光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021061301

高功率 LD 侧面单向泵浦激光模块的理论研究

王小发*，曹腾飞，方泽鹏

（重庆邮电大学 光电工程学院，重庆 400065）

摘　要： 构建了一种激光二极管(LD)侧面单向泵浦激光模块的理论模型。综合光线追迹和有限元仿真方法，推导了该模型下泵浦效率及晶体内光场分布均匀性的计算公式，数值分析了 LD 切向位移量、径向角度偏离度及晶体吸收系数等因素对泵浦效率和光场分布均匀性的影响。研究结果表明：随着吸收系数的增加，光场分布的均匀性呈现逐渐下降趋势；通过优化 LD 切向位移量和径向角度偏离量，仿真获得了高达 93%的泵浦效率。研究成果对高功率 LD 侧面单向泵浦激光模块的优化设计和实验研究具有一定的参考价值。

关键词： 光线追迹；有限元法；光场分布；泵浦效率

中图分类号： TN248.1　　**文章编号：** 1001－5868(2021)05－0641－05

Theoretical Study of High Power LD Unidirectional Side-Pumped Laser Module

WANG Xiaofa, CAO Tengfei, FANG Zepeng

(College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN)

Abstract: In this paper, a theoretical model on LD unidirectional side-pumped laser module has been constructed. Combining ray tracing and finite element simulation method, these calculation formulae on pump efficiency and distribution uniformity of light field in the crystal were derived. The effects of LD tangential displacement, radial angle deviation and crystal absorption coefficient on the pump efficiency and the uniform distribution of pump light in the crystal were also numerically analyzed. The results show that, with the increase of absorption coefficient, the distribution uniformity of light field in the crystal will decrease gradually. Maximum pump efficiency up to 93% can be achieved by optimizing the deviation of LD displacement and radial angle. The research results have certain reference value for optimization design and experimental study of the high power LD unidirectional side-pumped laser module.

Key words: ray tracing; finite element method; light field distribution; pump efficiency

0　引言

全固态激光器因其具有结构紧凑、转换效率高、激光稳定性好等诸多优点，在激光测距[1-2]、激光加工[3-4]、激光医疗[5]等领域得到广泛应用。作为全固态激光器的核心器件，激光泵浦模块目前按泵浦方式可分为端面泵浦[6-7]和侧面泵浦[8-10]两种，侧面泵浦相对端面泵浦而言泵浦面积更大，可以存储更多能量，因而有利于高功率激光输出[11]。近二十年来，探索更高泵浦效率、更高光场分布均匀性的侧面泵浦方式，成为高功率全固态激光器领域重要的研究方向。在激光二极管(Laser Diode，LD)侧泵模块中，影响泵浦效率和光场分布均匀性的因素很多。2009 年，陈薪羽等[12]建立了激光二极管阵列(Laser Diode Array，LDA)侧面多向泵浦激光模块的仿真模型，分析了 LDA 排列方式、光束束腰半径、晶体吸收系数和泵浦方向数量等因素对光场分布的影响。2014 年，闫立华等[13]基于侧面三向泵浦模型分

收稿日期：2021－06－13.

基金项目：重庆市自然科学基金项目(cstc2018jcyjAX0585，cstc2017zdzxX0011).

