

自调Q蓝光半导体碟片激光器及其在水下通信中的应用

沈小雨¹, 王涛^{1*}, 朱仁江¹, 蒋丽丹¹, 佟存柱², 宋晏蓉³, 张鹏^{4**}¹重庆师范大学物理与电子工程学院, 重庆 401331;²中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;³北京工业大学理学部, 北京 100124;⁴重庆师范大学重庆国家应用数学中心, 重庆 401331

摘要 蓝光波段是水下无线光通信的窗口, 高性能的蓝光激光器是水下无线光通信的理想光源。利用半导体碟片激光器增益芯片中的Kerr效应, 在半导体碟片激光器中实现了稳定的自调Q输出, 激光波长为982 nm。利用5 mm长的三硼酸锂(LBO)晶体进行腔内倍频, 实现了脉冲宽度为8 ns、重复频率为61.9 MHz、平均输出功率为702 mW的高功率自调Q蓝光输出。基于上述脉冲蓝光激光器, 搭建了水下无线光通信系统, 并在不同数据传输速率和不同Maalox溶液浓度下, 比较了自调Q脉冲蓝光与连续蓝光的通信性能。实验表明, 在相同条件下, 自调Q脉冲蓝光通信的误码率比连续蓝光的误码率降低了约一个数量级。

关键词 自调Q; 半导体碟片激光器; 倍频; 水下无线光通信

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL241168

1 引言

半导体碟片激光器(SDL)也称光泵浦垂直外腔面发射激光器(OP-VECSEL), 能同时获得高输出功率和良好的光束质量, 并能方便地插入其他光学元件进行频率转换^[1-2]、脉冲运转^[3]、单频工作^[4]等。特别是在频率转换方面, SDL的腔内功率密度高, 光束质量好, 有利于获得高的频率转换效率^[5]。此外, SDL的发射波长可以灵活设计, 通过倍频获得的输出波长可覆盖从紫外到可见光的较宽波段^[6]。

调Q技术常被应用在固体激光器中, 可获得时间宽度在纳秒量级、重复频率在数千到数兆赫兹、峰值功率在兆瓦量级的高能量脉冲^[7-8]。而半导体激光器中载流子的寿命在纳秒量级^[9], 比固体激光介质的上能级寿命(一般在微秒至毫秒量级)小几个数量级。所以, 在半导体激光器中难以通过调Q产生高能量的脉冲。另外, 由于载流子寿命短, 半导体激光器中的调Q容易获得比固体激光器中的调Q更高的重复频率。

典型的调Q技术有电光调Q、声光调Q等主动调

Q技术, 以及利用可饱和吸收体的被动调Q技术。传统半导体激光器通常采用所谓的双节结构调Q, 即激光器包含两个功能不同的区域[增益区和调制区(吸收区)], 两个区通过波导相互连接^[10-12]。若要在半导体激光器中实现皮秒乃至飞秒量级的更短脉冲, 则需要采用增益开关技术^[13]或激光锁模技术^[14]。

鉴于前述半导体增益介质中载流子寿命的限制, SDL中的调Q现象鲜有报道。Yu等^[15]用半导体可饱和吸收镜(SESAM)作为可饱和吸收介质制备了被动调Q的SDL, 张晓健等^[16]则利用Cr⁴⁺:YAG晶体作为可饱和吸收体制备了被动调Q的SDL。

SDL的半导体增益介质具有Kerr效应, 这一点最早被Kornaszewski等^[17]认识到并用来实现了SDL的自锁模。我们也对SDL中的自锁模进行了研究, 发现在自锁模SDL中还存在着调Q包络, 当SDL增益介质中的Kerr效应发挥不充分时, 可以在SDL中获得稳定的自调Q输出。

固体激光器可通过在激光晶体中同时掺杂激活离子和可饱和吸收离子来实现自调Q, 但半导体激光器中的自调Q未见报道。本文利用增益芯片中有源区的

收稿日期: 2024-08-26; 修回日期: 2024-09-03; 录用日期: 2024-09-14; 网络首发日期: 2024-10-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61975003, 61790584, 62025506)、在渝本科高校与中国科学院所属院所合作项目(HZ2021007)、重庆市自然科学基金(CSTB2024NSCQ-MSX0833)、重庆市教委科技计划(KJQN202200557, KJQN202300525)、重庆师范大学基金(23XLB003)

通信作者: *wangt@cqnu.edu.cn; **zhangpeng2010@cqnu.edu.cn

Kerr效应在SDL中获得了稳定的自调Q输出。这种自调Q的SDL不需要其他任何外部调制即可实现纳秒量级的脉冲输出,在器件的紧凑小型化方面具备独特的优势。另外,SDL具有波长灵活性,且方便在腔内进行频率转换,因此自调Q运转的SDL的应用范围可以得到拓展。

本文基于上述SDL增益介质中的Kerr效应,在982 nm波长处实现了稳定的自调Q运转。利用三硼酸锂(LBO)作为非线性频率变换晶体,保持激光器处于调Q状态,通过腔内倍频获得了波长为491 nm的脉冲蓝光输出。因为蓝光波段是水下无线光通信的良好窗口,所以把实验搭建的脉冲蓝光系统作为通信光源,建立了完整的水下无线光通信系统,并在不同数据传输速率和不同Maalox溶液浓度下,比较了自调Q脉冲蓝光与连续蓝光的通信性能。

