

文章编号: 0253-2239(2003)11-1370-5

单个激光二极管对称侧向抽运的固体激光器

郭明秀¹ 张 同² 沈冠群² 陆雨田¹ 潘 涌²

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800
² 上海光通激光光电子创新技术中心有限公司, 上海 200233)

摘要: 采用一种半导体激光器侧向抽运的固体激光器新结构,可将一个半导体激光器的输出光分成四部分,从四面对称耦合到激光棒中,从而实现比较均匀的抽运。模拟计算了这种对称抽运结构中激光棒对侧面抽运光的吸收过程,得到了激光棒介质的吸收系数和直径等参量对激光棒内抽运光能量分布均匀性和能量吸收率的影响规律,并在此基础上对相关参量进行了优化。这种方案结构简单紧凑,很容易获得高光束质量的高功率固体激光输出。采用这种抽运结构制成了新颖的激光头,初步实验结果良好,表明该结构确实可行。

关键词: 固体激光器; 激光二极管; 侧面抽运; 对称抽运; 直角反射镜; 模拟计算

中图分类号: TN244 文献标识码: A

1 引 言

激光二极管抽运的固体激光器性能优越,其主要特点是高效、可靠、长寿命、低噪音、结构简单、使用方便、可制成小型轻量的全固化器件,已经成为固体激光器发展的主流方向,具有巨大的应用前景^[1~4]。

端面抽运光束质量高,易于实现 TEM₀₀ 模激光输出。侧面抽运效率不及端面抽运高,较难获得高光束质量的固体激光输出。但对于大功率激光二极管而言,实现端面抽运的较小的圆光斑的整形集光系统比较复杂,相比之下,侧面抽运简单易行,且易实现大功率抽运和大功率输出,因此被广泛采用。一般来说,抽运越均匀,越能使增益在整个激光介质横截面近似高斯分布,越易实现 TEM₀₀ 模激光输出^[5]。但是,一个激光二极管提供的抽运光如果只从激光介质的一侧入射,抽运光能量在介质内部分布将不均匀^[6]。本文采用的抽运结构能将一个激光二极管输出的抽运光分成四部分从激光棒介质的四面同时对称耦合,实现对称侧面抽运^[7]。对所述抽运方案作了详细的理论分析和计算,得到了激光介质内抽运光强的分布,讨论了抽运参量(吸收系数、直径)对介质内抽运光强分布均匀性的影响,并在此基础上进行相关参量的优化研究。

2 实现对称侧向抽运的结构方案

典型的大功率激光二极管阵列,在平行于 p-n 结方向即所谓慢轴方向上宽约 10 mm,发散角 10°左右;在垂直于 p-n 结方向即所谓快轴方向上宽约 1 μm,光束发散角为 40°~90°,即所谓的“快方向”,快方向光束接近衍射极限,其光强基本上是高斯分布。文献[8]的研究结果说明激光二极管阵列光束在快方向上的光强分布基本上是高斯分布,激光二极管阵列光束快方向被微柱透镜准直后的光强分布,其顶部比较平坦,而升降沿陡削,这是简单地采用微柱透镜准直后的效果。而我们采用大尺寸消像差的非球面柱透镜准直,可以得到均匀性和发散度都相当好的平行光束。

将抽运光一分为四从四面抽运激光棒的结构如图 1 所示。激光棒沿 Z 方向放置,激光二极管的慢方向对应 Z 轴方向,而快方向对应 Y 轴方向。将激光二极管的发光区放在柱透镜 4 的焦平面上,其输出光束就被准直成比较均匀的平行光,这个平行入射的抽运光束被直角反射镜分成四个宽度相等的部分(I、II、III、IV),沿图 1 中所示的四个方向对称地从侧面抽运激光棒。设 ϕ 为激光棒的直径, θ 是激光二极管在快方向上的光束发散角,选择柱透镜的焦距 $f=2\phi/\tan(\theta/2)$,就能使准直抽运光束的宽度在纵向空间上四倍于激光棒的直径。

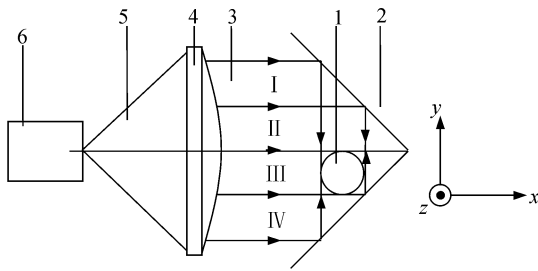


Fig. 1 Side view of the laser diode side-pumping head. 1: laser rod; 2: right-angle reflector; 3: collimated pump beams; 4: collimated cylindrical lens; 5: laser diode beams; 6: laser diode