* **通信作者：**王小发

析了 LDA 位置或角度偏差等因素对光场分布均匀性的影响。同年，Liu 等[14]建立了侧面五向 LDA 泵浦激光晶体的理论模型，分析了晶体棒特性、泵浦结构和泵浦光半径等因素对光场分布均匀性的影响，并通过调整 LDA 到晶体表面距离及 LDA 阵列间距，优化了光场分布的均匀性。2018 年，李耀等[15]分析了 LDA 侧面三向泵浦 Nd：YAG 晶体模型中 bar 条个数、间隔、倾斜程度等因素分别对泵浦效率及光场分布均匀性的影响，通过优化参数设置获得了最优的泵浦效果。目前，虽然在 LD 侧泵激光模型的优化方面已取得了一些成果，但在泵浦模型的紧凑性及泵浦效果影响因素等方面的研究还存在一些不足，如泵浦模型体积大、散热结构复杂，不利于紧凑型高功率激光器设计；采用控制变量法分析泵浦效果的相关影响因素，未考虑因素间相互影响，优化后泵浦效率一般不超过 90%。因此，本文设计了一种体积小、散热结构简单的 LD 侧面单向泵浦激光模块，构建了相应的仿真模型，综合光线追迹和有限元分析两种方法的优点，推导了该模型的泵浦效率及光场分布均匀性的计算公式，并分析了 LD 切向位移量、径向角度偏离度及晶体吸收系数对该结构泵浦效率及光场分布均匀性的影响。本文的研究结果对高功率 LD 侧面单向泵浦激光模块的结构优化设计和实验研究具有一定的参考价值。

1 侧泵激光模型

1.1 模块结构

图 1 为 LD 侧面泵浦激光模块示意图。图中基座起散热和支撑泵浦结构的作用，包含固定 LD 的平台和固定晶体棒的腔体。从模型剖面看，Nd：YAG 晶体与基座腔体呈同心圆关系放置，并由紫外胶（型号：NOA61）固定。LD 呈线形排列并放置于 Nd：YAG晶体两侧。狭缝为泵浦光入射位置，水平分布于晶体棒腔体两侧。泵浦过程中产生的热量通过基座传导至底部冷却装置。绝缘垫片隔离 LD 和基座并用于微调 LD 摆放的倾角。

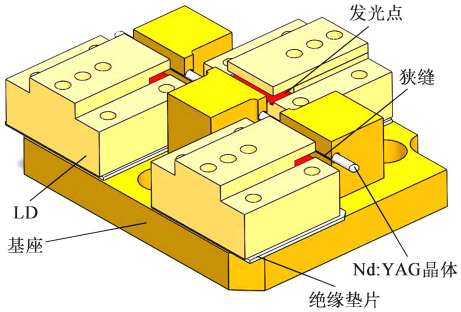


图 1 LD 侧面泵浦激光模块示意图

1.2 理论模型

基于上述激光模块构建了侧面单向泵浦理论模型，从 LD 发光点出射的 808 nm 泵浦光在晶体棒轴向方向呈线形排布，泵浦光为近高斯光束，其快轴发散角为 45°。因为发光点宽度与狭缝宽度相比很小，所以从剖面来看 LD 可视为点光源。在模型中，泵浦光被看作离散携带能量的光线，光线携带能量根据传输方向变化呈高斯分布。

图 2 为 LD 侧面单向泵浦理论模型及泵浦光在发散角内的光线传播轨迹图。从图中可以看出，以晶体棒横截面圆心 O 为原点建立坐标系，光线轨迹与 x 轴沿逆时针夹角为光线传播角度。模型包含空气、固化后的紫外胶以及 Nd：YAG 晶体三种介质，折射率分别为 n_1，n_2 和 n_3。s 为实际发光点，s'为仿真等效发光点，通过发光点等效可以将所有光线由空气入射紫外胶简化为一次等效发光点计算。s 与 s'的关系为

$$\begin{cases} n_1 \sin\alpha_1 = n_2 \sin\theta_1 \\ (x_{R_1} - x_s)\tan\alpha_1 = (x_{R_1} - x_{s'})\tan\theta_1 \end{cases} \tag{1}$$

