

掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体激光器研究进展

刘芬芬^{1,2}, 曹枢旋¹, 刘均海^{1*}

¹青岛大学物理科学学院, 山东 青岛 266071;

²海军航空大学航空基础学院, 山东 烟台 264001

摘要 介绍和总结了近年来掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐(Yb:ReCOB)晶体激光器研究取得的主要进展。这些进展包括连续波激光器,声光调 Q,以 Cr⁴⁺:YAG、GaAs、二维材料等为可饱和吸收体的被动调 Q,SESAM 被动锁模,克尔透镜锁模,以及自倍频绿光和黄光激光器等。这类 Yb:ReCOB 晶体对许多不同运转模式的全固态激光器应用都表现出很大潜力。

关键词 激光光学; Yb 激光器; 调 Q; 锁模; 自倍频; Yb:YCOB; Yb:GdCOB

中图分类号 O48 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP57.070004

Research of Yb-Doped Rare-Earth Calcium Oxyborate Crystal Lasers

Liu Fenfen^{1,2}, Cao Shuxuan¹, Liu Junhai^{1*}

¹College of Physics, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China;

²Aviation Foundation College, Aeronautical University, Yantai, Shandong 264001, China

Abstract This paper introduces and summarizes the main progress made in the research of Yb-doped rare-earth calcium oxyborate (Yb:ReCOB) crystal lasers in recent years. It includes continuous-wave lasers, acousto-optic Q-switching, passive Q-switching with Cr⁴⁺:YAG, GaAs, or two-dimensional materials as saturable absorber, Saturable absorber mode-locked, Kerr-lens mode-locked, and self-frequency doubling green and yellow lasers. This type of Yb:ReCOB crystal shows great potential for many all-solid-state laser applications with different modes of operation.

Key words laser optics; Yb lasers; Q-switching; mode-locked; self-frequency doubling; Yb:YCOB; Yb:GdCOB

OCIS codes 140.3380; 140.3615; 140.3580; 140.3540; 140.7090

1 引言

掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体的化学式为 Yb:ReCa₄O(BO₃)₃(Yb:ReCOB),这里 Re 代表 Y(钇)和镧系稀土元素 Gd、La。除了这三种单一晶体之外,这类稀土钙氧硼酸盐还包括不同组分的固溶晶体,也称为混晶,如 Yb_t:Y_xGd_{1-t-x}Ca₄O(BO₃)₃、Yb_t:La_xGd_{1-t-x}Ca₄O(BO₃)₃、Yb_t:Lu_xGd_{1-t-x}Ca₄O(BO₃)₃等。如同作为基质的稀土钙氧硼酸盐,Yb:ReCOB 晶体也具有非常高的化学稳定性,不潮解,易于由提拉法生长高光学质量的大尺寸晶体。这类晶体属于空间群 Cm 和点群 m,是对称性很低的双轴晶体,其物理性质、光学性质、光谱学性质以及激光

性质等都表现出很强的各向异性。

在目前已知的众多 Yb 离子激光材料中,Yb:ReCOB 晶体显得异常独特:1) 在这类晶体中,Yb 离子的基态(²F_{7/2})有着很大的 Stark 能级分裂(>1000 cm⁻¹)^[1-2]。大的 Stark 能级分裂可有效降低激光下能级的热激发粒子数,有利于实现室温下的低阈值准三能级激光运转。2) 在这类晶体中,Yb 离子的激发态也即激光跃迁的上能态(²F_{5/2})荧光寿命很长(>2 ms)^[1,3],使晶体具有很大的储能本领,可通过调 Q 产生高能量激光脉冲。3) 这类晶体本身为非线性光学晶体^[1],所产生的近红外激光可通过自倍频转换为可见激光输出。此外,这类稀土钙氧硼酸盐晶体还具有很高的光损伤阈值

收稿日期: 2019-12-27; 修回日期: 2020-02-11; 录用日期: 2020-02-12

* E-mail: junhai_liu@hotmail.com

($>1 \text{ GW/cm}^2$)^[4]。Yb:ReCOB 晶体兼上述诸多特(优)点于一身,这在 Yb 离子激光材料中是十分罕见的。

作为这类掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐的代表性晶体, Yb:YCOB 和 Yb:GdCOB 出现于 20 世纪 90 年代末期^[1,4],属于 Yb 离子激光器发展早期为数不多的激光材料之列^[5]。尽管这两种晶体最初即已在激光效率、可调谐、超短脉冲产生等方面表现出很大的优势和潜力^[6-10],但在随后相当长的一段时期内,这类晶体很少受到关注,相关的研究进展也不大。近几年来,这一情形得到很大改观,这类晶体的连续波(CW)、调 Q、锁模、自倍频等激光性质的研究获得了长足的发展。本文先对掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体的研究历史做一简短回顾,然后介绍近年来这一领域取得的重要研究进展。

2 掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体研究的简单历史回顾

稀土钙氧硼酸盐最初是作为非线性光学晶体而发展的。1991 年, Khamaganova 等^[11]在以 PbO 为助溶剂的高温溶液中尝试生长 $\text{Ca}_3\text{Sm}_2(\text{BO}_3)_4$ 晶体时,第一次得到了 $\text{SmCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ (SmCOB) 晶体[报道所用的化学式为 $\text{Sm}_2\text{Ca}_8\text{O}_2(\text{BO}_3)_6$]。随后, Norrestam 等^[12]由固相反应合成了一系列的稀土钙氧硼酸盐化合物,确定出它们的晶体结构属于单斜晶系的空间群 Cm 。在 Norrestam 等^[12]工作的基础上, Dirksen 等^[13]发现, GdCOB 基质中的三价稀土离子 Tb 和 Eu 有着很高的发光效率。法国研究者 Aka 等^[14]成功地由提拉法(Czochralski)生长了 GdCOB 晶体。YCOB 晶体也由日本研究者 Iwai 等^[15]利用提拉法生长得到。他们的研究还表明, YCOB 和 GdCOB 都是很有潜力的非线性光学晶体。这些开创性的工作,为激光晶体和非线性光学晶体的探索开辟了一个极具价值的新领域。

提拉法生长工艺的建立,标志着稀土钙氧硼酸盐晶体研究的重要突破。在随后的几年里,各种不同组分的稀土钙氧硼酸盐晶体不断涌现。1998 年, Hammons 等^[4]实现了 Yb:YCOB 晶体的室温连续波激光运转,并获得 mW 量级的自倍频激光输出。在接下来的几年内,先后有不同研究组开展了该晶体的光谱学性质、连续波、可调谐以及锁模超短脉冲激光等方面的研究^[2,6,7,9,16]。这些研究结果指出,室温下 Yb:YCOB 晶体的激光阈值可低至 0.05 W,而斜率效率可超过 70%^[2,6],初步显示出该晶体优

越的激光性能。对 Yb:GdCOB 晶体的研究也在同一时期开展起来。1999 年, Mougel 等^[1]对 Yb:GdCOB 晶体的光谱学性质做了深入细致的研究,发现 Yb 离子可取代 Gd 离子和 Ca 离子而占据三种不同的晶格位置,这将导致晶体中 Yb 离子吸收谱和发射谱的加宽。此后, Yb:GdCOB 晶体的连续波、可调谐、锁模等激光特性研究以及激光理论模型研究等都取得了迅速发展^[8,10,17-19]。至 2001 年,由 Yb:GdCOB 晶体产生的连续波激光输出功率已达 4.7 W (同期 Yb:YCOB 晶体低于 1.0 W)^[18],而锁模激光脉冲的宽度已短至 90 fs^[10]。

在随后的五年间,人们对掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体的关注减少,相关的研究进展不大。2007~2008 年,我们对 Yb:YCOB 和 Yb:GdCOB 两种晶体的室温连续波激光特性做了较为全面的实验研究,将输出功率提高至 7~8 W 水平,同时揭示出这类晶体激光性质存在的强烈各向异性、两个偏振态振荡的共存、偏振态随抽运功率水平的演化以及双波段激光振荡等复杂的激光运转行为^[20-22]。Kränkel 等^[3]在 2009 年报道,利用厚度小于 0.5 mm 的薄盘状 Yb:YCOB 晶体,所产生的连续波激光输出功率可达 26 W。次年,他们将输出功率提高至 100 W 水平,并证实了 Yb:YCOB 晶体在高功率飞秒脉冲薄盘激光器中的应用潜力^[23]。在这期间,基于半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 锁模的 Yb:YCOB 晶体超短脉冲激光研究也获得重要进展,所产生的最短激光脉冲宽度为 35 fs^[24-25]。

虽然自掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体出现之初,人们就已知道,这类晶体有着很长的荧光寿命和很大的储能本领,可通过调 Q 产生高能量激光脉冲,但在一个相当长的时期内,这类晶体的调 Q 脉冲激光研究几乎处于空白状态。2013 年,我们开展了以 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 为可饱和吸收体的 Yb:YCOB 和 Yb:GdCOB 两种晶体的被动调 Q 脉冲激光特性研究^[26-27]。实验结果表明,在连续波纵向抽运条件下,由 Yb:YCOB 和 Yb:GdCOB 晶体的被动调 Q 所产生的激光脉冲能量可超过 0.4 mJ,显著高于其他 Yb 离子激光晶体在相同(似)实验条件下所产生的脉冲能量^[26-27]。通过对晶体中 Yb 离子浓度的优化,我们于 2015~2016 年间,将 Yb:YCOB 晶体的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 脉冲能量提高至 1.28 mJ (重复频率 3.23 kHz,脉宽 5.0 ns)^[28],而由 Yb:GdCOB 晶体的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 产生的平均输出功率达到 15.6 W (重复频率 91 kHz)^[29]。除 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶

