

引用格式: ZHAO Zhi-gang, GUAN Chen, CONG Zhen-hua, *et al.* Research Progresses of Alexandrite Solid-state Lasers (Invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(11):1149006

赵智刚,关晨,丛振华,等. 翠绿宝石固体激光器研究进展(特邀)[J]. 光子学报, 2020, 49(11):1149006

## 翠绿宝石固体激光器研究进展(特邀)

赵智刚<sup>1,2</sup>, 关晨<sup>1,2</sup>, 丛振华<sup>1,2</sup>, 张行愚<sup>1,2</sup>, 朱振<sup>3</sup>, 王世武<sup>4</sup>, 聂奕<sup>4</sup>, 刘杨<sup>1,2</sup>,  
刘兆军<sup>1,2</sup>

(1 山东大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266237)

(2 山东省激光技术与应用重点实验室, 山东 青岛 266237)

(3 山东华光光电子股份有限公司, 济南 250101)

(4 青岛海泰光电技术有限公司, 山东 青岛 266000)

**摘要:** 翠绿宝石晶体是一种性能优良的宽带可调谐激光增益介质, 具有荧光寿命长、饱和能量密度高、吸收带宽较宽以及热机械性能优良等特点。除闪光灯外, 翠绿宝石晶体还可以使用蓝光激光二极管、红光激光二极管、绿光激光器、黄光激光器等多种可见光光源进行泵浦。随着激光二极管技术的成熟及其商业化应用, 利用红光激光二极管泵浦的翠绿宝石激光器逐渐成为固体激光领域的研究热点。本文首先介绍了翠绿宝石晶体的各种特性, 并着重对基于闪光灯以及各类激光二极管泵浦的翠绿宝石激光器在国内外的应用进行综述, 包括翠绿宝石连续激光、翠绿宝石调 Q 激光、翠绿宝石锁模激光、以及基于翠绿宝石的紫外激光。最后, 阐述了翠绿宝石激光光源在医疗、雷达、显微等领域中的应用并对其未来发展提出了展望。

**关键词:** 激光器; 翠绿宝石激光器; 二极管泵浦; 全固态激光器; 可见光激光器; 可调谐激光器; 闪光灯泵浦; 翠绿宝石晶体

中图分类号: TN248

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204911.1149006

## Research Progresses of Alexandrite Solid-state Lasers (Invited)

ZHAO Zhi-gang<sup>1,2</sup>, GUAN Chen<sup>1,2</sup>, CONG Zhen-hua<sup>1,2</sup>, ZHANG Xing-yu<sup>1,2</sup>, ZHU Zhen<sup>3</sup>,  
WANG Shi-wu<sup>4</sup>, NIE Yi<sup>4</sup>, LIU Yang<sup>1,2</sup>, LIU Zhao-jun<sup>1,2</sup>

(1 School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China)

(2 Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Technology and Application, Qingdao, Shandong 266237, China)

(3 Huaguang Optoelectronics Co., Ltd., Jinan 250101, China)

(4 Crystech Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266000, China)

**Abstract:** Alexandrite crystal is an excellent broadband tunable laser gain medium with long fluorescence lifetime, high saturation energy density, wide absorption bandwidth and excellent thermo-mechanical properties. In addition to the flash lamp pumping, a variety of visible light sources can also be used as the pumping source such as blue laser diodes, red laser diodes, green lasers, yellow lasers, etc. With the maturity and commercial application of laser diode technology, the alexandrite lasers pumped by red laser diodes have become a hot topic in the field of solid-state lasers. The characteristics of alexandrite crystal are

**基金项目:** 国家自然科学基金(Nos. 118041292, 62075116, 62075117), 教育部联合基金(Nos. 6141A02022413, 6141A02022421), 山东省重点研发计划(No. 2019JMRH0111), 山东大学杰出中青年学者计划, 山东大学齐鲁青年学者计划

**第一作者:** 赵智刚(1984—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为超快激光与非线性光学等. Email: zhigang@sdu.edu.cn

**共同第一作者:** 关晨(1993—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为固体激光技术等. Email: 201511772@mail.sdu.edu.cn

**通讯作者:** 刘兆军(1981—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为晶体光纤激光技术等. Email: zhaojunliu@sdu.edu.cn

**收稿日期:** 2020-09-01; **录用日期:** 2020-10-14

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

firstly introduced. The domestic and international research progress of alexandrite lasers pumped by flash lamp, laser diodes, etc. are summarized, including continuous, Q-switched, mode-locked and ultraviolet lasers. Finally, the recent advances in their applications to dermatology, lidar, microscope, etc. are introduced and the future developments of alexandrite solid-state lasers are prospected.

**Key words:** Lasers; Alexandrite lasers; Diode pumping; All-solid-state lasers; Visible lasers; Tunable lasers; Flash lamp pumping; Alexandrite crystal

**OCIS Codes:** 140.3460; 140.3480; 140.3580; 140.7300

## 0 引言

翠绿宝石晶体(Alexandrite,  $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$ )是一种性能优越的宽带可调谐激光工作介质<sup>[1-2]</sup>,波长调谐范围为701~858 nm<sup>[3]</sup>,且通过单次倍频即可获得紫外激光,在高分辨率光谱学、非线性光学、遥感技术、雷达技术、光电对抗和激光美容等领域有着广泛的应用<sup>[4-7]</sup>.特别是自2013年以来,高功率红光激光二极管(Laser Diode, LD)技术的成熟,为高效小型化翠绿宝石激光器的发展注入了新的活力,目前已经取得了系列研究成果<sup>[8-14]</sup>.翠绿宝石晶体,又称为紫翠宝石、金绿宝石、变石、亚历山大石等,主要供应商有美国的Northrop Grumman Synoptics公司、白俄罗斯的Solix公司、德国的Moltech GmbH公司、英国的Roditi公司、以及中国的青岛海泰光电技术有限公司等.近些年,美国Light Age公司<sup>[11]</sup>、土耳其科驰大学<sup>[8]</sup>、英国伦敦帝国理工学院<sup>[12-13]</sup>、德国亚琛工业大学<sup>[14]</sup>、以及中国长春理工大学<sup>[15]</sup>和山东大学<sup>[16]</sup>等单位均对翠绿宝石晶体全固态激光器进行了较为细致的研究.

本文首先介绍了翠绿宝石晶体的物理、激光特性和抽运源红光LD的发展概况,并着重对基于闪光灯以及各类LD泵浦的翠绿宝石激光器的国内外研究进展进行综述,包括翠绿宝石连续激光、翠绿宝石调Q激光、翠绿宝石锁模激光、以及基于翠绿宝石的紫外激光等.最后,介绍了翠绿宝石激光器在医疗、雷达、显微等领域中的应用,并对翠绿宝石激光器的发展提出展望.

## 1 翠绿宝石晶体的特性

翠绿宝石晶体的发射光谱位于可见光波段,具有重要的应用价值.实际上,除了翠绿宝石晶体,钛宝石晶体和 $\text{Cr}^{3+}:\text{colquiriites}(\text{Cr}:\text{LiCAF}, \text{Cr}:\text{LiSAF}, \text{Cr}:\text{LiSGaF})$ 等的发射波长也处于可见光波段,但是一方面它们的光谱并不完全重合,另一方面翠绿宝石晶体各方面性能优良并可用激光二极管进行泵浦,因此这些年得到了快速发展.

为了更好地展示翠绿宝石晶体的物理及光学性能,将其与钛宝石、 $\text{Cr}:\text{LiCAF}$ 、 $\text{Cr}:\text{LiSAF}$ 、 $\text{Cr}:\text{LiSGaF}$ ,以及目前近红外波段的主流晶体 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 的主要参数进行对比,如表1所示<sup>[17]</sup>.可以看出:1)翠绿宝石晶体具有优异的热机械性能,包括高热导率( $23 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )、高机械强度和高损伤阈值( $270 \text{ J/cm}^2$ ),因此适合在高功率泵浦下运转.2)翠绿宝石晶体的质量密度与钛宝石、 $\text{Cr}^{3+}:\text{colquiriites}$ 相近,比 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 稍低,翠绿宝石与钛宝石、 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 均具有较高的莫氏硬度(8~9),不易被划伤,相反, $\text{Cr}^{3+}:\text{colquiriites}$ 的莫氏硬度较低(3~4),因此在使用时需要谨慎操作,避免划伤.3)翠绿宝石的热膨胀系数( $6 \times 10^{-6} \sim 7 \times 10^{-6} / \text{K}$ )较小,与钛宝石、 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 相当,而较小的热膨胀系数意味着较弱的晶体热透镜效应.4)翠绿宝石晶体的杨氏模量较高,约为 $469 \times 10^9 \text{ Pa}$ ,因此其在纵向拉伸或压缩时承受长度变化的能力较强.

表2给出了翠绿宝石晶体与钛宝石、 $\text{Cr}:\text{LiCAF}$ 、 $\text{Cr}:\text{LiSAF}$ 、 $\text{Cr}:\text{LiSGaF}$ 以及 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 等晶体的光谱和激光典型参数的对比<sup>[17]</sup>.翠绿宝石晶体具有很强的双折射特性,可以直接输出线偏振激光.其非线性折射率与钛宝石相当,有利于实现克尔透镜锁模.另外,虽然翠绿宝石晶体受激发射截面 $\sigma_{em}$ 仅为 $0.7 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ <sup>[18]</sup>,但是由于其具有较高的损伤阈值(约为 $270 \text{ J/cm}^2$ ),因此可以承受高功率泵浦从而提供较高的激光增益.相比于钛宝石晶体,翠绿宝石晶体具有以下方面的突出优势:1)荧光寿命长.钛宝石晶体的荧光寿命 $\tau_f$ 较短(约 $3 \mu\text{s}$ ),而翠绿宝石晶体具有更长的荧光寿命(室温时 $262 \mu\text{s}$ ),更有利于储存能量;饱和能量密度高,便于得到更高峰值功率脉冲输出;较大的 $\sigma_{em}\tau_f$ 乘积表明可以实现更低阈值激光振荡.2)可LD泵浦.由于目前绿光LD功率尚低,用做钛宝石激光器泵浦源的单台绿光LD的输出功率仍限制在1 W量级<sup>[19]</sup>,因此LD泵浦钛宝石激光器还处于发展阶段.尽管可以使用更高功率的商用蓝光LD做泵浦源,但短波长泵浦的钛宝石激光器

量子亏损较高、热效应强,输出功率水平限制在0.5 W量级,因此钛宝石晶体主要使用绿光激光器作为抽运源,但是其价格昂贵、结构复杂、操作维护困难.而翠绿宝石晶体不仅可以使绿光激光器,还可以使用日渐成熟的红光LD作为泵浦源,量子亏损小、系统整体效率高、结构紧凑、造价低.3)热透镜效应弱.高功率泵浦条件时,钛宝石晶体的热效应严重,需要采用低温冷却才能获得高性能激光输出,且输出功率有限,而翠绿宝石激光器可以在室温下良好运转,同时翠绿宝石晶体的有效增益截面随晶体温度的升高而变大,有利于激光输出.

表1 翠绿宝石、钛宝石、Cr:LiCAF、Cr:LiSAF、Cr:LiSGaF和Yb:YAG晶体的相关热机械参数<sup>[17]</sup>Table 1 The related thermo-mechanical parameters of the alexandrite, Ti:Sapphire, Cr:LiCAF, Cr:LiSAF, Cr:LiS-GaF, and Yb:YAG crystal<sup>[17]</sup>

Gain medium	Cr <sup>3+</sup> :BeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (Alexandrite)	Ti <sup>3+</sup> :Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Ti:sapphire)	Cr <sup>3+</sup> : LiCaAlF <sub>6</sub> (Cr:LiCAF)	Cr <sup>3+</sup> : LiSrAlF <sub>6</sub> (Cr: LiSAF)	Cr <sup>3+</sup> : LiSrGaF <sub>6</sub> (Cr: LiSGaF)	Yb <sup>3+</sup> :Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (Yb:YAG)
Mass density $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	3.69	3.98	2.99	3.45	3.89	4.56
Melting point/ $^{\circ}\text{C}$	1 870	2 040	810	766	716	1 970
Specific heat capacity $C_p/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	1.05	0.761	0.935	0.842	0.76	0.59
Mohs hardness	8.5	9	~4	3~4	~4	8.5
Knoop hardness/ ( $\text{kg}\cdot\text{mm}^{-2}$ )	1 600~2 300	1 800 (//c) 2 200 (//a)	—	197	—	1 320
Thermal conductivity $\kappa/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	23 (//a-b-c)	30.3 (//a) 32.5 (//c)	4.58 (//a) 5.14 (//c)	1, 1.8 (//a) 1.68, 3 (//c)	1.3 (//a) 2.6 (//c)	10
Thermal expansion coefficient $\alpha/(\times 10^{-6}\text{K}^{-1})$	6 (//a) 6 (//b) 7 (//c)	4.8 & 5.3	22, 21 (//a) 3.6, 3.1 (//c)	22.2, 25, 26 (//a) -9.8, -10, -8.1 (//c)	12, 23 (//a) 0, -5.4 (//c)	6.7
Thermal diffusivity $D/(\times 10^{-3}\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	60	92.5	16.4 (//a) 18.4 (//c)	6 (//a) 10 (//c)	4.4 (//a) 8.8 (//c)	37
Young modulus $E/(\times 10^9\text{Pa})$	469	335	96	109 (avg) 85 (//c) 120 (//a)	—	280, 310
Poisson's ratio $\nu$	~0.25	0.29	0.25	0.3	—	0.3
Tensile (fracture) strength $\sigma_t/(\times 10^6\text{Pa})$	457~948 (//a) 520 (//b)	400	—	38.5±8	—	200
Fracture toughness $K_{Ic}/(\times 10^6\text{Pa}\cdot\text{m}^{1/2})$	2.6	2.2	0.31, 0.18~0.37	0.33, 0.4	—	1.4
Thermal figure of merit $R_T'/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1/2})$	14	22	0.53	0.42 (//a) 0.80 (//c)	0.55	5.1
Damage threshold/ ( $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	270 @ 12 ns	7.8 @ 0.5 ps 80 @ 50 ps 210 @ 8 ns	20~25 @ 50 ps	1.5 @ 20 ps 8~24 @ 50 ps	20~26 @ 50 ps	110 @ 4.5 ns

翠绿宝石晶体一般采用提拉法技术生长,属于斜方晶系、正双轴晶体,具有三个结晶轴<sup>[20]</sup>,每个晶轴对应不同的偏振吸收谱和发射谱.图1(a)为沿c轴方向观察到的翠绿宝石晶体的晶格结构<sup>[21]</sup>;图1(b)为青岛海泰光电技术有限公司利用提拉法生长的翠绿宝石晶体的毛坯图,其中晶体直径为70 mm,长度为140 mm.为

表2 翠绿宝石、钛宝石、Cr:LiCAF、Cr:LiSAF、Cr:LiSGaF和Yb:YAG晶体的光谱和激光相关参数<sup>[17]</sup>  
 Table 2 The spectroscopic and laser parameters of the alexandrite, Ti:Sapphire, Cr:LiCAF, Cr:LiSAF, Cr:LiSGaF, and Yb:YAG crystal<sup>[17]</sup>

Gain medium	Cr <sup>3+</sup> :BeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (Alexandrite)	Ti <sup>3+</sup> :Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Ti:sapphire)	Cr <sup>3+</sup> : LiCaAlF <sub>6</sub> (Cr:LiCAF)	Cr <sup>3+</sup> : LiSrAlF <sub>6</sub> (Cr:LiSAF)	Cr <sup>3+</sup> : LiSrGaF <sub>6</sub> (Cr:LiSGaF)	Yb <sup>3+</sup> :Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (Yb:YAG)
Birefringence	Biaxial	Negative uniaxial	Positive uniaxial	Positive uniaxial	Positive uniaxial	Isotropic
Refractive index <i>n</i>	1.736 7 ( <i>//a</i> ) 1.742 1 ( <i>//b</i> ) 1.734 6 ( <i>//c</i> )	1.765 5 ( <i>//a</i> ) 1.757 3 ( <i>//c</i> )	1.380 ( <i>//a</i> ) 1.380 8 ( <i>//c</i> )	1.387 3 ( <i>//a</i> ) 1.394 0 ( <i>//c</i> )	1.389 3 ( <i>//a</i> ) 1.391 ( <i>//c</i> )	1.82
Nonlinear refractive index <i>n</i> <sub>2</sub> / $(\times 10^{-16} \text{ cm}^2 \cdot \text{W}^{-1})$	2 3.54	3.2	0.4 0.36~0.66	0.8 0.52~2.15	1.2	6.9
Temperature dependence of refractive index <i>dn/dT</i> / $(\times 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1})$	5.5, 9.4 ( <i>//a</i> ) 7, 8.3 ( <i>//b</i> ) 14.9 ( <i>//c</i> )	13	4.2, -7.3 ( <i>//a</i> ) 4.6, -4.9 ( <i>//c</i> )	-2.5, -4.5 ( <i>//a</i> ) -4, -9.1 ( <i>//c</i> )	-7, -2.7 ( <i>//a</i> ) -1.8 ( <i>//c</i> )	9.9
Group velocity dispersion/ (fs <sup>2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )	60.7	56.6	24	22.7	~25	66.6
Pump wavelength/nm	550 ( <i>//a</i> ) 595 ( <i>//b</i> ) 570 ( <i>//c</i> )	480	630	650	630	940
Absorption bandwidth/nm	90 ( <i>//a</i> ) 80 ( <i>//b</i> ) 70 ( <i>//c</i> )	125	90	100	85	12.5
Peak absorption cross section $\sigma_{\text{ab}}$ / $(\times 10^{-20} \text{ cm}^2)$	3.9 ( <i>//a</i> ) 19 ( <i>//b</i> ) 9 ( <i>//c</i> )	6.4 ( <i>//c</i> ) 2.6 ( <i>//a</i> )	1.3 ( <i>//c</i> ) 0.9 ( <i>//a</i> )	4.5 ( <i>//c</i> ) 2.5 ( <i>//a</i> )	3 ( <i>//c</i> ) 1.5 ( <i>//a</i> )	0.83
Maximum gain wavelength/nm	750	790	780	855	840	1 030
Tuning range/nm	714~818 (300 K)	660~1180	720~887	770~1 110	777~977	1 016~1 108
Peak emission cross section $\sigma_{\text{em}}$ / $(\times 10^{-20} \text{ cm}^2)$	0.7 @ 22 °C	41 ( <i>//c</i> ) 15 ( <i>//a</i> )	1.3 ( <i>//c</i> ) 0.9 ( <i>//a</i> )	4.8 ( <i>//c</i> ) 1.6 ( <i>//a</i> )	3.3 ( <i>//c</i> ) 1.4 ( <i>//a</i> )	2.1
Room-temperature fluorescence lifetime $\tau_f$ / $\mu\text{s}$	262	3.2	175	67	88	940
$\sigma_{\text{em}}\tau_f$ / $(\times 10^{-26} \text{ cm}^2 \cdot \text{s})$	183 @ 22 °C	131	228	322	290	1 975
Crystal figure of merit	3 000	150	2 150	3 300	~2 000	—
Gain saturation fluence $J_{\text{sat}}$ / $(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$	38 @ 22 °C	0.6 ( <i>//c</i> )	19.1 ( <i>//c</i> )	4.8 ( <i>//c</i> )	7.5 ( <i>//c</i> )	8.8 9.2

了对翠绿宝石晶体的吸收谱和发射谱有全面的了解,人们对其能级跃迁结构进行了详细的研究.