2 自调Q蓝光SDL

2.1 实验装置

实验中所使用的SDL增益芯片的设计波长为980 nm,外延片采用逆向生长的结构,如图1(a)所示。GaAs基上首先生长高Al组分的AlGaAs刻蚀阻挡层,然后是GaAs保护层、用于阻挡载流子扩散到芯片表面的高势垒AlGaAs层、多量子阱(MQWs)有源区。有源区包括12个InGaAs/GaAsP

量子阱,InGaAs量子阱的发射波长为980 nm。有源区之上是30对高Al组分和低Al组分AlGaAs交替构成的分布式布拉格反射镜(DBR),其反射谱的中心波长位于980 nm附近,反射带宽约为100 nm。外延结构的最后是抗氧化的GaAs层。生长好的外延片被划分为尺寸为4 mm×4 mm的小块芯片,分别用钛、铂、金对外延片的最后端面进行金属化,并将其键合到铜热沉上,通过化学腐蚀方法把芯片的基质层刻蚀掉。为了对芯片的温度进行有效控制,将增益芯片、金刚石和铜热沉焊接在一起,并在铜热沉后端粘贴上热电制冷器(TEC)进行温度控制。实验的环境温度为20℃,湿度为40%,TEC温度设定在15℃。

自调Q腔内倍频蓝光SDL的光路图及实物照片如图1(b)所示。激光谐振腔为Z形折叠腔,由增益芯片底部的DBR、第一折叠镜M1、第二折叠镜M2及后端镜M3构成。M1和M2的曲率半径分别为150 mm和100 mm,M3为平镜。所有反射镜均镀有对980 nm基频激光高反的膜层,其中M2还镀有对490 nm倍频蓝光高透的膜层。臂长 $L_1=297$ mm, $L_2=209$ mm, $L_3=88$ mm。在 L_1 中距离芯片大约100 mm处,以布儒斯特角插入厚度为1 mm的石英片,使基频激光变为线偏振光,以满足后续频率转换中相位匹配的要求。

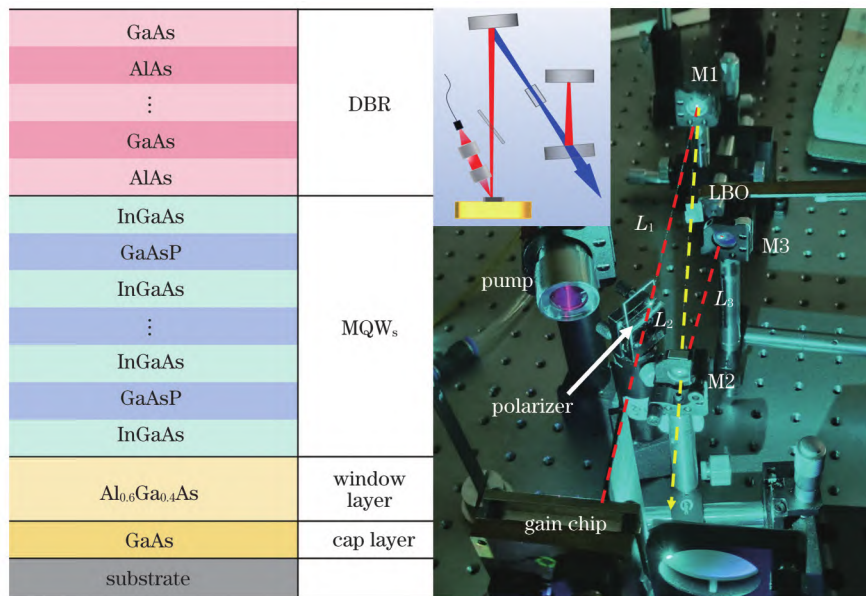


图1 SDL的增益芯片外延结构及谐振腔。(a)外延结构示意图;(b)谐振腔结构示意图及实物照片

Fig. 1 Epitaxial structure of gain chip and resonant cavity of SDL. (a) Schematic of epitaxial structure; (b) schematic and photograph of resonant cavity

考虑到增益芯片上的激光光斑和泵浦光斑尺寸应当满足模式匹配要求,以及启动调Q的光斑条件和后续倍频过程中对光束束腰的要求,实验选用发射波长808 nm的光纤耦合输出半导体激光器作为泵浦光源,其尾纤芯径为400 μm 。泵浦光被成像系统准直聚焦

后,以约为30°的入射角投射到半导体增益芯片上。为了实现高效的倍频过程,将尺寸为3 mm×3 mm×5 mm的LBO晶体放置在M1与M2之间的束腰处,束腰直径约为110 μm ,晶体的两个端面均镀有对980 nm基频光和490 nm倍频光高透的膜层。LBO晶体被放

置在特制的铜夹具中,对晶体进行散热,并使用温度计对晶体的温度进行实时监测。实验中晶体的温度维持在 30 ℃ 左右。

激光器谐振腔内基频激光腔模半径及腔内基频激光和倍频蓝光的偏振态如图 2 所示。在石英片与 LBO

晶体被放入谐振腔前,腔内基频激光的偏振态与自然光相同。以布儒斯特角插入厚度为 1 mm 的石英片后,基频激光变为水平方向的线偏振光。由于实验中使用的是 I 类相位匹配的 LBO 晶体,因此产生的倍频蓝光的偏振方向与基频激光的偏振方向垂直,即为竖直方向。

