

# 高效高稳定高光束质量声光调 Q 绿光激光器的研究<sup>\*</sup>

张玉萍<sup>1)†</sup> 张会云<sup>1)‡</sup> 钟 凯<sup>2)</sup> 王 鹏<sup>2)</sup> 李喜福<sup>2)</sup> 姚建铨<sup>2)</sup>

1) 山东科技大学理学院, 青岛 266510)

2) 天津大学精仪学院激光与光电子研究所, 天津 300072)

(2008 年 7 月 3 日收到, 2008 年 8 月 24 日收到修改稿)

通过优化双棒串接直腔结构设计, 利用大功率 LD 侧面抽运、声光 Q 开关、II 类相位匹配 S-KTP 内腔倍频获得高效大功率绿色激光输出. 当抽运电流为 45 A、重复频率为 15 kHz 时, 激光平均功率为 132 W, 光—光转换效率为 13.2%, 脉宽约为 120 ns. 在输出 130 W 时, 测得 1 h 功率不稳定性小于 0.5%, 光束质量因子  $M^2$  为 6.7. 对高功率抽运情况下激光介质的热透镜效应以及谐振腔稳定运转工作区域也进行了理论分析和实验研究.

关键词: 绿光激光器, 腔内倍频, 声光调 Q, LD 侧面抽运

PACC: 4255R, 4260B

## 1. 引 言

全固态声光调 Q 绿光激光器具有效率高、激光输出光束质量好、运转可靠、体积小以及寿命长等优点, 在激光医疗、激光微加工、激光测距、激光演示以及激光军事应用等领域得到了广泛的应用. 在声光调 Q 的高功率全固态激光器中利用内腔倍频技术获得高功率高重复频率的绿色激光输出, 是获得高功率绿光的一种有效方法. 目前国内外开展了许多这方面的研究工作, 国内外报道都已有平均功率达到百瓦级的全固态绿光激光器<sup>[1-9]</sup>.

本文采用两个半导体侧泵模块, 进行了双棒串接声光调 Q 内腔倍频绿光激光器的实验研究. 实验得到了 132 W 的绿光, 激光器输出功率为 130 W 时, 测得 1 h 激光功率不稳定性小于 0.5%, 光束质量因子  $M^2$  在 130 W 时测得为 6.7. 稳区计算的结果对实

验具有很好的指导作用, 抽运功率达到最高时激光输出并未饱和, 输出功率仍具有较大的提升潜力. 此结果在目前国内外声光调 Q 内腔倍频绿光激光器综合指标(功率、效率、稳定性和光束质量等)方面处于先进水平.

## 2. 实验装置

实验装置如图 1 所示, 包括两个激光头、90°石英旋光片、两个声光 Q 开关、倍频晶体、谐波镜 ( $M_3$ ) 和两个端镜 ( $M_1$  和  $M_2$ ). 其中, 两个激光头相同, 皆为 LD 列阵三维侧面抽运结构, 每列抽运激光二极管列阵额定功率 200 W, 每个激光头总抽运功率可达 600 W. 激光头中所使用的 Nd:YAG 棒尺寸为  $\phi 4 \times 97$  mm, 掺杂浓度为 0.8 at. %. 在两个激光头中间插入 90°石英旋光片来补偿 Nd:YAG 晶体的热致双折射效应. 两个声光 Q 开关为 NEOS 公司生产, 中心

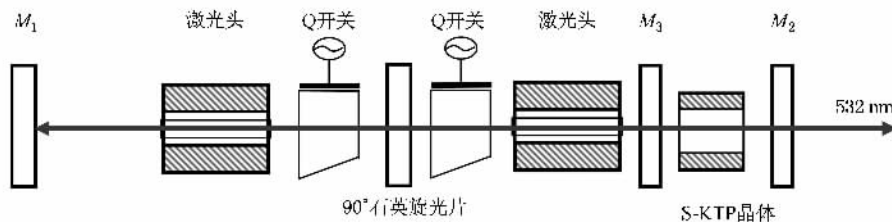


图 1 实验装置示意图

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(批准号 60671036), 山东科技大学春蕾计划项目(批准号 2008AZZ094)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: zhangyuping1976@yahoo.com.cn

频率 27.12 MHz, 双路同步输出, 每个 Q 开关电源射频输出功率为 100 W. 倍频晶体采用 II 类相位匹配的抗灰迹 KTP 晶体(S-KTP), 晶体尺寸为 4 mm × 4 mm × 10 mm, 切割角度  $\theta = 90^\circ, \phi = 23.5^\circ$ .  $M_1$  为 1064 nm 全反平面镜,  $M_2$  为对 1064 nm 全反和 532 nm 高透平面镜,  $M_3$  为 1064 nm 高透和 532 nm 高反平面镜.

