

文章编号: 1007-6654(2004)01-0042-05 \*

## LD 端面抽运的全固化单频蓝光激光器

郑耀辉, 张宽收\*

(量子光学与光量子器件国家重点实验室; 山西大学光电研究所, 山西 太原 030006)

摘要: 用激光二极管(LD)抽运 Nd:YAG 晶体, 采用四镜环行腔, 腔内放置 TGG 晶体和  $\lambda/2$  波片, 组成光学单向器, 利用 LBO 晶体内腔倍频技术, 实现单频 946 nm 红外光和 473 nm 蓝光输出。最大单频蓝光输出 12 mW, 红外光输出 13 mW, 光束 x 方向的  $M^2$  为 1.02, y 方向的  $M^2$  为 1.14。腰斑的不对称性为 1.062。自由运转情况下, 功率波动小于  $\pm 1.5\%$ , 频率稳定性优于  $\pm 5.4$  MHz。

关键词: 单频; 内腔倍频; 环行腔

中图分类号: O431 文献标识码: A

全固化小型固体激光器具有高效率、长寿命、结构紧凑、频率稳定等优点<sup>[1]</sup>。特别是全固化小型蓝光激光器在高密度光学数据存储、彩色显示、水下通信、拉曼光谱、医学诊断、量子光学等领域有非常广泛的应用<sup>[2,3]</sup>。把近红外波段的激光通过倍频是一种常用的产生可见光的方法。类似于激光二极管抽运 Nd:YAG 晶体并通过内腔倍频产生 532 nm 绿光, 用 Nd:YAG 的  $^4F_{3/2} - ^4F_{9/2}$  跃迁输出 946 nm 的红外光, 再用内腔倍频输出 473 nm 蓝光也是一种常用的手段。但是, 由于 Nd:YAG 946 nm 谱线属于准三能级系统之间的跃迁, 在泵浦功率密度不是很高时, 反转离子数较小, 下能级存在严重吸收。另外, 它的受激发射截面很小, 是 1064 nm 的 1/9, 1064 nm 波长处强的跃迁, 导致激光的阈值大大提高。随着激光二极管端面抽运方式的问世, 蓝光激光器进入它发展的黄金时期。Nd:YAG 晶体有很高的热导率和基态大的斯塔克分裂, 这样激光介质

的低能级就有较少的离子数, 这样对激光有更少的吸收损耗, 是一种很有前景的材料。许多文献报道了用激光二极管泵浦 Nd:YAG 晶体产生 946 nm 谱线的实验<sup>[4~6]</sup>和倍频产生 473 nm 蓝光输出的实验<sup>[2,7,8]</sup>。2003 年, 德国 C. Gzeranowsky 等用输出连续波功率为 21 W, 中心波长为 808 nm 的半导体激光器抽运 Nd:YAG 晶体获得 4.6 W 红外输出, 用 BBO 晶体内腔倍频, 最高得到 2.1 W 蓝光<sup>[9]</sup>。然而, 内腔倍频激光器由于不同纵模之间相互竞争, 产生了“蓝光问题”<sup>[10]</sup>, 许多研究工作都致力于降低内腔倍频激光器的噪声问题<sup>[11,12]</sup>。普遍采用的方法是使激光器单频运转, 消除纵模之间的相互耦合。而只有采用环行谐振腔, 内加拉第旋转器和  $\lambda/2$  波片, 使激光器单向运转, 消除空间烧孔效应, 才能实现精密选模, 达到理想的频率稳定性。本文设计使用非平面“8”字形谐振腔, 得到稳定的单频输出。

\* 收稿日期: 2004-03-13

基金项目: 山西省青年科技基金(No.20031005); 山西省归国留学人员基金

作者简介: 郑耀辉(1979-), 男, 山西石楼人, 山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室在读硕士, 研究方向: 全固化激光器。 \* 通讯联系人, kuanshou@sxu.edu.cn