体外,我们也开展了以 GaAs 半导体晶体为可饱和吸收体的被动调 Q 研究。结果表明, Yb:ReCOB 类晶体存在着两种不同的被动调 Q 模式:高重复频率高功率(HRHP)模式和低重复频率高能量(LRHE)模式^[30-33]。在 HRHP 模式下,由 Yb:YCOB 晶体产生的脉冲平均功率达到 5.7 W^[30];而在 LRHE 模式下,这类晶体产生的脉冲能量可达 0.8~1.0 mJ,比由其他 Yb 或 Nd 离子激光晶体产生的脉冲能量高一个数量级^[31-33]。最近两年以来,我们又对这类掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体以二维材料(Bi₂Te₃, MoTe₂, WS₂ 等)为可饱和吸收体的被动调 Q 做了研究,再次证实了其优越的脉冲激光性能^[34-37]。研究表明,在 1 μm 近红外波段,很少有 Yb 或 Nd 离子激光晶体的二维材料被动调 Q 能够在平均功率、脉冲能量、脉冲宽度等方面与掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体相比拟^[34-37]。与被动调 Q 情形类似,掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体同样有着优异的主动调 Q 脉冲激光特性。在已开展的 Yb:YCOB 和 Yb:GdCOB 晶体的声光调 Q 激光实验研究中,高重复频率(30 kHz)下脉冲输出功率可超过 10 W,而低重复频率(100~200 Hz)下激光脉冲能量可达 5 mJ 水平^[38-39]。

随着人们对掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体研究和认识的不断深入,这类晶体的自倍频研究也于近年取得了令人惊叹的进展^[40-42]。2016 年,由 Yb:YCOB 晶体的振动-电子跃迁产生的 1140 nm 基频激光经自倍频产生的 570 nm 黄光输出功率达到 1.08 W^[41]。2019 年, Yb:YCOB 晶体的连续波自倍频实现了 6.2 W 的绿光输出^[42]。这些实验研究,揭示出了这类掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体在发展可见光波段的实用化激光器件中所具有的应用潜力。

3 连续波 Yb:ReCOB 晶体激光器

对掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体连续波激光特性的较为系统的研究始于 2007 年^[20-22, 43]。这些研究揭示了激光振荡行为的各向异性,将这类晶体的连续波输出功率提高至 7~8 W。由这些研究获得的另外一个重要结果是,在 Y-切向晶体产生的激光振荡中,发现两个正交偏振态的共存以及偏振态随抽运功率水平的演化^[20-22]。现在已经知道,这是一种在光学各向异性的 Yb 离子晶体激光振荡中常会发生的现象^[44-46],它源自某些特定激发水平下,晶体沿两个偏振方向具有相同(近)的增益(对于稳态激光振荡,激发水平也即晶体中 Yb 离子的激发分数由

谐振腔总的损耗决定)。这一现象对于某些应用(如双偏振态双波长激光器)有着重要意义,但对于自倍频等非线性作用过程是有害的,需要加以避免。事实上,只有在谐振腔输出耦合透过率很低($T < 3\%$)的情况下,这一现象才会出现^[20-22, 28]。

晶体生长工艺的完善和晶体光学质量的提高,晶体中 Yb 离子浓度的优化和晶体长度的合理选择,作为抽运源的半导体激光器输出特性的不断改善,这些因素的结合使掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体激光器的室温连续波输出功率得以大幅提高。实验研究表明,利用长度 4~6 mm、Yb 离子原子数分数为 10%~15% 的晶体样品,在 976 nm 窄带(<0.5 nm)半导体激光器纵向抽运条件下, Yb:YCOB 和 Yb:GdCOB 产生的连续波输出功率可达 20 W 水平^[28-29, 33]。在相同(近)的条件下,目前已知的其他 Yb 离子激光材料很难产生这样高的激光功率。

作为激光晶体,掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐中的单一晶体除了 Yb:YCOB 和 Yb:GdCOB 之外,还包括 Yb:LaCa₄O(BO₃)₃ (Yb:LaCOB)。尽管早期研究中已涉及 Yb:LaCOB 的生长和光谱学性质^[2],但直到 2013 年,该晶体的偏振吸收谱和发射谱才得到充分的研究,而连续波激光运转也才得以实现^[47-49]。除了上述三种单一晶体之外,目前已报道的掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体还包括(Y, Gd)系列混晶 Yb:Y_{0.5}Gd_{0.5}Ca₄O(BO₃)₃, Yb_{0.14}:Y_{0.77}Gd_{0.09}Ca₄O(BO₃)₃, 以及 Yb_{0.14}:Y_{0.15}Gd_{0.71}Ca₄O(BO₃)₃^[50-52]。利用 5 mm 长的晶体样品,由 Yb_{0.14}:Y_{0.77}Gd_{0.09}Ca₄O(BO₃)₃ 产生的最高室温连续波激光输出功率达到 23.0 W,斜率效率为 70%^[51]。

掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体的发射谱中除主发射带(1000~1050 nm)外,在 1084 nm 还存在一个弱的长波边带,是由 Yb 离子²F_{5/2} 能态的最低 Stark 能级向²F_{7/2} 能态的最高 Stark 能级的辐射跃迁引起的^[1,3,51]。在自由运转条件下,当谐振腔的输出耦合透过率很低时,连续波激光振荡就发生在这一长波边带内,输出功率可达 10~15 W^[28, 33, 51];而当输出透过率在 3%~60% 范围内改变时,原则上可实现主发射带 1021~1055 nm 波段内任意中心波长的连续波激光运转^[28],获得超过 10 W 的输出功率(最高可达 20 W 水平^[33,51])。此外,通过抑制主发射带内的短波振荡,也可使激光器工作于长波边带内^[53-54];利用不同切向的晶体样品,可实现 1084 nm 附近的激光运转,也可获得 1061~1066 nm 的线偏

振激光输出(这与Nd离子的激光发射波长相近),还可实现双偏振态双波段激光振荡^[53]。这些不同运转模式下所产生的激光输出功率都可以很容易地超过10W水平^[53-54]。

根据实验研究,对于主发射带内的连续波激光运转,谐振腔的最佳输出耦合透过率在5%~15%范围内^[28,33,51,55]。对于Yb:YCOB和Yb:LaCOB晶体以及混晶Yb:YGdCOB(Yb_{0.14}:Y_{0.77}Gd_{0.09}Ca₄O(BO₃)₃),Y-切向晶体产生的输出功率最高;而在Yb:GdCOB情况下,Z-切向晶体产生的输出功率高于X-

表1 不同Yb:ReCOB晶体主发射带内连续波激光运转参数的比较

Table 1 Comparison of CW laser parameters in the main emission band for different Yb:ReCOB crystals

Crystal	$T_{\text{opt}}/\%$	P_{th}/W	P_{out}/W	$\eta_{\text{opt}}/\%$	$\eta_s/\%$	λ_c/nm	Pol.
Yb:YCOB (Y-cut)	10	0.80	22.1	54	71	1042.5	E//Z
Yb:GdCOB (Z-cut)	10	1.02	18.2	55	70	1031.5	E//X
Yb:YGdCOB (Y-cut)	10	0.79	23.0	57	70	1044.7	E//Z
Yb:LaCOB (Y-cut)	10	0.64	8.4	47	51	1046.0	E//Z

可以看到,Yb:YCOB和Yb_{0.14}:Y_{0.77}Gd_{0.09}Ca₄O(BO₃)₃两种晶体的高功率连续波激光特性相差不大,其高功率应用潜力都大于Yb:GdCOB。应当指出的是,混晶结构上无序程度的增加,似乎并没有导致晶体激光性能的下降。鉴于这类掺Yb稀土钙氧硼酸盐中存在着数量众多的不同组分混晶,有望从中探索和发现更多优异的Yb离子激光晶体。由表1还可看出,与前面三种Yb:ReCOB相比,Yb:LaCOB晶体的主发射带连续波激光性能较差。由于La和Yb的离子半径相差较大,Yb:LaCOB晶体的生长要困难得多。此外,Yb:LaCOB晶体的吸收谱和发射谱也与其他Yb:ReCOB晶体存在明显的差异^[1,3,47,51]。还应当说明的是,表1中的阈值抽运功率是指入射功率(P_{in}),而不是晶体中吸收的抽运功率(P_{abs}), η_{opt} 和 η_s 也都是相对于 P_{in} 计算的。这类掺Yb稀土钙氧硼酸盐晶体对976nm抽运光的吸收表现出很强的

表2 不同Yb:ReCOB晶体长波发射带内连续波激光运转参数的比较

Table 2 Comparison of CW laser parameters in the long-wavelength side band for different Yb:ReCOB crystals

Crystal	$T/\%$	P_{th}/W	P_{out}/W	$\eta_{\text{opt}}/\%$	$\eta_s/\%$	λ_l/nm	Pol.
Yb:YCOB (Z-cut)	1.3	0.16	10.7	56	65	1082-1085	E//X
Yb:YGdCOB (Z-cut)	1	0.14	18.1	60	70	1082-1086	E//X
Yb:LaCOB (Y-cut)	1	0.14	11.0	62	67	1077-1080	E//X, E//Z