### 3. 双棒串接腔激光器稳区分析

为了对谐振腔稳区进行分析, 我们首先研究 Nd:YAG 晶体棒的热效应. 将 He-Ne 激光扩束, 测量抽运组件的热焦距, 其中激光非谐振时和谐振时与抽运功率相对应的热焦距长度和光焦度如图 2 所示. 热透镜焦距倒数与抽运功率  $P_{in}$  的关系式为  $1/f \approx 8.42P_{in} + 0.0458$ , 测量时对应的输出耦合镜对 1064 nm 激光的反射率为 80%. 由于难以区分 r 偏振和  $\phi$  偏振的热焦距长度, 我们在分析谐振腔稳定条件时, 理论上 r 偏振和  $\phi$  偏振热透镜焦距长度比例采用的是  $f_\phi/f_r = 1.2^{[10]}$ . 定义平均热焦距  $f = (f_r + f_\phi)/2$ . 通过热透镜焦距倒数  $1/f$  与输入功率  $P_{in}$  的关系, 可以计算出  $f_r$  和  $f_\phi$  与  $P_{in}$  的关系.

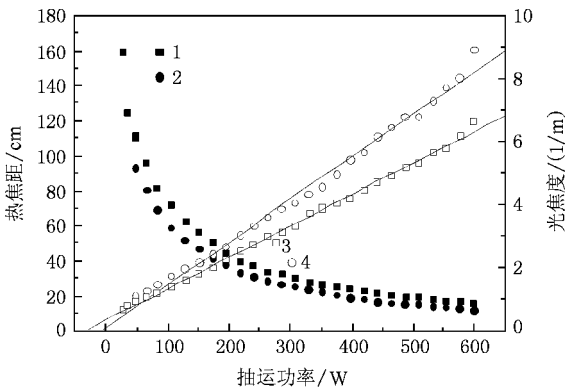


图 2 抽运组件在激射和非激射情况下, 热焦距和光焦度与抽运功率之间的关系(1 2 3 4 分别为激射、输出镜 80% 反射率时热焦距, 非激射时热焦距, 激射、输出镜 80% 反射率时光焦度, 非激射时光焦度)

我们用传输矩阵法分析谐振腔的稳定条件. 把激光棒看成类透镜介质, 其传输矩阵为<sup>[11, 12]</sup>

$$M_{r,\phi} = \begin{pmatrix} \cos\Gamma_{r,\phi}L & (n_0\Gamma_{r,\phi})^{-1}\sin\Gamma_{r,\phi}L \\ -(n_0\Gamma_{r,\phi})^{-1}\sin\Gamma_{r,\phi}L & \cos\Gamma_{r,\phi}L \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中,  $\Gamma_{r,\phi}$  定义为  $\Gamma_{r,\phi} = (\Delta n_{r,\phi}/n_0)^{1/2}$ ,  $L$  是棒长,  $n_0$

是棒中心的折射率.  $\Delta n_{r,\phi}$  由下式给出:

$$\Delta n_{r,\phi} = n_0 \frac{4\Delta T}{R^2} \left( \frac{1}{2n_0} \frac{dn}{dT} + n_0^2 \alpha C_{r,\phi} \right), \quad (2)$$

其中,  $R$  是棒半径,  $dn/dT$  是 Nd:YAG 折射率随温度的变化率,  $C_{r,\phi}$  是 Nd:YAG 的法向和切向偏振光的弹光系数,  $\Delta T$  是棒中心到表面的温差, 与热焦距长度  $F_{r,\phi}$  有关, 可写为<sup>[13, 14]</sup>

$$\Delta T = \frac{A}{4\pi l} \frac{1}{\left( \frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + n_0^3 \alpha C_{r,\phi} \right)} \frac{1}{f_{r,\phi}}. \quad (3)$$

运用激光棒传输矩阵(1)式, 激光束在腔内往返一次的往返传输矩阵  $M_{tot}$  由下式给出:

$$M_{tot} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = [d_1 \mathbf{I} M_r \mathbf{I} l \mathbf{I} d_R \mathbf{I} l \mathbf{I} M_\phi \mathbf{I} d_1 \mathbf{I} d_1] \times [M_\phi \mathbf{I} l \mathbf{I} d_R \mathbf{I} l \mathbf{I} M_r \mathbf{I} d_1], \quad (4)$$