## 1 实验分析

### 1.1 激光晶体最佳长度的选择

对 Nd:YAG 晶体, 946 nm 激光谱线为准三能级系统, 要求激光晶体工作在较低的温度环境下, 这就必须对激光晶体单独进行强制制冷。另一个问题是 946 nm 谱线距离 808 nm 较近, 增益介质对它有强烈的自吸收。增加增益介质的长度, 一方面可以增加泵浦光的吸收效率, 另一方面也增大了对 946 nm 的吸收损耗。所以在一定条件下存在一个最佳长度。

文献 [13] 指出谐振腔中的光子数公式为：

$$\frac{R - R_{th}}{c\delta_i(d+1)^2 - \frac{ca_l}{n}\left(\frac{1+d}{2d}\right)}$$

$\delta_i = \delta + 2a_l l$  为考虑  $a_l$  后的腔内往返总损耗。d =  $\left(\frac{\omega_0}{\omega_p}\right)^2$  表示振荡光与抽运光平均横截面积之比。 $a_l$

=  $N^0\sigma$  为再吸收损耗因子。L 为增益介质的长度。

N 为增益介质的折射率。R 为抽运速率。由  $P_{out} =$

$$\frac{h\nu_0 c}{2L} TS \quad (T \text{ 为输出镜透射率}), R = \frac{P\eta_p\eta_a}{h\nu_p} \text{ 得:}$$

$$P_{out} = \frac{(P_{in} - P_{th})T\eta_1}{\delta_i(d+1)^2 - \frac{2a_l L}{n}\left(\frac{1+d}{2d}\right)}$$

上式中,  $\eta_l = \frac{h\nu_0}{h\nu_p}\eta_p\eta_a$ ,  $\eta_a$  为增益介质的吸收效率,  $\eta_p$  为抽运效率,  $\nu_0$  为激光的频率,  $\nu_p$  为抽运光的频率。考虑到自己的实验参数, 我们选择 Nd:YAG 晶体的长度为 2 mm。这样即可以对 808 nm 的泵浦光有较高的吸收效率, 又不至于对 946 nm 的基频光产生大的吸收损耗。

### 1.2 单向系统的设计

根据环形谐振腔单向器的设计原理, 只有当腔内光束为线偏振光在腔内运转时, 用法拉第旋转器和  $\lambda/2$  波片构成的光学单向器才能使激光器单向运转。

在实验中, 我们发现 LD 抽运各向同性的工作物质 Nd:YAG 晶体时, 输出的基频光有大约 8:1 的偏振比, 分析出现这种情况有两方面的原因: 第一, LD 偏振抽运的结果 [14]。第二“8”字形谐振腔的四

个腔镜都以一定的角度放置, 所以它对腔内基频光有偏振选择作用。图 1 是我们测量输出激光偏振方向随抽运光偏振方向旋转的实验装置:

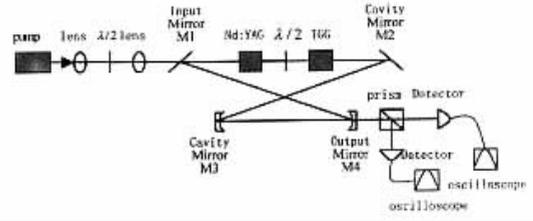


图 1 输出光极化方向与输入光极化方向关系的实验装置

实验过程中, 我们连续旋转抽运光前面带角度刻度的半波片, 输出激光前面放置一偏振分束棱镜, 通过棱镜后的两束光分别经两个相同型号的光电探测器送入示波器监视, 图 2 是两个示波器各自的显示随半波片旋转角度的变化曲线。

