

基于腔内级联变频的 0.63 μm 波段多波长激光器

陈海伟¹, 黄海涛^{1,2*}, 王石强¹, 沈德元^{1,2}

¹江苏师范大学物理与电子工程学院, 江苏 徐州 221116;

²江苏师范大学江苏省先进激光技术与新兴产业协同创新中心, 江苏 徐州 221116

摘要 设计出一种基于级联非线性频率变换的 634, 644, 655 nm 多波长激光器。该复合变频过程由磷酸钛氧钾 (KTP) 和砷酸钛氧钾 (KTA) 晶体共同完成。首先由沿 x 轴切割的 KTP 晶体的光参量振荡将波长为 1064 nm 的激光变频为 1572 nm, 然后基于 $(\theta=90^\circ, \varphi=20.9^\circ)$ 切割 KTA 晶体完成 1064 nm 与 1572 nm 的和频过程, 获得波长为 634 nm 的激光输出, 进一步利用前述沿 x 轴切割 KTP 晶体的拉曼变频, 将 634 nm 激光变频为 644 nm 的一阶拉曼光及 655 nm 的二阶拉曼光, 实现 634, 644, 655 nm 多波长激光同时输出。该复合变频多波长激光器的最大平均输出功率为 1.7 W, 相应的脉冲宽度为 19.3 ns, 重复频率为 6 kHz。

关键词 激光器; 级联非线性光学频率变换; 多波长激光器; KTiOPO_4 晶体; KTiOAsO_4 晶体

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0801003

Multi-Wavelength Laser at Waveband of 0.63 μm Based on Cascaded Intracavity Frequency Conversion

Chen Haiwei¹, Huang Haitao^{1,2*}, Wang Shiqiang¹, Shen Deyuan^{1,2}

¹School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

²Jiangsu Provincial Collaborative Innovation center of Advanced Laser Technology and Emerging Industry, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China

Abstract In this study, we describe a multi-wavelength laser at wavelengths of 634, 644, and 655 nm based on cascaded nonlinear frequency conversion. The cascaded frequency conversion process is jointly performed using the KTiOPO_4 (KTP) and KTiOAsO_4 (KTA) crystals. First, optical parametric oscillation is conducted in an x -cut KTP crystal to convert the 1064-nm laser into a 1572-nm laser. Sum frequency generation is subsequently achieved in a $(\theta=90^\circ$ and $\varphi=20.9^\circ)$ -cut KTA crystal for the sum frequency mixing of 1064 and 1572 nm, generating a 634-nm laser output. Raman frequency conversion is further utilized in the x -cut KTP crystal to convert the 634-nm laser into first-order Raman radiation at 644 nm and second-order Raman radiation at 655 nm, simultaneously achieving multi-wavelength emissions at 634, 644, and 655 nm. The cascaded frequency multi-wavelength laser has a maximum average output power of 1.7 W, a pulse width of 19.3 ns, and a repetition rate of 6 kHz.

Key words lasers; cascaded nonlinear optical frequency conversion; multi-wavelength laser; KTiOPO_4 crystal; KTiOAsO_4 crystal

OCIS codes 140.3460; 140.3550; 190.4223; 190.4410

1 引 言

红光激光器在高分辨率激光打印、激光全色显示以及医学治疗等领域具有良好的应用前景, 如光动力疗法的关键因素之一就是获得波长与光敏剂吸收峰相匹配的激光光源^[1-2]。目前常用的光敏剂(如

原卟啉^[3]、5-氨基酮戊酸^[4])能够强烈吸收波长为 635 nm 的光, 采用该波段激光可以保证足够的组织穿透深度和治疗深度^[5-6]。目前获得该波段激光的方式主要有三种, 即使用掺 Pr^{3+} 红光激光器、红光半导体激光器以及非线性光学频率变换。2013 年, 王凤娟等^[7]以 InGaN 为抽运源, 利用 $\text{Pr}:\text{YLF}$ 激光

收稿日期: 2019-03-07; 修回日期: 2019-03-26; 录用日期: 2019-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(61875077)