由表2可以看出,对于长波发射带内的激光运转,Yb_{0.14}:Y_{0.77}Gd_{0.09}Ca₄O(BO₃)₃混晶在激光效率和输出功率方面都显著地优于Yb:YCOB晶体。这显示了在不同组分的混晶中探索Yb:ReCOB类激光晶体的意义和潜力。也可以看出,尽管Yb:

和Y-切向晶体。这一差别可能起因于晶体在热导率、热膨胀系数、热光系数、吸收和受激发射性质等方面各向异性的不同,也可能与Yb:GdCOB晶体不同切向样品的光学质量差异有关。表1列出了以上四种晶体在纵向抽运的平凹谐振腔(腔长23mm,输出镜曲率半径25mm)中的连续波激光运转参数^[33,51,55]。这些参数包括:最佳输出耦合透过率 T_{opt} ;阈值抽运功率 P_{th} ;最大输出功率 P_{out} ;光-光转换效率 η_{opt} ;斜率效率 η_s ;激光振荡中心波长 λ_c 和激光偏振态Pol.,表格中的E为激光电场方向。

饱和效应^[28-29,33],在激光振荡条件下很难准确地测量晶体的抽运光吸收效率 $\eta_a(=P_{\text{abs}}/P_{\text{in}})$ 。但是, η_a 不会超过晶体的小信号(非饱和)吸收效率 η_{a0} ,若取 $\eta_{a0}\approx 0.9$ ^[28-29,33],则除Yb:LaCOB外,其他三种Yb:ReCOB晶体的室温连续波激光运转,在20W的输出功率水平下,光-光转换效率 $\eta_{\text{opt}}\geq 60\%$,而斜率效率 $\eta_s\approx 80\%$ 。对于1 μm 近红外波段的其他同类Yb或Nd离子固体激光器,这样的结果是很少见的。

表2列出了Yb:YCOB、Yb:LaCOB和Yb:YGdCOB(Yb_{0.14}:Y_{0.77}Gd_{0.09}Ca₄O(BO₃)₃)三种晶体,在低输出透过率自由运转条件下长波边带内的连续波激光运转参数^[28,54-55]。其中T为谐振腔输出耦合透过率, λ_l 是激光发射波长。与主发射带激光运转不同,这里Z-切向的Yb:YCOB和Yb:YGdCOB晶体表现出最佳的激光性能;而对于Yb:LaCOB,Y-切向的晶体产生的输出功率最高。

LaCOB在主发射带内的激光性能远不如其他三种晶体(表1),但该晶体的长波边带运转效率以及输出功率却与Yb:YCOB相当(光-光转换效率甚至更高)。还可以注意到,与其他晶体相比,Yb:LaCOB的激光振荡波长范围向短波方向移动了约

5 nm。另外,它的激光振荡中存在两个相互正交的偏振态。

利用特殊镀膜的腔镜,可以抑制主发射带内的激光振荡,从而在 $T \leq 20\%$ 的输出透过率范围内,

表3 抑制主发射带激光振荡条件下,不同 Yb:ReCOB 晶体长波发射带内连续波激光运转参数

Table 3 CW laser parameters in the long-wavelength side band for different Yb:ReCOB crystals, under the conditions of suppressing the main emission band laser oscillation

Crystal	$T / \%$	P_{th} / W	P_{out} / W	$\eta_{opt} / \%$	$\eta_s / \%$	Pol.	λ_t / nm
Yb:YCOB (X-cut)	5	0.40	13.0	45.1	53	$E // Z$	1063.2-1066.1
Yb:YCOB (Y-cut)	5	0.40	15.0	46.3	54	$E // X$	1083.5-1084.4
Yb:YCOB (Z-cut)	5	0.36	15.5	44.4	52	$E // Z$	1063.3-1067.2
Yb:YGdCOB (Z-cut)	3	0.33	16.2	50.3	58	$E // X$	1083.6-1085.5
Yb:YGdCOB (Z-cut)	3	0.33	16.2	50.3	58	$E // X$	1083-1085

表3中的结果指出,当抑制短波主发射带振荡后,激光运转发生在大于 $1.06 \mu m$ 的长波区。利用不同切向的晶体,既可获得 $1.06 \mu m$ 或 $1.08 \mu m$ 波段的高功率线偏振激光输出,也可实现双偏振态、双波段激光运转。可以看到,对于 Z-切向晶体的 $1.08 \mu m$ 波段激光运转,混晶有着更高的激光效率,这与表2中自由运转结果一致。还应指出,在 Nd 离子晶体中, Nd:GdVO₄ 也可产生 $1.08 \mu m$ 波段激光运转,且有着更窄的激光发射谱线^[56]。

上述结果都是利用最常用的平凹谐振腔获得的。除了一般的平凹谐振腔, Yb:ReCOB 类晶体同样适合于其他结构的谐振腔。利用 Yb 离子原子数分数为 15%、截面 $6.3 mm \times 7.0 mm$ 、厚度 $0.4 mm$ 的 Z-切向晶体样品,由 Yb:YCOB 薄盘激光器产生的连续波输出功率超过 100 W,光-光转换效率达到 40%^[23]。相关研究指出, Yb:YCOB 薄盘激光器性能优于许多其他 Yb 晶体薄盘激光器,仅有 Yb:Lu₂O₃ 晶体明显地超过 Yb:YCOB;就激光效率而言, Yb:YCOB 和 Yb:YAG 晶体相当,后者被认为是最合适的薄盘激光材料^[3]。另外,在近微片激光谐振腔中, Yb:YCOB 晶体也同样显示出优异的激光特性,室温连续波输出功率达到 8.35 W,斜率效率为 70%^[57]。

掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体的发射谱中,除主发射带和长波发射边带外,还有一个位于 976 nm 的很强的零声子发射峰,它与零声子吸收峰完全重迭^[1, 3, 51]。因此,要实现 976 nm 的三能级激光振荡,需要克服晶体自身极强的共振吸收损耗,这通常是十分困难的。最近的一项研究指出,利用 902 nm Nd:SrLaAlO₄ 晶体激光器作为抽运源,通过抑制其他长波振荡,可由低浓度(原子数分数 3.2%) Yb:GdCOB 晶体(长度 2.5 mm)实现 976 nm 的连续波

实现 Yb:ReCOB 晶体长波边带内的连续波激光运转^[53-54]。表3列出了沿三个光学主轴切割的 Yb:YCOB 和 Z-切向 Yb:YGdCOB (Yb_{0.14}:Y_{0.77}Gd_{0.09}Ca₄O(BO₃)₃) 晶体的激光运转参数。

激光运转,阈值抽运功率为 6.6 W,在抽运功率 9.6 W 下的输出功率为 0.78 W^[58]。

在 $\lambda > 1100 nm$ 的长波区,这类掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体还拥有由振动-电子跃迁引起的弱发射带^[41]。通过抑制 $\lambda < 1100 nm$ 波长范围内的主发射带和发射边带(1084 nm 附近)的激光振荡,可获得 1120~1140 nm 的连续波激光运转^[41]。

利用掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体,能够在 976 nm、1020~1085 nm 以及 1120~1140 nm 的范围内,实现不同波长的连续波激光输出;而在 1020~1085 nm 波长范围内,纵向抽运条件下所产生的输出功率一般可超过 10 W 水平。为了进一步提高输出功率,可采用双端抽运、侧面抽运,以及薄盘激光器中多路抽运等方式。

4 调 Q 脉冲 Yb:ReCOB 晶体激光器

掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体的荧光寿命超过 2 ms,比大多数 Yb 激光材料的荧光寿命都要长,特别适合于通过调 Q 产生高能量脉冲激光。另外,这类晶体容易实现高功率高效率连续波激光运转,也适合于产生高重复频率、高平均功率脉冲激光输出。我们的最近研究表明,这类晶体有着优异的被动调 Q 脉冲激光特性,无论是以传统的 Cr⁴⁺:YAG 或 GaAs 晶体作为可饱和吸收体,还是以新型二维材料作为可饱和吸收体, Yb:ReCOB 类晶体的被动调 Q 都显著优于其他 Yb 或 Nd 离子激光晶体。另外,这类晶体的声光调 Q 脉冲激光性能也明显超过其他 Yb 离子激光材料。

4.1 声光调 Q

根据实验研究,利用射频功率 50 W、作用长度 50 mm 的声光 Q 开关,可在 0.2~30 kHz 的重复频率范围内,实现 Yb:YCOB 和 Yb:GdCOB 晶体的

主动调 Q 脉冲激光运转,高重复频率下产生的最大平均功率超过 10 W,而低重复频率下产生的单脉冲能量可达 5 mJ^[33, 38]。

实验中所使用的 Yb:YCOB 和 Yb:GdCOB 晶体的 Yb 离子原子数分数为 10%,长度为 6 mm。比较发现,对于声光调 Q 脉冲激光运转,X-切向的 Yb:YCOB 晶体最为合适;而 Yb:GdCOB 晶体的最佳切向则为 Y-切向。实验在平凹腔中进行,作为输出镜的凹面镜曲率半径 $R_2 = 200$ mm,几何腔长为 216 mm。谐振腔的输出耦合透过率 $T = 50\%$ 。

表 4 和表 5 分别给出了 Yb:YCOB 和 Yb:GdCOB 两种晶体,在不同脉冲重复频率(PRF)条件下得到的声光调 Q 脉冲激光参数。这些参数包括:最高入射抽运功率 $P_{in,max}$;脉冲运转产生的最大平均功率 $P_{avr,max}$;单脉冲能量 E_p ;脉冲宽度 t_p 和峰值功率 P_p 。