翠绿宝石激光器可以工作在三能级系统或四能级系统.翠绿宝石晶体的简化能级结构如图2所示<sup>[22]</sup>.当翠绿宝石晶体的亚稳态能级<sup>2</sup>E作为储存能级时,与<sup>4</sup>T<sub>2</sub>能级之间的能级间隔较小(约为800 cm<sup>-1</sup>),且两能级的寿命分别为1.5 ms和6.6  $\mu\text{s}$ <sup>[18]</sup>,激发态离子从<sup>4</sup>T<sub>1</sub>和<sup>4</sup>T<sub>2</sub>上能级可以迅速跃迁到<sup>2</sup>E能级.<sup>2</sup>E能级包含R<sub>1</sub>线和



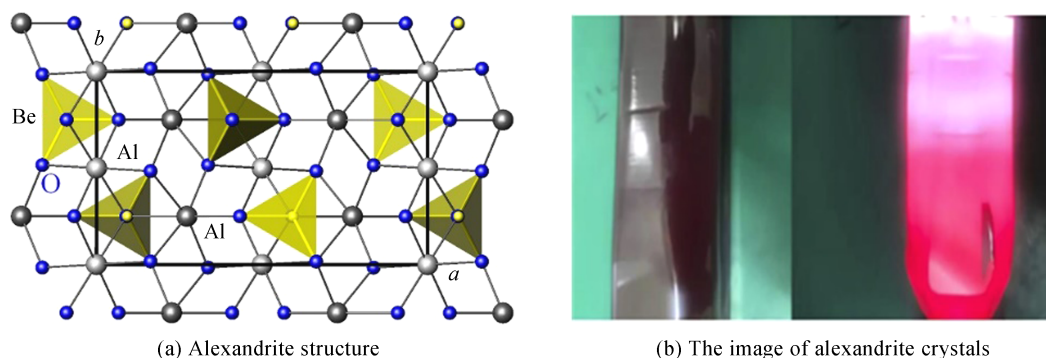


图1 沿 $c$ 轴方向翠绿宝石晶体的晶格结构<sup>[21]</sup>和海泰光电有限公司利用提拉法生长的翠绿宝石晶体  
Fig. 1  $c$ -axis view of alexandrite structure<sup>[21]</sup> and the image of alexandrite crystals grown by the Czochralski method in Crystech Co., Ltd.

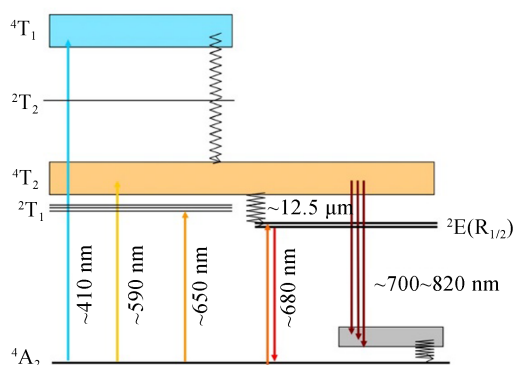


图2 翠绿宝石晶体的简化能级结构示意图<sup>[22]</sup>  
Fig. 2 Simplified energy level diagram for the alexandrite crystal<sup>[22]</sup>

$R_2$ 线,对应波长为 680.4 nm 和 678.5 nm. 由于 680.4 nm 的受激发射截面远大于 678.5 nm 对应的受激发射截面,利用  ${}^2E$  能级到  ${}^4A_2$  能级的跃迁可以得到波长约为 680.4 nm 的激光输出,此时翠绿宝石激光器工作在三能级系统. 当工作在四能级系统时,从  ${}^4T_2$  激光上能级到  ${}^4A_2$  振动激发态的跃迁产生光子,同时发射声子使整个系统恢复平衡. 两个宽带能级之间的跃迁使翠绿宝石激光器具有宽带可调谐激光特性(室温 700~820 nm).

从翠绿宝石晶体的能级结构可以看出,翠绿宝石晶体存在两个宽带吸收谱和两个窄带吸收谱. 室温时,  $Cr^{3+}$  掺杂浓度为 0.063% 的翠绿宝石晶体的吸收谱如图 3(a) 所示<sup>[23]</sup>, 可以看出其吸收带较宽, 几乎涵盖了整个可见光波段, 两个宽带吸收谱的范围分别为 380~480 nm 和 510~690 nm, 对应的峰值波长分别为 410 nm 和 590 nm. 另外, 两个窄带吸收谱对应的波长分别为 678.5 nm 和 680.4 nm. 沿  $E//b$  方向, 在 510~690 nm 波长范围内, 翠绿宝石晶体的吸收系数远大于  $E//a$  和  $E//c$  方向的吸收系数. 室温时, 翠绿宝石晶体的发射谱如图 3(b) 所示<sup>[23]</sup>,  $E//b$  方向的荧光速率比  $E//a$  和  $E//c$  方向的荧光速率大一个数量级. 因此, 在实际应用中, 多采用  $E//b$  方向作为吸收和发射谱的偏振方向,  $E//b$  方向的增益大约是  $E//a$  和  $E//c$  方向的增益的 10 倍.

晶体温度升高, 翠绿宝石晶体的增益会随之增大,  ${}^2E$  能级将为  ${}^4T_2$  能级提供更多的反转粒子数, 温度为 475 K 时对应的受激发射截面大约是室温时的 10 倍左右. 同时由于激光下能级粒子数分布变化, 较高振动能态的粒子数会增多, 抵消部分因温度升高而产生的增益上升<sup>[18]</sup>, 并将引起输出波长峰值红移. 不过, 较高的温度会使晶体的荧光寿命缩短, 不利于储能运转. 因此, 在调控翠绿宝石晶体的温度时, 应综合考虑其利弊, 以选择适当的温度获得理想的激光输出性能.

根据翠绿宝石晶体的光谱吸收特性, 除了使用闪光灯泵浦, 还可以使用氩离子激光器 (~647 nm)、染料激光器 (615~680 nm)、蓝光 LD (~444 nm)、绿光激光器 (~532 nm)、黄光激光器 (~590 nm)、红光 LD (630~680 nm) 等多种可见光光源做泵浦源.

在这些泵浦源中, 红光 LD 具有体积小、成本低、易于集成等优点, 非常适合做翠绿宝石激光器的泵浦

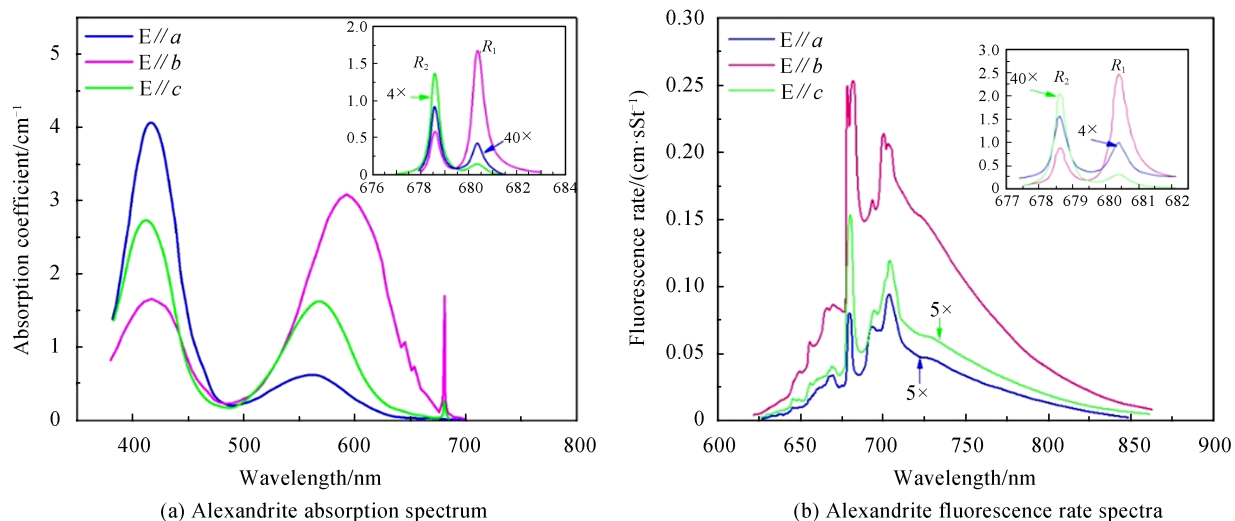


图3  $\text{Cr}^{3+}$ 掺杂浓度为0.063 at.%的翠绿宝石晶体的吸收谱线和300 K时翠绿宝石晶体的荧光速率谱线<sup>[23]</sup>  
 Fig. 3 Alexandrite absorption spectrum for  $\text{Cr}^{3+}$  dopant concentration of 0.063 at.% and alexandrite fluorescence rate spectra at 300 K<sup>[23]</sup>

源.但是,相比于成熟的近红外波长LD(如:808 nm、915 nm、940 nm、976 nm等),红光LD的制作难度更大.其主要的技术难点包括:1) 由于所用材料AlGaInP的限制,有源区及限制层的带隙差较小,因而对注入载流子的限制能力较差,容易产生泄露电流,这会使LD的内量子效率降低,最大输出功率下降,同时导致器件的特征温度变低,输出功率对温度的敏感度变高;2) 红光LD波长相对更短,光子能量高,在高功率下工作时,对腔面的抗烧毁能力要求更高.早期的红光激光器的输出功率一般在100 mW以内,近几年,随着激光显示市场的兴起,作为显示和泵浦光源的640 nm红光LD的输出功率和性能得到大幅提升<sup>[24]</sup>.

国际上,日本三菱公司(Mitsubishi Electric Corporation)、牛尾公司(Ushio Opto Semiconductors Incorporation)、美国恩耐公司(nLight Corporation)和德国FBH研究所等都进行了红光LD方面的研究<sup>[25-31]</sup>,部分结果如表3所示.日本三菱公司凭借其多年在红光LD方面的积累和不断地研发创新,在638 nm激光器的研究和产业化上一直处于世界领先地位.早在2008年,日本三菱公司就报道了12 W连续工作的640 nm二极管巴条产品,室温最大转换效率为34%<sup>[25]</sup>.2015年,他们又推出了新型三发光区的638 nm高功率激光器,采用低热阻、高可靠性的芯片设计,使得单管最大脉冲功率从2 W提升到了5.5 W,后续通过优化材料生

表3 640 nm红光LD的研究进展  
 Table 3 The research progress of 640 nm red LDs

Year	Wavelength/nm	Power/W	Chip structure	Institution
2008	643	12	0.4 mm bar, 20 emitting points, 40 $\mu\text{m} \times 1.5$ mm	Mitsubishi Electric Co., Japan <sup>[25]</sup>
2012	635	1.2	5 $\mu\text{m} \times 250$ $\mu\text{m}$ ridge-waveguide, 2 mm resonator	FBH, Germany <sup>[30]</sup>
2014	639	2.3	Single emitting region, 150 $\mu\text{m} \times 3$ mm	nLight Co., US <sup>[29]</sup>
2017	644	20.1	1 cm bar, 25 emitting points, 60 $\mu\text{m} \times 0.7$ mm	Sony Co., Japan <sup>[31]</sup>
2018	638	6	Three emitting region, 180 $\mu\text{m} \times 1.5$ mm	Mitsubishi Electric Co., Japan <sup>[27]</sup>
2019	638	4.5	Double emitting regions, 150 $\mu\text{m} \times 1.5$ mm	Ushio Opto Semiconductors Inc., Japan <sup>[28]</sup>
2019	640	3.9	Single emitting region, 100 $\mu\text{m} \times 1.5$ mm	Huagang Optoelectronics Co., China <sup>[32]</sup>

长将功率提升到了6 W以上,转换效率提升至40%以上<sup>[26-27]</sup>.

国内的中科院半导体研究所、山东大学和山东华光光电子股份有限公司等对红光LD也做了相关报道<sup>[32-34]</sup>.其中山东华光光电子股份有限公司一直致力于功率型红光LD的研究及产业化:2009年,他们报道了使用Mg掺杂技术及Zn扩散非吸收窗口技术的660 nm激光器,最大连续输出功率达到了3.7 W<sup>[34]</sup>;2019年,他们通过使用新型高导热SiC热沉制备了最大输出功率为3.9 W、转换效率为39%的640 nm红光激光器<sup>[32]</sup>.

2013年之后,随着商用高功率红光LD的迅猛发展,红光LD泵浦的翠绿宝石激光器在全固态激光领域有了突破性的进展.接下来,将以闪光灯和红光LD泵浦的翠绿宝石激光器为主,对翠绿宝石激光器的研究进展进行详细阐述.

## 2 国外研究进展

翠绿宝石晶体是第一个能在室温条件下工作的可调谐激光晶体<sup>[1-2]</sup>.1978年,俄罗斯苏联科学院的BUKIN G V等使用液氮将翠绿宝石晶体冷却到77 K,观测到了R-line的受激发射波长在679.86~680.33 nm范围内<sup>[35]</sup>.1979年,美国联合化学公司(Allied Chemical Corporation)的WALLING J C等以翠绿宝石晶体为激光介质、氙灯为泵浦源,在室温下获得了波长为701~794 nm的可连续调谐的激光输出;在长脉冲情况下,得到了能量为500 mJ、脉冲宽度为200  $\mu$ s的脉冲,使用电光调Q技术,得到了能量为70 mJ、脉冲宽度为120 ns的调Q激光输出;并根据三个偏振态的荧光发射谱和荧光寿命计算出荧光曲线峰值750 nm处的受激发射截面约为 $0.7 \times 10^{-20}$  cm<sup>2</sup>;室温时,高增益的R-line对应的波长为680.4 nm,在300 K时,对应的受激发射截面约为 $0.3 \times 10^{-20}$  cm<sup>2</sup><sup>[1]</sup>.1980,他们同样使用氙灯为泵浦源,在室温时获得了701~818 nm波长可调谐的激光输出<sup>[2]</sup>;同年,进一步报道了基于3 kW闪光灯泵浦源的翠绿宝石激光器,在744~788 nm之间得到了波长可调谐的连续激光输出,并在765 nm波长处得到了6.5 W的输出功率,但光光转换效率仅为0.2%<sup>[36]</sup>.1985年,为了提升连续激光输出功率,他们使用功率分别为6 kW、8 kW的汞灯和氙灯作为抽运源,获得了功率分别为60 W和20 W的连续多模激光输出,其中60 W平均输出功率是目前翠绿宝石激光器公开报道的最高连续激光输出功率<sup>[18]</sup>.1982年,来自美国加利福尼亚州的GUCH S等对不同温度下闪光灯泵浦翠绿宝石晶体激光器的输出特性进行了研究,发现随着晶体温度的升高,激光增益和效率会随之增大,并在225  $^{\circ}$ C时达到峰值,同时获得了752~790 nm的波长调谐激光输出<sup>[37]</sup>.便于对比,将关于闪光灯泵浦的翠绿宝石激光器的部分结果进行梳理,如表4所示.

表4 闪光灯泵浦的翠绿宝石激光器实验结果

Table 4 Results of experiments based on flash lamp pumped alexandrite laser

Year	Pump source	Pump parameters	Laser output performance	Laser wavelength	Ref.
1979	Xe flash lamp	—	500 mJ, 200 $\mu$ s; 70 mJ, 120 ns	701~794 nm	[1]
1980	Flash lamp	500 J, 1.5 kW	500 mJ, 33 ns, 5 Hz	701~818 nm	[2]
1980	Flash lamp	3.2 kW	CW 6.5 W	765 nm 744~788 nm	[36]
1980	Flash lamp	—	500 mJ, 20 ns	680.4 nm	[38]
1985	Hg arc lamp	6 kW	CW 60 W	—	[18]
1985	Xe arc lamp	8 kW	CW 20W	—	[18]

受二十世纪八九十年代实验条件和泵浦技术的限制,人们对翠绿宝石晶体的研究主要局限于丰富和明确翠绿宝石晶体的能级分布、光谱机理等,以及基于闪光灯泵浦的大能量脉冲激光器.然而,闪光灯泵浦效率很低且重复频率不高,因此激光输出的稳定性较差,系统整体效率很低、结构大、寿命短.闪光灯抽运的翠绿宝石激光器主要发展方向是大能量脉冲输出,应用于一些特定需求.

### 2.1 连续激光器

从翠绿宝石晶体的能级结构可以看出,其吸收带较宽,几乎涵盖了整个可见光波段,存在两个宽带吸收峰和两个窄带吸收峰,对应的峰值波长分别为410 nm、590 nm、678.5 nm和680.4 nm.因此,除了使用闪光灯和弧光灯泵浦,还可以使用多种可见光光源做泵浦源.



1983年,美国联合公司(Allied Corporation)的LAIS T等用平均功率为1.9 W、中心波长为647.1 nm的氩离子气体激光器作为泵浦源,实现了平均输出功率为0.6 W、斜效率为51%的连续激光输出,波长可调谐范围为726~802 nm<sup>[39]</sup>.但是由于氩离子气体激光器结构复杂、且自身功率受限,很难获得高平均功率的翠绿宝石激光输出.1993年,美国海军指挥控制和海洋监视中心的SCHEPS R等报道了染料激光器泵浦的翠绿宝石激光器,使用平均功率为0.36 W、中心波长为645 nm的染料激光器作为泵浦源,实现了斜效率为64%、平均输出功率为0.15 W的753.4 nm连续激光输出,是目前翠绿宝石激光器可实现的最高斜效率<sup>[40]</sup>.但是,染料激光器系统复杂、不稳定、有毒且维护困难,进而限制了它的广泛应用.