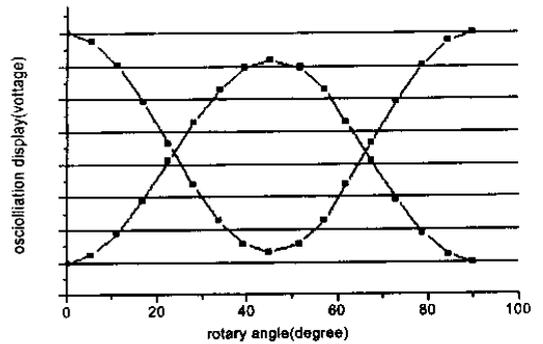


图 2 输出光极化方向随波片旋转角度的变化曲线

当 I 类临界相位匹配倍频晶体 LBO 插入腔内时, 基频光偏振比大于 150:1。且垂直于倍频光的偏振方向, 这与 Nd:YAG/KN I 类倍频产生的蓝光激光器中基频光的偏振比高达 1000:1 相类似 [15], 并被定性地解释为腔内基频光两个偏振本振态的净增益不同引起的 [2]。这样就为我们下一步进行单向创造了条件。

## 2 实验装置

为了得到高效倍频输出, 我们采用了四镜环形谐振腔, 实验装置如图 3 所示

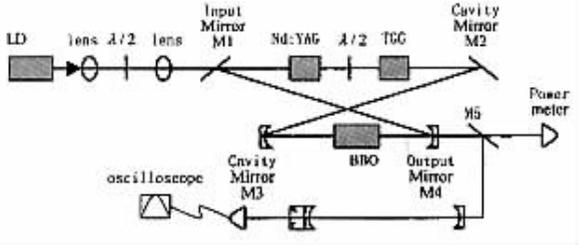


图3 测量频率漂移的实验装置

将 Nd:YAG 晶体置于抽运模的腰斑处,将 LBO 晶体置于两凹面镜之间的腰斑处,腔镜及腔内元件的参数如表 1 所示:

实验中我们用掺杂浓度为 1.1 atm,直径为 5 mm,长度为 2 mm 的 Nd:YAG 棒作为增益介质,由于 Nd:YAG 晶体有 946 nm、1064 nm、1320 nm 三条荧光谱线,其中 1064 nm 和 1320 nm 属于常见谱线,用常规方法即可获得,而 946 nm 谱线是准三能级系统,受强的 1064 nm 干扰,不易起振,我们采用腔镜的选择性镀膜来抑制 1064 nm 光起振,同时把增益介质的温度控制在 100℃。控温仪使用我们所自行研制生产的高精度控温仪,控温精度为

0.01°,实现了 946 nm 激光的稳定运转。抽运源采用 coherent company 的 S-81-2000C-200-N 半导体激光器,中心波长为 808 nm。输出激光为线偏振光,调节 LD 的温度为 22℃后,输出光的中心波长为 808.5 nm,正好在增益介质的吸收峰上。抽运光用整形 Lens1、聚焦透镜 Lens2 耦合到增益介质上,光斑大小约为 220 μm × 80 μm。谐振腔的总长度为 390 mm。腔镜 M3 被固定在平移架上,用来调整 M3 和 M4 之间的距离,达到调节激光器模式尺寸并使激光器运转在谐振腔的稳区。倍频分别采用福晶公司生产的 BBO 和 LBO 晶体,选用 BBO 晶体倍频时,倍频输出光斑呈椭圆形,我们选用 LBO 晶体得出后面的实验结果。法拉第介质是用 φ3 mm × 5 mm 的 TGG 晶体,双面镀 946 nm 减反膜,外加环形磁铁再配合半波片使激光器单向运转。M5 是 45°红外高反、蓝光增透平面镜,透射的 473 nm 光输入功率计,反射的 946 nm 光通过扫描共焦腔监视激光器的模式和频率稳定性。共焦腔的两个腔镜被固定在殷钢架上,两腔镜的曲率半径均为 50 mm,共焦腔的自由光谱区为 750 MHz。