3 数值模拟计算结果和分析

3.1 数值计算模型

我们用光线追迹法对这种侧面抽运过程进行了模拟计算。分别计算四个方向的抽运近似均匀平行光,最后将输出结果叠加。整个模型简化为只计算激光棒在 XY 横截面内的吸收分布。将激光介质的 XY 横截面进行网格离散化,计算时每一网格单元的值代表了介质轴向单位长度上横截面内该单元面积内激光介质吸收的抽运光能量的相对值,所有网格单元的值共同表征了激光介质对抽运光能量的吸收。根据光强吸收公式有

$$I_{\text{out}} = I_{\text{in}} \exp(-\alpha l), \quad (1)$$

其中 I_{in} 为进入该单元网格的抽运光强,亦即上一单元网络的出射光强, I_{out} 为该单元网络的出射光强亦即进入下一单元网络的抽运光强, α 为介质对抽运光的吸收系数,单位为 cm^{-1} ,本文只考虑其与介质掺杂浓度的关系, l 为光线在每一单元网格中的路径长度。如图 2 所示,设光线在棒表面的入射点为 A,该光线折射进入介质后,传播路径不变,直至在界面发生另一次折射,设该点为 B,对每个网格,根据光线在网格上的交点,即光线在每个网格上的入射点和出射点的坐标,由两点坐标公式即可算出光线在每个网格上经过的长度。设光线在单元网格上的入射点和出射点的坐标分别为 $(X_{\text{in}}, Y_{\text{in}})$, $(X_{\text{out}}, Y_{\text{out}})$, 则

$$l = [(Y_{\text{out}} - Y_{\text{in}})^2 + (X_{\text{out}} - X_{\text{in}})^2]^{1/2}, \quad (2)$$

根据能量吸收公式,则该网格对光线的吸收能量为

$$I_{\text{ab}} = I_{\text{in}} - I_{\text{out}} = I_{\text{in}}[1 - \exp(-\alpha l)], \quad (3)$$

所以对每条光线进行追迹算出其传播路径和被各部分介质吸收的能量,即可算出整个介质内的吸收光强分布。控制相对光强为 10^{-6} 时停止对光线追迹

计算。对于从棒中折射出的光,由于其强度较小,反射复杂,在计算时未考虑。

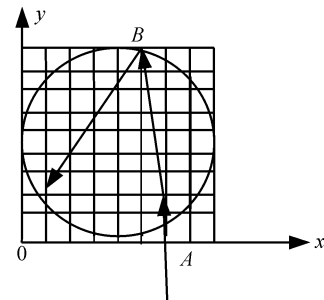


Fig. 2 Graph of calculating grid model

计算中主要考虑了激光棒直径 ϕ , 吸收系数 α (即掺杂浓度) 对吸收均匀性和吸收率的影响。计算采用的激光棒为 Nd:YAG, 折射率为 1.823, 抽运光波长为 808 nm。数值模拟计算结果如图 3 至图 5 所示,综合考虑选择吸收系数 $\alpha = 12 \text{ cm}^{-1}$ 左右即常见的掺杂离子数分数 1% 和直径 $\phi = 2.5 \sim 3.0 \text{ mm}$ 的激光棒比较好。能量吸收分布等值线图具有毛刺是离散化计算的结果。Z 轴没有归一化。

3.2 吸收系数 α 对激光介质吸收均匀性和吸收率的影响

图 3 为在激光棒直径一定时激光棒对抽运光的吸收率与吸收系数 α 的关系。可以看出,激光棒对抽运光的吸收率随吸收系数 α 增大而增大,吸收系数较小时其值变化对介质吸收率的影响较大,随着 α 的增大介质吸收率的变化趋于缓慢,当吸收系数 α 达到 10 cm^{-1} 时介质吸收率变化已趋于缓慢,此时 3 mm 的激光棒对抽运光的吸收已超过 90%。