利用具有衍射极限光束质量的高亮度532 nm绿光激光器作为泵浦源,可以得到更高输出功率和更好光束质量的翠绿宝石激光输出<sup>[41-42]</sup>.2016年,加拿大曼尼托巴大学的GHANBARIS等采用最大输出功率为11 W、中心波长为532 nm的绿光激光器作为泵浦源,对掺杂浓度为0.3%的翠绿宝石晶体进行泵浦,在755 nm输出波长下获得了最大输出功率为2.6 W、斜效率为26%的连续激光输出;同时使用0.5 mm厚的双折射滤光片进行波长调谐,实现了波长范围为715~800 nm的调谐输出<sup>[41]</sup>.然而,绿光激光器系统较复杂,并且具有相对较高的量子亏损.

1990年,来自美国海军海洋系统中心的SCHEPS R等第一次报道了基于红光LD泵浦的翠绿宝石激光器,实验中使用了两台功率分别为5 mW、中心波长为680.4 nm的单模红光LD作为泵浦源,最终得到了输出波长为751 nm、斜效率为25%的激光输出<sup>[43]</sup>.1993年,他们又利用两台功率分别为250 mW、中心波长为640 nm的多模红光LD作为泵浦源,实现了输出波长为753 nm、输出平均功率为25 mW、斜效率为28%的激光输出<sup>[40]</sup>.2005年,美国Light Age公司的PENG X Y等采用中心波长为680.4 nm、最大输出功率为10 W的多模红光二极管阵列作泵浦源,实现了平均输出功率为1.3 W、斜效率为24%、输出波长为750 nm的连续激光输出<sup>[11]</sup>.

二十世纪末至二十一世纪初,高功率LD技术尚未成熟,LD泵浦的翠绿宝石激光器发展缓慢.直到近些年,随着高功率红光LD的发展,使用红光LD泵浦块状翠绿宝石晶体的激光器输出功率和整体效率都得到了很大提升.

2013年,土耳其科驰大学BEYATLIE等利用一个输出功率约为1 W、波长在678.5 nm和680.4 nm之间可精确调节的高亮度锥形红光LD做泵浦源,抽运布儒斯特角切割、掺杂浓度为0.2%、尺寸为3 mm×5 mm×10 mm的翠绿宝石晶体,当红光LD的波长为678.5 nm时,对应的最大激光输出功率为168 mW、斜效率为38%;当红光LD的波长为680.4 nm时,对应的最大激光输出功率为200 mW、斜效率为34%<sup>[8]</sup>.2014年,英国伦敦帝国理工学院的TEPPITAKSAK A等利用自由空间输出的功率为64.5 W、波长为639 nm的红光LD,抽运尺寸为 $\Phi 4$  mm×10 mm、掺杂浓度为0.13%的翠绿宝石晶体,在连续运转模式下实现了输出功率>26 W、中心波长为759 nm的多模激光输出,是目前红光LD泵浦翠绿宝石激光器的最高平均输出功率,对应的光光转换效率为40%<sup>[9]</sup>.

2017年,英国伦敦帝国理工学院的DAMZEN M J等报道了基于自由空间输出的638 nm红光LD侧面泵浦的翠绿宝石掠入射板条激光器<sup>[12]</sup>,其中翠绿宝石晶体的尺寸为4 mm×2 mm×20 mm、掺杂浓度为0.235%.当使用单次反射侧面泵浦结构,如图4(a)所示,吸收泵浦功率为56 W时,获得了最大输出功率为12.2 W的755.3 nm连续激光输出,斜效率约为37%;当使用双反射侧面泵浦结构,如图4(b)所示,吸收泵浦功率为57 W时,获得了最大输出功率为6.5 W的多模连续激光输出,斜效率约为32%;当使用扩展的双反射侧面泵浦结构,如图4(c)所示,吸收泵浦功率为47 W时,获得了最大输出功率为4.5 W的基模连续激光输出,斜效率约为43%.与端面泵浦相比,侧面泵浦结构可从块状晶体的侧面入射泵浦功率,泵浦耦合装置更加简单,有利于高能量存储.然而,端面泵浦的固体激光器整体效率更高,有利于得到更好的光束质量和更高效的激光输出.

2018年,英国伦敦帝国理工学院的THOMAS G M等报道了638 nm红光LD侧面泵浦的翠绿宝石涡旋光激光器<sup>[44]</sup>,如图5所示,翠绿宝石晶体的尺寸为4 mm×2 mm×20 mm、掺杂浓度为0.22%,实现了755 nm和759 nm的双波长涡旋光激光输出,吸收泵浦功率为47 W时,最大平均输出功率为2 W,斜效率为9.5%,第一次在翠绿宝石激光器中实现涡旋光输出.

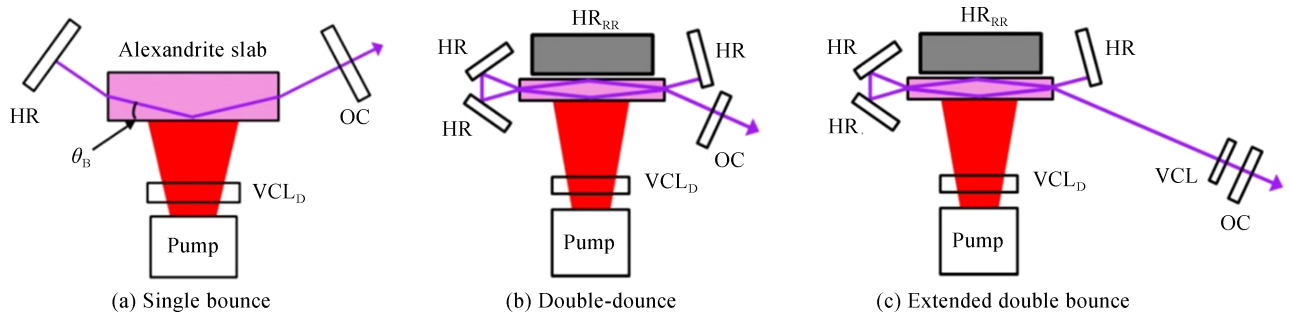


图4 红光LD侧面泵浦的单反射、双反射和扩展的双反射翠绿宝石板条激光器结构示意图<sup>[12]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of the single bounce alexandrite slab laser, the double-bounce alexandrite slab laser and the extended double bounce alexandrite slab laser<sup>[12]</sup>

2020年5月,德国亚琛工业大学的WALOCHNIK M等报道了由非光纤耦合输出红光LD泵浦的高功率基模翠绿宝石激光器<sup>[14]</sup>,实验中采用两台平均功率为45 W的637 nm红光LD作为泵浦源,通过泵浦空间整形装置对泵浦光进行合束和整形,如图6(a)所示,但是这些光学系统导致可用的泵浦光功率最大为58 W,损耗了近35%,实验装置如图6(b)所示,得到了发射波长为752 nm、最大输出功率为6.5 W的基模连续光输出,光束质量约为1.1,对应的光光转换效率为26%.

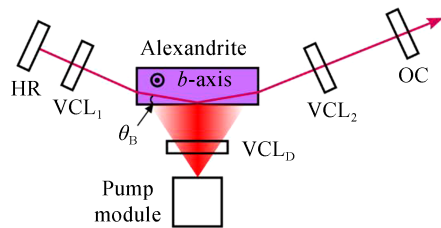


图5 红光LD侧面泵浦的翠绿宝石涡旋光激光器<sup>[44]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of diode-pumped alexandrite vortex laser<sup>[44]</sup>

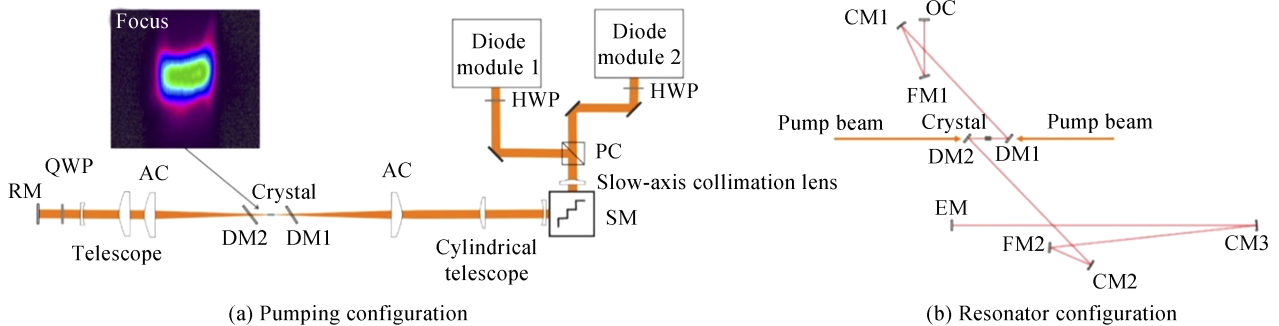


图6 两台红光二极管模块的泵浦整形装置和翠绿宝石激光器实验装置<sup>[14]</sup>

Fig. 6 Pumping configuration with two diode modules and the resonator configuration of the alexandrite laser<sup>[14]</sup>

以上报道中所使用的红光LD均为非光纤耦合输出模块,即直接空间耦合输出.由于LD巴条在快慢轴方向的模式大小和发散角存在较大差异,因此在使用时必须进行预整形.在侧面泵浦结构中,对泵浦光的快慢轴的对称性要求不高;然而在端面泵浦结构中,光斑形状和发散角大小直接决定泵浦光和信号光的重合程度.虽然可以通过光学元件对泵浦光进行整形,但所需光学系统较为复杂、效率不高.因此在端面泵浦结构中仍受到商用高功率LD模块的非对称光束特性的挑战,用于端面泵浦翠绿宝石激光晶体的最终泵浦模式通常仍是不对称的,这会导致泵浦像散和泵浦热透镜,从而使得在高功率泵浦下难以维持基模激光模式输出.在端面泵浦谐振腔中,除了对泵浦光束进行空间整形,通常还可以使用以下解决方案:设计复杂的谐振腔结构;对泵浦光束进行空间再分配;直接利用光纤耦合输出得到对称光束.使用光纤耦合输出的LD,具有更好的圆对称性和可操作性,可在增益介质处获得合适的泵浦光斑尺寸.

2016年,英国伦敦帝国理工学院的ARBABZADAH E A等报道了由光纤耦合输出红光LD端面泵浦的翠绿宝石激光器<sup>[45]</sup>,利用波长为636 nm、功率约5 W的红光LD对尺寸为 $\Phi 4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 、掺杂浓度为0.22%的翠绿宝石晶体进行抽运,当使用单端偏振泵浦短腔时,结构如图7(a)所示,吸收泵浦功率为3 W



时,实现了波长为 769.3 nm、输出功率为 1.08 W、斜效率为 44.2% 的激光输出;通过谐振腔的设计,结构如图 7(b)所示,采用双程端面非偏振泵浦结构,在泵浦光功率为 5.4 W 时,获得了输出功率为 1.66 W、斜效率为 40%、近衍射极限光束质量的连续激光输出。

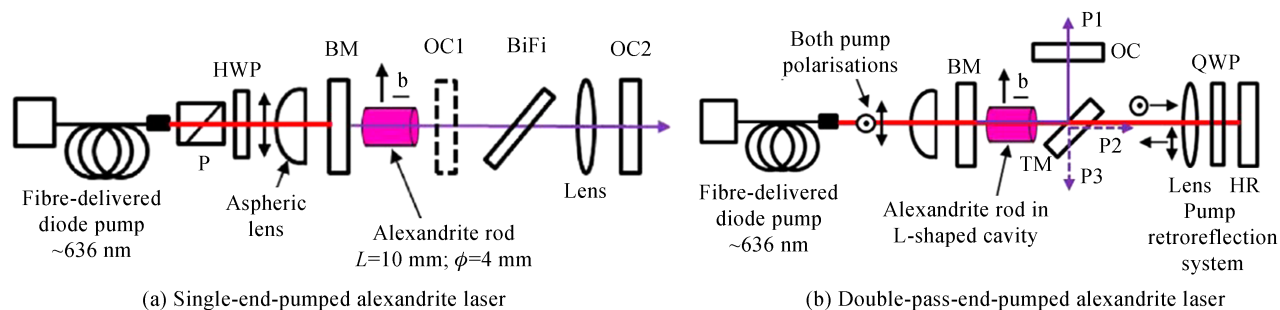


图 7 光纤耦合输出的 LD 单端偏振泵浦和双程端面泵浦的翠绿宝石激光器示意图<sup>[45]</sup>

Fig. 7 Experimental arrangements for fiber-delivered polarized diode single-end-pumped alexandrite laser and double-pass-end-pumped alexandrite laser.<sup>[45]</sup>

2016年,英国伦敦帝国理工学院的 KERRIDGE-JOHNS W R 等对基于 LD 端面泵浦的翠绿宝石激光器的激光输出特性进行了研究<sup>[46]</sup>,将激光基态吸收(Ground State Absorption, GSA)、激光激发态吸收(Excited State Absorption, ESA)和泵浦 ESA 等相关理论结合在一起,对端面泵浦固体激光器的输出功率、阈值和斜效率等主要激光参数进行了详细分析,并建立了完整的理论模型;展示了波长调谐、晶体温度、输出镜和腔内损耗等参数对光纤耦合输出红光 LD 泵浦的翠绿宝石激光系统的具体影响,并将模型预测与实验结果进行了比较,结果发现:随着输出镜反射率的降低,泵浦 ESA 会使激光系统阈值增大、斜效率下降.此外,该模型可广泛应用于其它将激光 ESA 与泵浦 ESA 相结合的准三能级固体激光器中,并给出了双稳态运行的条件.该理论模型与实验结果吻合较好,对优化设计翠绿宝石激光系统提供了一种有效参考。

2018年, KERRIDGE-JOHNS W R 等基于光纤耦合输出的 636 nm 红光 LD 泵浦源,研究了翠绿宝石晶体温度对激光输出的影响<sup>[47]</sup>.在短腔中,当晶体温度为 60 °C、最大泵浦功率为 3.07 W 时,得到了输出功率为 1.22 W 的基模连续激光输出,对应斜效率为 54.4%;另外,使用 0.5 mm 厚的双折射滤光片进行波长调谐,同时通过调控晶体的温度以在不同的输出波长下获得最高功率的激光输出,最终获得了在 714~818 nm 范围内的连续可调谐激光输出,其中 104 nm 的波长调谐范围是目前 LD 泵浦翠绿宝石晶体激光器中已实现的最宽调谐范围。

2019年,德国电子同步加速器研究所的 DEMIRBAS U 等详细报道了翠绿宝石晶体的温度对其有效发射截面光谱和小信号增益光谱的影响<sup>[22]</sup>,指明在未来的研究中翠绿宝石晶体的激发态吸收截面对优化翠绿宝石激光谐振腔和放大器的重要性.随着翠绿宝石晶体温度的升高,在 25~450 °C 范围内,如图 8(a)所示,有效发射截面光谱的峰值波长逐渐向长波方向漂移,且在同一发射波长下对应的有效发射截面逐渐增大;并根据有效发射截面光谱对小信号增益的波长、温度依赖性进行了详细分析,如图 8(b)所示,若想获得较短波长的激光输出,翠绿宝石晶体的温度越低越好,因为随着温度的升高,小信号增益的波长截止点逐渐向长波方向漂移,限制了高温下的激光器性能。

2019年,英国伦敦帝国理工学院的 TAWY G 等首次对红光 LD 泵浦翠绿宝石晶体的热透镜进行了详细研究<sup>[48]</sup>.对翠绿宝石固体激光器中的泵浦热透镜和像差效应的研究至关重要,它们在很大程度上决定了该激光系统可获得的具有高光束质量的最大基模输出功率,同时快速可饱和粒子数透镜机制的研究为翠绿宝石激光系统中观察到的自调 Q 现象提供了解释依据.他们首次利用波前传感器直接测量了在无激光输出和有激光输出状态时,翠绿宝石晶体的泵浦热透镜和球差.结果如图 9 所示,当无激光输出时,晶体的热透镜光焦度随吸收泵浦功率的增加近似线性变化,而当有激光输出时,光焦度随吸收泵浦功率的增加非线性变化;对热透镜理论和粒子数透镜理论进行了组合重建,并分别对无、有激光输出时的光焦度进行了定量分析。

2020年 6 月, TAWY G 等又报道了光纤耦合输出红光 LD 泵浦的高功率基模翠绿宝石激光器<sup>[13]</sup>,利用功率为 34 W、波长为 636 nm 的光纤耦合输出红光 LD 作为泵浦源,抽运尺寸为 4 mm×4 mm×6 mm、掺杂

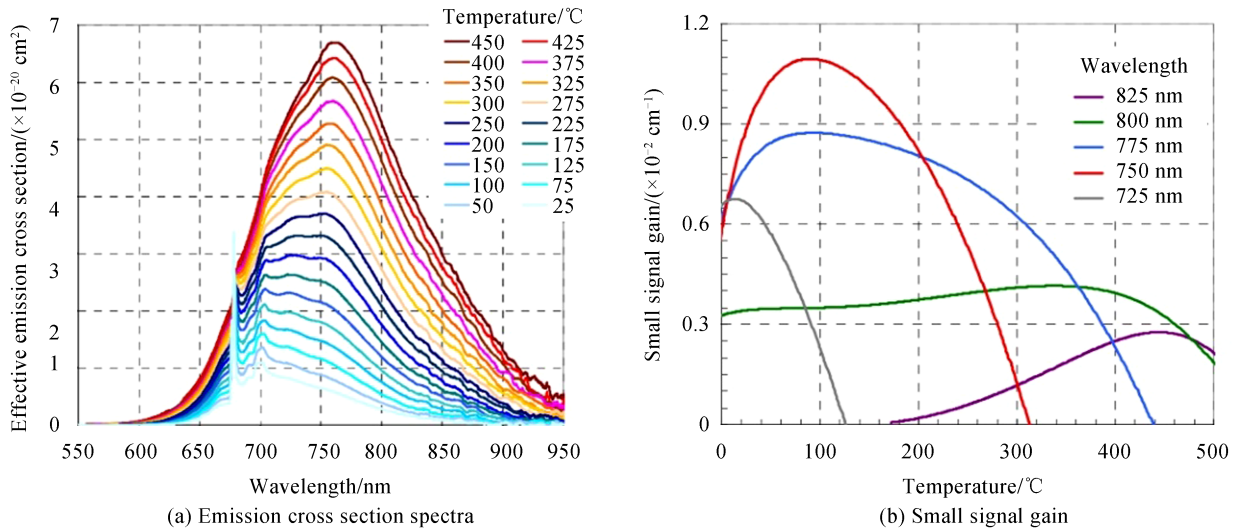


图8 不同温度下E//b极化方向翠绿宝石晶体的有效发射截面光谱,以及小信号增益随温度的变化曲线<sup>[22]</sup>  
 Fig. 8 Effective emission cross section spectra of alexandrite for E//b polarization at different crystal temperatures and variation of small signal gain with temperature<sup>[22]</sup>

浓度为0.20%的翠绿宝石晶体.基于双端偏振泵浦谐振腔,结构如图10(a)所示,在吸收泵浦功率为32.6 W时,实现了最大输出功率为12.7 W的多模连续激光,斜效率为43%;基于单端偏振泵浦线性腔,在吸收泵浦功率为13.4 W时,实现了输出功率约为4.7 W的基模连续激光输出,斜效率为54.9%;同时,使用厚度为0.5 mm的双折射滤光片,获得了725~808 nm的基模连续激光调谐输出,并且第一次在LD泵浦的翠绿宝石激光器中实现了730~805 nm内平均功率均大于1 W的激光输出.另外,实验中使用双凸双色腔镜补偿晶体热透镜效应,结构如图10(b)所示,吸收泵浦功率为26.3 W时,成功获得了最大平均输出功率为7.4 W的基模连续激光输出,光束质量因子约为1.1,是目前红光LD泵浦翠绿宝石激光器基模连续光输出的最高平均功率.