表 4 不同 PRF 条件下,Yb:YCOB 晶体的声光调 Q 脉冲激光参数

Table 4 Acousto-optic Q-switching laser parameters of Yb:YCOB crystal at different PRF values

Parameter	PRF /kHz					
	30	10	5	2	0.5	0.2
$P_{in,max}/W$	41.3	36.0	36.0	29.2	21.3	21.3
$P_{avr,max}/W$	10.2	8.8	6.5	4.2	1.6	1.0
E_p/mJ	0.34	0.88	1.3	2.1	3.2	5.0
t_p/ns	132	43	26	16	14	17
P_p/kW	2.6	20.5	50.0	131.3	214.3	294.1

表 5 不同 PRF 条件下,Yb:GdCOB 晶体的声光调 Q 脉冲激光参数

Table 5 Acousto-optic Q-switching laser parameters of Yb:GdCOB crystal at different PRF values

Parameter	PRF /kHz					
	30	10	5	2	0.5	0.2
$P_{in,max}/W$	34.2	34.2	25.6	23.5	21.0	19.6
$P_{avr,max}/W$	10.2	8.7	6.1	3.8	1.55	0.95
E_p/mJ	0.34	0.87	1.2	1.9	3.1	4.75
t_p/ns	108	36	26	20	17	11
P_p/kW	3.1	24.2	46.2	95.0	182.4	431.8

可以看到,在相同 PRF 条件下,两种晶体产生的平均输出功率或单脉冲能量很接近。它们的最大平均功率都是 10.2 W (PRF 为 30 kHz),但 Yb:GdCOB 晶体的声光调 Q 有着更高的激光效率,光-光转换效率和斜率效率分别为 29.8% 和 36%,而 Yb:YCOB 的相应值分别为 24.7% 和 32%^[33]。另外,在最低重复频率(PRF 为 0.2 kHz)条件下,Yb:GdCOB 晶体的脉冲宽度比 Yb:YCOB 窄得多,产

生的峰值功率也高得多。

在足够高的重复频率下,声光调 Q 脉冲平均功率一般可达到或接近连续波输出功率水平。随着重复频率降低,声光调 Q 激光运转效率也将随之减小,引起输出功率下降。此外,多脉冲或连续波激光振荡的出现,也是限制声光调 Q 脉冲平均功率进一步提高的原因。声光 Q 开关属于“慢”开关,它的开关时间由超声波通过声光介质中激光光束的渡越时间决定^[59]。随着抽运功率增加,脉冲建立时间将缩短,当脉冲建立时间短于 Q 开关完全打开所需的时间时,第二个激光脉冲将会出现。另一方面,若在两个相继脉冲间隔内积累的增益超过声光 Q 开关的关断损耗与谐振腔损耗之和,则连续波激光振荡将会建立。显然,提高谐振腔输出耦合透过率有利于抑制多脉冲的出现以及连续波激光振荡的形成。

4.2 以 Cr^{4+} :YAG 为可饱和吸收体的被动调 Q

对掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体被动调 Q 的研究始于 2007 年。Liang 等^[60]实现了以 InGaAs 半导体量子阱为可饱和吸收体的 Yb:YCOB 晶体激光器被动调 Q,在 7 kHz 的重复频率下获得了 1.15 W 的脉冲输出功率和宽度为 100 ns 的激光脉冲。2013 年,我们研究了 Yb:YCOB 和 Yb:GdCOB 晶体以 Cr^{4+} :YAG 为可饱和吸收体的被动调 Q 脉冲激光特性^[26-27]。实验结果表明,在连续波抽运条件下,由这两种晶体的室温被动调 Q 激光运转所产生的脉冲能量可达 0.4~0.5 mJ 水平,高于其他 Yb 激光晶体在相近实验条件下得到的脉冲能量^[26-27]。随后,通过对激光晶体参数、谐振腔结构和被动调 Q 条件的优化,使这类 Yb:ReCOB 晶体产生的激光脉冲能量超过 1 mJ,而脉冲激光输出功率达到 10~15 W 水平,显著超过其他 Yb 离子激光晶体^[28-29]。

实验研究指出,对于 Cr^{4+} :YAG 为可饱和吸收体的被动调 Q 激光运转,Yb:YCOB 和 Yb:GdCOB 两种晶体都以 X-切向为最佳。表 6 列出了表征两种晶体被动调 Q 脉冲激光特性的主要参数,其中所用符号的意义与表 4、表 5 一致。另外, T_0 是 Cr^{4+} :YAG 可饱和吸收体的初始透过率。实验中使用的 Yb:YCOB 晶体样品长度为 4 mm,Yb 离子原子数分数为 15%;Yb:GdCOB 晶体样品长度为 6 mm,Yb 离子原子数分数为 10%。

可以看到,在几个 kHz 的(低)重复频率下,Yb:YCOB 和 Yb:GdCOB 晶体的被动调 Q 能够产

表6 连续波抽运条件下,不同 Yb:ReCOB 晶体的 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 脉冲激光参数Table 6 Pulsed laser parameters obtained in passive Q-switching with Cr⁴⁺:YAG under CW pump for different Yb:ReCOB crystals

Crystal	Q-switching conditions	$P_{avr,max}/W$	PRF /kHz	E_p/mJ	t_p/ns	P_p/kW	$\eta_{opt}/\%$	$\eta_s/\%$
Yb:YCOB	$T=20\%, T_0=97.5\%$	10.7	26.3	0.36	22	16.4	42.9	53
	$T=40\%, T_0=90\%$	4.13	3.23	1.28	5	256	26.8	49
Yb:GdCOB	$T=20\%, T_0=97.5\%$	15.6	91	0.17	22	7.8	44	53
	$T=60\%, T_0=84\%$	4.2	5.7	0.74	3.6	205	12	21

生高能量的激光脉冲(>0.7 mJ);而在几十个 kHz 的(高)重复频率下,可实现高功率脉冲激光运转,平均功率超过 10 W。目前所知的其他 Yb 离子激光材料,在连续波抽运条件下很难达到这样的水平。

4.3 以 GaAs 为可饱和吸收体的被动调 Q

除了 Cr⁴⁺:YAG 晶体外,纯的 GaAs 半导体晶体也可作为 1 μ m 波段的可饱和吸收体,用于 Yb 或 Nd 离子激光器的被动调 Q。GaAs 晶体的禁带宽度为 1.42 eV,它在 1 μ m 波段的可饱和吸收是由禁带中的 EL2 深能级引起的。

根据研究,通过对谐振腔构型和参数、GaAs 晶体的厚度和腔内位置等实验条件的选择和调整, Yb:YCOB 和 Yb:GdCOB 两种晶体以 GaAs 为可饱和吸收体的被动调 Q,可实现两种不同模式的脉冲激光运转,一种是 HRHP 模式,另一种是 LRHE 模式^[30-33]。就脉冲激光输出功率而言,目前仅 Yb:

LuPO₄晶体的 GaAs 被动调 Q 可与之相比,它同样能够实现 HRHP 和 LRHE 两种不同的被动调 Q 模式^[61-63]。

HRHP 模式 Yb:ReCOB/GaAs 被动调 Q 激光器所使用的谐振腔为平凹腔,输出镜的曲率半径 $R_2=100$ mm,腔长为 98 mm。在谐振腔内,激光晶体靠近平面镜放置,而 GaAs 晶体的位置紧靠激光晶体。GaAs 晶体(片)沿[100]方向切割,截面为 10 mm \times 10 mm,厚度为 0.2 mm,两个表面镀 1030 nm 增透膜。实验中所用 Yb:ReCOB 晶体的 Yb 离子原子数分数为 10%,长度分别为 4 mm (Yb:YCOB)和 6 mm (Yb:GdCOB),Yb:YCOB 为 X-切向,而 Yb:GdCOB 为 Y-切向。表 7 列出了 Yb:YCOB 和 Yb:GdCOB 两种晶体的 HRHP 模式脉冲激光运转得到的主要参数^[30, 33]。为了便于直接比较,表中也给出了 Yb:LuPO₄晶体在相同实验条件下得到的结果^[61, 63]。

表 7 高重复频率高功率模式下,不同晶体的 GaAs 被动调 Q 脉冲激光参数

Table 7 Pulsed laser parameters for different crystals, obtained in passive Q-switching with GaAs in the high-repetition-rate high-power mode

Crystal	P_{avr}/W	PRF /kHz	$E_p/\mu J$	t_p/ns	P_p/kW	$\eta_{opt}/\%$	λ_c/nm
Yb:YCOB	5.7	166.7	30	153	0.20	21.3	1032.0
Yb:GdCOB	3.8	100.0	38	79	0.48	20.9	1027.5
Yb:LuPO ₄	5.0	333.3	15	68	0.22	26.6	1003.0

由表 7 可以看出, Yb:GdCOB 晶体产生的脉冲激光功率低于 Yb:YCOB,但脉冲宽度更窄,只有 Yb:YCOB 晶体的一半。Yb:LuPO₄晶体可获得相同水平的脉冲输出功率,但脉冲重复频率是 Yb:YCOB 晶体的 2 倍,而脉冲宽度也更窄,这源自两种晶体光谱学性质的差异。

为了获得 LRHE 模式的被动调 Q 脉冲激光运

转,平凹腔输出镜曲率半径改为 $R_2=200$ mm,腔长为 199 mm。同时, GaAs 晶片厚度增加到 0.5 mm,并紧靠凹面输出镜放置。LRHE 模式下得到的被动调 Q 脉冲激光参数列于表 8。