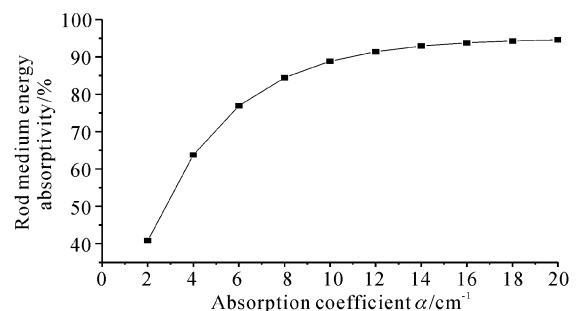


Fig. 3 Influence of the absorption coefficient α on the rod medium absorptivity ($\phi = 3.0 \text{ mm}$)

图 4 是在激光棒直径一定,不同吸收系数 α 时激光棒横截面上的能量吸收分布。可知当吸收系数 α 由小变大时,激光棒对抽运光的吸收均匀性呈变差趋势,对于 $\phi = 3.0 \text{ mm}$ 的棒当吸收系数 α 较小时 ($\alpha = 2 \text{ cm}^{-1}$) 其吸收均匀性比较好,当吸收系数增大到 $\alpha = 12 \text{ cm}^{-1}$ 时其吸收均匀性已开始变差,棒边缘

部分吸收开始呈现比中心区域吸收变强的趋势,而当吸收系数较大时($\alpha=20\text{ cm}^{-1}$)其吸收主要集中在

边缘部分,而中心部分几乎没有吸收,中心区域和边缘部分吸收相差较大,吸收均匀性明显变坏。

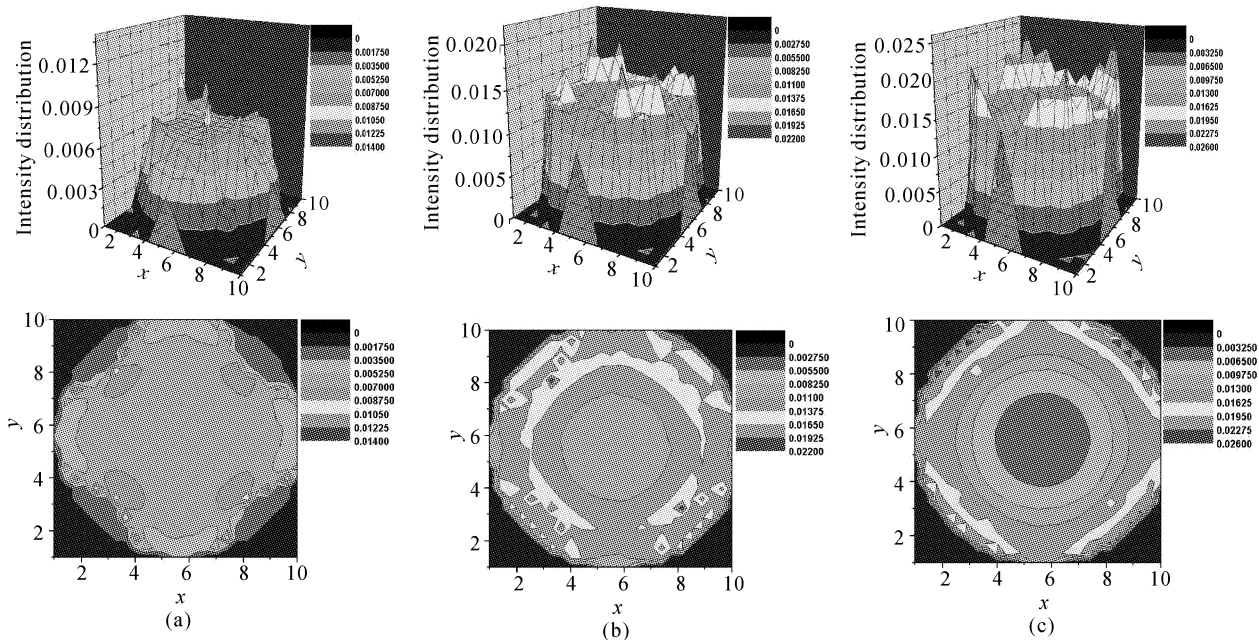


Fig. 4 Influence of the absorption coefficient α on the rod medium absorption homogeneity, $\phi=3.0\text{ mm}$. (a) $\alpha=2\text{ cm}^{-1}$, (b) $\alpha=12\text{ cm}^{-1}$, (c) $\alpha=20\text{ cm}^{-1}$. Above: three-dimensional absorbed pumping energy distribution in the rod medium, bottom: pumping energy contour distribution in rod medium

