

· 综述 ·

翠绿宝石超快激光器研究进展(特邀)

杨云霄¹, 孙思佳¹, 于洋², 田文龙¹, 张大成¹, 朱江峰^{1*}, 等³

(1.西安电子科技大学 光电工程学院, 西安; 2.西安电子科技大学 前沿交叉研究院, 西安;
3.中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 北京)

摘要:翠绿宝石晶体是一种宽带可调谐激光晶体, 发射光谱覆盖700~900 nm, 因此在超快激光脉冲产生方面也具有很大的潜力, 近年来得到了广泛的研究。首先介绍了翠绿宝石晶体的结构、物理及光学性质, 然后综述翠绿宝石晶体在超快激光领域中的发展现状, 并对其未来的发展进行了展望。

关键词:超快激光器; 二极管泵浦; 翠绿宝石晶体; 克尔透镜锁模

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2022)-02-0014-09

Advances in Research on Alexandrite Ultrafast Lasers (Invited)

YANG Yunxiao¹, SUN Sijia¹, YU Yang², TIAN Wenlong¹, ZHANG Dacheng¹, ZHU Jiangfeng^{1*}, et al³

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, China;

2. Academy of Advanced Interdisciplinary Research Xidian University, Xi'an, China;

3. Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China)

Abstract: Alexandrite is broadband tunable laser crystal with emission spectra covering 700~900 nm. Thus it also has great potential for ultrafast laser pulse generation, which has been extensively studied in recent years. At first, the structure, physical and optical properties of Alexandrite crystal are introduced. And then, the current development status in the field of ultrafast lasers is reviewed. At last, the future development is forecasted.

Key words: Ultrafast lasers; diode pumping; Alexandrite; Kerr-lens mode-locked

翠绿宝石晶体化学式为 $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$, 又称为亚历山大石 (Alexandrite), 是一种宽带可调谐激光晶体, 波长调谐范围为 701~858 nm^[1], 该晶体硬度高, 热导率高, 抗光学损伤能力强, 被广泛应用于遥感技术^[2-3]、雷达技术^[4-6]、光电对抗^[7]、激光美容^[8-10]等领域。翠绿宝石晶体由于其独特的光谱特性^[11], 在超快激光脉冲产生和应用方面也具有很大的潜力。首先, 翠绿宝石晶体发射光谱峰值位于 750 nm 处, 该波段激光穿透表皮能更好地被毛囊中的黑色素吸收, 有效作用于组织, 被广泛用于激光脱毛手术、皮肤黑色素祛除等。相比于现有的调 Q 激光器, 该波段的超快激光能更快更好地作用于组织细胞, 减少表皮细胞的损伤, 降低术后皮肤泛红、过敏的概率^[9, 12]。其次, 翠绿宝石激

光器经过倍频可直接获得紫外波段激光^[13-14], 可用于激光精密加工或光栅刻写等。另外, 翠绿宝石晶体发射光谱覆盖 700~900 nm^[15], 可支持产生小于 20 fs 的超短脉冲, 其吸收峰为 410 nm (E//a) 和 590 nm (E//b), 与钛宝石晶体相比, 当用 445 nm 蓝光泵浦翠绿宝石晶体时, 可以获得更宽的发射光谱, 当用 635 nm 红光泵浦时, 量子效率更高, 有望获得高平均功率输出, 弥补钛宝石激光器的不足。因此, 国内外研究单位对基于翠绿宝石晶体的超快激光技术进行了广泛研究, 对该方面研究进展进行综述。首先介绍了翠绿宝石晶体结构与部分光学性质, 然后重点对翠绿宝石超快激光器国内外研究进展展开叙述, 最后对翠绿宝石超快激光器发展提出了展望。

收稿日期: 2021-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(11774277); 科技部国家重点研发计划(2017YFB0405202); 中央高校基本科研业务费(ZD2006)

1 翠绿宝石晶体性质

1.1 晶体特征与结构

翠绿宝石晶体可采用熔盐法^[16]和提拉法生长^[17-18]。该晶体属于一致共熔化合物,熔点约为1 870 ℃,采用氧化铝(Al₂O₃)晶块、氧化铍(BeO)粉末和三氧化二铬(Cr₂O₃)粉末,按照一定化学计量比混合后烧制而成^[19]。该晶体属于斜方晶系、正双轴晶体,具有三个结晶轴,每个晶轴对应不同的偏振吸收谱和发射谱。

如图1所示,翠绿宝石晶胞属正交空间群(Pnma),可以被看作近似六边形紧密堆积(hcp),由四个分子组成,其中八个Al³⁺占据八面体结构中的扭曲位置,四个Be²⁺位于四面体结构中的扭曲位置,此外还有位于垂直于c轴平面的O²⁻^[20]。

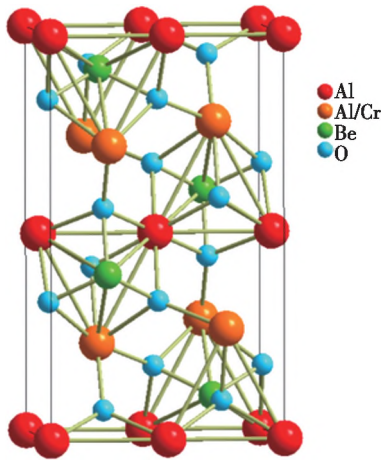


图1 翠绿宝石晶胞结构

由于Al-O离子组合结构的差异,导致了Al³⁺在结构产生了两种不同的位置,一种Al³⁺位于Cipoint群的反转位,具有反转对称性,称作Al₁;另一类Al³⁺位于Cspoint群的镜像对称位,具有镜像对称性,称作Al₂。掺杂过程中,Cr³⁺优先占据尺寸较大的Al₂离子位置。因此,Cr³⁺占据镜像位的粒子数约占总掺杂粒子数的78%^[21]。激光产生本质上是由掺杂离子在镜像对称位(CS)处的离子决定。翠绿宝石晶体简化能级如图2所示^[11]。其中⁴A₂能级是基态能级,⁴T₂是吸收态连续区,²E是储能能级。在翠绿宝石激光器中,产生的宽带激光是通过声子跃迁的方式发生在⁴T₂与⁴A₂两个能级之间。晶体中的²E与⁴T₂两能级能量差 $\Delta E = 800 \text{ cm}^{-1}$,它们之间存在耦合,激发态离子从⁴T₁和⁴T₂跃迁到包含R1线R2线的²E能级,可对