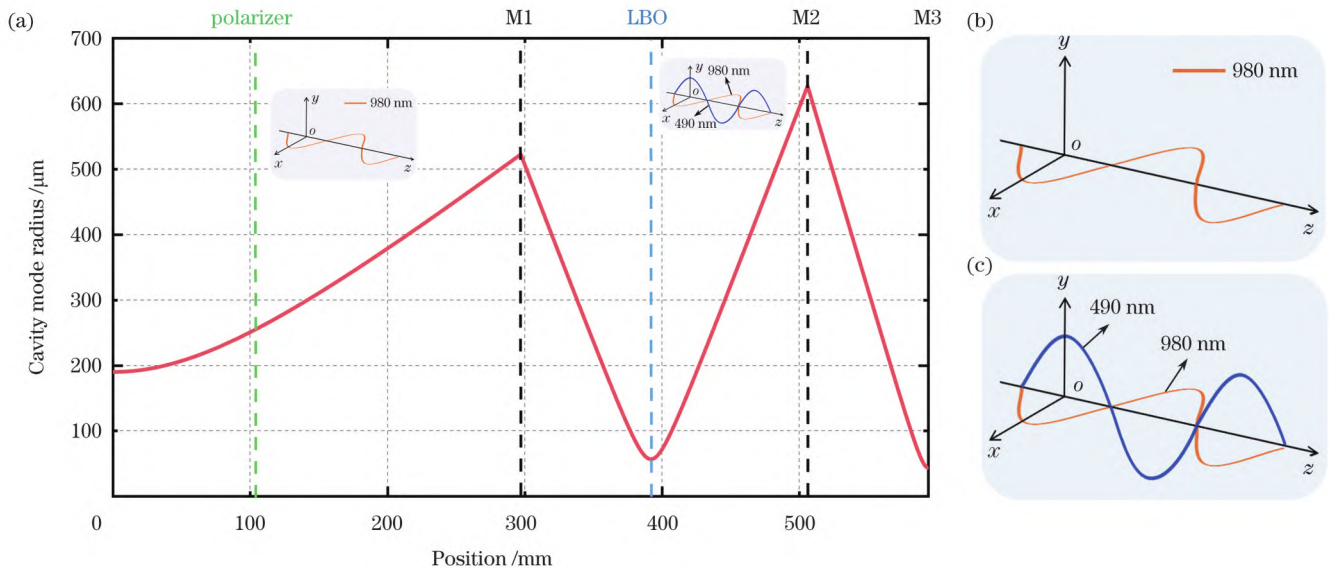


图 2 激光器谐振腔内基频激光腔模半径及腔内基频激光和倍频蓝光的偏振态。(a)基频激光腔模半径;(b)基频激光的偏振态;(c)倍频蓝光的偏振态

Fig. 2 Cavity mode radius of fundamental frequency laser in resonator of laser and polarization states of fundamental frequency laser and frequency-doubled blue light in resonator. (a) Cavity mode radius of fundamental frequency laser; (b) polarization state of fundamental frequency laser; (c) polarization state of frequency-doubled blue light

实验中激光器的脉冲运转状态,通过自调 Q (SQS)技术调控。在 SDL 的增益芯片中,有源区的半导体多量子阱区域存在非线性 Kerr 效应,即该区域的折射率与光场强度成正比,即 $n = n_2 I$, 其中 n 是材料折射率, I 是入射光强, n_2 是 Kerr 系数。对于半导体量子阱材料,上述 n_2 为负值。有源区的非线性 Kerr 效应导致出现与光强相关的等效透镜,脉冲光对应更大的折射率,连续光则对应较小的折射率。当谐振腔内存在光阑,或者增益芯片上存在由泵浦光斑构成的软光阑时,上述等效透镜会使脉冲光在谐振腔内经历更小的损耗,启动激光器的脉冲运转方式并维持稳定的脉冲输出^[18]。如果 Kerr 等效透镜的作用较弱,则 SDL 会工作在调 Q 运行状态,产生脉冲宽度在 ns 量级的调 Q 脉冲,即为自调 Q。如果 Kerr 等效透镜的作用很强,SDL 将有可能工作在锁模状态,产生更短的 ps 量级脉冲。通过改变谐振腔的工作点,使其偏离 Kerr 等效透镜发挥作用的区间,从而使激光器失去调 Q 所需要的条件,工作状态过渡到连续波(CW)运转状态。具体的方法如下:在激光器处于自调 Q 的状态时,调节腔镜 M1,同时适当改变 M1 与 M2 之间的臂长,即可使谐振腔的工作点发生变化,偏离 Kerr 等效透镜发挥作用的区域,调 Q 状态不能继续维持,工作状态过渡到 CW 运转状态。

2.2 自调 Q 蓝光输出特性

实验中用光谱仪(波长范围为 165~1100 nm,分辨率为 0.025 nm)对芯片的荧光(PL)谱和激光光谱进行测量,所得结果如图 3 所示。其中增益芯片的 PL 谱峰值波长为 973 nm,基频激光波长为 982 nm,倍频蓝光波长为 491 nm。

使用高速自由空间探测器(6 GHz 带宽,波长范围为 800~1700 nm,982 nm 处的响应度约为 0.62 A/W)

