重复频率24.3 GHz、脉冲宽度680 fs的亚皮秒光脉冲输出,脉冲光谱宽度为7.2 nm,峰值能量为525 mW。并将该结构与InGaAsP/InP材料体系的6量子阱、两段式锁模激光器进行了性能对比,研究表明,所研制的25 GHz重频半导体锁模激光器具有更短的脉冲宽度以及脉冲质量。

1 器件设计与制备

设计中采用了AlGaInAs/InP材料体系。该材料体系具有较大的导带带阶差和较小的价带带阶差,更适于高温工作,且SA区反向偏压范围更大^[8],更有利于大功率、短脉冲输出。在材料结构和器件结构设计方面,主要从材料饱和能量 E_{sat} 和腔内损耗角度进行优化。为实现有效锁模,需要SA区的饱和能量 E_{satSA} 低于增益区饱和能量 E_{satG} ,也即需要SA区先于增益区饱和,这样才能实现脉冲输出。增益区与SA区的饱和能量的比值 $R=E_{\text{satG}}/E_{\text{satSA}}$ 影响脉冲宽度,一般来说,脉冲宽度随着 R 的增大而减小^[7]。饱和能量 E_{sat} 可表示为

$$E_{\text{sat}} = \frac{h\nu A}{\Gamma dg/dN} \quad (1)$$

式中, $h\nu$ 为光子能量, A 为模场面积, Γ 为光限制因子, dg/dN 为微分增益^[6]。对于反偏状态的SA区,其内部载流子密度很低,微分增益高于正向偏置的增益区,因此,SA区具有较低的饱和能量。通常希望提高增益区的饱和能量来获得更高的脉冲功率、更小的脉冲宽度以及更小的自相位调制效应。由式(1)可知,可以通过降低有源区微分增益、减小光限制因子、增加模场面积的方法来提高饱和能量。减小有源区量子阱个数是降低微分增益的常用手段,同时量子阱个数的减少也可以降低光限制因子,提高饱和光功率。在设计中,将量子阱个数从常规的5组或6组减少为4组。另一方面,在 n 型层引入了一层折射率较高的稀释波导层,一方面进一步减小光限制因子并增加模场面积,另一方面稀释波导层也可以将光场从自由载流子吸收损耗较高的 p 型层拉向损耗较低的 n 型层,减小了腔内损耗。随着光限制因子的减小以及光场向 n 型层的转移,有源区增益色散的作用也会减弱,从而在较长腔长下获得更短的脉冲宽度。在SA区的设计上,将SA的长度设计为总腔长的5%~7%之间,以获得脉冲宽度更窄、峰值功率更高的脉冲^[10],同时抑制低频自脉动现象的发生。

AlGaInAs/InP半导体锁模激光器的外延结构如图1。首先在 n 型InP衬底上外延500 nm厚 n 型掺杂的InP缓冲层、InGaAsP/InP稀释波导结构和1 μm厚 n 型InP层。然后依次生长100 nm厚的下限制层,4对AlGaInAs量子阱层(阱/垒)和100 nm厚的AlGaInAs上限制层。上下限制层与量子阱层构成了激光器的波导结构。随后外延

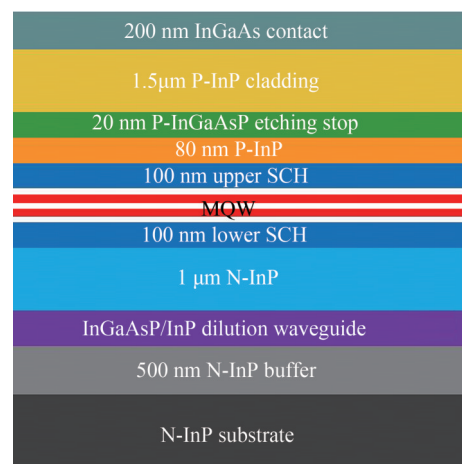


图1 AlGaInAs/InP锁模激光器材料结构
Fig.1 Material structure of the AlGaInAs/InP mode-locked laser