可以看到,在 LRHE 模式下, Yb:ReCOB 晶体产生的激光脉冲能量是 Yb:LuPO₄晶体的 4~5 倍,但后者能够产生更窄的激光脉冲。另外,比较

表 8 低重复频率高能量模式下,不同晶体的 GaAs 被动调 Q 脉冲激光参数

Table 8 Pulsed laser parameters for different crystals, obtained in passive Q-switching with GaAs in the low-repetition-rate high-energy mode

Crystal	P_{avr}/W	PRF /kHz	E_p/mJ	t_p/ns	P_p/kW	$\eta_{opt}/\%$	λ_c/nm
Yb:YCOB	1.02	1.0	1.02	13.6	75.0	3.5	1022.7
Yb:GdCOB	1.31	1.92	0.68	9.0	75.6	5.4	1027.0
Yb:LuPO ₄	0.84	3.7	0.23	5.5	41.3	4.9	1002.0

表 7 和 8 所列参数可以看出,除了激光发射波长外,两种不同被动调 Q 模式下的脉冲激光运转,在几乎所有方面都表现出极大的差异。还应指出的是,以上两种不同模式的被动调 Q 所产生的脉冲激光运转,在功率输出特性以及重复频率、脉冲宽度和脉冲能量随抽运功率的变化等方面也存在很大差别^[30-33, 61-63]。

表 9 掺 Yb 石榴石晶体的 GaAs 被动调 Q 脉冲激光参数

Table 9 Pulsed laser parameters for Yb-doped garnet crystals, obtained in passive Q-switching with GaAs

Crystal	P_{avr}/W	PRF /kHz	E_p/mJ	t_p/ns	P_p/kW	λ_c/nm
Yb:YAG	1.39	35.7	53.0	3.5	11.1	1030.8
Yb:YGG	1.40	43.5	52.0	3.5	12.4	1025.5
Yb:LuGG	1.10	19.6	82.4	3.3	17.0	1025.8
Yb:GGG	1.53	41.7	55.0	3.4	12.7	1025.7

4.4 以二维材料为可饱和吸收体的被动调 Q

近年来涌现出了许多种类繁多的二维可饱和吸收体。这些二维材料主要有石墨烯、黑磷、过渡金属硫/硒/碲化物(TMD)以及 Bi_2Se_3 和 Bi_2Te_3 等拓扑绝缘体,它们的光吸收只显示很弱的波长选择性,因而可作为宽带可饱和吸收体,用于中红外至可见光波段激光器的被动调 Q 或锁模。

自 2014 年以来,这些二维材料已被广泛地用于 Nd、Yb、Er、Pr、Tm 和 Ho 等三价稀土离子激光器的被动调 Q 激光研究。然而,直到 2017 年,由二维材料被动调 Q 产生的脉冲激光输出功率一般限于 1 W 水平,而脉冲宽度多为几百 ns。限制输出功率提高和脉冲宽度压缩的主要障碍,是二维材料表面

表 10 Yb:YCOB、Yb:LuPO₄ 和 Yb:KLuW 以二维 WS₂ 为可饱和吸收体的被动调 Q 脉冲激光参数Table 10 Pulsed laser parameters for Yb:YCOB, Yb:LuPO₄, and Yb:KLuW crystals, obtained in passive Q-switching with 2D WS₂ as saturable absorber

Crystal	$T/\%$	P_{avr}/W	PRF /MHz	$E_p/\mu J$	t_p/ns	P_p/W	$\eta_s/\%$	λ_c/nm
Yb:YCOB	80	4.05	0.606	6.67	66	101.0	47	1036.4
Yb:LuPO ₄	80	4.35	1.33	3.41	28.6	110.0	47	1010.9
Yb:KLuW	80	1.87	2.18	1.19	39	30.5	71	1024.2

由表 10 可以看出,在 $T=80\%$ 的输出耦合透过率条件下,Yb:YCOB 和 Yb:LuPO₄ 两种晶体的脉冲输出功率都超过 4 W,斜率效率达到 47%。但 Yb:LuPO₄ 晶体脉冲激光运转的重复频率超过 Yb:YCOB 晶体的 2 倍,而脉冲宽度和脉冲能量约为后者的一半。这是因为 Yb:LuPO₄ 晶体的荧光寿命(0.83 ms)比 Yb:YCOB 晶体短,受激发射截面比 Yb:YCOB 晶体大而导致。还可以看到,在相同的输出耦合透过率下,Yb:KLuW 晶体在低于 2 W 的输出功率水平时,脉冲重复频率已高达 2.18 MHz。这归因于其更大的受激发射截面。

经过实验研究可知,在现有的 Yb 和 Nd 离子激光材料中,Yb:YCOB 和 Yb:GdCOB 等掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体以及 Yb:LuPO₄ 晶体最适合于以 GaAs 为可饱和吸收体的被动调 Q 激光运转,它们表现出的脉冲激光特性显著优于其他的 Yb 或 Nd 离子激光晶体。表 9 给出了 Yb:YAG 等掺 Yb 石榴石晶体的实验结果^[64]。

的光损伤以及光吸收引起的热效应;而克服这一障碍的最有效途径,是降低谐振腔内的激光功率密度。2018 年,研究发现,利用耦合腔效应可以在很高的谐振腔输出耦合透过率(最高可容许 $T=90\sim 95\%$)下,实现 Yb 离子激光器的稳定的二维材料被动调 Q,这就极大地降低了腔内功率密度,从而使脉冲输出功率提高到 4~5 W 水平,而脉冲宽度则缩短至 100 ns 以下(最短 28.6 ns)^[34,37,61,65-66]。研究表明,只有 Yb:LuPO₄ 晶体的二维材料被动调 Q 所产生的脉冲输出功率能够达到 Yb:ReCOB 类晶体的水平,这与 GaAs 被动调 Q 情况相同。表 10 给出了 Yb:YCOB、Yb:LuPO₄ 和 Yb:KLu(WO₄)₂ (Yb:KLuW) 三种晶体的 WS₂ 被动调 Q 脉冲激光参数^[37,65,67]。

表 11 给出了 Yb:YCOB、Yb:LaCOB 和 Yb:KLuW 三种晶体以二维 MoTe₂ 为可饱和吸收体的被动调 Q 激光运转参数^[35,68-69]。与 Yb:YCOB 晶体相比,Yb:LaCOB 的脉冲重复频率低得多,相应地,其脉冲能量也高得多,但脉冲宽度为前者的 2 倍。与表 10 中的 WS₂ 被动调 Q 情况相同,这里 Yb:KLuW 晶体也有着远高于 Yb:ReCOB 晶体的脉冲重复频率以及窄得多的脉冲宽度。

除了 WS₂ 和 MoTe₂ 两种二维 TMD 半导体,我们也实现了 Yb:ReCOB 晶体以二维 Bi₂Te₃ 拓扑绝缘体为可饱和吸收体的被动调 Q 脉冲激光运

表 11 Yb:YCOB、Yb:LaCOB 和 Yb:KLuW 以二维 MoTe₂ 为可饱和吸收体的被动调 Q 脉冲激光参数Table 11 Pulsed laser parameters for Yb:YCOB, Yb:LaCOB, and Yb:KLuW crystals, obtained in passive Q-switching with 2D MoTe₂ as saturable absorber

Crystal	$T / \%$	P_{avr} / W	PRF / MHz	$E_p / \mu J$	t_p / ns	P_p / W	$\eta_s / \%$	λ_c / nm
Yb:YCOB	40	1.58	0.704	2.25	52	40.8	36	1035.5
Yb:LaCOB	70	2.11	0.357	6.6	103	52.4	32	1037.8
Yb:KLuW	80	2.06	2.18	1.30	36	36.1	56	1030.6

转^[34,36,70]。表 12 列出了 Yb:YCOB、Yb:GdCOB、Yb:LaCOB 和 Yb:LuPO₄ 等晶体的被动调 Q 脉冲激光参数^[34, 36, 66, 70]。在三种 Yb:ReCOB 晶体中, Yb:YCOB 所产生的脉冲输出功率最高, 脉冲宽度

表 12 Yb:YCOB、Yb:GdCOB、Yb:LaCOB 和 Yb:LuPO₄ 晶体的 Bi₂Te₃ 被动调 Q 脉冲激光参数Table 12 Pulsed laser parameters for Yb:YCOB, Yb:GdCOB, Yb:LaCOB, and Yb:LuPO₄ crystals, obtained in passive Q-switching with Bi₂Te₃

Crystal	$T / \%$	P_{avr} / W	PRF / MHz	$E_p / \mu J$	t_p / ns	P_p / W	$\eta_s / \%$	λ_c / nm
Yb:YCOB	70	3.85	0.400	9.63	96	100.3	28	1033.3
Yb:GdCOB	50	2.38	0.325	7.32	104	70.4	36	1034.1
Yb:LaCOB	30	1.76	0.140	12.6	288	43.8	38	1079.2
Yb:LuPO ₄	50	5.02	1.67	3.0	55	54.5	54	1014.5

由二维材料引起的被动调 Q 激光运转, 重复频率通常在几百 kHz 以上, 相应的脉冲间隔远小于晶体的荧光寿命。尽管如此, 研究仍表明, 荧光寿命长而发射截面小的晶体, 如 Yb:ReCOB, 所产生的脉冲能量更高(重复频率低), 但脉冲宽度较大; 相反地, 荧光寿命短而发射截面大的晶体, 如 Yb:KLuW, 则易于产生脉冲宽度小、但重复频率高(脉冲能量低)的激光脉冲。