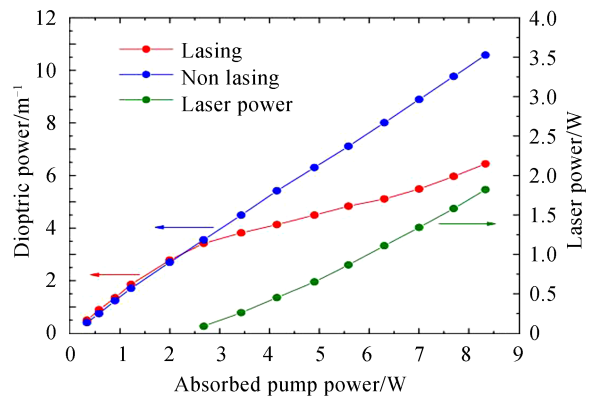


图9 热透镜光焦度和激光功率与吸收泵浦功率的关系<sup>[48]</sup>  
 Fig. 9 Thermal lens dioptric power and laser power as a function of the absorbed pump power<sup>[48]</sup>

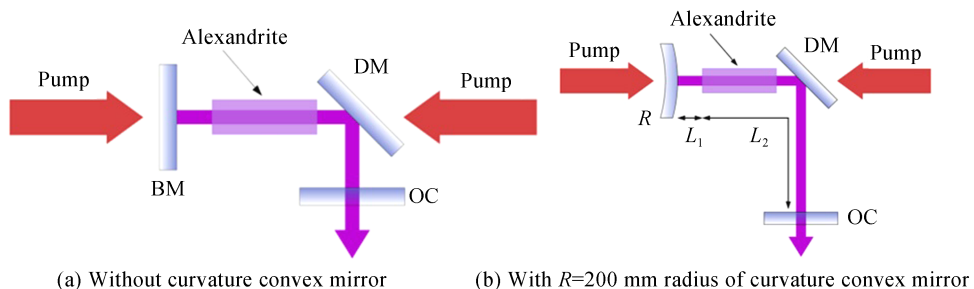


图10 双端泵浦“L”型翠绿宝石激光器实验装置<sup>[13]</sup>  
 Fig. 10 Schematic of double-end-pumped L-shaped alexandrite laser<sup>[13]</sup>

除了使用红光LD作为泵浦源,由于蓝光LD的发射波长约为444 nm,与翠绿宝石晶体a轴的最大吸收峰值约410 nm相匹配,当调整泵浦光的偏振方向与翠绿宝石晶体的a轴重合时,可以获得更高的吸收效率,从而得到高效的激光输出.基于蓝光LD,捷克理工大学的研究者们对翠绿宝石激光器进行了研究<sup>[49-50]</sup>,并且

取得了不错的结果.但是与红光LD相比,蓝光LD作为泵浦源时,量子亏损较大、晶体产热较高,激光器整体效率相对较低.

2017年,捷克理工大学的FIBRICH M等报道了第一台使用波长为444 nm、输出功率为3.5 W的蓝光LD泵浦的翠绿宝石激光器<sup>[49]</sup>.实验中利用半波片调整泵浦光的偏振方向与翠绿宝石晶体的 $a$ 轴重合,以获得更高的吸收效率,翠绿宝石晶体的掺杂浓度为0.13%、尺寸为 $\Phi 5\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ ,将晶体放置于低温恒温真空室中,如图11(a)所示,使晶体工作在低温条件下(78~220 K)时,得到了R-line翠绿宝石激光输出,输出波长为680 nm,输出功率为13 mW;在晶体温度为353 K时,结构如图11(b)所示,得到了输出波长为750 nm、输出功率为0.326 W、斜效率约为20%的连续激光输出.

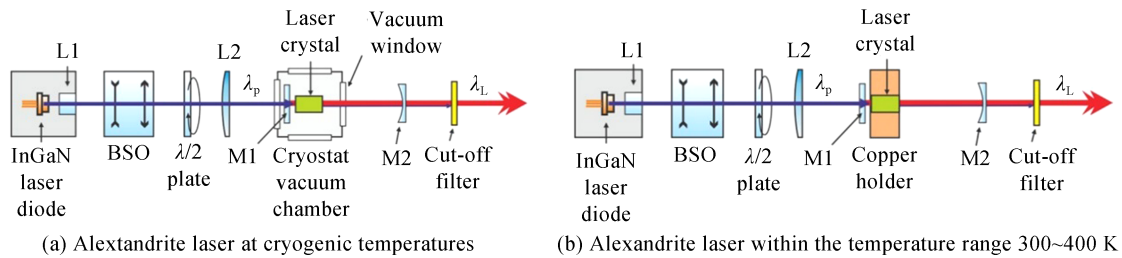


图11 在低温和300~400 K温度下蓝光LD泵浦的翠绿宝石激光器实验装置<sup>[49]</sup>

Fig. 11 Schematic layout of the blue LD pumped alexandrite laser system at cryogenic temperatures and within the temperature range of 300~400 K<sup>[49]</sup>

2019年,捷克理工大学同一团队报道了基于蓝光LD泵浦的翠绿宝石微片激光器<sup>[50]</sup>,采用输出功率为

表5 基于翠绿宝石晶体的连续激光器实验结果(非闪光灯泵浦)

Table 5 Results of continuous-wave alexandrite lasers (non-flashlamp pumping)

Year	Pump source	Pump wavelength/nm	Pump power/W	Slope efficiency	Output power/W	Tuning range/nm	Remark
1983 <sup>[39]</sup>	Krypton ion laser	647.1	1.9	51%	0.6	726~802	Krypton ion laser pumping
1993 <sup>[40]</sup>	Dye laser	645	0.36	64%	0.15	753.4	Dye laser pumping
1993 <sup>[40]</sup>	Red LD	640	2×0.25	28%	0.025	753	—
2016 <sup>[41]</sup>	Green laser	532	11	26%	2.6	715~800	Green laser pumping
2006 <sup>[42]</sup>	Green laser	532	5	31%	1.4	730~780	—
1990 <sup>[43]</sup>	Red LD	680.4	0.01	25%	—	751	First LD pumping
2005 <sup>[11]</sup>	Red LD	680.4	10	24%	1.3	750	—
2013 <sup>[8]</sup>	Red LD	680.4	0.865	34%	0.2	—	—
2014 <sup>[9]</sup>	Red LD	639	64.5	49%	26	730~792	Highest output power with LD pumping
2017 <sup>[12]</sup>	Red LD	638	56	37%	12.2	755.3	—
2020 <sup>[14]</sup>	Red LD	637	25	—	6.5	752	—
2018 <sup>[47]</sup>	Red LD	636	3.07	54.4%	1.22	714~818	Longest tuning range
2020 <sup>[13]</sup>	Red LD	636	34	54.9%	12.7	725~808	Highest slope efficiency with LD pumping
2017 <sup>[49]</sup>	InGaN blue LD	444	3.5	20%	0.326	750	First blue LD pumping
2019 <sup>[50]</sup>	InGaN blue LD	445	3.5	39%	0.57	749.5	—
2020 <sup>[16]</sup>	Yellow laser	589	7.7	41%	2.51	727.2~787.3	First yellow laser pumping



3.5 W、波长为 445 nm 的蓝光 LD 为泵浦源,抽运长度为 2.5 mm、横截面为 3 mm×3 mm、掺杂浓度为 0.13% 的翠绿宝石微片晶体.在晶体温度为 78 K 时,得到了输出波长为 680.4 nm、输出功率为 0.21 W、斜效率约为 15% 的连续激光输出;在晶体温度为 354 K 时,得到了输出波长为 749.5 nm、输出功率为 0.57 W、斜效率约为 39% 的连续激光输出.由于翠绿宝石晶体的蓝光和红光吸收带的吸收最大值分别位于两个相互正交的偏振面  $E//a$  和  $E//b$  上,因此蓝光 LD 泵浦的翠绿宝石激光器的研制提供了利用蓝光 LD 与红光 LD 结合实现多路复用泵浦的潜力<sup>[51]</sup>.为了便于对比,将上述关于翠绿宝石连续激光器的部分结果进行梳理,如表 5 所示.

## 2.2 调 Q 激光器

对调 Q 翠绿宝石激光器的研究可以追溯至二十世纪七十年代且主要以闪光灯泵浦为主,重复频率在数十赫兹量级,最高单脉冲能量可达十焦耳量级.直到 2014 年,人们才逐渐开展对 LD 泵浦的翠绿宝石调 Q 激光器的研究,目前已经实现了主动调 Q、被动调 Q、腔倒空和自调 Q 等稳定的调 Q 激光输出.

2014 年,英国伦敦帝国理工学院的 TEPPITAKSAK A 等首次报道了采用脉冲 LD 泵浦的翠绿宝石调 Q 激光器<sup>[9]</sup>,结构如图 12 所示,采用  $\beta$  相偏硼酸钡晶体( $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, BBO)制成的电光开关为调 Q 元件,泵浦源为工作在准连续模式、泵浦持续时间和重复频率可调的非光纤耦合输出 639 nm 红光 LD,在谐振腔长度约为 125 mm、泵浦持续时间为 0.22 ms 模式下,获得了重复频率为 1 kHz、单脉冲能量为 0.74 mJ、脉宽为 92 ns 的激光输出;在谐振腔长度约为 60 mm、泵浦持续时间为 0.2 ms 模式时,实现了重复频率为 100 Hz、单脉冲能量为 0.7 mJ、脉宽为 58 ns 的激光输出,斜效率约为 12.5%.

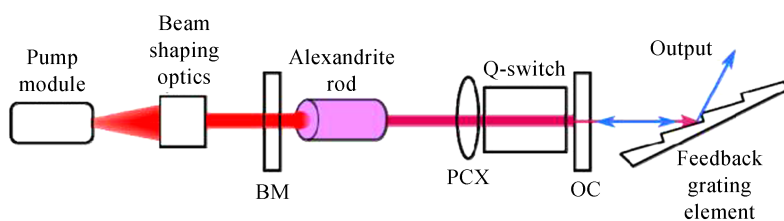


图 12 翠绿宝石调 Q 激光器实验装置<sup>[9]</sup>

Fig. 12 Schematic layout of alexandrite laser system for Q-switching<sup>[9]</sup>

2016 年,德国弗劳恩霍夫激光技术研究所的 MUNK A 等报道了红光 LD 泵浦的翠绿宝石调 Q 激光器<sup>[52]</sup>,在线性腔中获得了重复频率为 35 Hz、单脉冲能量为 0.8 mJ、脉宽为 350 ns 的调 Q 激光输出;在环形腔中使用两个翠绿宝石晶体作为激光增益介质,得到了重复频率为 100 Hz、单脉冲能量为 6.2 mJ、斜效率为 17% 的调 Q 激光输出.

由于翠绿宝石晶体的受激发射截面较小、增益较低,因此使用典型的调 Q 技术,所获得的调 Q 激光脉冲宽度较长,很难得到脉宽小于 10 ns 的脉冲输出,目前公开报道的工作在四能级系统下的基于 LD 泵浦的翠绿宝石调 Q 激光脉冲宽度最短约为 58 ns<sup>[9]</sup>.值得注意的是,当翠绿宝石激光器工作在  $R_1$  线(三能级系统)时,波长 680.4 nm 在室温下对应的受激发射截面约为  $3 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ ,远大于工作在四能级系统时的受激发射截面  $7 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ ,因此更易实现较短的调 Q 激光输出.1980 年,美国联合化学公司的 WALLING J C 等实现了脉冲宽度约为 20 ns 的 680.4 nm 翠绿宝石调 Q 激光输出<sup>[38]</sup>.2016 年,为了获得更短脉宽的调 Q 激光输出,英国伦敦帝国理工学院的 THOMAS G M 等报道了分别基于连续红光 LD 和脉冲红光 LD 泵浦的翠绿宝石调 Q 和腔倒空激光器<sup>[53]</sup>,第一次在连续 LD 泵浦的翠绿宝石激光器中实现调 Q 激光输出,也是第一次在 LD 泵浦的翠绿宝石激光器中利用腔倒空技术实现了小于 10 ns 的调 Q 激光输出.具体结果为:采用 638 nm 连续红光 LD 作为泵浦源,利用 BBO 电光开关,如图 13(a)所示,获得了重复频率 5 kHz、单脉冲能量 195  $\mu\text{J}$ 、脉冲宽度 150 ns 的调 Q 激光输出;采用高能脉冲 LD 双端泵浦翠绿宝石晶体,如图 13(b)所示,获得了重复频率为 500 Hz、脉冲宽度为 70 ns、单脉冲能量为 3 mJ 的调 Q 激光输出,这是目前 LD 泵浦的翠绿宝石激光器已获得的最大的单脉冲能量;基于连续红光 LD 泵浦源,结合腔倒空技术,如图 13(c)所示,实现了重复频率为 10 kHz、脉冲宽度最短为 2.9 ns 的短脉冲激光输出;基于脉冲红光 LD 双端泵浦结构,结合腔倒空技术,如图 13(d)所示,实现了重复频率为 kHz 量级、脉冲宽度最短为 3 ns、单脉冲能量为 510  $\mu\text{J}$  的短脉冲激光输出.

2018 年,英国伦敦帝国理工学院的 PARALI U 等利用光纤耦合输出的最大功率约 5 W 的 635 nm 红光

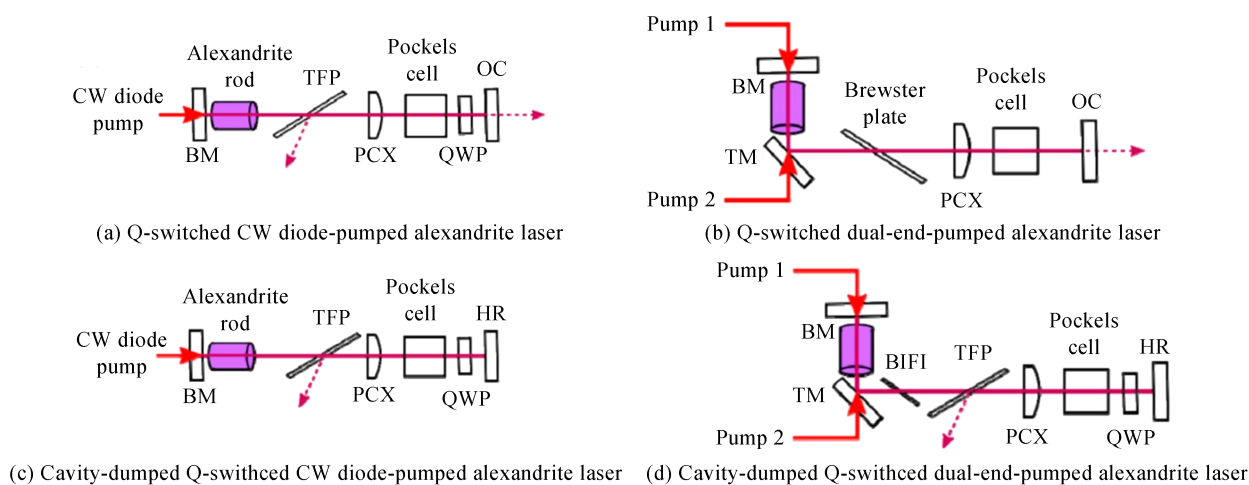


图 13 红光 LD 泵浦的翠绿宝石调 Q 激光器和腔倒空调 Q 激光器<sup>[53]</sup>

Fig. 13 Schematic of red LD-pumped Q-switched alexandrite laser and cavity-dumping Q-switched alexandrite laser<sup>[53]</sup>

LD 作为泵浦源,利用半导体可饱和吸收镜(Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM)实现了翠绿宝石激光器的调 Q 运转<sup>[54]</sup>.在线性腔中,可获得的调 Q 激光输出的最高的重复频率为 27 kHz、最短脉宽为 550 ns、最大平均输出功率约为 41 mW,激光波长在 740~755 nm 可调谐;在 X 型腔中,可获得的基模调 Q 激光输出的平均输出功率为 73 mW,在重复频率为 11.2 kHz 时对应的单脉冲能量约为 6.5  $\mu$ J,波长可调谐范围为 775~781 nm.