式中，α_1 和 θ_1 分别为光线由 n_1 入射至 n_2 的入射角和折射角。

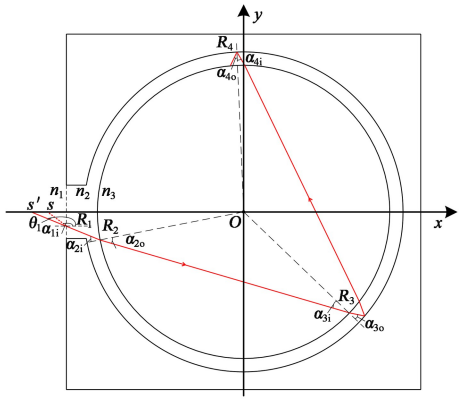


图 2 LD 侧面单向泵浦理论模型

为简化光线传输计算过程，采用临界面交点属性替代光线方程记录光线轨迹，点属性表示为

$$R_j = (x_j, y_j, \theta_j, I_j) \tag{2}$$

式中，$j=1,2,3,\cdots$，(x_j, y_j)为点 R_j 坐标，θ_j 为传播方向，I_j 为光线在该点处携带的能量。

由折射定理可知，任一点 R_j 折射角为

$$\alpha_{jo} = \arcsin\left(\frac{n_2 \sin\alpha_{ji}}{n_3}\right) \tag{3}$$

式中，α_{ji} 和 α_{jo} 分别为 R_j 点入射角和折射角。

光疏介质至光密介质折射，折射角小于入射角，折射光线相较入射光线更靠近法线，则该类型临界面交点的传播角度可以通过条件判断替代方程计算得出，角度为

$$\theta_j=\begin{cases}(\theta_{j-1}-\Delta\alpha_j+2\pi)\%2\pi,0\leqslant\theta_{j-1}\leqslant\dfrac{\pi}{2},\\ \qquad\left(\gamma<\theta_{j-1}\mid\gamma>\theta_{j-1}+\dfrac{3\pi}{2}\right)\\ \theta_{j-1}+\Delta\alpha_j,0\leqslant\theta_{j-1}\leqslant\dfrac{\pi}{2},\gamma<\theta_{j-1}+\dfrac{\pi}{2}\\ \theta_{j-1}+\Delta\alpha_j,\dfrac{\pi}{2}\leqslant\theta_{j-1}\leqslant\dfrac{3\pi}{2},\gamma<\theta_{j-1}\\ \theta_{j-1}-\Delta\alpha_j,\dfrac{\pi}{2}\leqslant\theta_{j-1}\leqslant\dfrac{3\pi}{2},\gamma\geqslant\theta_{j-1}\\ (\theta_{j-1}+\Delta\alpha_j)\%2\pi,\dfrac{3\pi}{2}\leqslant\theta_{j-1}\leqslant2\pi,\\ \qquad\left(\gamma>\theta_{j-1}\mid\gamma<\left(\theta_{j-1}+\dfrac{\pi}{2}\right)\%2\pi\right)\\ \theta_{j-1}-\Delta\alpha_j,\dfrac{3\pi}{2}\leqslant\theta_{j-1}\leqslant2\pi,\gamma<\theta_{j-1}\end{cases}\tag{4}$$

式中，γ 为该点法线角度，$\Delta\alpha_j=|\alpha_{ji}-\alpha_{jo}|$ 为入射和出射角差的绝对值。光密介质至光疏介质折射点的传播角度与之相反。

根据反射定理可知腔面反射点 R_j 传播角度 θ_j 为

$$\theta_j=(2\gamma-\theta_{j-1}+\pi)\%2\pi\tag{5}$$

根据晶体棒吸收公式及腔面反射损耗可将任一点 R_j 携带能量 I_j 表示为

$$I_j=\begin{cases}I_{j-1}(1-\mathrm{e}^{-ad}), & R_{\mathrm{exit}}\\ I_{j-1}(1-P_{\mathrm{w}}), & R_{\mathrm{ref}}\\ I_{j-1}, & \mathrm{other}\end{cases}\tag{6}$$