表 1 谐振腔参数表

Component	Function describing	Reflection				Curvature( mm )
		946 nm	808.5 nm	473 nm	1064 nm	
M1	Input Mirror	> 99.7%	< 5%		< 60%	∞
M2	Cavity Mirror	> 99.6%			< 10%	∞
M3	Output Mirror	> 99.7%		< 15%	< 10%	50
M4	Cavity Mirror	> 99.6%			< 60%	50
LBO	Doubling crystal	< 0.15%				∞
Nd:YAG	Gain Medium	Face1	< 1.5%	< 1%		∞
		Face2	< 1.5%			

### 3 实验结果

当抽运光功率达到 1.6 W 时,激光器开始有蓝光输出,当我们增加抽运光功率到最大 2.4 W 时,得到最大单频蓝光输出 12 mW,同时伴有 13 mW 红外光输出。表明倍频晶体选择不很合适,红外光还没有完全转化为倍频光。在下一步实验中。我

们会进一步改进谐振腔的设计,优化腔及晶体的各项参数,争取得到更大的输出功率和使基频光得到完全转化。图 4 是输出功率为 12 mW 时,扫描共焦腔时示波器显示的投射峰曲线,指示激光器单频运转。图 5 是激光器自由运转时,扫描共焦腔得到的激光器在一分钟内的频率漂移曲线,频率稳定性小

于  $\pm 5.4$  MHz, 图 6 是用 FFD100 光电探测器探测的谐波的输出功率波动曲线, 功率波动小于  $\pm 1.5\%$ 。

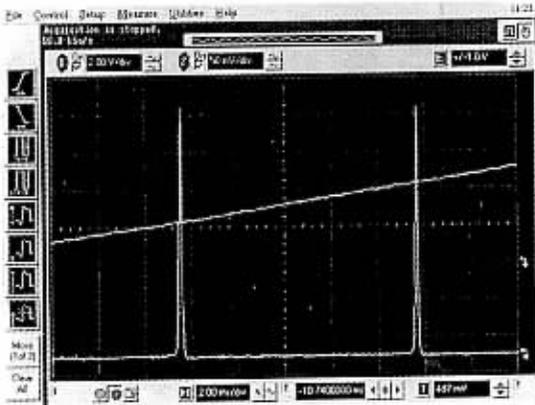


图 4 扫描共焦腔的透射曲线

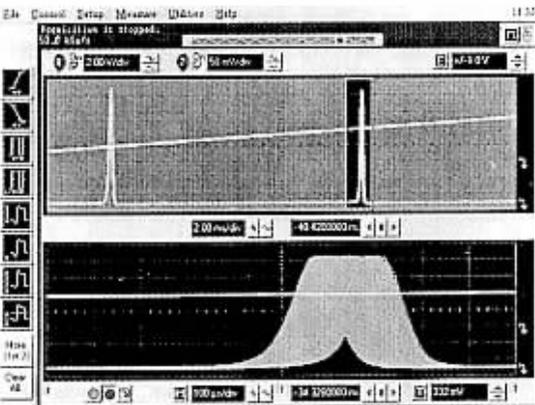


图 5 频率漂移曲线

表 2 是用 coherent 公司生产的 Beam Propagation Analyzer (Modemaster) 测量得到的蓝光光束质量参数：

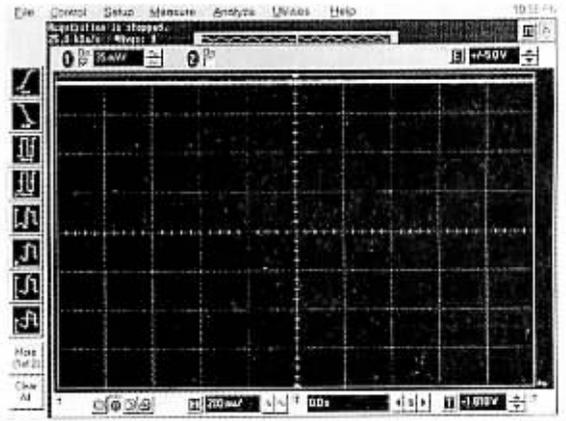


图 6 功率稳定性曲线

表 2 光束质量参数表

	X	Y
Msqd	1.02	1.14
$2\alpha_x$ ( mm )	0.949	1.008
Divergenc( mr )	0.73	0.77
Waist Asymmetry	$2\alpha_y/2\alpha_{ox} = 1.062$	
Divergence Asymmetry	Theta y/Theta x = 1.061	