80 nm P-InP层、20 nm厚的P-InGaAsP层、1.5 μm 厚的 p 型InP盖层和200 nm高掺杂的InGaAs层,20 nm厚的P-InGaAsP层用来作为刻脊波导时的刻蚀停止层,高掺杂的InGaAs层用来形成欧姆接触。

器件采用标准半导体激光器工艺制备,芯片为两段式结构,包含增益区与一个SA区。芯片总长度为1 740 μm ,增益区长1 575 μm ,SA长125 μm 。增益区和SA区之间的电隔离通过腐蚀InGaAs接触层实现,隔离区长度为40 μm ,隔离电阻为2 k Ω 。

2 器件性能测试

对芯片进行测试表征过程中,半导体锁模激光器芯片被置于温控平台上并将温度控制在20 $^{\circ}\text{C}$ 。激光器功率-电流曲线($L-I$)通过积分球测量,光谱、重复频率、脉冲宽度以及啁啾特性分别通过光谱分析仪(Advantest Q8384)、频谱分析仪(Agilent PXA-N9030A)、强度自相关仪(APE-150)和频率分辨光学开关(Frequency Resolved Optical Gating, FROG)(Coherent Solutions HR-150)进行性能表征。除 $L-I$ 曲线测试外,其它所有测试均通过拉锥光纤耦合测试。

图2给出了未镀膜芯片的光功率-电流($L-I$)曲线,在未施加反向偏压时,锁模激光器阈值电流50 mA,在300 mA下激光器的输出功率超过35 mW,单边斜率效率0.14。对SA区施加反向偏压后,SA区呈现饱和吸收作用,锁模激光器的阈值电流比未偏压时增大,输出功率减小,单边斜率效率降低。随着反向偏压的增加,激光器输出功率逐渐降低。通过控制激光器的注入电流以及反向偏压,可以获得不同宽度和功率的脉冲输出。

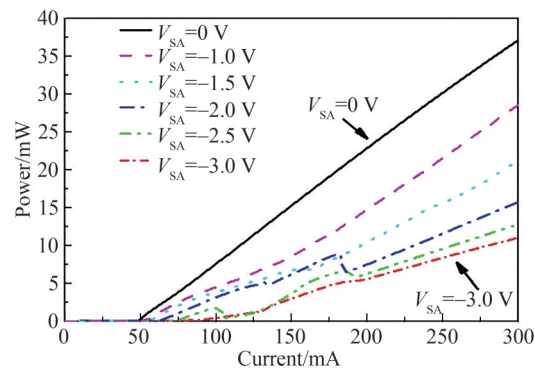


图2 AlGaInAs/InP锁模激光器在不同反向偏压下的 $L-I$ 曲线
Fig.2 $L-I$ curve of the AlGaInAs/InP mode-locked laser under different reverse voltage

在增益区正向偏置电流250 mA,SA区反向偏压-3 V情况下,获得了该芯片的最短脉冲输出状态。图3为利用自相关仪测得的脉冲自相关曲线及其拟合结果。自相关迹表明脉冲序列的时间间隔为41 ps,对应于重复频率约为24.3 GHz。拟合脉冲呈洛伦兹型,经反卷积计算后脉冲宽度为680 fs。图4为脉冲的光