另外,由于单纵模翠绿宝石激光与普通的多纵模激光相比具有更长的相干长度,在激光雷达、高分辨率光谱学、量子技术等领域中有广泛的应用.二十世纪八九十年代左右,人们对翠绿宝石单纵模激光器的研究集中于闪光灯泵浦的调 Q 环形腔翠绿宝石激光输出,使用钛宝石或者二极管激光器作为种子源进行种子注入.但是,此类激光器系统复杂、体积大、效率低,而使用 LD 作为泵浦源可以使整个单纵模翠绿宝石激光系统结构更加紧凑、效率更高、成本更低.

2018 年,德国弗劳恩霍夫激光技术研究所的 MUNK A 等报道了可用于大气雷达测量的 LD 泵浦的翠绿宝石调 Q 激光器<sup>[55]</sup>,实验装置如图 14 所示,利用两台脉冲峰值功率约为 100 W 的 636 nm 红光 LD 巴条作为泵浦源,快慢轴的光束质量因子分别为 30 和 300,泵浦脉冲宽度为 200  $\mu$ s 时具有 20 mJ 的单脉冲能量;实验中使用两个长度均为 7 mm、掺杂浓度为 0.2% 的翠绿宝石晶体作为增益介质,在环形腔中采用普克尔盒作为电光开关,线宽 < 1 MHz、输出功率为 20 mW 的商用外腔二极管激光器作为种子源,实现了线宽约为 10 MHz 的单纵模调 Q 激光输出,单脉冲能量约为 1 mJ、脉冲宽度为 420 ns、重复频率为 150 Hz.

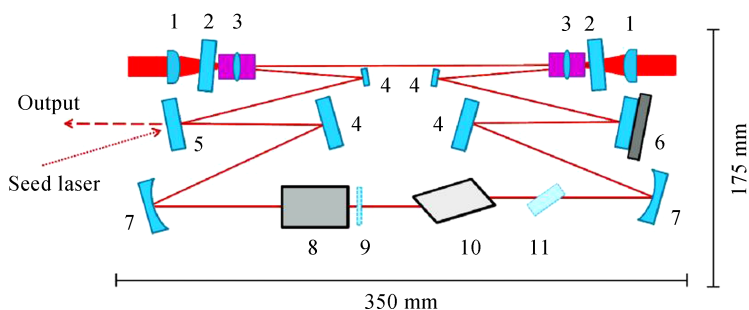


图 14 LD 泵浦的翠绿宝石环形腔调 Q 激光器示意图<sup>[55]</sup>

Fig. 14 Schematic of Q-switched diode-pumped alexandrite ring laser<sup>[55]</sup>

同年,德国弗劳恩霍夫激光技术研究所同一团队报道了具有瓦量级平均输出功率的 LD 泵浦翠绿宝石调 Q 单纵模激光器<sup>[56]</sup>,使用单个翠绿宝石晶体作为激光增益介质,实验装置如图 15 所示,利用普克尔盒调 Q,实现了平均功率为瓦量级、线宽小于 10 MHz、单脉冲能量为 1.7 mJ、重复频率为 500 Hz 的 770 nm 单纵模





的性能得到了大幅提升,同时在照明市场的推动下,成本大幅降低,因此被重新考虑用作可见光谱范围内的泵浦源.

2017年,法国巴黎萨克雷大学的PICHON P等报道了基于蓝光LED泵浦的翠绿宝石激光器<sup>[59]</sup>,使用2200个波长为450 nm的蓝光LED,以Ce:YAG作为聚光器,将LED辐照度提高一个数量级,从而达到翠绿宝石晶体的激光阈值,实验中将波长为550 nm、单脉冲能量为268 mJ、重复频率为10 Hz、辐照度为8.5 kW/cm<sup>2</sup>的泵浦光传输到翠绿宝石激光晶体.在自由运转模式下,如图16(a)所示,振荡器可以输出的最大单脉冲能量为2.9 mJ、波长为748 nm、光光转换效率约为1.7%.另外,使用该系统作为放大器,如图16(b)所示,对输出波长在710~800 nm范围内可调的连续钛宝石激光器进行了放大,经过八程放大750 nm波长对应的小信号增益为4.

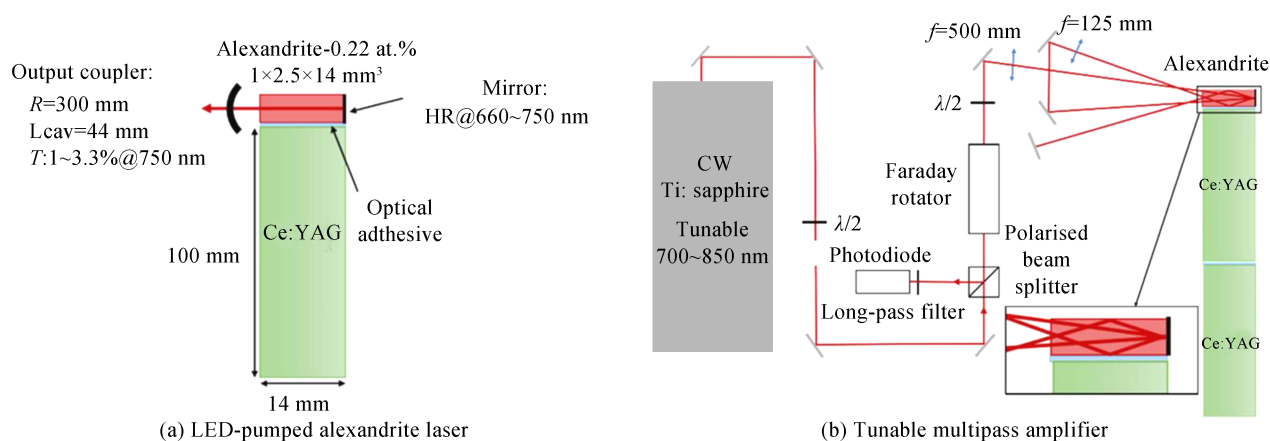


图16 LED泵浦的翠绿宝石激光器与基于连续钛宝石激光器的可调谐多程放大器<sup>[59]</sup>

Fig. 16 Setup of the experiment for LED-pumped alexandrite laser and the tunable multipass amplifier for a CW Ti:sapphire laser<sup>[59]</sup>

尽管LED泵浦源提供了一种低成本的选择,但是需要使用额外的聚光器来改善LED辐照度较低的情况,激光器整体效率仍较低.在过去的十几年中,尽管高功率红光LD取得了迅猛的发展,但是功率仍然有限、成本相对较高,通常为每瓦100美元左右.相比较而言,LED的成本更低,每瓦低于0.5美元,且还在不断降低,另外,LED更加坚固,对外部环境的敏感度较低,因此LED泵浦的激光光源可以使工业、医疗和科研领域的激光应用受益,不失为未来翠绿宝石振荡器和再生放大器的一种有效抽运源.

### 2.3 锁模激光器

超短脉冲激光具有脉宽短、峰值功率高等特点,在精密微纳加工、超高速光通信、生物医学等领域扮演着重要的角色.翠绿宝石晶体有较宽的发射带宽(701~858 nm),特别适合于超短脉冲锁模激光的产生,从理论上来说脉宽最小能到10 fs.为了获得皮秒或飞秒量级的超短脉冲激光输出,人们对翠绿宝石锁模激光器进行了研究.表7总结了基于翠绿宝石晶体的锁模激光器的典型实验结果<sup>[60-65]</sup>.可以看出,早期的翠绿宝石锁模激光器主要用闪光灯作为翠绿宝石晶体的泵浦源<sup>[60-61]</sup>.1982年,苏联科学院西伯利亚热物理研究所LISITSYN V N等使用闪光灯抽运口径为6 mm、长度为70 mm的翠绿宝石晶体,利用弛豫时间为22 ps的

表7 基于翠绿宝石晶体的锁模激光器实验结果  
Table 7 Results of mode-locking experiments based on alexandrite crystal

Year	Pump source	Mode-locking	Laser wavelength	Pulse width	Repetition frequency	Output power	Ref.
1982	Flash lamp	Organic dye	725~745 nm	8 ps	12.5 Hz	—	[60]
2016	532 nm laser	KLM	755 nm	170 fs	80 MHz	780 mW	[62]
2018	532 nm laser	QD-SESAM	775 nm	380 fs	79.9 MHz	295 mW	[63]
2018	532 nm laser	KLM	750 nm	70 fs	5.6 MHz	4 mW	[64]
2018	532 nm laser	Graphene	750 nm	65 fs	5.56 MHz	8 mW	[65]

有机染料作为可饱和吸收体实现了被动锁模,得到了波长范围为725~745 nm、重复频率为12.5 Hz、脉冲宽度为8 ps的超短脉冲激光输出<sup>[60]</sup>,是目前利用闪光灯泵浦翠绿宝石晶体锁模激光的最短脉冲宽度。

直到2016年,研究者们开始使用绿光532 nm激光器做泵浦源,翠绿宝石晶体超短脉冲激光器得到了飞速的发展.2016年,加拿大马尼托巴大学GHANBARI S等报道了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<sup>[62]</sup>,采用X型腔,使用8 W的绿光532 nm激光器泵浦掺杂浓度为0.155%、长度为7 mm的翠绿宝石晶体,第一次实现了百飞秒量级翠绿宝石晶体超短脉冲锁模激光输出,输出激光中心波长为755 nm,脉冲宽度为170 fs,重复频率为80 MHz,平均输出功率为780 mW,对应光光转换效率9.8%,实验装置图如图17(a)所示.2018年,该研究团队进一步报道了532 nm绿光激光器泵浦的翠绿宝石被动锁模激光器<sup>[63]</sup>,利用量子点半导体可饱和吸收镜(Quantum-Dot Saturable Absorber Mirror, QD-SESAM)为锁模元件,在泵浦功率为7.3 W时,实现了平均输出功率为295 mW、中心波长为775 nm的超短脉冲激光输出,脉冲宽度为380 fs,重复频率为79.9 MHz,实验装置图如图17(b)所示。

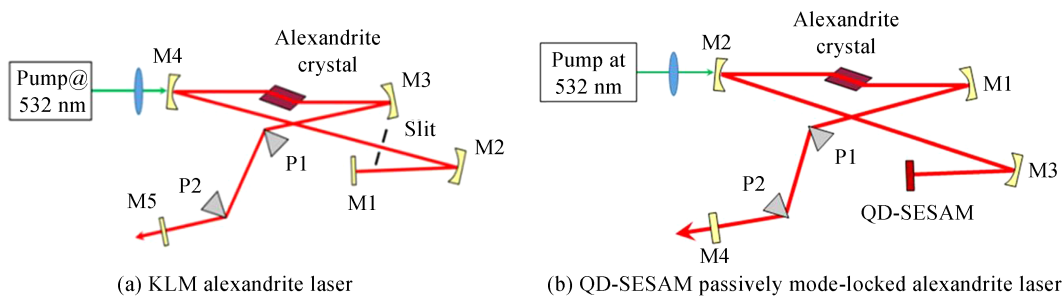


图17 532 nm绿光激光器抽运翠绿宝石晶体克尔透镜锁模<sup>[62]</sup>与QD-SESAM被动锁模<sup>[63]</sup>实验装置示意图  
Fig. 17 Schematic diagram of 532 nm pumped KLM<sup>[62]</sup> and QD-SESAM passively mode-locked<sup>[63]</sup> alexandrite laser

2018年,土耳其CIHAN C等报道了一种低重复频率克尔透镜锁模飞秒翠绿宝石激光器<sup>[64]</sup>,通过在谐振腔的一臂引入折叠多程腔(Multipass-cavity, MPC)系统,将激光腔的有效腔长从1.4 m增加到了26.8 m,从而将重复频率从107 MHz降低到了5.6 MHz.采用532 nm激光器对翠绿宝石晶体进行泵浦,在532 nm抽运功率为1 W时,就获得了脉冲宽度为70 fs、脉冲重复频率为5.6 MHz的超短脉冲激光,输出激光中心波长为750 nm,平均功率为4 mW,单脉冲能量为0.7 nJ,实验装置图如图18(a)所示.同年,该研究团队使用功率为5 W的532 nm绿光激光器为泵浦源,采用相似的多程锁模翠绿宝石激光系统,利用单层石墨烯做可饱和吸收体实现了翠绿宝石被动锁模激光输出<sup>[65]</sup>,得到重复频率为5.56 MHz、平均功率为8 mW、单脉冲能量为1.4 nJ、脉冲宽度为65 fs的750 nm超短脉冲激光输出,这是目前报道的翠绿宝石锁模激光器获得的最窄的脉冲宽度,实验装置图如图18(b)所示.在腔内引入带有色散补偿功能的多程腔,一方面通过多程腔增加谐

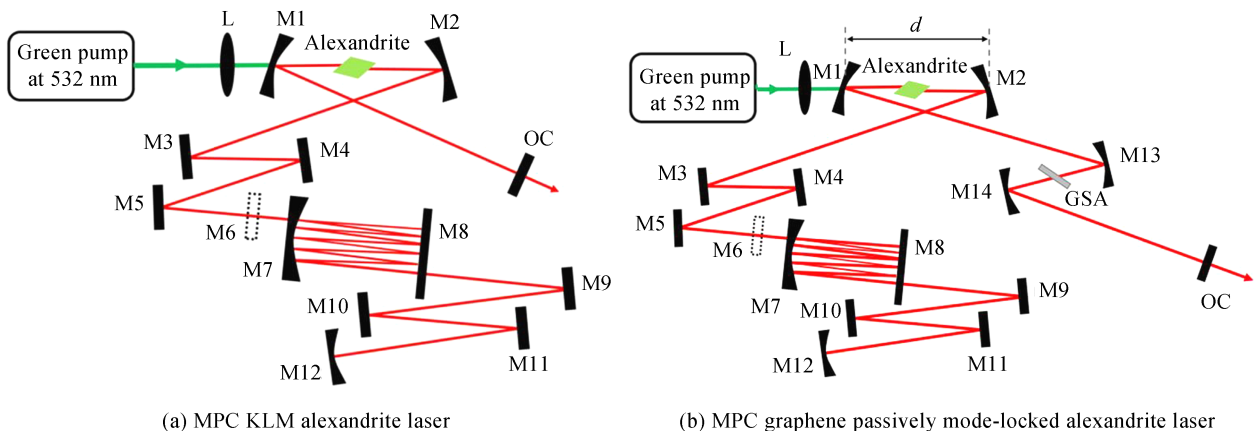


图18 532 nm激光器抽运翠绿宝石扩展腔克尔透镜锁模激光器<sup>[64]</sup>与石墨烯被动锁模激光器实验装置示意图<sup>[65]</sup>  
Fig. 18 Schematic diagram of 532 nm laser pumped MPC KLM alexandrite laser<sup>[64]</sup> and graphene passively mode-locked alexandrite laser<sup>[65]</sup>

振腔的长度,在一定平均功率下,降低了脉冲重复频率、增大了单脉冲能量,更容易直接获得低阈值大能量超短脉冲激光输出;另一方面,多程腔由啁啾镜组成,可以更好地实现色散补偿,有利于得到更窄脉宽的锁模激光;同时,可以获得更加稳定的锁模激光光谱并消除调Q脉冲不稳定的影响。

然而,从上述结果可以看出,针对锁模翠绿宝石激光,目前仅成功在闪光灯和532 nm绿光激光器抽运下获得了成功,尚未有LD泵浦的翠绿宝石锁模激光器的公开报道.这是一项非常具有挑战性的工作,因为翠绿宝石晶体的上能级寿命较长,且多模LD泵浦源的亮度较低.低亮度抽运源往往对应大的泵浦光斑尺寸,为了获得高效的模式匹配,需要对谐振腔进行设计以获得相匹配的大的基模振荡光斑尺寸,而大的光斑和有限的泵浦功率往往无法提供克尔透镜锁模所需要的足够强的自振幅调制,采用腔内双焦点的方式,将克尔介质和增益介质分离,可以克服传统克尔透镜锁模中激光晶体同时作为克尔介质和增益介质的窘境,为基于多模LD作为泵浦源的克尔透镜锁模激光器的实现提供了可能性.另外,通过增加谐振腔的长度,降低腔内起振激光的重复频率,来提升腔内能量以满足锁模激光起振的阈值也可以在一定程度上弥补抽运源亮度低的影响。

## 2.4 再生放大器

由于翠绿宝石晶体的泵浦吸收带较宽、荧光寿命较长、饱和通量较大,因此能够有效地储存能量,使翠绿宝石晶体成为亚皮秒脉冲放大技术的绝佳选择.然而,由于其受激发射截面较小,因此很难获得较大的放大系数.典型的翠绿宝石放大器的单程放大倍数为2~6倍,而使用再生放大器可以获得高达 $10^6 \sim 10^{11}$ 的放大因子<sup>[66]</sup>.再生放大腔内损耗元件较少,并且所有能量都在单个脉冲中而不是脉冲序列中累积.人们对基于翠绿宝石晶体的再生放大器的研究主要集中在二十世纪八九十年代<sup>[66-68]</sup>.