式中，α 为晶体吸收系数，d 为光线在晶体内的传输距离，P_{w} 为腔体内壁的反射损耗，R_{exit} 为光线出射晶体点，R_{ref} 为腔内壁反射点。

晶体内部能量分布通过有限元法处理，用网格将晶体进行分割，累加每个网格吸收能量，得到光场分布。如图 3 所示为晶体剖面网格图及网格吸收能量示意图。

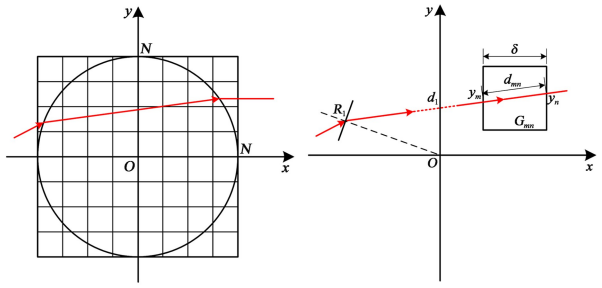
$$I_{mn}=I_{mn}+I_1(\mathrm{e}^{-a(d_1+d_{mn})}-\mathrm{e}^{-ad_1})\tag{7}$$

式中，d_1 为光线从 R_1 传播至 y_{m} 之间的距离，d_{mn} 为光线在网格 G_{mn} 内传播的距离，I_{mn} 为网格 G_{mn} 处吸收的能量。

光场分布的均匀性表示为

$$\delta^2=\frac{\sum\left(I_{mn}-\dfrac{\sum I_{mn}}{N^2-N_{\mathrm{ex}}}\right)^2}{N^2-N_{\mathrm{ex}}}\tag{8}$$

式中，δ_2 为晶体内网格方差，其值越小说明光场分布均匀性越好。N^2 为晶体外接正方形网格总数，N_{ex} 为不包含在晶体内的网格数量。



(a)　晶体剖面网格图　　(b)　网格吸收能量示意图

图 3　晶体剖面网格图及网格吸收能量示意图

仿真模型相关参数如表 1 所示，考虑到 YAG 晶体钕离子浓度掺杂过高可能导致的荧光猝灭效应，取钕离子掺杂浓度在 0.6at%～1.0at%之间的晶体吸收系数作为本研究的条件。

表 1　模型相关参数

参数	侧面单向泵浦模型
晶体棒直径/mm	1.65
晶体吸收系数 a/mm^{-1}	0.10/0.18/0.24/0.33
晶体棒折射率 n_3	1.82
紫外胶折射率 n_2	1.56
泵浦光峰值功率/W	1
泵浦光快轴发散角/(°)	45
内壁反射损耗	0.02
狭缝宽度/mm	0.3
光源横轴坐标/mm	−0.2

2　结果和讨论

2.1　泵浦效率

理论模型中影响泵浦效率的因素主要有两方面：一是入射腔内的泵浦光功率与总泵浦功率之比；二是泵浦光入射腔内经过多次反射后由狭缝出射的光功率与总泵浦功率之比。图 4 描述了 $a=0.33$ mm^{-1} 时，泵浦效率随 LD 切向位移量 y 及径向角度偏离度 θ 的变化关系图。在图 4 中标记了三个区域(分别为Ⅰ,Ⅱ和Ⅲ)和两条直线(A 和 B)。区域Ⅰ中泵浦效率随 y 和 θ 增加，呈现下降趋势，其原因在于随着 y 和 θ 增加，泵浦光被腔体外壁遮挡，能够入射腔内的泵浦光逐渐减少，腔内泵浦功率下降，导致泵浦效率迅速下降，斜率 $k_{\mathrm{A}}=-0.004$ 的直线 A 则描述了该区域

中 y 和 θ 影响系数(泵浦效率的变化量与引起此变化的参量变化量之比)的比值;区域Ⅱ中平均泵浦效率达到 93%,当 y 和 θ 取值范围在此区间时,由狭缝出射的功率能够取得最小值;与区域Ⅱ相比,区域Ⅲ中泵浦效率有所下降,平均泵浦效率在 90%左右,该区域中狭缝出射的功率能够取得最大值,直线 B 为区域Ⅱ和Ⅲ的分界线,该直线斜率 $k_B=-0.028$,表示 y 和 θ 影响系数的比值;在泵浦光能够完全入射腔内的区域中,区域Ⅱ和区域Ⅲ呈周期性分布。