$[d_1]$  是全反镜与晶体棒近端距离  $d_1$  的传输矩阵,  $[l]$  是晶体棒和旋光片之间距离  $l$  的传输矩阵,  $[d_R]$  是长为  $d_R$ 、折射率为  $n_R$  的旋光片的传输矩阵. 定义光束在两晶体棒之间的传输矩阵  $[d_2]$  为

$$[d_2] = [l \mathbf{I} d_R \mathbf{I} l] = \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_R/n_R \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

从方程(4), 谐振腔的稳定条件由下式给出:

$$-1 < \frac{A+D}{2} < 1. \quad (6)$$

根据方程(6)的稳定性条件, 双棒之间的距离  $d_2$  一定时, 我们以抽运功率和  $d_1$  为坐标参数, 计算了双棒对称平行平面腔的稳区, 如图 3 所示, 其中白色区域 1 3 5 7 代表稳区, 黑色区域 2 4 6 8 代表非稳区.

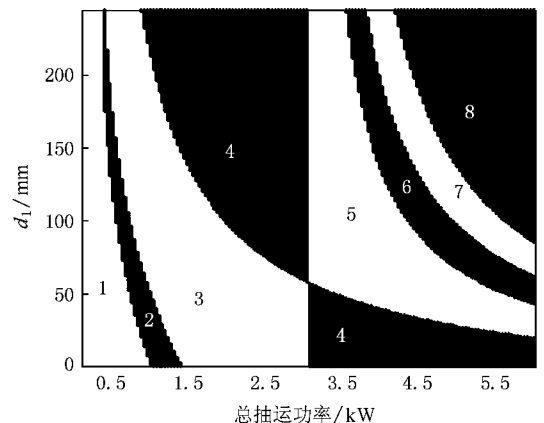


图 3 双棒串接对称平行腔的稳区图( $d_2 = 12$  cm)

图 3 所示的非稳区 2, 是由于插入  $90^\circ$  旋光片进行补偿热致双折射时引起  $r$  偏振和  $\phi$  偏振的热焦距长度不同引起的<sup>[7]</sup>. 非稳区 4 是由全反镜与晶体棒近端距离  $d_1$  引起的, 当  $d_1$  不等于激光棒之间的距离的一半时( $d_2/2$ )会出现非稳区 4.

当激光棒之间的距离  $d_2 = 12$  cm, 镜面距离  $d_1$  在小于 6 cm 时, 从稳区图可以看出激光器可以稳定运行在稳区 3, 最大总抽运功率可以达到 3000 W.

为了便于放置调 Q 开关和倍频晶体, 谐振腔须做适当的加长. 然而当激光棒之间的距离( $d_2$ )增加时, 谐振腔的稳区会发生变化. 图 4 是晶体间距相对较长 (35 cm) 时的谐振腔稳区. 与图 3 相比, 主要的变化是: 上非稳区 4 右侧向左缩进, 下非稳区 4 左侧向左扩张, 因此在抽运功率较低时谐振腔就到达非稳区 4. 只有全反镜与晶体棒近端距离  $d_1 = d_2/2$  时, 输入抽运功率可以在宽的稳区内运行.

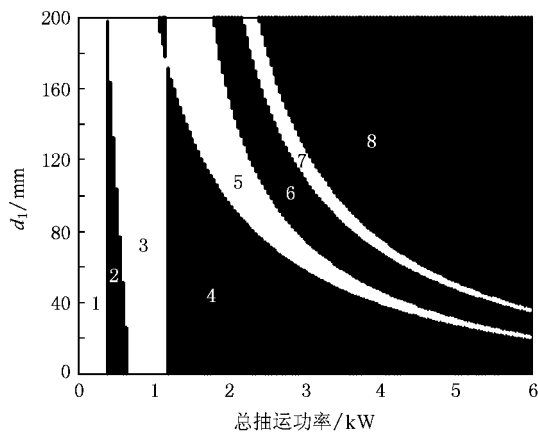


图 4 双棒串接对称平平腔的稳区图( $d_2 = 35$  cm)

根据以上理论模拟的结果, 我们取端镜与晶体棒近端距离  $d_1$  为 17.5 cm、两晶体棒之间的距离  $d_2$  为 35 cm 进行实验. 由于计算中没有考虑 S-KTP 晶体的热效应, 因此在实验中, 我们又对谐振腔尺寸进行了微调, 主要是调节输出镜和 S-KTP 晶体的位置. 结果发现, 当输出镜向模块远端移动一小段距离时, 可以得到最佳的倍频激光输出效果.