从表中可以看出, 光束在腔中传输过程中, 发生了像差, 这是由于实验中谐振腔的腔镜都以一定的角度放置, 导致的像散而引起的。

在下一步实验中, 我们将选用大功率抽运源, 同时优化 Nd : YAG 晶体的长度, 来增加激光器的输出功率, 同时, 优化腔镜之间的角度及光斑在凹面镜的位置来减小像差和使用稳频系统减小激光器的频率漂移。

参考文献：

[ 1 ] ZHANG Jing , ZHANG Kuan - shou , WANG Run - lin , et al . All - solid - state Nd : YVO<sub>4</sub> Ring laser of single - frequency Operation [ J ] . *Chinese Journal of Lasers* , 2002 , **27** ( 8 ) : 694 - 696 .

[ 2 ] KELLNER T , HEINE F , HUBER G . Efficient laser performance of Nd : YAG at 946 nm and intracavity frequency doubling with LiIO<sub>3</sub> ,  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>5</sub> , LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> [ J ] . *Appl Phys B* , 1997 , **65** ( 6 ) : 789 - 792 .

[ 3 ] CHEN X , LUO Z , HUANG Y . Modeling of the self - sum - frequency mixing [ J ] . *Laser* , 2001 , **18** ( 5 ) : 646 - 656 .

[ 4 ] CLARKSON W A , KOCH R , HANNA D C . Room - temperature diode - bar - pumped Nd : YAG laser at 946 nm [ J ] . *Optics Letters* , 1996 , **21** ( 10 ) : 737 - 739 .

[ 5 ] LINDSAY I D , EBRAHIMZADEH M . efficient continuous - wave and Q - switched operation of a 946 nm Nd : YAG laser

- pumped by an injection – locked broad – area laser [ J ]. *Appl Opt* , 1998 , **37** ( 18 ) : 3961 – 3970.
- [ 6 ] TSUNEKANE M , TAGUCHI N , INABLE H. Efficient 946 nm laser operation of a composite Nd : YAG rod with undoped ends [ J ]. *Appl Opt* , 1998 , **37** ( 24 ) : 5713 – 5719.
- [ 7 ] RISK W P , LENTH W. Room – temperature , continuous – wave , 946 nm Nd : YAG laser pumped by laser diode arrage and intracavity frequency doubling to 473 nm [ J ]. *Opt Lett* , 1987 , **12** ( 12 ) : 993 – 995.
- [ 8 ] MATTHEWS D G , CONRAY R S , SINCLAIR B D , *et al.* Blue microchip laser fabricated from Nd : YAG and KNbO<sub>3</sub> [ J ]. *Opt Lett* , 1996 , **21** ( 3 ) : 198 – 200.
- [ 9 ] CZERANOWAKY C , HEUMANN E , HUBER G. ALL – solid – state continuous – wave frequency – doubled Nd : YAG – BiBO laser with 2.8 W output power at 473 nm [ J ]. *Opt Lett* , 2003 , **28** ( 6 ) : 432 – 434.
- [ 10 ] BOSENBERG W R , ALEXANDER J I , MYERS L E , *et al.* 2.5 W continuous – wave , 629 nm solid – state laser source [ J ]. *Opt Lett* , 1998 , **23** ( 3 ) : 207 – 209.
- [ 11 ] BEAR T. Large – amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode – pumped intracavity – doubled Nd : YAG laser [ J ]. *J Opt Soc Am B* , 1986 , **3** ( 9 ) : 1175 – 1180.
- [ 12 ] ANTHON D W , SIPES D L , PIER T J , *et al.* Intracavity Doubling of cw Diode – Pumped Nd : YAG laser with KTP , IEEE [ J ]. *Journal of Quantum Electronics* , 1992 , **28** ( 4 ) : 1148 – 1152.
- [ 13 ] LIU Y , LI G , CHEN M , *et al.* Theoretical analysis and optimum experimental design of LD pumped quasi – three – level system [ J ]. *Laser Journal* , 2000 , **21** ( 3 ) : 9 – 11 ( in chinese ).
- [ 14 ] ZHENG Q , JIANG Y L , QIAN L S. Research on the Polarization of a LD – pumped Nd : YAG/Cr : YAG Laser [ J ]. *Laser & Infrared* , 2002 , **32** ( 4 ) : 248 – 249 ( in Chinese ).
- [ 15 ] ZHENG Q , XUE Q H , WANG J Y. Research of All – Solid – State Green , Blue Laser of Single – frequency Operation [ J ]. *Laser Technology & Application* , 2003 , **5** ( 3/4 ) : 20 – 23 ( in Chinese ).