应出射波长为680.4 nm和678.5 nm^[21-22]。

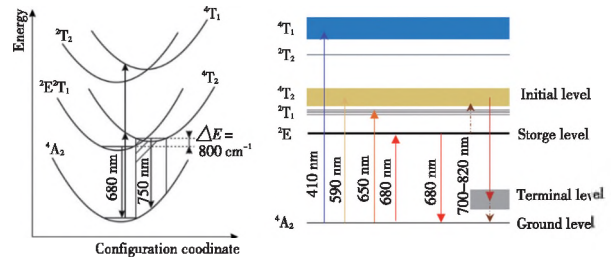


图2 翠绿宝石晶体的简化能级图

作为可调谐激光晶体,翠绿宝石晶体光谱可调谐范围在701~858 nm之间,它的受激发射截面 σ 为 $0.7 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$,相较于Ti:Sapphire的受激发射截面($2.77 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$)来说比较小,但其激光上能级寿命较长(室温下约260 μs),因此 $\sigma\tau = 1.82 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$,乘积很大^[11,23],从而使翠绿宝石激光器可以实现高效低阈值连续光运转^[1,24]。晶体热机械性能好,有高热导率,高损伤阈值,用做高功率、大能量激光器有很大的潜力^[25]。表1列出了翠绿宝石晶体部分性质^[15,25-28]。

表1 翠绿宝石晶体性质

Crystal Properties	Values	Crystal Properties	Values
Lattice dimensions	$a = 9.404 \text{ \AA}$	Refractive index	$n_a = 1.736$
	$b = 5.476 \text{ \AA}$		$n_b = 1.741$
	$c = 4.424 \text{ \AA}$		$n_c = 1.734$
Occupation site	Cr ³⁺ /Al ³⁺	Inrefractive index	$3.54 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$
Density	3.69 g/cm ³	dispersion	60.7 fs ² /mm
Melting point	1 870 ℃	Thermal conductivity	23 Wm ⁻¹ K ⁻¹
Mohs hardness	8.5	Thermo-optic coefficients ($\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)	$dn_a/dT = 5.9$
			$dn_b/dT = 6.9$
			$dn_c/dT = 15.2$
Lifetime	262 μs	Intrinsic slope efficiency	65%
Emission cross section	$0.7 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$	Tuning range	701~858 nm

1.2 晶体光谱特性

翠绿宝石激光器可在三能级系统或四能级系统下运转。低温下,翠绿宝石激光器工作在三能级系统下,出射波长为680.4 nm^[29]。室温甚至高温下,翠绿宝石激光器工作在四能级系统下,可实现宽带波长调谐。翠绿宝石晶体在可见光区具有广泛的吸收带(图3),吸收峰位于410 nm(E//a)和590 nm(E//b)附近,因此可选用蓝光、绿光、红光作为泵浦源。

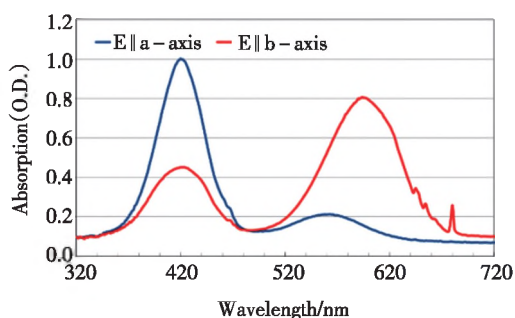
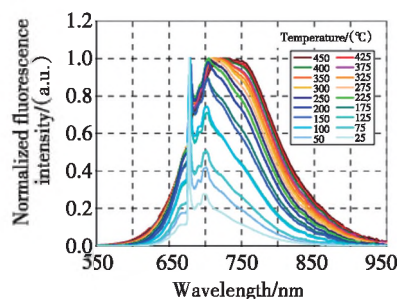


图3 翠绿宝石晶体吸收光谱

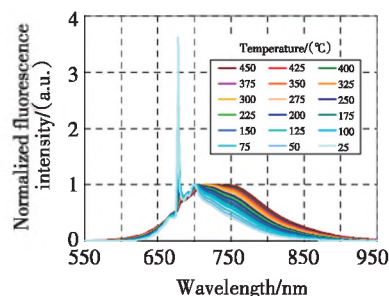
20世纪80年代,以闪光灯作为翠绿宝石晶体的泵浦源的激光器效率很低。随着激光技术的发展,利用成熟的商用绿光光源^[1,30]和红光二极管激光器(LD)^[31]作为泵浦源开展实验,实现了效率较高的连续光激光器。近年来,红光LD泵浦翠绿宝石晶体成为热点研究方向,红光作为泵浦源相较于其他光源来说有更小的量子亏损,更高的光光转化效率,能获得大功率激光输出,且成本也比较低^[32]。2005年,麦考瑞大学OGLVY H等人选用绿光、黄光、红光等不同波长激光泵浦翠绿宝石晶体,探究了不同波长泵浦下激光器的转化效率,模式匹配和光束质量。实验结果表明,泵浦波长短于645 nm更容易导致光谱不稳定以及光斑恶化。而波长在645~680 nm之间的光源都能够产生高效、稳定的连续激光输出。因此选用绿光泵浦时,激光器设计需要偏重考虑激光器腔内的模式匹配^[33]。2016年,英国帝国理工WILLIAM R KERRIDGE-JOHNS等人研究翠绿宝石激光器时,提出了一个充分考虑激光基态吸收、激光激发态吸收和泵浦光基态吸收的准三能级激光器工作模型,给出了输出功率、阈值、斜效率、腔内损耗等参数相关理论计算公式,他们将该模型计算得出的理论值与实验得出的实际测量值进行对比,结果吻合较好,为优化设计翠绿宝石激光器提供了指导思路^[34]。2017年,捷克理工大学首次使用蓝光InGaN半导体激光器作为泵浦源,设计搭建了集成微芯片激光器^[11],由于其发射峰值位于750 nm附近,量子亏损较大,转换效率只有19.6%。