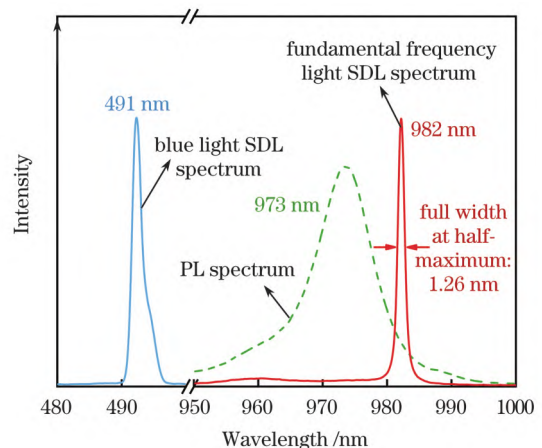


图 3 蓝光 SDL 的光谱、增益芯片的荧光谱和基频 SDL 的光谱
Fig. 3 Spectrum of blue light SDL, PL spectrum of gain chip, and spectrum of fundamental SDL

检测基频光脉冲,利用光电探测器(150 MHz带宽,波长范围为200~1100 nm,491 nm处的响应度为0.2 A/W)检测倍频光脉冲,并在示波器(10 GHz带宽,50 GSa/s采样速率)上记录脉冲波形,在射频(RF)频谱分析仪(7.5 GHz带宽,100 Hz~1 MHz分辨率)上记录脉冲的重复频率。实验所得自调Q蓝光SDL的输出脉冲的

时域波形如图4(a)所示,其中右上角的插图为20 μ s的长时间尺度上的脉冲包络,证明了自调Q激光脉冲具有较好的稳定性。激光脉冲的时间宽度为8 ns,周期(T)为16.1 ns,对应的脉冲重复频率为61.9 MHz,如图4(b)所示。图4(b)中的插图是自调Q激光脉冲的2~6阶高次谐波。

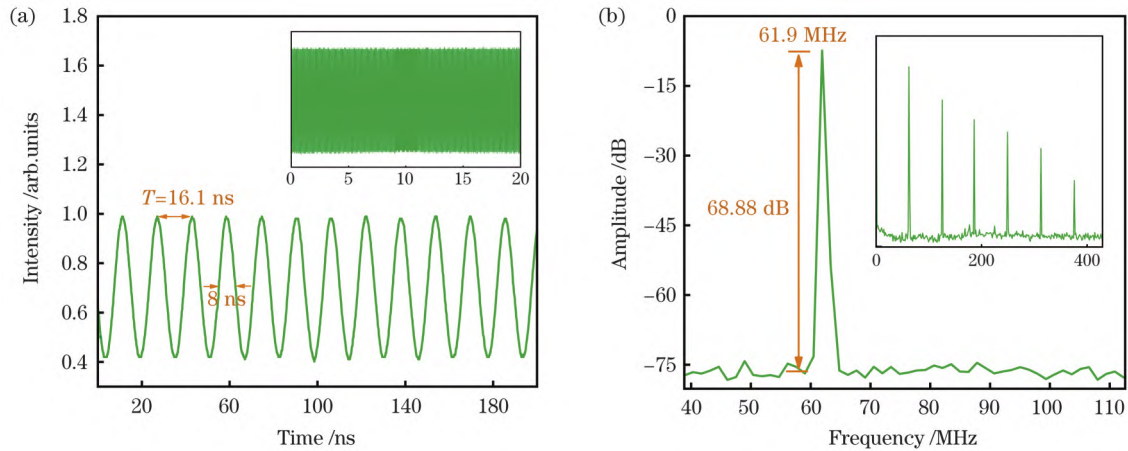


图4 蓝光SQS脉冲的特性。(a)脉冲的时域波形;(b)脉冲的射频频谱

Fig. 4 Characteristics of SQS blue laser pulse train. (a) Temporal waveform of pulse train; (b) radio frequency spectrum of pulse train

增益芯片表面没有镀制对泵浦光高透的膜层,所以会反射掉约30%的泵浦光功率。激光器调Q之前,测量所得的SDL连续运转输出功率如图5所示。当吸收泵浦功率为29.4 W时,基频激光的最大输出功率为4.22 W。LBO晶体放入谐振腔后,测试所得的自调Q蓝光SDL的输出功率也列于图5中。在吸收泵浦功率为28 W时,调Q蓝光脉冲的最大平均输出功率为702 mW。在图5中,随着泵浦功率的增加,腔内循环的基频光功率密度增加,增益芯片中的Kerr效应将越来越强。在泵浦光功率增加到一定程度(图5中的19.0 W)后,芯片中的Kerr效应会引发激光器从自调Q状态向自锁模状态过渡,在激光器中产生一定的不稳定性,使激光器在输出自调Q蓝光的功率上出现小范围的波动,表现为基频光与倍频光的变化趋势不完全一致。在上述功率测量中,基频激光的输出功率由探测器和功率计获得,蓝光输出功率由功率计获得。

自调Q蓝光SDL输出脉冲的重复频率随吸收泵浦功率的变化如图6所示。在吸收泵浦功率从7 W增加至22.4 W的过程中,自调Q脉冲的重复频率增长了6.56 MHz,增长的幅度并不大。不论是在固体激光器还是在半导体激光器中,调Q的重复频率都存在随泵浦功率的增大而上升的趋势。主要原因是:泵浦功率的增加直接导致增益介质内储能的增大,在相同时间内支持产生数目更多的脉冲,从而增加调Q脉冲的重复频率。在半导体碟片激光器SDL中,增益介质为多量子阱材料,载流子的寿命在纳秒量级,脉冲积累和释放的过程比固体激光器更快,其产生的自调Q脉冲的时间宽度和脉冲间隔均处于与载流子寿命相同的数