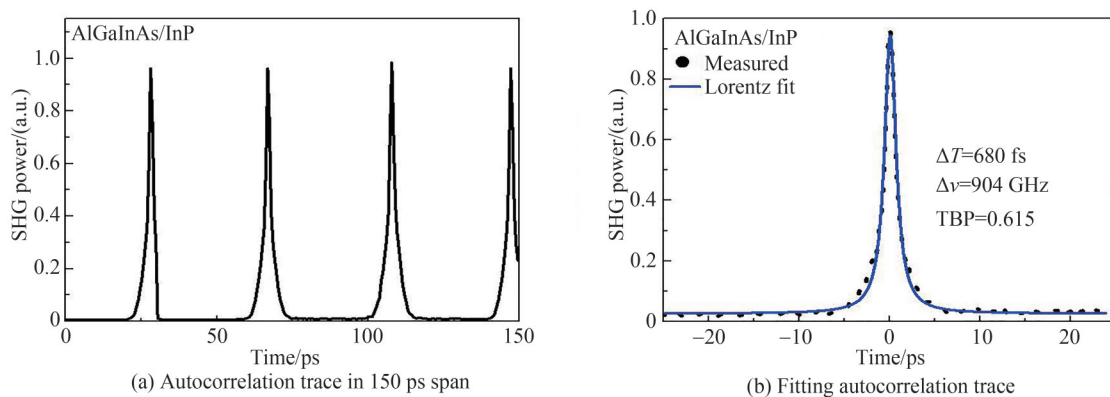


图3 AlGaInAs/InP锁模激光器脉冲自相关曲线
Fig.3 Pulse autocorrelation trace of the AlGaInAs/InP mode-locked laser

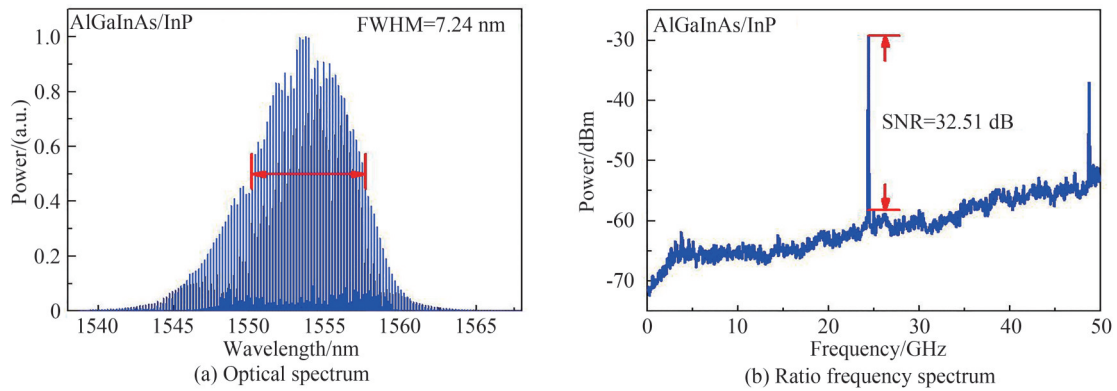


图4 AlGaInAs/InP锁模激光器脉冲光谱及频谱特性

Fig.4 Optical and RF spectrum of the AlGaInAs /InP mode-locked laser

谱及射频频谱。由图4(a)可知锁模脉冲半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)光谱宽度带宽为7.2 nm,可以计算得到脉冲的时间带宽积(TBP)为0.615,时间带宽积大于洛伦兹型脉冲转换极限0.221,脉冲存在啁啾。脉冲的射频频谱通过50 GHz带宽的高速探测器经光电转换后,由频谱仪测量。由图4(b)可知,脉冲的重复频率为24.3 GHz,信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)32 dB,脉冲处于较好的锁模状态。

为获取脉冲的啁啾特性,利用FROG对脉冲做进一步分析,图5(a)为测量得到的锁模脉冲的谱图,通过FROG可以得到脉冲精确的强度分布和相位信息。可以看出,脉冲能量集中在 ± 1 ps范围内(以红色区域为基准)。图5(b)为利用FROG测量得到的脉冲幅度及瞬时频率信息。可以看出,FROG测量得到的脉冲与自相关仪测得的脉冲形状一致,相位特性上呈现上啁啾特性,脉冲前沿为负啁啾,后沿为正啁啾,在脉冲中心部分的啁啾近似为线性。