## 4. 实验结果与分析

在图 4 的指导下进行实验, 通过移动输出耦合镜、倍频晶体等腔内元件的方法对谐振腔进行优化调整, 以得到最佳腔参数. 在抽运模块水冷却温度为  $25^\circ\text{C}$ , 倍频晶体水冷却温度为  $20^\circ\text{C}$  条件下进行声光

调 Q 倍频绿光的实验研究.

LD 抽运电流与输出绿光之间关系如图 5 所示, 声光 Q 开关频率为 15 kHz, 当两抽运模块抽运电流均为 45 A 时得到了 132 W 的绿光输出. 倍频光与 808 nm 抽运光之间的光—光转换效率约为 13.2%. 在整个激光输出的范围内, 激光器都运转在稳定区, 因此, 激光器的输出功率随抽运功率稳定上升. 从图中还可以看出, 激光器输出功率没有饱和, 如果抽运功率提高, 激光输出功率仍有很大的提升潜力.

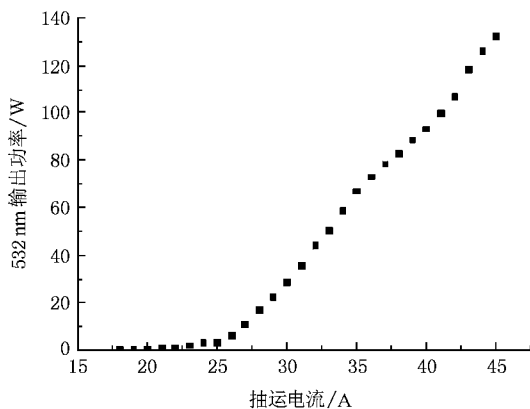


图 5 LD 抽运电流与输出绿光之间关系的输入输出曲线

把  $M_1$  换成 1064 nm 透过率为 20% 的输出镜, 并移走 S-KTP 晶体, 测 1064 nm 输出情况. 在两模块抽运电流同为 45 A 时, 得到 200 W 的连续 1064 nm 的基频光, 在调 Q 频率为 15 kHz, 得到 185 W 的声光调 Q 1064 nm 激光. 因此, 我们估算 1064 nm 激光到 532 nm 激光的转换效率约为 71%.

图 6(a) 为在 130 W 附近测量的 532 nm 激光功率稳定性, 每隔 2 min 从功率计上读取一个数据, 共测量 30 组数. 1 h 内其输出功率不稳定性为

$$\Delta \bar{P} / \bar{P} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n} \right]^{1/2} \times \frac{1}{\bar{P}} \approx 0.4138\% < 1\% .$$

我们使激光器预热 15 min 后连续运行 5 h, 测得激光功率不稳定性为 0.71%, 如图 6(b) 所示.

图 7 为脉冲宽度随抽运电流的变化曲线; 图 8 是抽运电流为 45 A 时的脉宽图, 脉冲宽度为 120 ns.

在抽运电流为 45 A, 输出功率是 130 W 时, 我们用刀口法测量了的光束纵向的光斑半径分布, 如图 9 所示. 经计算得  $M^2$  值约为 6.7.

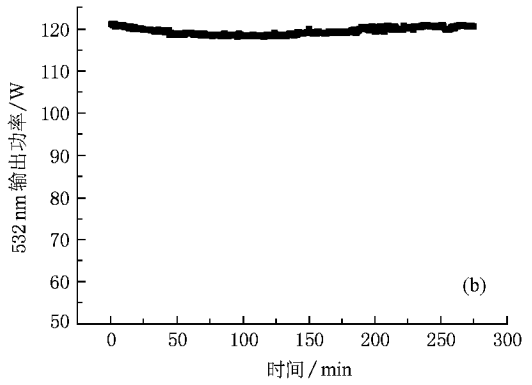
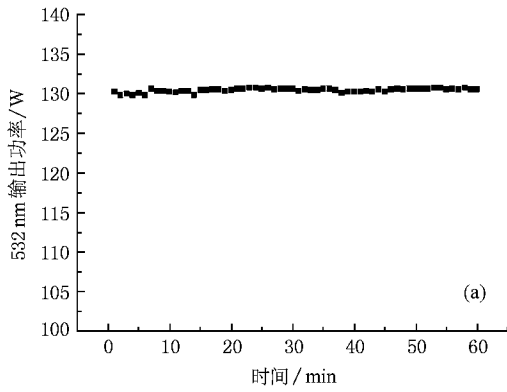