翠绿宝石晶体发射光谱位于可见光波段(700~900 nm),与钛宝石一样都是可调谐波长的激光晶体,室温下其波长调谐范围在701~858 nm,峰值位于750 nm处。2019年UMIT DEMIRBAS等人测量**b**轴方向上25℃~450℃不同温度下的发射光谱^[35],并将其强度归一化后进行对比,如图4所示^[35]。高温

下发射光谱峰值有红移的现象。该光谱发射带宽可支持小于20 fs的超短脉冲的产生。



(a) E//b处25℃~450℃归一化光谱的峰值发射波长强度

(b) $T_2 \rightarrow {}^4A_2$ 跃迁的声子加宽峰值归一化光谱^[35]图4 E//b处25℃~450℃归一化光谱的峰值发射波长强度及 $T_2 \rightarrow {}^4A_2$ 跃迁的声子加宽峰值归一化光谱

为了更直观地对比晶体各属性之间的差异,表2中列出了钛宝石与性质相似的同族激光晶体^[23,25-26,36-37]。

相较于掺铬的其他晶体(如Cr:LiSAF、Cr:LiCAF、Cr:LiSGaF),翠绿宝石晶体有更高的热导率($23 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)和莫氏硬度(8.5),适合选作高功率泵浦的激光器增益介质。此外,翠绿宝石晶体的热膨胀系数较小,与钛宝石相当,有较弱的热透镜效应。晶体非线性折射率与钛宝石相近,有利于产生较强的克尔效应,实现克尔透镜锁模,获得超短脉冲。

1.3 晶体热效应

激光器设计中热管理是重点考虑因素,尤其是在高功率激光器设计中,过重的热负荷会导致热透镜效应,影响激光器工作性能,过度的热积累会导致晶体损坏。评价激光器的热参数中,不容忽视的参数是晶体的热膨胀系数 α 和热导率 κ ,前者描述晶体在不同温度下如何膨胀或收缩,后者描述晶体

散发多余热量的速度有多快^[38]。因此,热光系数(the thermo-optic coefficients, TOCs)和热光路系数(the thermal coefficients of the optical path, TCOP)是所需要关注的两个重要参数。热光系数用 dn/dT

计算,热光路系数用 $W = dn/dT + (n - 1)\alpha$ 计算,其中 n 是折射率, T 是温度, α 为热膨胀系数。2018年 PAVEL LOIKO 等用激光束偏差法对翠绿宝石晶体的这两个参数进行了测量计算^[23]。

表2 晶体物理与光学特性参数

	Cr ³⁺ :BeAl ₂ O ₄ Alexandrite	Ti ³⁺ :Al ₂ O ₃ Ti:sapphire	Cr ³⁺ :LiCaAlF ₆ Cr:LiCAF	Cr ³⁺ :LiSrAlF ₆ Cr:LiSAF	Cr ³⁺ :LiSrGaF ₆ Cr:LiSGaF
Mass density $\rho /(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	3.69	3.98	2.99	3.45	3.89
Melting point/ $^{\circ}\text{C}$	1 870	2 040	810	766	716
Mohs hardness	8.5	9	4	3~4	4
Thermal expansion coefficient $\alpha /(\times 10^{-6}/\text{K})$	5.9(/a) 6.1(/b) 6.7(/c)	4.8 and 5.3	21(/a) 3.1(/c)	26(/a) -8.1(/c)	12, 23(/a) 0, -5.4(/c)
Thermal conductivity $\kappa /(\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1})$	23	42	5.1	3.1	3.6
Lasing bandwidth λ / nm	700~900	700~1 050	720~840	780~1 010	785~935
Nonlinear index $n_2/10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$	3.54	3.2	0.4	0.8	1.2
Room-temperature fluorescence lifetime $\tau/\mu\text{s}$	262	3.2	175	67	88
Emission cross section $\sigma_{\text{eff}} (10^{-19} \text{ cm}^2)$	0.07	2.77	0.13	0.48	0.33
Intrinsic slope efficiency	65%	64%	67%	53%	52%