对于被动调 Q 的 Yb:ReCOB 类激光器, 腔内激光晶体和(或)可饱和吸收体表面的光损伤, 成为限制脉冲能量或脉冲功率提高的最大障碍。通过谐振腔构型的选择、腔内模参数的优化、抽运光条件的调整等, 可以在一定程度上降低光损伤的影响。而为了克服 Yb:ReCOB 类晶体声光调 Q 激光器在高抽运功率下通常出现的多脉冲运转或连续波振荡, 可以用开关时间短、关断损耗高的电光 Q 开关来代替声光 Q 开关。

5 锁模超短脉冲 Yb:ReCOB 晶体激光器

掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体有着很宽的发射带(1000~1100 nm)以及随波长平滑变化的增益, 特别适合于锁模超短脉冲的产生。早在 2000 年, 由离子注入改性的可饱和 Bragg 反射镜(SBR)锁模的 Yb:YCOB 晶体激光器已能够产生 210 fs 的脉冲; 而利用 SESAM 锁模, 由 Yb:GdCOB 晶体产生的激

光脉冲宽度更是缩短至 90 fs^[9-10]。自 2010 年以来, Yb:YCOB 晶体的锁模超短脉冲激光研究也取得重要进展, 由 SESAM 锁模和克尔透镜锁模产生的脉冲宽度都已小于 50 fs^[24, 25, 71-72]。

研究表明, 对于 Yb:YCOB 晶体的 SESAM 锁模, Y-切向晶体的 E//Z 偏振态激光运转, 最有利于锁模超短脉冲的产生^[24-25]。利用 Yb 离子原子数分数为 20%、长度为 3 mm 的 Y-切向晶体样品, 由 SESAM(调制深度 2%, 驰豫时间 < 0.5 ps)锁模可实现重复频率 95 MHz、脉冲宽度 47 fs 的激光运转(输出镜透过率 $T = 1\%$), 中心发射波长位于 1055 nm, 发射谱宽度为 43 nm, 在 1.4 W 的入射抽运功率下产生的平均输出功率为 44 mW^[25]。通过腔外脉冲压缩, 可使锁模脉冲宽度缩短至 35 fs(输出功率也降至 36 mW)。若输出镜透过率增加至 $T = 3\%$, 可使输出功率提高到 210 mW, 但未经压缩的锁模脉冲宽度为 75 fs^[25]。此外, 研究还发现, 当锁模脉冲宽度小于 50 fs 时, 腔内存在单程自拉曼转换, 中心波长位于 1170 nm, 是由 Yb:YCOB 晶体中(BO₃)³⁻离子团的内振动模(930 cm⁻¹)的受激拉曼散射所引起^[25]。

除了 SESAM 被动锁模, 利用 Yb:YCOB 晶体自身的克尔透镜效应, 也已实现稳定的锁模激光运转^[71-72]。实现克尔透镜锁模的重要前提是, 腔内激光介质中存在着足够高的激光功率密度。研究指出, 利用高亮度光纤耦合半导体激光器(光纤芯径

除了 SESAM 被动锁模, 利用 Yb:YCOB 晶体自身的克尔透镜效应, 也已实现稳定的锁模激光运转^[71-72]。实现克尔透镜锁模的重要前提是, 腔内激光介质中存在着足够高的激光功率密度。研究指出, 利用高亮度光纤耦合半导体激光器(光纤芯径

50 μm 、数值孔径 0.22) 纵向抽运, 若激光晶体内振荡光束半径约为 20 μm , 谐振腔输出镜透过率 $T = 0.8\%$, 就可以获得克尔透镜锁模运转^[71]。实验中使用 2 mm 长的 X-切向 Yb:YCOB 晶体(Yb 离子原子数分数为 20%), 激光偏振方向为 $E // Y$ 。由克尔透镜锁模产生的最短脉冲宽度为 73 fs, 相应的输出功率为 70 mW, 激光发射中心波长位于 1043 nm, 发射谱宽度为 19 nm^[71]。随后的进一步研究表明, 通过谐振腔结构的优化(包括输出耦合透过率减小至 $T = 0.4\%$), 可使克尔透镜锁模产生的激光脉冲宽度缩短到 39 fs^[72]。

激光介质具有宽的发射带和平滑的增益变化曲线, 是获得锁模超短脉冲的必要条件。在不同组分的掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐混晶中, 因存在电子跃迁谱线的非均匀加宽效应, 可能具有比 Yb:YCOB 和 Yb:GdCOB 更大的发射带宽和更平滑的增益变化, 因而有着更大的超短脉冲产生潜力。迄今为止, 有关这类掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐混晶锁模激光的研究仍非常少^[73]。因此, 在不同组分的混晶系列中探索更适合于锁模超短脉冲产生的新型 Yb:ReCOB 类激光晶体, 仍是有待于开展的很有意义的工作。

6 自倍频 Yb:ReCOB 晶体激光器

稀土钙氧硼酸盐本身为非线性光学晶体。在这类 Yb:ReCOB 晶体出现之初, 人们就已经认识到, 它们是很有潜力的自倍频激光晶体^[1,4]。同一时期的研究还指出, YCOB 和 GdCOB 晶体能够在 Nd:YVO₄ 晶体激光器中产生高效率的腔内倍频, 有效倍频效率可超过 40%, 达到磷酸钛氧钾(KTP)晶体倍频效率的 2/3^[74-75]。然而, 在随后的十多年里, Yb:ReCOB 晶体自倍频激光研究一直没有进展, 自倍频绿光输出功率限于 mW 水平^[40]。

2016 年, Khaled 等^[40]测量了 400~1100 nm 范围内 Yb:YCOB 晶体(Yb 离子原子数分数为 15%) 的主轴折射率(n_x, n_y, n_z), 计算了 XY、YZ 和 ZX 三个主平面内晶体的 I 类二次谐波(SHG)位相匹配曲线。结果表明, 原子数分数为 15% 的 Yb:YCOB 的位相匹配曲线几乎与 YCOB 的相应曲线完全重合。他们选取有效非线性系数最大的位相匹配方向, 即 ZX 主平面内 $\theta = 32.7^\circ$ (1089 nm), 利用 5 mm 长的 Yb:YCOB 晶体, 在 14.7 W 的入射抽运功率下, 由平凹腔产生的自倍频绿光输出功率达到 330 mW(输出波长 544.5 nm), 但存在着严重的绿光噪声^[40]。他们指出, 无法实现稳定的自倍频绿光

输出的主要原因之一, 在于沿着这一位相匹配方向, Yb:YCOB 晶体在 1089 nm 处两个正交偏振方向的发射截面差别太小。在自倍频过程中, 基频光难以保持在位相匹配所要求的单一偏振态($E // Y$)。Khaled 等还指出, 为了实现稳定的自倍频绿光输出, 应当在主平面之外寻找新的位相匹配方向。

在最近开展的一项研究中, Lu 等^[42]指出, 对于 Yb:YCOB 晶体 1020~1026 nm 的自倍频, 有效非线性系数最大的位相匹配方向为 ($\theta = 113^\circ, \varphi = 38.9^\circ$) 的一般空间方向。他们利用长度为 6 mm、截面为 2 mm × 2 mm、沿这一位相匹配方向切割的 Yb:YCOB 晶体(Yb 离子原子数分数为 10%), 并将谐振腔全反镜和输出镜直接镀在晶体的两个端面上。在 976 nm 光纤耦合半导体激光器纵向抽运下, 当入射抽运功率为 28.5 W 时, 510 nm 的自倍频输出功率达到 5.2 W, 斜率效率为 23%; 而当自倍频激光器工作于 513 nm 时, 所产生的最大绿光输出功率可达 6.2 W, 光-光转换效率和斜率效率分别为 22% 和 30%^[42]。

与上面 510~513 nm 和 544.5 nm 自倍频绿光相对应的 1020~1026 nm 和 1089 nm 的基频激光, 分别来自 Yb:YCOB 晶体主发射带和 1084 nm 附近的发射边带。研究表明, 除了主发射带和发射边带之外, Yb:YCOB 晶体在 $\lambda > 1100$ nm 还存在一个很弱的长波发射带, 发射峰位于 1130 nm, 是由振动-电子跃迁所引起的^[41]。利用这一弱长波发射带, 通过晶体的自倍频作用, 可实现黄光输出。对于 Yb:YCOB 晶体 1140 nm 的自倍频, 有效非线性系数最大的 I 类位相匹配方向为 $\theta = 120.6^\circ, \varphi = -38.73^\circ$ ^[41]。利用沿这一位相匹配方向切割的 6 mm 长的 Yb:YCOB 晶体(Yb 离子原子数分数为 20%), 通过晶体端面镀膜抑制 $\lambda < 1100$ nm 的基频激光振荡, 由自倍频产生的最大黄光输出功率达到 1.08 W, 光-光转换效率为 7.2%^[41]。

近年来在自倍频领域所取得的研究成果, 反映出这类稀土钙氧硼酸盐晶体在自倍频激光应用方面所拥有的显著优势和极大潜力。可以预期, 随着晶体中的 Yb 离子浓度、晶体长度、谐振腔参数、抽运光束功率密度与分布等条件的优化和晶体光学质量的改善, 以及新的 Yb:ReCOB 晶体的出现, 自倍频效率和激光功率还会获得进一步的提高。