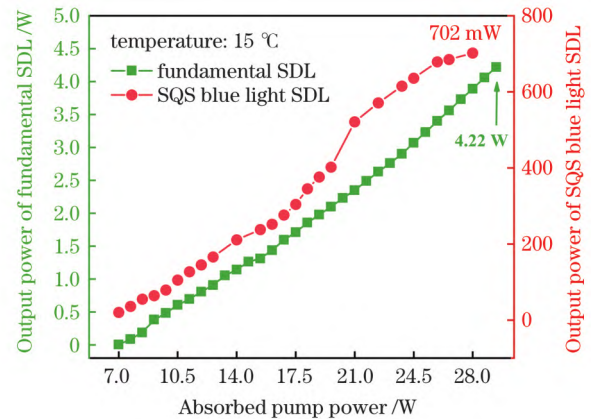


图5 基频SDL和SQS蓝光SDL的输出功率曲线

Fig. 5 Output power curves of fundamental SDL and SQS blue light SDL

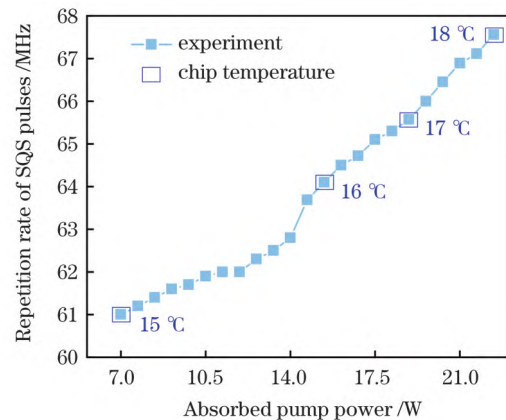


图6 SQS脉冲的重复频率随泵浦功率的变化

Fig. 6 Repetition rate of SQS pulses versus pump power

量级,因此两个相邻脉冲之间容纳更多脉冲的能力更加有限,即重复频率增加的幅度不大。实验还表明,自调Q脉冲宽度随泵浦功率的增加而减小。当泵浦功率为7 W时,脉冲宽度为8.125 ns;当泵浦功率为20.1 W时,脉冲宽度减小到7.475 ns。

3 自调Q蓝光SDL在水下无线光通信中的应用

3.1 水下无线光通信系统

为了对比脉冲激光与连续激光在水下无线光通信中的性能,我们搭建了一套水下无线光通信(UWOC)系统,实验装置如图7所示。在计算机端生成随机二进制序列,对其进行非归零开关键控(NRZ-OOK)调制。将调制信号加载到任意波形发生器(AWG, 50 GSa/s采样速率,2 Gs记录长度)中进行数模转换,把调制信号转换为模拟信号。模拟信号随后被加载到250 MHz带宽的声光调制器(AOM)上,完成对入射光束的信号加载。

由于发散的SDL激光束不易在水中的传输,实验中对其进行了准直。在自调Q蓝光输出镜M2的后方,相继放置凸透镜1(焦距 $f_1=500$ mm)和凸透镜2(焦距 $f_2=100$ mm),将SDL输出的蓝光聚焦到AOM上。调节AOM,使其达到最佳衍射效率。凸透镜3(焦距 $f_3=300$ mm)对通过AOM的衍射光进行准直,使得激光束在进入水箱前为平行光束。

加载信号后的平行激光束进入水箱,通过尺寸为 $2\text{ cm}\times 2\text{ cm}$ 的平面镜进行光路调整。平面镜表面镀有对蓝光高反的膜层。水下通信链路的总长度约为18 m。在接收端,输出激光束通过焦距为75 mm的聚焦透镜聚焦到光电探测器上。探测器接收到的信号用示波器(DSO)进行记录和分析,再传回计算机端进行误码率计算。为了确保通信中脉冲波形的一致性和稳定性,实验时尽量保证激光器、通信设备和线路都处于

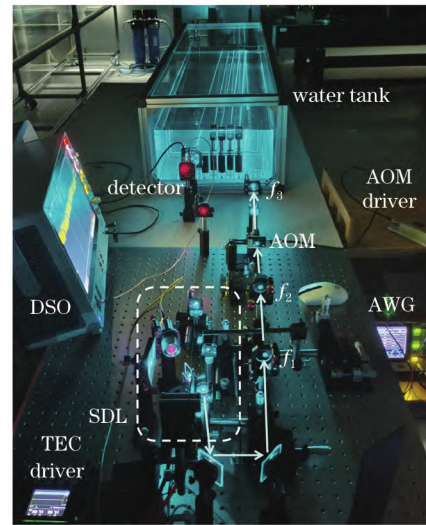


图7 UWOC系统实验装置图

Fig. 7 Experimental setup of UWOC system

稳定的环境中,通过控温、防尘、除湿等操作,减少外部因素对系统稳定性的影响。所有实验都在黑暗环境中进行,以尽量减少环境光噪声的影响。

3.2 通信性能与分析

首先在清水和Maalox[由质量浓度为 $220\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和质量浓度为 $195\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 混合组成]质量浓度为 $922.2\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的水缸环境中,对不同数据传输速率下脉冲光与连续光的通信性能进行了对比研究。在相同的通信链路长度(18 m)下,当数据传输速率分别为1、2、5、10、15、20 Mbit/s时,对接收到的信号进行误码率(BER)计算,结果如图8所示。其中,图8(a)为清水中的误码率情况,图8(b)为质量浓度为 $922.2\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的Maalox溶液中的误码率情况。