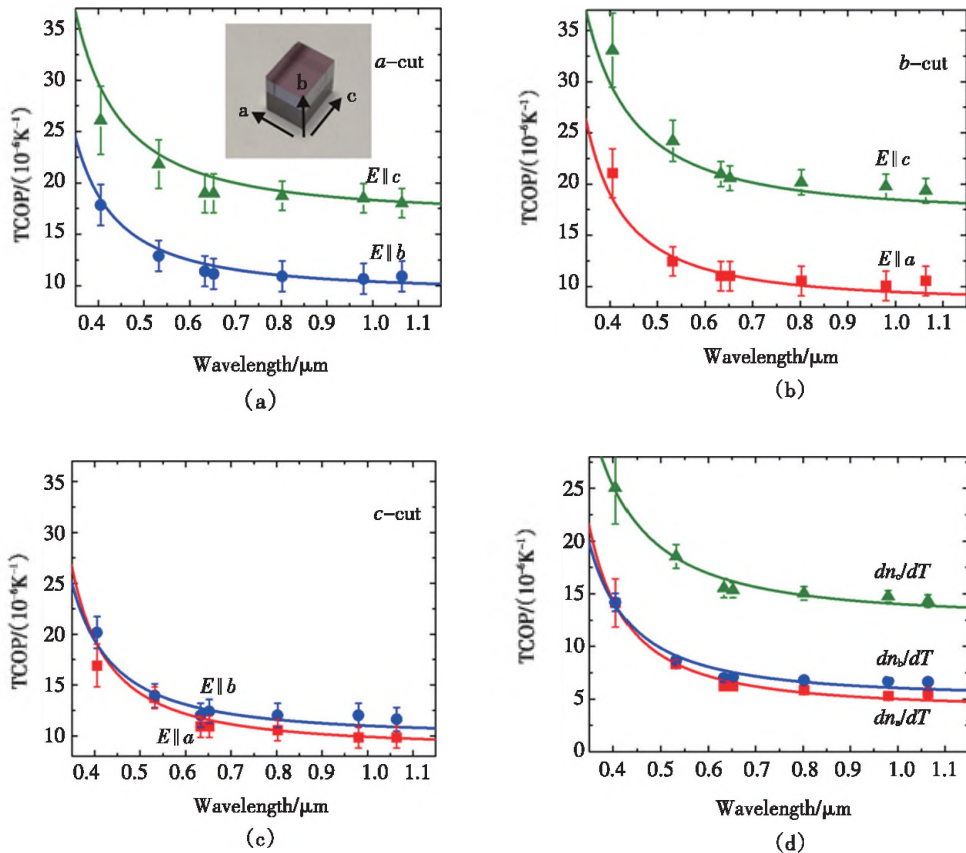


图5 a-cut(a)b-cut(b)和c-cut(c)翠绿宝石晶体的热光学特性(d)晶体三个晶轴关于TCOP的色散曲线^[23]

由于翠绿宝石晶体三个不同晶轴所展现出来的性质不同,因此每个晶轴测量所获得的热光系数也不一样。文中报道了测量并拟合的不同波长下热光系数,并将热光色散公式简化为

$$\frac{dn}{dT} = A_0 + \frac{A_1}{\lambda^2} + \frac{A_2}{\lambda^4} + \frac{A_3}{\lambda^6} \quad (1)$$

其中, λ 的单位为 μm ; A_{0-3} 为膨胀系数 (A_0 对应于 dn/dT 波长极限, A_{1-3} 代表其色散), 其大小见表3^[23]。

表3 翠绿宝石晶体的热光色散公式中的系数

OC	A_0	A_1	A_2	A_3
dn/dT	3.95	1.184 2	-0.078 6	0.024 6
dn/dT	5.12	0.984 8	-0.012 9	0.014 1
dn/dT	12.72	1.327 5	0.032 0	0.012 1

此外,根据不同波长下测量所得的折射率拟合出相应的塞曼方程,并计算出翠绿宝石晶体的二阶与三阶色散曲线^[26]。当激光波长为 755 nm, 偏振平行于晶轴 b 方向, 即 $E//b$ 时, 每毫米翠绿宝石晶体的二阶材料色散量为 60.7 fs^2 , 三阶色散为 39.5 fs^3 。标定准确的色散曲线可为超短脉冲的产生提供较为准确的色散量参考, 在超快激光器中, 补偿足够的色散量是很有必要的。具体色散曲线见图5。

2 翠绿宝石超快激光器

超短脉冲激光亦可称作超快激光, 它具有脉冲宽度窄, 峰值功率高等特点, 被广泛应用于激光通信、工业加工、医学成像等领域。20世纪80年代发现翠绿宝石晶体时, 人们就开展了相关研究。

2.1 锁模激光器

1982年, 苏联科学院西伯利亚物理研究所 LISITSYN V N 等人以闪光灯作为泵浦源, 弛豫时间 22 ps 的有机染料作为可饱和吸收体实现了被动锁模的翠绿宝石激光器, 获得了可调谐波长范围 725~745 nm、重复频率 12.5 Hz、脉冲宽度 8 ps 的超短脉冲激光输出^[39]。1989年, 法国 CNRS 量子光学实验室 FREY R 等人利用氩离子激光器作为泵浦源, 在腔内插入声光调制器 (acousto-optic modulator, AOM) 以主动锁模的方式获得了重复频率 112 MHz, 脉冲宽度 35 ps 的激光输出, 波长在 750 nm 附近 30 nm 宽度可调谐^[40]。随着激光技术的发展, 不同波段激光器极大丰富, 翠绿宝石晶体吸收谱覆

盖大部分可见光区域, 激光器可选择的泵浦源有蓝光、绿光、黄光、红光激光器。目前, 市面上的可用的蓝红光激光器以半导体二极管激光器为主, 其光束质量差, 不是作为锁模激光器首选的优质泵浦源; 匹配翠绿宝石晶体发射峰的大功率黄光激光器主要是以拉曼倍频的手段获得^[41], 成本较高; 由 Nd:YVO₄ 倍频产生 532 nm 绿光激光器拥有优质的光束质量, 较高的功率, 通常作为克尔透镜锁模激光器的首选泵源。

2016年加拿大曼尼巴托大学 SHIRING HAMNBAR 等人首次报道了基于 532 nm 绿光激光器泵浦的翠绿宝石克尔透镜锁模 (Kerr-lens Mode-locked, KLM) 激光器, 证明了翠绿宝石晶体可作为超快激光器的增益介质^[42]。

该激光器的中心波长为 755 nm, 重复频率为 80 MHz, 脉冲宽度为 170 fs, 这也是翠绿宝石激光器第一次实现百飞秒量级的脉冲激光输出, 输出功率为 780 mW, 对应的光光转化效率为 9.8%。实验中使用的翠绿宝石晶体掺杂浓度为 0.155.at%, 晶体长度 7 mm。腔型设计如图6所示^[42]。