1988年,美国IMRA America公司的HARTER D J等实现了一种波长可调谐的翠绿宝石再生放大器<sup>[66]</sup>,如图19所示,采用脉冲宽度为5 ns、单脉冲能量为1 nJ的单频连续染料激光器作为种子源,注入到闪光灯泵浦的翠绿宝石再生放大器中,获得了波长为755 nm、脉冲宽度为5 ns、单脉冲能量为5 mJ的再生放大输出,并且腔内使用双折射滤光片实现了从735 nm到780 nm范围内的可调谐输出;同时,采用单脉冲能量为1 pJ、脉冲宽度为50 ps的755 nm增益开关二极管激光器为种子源,实现了单脉冲能量为10 mJ的再生放大输出。

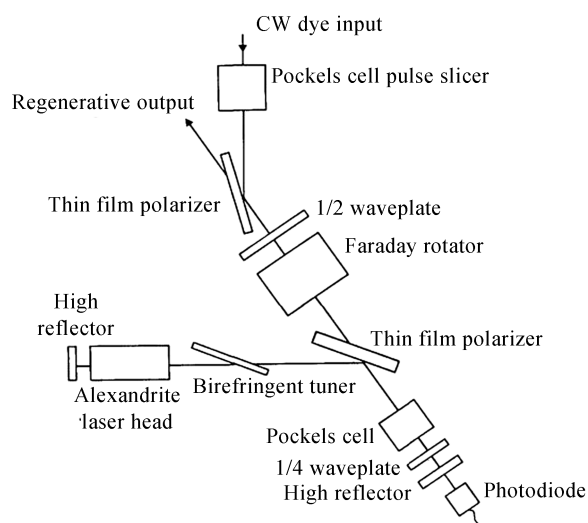


图19 窄线宽翠绿宝石再生放大器实验装置<sup>[66]</sup>

Fig. 19 Experimental setup for narrow linewidth alexandrite regenerative amplifier<sup>[66]</sup>

由于翠绿宝石晶体的增益带涵盖701~858 nm,因此可以对大带宽的超短脉冲进行放大.高饱和通量可确保将因单通增益饱和而产生的脉冲整形效应降至最低,但也将放大器的设计限制为再生放大器而非多通放大器.另外,需要展宽的脉冲宽度尽可能大,以允许放大器在相对较高的光通量(约 $2 \text{ J/cm}^2$ )下工作,从而提高放大效率并使B积分值最小化.因此,将啁啾脉冲放大与再生放大器结合,是获得高能量超短脉冲激光



输出行之有效的方法。

1989年,美国罗切斯特大学的PESSOT M等在翠绿宝石再生放大腔中实现了啁啾脉冲放大(Chirped Pulse Amplification, CPA)<sup>[67]</sup>,实验装置如图20所示,采用脉冲宽度为270 fs、波长为765 nm的锁模染料激光器为种子源,经过预放大和光栅展宽之后入射到翠绿宝石再生放大腔的脉冲光源的单脉冲能量为1 nJ,脉冲宽度为50 ps,得到了单脉冲能量为3.5 mJ、脉冲宽度为60 ps、重复频率为30 Hz的再生放大输出,最后经过光栅进行脉冲压缩获得了脉冲宽度为300 fs、峰值功率高达1.7 GW的脉冲输出。

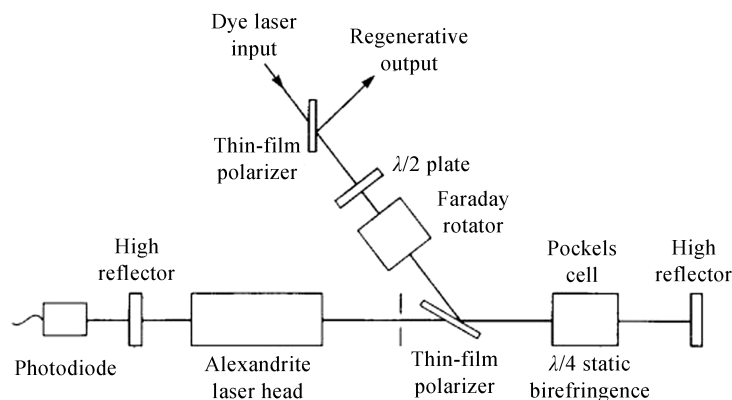


图20 基于翠绿宝石再生放大器的300 fs啁啾脉冲放大实验装置<sup>[67]</sup>

Fig. 20 Experimental setup for chirped pulse amplification of 300 fs pulses in an alexandrite regenerative amplifier<sup>[67]</sup>

1996年,美国IMRA America公司的HARIHARAN A等报道了由翠绿宝石激光器纵向泵浦的翠绿宝石飞秒再生放大器<sup>[68]</sup>,如图21所示,将啁啾脉冲放大技术与再生放大腔相结合,实验中利用了翠绿宝石晶体的吸收随温度变化的特性,再生放大器的泵浦源中所使用的翠绿宝石晶体的温度与再生放大腔中的翠绿宝石晶体的温度不同.再生放大器采用的激光工作物质翠绿宝石晶体的掺杂浓度为0.17%,长度为11 cm,直径为6 mm.泵浦源为闪光灯泵浦的翠绿宝石激光器,波长为728 nm,单脉冲能量最大为900 mJ,重复频率为10 Hz,脉冲宽度为100 μs.采用脉冲宽度为100 fs、波长为800 nm的锁模钛宝石激光器为种子源,获得了脉冲宽度为200 fs、单脉冲能量为mJ量级的再生放大输出;另外,采用脉冲宽度为61 fs、单脉冲能量最大为30 pJ、波长为796.3 nm的倍频掺铒光纤激光器为种子源,同样实现了单脉冲能量为mJ量级的再生放大输出。

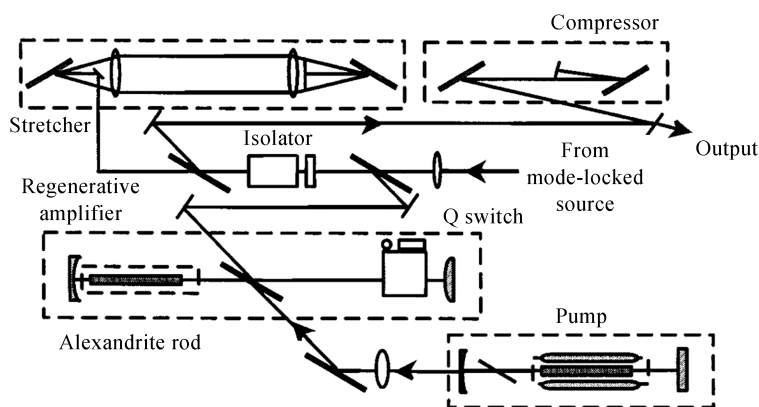


图21 翠绿宝石泵浦的翠绿宝石再生放大器实验装置<sup>[68]</sup>

Fig. 21 System schematic of the alexandrite-pumped alexandrite regenerative amplifier<sup>[68]</sup>

## 2.5 紫外光源

传统的紫外光源由汞弧光灯和准分子激光器产生,然而汞弧光灯紫外光源不具有相干性;气体准分子激光器,可以直接在深紫外波段输出高平均功率而无需借助非线性频率变换技术,但是光束质量和相干性较差,聚焦光斑尺寸受限,限制了其在深紫外激光精密加工方面的应用.获得具有高光束质量和高相干性的



紫外激光光源的最有效的替代方法是基于固体激光器的倍频紫外光源.与常规紫外固体激光器相比(如:基于掺Nd晶体和掺Yb晶体的紫外激光器),翠绿宝石激光器的波长调谐范围为701~858 nm,通过单次倍频或者两次倍频即可获得波长可调谐的紫外和深紫外激光,例如:波长为365 nm(730 nm二倍频)、248 nm(744 nm三倍频)、193 nm(772 nm四倍频)的具有高相干性、高光束质量的深紫外激光输出.

人们对翠绿宝石紫外激光器的研究可以追溯到二十世纪八十年代.1983年,美国加利福尼亚大学的BARNES N P等报道了基于BBO腔外倍频、波长在0.36~0.40  $\mu\text{m}$ 之间可调谐的紫外倍频翠绿宝石激光器,获得了脉冲宽度为0.1  $\mu\text{s}$ 、单脉冲能量为5 mJ的紫外激光输出<sup>[69]</sup>.1988年,美国联合信号公司(Allied Signal Incorporation)的CHEN D W等使用BBO晶体对闪光灯泵浦的翠绿宝石激光器进行腔外倍频,实现了重复频率为4 Hz、波长为360~390 nm可调谐的紫外激光输出,并在378 nm获得了最大单脉冲能量105 mJ,倍频效率为31%<sup>[70]</sup>.1994年,美国联合信号公司的KUPER J W等报道了闪光灯泵浦的248 nm深紫外单频翠绿宝石激光器<sup>[71]</sup>,利用窄线宽LD作为种子源、使用BBO晶体进行腔内二倍频,在重复频率为60 Hz时获得了最大单脉冲能量约为72 mJ的372 nm紫外单频激光;同时,使用KDP晶体进行腔外三倍频,进一步实现了单脉冲能量为15 mJ、重复频率100 Hz的248 nm深紫外单频激光输出.

1989年,日本东芝集团的IMAI S等报道了一台基于闪光灯泵浦的三倍频翠绿宝石激光器<sup>[72]</sup>,分别使用BBO晶体作为外腔二倍频和三倍频晶体,获得了单脉冲能量约为7.5 mJ、重复频率为10 Hz的252 nm深紫外激光,从756 nm到252 nm对应的光光转换效率约为10%;另外,利用厚度比为1:4:10:20的双折射滤波片组合作为波长调谐元件,实现了波长244~259 nm可调谐的深紫外激光输出.1998年,他们又使用BBO晶体对闪光灯泵浦的翠绿宝石激光器进行腔内倍频,利用厚度比为1:4:16的双折射滤波片组合作为波长调谐元件,实现了波长365~390 nm可调的紫外激光输出,在375 nm波长下,对应的最大单脉冲能量为90 mJ、脉冲宽度为240  $\mu\text{s}$ ;同时,他们还通过纤芯直径为600  $\mu\text{m}$ 、长度约3 m的阶跃折射率石英光纤成功传输了所获得的紫外激光<sup>[73]</sup>.

2001年,澳大利亚CSIRO的QING P等报道了一台具有大单脉冲能量、低峰值功率的长脉冲365 nm紫外激光器<sup>[74]</sup>,使用尺寸为5 mm $\times$ 5 mm $\times$ 10 mm的BBO晶体对闪光灯泵浦的翠绿宝石激光器进行腔外倍频,获得了单脉冲能量最大为186 mJ、脉冲宽度为220  $\mu\text{s}$ 的365 nm紫外激光输出,从730 nm到365 nm对应的光光转换效率约为4.2%.2007年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的刘书航等报道了采用尺寸为5 mm $\times$ 4 mm $\times$ 5 mm的LBO晶体进行腔外倍频的闪光灯泵浦的翠绿宝石激光器<sup>[75]</sup>,获得了波长为0.36~0.388  $\mu\text{m}$ 的紫外激光输出.当0.75  $\mu\text{m}$ 基频光工作在长脉冲200  $\mu\text{s}$ 时,实现了波长为0.375  $\mu\text{m}$ 、最大单

表8 紫外翠绿宝石激光器的研究进展  
Table 8 The research progress of ultraviolet alexandrite laser

Year	Crystal	Type	Crystal dimensions	Wavelength	Pulse energy	Pulse width	Repetition frequency	Highest conversion efficiency/%	Ref.
1983	RDP	Type I SHG	10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 25 mm	0.36~0.40 $\mu\text{m}$	5 mJ	0.1 $\mu\text{s}$	—	—	[69]
1988	BBO	Type I SHG	9 mm $\times$ 5 mm $\times$ 7 mm	378 nm	105 mJ	—	4 Hz	31%	[70]
1989	BBO	Type I SHG	4 mm $\times$ 9 mm $\times$ 7 mm	378 nm	~19 mJ	—	10 Hz	26%	[72]
1989	BBO	Type I THG	8 mm $\times$ 4 mm $\times$ 7.5 mm	252 nm	~7.5 mJ	—	10 Hz	10%*	[72]
1994	BBO	Type I SHG	8 mm	373 nm	~72 mJ	—	60 Hz	28.6%	[71]
1994	KDP	Type I THG	—	248 nm	15 mJ	—	100 Hz	—	[71]
1998	BBO	Type I SHG	5 mm $\times$ 5 mm $\times$ 5 mm	375 nm	90 mJ	240 $\mu\text{s}$	10 Hz	—	[73]
2001	BBO	Type I SHG	5 mm $\times$ 5 mm $\times$ 10 mm	365 nm	186 mJ	220 $\mu\text{s}$	—	4.2%	[74]
2007	LBO	Type I SHG	5 mm $\times$ 4 mm $\times$ 5 mm	0.36~0.388 $\mu\text{m}$	0.87 mJ	—	—	3.5%	[75]
2016	BBO	Type I SHG	4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 10 mm	379 nm	184 $\mu\text{J}$	—	1 kHz	47%	[53]

\*: the conversion efficiency from 756 nm to 252 nm.

脉冲能量为 0.48 mJ、最高倍频转换效率为 1.2% 的紫外激光;当 0.75  $\mu\text{m}$  基频光工作在短脉冲 200 ns 时,对应的 0.375  $\mu\text{m}$  紫外激光的最大单脉冲能量为 0.87 mJ,最高倍频转换效率为 3.5%。2016 年,英国伦敦帝国理工学院的 THOMAS G M 等使用尺寸为 4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 10 mm 的 BBO 晶体对红光 LD 双端泵浦的 758 nm 腔倒空 Q 翠绿宝石激光器进行腔外单程倍频<sup>[53]</sup>,在基频光的脉冲能量为 395  $\mu\text{J}$ 、重复频率为 1 kHz 时,获得了波长为 379 nm、单脉冲能量为 184  $\mu\text{J}$ 、转换效率为 47% 的紫外激光。为了便于对比,对关于翠绿宝石紫外激光器的部分结果进行梳理,如表 8 所示。

### 3 国内研究进展

国内对于翠绿宝石晶体激光器的研究还比较少,绝大多数已报道的翠绿宝石激光器上仍然采用闪光灯泵浦和绿光激光器泵浦<sup>[15,76-79]</sup>,而基于其他泵浦源(如蓝光 LD、红光 LD、黄光激光器等)的翠绿宝石激光器研究鲜有公开报道。

2003 年,长春理工大学王世英等基于闪光灯泵浦,分别利用双折射滤光片组合和棱镜对实现了调谐范围 724~781 nm 和 723~797 nm 的波长可调翠绿宝石激光器<sup>[78]</sup>。2008 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的刘书航与北方电子设备研究所的刘京郊联合研制了闪光灯泵浦的翠绿宝石可调激光器,调谐范围为 725~781 nm,最大输出能量达 1 J<sup>[79]</sup>。2011 年,长春理工大学的肖崇溧等基于 Nd:YAG 激光倍频技术得到的 532 nm 绿光激光器为泵浦源、磷酸二氢钾(KD<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>,KD\*P)晶体制成的电光 Q 开关为调 Q 元件,获得了脉宽约 200 ns 的激光输出<sup>[15]</sup>。2020 年,中国科学院理化技术研究所的宋越等分别使用一台光束质量因子为 11.8、功率为 22 W 的 532 nm 绿光激光器和一台 40 W 光纤耦合输出的红光 LD 作为泵浦源,实现了最大输出功率、斜效率分别为 2.1 W、12.9% 和 6.2 W、24.2% 的激光输出<sup>[80]</sup>。

与 638 nm 红光 LD 和 532 nm 激光器光源相比,590 nm 激光泵浦源的亮度较高、量子效率适中,对应于晶体 *b* 轴的最大吸收系数,约为 638 nm 和 532 nm 波长对应值的 2 倍和 3 倍。由于具有近衍射极限的光束质量和高吸收系数,590 nm 激光泵浦是实现翠绿宝石克尔透镜锁模的一种有效途径:高吸收系数允许使用更短的晶体长度,更加有利于实现克尔透镜锁模。2020 年初,本课题组创新性地提出使用高功率 589 nm 黄光激光器做泵浦源,精确对准翠绿宝石吸收峰值,获得了 2.51 W 的基模 755 nm 激光输出功率,对应的斜效率约为 41%;使用厚度为 1 mm 的双折射滤光片实现了输出激光波长调谐,调谐范围为 727.2~787.3 nm;同时使用厚度为 6 mm 的双折射滤光片,实现了 755.2 nm 和 764.2 nm 的双波长激光输出,最大平均输出功率为 1.8 W<sup>[16]</sup>。

最近,本课题组利用两台光纤耦合输出的最大功率为 40 W 的 638 nm 高功率 LD 做泵浦源,使用双端偏振泵浦结构对翠绿宝石晶体进行抽运,实验装置如图 22 所示,实现了中心波长为 760 nm、功率达 10.5 W 的可见光波段激光输出<sup>[81]</sup>,是目前国内利用红光 LD 泵浦翠绿宝石晶体实现的最高输出功率,光光转换效率为 20%,其中可获得的最大的基模激光输出功率约为 5.5 W,实验结果如图 23 所示。

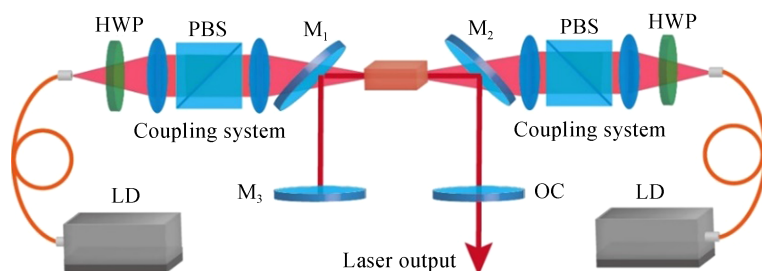
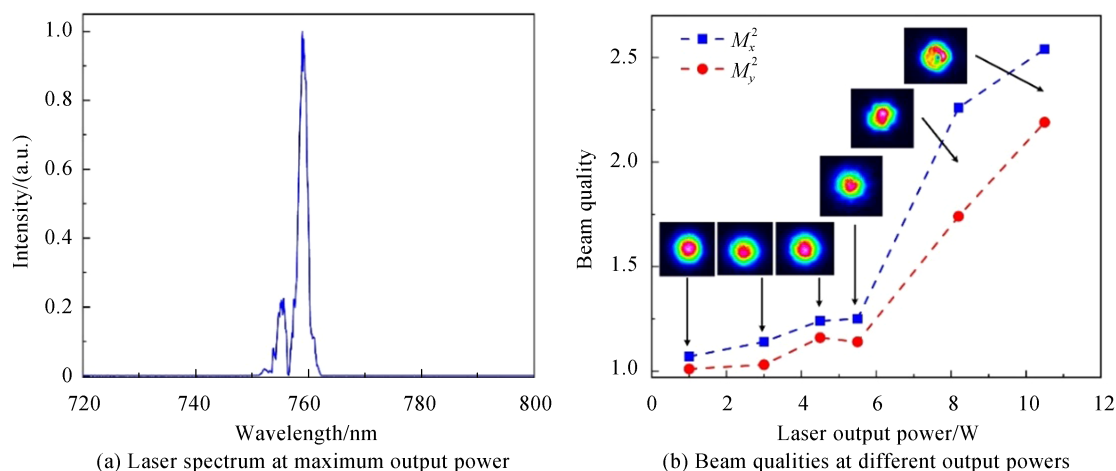


图 22 双端偏振泵浦实验装置<sup>[81]</sup>

Fig. 22 Experimental setup diagram of dual-end-pumped alexandrite laser<sup>[81]</sup>

图 23 最高输出功率下的激光光谱和不同输出功率下的光束质量<sup>[81]</sup>Fig. 23 Laser spectrum at maximum output power and beam qualities at different output powers<sup>[81]</sup>

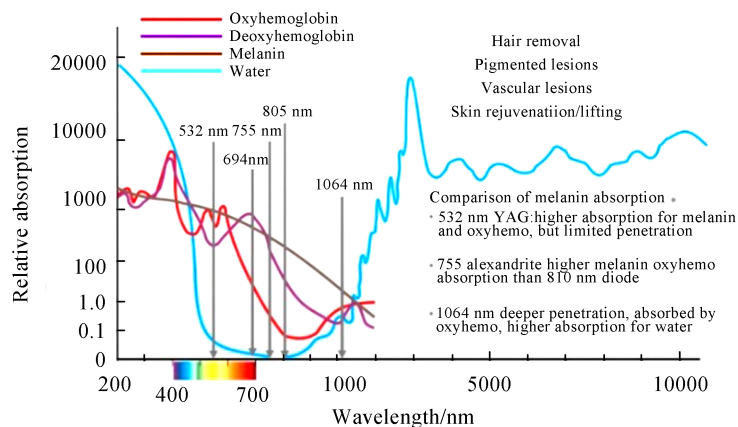
## 4 翠绿宝石激光器的应用

尽管闪光灯泵浦的翠绿宝石激光器效率较低,但在市场应用中仍占据主导地位.受益于翠绿宝石晶体优异的热机械性能,可以使用超高功率的泵浦源来得到高功率和大能量的激光输出.宽带发射波长适用于非线性频率转换(如倍频)等.因此,闪光灯泵浦的翠绿宝石激光器在科研和工业等领域具有重要的应用价值.美国Light Age公司生产的PAL<sup>TM</sup>翠绿宝石脉冲激光器是其中最具代表性的产品<sup>[82]</sup>,基于闪光灯泵浦模块,PAL<sup>TM</sup>振荡器和放大器分别可实现最高500 mJ和1 J的单脉冲能量;输出波长在720~800 nm范围内任意可选,通过二倍频、三倍频和四倍频可输出360~400 nm、240~266 nm和192~200 nm深紫外激光;工作在锁模状态下可获得最短单脉冲宽度约为100 ps的脉冲输出.翠绿宝石激光器在激光医疗、激光雷达、多光子显微镜、多光谱成像、光声成像、组织成像、材料加工、非线性频率转换、全息摄影、污染物监测、分析化学等领域都有着广泛的应用.