* E-mail: hht840211@163.com

晶体获得了640 nm 的红光输出。目前掺 Pr³⁺ 红光激光器的输出功率较低,并且掺 Pr³⁺ 激光材料的荧光谱覆盖 480~720 nm 波段,需要选频以实现特定波段的红光输出^[8-9]。2018 年,朱振等^[10]采用生长出的 AlGaInP 材料,设计出一种大功率的 640 nm 红光半导体激光器,该类激光器存在输出功率不高、温度特性差等问题。

通过非线性光学频率变换的方式将成熟的近红外激光变换至红光波段,是获得高功率、高光束质量红光相干光源的简便且有效的技术手段。1999 年,Jaques 等^[11]设计出一种 Nd³⁺:YAl₃(BO₃)₄ 晶体自倍频的红光激光器,实现了功率为 1 mW 的 669 nm 红光输出。2007 年,Sarrouf 等^[12]报道了一种二极管抽运 Nd:YLF 的红光激光器,采用具有温度调谐周期极化的 KTiOPO₄,实现了功率为 0.92 W 的 656~658 nm 单频可调谐激光输出。2012 年,Chen 等^[13]采用半导体激光器(LD)侧抽运 Nd:YAG 和声光调 Q 技术,在重复频率为 11.5 kHz 时,获得输出功率为 1.0 W 的 660 nm 的红光。本文提出一种基于光参量振荡(OPO)、和频(SFG)及受激拉曼散射(SRS)的新型级联非线性变频方案,由磷酸钛氧钾(KTiOPO₄,KTP)和砷酸钛氧钾(KTiOAsO₄,KTA)两块晶体共同完成复合变频,将 1064 nm 基频光变频至 634 nm 波段。首先,在沿 *x* 轴切割 KTP 晶体的 OPO 过程中将 1064 nm 激光变频为 1572 nm;然后根据($\theta=90^\circ, \varphi=20.9^\circ$)(其中 θ 为入射光与晶体 *z* 轴的夹角, φ 入射光在晶体 *xy* 平面的投影与 *x* 轴夹角)切割 KTA 晶体,完成 1064 nm 与 1572 nm 激光的和频过程,获得 634 nm 的激光输

出,进一步利用前述沿 *x* 轴切割 KTP 晶体的 SRS 效应,将 634 nm 激光变频为 644 nm 的一阶拉曼光及 655 nm 的二阶拉曼光,从而实现 634 nm、644 nm、655 nm 多波长激光同时输出,获得的最大平均输出功率为 1.7 W,对应的脉冲宽度为 19.3 ns。与文献[11-13]报道的单波长输出红光激光器相比,该级联变频多波长激光器具有 634 nm、644 nm 和 655 nm 多波长同时输出特性,且输出波长可调控。由于 OPO 及 SRS 的联合脉冲压窄效应,输出红光的脉冲宽度只有 19.3 ns,相应峰值功率达到 14.7 kW。此外,所设计的级联变频多波长激光器具有结构紧凑、性价比高特点^[14],三波长红光也可为阳离子卟啉衍生物^[15]、新型亚甲蓝^[16]等多组分光敏剂治疗方案提供 620~645 nm 和 655 nm 相干红光光源。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。整个谐振腔由输入镜 M1、声光(AO)Q 开关、Nd:YAG 模块、中间镜 M2、KTP 晶体、KTA 晶体和输出镜 M3 组成,且由 M1 与 M3 构成的整个谐振腔的长度为 195 mm,M1 与 M2 之间的长度为 155 mm,M2 与 M3 之间的长度为 40 mm。M1 为平凹镜,凹面曲率半径为 1000 mm,镀有 1064 nm 高反膜(反射率 $R > 99.8\%$);声光 Q 开关位于 M1 与 Nd:YAG 模块之间,由中国电子科技集团公司第二十六研究所生产(型号为 QSG40),射频频率为 27 MHz,射频功率为 50 W,重复频率在 1~50 kHz 范围内连续可调,对 1064 nm 激光的静态透过率大于 97%。