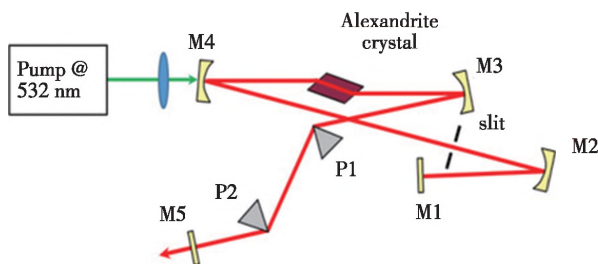


图6 克尔透镜锁模飞秒翠绿宝石激光振荡器的示意图

选用了传统的克尔透镜锁模 X 型腔, 腔内一臂加入了 $R=200 \text{ mm}$ 的凹面镜 M_2 和硬孔光阑, 更好地控制腔内激光模式大小, 在实验操作中能更好地对激光进行调节; 另一臂作为色散补偿臂, 插入材质为 SF10 的三棱镜, 较大折射率材质的三棱镜能在较短距离范围内为长晶体提供足量的负色散。

2018年, 该团队在此腔型的基础上利用量子点半导体可饱和吸收镜 (quantum-dot saturable absorber mirror, QD-SESAM) 作为锁模元件, 在中心波长为 775 nm 处实现脉冲宽度为 380 fs 被动锁模实验结果, 该激光器的输出功率为 295 mW, 重复频率为 79.9 MHz^[43], 实验装置如图7所示^[43]。

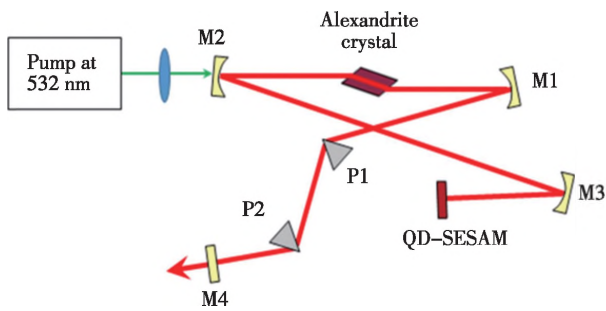


图7 QD-SESAM 翠绿宝石锁模激光器示意图

2018年,土耳其科奇大学CAN CIHAN等人报道了基于多通腔的克尔透镜锁模翠绿宝石激光器。在传统锁模X型腔的其中一臂引入折叠多通腔(Multipass-cavity, MPC)系统,将1.4 m的腔长在有限的空间内增长到26.8 m,重复频率从107 MHz变为5.6 MHz,在泵浦功率1 W时获得输出功率4 mW,脉冲宽度为70 fs的实验结果^[44],实验装置如图8所示^[44]。

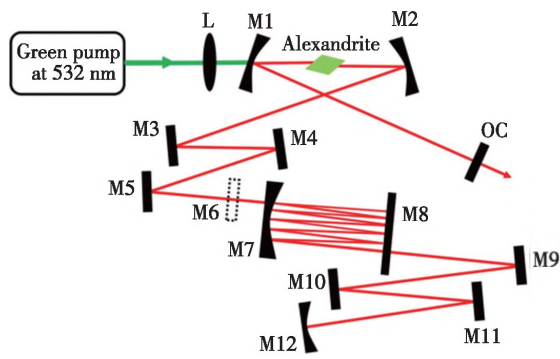


图8 532 nm 泵浦的 MPC 翠绿宝石激光器的实验装置

同年,该课题组利用相似的实验装置,使用单层石墨烯作为可饱和吸收体获得了翠绿宝石被动锁模实验结果,脉冲宽度进一步得到压缩,从70 fs减小到65 fs^[45],这是目前为止报道的基于绿光泵浦的翠绿宝石锁模激光器获得的最窄脉冲宽度。

2021年山东大学RU Linmiao等人报道了基于红光LD泵浦的高重频自锁模翠绿宝石激光器。获得了重复频率3.6 GHz,脉冲宽度237 fs的锁模脉冲输出^[46],实验中利用平凹腔(图9)^[46]的设计缩短腔长,提高重复频率,这也是翠绿宝石激光器首次获得的GHz量级的实验结果。

最近,本课题组选用10 W商用绿光激光器(Sprout-G, Lighthouse Photonics)作为泵浦源,开展了翠绿宝石克尔透镜锁模激光器研究(图10)。使用

掺杂浓度0.22.at%,长度3 mm的翠绿宝石晶体,通过棱镜对补偿腔内色散的方式,在10 W泵浦光功率下,实现了稳定的锁模输出,平均功率为369 mW,脉冲宽度为105 fs,中心波长为749 nm,光谱半高全宽为6.3 nm,重复频率为92 MHz,相应的时间带宽积为0.354。图11为脉冲自相关结果及锁模脉冲光谱。