### 4.1 激光医疗

翠绿宝石激光器最为重要的应用领域之一为医疗领域的皮肤科,可用于皮肤美容手术(如激光脱毛、纹身去除等)<sup>[83-87]</sup>、治疗皮肤疾病(如色素沉着引起的病变)等<sup>[88-89]</sup>.

激光脱毛是基于选择性光热原理,利用特殊波长的激光透过表皮直接作用于毛囊,激光能量被毛囊和毛干中的黑色素选择性地吸收,由此产生的热量会损坏这些毛囊和毛干,使其变性萎缩,从而达到脱毛的作用<sup>[83]</sup>.图24为不同波长激光对应的组织吸收光谱.755 nm波段的翠绿宝石激光器是目前最常用的激光脱毛

图 24 激光组织吸收光谱<sup>[90]</sup>Fig. 24 Laser-tissue absorption spectrum<sup>[90]</sup>

激光器之一,与其他可用于激光脱毛的激光器(如红宝石激光器和Nd:YAG激光器)相比,翠绿宝石激光器产生的脉冲宽度较长(约为250  $\mu\text{s}$ ),而脉冲宽度越长,激光脱毛就越安全有效.与Nd:YAG激光器相比,翠绿宝石激光器的发射波长更短,有利于去除较细的毛发.翠绿宝石激光器还可用于去除纹身,基于色泽互补原理,由于翠绿宝石激光器发射的激光波长可以被黑色、蓝色、绿色和棕色等纹身有效吸收,尤其适用于去除这些颜色的纹身<sup>[86]</sup>.同时,基于激光对黑色素的靶向选择性,翠绿宝石激光器已广泛应用于色素性疾病治疗中,如太田痣、雀斑等疾病的治疗.翠绿宝石激光器也可用于特定的激光碎石医疗手术中,如美国联合信号公司生产的380 nm和760 nm双波长翠绿宝石激光器用于激光碎石手术中,效果比传统的单波长激光系统(如Nd:YAG激光器、504 nm单频染料激光器等)更有效.

#### 4.2 激光雷达

激光雷达是一种以激光束作为信息载体,通过探测远距离目标的反射和散射光特性来获取目标相关信息的主动式现代光学遥感技术,受地面背景、天空背景干扰小,具有高分辨率和高灵敏度,可以广泛应用于各个领域,如侦察大气层的物理属性(如温度和风速等)、测量大气成分(如云、气溶胶和臭氧等)以及表征地球环境(如植被和水覆盖等)等<sup>[91]</sup>.这些信息对了解气候变化、大气科学和地球生态系统的健康提供了宝贵的资源.表9为一些闪光灯泵浦的翠绿宝石激光器的相关激光雷达<sup>[92]</sup>.闪光灯泵浦的调Q翠绿宝石激光器可应用于差分吸收激光雷达系统,具有较宽的激光波长调谐范围(701~858 nm).尤其是720~730 nm和760~770 nm波段分别对应水蒸气和氧气的高吸收谱线<sup>[93-96]</sup>,可以测量大气湿度和温度.同时,早在二十世纪九十年代,LD泵浦的翠绿宝石激光器就引起了人们浓厚的兴趣,使用具有高功率、高性价比的可见光LD作为泵浦源可以使整个翠绿宝石激光系统结构更加紧凑、效率更高<sup>[55,91-92]</sup>、成本更低,适用于基于激光的测高仪,可以测量地形的高度以提供具有高空间分辨率的地形图.翠绿宝石的宽光谱范围(701~858 nm)与植被的红边(植被的反射率在近红外波段接近与红光交界处快速变化的区域)重叠<sup>[97]</sup>,因此基于翠绿宝石激光器可实现对植被质量和植被健康的高灵敏度监测,是非常适合于植被遥感的激光光源.Nd:YAG激光器需要利用三倍频产生紫外激光,而翠绿宝石晶体仅通过二次倍频即可产生可调谐紫外激光,更加简单、高效.可调谐紫外翠绿宝石激光器可用于多普勒激光雷达中进行风切变探测.另外,由于钾原子能够吸收770 nm或766 nm特定波长的光子发生荧光共振,因此770 nm或766 nm翠绿宝石激光器可用于多普勒激光雷达系统中对地球大气80~110 km高度中层顶区域中的钾原子进行观测分析<sup>[98-99]</sup>.图25(a)、(b)分别为使用LD和闪光灯泵浦的翠绿宝石激光器为光源测得的不同大气高度中的钾原子的浓度分布曲线<sup>[55,100]</sup>.近年来,用于激光雷达系统的LD泵浦的翠绿宝石调Q激光器取得了重大进展<sup>[53,55-56,101]</sup>,展示了翠绿宝石激光器作为激光雷达可调谐光源令人瞩目的应用前景.

表9 闪光灯泵浦的翠绿宝石激光器的相关激光雷达<sup>[92]</sup>

Table 9 Some working lidars based on alexandrite lasers pumped by flashlamp<sup>[92]</sup>

Property	CNRS	NASA	MPI	IAP	Arecibo	PNL
Application	DIAL	DIAL	DIAL	Res fl	Res fl	Lab
Seeder	none	none	Ti:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Diode	Diode	Diode
Wavelength range /nm	727~732	725~785	720~780	770	770+385	750
Linewidth /MHz	<560	560	<150	<20	<50	<20
Freq stability /MHz	<110	<400	63 rms	—	—	16
Spectral purity	>99.95%	>99.85%	>99.99%	>99%	—	—
Pulse width /ns	<500	200	<200	275	100~300	140
Pulse energy /mJ	30	30	>50	100	200	250
Pulse rate /pps	20	10	>15	25	20	20
Installation	Ground	Aircraft	Ground	Ship	Ground	Ground



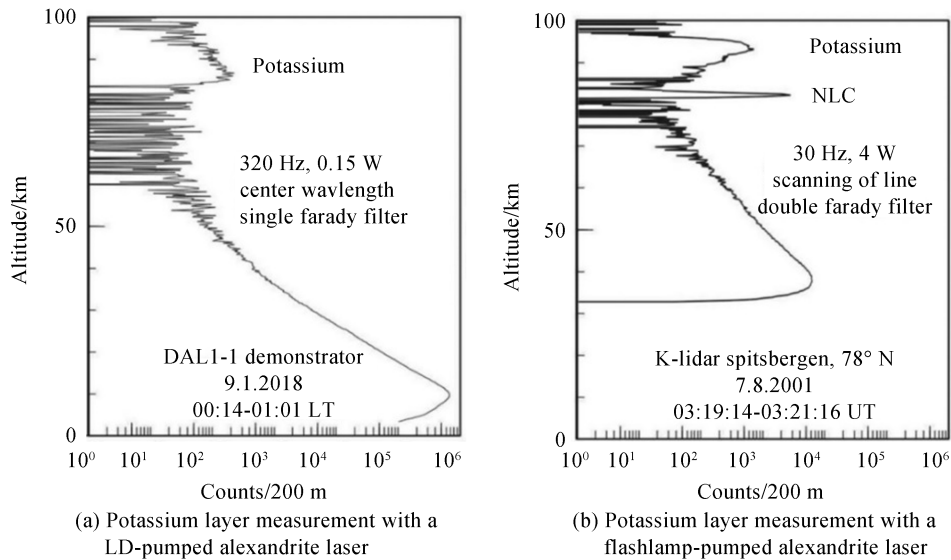


图 25 基于 LD 泵浦的<sup>[55]</sup>与基于闪光灯泵浦的<sup>[100]</sup>翠绿宝石激光器的钾层测量结果

Fig. 25 Demonstration of a potassium layer measurement with a LD-pumped alexandrite laser<sup>[55]</sup> and a flashlamp-pumped alexandrite laser<sup>[100]</sup>

### 4.3 多光子显微镜

多光子显微镜,也称为多光子激发荧光显微镜,是一种光学切片荧光显微镜<sup>[102]</sup>,与共聚焦显微镜结合,已成为生物医学显微镜中最强大的成像方式之一.多光子显微镜可以对生物样品进行四维高分辨率深层成像,而对样品的破坏却很小,有利于完整组织和活体动物的成像<sup>[103-105]</sup>,已广泛用于生物学的多个不同领域,如神经科学、免疫学、胚胎学和癌症研究等.与传统的线性荧光显微镜相比,多光子显微镜具有对样品光损伤量小、成像深度大、分辨率高等优点.选择合适的激光源对多光子显微镜至关重要,会直接影响所获得图像的质量.多光子显微镜通常使用脉冲染料激光器、二极管激光器,以及基于钛宝石激光器、掺 Yb 激光器、掺 Nd 激光器等激光系统作为光源<sup>[106-108]</sup>.750 nm 波段对于多光子显微镜中多种广泛使用的荧光团的最佳激发非常重要,包括 4',6-diamidino-2-phenylindole dihydrochloride (DAPI)、Alexa flour 488、indo-1 和 fura-2 等<sup>[109-112]</sup>.图 26 为使用 750 nm 波段光源测得的小鼠膝后淋巴结的多光子显微镜图像<sup>[112]</sup>.因此,在 700~850 nm 光谱范围内,具有飞秒输出的可调谐翠绿宝石激光器可能是多光子显微镜中所用现有激光光源的替代品.低成本飞秒激光器的发展为推动多光子显微镜的广泛应用,加速生物学和医学的基础研究至关重要.随着 LD 技术的快速发展,未来基于 LD 直接泵浦的飞秒翠绿宝石激光系统的实现,可以为多光子显微镜的成像工作提供极大的成本优势.

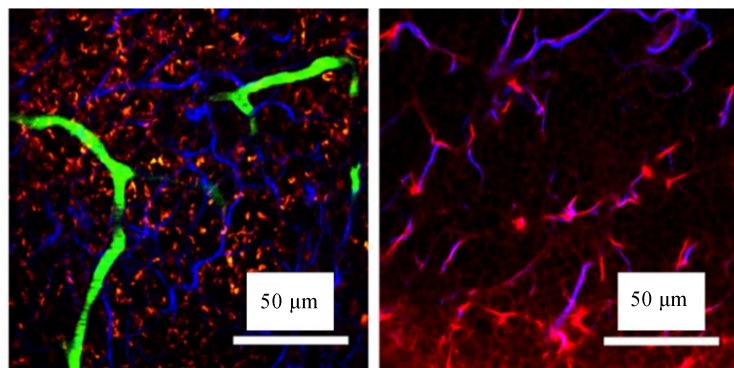


图 26 小鼠膝后淋巴结的多光子显微镜图像<sup>[112]</sup>

Fig. 26 Multiphoton microscopy images of a mouse popliteal lymph node<sup>[112]</sup>



## 5 结论

翠绿宝石激光器的研究领域涵盖了传统全固态激光器的主流方向,并在连续激光、调Q激光、锁模激光、以及紫外激光等领域取得了较大的进展.然而,其研究仍有大量值得继续深入探讨的科学技术问题:如何获得高亮度、高光束质量的红光LD泵浦源仍是突破翠绿宝石全固态激光器基模功率限制的关键;目前LD泵浦的翠绿宝石激光器的研究主要集中在连续光和调Q脉冲光机制下,对于其在模式锁定等超快领域的研究较为匮乏,尚未有公开报道;关于翠绿宝石激光器中自调Q机理,目前虽然已经有了初步的探索,但仍需进一步的明确;LED抽运源在翠绿宝石激光器中的应用仍相对较少,LED技术与LD技术相比更加成熟且价格低廉,然而目前基于LED抽运源的翠绿宝石激光器的整体效率较低,如何提高LED泵浦的整体效率,对高集成度、高功率翠绿宝石振荡器和放大器的研制具有重要意义.翠绿宝石激光器在多光子显微镜、深紫外光刻、光纤光栅刻写、KrF放大器种子光源等领域仍具有很大的发展潜力和应用前景.

### 参考文献

- [1] WALLING J C, JENSSEN H P, MORRIS R C, *et al.* Tunable-laser performance in  $\text{BeAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$  [J]. *Optics Letters*, 1979, **4**(6): 182-183.
- [2] WALLING J C, PETERSON O G, JENSSEN H P, *et al.* Tunable alexandrite lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, **16**(12): 1302-1315.
- [3] KUPER J W, CHIN T, ASCHOFF H E. Extended tuning range of alexandrite at elevated temperatures [C]. *Advanced Solid State Lasers*, 1990: CL3.
- [4] TRAFELI J P, KWAN J M, MEEHAN K J, *et al.* Use of a long-pulse alexandrite laser in the treatment of superficial pigmented lesions [J]. *Dermatologic Surgery*, 2007, **33**(12): 1477-1482.
- [5] BRUNEAU D, CAZENEUVE H, LOTH C, *et al.* Double-pulse dual-wavelength alexandrite laser for atmospheric water vapor measurement [J]. *Applied Optics*, 1991, **30**(27): 3930-3937.
- [6] ARORA P, SARKAR R, GARG V K, *et al.* Lasers for treatment of melasma and post-inflammatory hyperpigmentation [J]. *Journal of Cutaneous and Aesthetic Surgery*, 2012, **5**(2): 93-103.
- [7] BAKULE P, BAIRD P E G, BOSHIER M G, *et al.* A chirp-compensated, injection-seeded alexandrite laser [J]. *Applied Physics B*, 2000, **71**(1): 11-17.
- [8] 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): 3184-3192.
- [9] TEPPITAKSAK A, MINASSIAN A, THOMAS G M, *et al.* High efficiency  $>26$  W diode end-pumped Alexandrite laser [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(13): 16386-16392.
- [10] SATHIAN J, TAWY G, SHENG X, *et al.* Non-astigmatic alexandrite ring laser design with wavelength-tunable single-longitudinal-mode operation [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2020, **37**(7): 2185-2192.
- [11] PENG X Y, MARRAKCHI A, WALLING J C, *et al.* Watt-level red and UV output from a CW diode array-pumped tunable alexandrite laser [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2005: CMAA5.
- [12] DAMZEN M J, THOMAS G M, MINASSIAN A. Diode-side-pumped alexandrite slab lasers [J]. *Optics Express*, 2017, **25**(10): 11622-11636.
- [13] TAWY G, MINASSIAN A, DAMZEN M J. High-power 7.4 W TEM<sub>00</sub> and wavelength-tunable alexandrite laser with a novel cavity design and efficient fibre-coupled diode-pumping [J]. *OSA Continuum*, 2020, **3**(6): 1638-1649.
- [14] WALOCHNIK M, JUNGBLUTH B, HUBER H, *et al.* Diode-pumped cw alexandrite laser with temporally stable 6.5 W in TEM<sub>00</sub> operation with prospect of power scaling [J]. *Optics Express*, 2020, **28**(11): 15761-15769.
- [15] XIAO Chong-li. Study on all-solid-state  $\text{BeAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$  laser [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.  
肖崇溧. 全固态金绿宝石激光器研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
- [16] GUAN Chen, LIU Zhao-jun, CONG Zhen-hua, *et al.* Alexandrite laser on-peak pumped by a frequency doubled Raman Yb-fiber laser at 589 nm [J]. *OSA Continuum*, 2020, **3**(5): 1204-1211.
- [17] DEMIRBAS U. Cr: colquirite lasers: current status and challenges for further progress [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2019, **68**: 100227.
- [18] WALLING J C, HELLER D F, SAMELSON H, *et al.* Tunable alexandrite lasers: development and performance [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1985, **21**(10): 1568-1581.
- [19] MIAO Z W, YU H J, ZHANG J Y, *et al.* Watt-level CW Ti: sapphire oscillator directly pumped with green laser diodes module [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, **32**(5): 247-250.
- [20] POWELL R C, XIL, GANG X, *et al.* Spectroscopic properties of alexandrite crystals [J]. *Physical Review B*, 1985, **32**(5): 2788-2797.