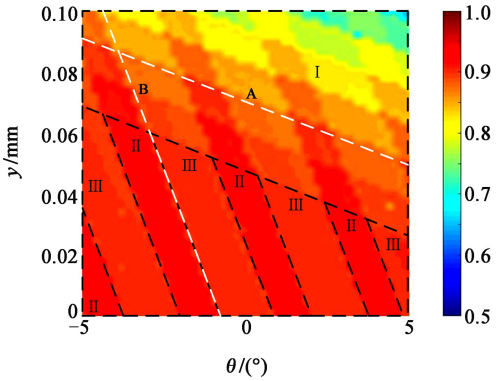


图 4 泵浦效率随 LD 切向位移量 y 和径向角度偏离度 θ 的变化关系图

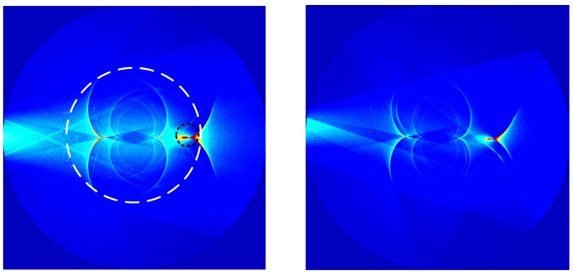
表 2 列出 a 分别为 0.10, 0.18, 0.24 和 0.33 mm^{-1} 时图 4 中相关区域的泵浦效率均值。吸收系数决定了光线在晶体中传输时被吸收光能量的比例,由表 2 的 4 种吸收系数条件下泵浦效率变化关系可以得出,随着吸收系数增加,整体泵浦效率随之增加。

表 2 图 4 中相关区域泵浦效率均值

区域	a/mm^{-1}			
	0.10	0.18	0.24	0.33
Ⅱ	78%	86%	90%	93%
Ⅲ	70%	81%	86%	90%

2.2 光场分布均匀性

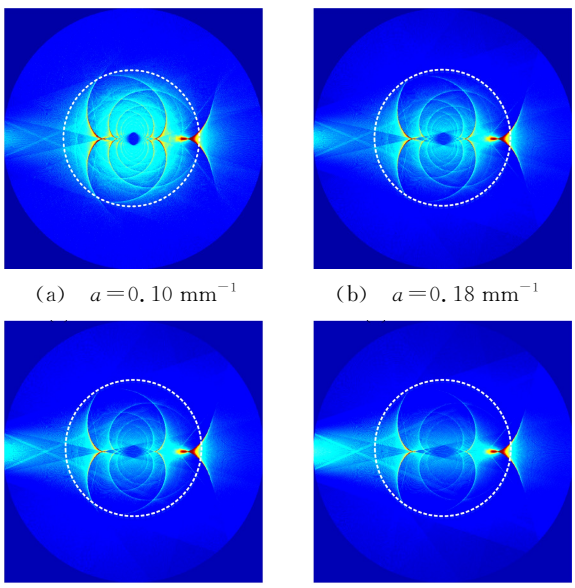
图 5 为吸收系数 $a=0.33\ mm^{-1}$ 时在 LD 切向位移量 y 及径向角度偏离度 θ 两参量空间下的晶体光场分布图。其中图 5(a)为 $y=0$ mm,$\theta=0°$时光场分布情况,方差为 6.21×10^{-8}。光场分布图中的线条是泵浦光在腔内多次反射叠加造成的,黑色虚线标记区域为其中一个泵浦光反射焦点,这些点的产生原因是泵浦光在腔内传输时多次反射聚焦。在上述条件下的光场分布与 Ajer 等[16]仿真及实验得出的光场分布基本一致,证明了本文模型的正确性。图 5(b)为在 $y=0.034$ mm,$\theta=2.8°$时的光场分布情况,方差为 6.63×10^{-8}。对比图 5(a)和图 5(b)可以看出,y 和 θ 发生变化,光场分布中由于泵浦光反射叠加产生的线条同样发生偏移,光场分布均匀性随之改变。