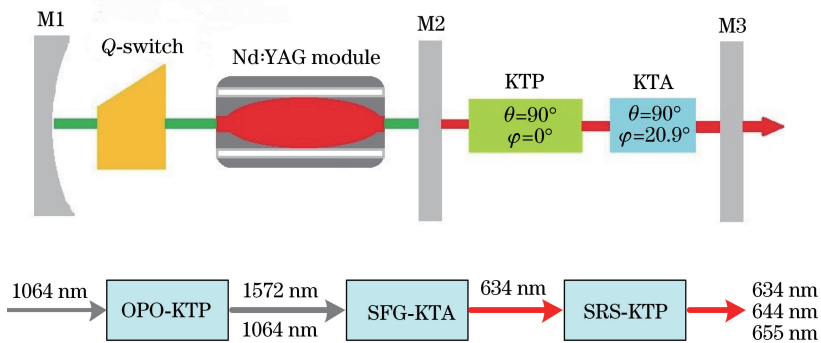


图 1 实验装置图及级联非线性变频原理图

Fig. 1 Experimental device diagram and cascaded nonlinear frequency conversion schematic

Nd:YAG 模块所用的 Nd:YAG 晶体棒的直径为 3 mm,长度为 65 mm,掺杂浓度(原子数分数,下同)为 1.1%,端面镀有 1064 nm 增透膜。Nd:YAG

晶体棒置于石英玻璃管中,并直接通水冷却;三组 LD bar 条对称环绕在 Nd:YAG 晶体棒周围,LD 的中心波长为 808 nm;M2 为平面镜,朝向 KTP 晶体

的一面镀 1500~1600 nm 及 600~650 nm 波段高反膜(反射率 $R > 99.8\%$),同时对 1064 nm 波长的激光具有高透射作用(透射率 $T > 98\%$),另一面镀 1064 nm 减反膜。KTP 晶体的切割方式为沿 x 轴切割,尺寸为 4 mm×4 mm×20 mm,且 KTP 晶体端面镀有 1064 nm 和 1500~1600 nm 增透膜;KTA 晶体的相位匹配角为($\theta = 90^\circ$, $\varphi = 20.9^\circ$),尺寸为 4 mm×4 mm×8 mm,且 KTA 晶体端面镀有 1064 nm 和 1500~1600 nm 增透膜。KTP 晶体和 KTA 晶体侧面均采用钢薄包裹,分别置于铜块中,用 20 °C 恒温水进行冷却。M3 为平面镜,对 1500~1600 nm 及 1064 nm 波长的激光具有高反射作用(反射率 $R > 99.5\%$),同时对 600~650 nm 波段的光有高透射作用(透射率 $T > 95\%$)。

3 实验结果和讨论

实验中测量了该级联变频激光器的输出光谱,所用仪器为美国 Ocean Optics 公司生产的 HR4000CG-UV-NIR 光谱仪。实验发现输出光谱随输出功率呈现区间化现象,当平均输出功率小于 0.6 W 时,输出波长为 634 nm,测量结果如图 2 所示。该光谱由 1572 nm 激光与 1064 nm 激光通过 KTA 晶体和频产生,1572 nm 激光则由基于非临界相位匹配 KTP 晶体的 OPO 过程产生。需要说明的是,在平均输出功率的测量过程中,在腔外又放置了一个输出镜 M3,以进一步滤除 1064 nm 基频光和 1572 nm OPO 信号光。此外,根据各光谱强度和所测得的多波长红光功率,可以估算出在不同平均输出功率下,634,644,655 nm 激光的平均输出功率。当平均输出功率为 0.6 W 时,只输出 634 nm 的光波;当平均输出功率为 0.9 W 时,3 个波长激光的输出功率分别为 0.45,0.34,0.11 W;当平均输出功率为 1.7 W 时,3 个波长激光的输出功率分别为 0.22,0.75,0.73 W。

平均输出功率及脉冲宽度是评价激光器性能的重要指标。图 3 所示为平均输出功率及脉冲宽度随 LD 抽运功率的变化情况。由于 630 nm 附近的多波长之间的距离很小,所以很难准确测量单个波长的平均输出功率。因此,图 3 所示的平均输出功率为多波长总平均输出功率,最大平均输出功率为 1.7 W。随着抽运功率的增加,脉冲宽度逐渐减小,最小脉冲宽度为 19.3 ns。重复频率对腔内级联变频的输出功率会产生较大影响,在 LD 抽运功率一定的情况下,重复频率增大,将导致红光的输出功率