图 6 ( a ) 输出功率 130 W 附近时的 1 h 功率稳定性(  $r_{ms} = 0.4138\%$  ,  $P(Aver) = 130.4\text{ W}$  ) ( b ) 输出功率 120 W 附近时的 4.5 h 功率稳定性(  $r_{ms} = 0.718\%$  ,  $P(Aver) = 119.43\text{ W}$  )

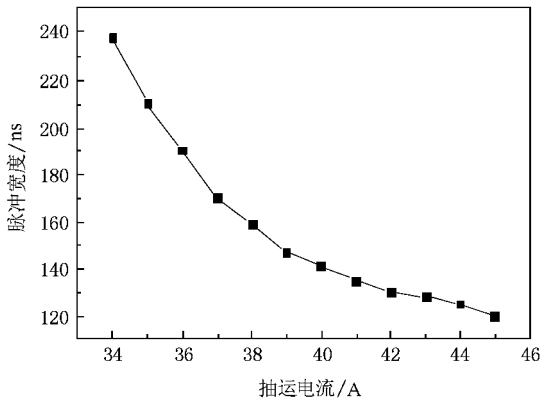


图 7 脉冲宽度随抽运电流的变化曲线

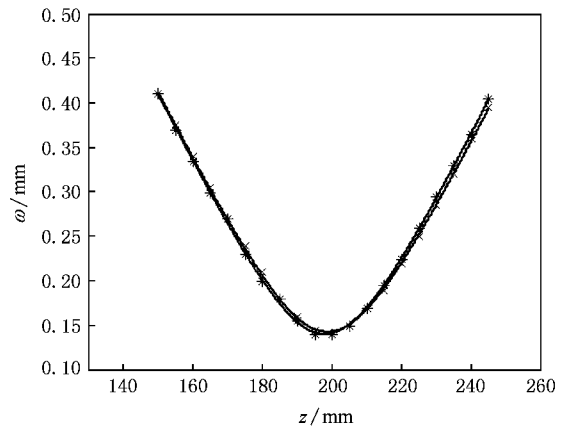


图 9 光束的光斑半径分布图( \* 和 x 分别为 x 和 y 的光斑半径 )

### 5. 结 论

本文采用两个国产的 150 W 半导体侧泵模块 , 进行了双棒串接声光调 Q 内腔倍频绿光激光器的研究 . 与文献中通常采用的 L-型 , V-型 , Z-型等腔不同 , 我们采用结构简单的直线型谐振腔结构 , 该结构具有光学损耗小、可获得较窄的脉宽等特点 , 有利于提高峰值功率从而产生高效二倍频 . 所设计的谐振腔同时可以保证在整个抽运功率范围内激光器都能工作在稳区 , 在很大程度上提高了激光器的输出功率和稳定性等指标 . 所实现的激光器在目前国内外高功率绿光激光器综合性能方面处于先进水平 , 在激光加工、医疗、军事及科学研究等领域具有良好的应用前景 .

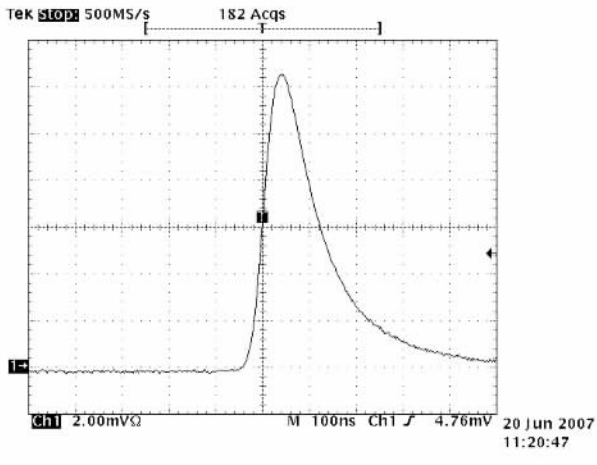


图 8 在电流 45 A  $f = 15\text{ kHz}$  时测得绿激光脉宽图

衷心感谢山东大学晶体材料国家重点实验室何京良教授对本文的指导和帮助 .