## All – solid – state Blue Laser of Single – frequency Operation End – Pumped by Diode Laser

ZHENG Yaohui , ZHANG Kuanshou

( *The State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices , Insititute of Opto – Electronics ,  
Shanxi University , Taiyuan 030006 , China* )

**Abstract** : A 946 nm Nd : YAG laser pumped by a laser diode was obtained using four mirrors ring resonator. the laser was single – frequency operated by using a TGG and a half – wave plate acted as optical diode in the cavity. when intracavity – frequency – doubled by a LBO crystal , 12 mw blue laser and 13 mw infrared laser can be obtained.  $M^2$  of the laser beam is 1.02 in x direction and 1.14 in y direction and asymmetry is 1.062 only to the astigmatism of the ring cavity. the intantly fluctution and frequency shift of the laser output are less than  $\pm 1.5\%$  and better than  $\pm 5.4$  MHz , respetively , when the laser is free running.

**Key words** : single – frequency ; intracavity frequency – doubled ; ring laser

作者: 郑耀辉, 张宽收  
作者单位: 量子光学与光量子器件国家重点实验室; 山西大学光电研究所, 山西, 太原, 030006  
刊名: 量子光学学报 **ISTIC** **PKU**  
英文刊名: ACTA SINICA QUANTUM OPTICA  
年, 卷(期): 2004, 10(1)  
被引用次数: 3次