升高,而当重复频率增加到一定程度后,继续增大重复频率,则会导致红光输出功率减小,因此,腔内级联变频过程中存在一个最佳重复频率。实验发现,该腔内级联变频过程的最佳重复频率为 6 kHz。

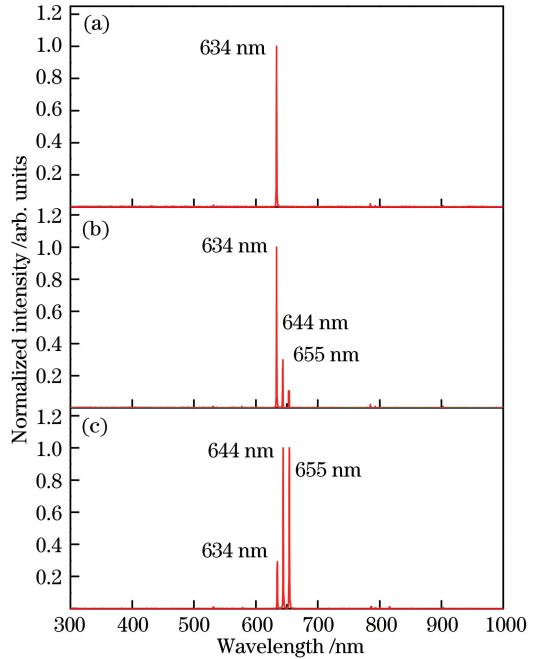


图 2 LD 抽运功率变化的输出光谱。(a)输出功率为 0.6 W 的光谱图;(b)输出功率为 0.9 W 的光谱图;(c)输出功率为 1.7 W 的光谱图

Fig. 2 Output spectra of LD pump power variation. (a) Spectrum of 0.6 W output power; (b) spectrum of 0.9 W output power; (c) spectrum of 1.7 W output power

图 4 所示为脉冲能量和峰值功率随 LD 抽运功率的变化曲线。由图 4 可知,脉冲能量和峰值功率随着 LD 抽运功率的增加而增大。当抽运功率达到 153 W 时,即平均输出功率达到最大值时,脉冲能量和峰值功率均达到最大值,且它们的最大值分别为 0.28 mJ、14.7 W。

当平均输出功率大于 0.6 W 时,输出光谱中出现新的光谱成份——644 nm 和 655 nm 激光,由本实验的测量结果可知,634 nm 激光在输出光谱中仍占据主导地位。从图 5 所示的 KTP 晶体的拉曼光谱可以看出,在 X(ZZ)X(抽运光沿 x 方向入射,偏振方向沿 z 方向,拉曼光沿 x 方向出射,偏振方向沿 z 方向)结构中,最强的拉曼频移为 267 cm^{-1} ,对应着 $[\text{TiO}_6]$ 八面体的键角弯曲振动。644 nm、655 nm 分别对应沿 x 轴切割的 KTP 晶体的一阶、二阶拉曼光。图 2 所示的输出光谱中未出现 1096 nm 的光谱成分,表明 1064 nm 基频光未激发