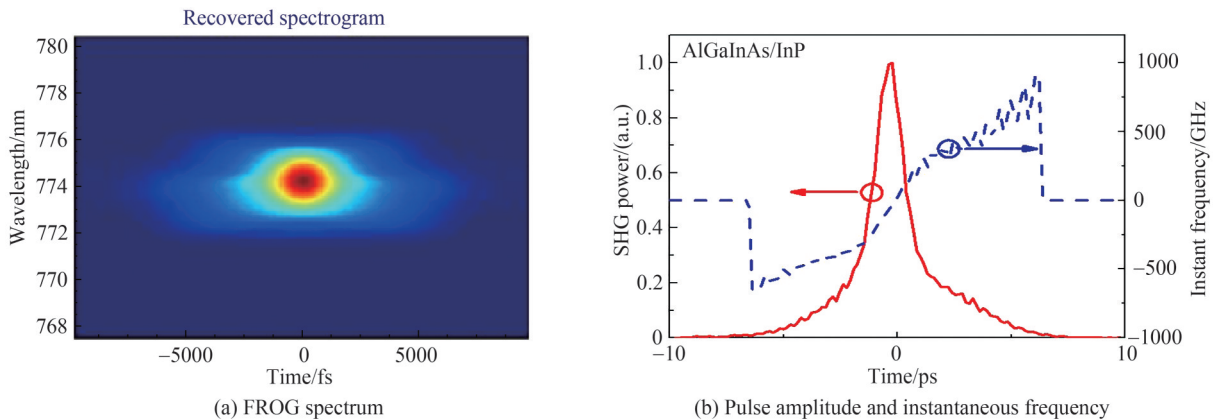


图5 AlGaInAs/InP锁模激光器脉冲FROG测试

Fig.5 FROG test of the AlGaInAs/InP mode-locked laser

作为对比,测试了基于InGaAsP/InP材料体系的传统锁模激光器脉冲特性。该锁模激光器采用6对量子阱、两段式锁模结构,工作频率为24.5 GHz。与设计的AlGaInAs/InP锁模激光器结构相比,用于对比的InGaAsP/InP锁模激光器具有更大的光限制因子,光场被更多的限制在色散和非线性效应更强的有源区内。图6(a)给出了InGaAsP/InP和AlGaInAs/InP锁模激光器输出脉冲对比。可以看出,用于对比的InGaAsP/InP锁模激光器在脉冲中心附近具有较窄的脉冲宽度,在两翼处出现脉冲展宽的平台,脉冲底部比本文设计的锁模激光器宽2~3倍,该现象意味着脉冲具有更复杂的波形或相位分布。脉冲的光谱如图6(b),光谱宽度约为2 nm。为进一步明确InGaAsP/InP锁模激光器脉冲特征,采用FROG对其进行进一步分析,测得谱图如图7(a),可以看到,该脉冲的频谱分量覆盖范围与AlGaInAs/InP锁模激光器类似,但是脉冲能量明显分散在 $\pm 6\sim 7$ ps内,具有更宽的脉冲宽度。图7(b)为脉冲幅度及瞬时频率信息,可以看出该脉冲前沿伴有较大的频率啁啾,且具有明显的振荡结构,形成不对称的脉冲形状。该振荡结构也导致自相

关曲线两翼出现平台。推测导致25 GHz InGaAsP/InP锁模激光器脉冲质量较差的原因在于该结构的量子阱数量较多,光限制因子较大,材料饱和能量较低,激光被限制在增益色散较严重的有源区传输,在将近2 mm的腔长内传输时,导致容易受到自相位调制效应和增益色散影响,使脉冲出现畸变。而本文所采用的AlGaInAs/InP锁模激光器结构则有效避免了上述不利因素的影响,从而获得25 GHz超短脉冲输出。