实验结果表明,在相同水质、相同的数据传输速率和相同的通信链路长度下,脉冲光通信的误码率比连续光通信的误码率低了一个数量级。这种误码率的降低在UWOC的实际场景中具有极大的工程应用

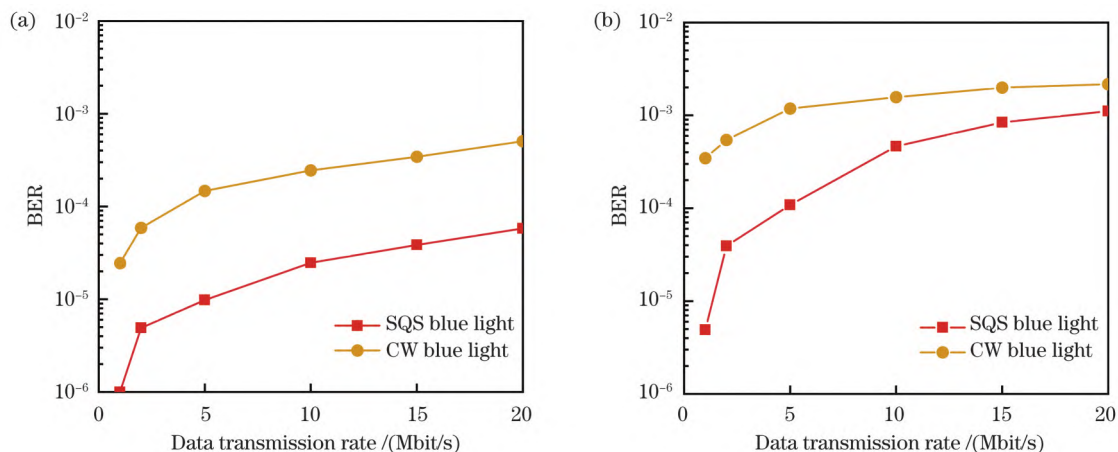


图8 不同数据传输速率下SQS蓝光和CW蓝光的通信误码率比较。(a)在清水中;(b)在质量浓度为 $922.2\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的Maalox溶液中
Fig. 8 Comparison of communication BER between SQS blue light and CW blue light at different data transmission rates. (a) In clear water; (b) in Maalox solution with mass concentration of $922.2\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$

价值。

然后,在固定数据传输速率为 10 Mbit/s 和 20 Mbit/s 的情况下,研究了不同 Maalox 溶液质量浓度下,脉冲光和连续光的通信性能。图 9(a)为数据传输速率为 10 Mbit/s 时,不同 Maalox 溶液质量浓度下脉冲光和连续光通信的误码率。图 9(b)为数据传输速率为 20 Mbit/s 时,不同 Maalox 溶液质量浓度下脉冲光和连续光通信的误码率。

图 9(a)、(b)都显示,两种光源在低 Maalox 溶液质量浓度下均没有出现误码情况。在图 9(a)中,当 Maalox 溶液质量浓度增加到 $815 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,脉冲光仍是零误

码,而连续光出现误码。在两者都存在误码的情况下,脉冲光的误码率比连续光的误码率低约一个数量级。图 9(b)中脉冲光的误码率也比连续光的误码率低 1~2 个数量级,且随着 Maalox 溶液质量浓度的增加,脉冲光误码率与连续光误码率之间的差别有增大的趋势。文献[19-20]指出高频调制的光波在水下传输时具有抑制反向散射的作用,因此会经历比连续光更小的散射衰减。本实验中的自调 Q 激光脉冲可视为上述高频调制的光波,因而会具有比连续光更小的散射衰减,接收端获得的脉冲激光功率将明显大于连续激光,从而信号强度增大,信噪比提高,误码率降低。

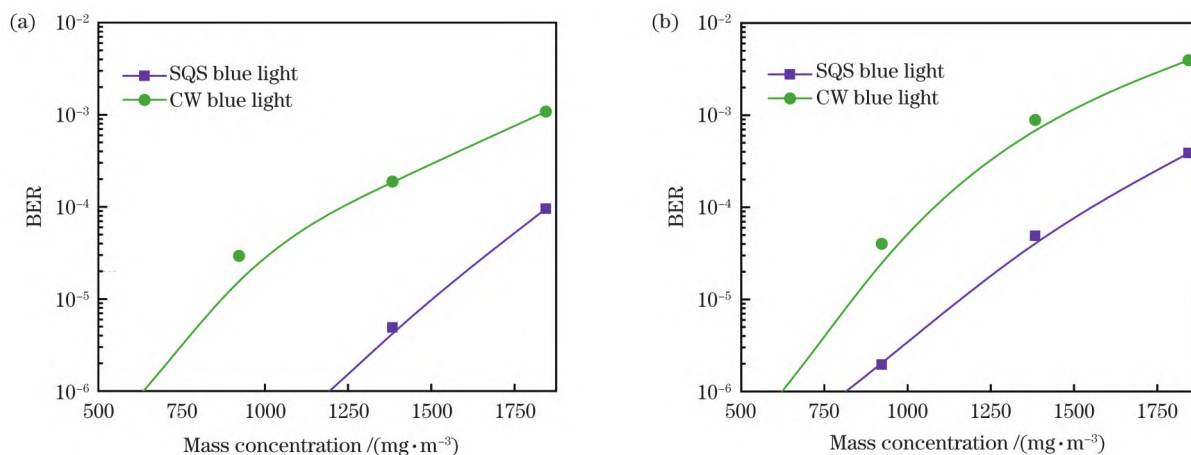


图 9 不同 Maalox 溶液质量浓度下 SQS 蓝光和 CW 蓝光的通信误码率。(a) 10 Mbit/s 数据传输速率;(b) 20 Mbit/s 数据传输速率
Fig. 9 Communication BERs for SQS blue light and CW blue light at different Maalox solution mass concentrations. (a) 10 Mbit/s data transmission rate; (b) 20 Mbit/s data transmission rate