结合图 3 和图 4 可知,吸收系数 α 太小则激光棒对抽运光吸收太少,在 $\alpha=2\text{ cm}^{-1}$ 时吸收率只有 41.8%,而在 12 cm^{-1} 左右时吸收率已经有 91.1%,而当 α 继续增大时吸收率增长不明显,而且当吸收系数 α 太大时则激光棒对抽运光吸收均匀性不好,综合激光棒对抽运光吸收率和吸收均匀性两者考虑,选择吸收系数 $\alpha=12\text{ cm}^{-1}$ 左右即常见的掺杂离子数分数为 1% 的激光棒较好。

3.3 激光棒直径 ϕ 对介质吸收均匀性和吸收率的影响

图 5 为吸收系数 α 一定时激光棒直径对吸收率的影响。可以看出,吸收系数 $\alpha=12\text{ cm}^{-1}$ 的棒在棒直径 $\phi=2.0\sim 7.0\text{ mm}$ 变化时可以获得从低到高变化的吸收率,在直径为 2.0 mm 时吸收率已经有 84%,直径 $\phi=3.0\text{ mm}$ 时吸收率已经超过 90%。在直径从 $2.0\sim 3.0\text{ mm}$ 之间吸收率增长较快,在 $3.0\sim 4.5\text{ mm}$ 之间增长吸收率增长趋势减慢,大于 4.5 mm 后其增长趋势则趋于平缓。

图 6 是吸收系数一定不同直径时激光棒横截面上的能量吸收分布。由图 6 及图 4(b) 可以看出,吸收系数 $\alpha=12\text{ cm}^{-1}$ 的激光棒当直径 ϕ 由小变大时

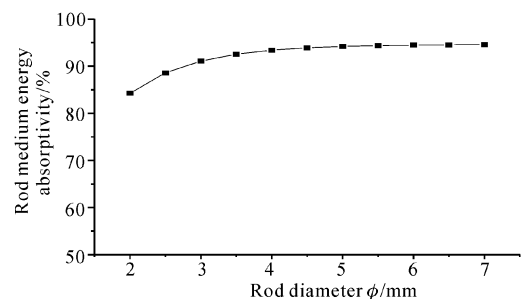


Fig. 5 Influence of the rod diameter ϕ on the rod medium energy absorptivity

对抽运光的吸收均匀性呈变差趋势,在 ϕ 较小为 1.5 mm 时棒的吸收均匀性已比较好,当 ϕ 增大到 2.5 mm 时棒边缘部分比中心区域吸收强,吸收均匀性变差,直径大于 3.0 mm 后吸收均匀性明显变差,棒边缘部分比中心区域吸收明显较强,吸收主要集中在边缘部分。

综合考虑选择 $\phi=2.5\sim 3.0\text{ mm}$ 的激光棒比较好。 $\phi=3.0\text{ mm}$ 左右棒对抽运光的吸收率已经超过 90%;另一方面,激光基模直径一般不会超过 2.0 mm ,所以激光棒直径不大于 3.0 mm 为宜;而且较细的棒也更容易得到均匀的冷却。