- [ 1 ] Konno S ,Kojima T ,Fujikawa S ,Yasui K 2000 *Opt . Lett .* **25** 105
- [ 2 ] Honea E C ,Ebbers C A ,Beach R J ,Speth J A ,Skidmore J A 1998 *Opt . Lett .* **23** 1203
- [ 3 ] Bo Y ,Geng A C ,Bi Y Sun Z P ,Yang X D ,Peng Q J ,Li H Q ,Li R N ,Cui D F ,Xu Z Y 2006 *Appl . Opt .* **45** 2499
- [ 4 ] Garrec B J ,Raze G J ,Thro et P Y 1996 *Opt . Lett .* **21** 1990
- [ 5 ] Yi J H ,Moon H J ,Lee J M 2004 *Appl . Opt .* **43** 3732
- [ 6 ] Jiang D S ,Zhao H ,Wang J J ,Yuan L G ,Yang T ,Zhou S H 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 7 ( in Chinese )[ 姜东升、赵洪、王建军、苑利刚、杨涛、周寿恒 2005 强激光与粒子束 **17** 7
- [ 7 ] Geng A C ,Bo Y ,Bi Y Sun Z P ,Yang X D ,Peng Q J ,Li H Q ,Li R N ,Cui D F ,Xu Z Y 2005 *Chin . Phys . Lett .* **22** 125
- [ 8 ] Yao Z Y ,Jiang J F ,Xu B ,Zhou T J , Cui L L 2005 *Chinese Journal of Lasers* **32** 1459 ( in Chinese )[ 姚震宇、蒋建锋、涂波、周唐建、崔玲玲 2005 中国激光 **32** 1459 ]
- [ 9 ] Xu D G ,Yao J Q ,Zhang B G *et al* 2005 *Opt . Commun .* **245** 341
- [ 10 ] Koechner W 1996 *Solid-State Laser Engineering* 4th ed. ( Springer , Berlin ) p398
- [ 11 ] Park J R ,Lee J Y ,Kim H S ,Um K Y ,Kong H J 1997 *Opt . Rev .* **4** 170
- [ 12 ] Lee S M ,Yun M J ,Cha B H ,Suk S S ,Kim H S 2002 *Appl . Opt .* **41** 5625
- [ 13 ] Teehan R F ,Bienfang J C ,Denman C A 1981 *Appl . Opt .* **20** 4124
- [ 14 ] Somes L N ,Tarasov A A ,Shashkin V V 1980 *Sov . J . Quantum Electron .* **10** 350

## Study of acousto-optic Q-switched green laser with high efficiency , high stability and high-quality coherent beam generation \*

Zhang Yu-Ping<sup>1)†</sup> Zhang Hui-Yun<sup>1)‡</sup> Zhong Kai<sup>2)</sup> Wang Peng<sup>2)</sup> Li Xi-Fu<sup>2)</sup> Yao Jian-Quan<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> College of Science ,Shandong University of Science and Technology ,Qingdao 266510 ,China )

<sup>2)</sup> Institute of Laser and Optoelectronics ,College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering , Tianjin University ,Tianjin 300072 ,China )

( Received 3 July 2008 ; revised manuscript received 24 August 2008 )

### Abstract

High-power and high efficient coherent beam generation with good green-beam quality has been achieved by optimizing the diode-side-pumped linear cavity geometry with two modules in tandem , acousto-optic Q-switching and with S-KTP of II -type phase-matching for intracavity frequency doubling of a Nd :YAG laser . When the pump current is 45A , the maximum average green output power of 132 W is obtained with pulse width of 120 ns at pulse repetition rate of 15 kHz , corresponding to the conversion efficiency of 13.2% from diode pump power to green output power . The  $M^2$  beam quality factor is 6.7 at output power of 130 W , and the output power instability is less than 0.5% at the same output power during an hour measurement time . The thermo-lensing effect of the laser medium and the stable region of the laser cavity under high power-pumping are also theoretically analyzed and experimentally researched .

**Keywords :** green laser , intracavity frequency doubling , acousto-optic Q-switched , diode-side-pumped

**PACC :** 4255R , 4260B

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60671036 ) and the Spring Bud Project of Shandong University of Science and Technology ( Grant No. 2008AZZ094 ).

† E-mail : zhangyuping1976@yahoo.com.cn