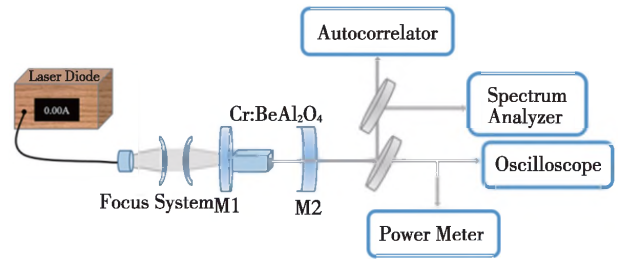


图9 二极管泵浦的自锁模翠绿宝石激光器的实验装置

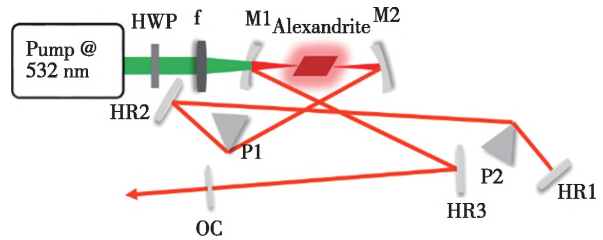
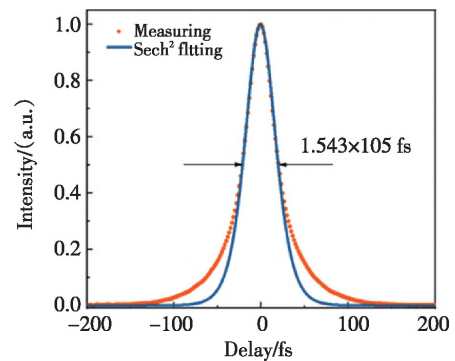
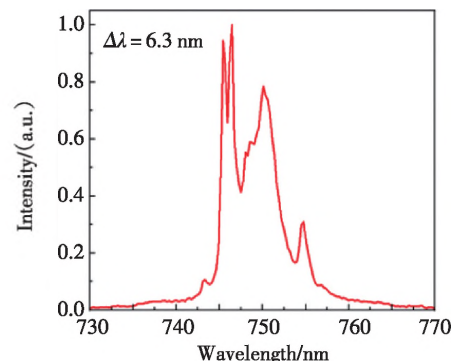


图10 克尔透镜锁模翠绿宝石激光器实验装置



(a) 脉冲自相关结果



(b) 锁模脉冲光谱

图11 脉冲自相关结果及锁模脉冲光谱

2.2 放大器

翠绿宝石晶体吸收带宽较宽,上能级寿命较长(260 μs),是很好的储能器件,可用于飞秒激光放大。1988年,美国IMRA America公司DONALD J HARTER等人研制一款波长可调谐的窄线宽翠绿宝石再生放大器^[47]。种子源选用单频染料激光器,其脉冲宽度5 ns,单脉冲能量1 nJ,将其注入到如图12所示的翠绿宝石再生放大腔中^[47],同时在腔内插入双折射滤光片进行波长调谐,获得了中心波长755 nm,脉冲宽度5 ns,单脉冲能量5 mJ放大结果,波长可调谐范围为735~780 nm。

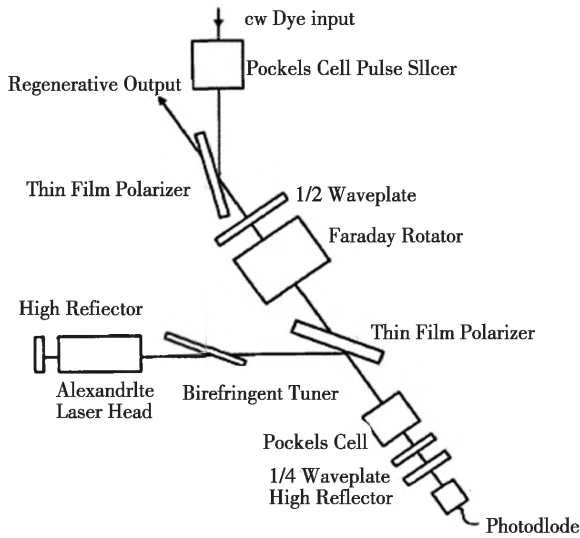


图12 窄线宽再生放大器实验装置

1989年,罗彻斯特大学MAURICE PESSOT等人利用啁啾脉冲放大技术与再生放大器结合(图13)^[48],以功率为30 mW,中心波长765 nm,脉冲宽度270 fs的同步泵浦锁模染料激光器作为种子源,经过展宽压缩,最终获得脉冲宽度300 fs,峰值功率1.7 GW的放大输出结果^[48]。图14为翠绿宝石再生放大器的腔体设计^[48]。

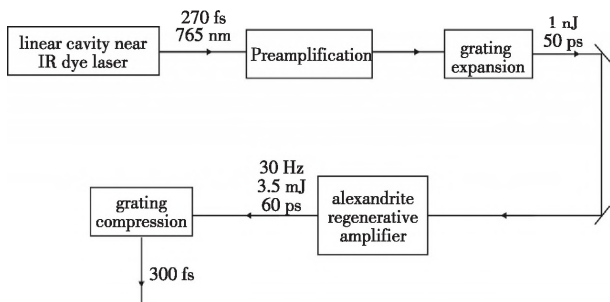


图13 翠绿宝石再生放大器放大方案

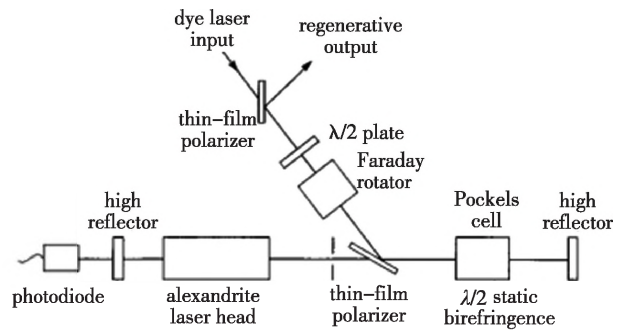


图14 翠绿宝石再生放大器的腔体设计

1996年IMRA America公司与加利福尼亚大学A HARIHARAN等人将翠绿宝石激光器作为泵浦源,注入飞秒种子源,纵向泵浦翠绿宝石再生放大腔^[49]。如图15所示^[49]。