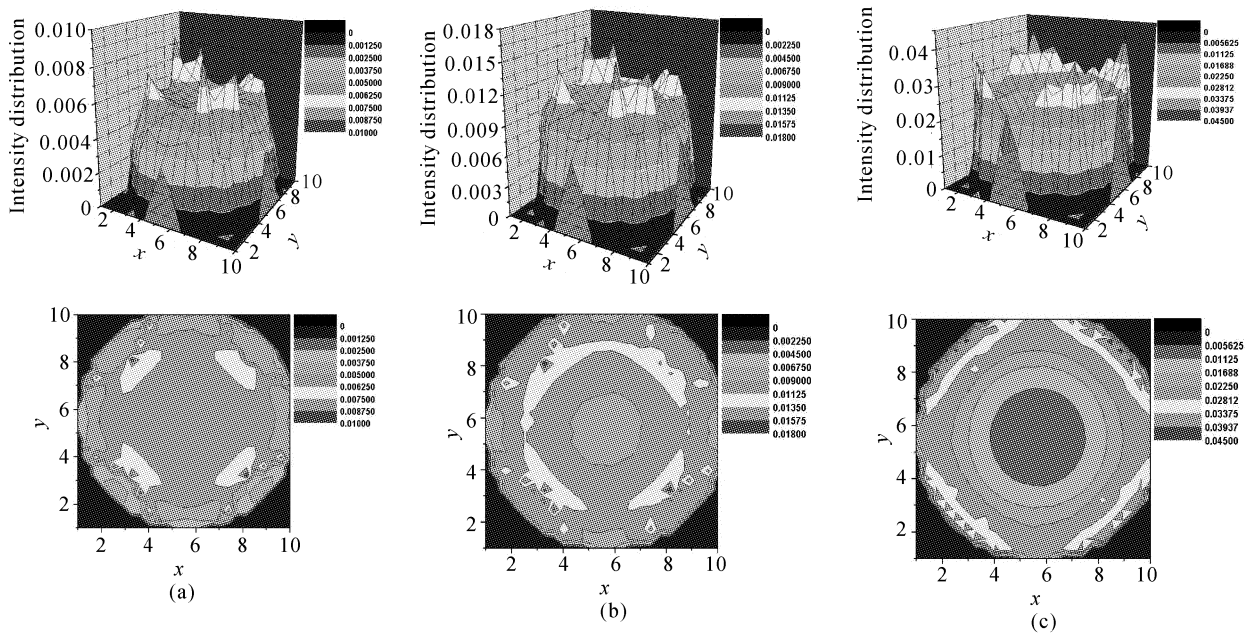


Fig. 6 Influence of the rod diameter ϕ on the rod medium absorption homogeneity, $\alpha = 12 \text{ cm}^{-1}$. (a) $\phi = 1.5 \text{ mm}$, (b) $\phi = 2.5 \text{ mm}$, (c) $\phi = 5.0 \text{ mm}$. Above: Three-dimensional absorbed pumping energy distribution in the rod medium; bottom: pumping energy contour distribution in rod medium

4 实验结果和讨论

对这种抽运结构进行了初步的实验。Nd:YAG 激光棒是电子部十一所生产的,棒直径 $\phi = 2.5 \text{ mm}$,长 35 mm ,掺杂离子数浓度 1% ;沿棒长方向采用两个中国科学院半导体研究所生产的 40 W 的 808 nm 激光二极管抽运,其快方向发散角约 56° ;采用焦距 $f = 9 \text{ mm}$ 的柱面透镜准直,得到的平行抽运光束的宽度近似地四倍于棒直径。激光谐振腔采用平平腔结构,腔长 $L = 192 \text{ mm}$,输出耦合镜透过率 $T = 15\%$ 。实验结果,在输入功率 48 W 的抽运下,输出功率 7.2 W ,光-光转换效率为 15% ,输出稳定度在 $\pm 2.5\%$,输出光束特性见图 7~图 9。

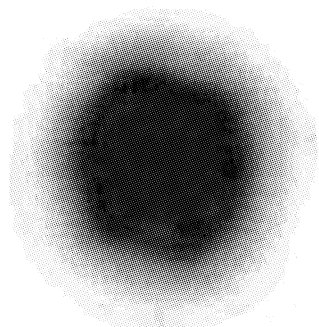


Fig. 7 Photo of the $1.06 \mu\text{m}$ light spot
图 7 为所拍摄的近场光斑照片,可以看出基本

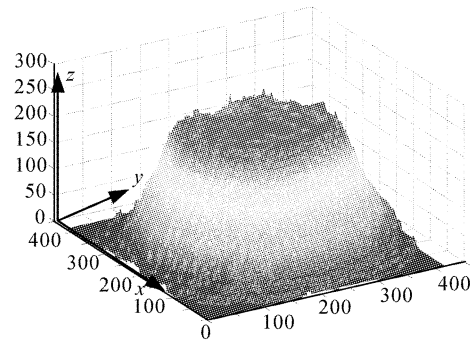


Fig. 8 Intensity of the $1.06 \mu\text{m}$ light spot

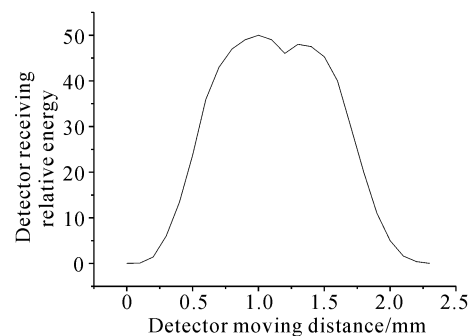


Fig. 9 The $1.06 \mu\text{m}$ light intensity distribution along the diameter direction of the laser rod cross section
上是圆形光斑。图 8 为输出光横截面上光强分布的立体图,中心部分比较均匀,与理论计算得到的抽运光光强三维分布图较好地吻合,其在 X 轴和 Y 轴上的有效长度为光斑直径大小(mm),Z 轴为光强的相