7 结束语

掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体在固体激光的几乎

所有主要方面都有着突出的表现。它们可在 $1.02 \sim 1.09 \mu\text{m}$ 范围内,实现不同波长的室温连续波高功率线偏振激光输出,也可实现双偏振态、双波长(段)激光振荡;可由主动调 Q 或被动调 Q 获得高功率或高能量的脉冲激光输出;可通过 SESAM 被动锁模或克尔透镜锁模直接产生 $< 50 \text{ fs}$ 的超短激光脉冲;还可通过自倍频在可见光波段产生不同波长的高功率连续波(或脉冲)激光输出。另外,稀土钙氧硼酸盐也是电光晶体和压电晶体,而且存在着众多不同组分的混晶(固溶晶体)。在这类掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体中,不仅可望发展更多性能独特的优异激光晶体,也有可能探索和发现具有不同复合功能的新型激光材料。另一方面,虽然掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体已有二十年的研究历史,但对这类对称性极低的单斜结构激光晶体的认识和理解仍不够全面和深入,甚至有些看起来简单的基本问题,目前也无法给出令人信服的解释。例如,这类晶体的热导率很低(2 W/mK),而且热膨胀系数的各向异性很强^[76],但在纵向抽运条件下却可承受高达 $40 \sim 50 \text{ W}$ 的抽运光功率(稀土钙氧硼酸盐晶体的热光效应较弱,其热光系数小于许多现有的激光晶体,可能有助于这一问题的理解)。因此,在这类颇具潜力的掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体的应用开发过程中,仍然有大量基础性研究工作有待开展。

参 考 文 献

[1] Mougel F, Dardenne K, Aka G, et al. Ytterbium-doped $\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$: an efficient infrared laser and self-frequency doubling crystal [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1999, 16(1): 164-172.

[2] Aron A, Aka G, Viana B, et al. Spectroscopic properties and laser performances of Yb: YCOB and potential of the Yb: LaCOB material [J]. *Optical Materials*, 2001, 16(1/2): 181-188.

[3] Kränkel C, Peters R, Petermann K, et al. Efficient continuous-wave thin disk laser operation of Yb: $\text{Ca}_4\text{YO}(\text{BO}_3)_3$ in $E//Z$ and $E//X$ orientations with 26 W output power [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2009, 26(7): 1310-1314.

[4] Hammons D A, Eichenholz J M, Ye Q, et al. Laser action in Yb^{3+} : YCOB (Yb^{3+} : $\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$) [J]. *Optics Communications*, 1998, 156(4/5/6): 327-330.

[5] Krupke W F. Ytterbium solid-state lasers. The first decade [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in*

Quantum Electronics, 2000, 6(6): 1287-1296.

[6] Zhang H, Meng X, Wang P, et al. Slope efficiency of up to 73% for Yb: $\text{Ca}_4\text{YO}(\text{BO}_3)_3$ crystal laser pumped by a laser diode [J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 1999, 68(6): 1147-1149.

[7] Shah L, Ye Q, Eichenholz J M, et al. Laser tunability in Yb^{3+} : $\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ (Yb: YCOB) [J]. *Optics Communications*, 1999, 167: 149-153.

[8] Druon F, Augé F, Balembois F, et al. Efficient, tunable, zero-line diode-pumped, continuous-wave Yb^{3+} : $\text{Ca}_4\text{LnO}(\text{BO}_3)_3$ (Ln = Gd, Y) lasers at room temperature and application to miniature lasers [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2000, 17(1): 18-22.

[9] Valentine G J, Kemp A J, Birkin D J L, et al. Femtosecond Yb: YCOB laser pumped by narrow-stripe laser diode and passively modelocked using ion implanted saturable-absorber mirror [J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(19): 1621-1623.

[10] Druon F, Balembois F, Georges P, et al. 90 fs pulse generation from a mode-locked diode-pumped Yb^{3+} : $\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$ laser [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(6): 423-425.

[11] Khamaganova T N, Trunov V K, Dzhurinskiy B F. Crystal structure of calcium samarium oxyborate $\text{Sm}_2\text{Ca}_3\text{O}_2(\text{BO}_3)_6$ [J]. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 1991, 36(4): 855-857.

[12] Norrestam R, Nygren M, Bovin J O. Structural investigations of new calcium - rare earth (R) oxyborates with the composition $\text{Ca}_4\text{RO}(\text{BO}_3)_3$ [J]. *Chemistry of Materials*, 1992, 4(3): 737-743.

[13] Dirksen G J, Blasse G. Tetracalcium gadolinium oxoborate ($\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$) as a new host lattice for luminescent materials [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 1993, 191(1): 121-126.

[14] Aka G, Kahn-Harari A, Vivien D, et al. ChemInform abstract: a new non-linear and neodymium laser self-frequency doubling crystal with congruent melting: $\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$ (GdCOB) [J]. *ChemInform*, 2010, 28(1): 727-736.

[15] Iwai M, Kobayashi T, Furuya H, et al. Crystal growth and optical characterization of rare-earth (Re) calcium oxyborate $\text{ReCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ (Re = Y or Gd) as new nonlinear optical material [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1997, 36 (Part 2, No. 3A): L276-L279.

[16] Lebedev V A, Voroshilov I V, Gavrilenko A N, et al. Kinetic and spectroscopic investigations of Yb:

- YCa₄O(BO₃)₃ (Yb: YCOB) single crystals [J]. *Optical Materials*, 2000, 14(2): 171-173.
- [17] Augé F, Balembois F, Georges P, et al. Efficient and tunable continuous-wave diode-pumped Yb³⁺: Ca₄GdO(BO₃)₃ laser [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(6): 976-979.
- [18] Chénais S, Druon F, Balembois F, et al. Multiwatt, tunable, diode-pumped CW Yb: GdCOB laser [J]. *Applied Physics B*, 2001, 72(4): 389-393.
- [19] Auge F, Druon F, Balembois F, et al. Theoretical and experimental investigations of a diode-pumped quasi-three-level laser: the Yb³⁺-doped Ca₄GdO(BO₃)₃ (Yb: GdCOB) laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2000, 36(5): 598-606.
- [20] Liu J H, Zhang H J, Wang J Y, et al. Output-coupling-dependent polarization state of a continuous-wave Yb: YCa₄O(BO₃)₃ laser [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(20): 2909-2911.
- [21] Liu J, Han W, Zhang H, et al. Comparison of laser performance of Yb: YCa₄O(BO₃)₃ crystals cut along the principal optical axes [J]. *Applied Physics B*, 2008, 91(2): 329-332.
- [22] Liu J H, Yang H W, Zhang H J, et al. Anisotropy in laser performance of Yb: GdCa₄O(BO₃)₃ crystal [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(29): 5436-5441.
- [23] Heckl O H, Kränkel C, Baer C R E, et al. Continuous-wave and modelocked Yb: YCOB thin disk laser: first demonstration and future prospects [J]. *Optics Express*, 2010, 18(18): 19201-19208.
- [24] Yoshida A, Schmidt A, Zhang H J, et al. 42 fs diode-pumped Yb: Ca₄YO(BO₃)₃ oscillator [J]. *Optics Express*, 2010, 18(23): 24325-24330.
- [25] Yoshida A, Schmidt A, Petrov V, et al. Diode-pumped mode-locked Yb: YCOB laser generating 35 fs pulses [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(22): 4425-4427.
- [26] Liu J H, Dai Q B, Wan Y, et al. The potential of Yb: YCa₄O(BO₃)₃ crystal in generating high-energy laser pulses [J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 9365-9376.
- [27] Liu J H, Wan Y, Dai Q B, et al. Efficient high-energy passively Q-switched Yb: GdCa₄O(BO₃)₃ laser [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(12): 2676-2681.
- [28] Liu J H, Han W J, Chen X W, et al. Continuous-wave and passive Q-switching laser performance of Yb: YCa₄O(BO₃)₃ crystal [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(1): 348-355.
- [29] Chen X W, Wang L S, Liu J H, et al. High-power CW and passively Q-switched laser operation of Yb: GdCa₄O(BO₃)₃ crystal [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 79: 74-78.
- [30] Chen X W, Han W J, Xu H H, et al. High-power passively Q-switched Yb: YCa₄O(BO₃)₃ laser with a GaAs crystal plate as saturable absorber [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(11): 3225-3230.
- [31] Chen X W, Wang L S, Han W J, et al. High-energy passively Q-switched operation of Yb: GdCa₄O(BO₃)₃ laser with a GaAs semiconductor saturable absorber [J]. *Optics Express*, 2015, 23(23): 30357-30363.
- [32] Liu J H, Chen X W, Han W J, et al. Passively Q-switched Yb: YCa₄O(BO₃)₃/GaAs laser generating 1 mJ of pulse energy [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(10): 1104-1106.
- [33] Chen X W. Yb: ReCOB crystal characteristics of the high power /high energy pulse laser [D]. Qingdao: Qingdao University, 2016: 39-57.
陈晓雯. Yb: ReCOB 晶体的高功率/高能量脉冲激光特性研究 [D]. 青岛: 青岛大学, 2016: 39-57.
- [34] Yang J N, Ma Y J, Tian K, et al. High-power passive Q-switching performance of a Yb: YCa₄O(BO₃)₃ laser with a few-layer Bi₂Te₃ topological insulator as a saturable absorber [J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(10): 3146-3154.
- [35] Ma Y J, Tian K, Dou X D, et al. Passive Q-switching induced by few-layer MoTe₂ in an Yb: YCOB microchip laser [J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 25147-25155.
- [36] Li Y H, Liu M J, Chen J X, et al. Passively Q-switched laser action of Yb: LaCa₄O(BO₃)₃ crystal at 1.07 - 1.08 μm induced by 2D Bi₂Te₃ topological insulator [J]. *Applied Physics B*, 2019, 125(7): 131.
- [37] Tian K, Yang J N, Yi H Y, et al. High-power Yb: YCa₄O(BO₃)₃ laser passively Q-switched by a few-layer WS₂ saturable absorber [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 113: 1-5.
- [38] Chen X W, Xu H H, Guo Y F, et al. Acousto-optic Q-switching laser performance of Yb: GdCa₄O(BO₃)₃ crystal [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(24): 7142-7147.
- [39] Chen X W, Xu H H, Han W J, et al. Compact repetitively Q-switched Yb: YCa₄O(BO₃)₃ laser with an acousto-optic modulator [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 70: 128-130.