- [21] COMMONSWIKIMEDIA. File: Alexandrite structure. png [EB/OL]. [2020-08-31]. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alexandrite\\_structure.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alexandrite_structure.png).
- [22] DEMIRBAS U, SENNAROGLU A, KÄRTNER F X. 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): 3352–3370.
- [23] KERRIDGE W R. Development of diode pumped alexandrite lasers[D]. London: Imperial College London, 2020.
- [24] ZHU Zhen, XIAO Cheng-feng, XIA Wei, *et al.* Design and fabrication of high power 640 nm red laser diodes[J], *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, **55**(8): 081403.  
朱振, 肖成峰, 夏伟, 等. 大功率640 nm红光半导体激光器的设计及制备[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, **55**(8): 081403.
- [25] SHIMADA N, SHIBATA K, HANAMAKI Y, *et al.* 12W CW operation of 640nm-band laser diode array[C]. SPIE, 2008, **6876**: 20.
- [26] KURAMOTO K, NISHIDA T, ABE S, *et al.* High-power operation of AlGaInP red laser diode for display applications [C]. SPIE, 2015, **9348**:93480H.
- [27] KURAMOTO K, ABE S, MIYASHITA M, *et al.* Recent progress of 638-nm high-power broad area laser diodes in Mitsubishi Electric[C]. SPIE, 2018, **10514**: 1051404.
- [28] HAGIMOTO M, MIYAMOTO S, KIMURA Y, *et al.* USHIO 3.5W red laser diode for projector light source [C]. SPIE, 2019, **10939**: 109391I.
- [29] BAO L, GRIMSHAW M, DEVITO M, *et al.* High power diode lasers emitting from 639 nm to 690 nm[C]. SPIE, 2014, **8965**: 896512.
- [30] BLUME G, KASPARI C, FEISE D, *et al.* Tapered diode lasers and laser modules near 635nm with efficient fiber coupling for flying-spot display applications[J]. *Optical Review*, 2012, **19**(6): 395–399.
- [31] IMANISHI D. High-temperature operation of 640 nm wavelength high-power laser diode arrays[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2017, **56**(3): 032702.
- [32] XIA W, ZHU Z, LI X Y, *et al.* Improved thermal performance of 640 nm laser diode packaged by SiC submount[J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2019, **40**(2):193–196.
- [33] XU Yun, CAO Qing, ZHU Xiao-peng, *et al.* High power AlGaInP laser diodes with zinc-diffused window mirror structure[J]. *Chinese Optics Letters*, 2004, **2**(11): 647–649.
- [34] MA De-ying, LI Pei-xu, XIA Wei, *et al.* Mg doped p-cladding AlInP layer with window-structure high power 660 nm (3.7 W) AlGaInP broad area laser diodes[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2009, **38**(3): 597–601.  
马德营, 李佩旭, 夏伟, 等. Mg 掺杂 AlInP 限制层窗口结构高功率(3.7 W)660 nm AlGaInP 宽面半导体激光器[J]. *人工晶体学报*, 2009, **38**(3): 597–601.
- [35] BUKIN G V, VOLKOV S Y, MATROSOV V N, *et al.* Stimulated emission from alexandrite (BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Cr<sup>3+</sup>) [J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1978, **8**(5): 671–672.
- [36] WALLING J C, PETERSON O G, MORRIS R C. Tunable CW Alexandrite Laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, **16**(2): 120–121.
- [37] GUCH S, JONES C E. Alexandrite-laser performance at high temperature[J]. *Optics Letters*, 1982, **7**(12): 608–610.
- [38] WALLING J C, PETERSON O G. High gain laser performance in alexandrite [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, **16**(2): 119–120.
- [39] LAI S T, SHAND M L. High efficiency cw laser-pumped tunable alexandrite laser[J]. *Journal of Applied Physics*, 1983, **54**(10): 5642–5644.
- [40] SCHEPS R, MYERS J F, GLESNE T R, *et al.* Monochromatic end-pumped operation of an Alexandrite laser [J]. *Optics Communications*, 1993, **97**(5–6): 363–366.
- [41] GHANBARI S, MAJOR A. High power continuous-wave Alexandrite laser with green pump[J]. *Laser Physics*, 2016, **26**(7): 075001.
- [42] KUPER J W, BROWN D C. High efficiency CW green pumped Alexandrite lasers[C]. SPIE, 2006, **6100**: 61000T.
- [43] SCHEPS R, GATELY B M, MYERS J F, *et al.* Alexandrite laser pumped by semiconductor-lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 1990, **56**(23): 2288–2290.
- [44] THOMAS G M, MINASSIAN A, DAMZEN M J. Optical vortex generation from a diode-pumped alexandrite laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, **15**(4): 045804.
- [45] ARBABZADAH E A, DAMZEN M J. Fibre-coupled red diode-pumped Alexandrite TEM<sub>00</sub> laser with single and double-pass end-pumping[J]. *Laser Physics Letters*, 2016, **13**(6): 065002.
- [46] KERRIDGE-JOHNS W R, DAMZEN M J. 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): 2525–2534.
- [47] KERRIDGE-JOHNS W R, DAMZEN M J. Temperature effects on tunable cw Alexandrite lasers under diode end-pumping[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(6): 7771–7785.

- [48] TAWY G, WANG J, DAMZEN M J. Pump-induced lensing effects in diode pumped Alexandrite lasers[J]. *Optics Express*, 2019, **27**(24): 35865-35883.
- [49] FIBRICH M, ŠULC J, VYHLÍDAL D, *et al.* Alexandrite spectroscopic and laser characteristic investigation within a 78-400 K temperature range[J]. *Laser Physics*, 2017, **27**(11): 115801.
- [50] FIBRICH M, ŠULC J, JELÍNKOVÁ H. Alexandrite microchip lasers[J]. *Optics Express*, 2019, **27**(12): 16975-16982.
- [51] SAWADA R, TANAKA H, SUGIYAMA N, *et al.* Wavelength-multiplexed pumping with 478- and 520-nm indium gallium nitride laser diodes for Ti: sapphire laser[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(6): 1654-1661.
- [52] MUNK A, JUNGBLUTH B, STROTKAMP M, *et al.* Diode-pumped alexandrite ring laser for LIDAR applications [C]. SPIE, 2016, **9726**: 972601.
- [53] THOMAS G M, MINASSIAN A, SHENG X, *et al.* Diode-pumped alexandrite lasers in Q-switched and cavity-dumped Q-switched operation[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(24): 27212-27224.
- [54] PARALI U, SHENG X, MINASSIAN A, *et al.* Diode-pumped alexandrite laser with passive SESAM Q-switching and wavelength tunability[J]. *Optics Communications*, 2018, **410**: 970-976.
- [55] MUNK A, JUNGBLUTH B, STROTKAMP M, *et al.* Diode-pumped alexandrite ring laser in single-longitudinal mode operation for atmospheric lidar measurements[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(12): 14928-14935.
- [56] MUNK A, STROTKAMP M, WALOCHNIK M, *et al.* Diode-pumped Q-switched alexandrite laser in single longitudinal mode operation with Watt-level output power[J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(22): 5492-5495.
- [57] TWAY G, DAMZEN M J. Tunable, dual wavelength and self-Q-switched alexandrite laser using crystal birefringence control[J]. *Optics Express*, 2019, **27**(13): 17507-17520.
- [58] KEYES R J, QUIST T M. Injection luminescent pumping of  $\text{CaF}_2:\text{U}^{3+}$  with GaAs diode lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 1964, **4**(3): 50-52.
- [59] PICHON P, BARBET A, J-PBLANCHOT, *et al.* LED-pumped alexandrite laser oscillator and amplifier[J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(20): 4191-4194.
- [60] LISITSYN V N, MATROSOV V N, OREKHOVA V P, *et al.* Generation of 0.7-0.8  $\mu$  picosecond pulses in an alexandrite laser with passive mode locking[J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1982, **12**(3): 368-370.
- [61] VOLKER F, LU Q, WEBER H. Passive mode-locking of an alexandrite laser for picosecond pulse generation [J]. *Journal of Applied Physics*, 1991, **69**(6): 3432-3439.
- [62] GHANBARI S, AKBARI R, MAJOR A. Femtosecond Kerr-lens mode-locked alexandrite laser[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(13): 14836-14840.
- [63] GHANBARI S, FEDOROVA K A, KRYSA A B, *et al.* Femtosecond alexandrite laser passively mode-locked by an InP/InGaP quantum-dot saturable absorber[J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(2): 232-234.
- [64] CIHAN C, MUTI A, BAYLAM I, *et al.* 70 femtosecond Kerr-lens mode-locked multipass-cavity alexandrite laser[J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(6): 1315-1318.
- [65] CIHAN C, KOCABAS C, DEMIRBAS U, *et al.* Graphene mode-locked femtosecond alexandrite laser[J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(16): 3969-3972.
- [66] HARTER D J, BADO P. Wavelength tunable alexandrite regenerative amplifier[J]. *Applied Optics*, 1988, **27**(21): 4392-4395.
- [67] PESSOT M, SQUIER J, BADO P, *et al.* Chirped pulse amplification of 300 fs pulses in an alexandrite regenerative amplifier[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989, **25**(1): 61-66.
- [68] HARIHARAN A, FERMAN M E, STOCK M L, *et al.* Alexandrite-pumped alexandrite regenerative amplifier for femtosecond pulse amplification[J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(2): 128-130.
- [69] BARNES N P, JOHNSON T M, GETTEMY D J, *et al.* Tunable near ultraviolet laser system from a frequency doubled alexandrite laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1983, **19**(9): 1437-1442.
- [70] CHEN D W, YE H J. Alexandrite laser frequency doubling in  $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$  crystals[J]. *Optics Letters*, 1988, **13**(10): 808-810.
- [71] KUPER J W, CHIN T C, PAPANESTOR P A, *et al.* High-average-power, narrow band 248 nm alexandrite laser system[C]. SPIE, 1994, **2115**: 88-93.
- [72] IMAI S, YAMADA T, FUJIMORI Y, *et al.* Third-harmonic generation of an alexandrite laser in  $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ [J]. *Applied Physics Letters*, 1989, **54**(13): 1206-1208.
- [73] IMAI S, ITO H. Long-pulse ultraviolet-laser sources based on tunable alexandrite lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, **34**(3): 573-576.
- [74] QING Pan, YANG Xiao-ping. Long pulse, high energy output at 365 nm from an frequency-doubled Alexandrite laser [J]. *Optics Communications*, 2001, **200**(1-6): 309-314.
- [75] LIU Shu-huang, LIU Jing-jiao, WANG Li-jun. Tunable ultraviolet laser source from a frequency doubled alexandrite laser[C]. SPIE, 2007, **6782**: 67822Y.

- [76] 吴光照. 全固态紫翠宝石激光器的实验方案[J]. 激光与光电子学进展, 1997, **34**(7): 21-22.
- [77] YANG Xiao-dong, OUYANG Bin, LI Chuan-dong, *et al.* Research on temperature characteristics of an alexandrite laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(1): 74-77.  
杨晓东, 欧阳斌, 李传东, 等. 紫翠宝石激光输出的温度特性研究[J]. 光学学报, 1995, **15**(1): 74-77.
- [78] WANG Shi-ying. Tunable alexandrite laser and test research of Q-switch [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2003.  
王世英. 可调谐紫翠宝石激光器与调Q技术实验研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2003.
- [79] LIU Shu-hang, LIU Jing-jiao, WANG Li-jun. Design and experimental research of tunable alexandrite laser in the visible range[J]. *Journal of Optoelectronics•Laser*, 2008, **19**(3): 326-330.  
刘书航, 刘京郊, 王立军. 可见光可调谐金绿宝石激光器的设计与实验[J]. 光电子·激光, 2008, **19**(3): 326-330.
- [80] SONG Yue, WANG Zhi-min, ZHANG Feng-feng, *et al.* Continuous-wave alexandrite laser pumped by 638 nm and 532 nm lasers[J/OL]. [2020-08-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20200810.1510.008.html>.  
宋越, 王志敏, 张丰丰, 等. 638 nm、532 nm 激光泵浦的连续波翠绿宝石激光器[J/OL]. [2020-08-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20200810.1510.008.html>.
- [81] GUAN Chen, CONG Zhen-hua, LIU Zhao-jun, *et al.* 10.5-W laser output at 760 nm from laser diode pumped alexandrite crystal[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, **47**(10): 1015001.  
关晨, 丛振华, 刘兆军, 等. LD泵浦翠绿宝石晶体实现760 nm、10.5 W激光输出[J]. 中国激光, 2020, **47**(10): 1015001.
- [82] LIGHT AGE. PAL™ Pulsed alexandrite laser system [EB/OL]. [2020-08-30]. <http://lightage.com/web/pal-pulsed-alexandrite-laser/>.
- [83] TATLIDEDE S, EGEMEN O, SALTAT A, *et al.* Hair removal with the long-pulse alexandrite laser[J]. *Aesthetic Surgery Journal*, 2005, **25**(2): 138-143.
- [84] LAUGHLIN S A, DUDLEY D K. Long-term hair removal using a 3-millisecond alexandrite laser [J]. *Journal of Cutaneous Medicine and Surgery*, 2000, **4**(2): 83-88.
- [85] FITZPATRICK R E, GOLDMAN M P. Tattoo removal with the Alexandrite laser: a clinical and histologic study[C]. SPIE, 1993, 1876: 110-111.
- [86] ALSTER T S. Q-switched alexandrite laser treatment (755 nm) of professional and amateur tattoos[J]. *Journal of The American Academy of Dermatology*, 1995, **33**(1): 69-73.
- [87] LEUENBERGER M L, MULAS M W, HATA T R, *et al.* Comparison of the Q-switched alexandrite, Nd:YAG, and Ruby lasers in treating blue-black tattoos[J]. *Dermatologic Surgery*, 1999, **25**(1): 10-14.
- [88] GOLDBERG D J. Laser treatment of pigmented lesions[J]. *Dermatologic Clinics*, 1997, **15**(3): 397-407.
- [89] LEE Y J, SHIN H J, NOH T K, *et al.* Treatment of melasma and post-inflammatory hyperpigmentation by a picosecond 755-nm alexandrite laser in Asian patients[J]. *Annals of Dermatology*, 2017, **29**(6): 779-781.
- [90] CLARITY™ [EB/OL]. [2020-08-31]. [https://www.duallaser.fi/wp-content/uploads/2015/02/CLARITY\\_launching-PPT\\_4100607440\\_20121108.pdf](https://www.duallaser.fi/wp-content/uploads/2015/02/CLARITY_launching-PPT_4100607440_20121108.pdf).
- [91] DAMZEN M J, THOMAS G M, TEPPITAKSAK A, *et al.* Progress in diode-pumped Alexandrite lasers as a new resource for future space Lidar missions[C]. SPIE, 2014, 10563.
- [92] MCKAY J A, WILKERSON T D. The diode-pumped alexandrite laser for DIAL and Doppler lidar[C]. SPIE, 1997, **3127**: 124-132.
- [93] BRUNEAU D, LIONS T A D, QUAGLIA P, *et al.* Injection-seeded pulsed alexandrite laser for differential absorption lidar application[J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(18): 3941-3950.
- [94] PONSARDIN P, HIGDON N S, GROSSMANN B E, *et al.* Spectral control of an alexandrite laser for an airborne water-vapor differential absorption lidar system[J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(27): 6439-6450.
- [95] WULFMEYER V, BÖSENBERG J. Single-mode operation of an injection-seeded alexandrite ring laser for application in water-vapor and temperature differential absorption lidar[J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(15): 1150-1152.
- [96] WULFMEYER V. Ground-based differential absorption lidar for water-vapor and temperature profiling: development and specifications of a high-performance laser transmitter[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(18): 3804-3824.
- [97] MILLER J R, HARE E W, WU J, *et al.* Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance 1. An inverted-Gaussian reflectance model[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, **11**(10): 1755-1773.
- [98] ZAHN U V, HÖFFNER J. Mesopause temperature profiling by potassium lidar[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, **23**(2): 141-144.
- [99] HÖFFNER J, LÜBKEN F J. Potassium lidar temperatures and densities in the mesopause region at Spitsbergen (78°N) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**(D20).
- [100] FRICKE-BEGEMANN C, ALPERS M, HÖFFNER J. Daylight rejection with a new receiver for potassium resonance temperature lidars[J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(21): 1932-1934.
- [101] 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.
- [102] XU C, WEBB W W. Measurement of two-photon excitation cross sections of molecular fluorophores with data from 690 to 1050 nm[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1996, **13**(3): 481-491.
- [103] DIASPRO A, BIANCHINI P, VICIDOMINI G, *et al.* Multi-photon excitation microscopy [J]. *Biomedical Engineering Online*, 2006, **5**(1): 36.
- [104] GIRKIN J M. Optical physics enables advances in multiphoton imaging [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2003, **36**(14): R250.
- [105] GIRKIN J M, MCCONNELL G. Advances in laser sources for confocal and multiphoton microscopy [J]. *Microscopy Research and Technique*, 2005, **67**(1): 8-14.
- [106] DENK W, STRICKLER J H, WEBB W W. Two-photon laser scanning fluorescence microscopy [J]. *Science*, 1990, **248**(4951): 73-76.
- [107] TAIRA K, HASHIMOTO T, YOKOYAMA H. Two-photon fluorescence imaging with a pulse source based on a 980-nm gain-switched laser diode [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(5): 2454-2458.
- [108] MCCONNELL G, SMITH G L, GIRKIN J M, *et al.* Two-photon microscopy of fura-2-loaded cardiac myocytes with an all-solid-state tunable and visible femtosecond laser source [J]. *Optics Letters*, 2003, **28**(19): 1742-1744.
- [109] DENK W J, STRICKLER J H, WEBB W W. Two-photon laser scanning fluorescence microscopy [J]. *Science*, 1990, **248**(4951): 73-76.
- [110] ZIPFEL W R, WILLIAMS R M, WEBB W W. Nonlinear magic: multiphoton microscopy in the biosciences [J]. *Nature Biotechnology*, 2003, **21**(11): 1369-1377.
- [111] XU C, WEBB W W. Measurement of two-photon excitation cross sections of molecular fluorophores with data from 690 to 1050 nm [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1996, **13**(3): 481-491.
- [112] SAKADŽIĆ S, DEMIRBAS U, MEMPEL T R, *et al.* Multi-photon microscopy with a low-cost and highly efficient Cr:LiCAF laser [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(25): 20848-20863.