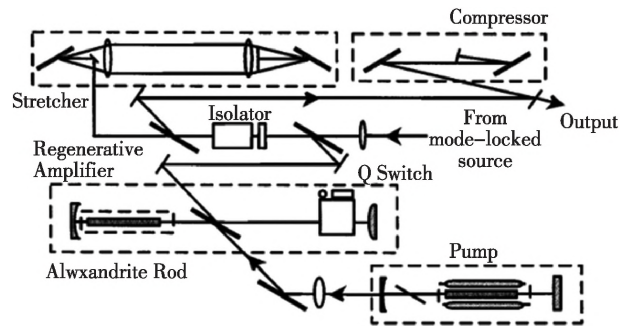


图15 翠绿宝石泵浦翠绿宝石再生放大器的系统示意图

实验中选用闪光灯泵浦的翠绿宝石调Q激光器作为放大器的泵浦源,利用翠绿宝石晶体不同温度下的发射特性,对晶体的温度进行控制,获得中心波长728 nm,重复频率10 Hz,脉冲宽度100 μs,最大单脉冲能量900 mJ的泵浦光。种子源选用脉冲宽度为100 fs、波长为800 nm的锁模钛宝石激光器,将其注入以翠绿宝石晶体作为介质的再生放大腔中,采用啁啾脉冲放大技术对种子光进行展宽压缩,获得了脉冲宽度为200 fs,脉冲能量为4 mJ输出结果。

3 总结与展望

综上所述,目前翠绿宝石超快激光器主要是以高功率绿光激光器作为泵浦源。虽然选用红光LD进行泵浦,获得较小的量子亏损,实现更高的转换效率,从而提升激光器输出功率,腔型选择设计上也可以弱化晶体缺陷所带来的影响因素,但红光LD泵浦源的亮度低,光束质量差,需对输出光斑进行

整形优化,才能实现翠绿宝石锁模激光器较好的模式匹配。近年来,高功率红光LD发展迅速,为翠绿宝石激光器提供波长合适,价格低廉的泵浦源。以翠绿宝石晶体优异的物理与光学性质,搭配恰当的LD光束整形方案与优质的热管理方案,可设计搭建LD泵浦的高功率飞秒激光器。翠绿宝石再生放大器的研究从20世纪90年代之后就没有相关的报道,在此方面还有更大的探索发展空间。翠绿宝石激光器可通过倍频产生紫外激光,未来在获得高功率飞秒紫外光源的研究方向上有重要的意义,对其应用于光栅刻写等方面具有很大的发展潜力。

参考文献

- [1] GHANBARI S, MAJOR A. High power continuous-wave Alexandrite laser with green pump[J]. *Laser Physics*, 2016, 26(7).
- [2] MUNK A, JUNGBLUTH B, STROTKAMP M, et al. Diode-pumped alexandrite ring laser in single-longitudinal mode operation for atmospheric lidar measurements[J]. *Opt Express*, 2018, 26(12): 14928-14935.
- [3] PONSARDIN PL, HIGDON NS, GROSSMANN BE, et al. Optimization of the alexandrite laser tuning elements for a water vapor lidar[J]. *NTRS*, 1990.
- [4] CLARKSON WA, SHORI RK, MUNK A, et al. Diode-pumped Alexandrite ring laser for lidar applications[J]. *Solid State Lasers XXV: Technology and Devices*, 2016.
- [5] KARAFOLAS N, SODNIK Z, CUGNY B, et al. Progress in diode-pumped alexandrite lasers as a new resource for future space lidar missions[J]. *International Conference on Space Optics-ICSO 2014*, 2017.
- [6] STROTKAMP M, MUNK A, JUNGBLUTH B, et al. Diode-pumped Alexandrite laser for next generation satellite-based earth observation lidar[J]. *CEAS Space Journal*, 2019, 11(4): 413-422.
- [7] 刘书航, LIU S, 刘京郊, 等. High output energy tunable alexandrite laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(s1).
- [8] LEE MC, LIN YF, HU S, et al. A split-face study: comparison of picosecond alexandrite laser and Q-switched Nd:YAG laser in the treatment of melasma in Asians[J]. *Lasers Med Sci*, 2018, 33(8): 1733-1738.
- [9] SINDY H, CHING-SHENG Y, SHYUE-LUEN C, et al. Efficacy and safety of the picosecond 755-nm alexandrite laser for treatment of dermal pigmentation in Asians-a retrospective study[J]. *Lasers in medical science*, 2020, 35(6).
- [10] TANGHETTI EA. The histology of skin treated with a picosecond alexandrite laser and a fractional lens array[J]. *Lasers Surg Med*, 2016, 48(7): 646-652.
- [11] FIBRICH M, ŠULC J, VYHLÍDAL D, et al. Alexandrite spectroscopic and laser characteristic investigation within a 78-400K temperature range[J]. *Laser Physics*, 2017, 27(11).
- [12] 王英, 汪倩, 鲜燕, 等. 翠绿宝石皮秒激光与Q开关翠绿宝石纳秒激光治疗面部雀斑疗效对比[J]. *中国美容医学*, 2019, 28(10): 72-74.
- [13] SONG Y, WANG Z, YONG B, et al. 2.55 W continuous-wave 378 nm laser by intracavity frequency doubling of a diode-pumped alexandrite laser[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(20).
- [14] IMAI S, ITO H. Long-pulse ultraviolet-laser sources based on tunable alexandrite lasers[J]. *Quantum Electronics, IEEE Journal of* 1998.
- [15] PESTRYAKOV EV, ALIMPIEV AI, MATROSOV VN. Prospects for the development of femtosecond laser systems based on beryllium aluminate crystals doped with chromium and titanium ions[J]. *Quantum Electronics*, 2001, 31(8): 689.
- [16] 李宋贤, 陈建中, 董美斌, 等. 可调谐激光材料—掺杂铝酸铍单晶的生长及其光谱特性[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 1995, 6(6): 87-91.
- [17] 张新民, 朱汝德, 柴耀, 等. Cr³⁺:BeAl₂O₄单晶的特性及生长工艺的改进[J]. *人工晶体学报*, 1999, 28(2).
- [18] GUO X, CHEN M, LI N, et al. Czochralski growth of Alexandrite crystals and investigation of their defects[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1987, 83(3): 311-318.
- [19] 郭行安. 金绿宝石晶体提拉法生长及光学性能[J]. *激光杂志*, 1986(4): 180-183.
- [20] TRINDADE NM, SCALVI R, SCALVI L. Cr³⁺ distribution in Al₁ and Al₂ sites of Alexandrite (BeAl₂O₄: Cr³⁺) induced by annealing, investigated by optical spectroscopy[J]. *Energy and Power Engineering*, 2010, 2(1): 18-24.
- [21] 王艳, 王学荣, 刘博林. 金绿宝石激光晶体性能的研究[J]. *激光杂志*, 2003, 24(1): 2.
- [22] WALLING J, PETERSON O, MORRIS R. Tunable CW alexandrite laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16(2): 120-121.
- [23] LOIKO P, GHANBARI S, MATROSOV V, et al. Dispersion and anisotropy of thermo-optical properties of Alexandrite laser crystal[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(10).
- [24] YORULMAZ I, BEYATLI E, KURT A, et al. Efficient and low-threshold Alexandrite laser pumped by a single-mode diode[J]. *Optical Materials Express*, 2014, 4(4).
- [25] DEMIRBAS U, KÄRTNER FX. Alexandrite: an attractive