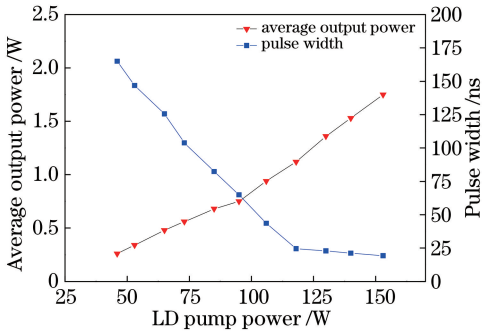


图 3 平均输出功率和脉冲宽度随 LD 抽运功率的变化曲线

Fig. 3 Average output power and pulse width as a functions of LD pump power

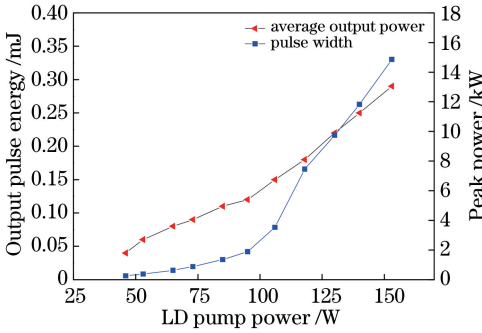


图 4 脉冲能量和峰值功率随 LD 抽运功率的变化曲线

Fig. 4 Pulse energy and peak power as a function of LD pump power

KTP 晶体的受激拉曼散射效应。随着平均功率的增大,拉曼光的强度也随之增强。当平均功率达到 1.7 W 时,644 nm 和 655 nm 光波在输出光谱中占据主导地位。这可能是因为:KTA 晶体的拉曼频移^[17]为 234 cm^{-1} 、 671 cm^{-1} ,若 KTA 晶体参与了 SRS 过程,将会产生波长分别为 643, 652, 662, 672 nm 的光波,由图 2 所示的光谱可知,只有 KTP 晶体参与了 SRS 过程。根据本课题组基于单块 KTP 晶体腔内光参量振荡和受激拉曼散射变频的研究工作^[18]可知,虽然输出镜在 1572 nm 处的透过率远大于 1096 nm 处的透过率,但 1064 nm 基频光依然优先激发 KTP 晶体的光参量振荡变频过程,这是因为光参量振荡利用的是晶体的二阶非线性光学效应,而受激拉曼散射为三阶非线性光学变频过程。本研究所使用的输出镜对 1572 nm OPO 信号光高反,对红光和拉曼变频光高透,故 OPO 的振荡阈值低于 SRS 的阈值。

本实验中,使用 Ophir Optronics 公司生产的型号为 SP90421 的激光光束轮廓分析仪相机进行红光横模分布的采集,结果如图 6 所示。可以看到,红光光束呈近似高斯分布。

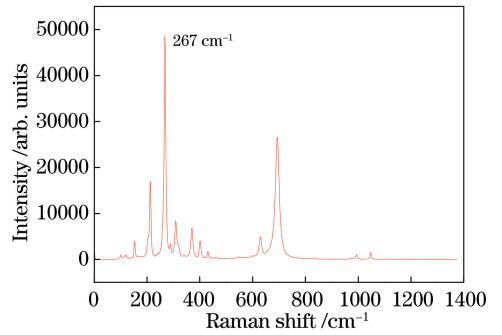


图 5 KTP 晶体在 X(ZZ)X 结构下的自发拉曼散射光谱

Fig. 5 Spontaneous Raman scattering spectrum of KTP crystal with X(ZZ)X structure

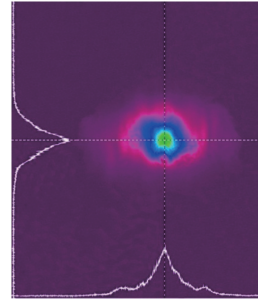


图 6 红光的横模分布

Fig. 6 Transverse mode distribution of red laser

图 7 为不同波段的脉冲波形图,使用的带宽为 1 GHz 的示波器是由 KEYSIGHT 公司生产的,其型号为 DSO-S 104A,探测器型号为 DET10A/M (Si Biased Detector 200~1100 nm)。图 7(a)~(c)分别为红光脉冲波形图、1064 nm 基频光脉冲波形图、1572 nm OPO 信号光脉冲波形图。图 7(a)所示的红光脉冲宽度为 19.3 ns,脉冲序列重复频率为 6 kHz,且整个过程产生了不对称的脉冲,这主要是因为 OPO 是典型的腔体倾倒过程^[19],它产生了短于 1064 nm 脉冲宽度的 1572 nm 脉冲,该脉冲会对 634 nm 脉冲和随后的斯托克斯脉冲在时间上进行调制。

4 结 论

提出一种从 1064 nm 抽运光经过级联变频产生波长约为 634 nm 可见光的新级联 NOFC 方案,使用 KTP 晶体、KTA 晶体来设计级联变换,通过 KTP-OPO、KTA-SFG 和 KTP-SRS 过程实现了 634,644,655 nm 多波长输出。所设计级联变频器的最大平均输出功率为 1.7 W,最小脉冲宽度为 19.3 ns,最大脉冲峰值功率为 14.7 kW。通过商业非线性光学晶体的组合,可使基频光的波长进一步变换为超出单个非线性变频器波长范围的波长。这