对值(W/mm^2)。沿介质棒直径方向的光强分布见图 9,看起来近似高斯分布。正如计算模拟结果抽运光场相当均匀所预示的,实验得到了强度分布十分理想的激光输出。而按照通常的侧面抽运方法,若不采用多个激光二极管环绕激光棒进行抽运是难以得到这样好的输出光束的。

从激光光场可以看出,最后的光场分布并不是非常均匀,仍然是边缘部分强,中心部分弱,易产生多横模振荡,所以应通过谐振腔的设计来抑止高阶模,尽量产生光束质量较好的低阶模输出,例如将实验中的平平腔拉长或采用非稳腔。由于直角反射镜的表面光洁度、镀膜等加工比较粗糙,也没有为激光二极管配制稳定调节发射波长的恒温控制系统,本实验结果的光-光转换效率不高,将在下一步样机研制时改进。

结论 本文报告一种已获美国专利的激光二极管侧面抽运固体激光器方案。该方案能将一个激光二极管的输出分成四份,从四面对称耦合到激光棒中,因此能获得比较均匀的抽运光场。这种方案结构简单紧凑,且可以沿棒长方向排列多个激光二极管抽运,很容易获得高光束质量的高功率固体激光输出。文章通过理论分析和数值模拟计算,讨论了采用这种直角反射镜抽运结构后棒状激光介质的吸收系数和直径等参量对介质内抽运光能量吸收和分布均匀性的影响,并且用这样结构的激光器得到了强度分布

理想的激光输出,理论和实验符合得很好。

参 考 文 献

- 1 Ning Jiping, Tang Shengshu, Xiong Ying *et al.*. Theoretical analysis of diode-laser arrays pumped solid-state laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(9): 1183~1188 (in Chinese)
- 2 Huang Yongzhen. Influence of reflection phase of air interface on mode characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(2):167~185 (in Chinese)
- 3 Zheng Quan, Zhao Ling, Qian Longsheng. Application and development of high power diode-pumped solid-state laser. *Opt. Precision Engng.* (光学精密工程), 2001, **9**(1):6~7 (in Chinese)
- 4 Liu Ning, Hu Wei, Liao Changjun *et al.*. Analysis of fiber-coupled laser-diode end-pumped solid-state lasers. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 1999, **A26**(2):105~108 (in Chinese)
- 5 Wang Jianjun, Jiang Dongsheng, Zhao Hong. Research on diode side-pumped TEM₀₀-mode lasers. *Laser & Infrared* (激光与红外), 2000, **30**(5):286~288 (in Chinese)
- 6 Mao Shaoqing, Huang Tao, Wen Zhongyi *et al.*. Calculation and analyze of homogeneity of diode side pumped solid laser. *Laser Technology* (激光技术), 1995, **19**(2):185~188 (in Chinese)
- 7 Zhang Tong. Laser head and telescopic cavity for diode-pumped solid-state lasers. US Patent, 5548608, August, 20, 1996
- 8 Hannes. Microlens Diode Array Collimation Research. <http://www.hannesgreim.com>

Symmetrically Side-Pumped Solid-State Laser with Single Diode Laser

Guo Mingxiu¹ Zhang Tong² Shen Guanqun² Lu Yutian¹ Pan Yong²

¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800
² Shanghai Guangtong Laser & Optoelectronics Technology Co., Ltd., Shanghai 200233

(Received 6 September 2002; revised 13 December 2002)

Abstract: A new configuration of laser diode side-pumped solid-state laser is put forward. The pumping configuration divides the pumping beam of one laser diode bar into four equal portions and produces a symmetric pumping the laser medium. A ray trace simulation of the pumping beam absorption in the rod medium is made, and the effect of the absorption coefficient and laser rod diameter on the uniformity of the absorbed pumping energy distribution and the energy absorption ratio is got. An optimization of proper parameters also is made. The configuration is simple, it is very easy to obtain high beam quality output laser beam with it. A novel laser head is made with this configuration, and the initial experimental results are fairly good, which show the feasibility of this configuration.

Key words: solid-state laser; laser diode; side-pump; pumping homogeneity; right-angle reflector; simulation calculation