## 参考文献(15条)

1. Zhang Jing;ZHANG Kuan-shou;WANG Run lin All-solid-state Nd:YVO4 Ring laser of single-frequency Operation 2002(08)
2. Kellner T;HEINE F;HUBER G Efficient laser performance of Nd: YAG at 946 nm and intracavity frequency doubling with LiIO<sub>3</sub>,  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> 1997(06)
3. Chen X;LUO Z;Huang Y Modeling of the self-sum-frequency mixing[外文期刊] 2001(05)
4. Clarkson W A;KOCH R;HANNA D C Room-temperature diode-bar-pumped Nd: YAG laser at 946 nm 1996(10)
5. LINDSAY I D;EBRAHIMZADEH M efficient continuous-wave and Q-switched operation of a 946 nm Nd:YAG laser pumped by an injection-locked broad-area laser[外文期刊] 1998(18)
6. Tsunekane M;TAGUCHI N;INABLE H Efficient 946 nm laser operation of a composite Nd:YAG rod with undoped ends[外文期刊] 1998(24)
7. Risk W P;LENTH W Room-temperature, continuous-wave, 946 nm Nd: YAG laser pumped by laser diode arrage and intracavity frequency doubling to 473 nm 1987(12)
8. Matthews D G;CONRAY R S;SINCLAIR B D Blue microchip laser fabricated from Nd: YAG and KNbO<sub>3</sub> 1996(03)
9. CZERANOWAKY C;HEUMANN E;HUBER G ALL-solid-state continuous-wave frequency-doubled Nd: YAG-BiBO laser with 2.8 W output power at 473 nm[外文期刊] 2003(06)
10. Bosenberg W R;ALEXANDER J I;MYERS L E 2.5 W continuous-wave, 629 nm solid-state laser source 1998(03)
11. BEAR T Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd: YAG laser 1986(09)
12. ANTHON D W;SIPES D L;PIER T J Intracavity Doubling of cw Diode-Pumped Nd: YAG laser with KTP, IEEE 1992(04)
13. Liu Y;LI G;CHEN M Theoretical analysis and optimum experimental design of LD pumped quasi-three-level system[期刊论文]-激光杂志 2000(03)
14. Zheng Q;JIANG Y L;QIAN L S Research on the Polarization of a LD-pumped Nd:YAG/Cr:YAG Laser[期刊论文]-激光与红外 2002(04)
15. Zheng Q;XUE Q H;Wang J Y Research of All-Solid-State Green, Blue Laser of Single-frequency Operation 2003(05)

## 本文读者也读过(5条)

1. 侯惠民. HOU Hui-min 全固态准连续宽调谐激光器研究[期刊论文]-激光与红外2009, 39(6)
2. 臧二军. 曹建平. 李成阳 半非平面单块固体环形激光器研究[期刊论文]-现代测量与实验室管理2004, 12(1)

3. [张百钢](#), [姚建铨](#), [路洋](#), [纪峰](#), [张铁犁](#), [徐德刚](#), [王鹏](#), [徐可欣](#), [Zhang Bai-Gang](#), [Yao Jian-Quan](#), [Lu Yang](#), [Ji Feng](#), [Zhang Tie-Li](#), [Xu De-Gang](#), [Wang Peng](#), [Xu Ke-Xin](#) [抽运光角度调谐准相位匹配光学参量振荡器的研究](#)[期刊论文]-[物理学报](#)2006, 55(3)
4. [俞侃](#), [刘文](#), [黄德修](#), [黄华茂](#), [YU Kan](#), [LIU Wen](#), [HUANG De-xiu](#), [HUANG Hua-mao](#) [角度调谐滤光片的膜系优化设计算法](#)[期刊论文]-[中国激光](#)2007, 34(9)
5. [林洪沂](#), [苗杰光](#), [檀慧明](#), [苏少昌](#), [崔铁成](#), [郭劲](#), [Lin Hongyi](#), [Miao Jieguang](#), [Tan Huiming](#), [Su Shaochang](#), [Cui Tiecheng](#), [Guo Jin](#) [外腔式宽调谐被动调QNd:YVO<sub>4</sub>/PPMgLN光学参量振荡器](#)[期刊论文]-[强激光与粒子束](#)2010, 22(1)

#### 引证文献(3条)

1. [巩轲](#), [吴克瑛](#), [何淑芳](#), [霍玉晶](#) [角锥型全固态非平面环形激光器473 nm单频运转](#)[期刊论文]-[光子学报](#) 2009(12)
2. [王垚廷](#), [周倩倩](#), [李渊骥](#), [刘建丽](#), [张宽收](#) [输出770 mW的全固态连续单频蓝光激光器](#)[期刊论文]-[中国激光](#) 2009(7)
3. [王守鹏](#) [高功率全固态可调谐KBe<sub>2</sub>B<sub>3</sub>O<sub>9</sub>蓝光激光输出特性的研究](#)[学位论文]硕士 2006

引用本文格式: [郑耀辉](#), [张宽收](#) [LD端面抽运的全固化单频蓝光激光器](#)[期刊论文]-[量子光学学报](#) 2004(1)