- [40] Khaled F, Loiseau P, Aka G, et al. Rise in power of Yb : YCOB for green light generation by self-frequency doubling [J]. *Optics Letters*, 2016, 41 (15): 3607-3610.
- [41] Fang Q N, Lu D Z, Yu H H, et al. Self-frequency-doubled vibronic yellow Yb : YCOB laser at the wavelength of 570 nm[J]. *Optics Letters*, 2016, 41 (5): 1002-1005.
- [42] Lu D Z, Fang Q N, Yu X S, et al. Power scaling of the self-frequency-doubled quasi-two-level Yb:YCOB laser with a 30% slope efficiency[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(21): 5157-5160.
- [43] Hellström J E, Pasiskevicius V, Laurell F, et al. Laser performance of Yb: GdCa₄O(BO₃)₃ compared to Yb: KGd(WO₄)₂ under diode-bar pumping [J]. *Laser Physics*, 2007, 17(10): 1204-1208.
- [44] Liu J H, Mateos X, Zhang H J, et al. Characteristics of a continuous-wave Yb: GdVO₄ laser end pumped by a high-power diode[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(17): 2580-2582.
- [45] Liu J H, Wan Y, Tian X P, et al. Polarization state of a continuous-wave Yb: NaY(WO₄)₂ disordered crystal laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10 (7): 075003.
- [46] Yuan H L, Wang L S, Ma Y J, et al. Anisotropy in spectroscopic and laser properties of Yb: Sr₃La₂(BO₃)₄ disordered crystal [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(9): 3251-3260.
- [47] Ji Y X, Cao J F, Tu C Y. Polarized spectral properties of a notable Yb³⁺: LaCa₄O(BO₃)₃ crystal [J]. *Optical Materials*, 2013, 35(12): 2698-2702.
- [48] Ji Y X, Cao J F, Xu J L, et al. Output-coupling-dependent laser operation of monoclinic Yb: Ca₄LaO(BO₃)₃ crystal[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(21): 5079-5082.
- [49] Ji Y X, Cao J F, Xu J L, et al. 24 W highly efficient simultaneous dual-wavelength laser operation of monoclinic Yb³⁺: Ca₄LaO(BO₃)₃ crystals [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(24): 5517-5521.
- [50] Zhang Y, Wei B, Wang G F. Spectroscopic properties of Yb³⁺-doped Ca₄Gd_{0.5}Y_{0.5}O(BO₃)₃ single crystals[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2010, 207(6): 1468-1473.
- [51] Chen X W, Xu H H, Han W J, et al. Spectroscopic properties and high-power laser operation of Yb_{0.14}: Y_{0.77}Gd_{0.09}Ca₄O(BO₃)₃ mixed crystal [J]. *Optical Materials*, 2016, 55: 33-37.
- [52] Zhong D G, Teng B, Kong W J, et al. Growth, structure, spectroscopic and continuous-wave laser properties of a new Yb: GdYCOB crystal[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 692: 413-419.
- [53] Ma Y J, Tian K, Li Y H, et al. Anisotropic lasing properties in the 1059 - 1086 nm range of Yb : YCa₄O (BO₃)₃ crystal [J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(4): 727-735.
- [54] Ma Y J, Li Y H, Dou X D, et al. Free-running performance of Yb_{0.14}:Y_{0.77}Gd_{0.09}Ca₄O(BO₃)₃ mixed crystal laser operating around 1084 nm [J]. *Optics Communications*, 2018, 427: 244-249.
- [55] Li Y H, Liu M J, Han W J, et al. High-power dual-polarization laser operation of Yb: LaCa₄O(BO₃)₃ crystal[J]. *Optics Communications*, 2019, 451: 192-196.
- [56] Chen L J, Wang Z P, Yu H H, et al. High-power single- and dual-wavelength Nd: GdVO₄ lasers with potential application for the treatment of telangiectasia[J]. *Applied Physics Express*, 2012, 5 (11): 112701.
- [57] Loiko P, Serres J M, Mateos X, et al. Thermal lensing and multiwatt microchip laser operation of Yb : YCOB crystals[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(3): 1-12.
- [58] Xia J, Liu H L, Hu Z H, et al. Pure-three-level Yb: GdCOB CW laser at 976 nm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(16): 3981-3984.
- [59] Koechner W. *Solid-state laser engineering* [M]. 6th ed. Berlin:Springer, 2006, 488-533.
- [60] Liang H C, Huang J Y, Su K W, et al. Passively Q-switched Yb³⁺: YCa₄O(BO₃)₃ laser with InGaAs quantum wells as saturable absorbers [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(12): 2292-2296.
- [61] Dou X D. Laser properties of Yb ions in tetragonal LuPO₄ and LuVO₄ crystals [D]. Qingdao: Qingdao University, 2019: 37-54.
窦晓丹. 四方结构 LuPO₄ 和 LuVO₄ 晶体中 Yb 离子的激光特性研究 [D]. 青岛: 青岛大学, 2019: 37-54.
- [62] Dou X D, Wang L S, Ma Y J, et al. Generation of pulsed laser radiation at 1002 nm with a quantum defect of 2.6% [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9 (3): 1-8.
- [63] Dou X D, Wang L S, Han W J, et al. Near-IR 1 μm high-repetition-rate pulsed radiation generated with an Yb: LuPO₄ miniature crystal rod laser [J]. *Optics Communications*, 2018, 420: 90-94.
- [64] Han W J, Ma Y J, Dou X D, et al. Passive Q-switching laser properties of Yb: Re₃Ga₅O₁₂ (Re = Y,

- Lu, Gd) garnets with GaAs semiconductor saturable absorber[J]. *Optics Communications*, 2018, 423: 1-5.
- [65] Dou X D, Ma Y J, Zhu M, et al. Multi-watt sub-30 ns passively Q-switched Yb:LuPO₄/WS₂ miniature laser operating under high output couplings [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(15): 3666-3669.
- [66] Yang J N, Tian K, Li Y H, et al. Few-layer Bi₂Te₃: an effective 2D saturable absorber for passive Q-switching of compact solid-state lasers in the 1 μm region[J]. *Optics Express*, 2018, 26(17): 21379-21389.
- [67] Tian K, Li Y H, Yang J N, et al. Passive Q-switching of an Yb:KLu(WO₄)₂ laser with 2D saturable absorbers of MoS₂ and WS₂: Scaling the output power to 2-W level [J]. *Optics Communications*, 2019, 436: 42-46.
- [68] Li Y H, Xu Y F, Xu G Y, et al. Performance of an Yb:LaCa₄O(BO₃)₃ crystal laser at 1.03-1.04 μm passively Q-switched with 2D MoTe₂ saturable absorber[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 99: 167-171.
- [69] Tian K, Li Y H, Yang J N, et al. Passively Q-switched Yb:KLu(WO₄)₂ laser with 2D MoTe₂ acting as saturable absorber[J]. *Applied Physics B*, 2019, 125(2): 24.
- [70] Yang J N, Li Y H, Tian K, et al. Passive Q-switching of an Yb:GdCa₄O(BO₃)₃ laser induced by a few-layer Bi₂Te₃ topological insulator saturable absorber[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(12): 125802.
- [71] Gao Z Y, Zhu J F, Tian W L, et al. Generation of 73 fs pulses from a diode pumped Kerr-lens mode-locked Yb:YCa₄O(BO₃)₃ laser[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(20): 5870-5872.
- [72] Gao Z Y, Zhu J F, Wu Z M, et al. Tunable second harmonic generation from a Kerr-lens mode-locked Yb:YCa₄O(BO₃)₃ femtosecond laser [J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(4): 044202.
- [73] Lin H F, Zhang G, Zhang L Z, et al. SESAM mode-locked Yb:GdYCOB femtosecond laser[J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(10): 3791-3795.
- [74] Liu J H, Wang C Q, Zhang S J, et al. Investigation on intracavity second-harmonic generation at 1.06 μm in YCa₄O(BO₃)₃ by using an end-pumped Nd:YVO₄ laser[J]. *Optics Communications*, 2000, 182(1/2/3): 187-191.
- [75] Liu J, Xu X, Wang C Q, et al. Intracavity second-harmonic generation of 1.06 μm in GdCa₄O(BO₃)₃ crystals[J]. *Applied Physics B*, 2001, 72(2): 163-166.
- [76] Fang Q N, Lu D Z, Yu H H, et al. Anisotropic thermal properties of Yb:YCOB crystal influenced by doping concentrations[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(3): 1501-1512.