4 结 论

基于 SDL 增益芯片有源区内半导体介质的非线性 Kerr 效应,在 Z 形谐振腔中实现了发射波长为 982 nm 的 SDL 的稳定自调 Q。在腔内最小的光束束腰处放入 LBO 晶体后,得到 491 nm 的脉冲蓝光输出。当吸收泵浦功率为 28 W 时,调 Q 蓝光脉冲的最大输出功率为 702 mW,脉冲宽度为 8 ns,重复频率为 61.9 MHz。利用上述自调 Q 脉冲蓝光激光器搭建了水下无线光通信系统,在相同条件(输入光功率、Maalox 溶液质量浓度、通信链路长度、数据传输速率)下,自调 Q 蓝光 SDL 的通信性能明显优于连续蓝光 SDL。当数据传输速率为 10 Mbit/s、链路长度为 18 m 时,自调 Q 蓝光 SDL 通信的误码率比连续蓝光 SDL 通信的误码率降低了约一个数量级。

参 考 文 献

- [1] Tropper A C, Hoogland S. Extended cavity surface-emitting semiconductor lasers[J]. Progress in Quantum Electronics, 2006, 30(1): 1-43.
- [2] Rahimi-Iman A. Recent advances in VECSELs[J]. Journal of Optics, 2016, 18(9): 093003.
- [3] Tilma B W, Mangold M, Zaugg C A, et al. Recent advances in ultrafast semiconductor disk lasers[J]. Light: Science & Applications, 2015, 4(7): e310.
- [4] Lindberg H, Larsson A, Strassner M. Single-frequency operation of a high-power, long-wavelength semiconductor disk laser[J]. Optics Letters, 2005, 30(17): 2260-2262.
- [5] 伍亚东,朱仁江,晏日,等. 高转换效率腔内倍频外腔面发射蓝光激光器[J]. 物理学报, 2024, 73(1): 014203.
Wu Y D, Zhu R J, Yan R, et al. Intracavity frequency-doubled external-cavity surface-emitting blue laser with high conversion efficiency[J]. Acta Physica Sinica, 2024, 73(1): 014203.
- [6] Mangold M, Wittwer V J, Sieber O D, et al. VECSEL gain characterization[J]. Optics Express, 2012, 20(4): 4136-4148.
- [7] 周瑞,方振,周鑫虎,等. 基于泵浦强度调制的调 Q 和锁模连续切换光纤激光器[J]. 光学学报, 2024, 44(16): 1614003.
Zhou R, Fang Z, Zhou X H, et al. Q-switched and mode-locked continuously switchable fiber laser based on pump intensity modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(16): 1614003.
- [8] 赵海栋,于佳琦,代守军,等. 电光调 Q 双脉冲 Nd:YAG 激光器的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(15): 1514005.
Zhao H D, Yu J Q, Dai S J, et al. Research on electro-optic Q-switched double-pulse Nd:YAG laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(15): 1514005.
- [9] Keller U, Weingarten K J, Kartner F X, et al. Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1996, 2(3): 435-453.
- [10] Lee T P, Roldan R. Repetitively Q-switched light pulses from GaAs injection lasers with tandem double-section stripe geometry [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1970, 6(6): 339-352.
- [11] Tsang D, Walpole J. Q-switched semiconductor diode lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1983, 19(2): 145-156.
- [12] Cakmak B. Modelling of experimentally measured Q-switched

- pulsations in InGaAs/GaAs diode lasers[J]. Optics Communications, 2006, 266(2): 614-619.
- [13] 彭柏语, 袁晨智, 张瑞明, 等. 用于量子通信的增益开关半导体激光器研究进展[J]. 光学学报, 2022, 42(3): 0327007.
- Peng B Y, Yuan C Z, Zhang R M, et al. Progress in gain-switched semiconductor lasers for quantum communication[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(3): 0327007.
- [14] Haring R, Paschotta R, Aschwanden A, et al. High-power passively mode-locked semiconductor lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(9): 1268-1275.
- [15] Yu W M, Song Y R, Hu J H, et al. Q-switched output in vertical external cavity surface emitting lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6344: 63441Z.
- [16] 张晓健, 潘丽, 曾颖, 等. 调 Q 运转外腔面发射激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0701003.
- Zhang X J, Pan L, Zeng Y, et al. Q-switched external-cavity surface-emitting lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0701003.
- [17] Kornaszewski L, Maker G, Malcolm G P A, et al. SESAM-free mode-locked semiconductor disk laser[J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6(6): L20-L23.
- [18] Yan R, Zhu R J, Wu Y D, et al. Power scaling of a self-mode-locked vertical-external-cavity surface-emitting laser[J]. Applied Physics Letters, 2023, 123(1): 011106.
- [19] Mullen L, Laux A, Cochenour B. Propagation of modulated light in water: implications for imaging and communications systems[J]. Applied Optics, 2009, 48(14): 2607-2612.
- [20] Luchinin A G, Savel'ev V A. Propagation of a sinusoidally modulated light beam through a scattering medium[J]. Radiophysics and Quantum Electronics, 1969, 12(2): 205-211.