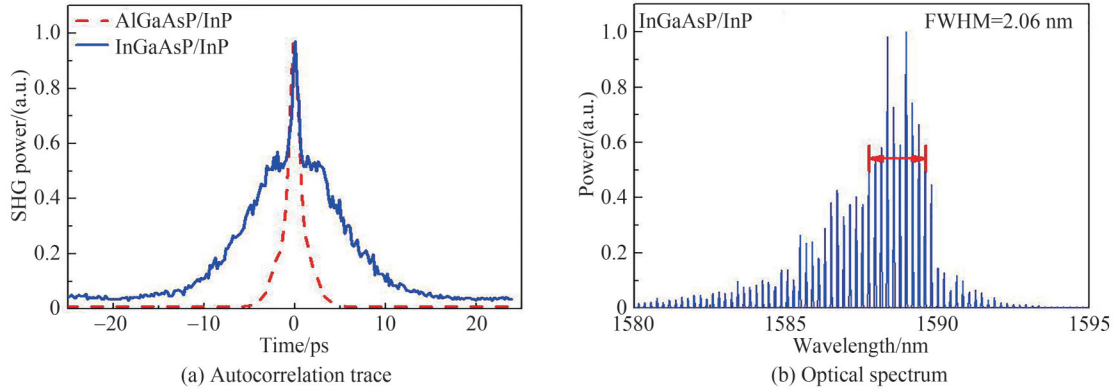


图6 InGaAsP/InP锁模激光器脉冲特性
Fig.6 Pulse characters of the InGaAsP/InP mode-locked laser

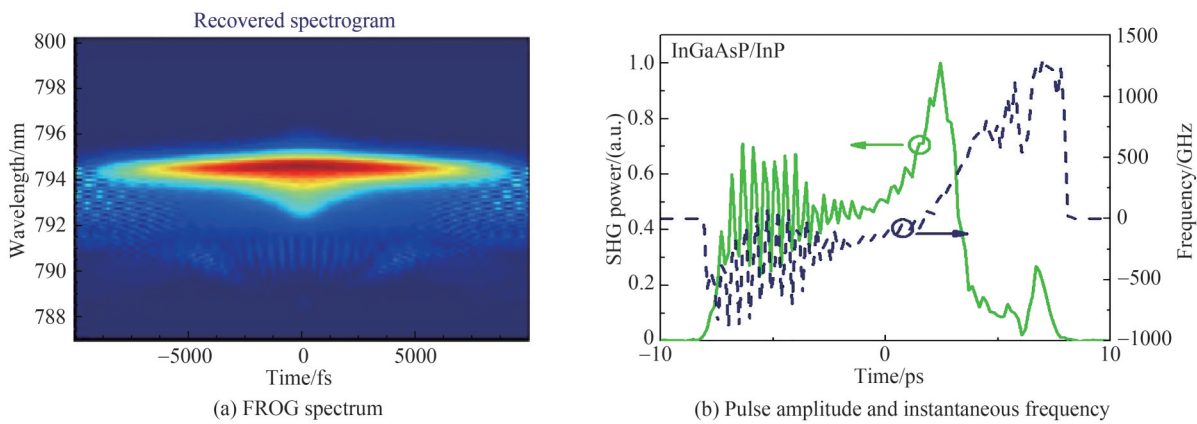


图7 InGaAsP/InP锁模激光器脉冲FROG测试
Fig.7 FROG test of the InGaAsP/InP mode-locked laser

3 结论

本文利用AlGaInAs/InP材料体系研制了25 GHz重频的亚皮秒输出半导体锁模激光器。采用4对应变量子阱并通过引入下稀释波导层减小光限制因子、增加模场面积、提高激光器材料饱和能量,从而减小腔内色散对脉冲的影响。最终在1.5 μm 波段实现了重频24.3 GHz、脉冲宽度680 fs亚皮秒光脉冲输出,脉冲峰值能量为525 mW。

参考文献

- [1] KOENIG S, LOPEZ-DIAZ D, ANTES J, et al. Wireless sub-THz communication system with high data rate[J]. Nature Photonics, 2013, 7(12):977-981.
- [2] KHILO A, SPECTOR S J, GREIN M E, et al. Photonic ADC: overcoming the bottleneck of electronic jitter[J]. Optics Express, 2012, 20(4):4454-4469.
- [3] LIU S, WU X, JUNG D, et al. High-channel-count 20 GHz passively mode-locked quantum dot laser directly grown on Si with 4.1 Tbit/s transmission capacity[J]. Optica, 2019, 6(2):128-134.
- [4] PANG Haiyue, LIN Xiaodong, WU Zhengmao, et al. Widely tunable narrow-linewidth photonic microwave generation using optically injected semiconductor laser combined with optoelectronic loops[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(1): 0114003.