(a) $y=0$ mm,$\theta=0°$ (b) $y=0.034$ mm,$\theta=-2.8°$

图 5 不同 LD 切向位移量及径向角度偏离度条件下光场分布图

图 6 为 LD 切向位移量 y 及径向角度偏离度 θ 不变时在不同吸收系数 a 条件下的光场分布情况。其中(a),(b),(c),(d)分别为 $a=0.10$,0.18,0.24 和 0.33 mm^{-1} 时的光场分布情况,方差分别为 2.04×10^{-8},3.68×10^{-8},4.76×10^{-8} 和 6.21×10^{-8},对比 4 幅图可以看出,由泵浦光在腔内传输时多次反射聚焦形成的焦点不随 a 值变化而变化;对比方差可以看出光场分布的均匀性则随着 a 值增加而逐渐变差,其原因在于随着 a 值增加,晶体吸收能力提升,导致泵浦光在腔内反射次数减少。



(a) $a=0.10\ mm^{-1}$ (b) $a=0.18\ mm^{-1}$

(c) $a=0.24\ mm^{-1}$ (d) $a=0.33\ mm^{-1}$

图 6 不同吸收系数条件下光场分布图

3 结论

本文对高功率 LD 侧面单向泵浦激光模块进行了详细的理论研究。构建了一种 LD 侧面单向泵浦

模型，综合光线追迹和有限元仿真方法，推导了该模型的泵浦效率及光场分布均匀性的计算公式，数值分析了 LD 切向位移量、径向角度偏离度及晶体吸收系数等因素对泵浦效率和光场分布均匀性的影响。研究结果表明：在 LD 切向位移量和径向角度偏离度两参数空间中，泵浦效率在区域Ⅰ中随两参量增加呈线性下降趋势，两参量影响系数比值为－0.004；在区域Ⅱ和区域Ⅲ中分别呈稳定分布，两区域随径向角度偏离度变化呈周期性排布，区域相邻边界处两参量影响系数比值为－0.028。通过优化相关参量，泵浦效率最高达 93%；光场分布的均匀性随晶体吸收系数提高呈逐渐下降趋势。本文研究成果对高功率 LD 侧面泵浦激光模块结构的优化设计和实验研究具有一定参考价值。

参考文献：

[1] 朱飞虎，王　立，郭绍刚，等. 面向非合作目标的大动态范围激光测距系统[J]. 红外与激光工程，2014，43(S1)：8-12.
Zhu Feihu，Wang Li，Guo Shaogang，et al. Large dynamic range laser ranging system for non-cooperative target[J]. Infrared and Laser Engineering，2014，43(S1)：8-12.

[2] 白聪聪，张峻豪，高　畅，等. 基于激光加工的平面型微型超级电容器[J]. 中国激光，2021，48(2)：190-208.
Bai Congcong，Zhang Junhao，Gao Chang，et al. Planar micro-supercapacitor based on laser processing[J]. Chinese J. of Laser，2021，48(2)：190-208.

[3] 陈　亮，刘晓东，刘　静，等. 飞秒激光在石英玻璃表面刻蚀微槽的研究[J]. 光学学报，2020，40(23)：145-151.
Chen Liang，Liu Xiaodong，Liu Jing，et al. Microgroove etching with femtosecond laser on quartz glass surfaces[J]. Acta Optica Sinica，2020，40(23)：145-151.