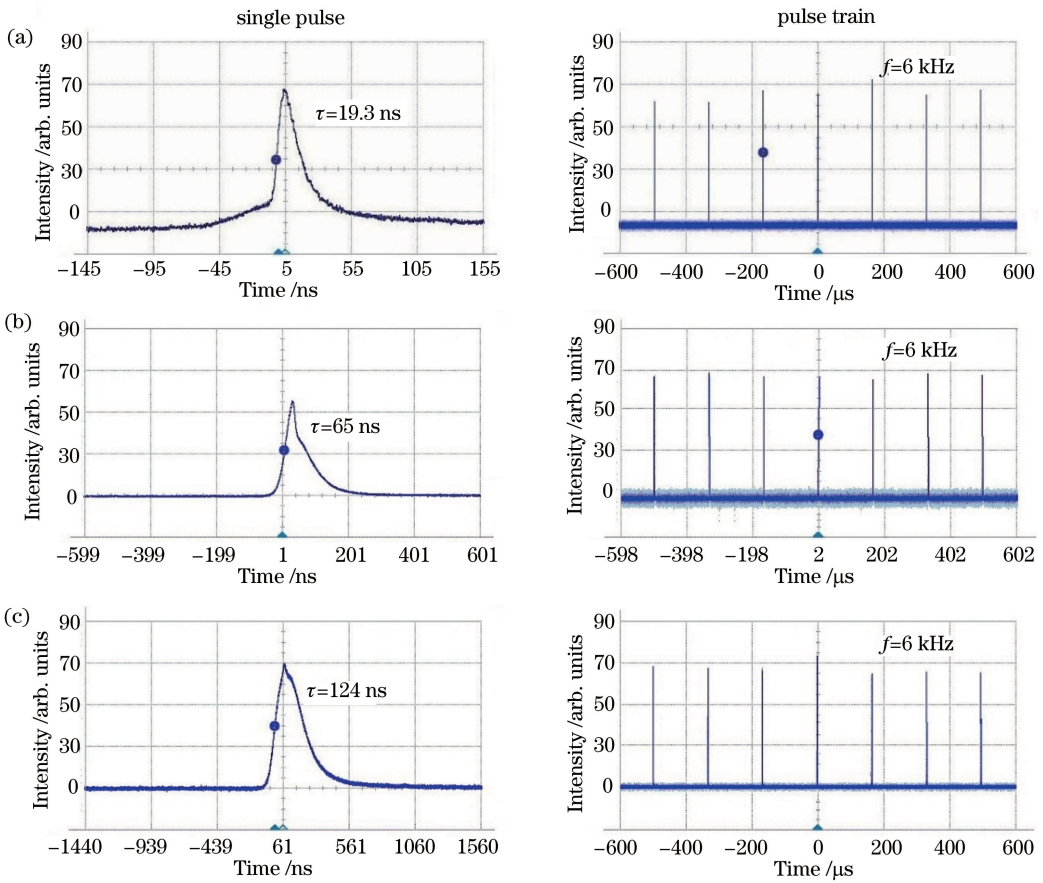


图 7 不同输出波长单脉冲和脉冲串的波形图。(a)红光脉冲波形；
(b) 1572 nm OPO 信号光脉冲波形；(c) 1064 nm 基频光脉冲波形

Fig. 7 Waveforms of single pulses and pluse train with different output wavelengths. (a) Red laser waveforms;
(b) pulse waveforms of OPO signal at 1572 nm; (c) pulse waveforms of fundamental wave at 1064 nm

些参数使这种相干红光源在光动力治疗中更具有实际适用性,可用于红外遥感、环境监测和医学治疗等领域。

参 考 文 献

[1] Wang H J, Shrestha R, Zhang Y. Encapsulation of photosensitizers and upconversion nanocrystals in lipid micelles for photodynamic therapy[J]. Particle & Particle Systems Characterization, 2014, 31(2): 228-235.

[2] Wu Z C, Zhang X L. 670 nm single wavelength Nd:YAG ceramic laser[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 321/322/323/324: 482-485.