庞海越,林晓东,吴正茂,等.结合光注入半导体激光器与光电环路产生频率大范围可调、窄线宽微波信号[J].光子学报,

- 2018, 47(1): 0114003.
- [5] AGRAWAL G P. Effect of gain dispersion on ultrashort pulse amplification in semiconductor laser amplifiers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, 21(6):1843-1849.
- [6] AGRAWAL G P. Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in SLA [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(11):2297-2306.
- [7] DERICKSON D J, HELKEY R J, MAR A, et al. Short pulse generation using multisegment mode-locked semiconductor lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(10):2186-2202.
- [8] HOU L, STOLARZ P, JAVALOYES J, et al. Subpicosecond pulse generation at quasi-40-GHz using a passively mode-locked AlGaInAs/InP 1.55- μm strained quantum-well laser [J]. IEEE Photonics Technology Letter, 2009, 21(23):1731-1733.
- [9] AKBAR J, HOU L, HAJI M, et al. High peak power (550 mW) 40 GHz mode-locked DBR lasers with integrated optical amplifiers [C]. IEEE Photonic Society 24th Annual Meeting, 2011, 755-756.
- [10] ZHAO P, LIU A, ZHENG W. 80 GHz AlGaInAs/InP colliding-pulse mode-locked laser with high pulse power [J]. Applied Physics Express, 2016, 9(12):122701.

25-GHz Semiconductor Mode-locked Laser with Subpicosecond Pulse Output in the 1.5- μm Band (Invited)

LIU Yuxiang^{1,2,3}, ZHANG Ruikang^{1,2,3}, WANG Huan^{1,2,3}, LU Dan^{1,2,3}, ZHAO Lingjuan^{1,2,3}

(1 Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(2 Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Beijing Key Laboratory of Low Dimensional Semiconductor Materials and Devices, Beijing 100083, China)

Abstract: Ultrashort optical pulse sources have important applications in optical analog-to-digital conversion, optical fiber communication, optical THz communication, microwave photonics and other systems. Mode-locking technology is a common method for generating ultrashort pulses. Various types of mode-locked lasers, such as solid-state mode-locked lasers, fiber mode-locked lasers, and semiconductor mode-locked lasers, can be used to generate short pulse outputs with different repetition frequencies. In optical analog-to-digital conversion systems and optical fiber communication systems, it is usually desired that the sampling light source or multi-wavelength light source has the characteristics of high repetition frequency, short pulse, small size, low cost, and mass production. Semiconductor mode-locked lasers are ideal light sources that meet the above requirements. A 1.5 μm high repetition frequency ultrashort optical pulse source based on a semiconductor mode-locked laser is developed for applications such as high-speed optical sampling, optical frequency comb and optical communication system. By adopting the AlGaInAs/InP material system, a two-section monolithic integrated mode-locking structure with a dilution waveguide layer is developed to decrease the optical confinement factor, increase the saturation energy, reduce the cavity loss, so as to reduce the influence of the gain dispersion and increase the peak pulse power. Finally, a subpicosecond optical pulse with a repetition rate of 24.3 GHz and pulse width of 680 fs is achieved in 1.5 μm band, with a spectral width of 7.2 nm and a peak pulse energy of 525 mW.

Key words: Semiconductor lasers; Mode-locked lasers; Monolithic integrated circuit; Ultra-short pulse; Dilution waveguide

OCIS Codes: 140.5960; 140.4050; 320.5520