[4] 郭敏超，王明娣，张胜江，等. FR-4 覆铜板飞秒激光微孔加工工艺研究[J]. 中国激光，2020，47(12)：135-143.
Guo Minchao，Wang Mingdi，Zhang Shengjiang，et al. Techniques for femtosecond laser processing of micro-holes in FR-4 copper clad laminate[J]. Chinese J. of Laser，2020，47(12)：135-143.

[5] 王克璞，赵鹏飞，向　阳，等. 医疗用非相干合成绿光激光器及其光斑匀化研究[J]. 光电子·激光，2019，30(11)：1133-1139.
Wang Kepu，Zhao Pengfei，Xiang Yang，et al. Medical incoherent combined green diode laser and its uniformization of intensity distribution[J]. J. of Optoelectronics · Laser，2019，30(11)：1133-1139.

[6] Liu Jinge，Wen Ya，Li Shuo，et al. Study on LD end-pumped multi-segment bonded Tm ∶ YAG solid-state laser[J]. Optics Communications，2021，480：126452.

[7] Ji Shengzhe，Huang Wenfa，Wang Jiangfeng，et al. LD end-pumped joule-level square-rod Nd ∶ glass laser amplifier with high efficiency[J]. Optics & Laser Technol.，2021，135：106634.

[8] Wang Wei，Zhao Qin，Gao Wenqing，et al. Thermo-optic numerical research on segmented circular LD arrays side-pumping a Nd ∶ YAG laser rod[J]. Appl. Sciences，2020，10(20)：7316.

[9] Wu Rina，Yang Fan，Lu Jiaqi，et al. Research on beam quality improvement method of LD side-pumped acousto-optic Q-switched anisotropic Nd ∶ YLF laser[J]. Optik，2020，207：163848.

[10] Cui Qingzhe，Wei Mengen，Xiong Zhengdong，et al. 100～300 Hz repetition-rate acousto-optic Q-switched 2.79 μm Er ∶ YSGG laser side-pumped by laser-diode[J]. Infrared Physics & Technol.，2019，98：256-259.

[11] Xie Wenjie，Tam S C，Lam Y L，et al. Influence of the thermal effect on the TEM_{00} mode output power of a laser-diode side-pumped solid-state laser[J]. Appl. Optics，2000，39(30)：5482.

[12] 陈薪羽，金光勇，王　超，等. LD 侧面泵浦全固态激光器光场均匀性研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版)，2009，32(3)：352-355.
Chen Xinyu，Jin Guangyong，Wang Chao，et al. Study for pumping uniformity in LD side-pumped all solid-state laser[J]. J. of Changchun University of Science and Technol.（Natural Science Edition)，2009，32(3)：352-355.

[13] 闫立华，安振峰，任　浩，等. 半导体侧泵模块激光晶体内吸收光场分析[J]. 激光与红外，2014，44(7)：720-724.
Yan Lihua，An Zhenfeng，Ren Hao，et al. Absorption property of LDA side-pumped laser crystal[J]. Laser & Infrared，2014，44(7)：720-724.

[14] Liu Wenwen，Niu Yanxiong，Liu Haixia，et al. Uniformity of pump intensity distribution in diode-array side-pumped laser rod[J]. Proc. of SPIE，2014，9266：1-6.

[15] 李　耀，李　阳，王　超. LD 面阵侧面泵浦 Nd ∶ YAG 晶体吸收光场研究[J]. 中国光学，2018，11(2)：206-211.
Li Yao，Li Yang，Wang Chao. Absorption light field of side-pumped Nd ∶ YAG crystal in LD planar arrays[J]. Chinese Optics，2018，11(2)：206-211.

[16] Ajer H，Landr S，Rustad G，et al. Efficient diode-laser side-pumped TEM_{00} mode Nd ∶ YAG laser[J]. Optics Lett.，1992，17(24)：1785-1787.

作者简介：

王小发(1978－)，男，湖南洞口人，博士，副教授，主要研究方向为激光技术。