- thin-disk laser material alternative to Yb:YAG[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2020, 37(2).
- [26] LOIKO P, MAJOR A. Dispersive properties of alexandrite and beryllium hexaaluminate crystals[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(7).
- [27] PUGH-THOMAS D, WALSH BM, GUPTA MC. Spectroscopy of $\text{BeAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ with application to high-temperature sensing[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(15): 2891.
- [28] CHING WY, XU Y-N, BRICKEEN BK. Comparative study of the electronic structure of two laser crystals: BeAl_2O_4 and LiYF_4 [J]. *Physical Review B*, 2001, 63(11).
- [29] FIBRICH M, ŠULC J, JELINKOVÁ H. Alexandrite microchip lasers[J]. *Optics Express*, 2019, 27(12).
- [30] HOFFMAN HJ, KUPER JW, SHORI RK, et al. High efficiency CW green-pumped alexandrite lasers[J]. *Solid State Lasers XV: Technology and Devices*, 2006.
- [31] BEYATLI E, BAALI I, SUMPFF B, et al. Tapered diode-pumped continuous-wave alexandrite laser[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(12).
- [32] TEPPITAKSAK A, MINASSIAN A, THOMAS GM, et al. High efficiency >26 W diode end-pumped Alexandrite laser[J]. *Opt Express*, 2014, 22(13): 16386-16392.
- [33] OGILVY H, WITHFORD MJ, MILDREN RP, et al. Investigation of the pump wavelength influence on pulsed laser pumped Alexandrite lasers[J]. *Applied Physics B*, 2005, 81(5): 637-644.
- [34] KERRIDGE-JOHNS WR, DAMZEN MJ. Analytical model of tunable Alexandrite lasing under diode end-pumping with experimental comparison[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, 33(12).
- [35] DEMIRBAS U, SENNAROGLU A, KÄRTNER FX. Temperature dependence of Alexandrite effective emission cross section and small signal gain over the 25-450 °C range[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(8).
- [36] UMIT Demirbas, DUO Li JRB, ALPHAN Sennaroglu, et al. Low-cost, single-mode diode-pumped Cr:Colquirite lasers[J]. *Optics Express*, 2009.
- [37] DEMIRBAS U. Cr:Colquirite lasers: current status and challenges for further progress[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2019, 68.
- [38] WANG H, PAN J, MENG Y, et al. Advances of Yb:CALGO laser crystals[J]. *Crystals*, 2021, 11(9).
- [39] LISITSYN VN, MATROSOV VN, OREKHOVA VP, et al. Generation of 0.7~0.8 μm picosecond pulses in an alexandrite laser with passive mode locking[J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1982, 9(3): 607-609.
- [40] R, FREY, F, et al. An actively mode-locked continuous wave Alexandrite laser[J]. *Optics Communications*, 1989, 73(3): 232-234.
- [41] CHEN YF, HUANG HY, LEE CC, et al. High-power diode-pumped Nd:GdVO₄/KGW Raman laser at 578 nm[J]. *Opt Lett*, 2020, 45(19): 5562-5565.
- [42] GHANBARI S, AKBARI R, MAJOR A. Femtosecond Kerr-lens mode-locked Alexandrite laser[J]. *Opt Express*, 2016, 24(13):14836-14840.
- [43] GHANBARI S, FEDOROVA KA, KRYSA AB, et al. Femtosecond Alexandrite laser passively mode-locked by an InP/InGaP quantum-dot saturable absorber[J]. *Opt Lett*, 2018, 43(2): 232-234.
- [44] CIHAN C, MUTI A, BAYLAM I, et al. 70 femtosecond Kerr-lens mode-locked multipass-cavity Alexandrite laser[J]. *Opt Lett*, 2018, 43(6): 1315-1318.
- [45] CIHAN C, KOCABAS C, DEMIRBAS U, et al. Graphene mode-locked femtosecond Alexandrite laser[J]. *Opt Lett*, 2018, 43(16): 3969-3972.
- [46] MIAO R, NIE Y, WANG S, et al. Self-mode-locked alexandrite femtosecond lasers with multi-GHz repetition rates[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(8).
- [47] HARTER DJ, BADO P. Wavelength tunable alexandrite regenerative amplifier[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(21): 4392-4395.
- [48] PESSOT M, SQUIER J. Chirped pulse amplification of 300 fs pulses in an alexandrite regenerative amplifier[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989, 25(1): 61-66.
- [49] HARIHARAN A, FERMAN ME, STOCK ML, et al. Alexandrite-pumped alexandrite regenerative amplifier for femtosecond pulse amplification[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(2): 128-130.

文中作者还有魏志义