[3] Milanetto M C, Imasato H, Perussi J R. The importance of protoporphyrin IX efflux for ALA-PDT dosimetry[J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(8): 611-615.

[4] Marcus S L, Sobel R S, Golub A L, et al. Photodynamic therapy (PDT) and photodiagnosis (PD) using endogenous photosensitization induced by 5-aminolevulinic acid (ALA): current clinical and

development status [J]. Journal of Clinical Laser Medicine & Surgery, 1996, 14(2): 59-66.

[5] Zhou B R, Zhang L C, Permatasari F, et al. ALA-PDT elicits oxidative damage and apoptosis in UVB-induced premature senescence of human skin fibroblasts [J]. Photodiagnosis and Photodynamic Therapy, 2016, 14: 47-56.

[6] Semyachkina-Glushkovskaya O, Kurths J, Borisova E, et al. Photodynamic opening of blood-brain barrier [J]. Biomedical Optics Express, 2017, 8(11): 5040-5048.

[7] Wang F J, Liu Z, Xu B, et al. Blue laser diode pumped Pr³⁺:YLF visible lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(12): 1202002.
王凤娟, 刘哲, 徐斌, 等. 蓝光激光二极管抽运 Pr³⁺:YLF 红绿可见光激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1202002.

[8] Gamaleia N F, Lisnyak I A, Shishko E D, et al. Chronobiological approaches to antiangiogenic photodynamic therapy of tumors: the first experimental evaluation[J]. Experimental Oncology,

- 2012, 34(4): 364-366.
- [9] Brahmachary K, Rajesh D, Babu S, *et al.* Investigations on spectroscopic properties of Pr^{3+} and Nd^{3+} doped zinc-alumino-sodium-phosphate (ZANP) glasses [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2014, 1064: 6-14.
- [10] Zhu Z, Xiao C F, Xia W, *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.
- [11] Jaque D, Capmany J, García Solé J. Continuous wave laser radiation at 669 nm from a self-frequency-doubled laser of $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4:\text{Nd}^{3+}$ [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 74(13): 1788-1790.
- [12] Sarrouf R, Sousa V, Badr T, *et al.* Watt-level single-frequency tunable $\text{Nd}:\text{YLF}$ /periodically poled KTiOPO_4 red laser [J]. *Optics Letters*, 2007, 32 (18): 2732-2734.
- [13] Chen X Y, Bai J T, Ren Z Y, *et al.* Red, green and infrared three-wavelength lasers generated from LD side-pumped $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ crystal [J]. *Optik*, 2012, 123(14): 1245-1248.
- [14] Cui J F, Wang D, Zhang Y N, *et al.* LD side-pumped $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 532 nm quasi-continuous green laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(4): 041402.
崔建丰, 王迪, 张亚男, 等. LD 侧面抽运 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 532 nm 准连续绿光激光器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(4): 041402.
- [15] Taşlı H, Akbıyık A, Topaloğlu N, *et al.* Photodynamic antimicrobial activity of new porphyrin derivatives against methicillin resistant staphylococcus aureus [J]. *Journal of Microbiology*, 2018, 56(11): 828-837.
- [16] López-Chicón P, Gullías Ò, Nonell S, *et al.* *In vitro* antimicrobial photodynamic therapy against trichophyton mentagrophytes using new methylene blue as the photosensitizer [J]. *Actas Dermo-Sifiliográficas (English Edition)*, 2016, 107(9): 765-770.
- [17] Duan Y M, Zhu H Y, Wang H Y, *et al.* Comparison of 1.15 μm $\text{Nd}:\text{YAG}/\text{KTA}$ Raman lasers with 234 and 671 cm^{-1} shifts [J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 5565-5571.
- [18] Huang H T, He J L, Liu S D, *et al.* Efficient generation of 1096 nm and 1572 nm by simultaneous stimulated Raman scattering and optical parametric oscillation in one KTiOPO_4 crystal [J]. *Applied Physics B*, 2011, 103(1): 129-135.
- [19] Potma E O, de Boeij W P, Pshenichnikov M S, *et al.* 30-fs, cavity-dumped optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(22): 1763-1765.