Self-Q-Switched Blue Semiconductor Disk Laser and Its Application in Underwater Wireless Optical Communications

Shen Xiaoyu¹, Wang Tao^{1*}, Zhu Renjiang¹, Jiang Lidan¹, Tong Cunzhu²,
Song Yanrong³, Zhang Peng^{4**}

¹College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China;

²Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;

³Faculty of Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

⁴National Center for Applied Mathematics in Chongqing, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

Abstract

Objective The blue waveband is the window for underwater wireless optical communication, and high-performance blue lasers are the ideal light source for underwater wireless optical communication. Pulsed blue lasers have high peak power than that of continuous-wave laser, experience less attenuation during underwater transmission and have better communication performance. As an important technique for obtaining pulsed lasers, Q-switching has been widely used in solid-state lasers. However, for semiconductor lasers, it is difficult to obtain large pulse energy or high peak power due to the nanosecond short lifetime of the carriers. But in the other hand, Q-switched semiconductor lasers can produce pulse trains with higher repetition rates because of their shorter carrier lifetime, and combined with their flexible and designable emitting wavelengths, their application range can also be expanded.

Methods In the gain chip of a semiconductor disk laser (SDL), there exists the nonlinear Kerr effect in the semiconductor multiple quantum wells of the active region, where the refractive index in the region is proportional to the light intensity, i.e. $n=n_2I$, where n is the refractive index of the material, I is the incident light intensity, and n_2 is the Kerr coefficient. For the semiconductor multiple quantum wells materials, the above n_2 is negative. The nonlinear Kerr effect in the active region leads to an equivalent lens depending on the intensity of light, causing the pulsed laser to experience a higher refractive index, while the continuous-wave laser suffers to a lower refractive index. When there is an aperture in the resonant cavity or a so-called soft aperture composed of pump spot on the gain chip, the equivalent lens mentioned above will cause the pulsed laser to experience less loss in the resonant cavity, start the pulse operation of the laser, and maintain stable pulse train output. If the effect of the Kerr equivalent lens is weak, SDL will operate in a Q-switching state, producing Q-switching pulse train with a pulse width on the order of nanosecond, which is called self Q-switching. If the Kerr equivalent lens has a stronger effect, SDL may operate in a mode-locked state, generating shorter picosecond pulses. This article utilizes the above-mentioned Kerr equivalent lens to achieve stable self Q-switching in the SDL. Then, while maintaining the Q-switched operation of the laser, a self Q-switched frequency-doubled blue laser is obtained by inserting a LiB₃O₅ (LBO) nonlinear crystal into the resonant cavity. Finally, pulsed blue laser is used as the light source for an underwater wireless optical communication, and the communication performance of the pulsed blue laser and the continuous-wave blue laser is compared.

Results and Discussions In a Z-type resonant cavity composed of the bottom distributed Bragg reflector (DBR) in the gain chip, the high-reflectivity mirror M1, the frequency-doubling output mirror M2, and the planar high-reflectivity mirror M3, when the

absorbed pump power is 29.4 W, the maximum output power of the 982 nm fundamental laser is 4.22 W. After the nonlinear crystal LBO is placed in the resonant cavity and the absorbed pump power is 28 W, the maximum average output power of the self *Q*-switched blue laser is 702 mW, with a pulse width of 8 ns and a period of 16.1 ns, corresponding to a pulse repetition rate of 61.9 MHz. The repetition rate of the output pulses of the self *Q*-switched blue SDL increases with the increase of the absorbed pump power, but the width of the pulse decreases with the increase of the absorbed pump power. In the underwater wireless optical communication system constructed using the above-mentioned self *Q*-switched pulse blue laser as the light source, the bit error rate of the pulse optical communication is at least one order of magnitude lower than that of the continuous-wave optical communication under the same water type, data rate, and link length. The reason is that the self *Q*-switched laser pulses can be regarded as a high-frequency modulated light waves, which have smaller scattering attenuation than that of the continuous-wave laser. Therefore, the pulsed laser power obtained by the receiver will be significantly greater than that of the continuous-wave laser, thereby increasing the signal intensity, improving the signal-to-noise ratio, and reducing the bit error rate.

Conclusions Based on the nonlinear Kerr effect of the semiconductor medium in the active region of the SDL gain chip, stable self *Q*-switching of the SDL with an emission wavelength of 982 nm is achieved in a Z-type resonant cavity. After placing an LBO crystal at the smallest waist of the beam inside the cavity, 491 nm pulsed blue laser output is obtained. When the absorbed pump power is 28 W, the maximum average output power of the *Q*-switched blue laser pulse is 702 mW, the pulse width is 8 ns, and the repetition rate is 61.9 MHz. In the underwater wireless optical communication system constructed using the above-mentioned self *Q*-switched pulsed blue laser, under the same conditions (input optical power, Maalox solution mass concentration, communication link length, and data rate), the communication performance of the self *Q*-switched blue SDL is significantly better than that of the continuous-wave blue SDL. When the data rate is 10 Mbit/s and the link length is 18 m, the bit error rate of the self *Q*-switched blue SDL communication is reduced by about one order of magnitude compared to that of the continuous-wave blue SDL communication.

Key words self-*Q*-switching; semiconductor disk laser; frequency-doubling; underwater wireless optical communications