

文章编号: 1001-3806(2005)03-0291-04

发展中的 LD 抽运调 Q 钕玻璃激光器

路英宾, 卿光弼*, 兰 戈
(西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要: 介绍了二极管抽运调 Q 钕玻璃激光器的发展过程、发展水平和发展趋势, 主要包括: 钕玻璃激光材料、调 Q 技术、抽运系统。钕玻璃材料向高离子掺杂浓度方向发展; 双侧面对称抽运方式可以提高抽运效率的同时还可以减少材料的热畸变; $\text{Co}^{+2}:\text{MgAlO}_4$ 晶体发展为最合适的被动调 Q 材料; 激光器高重复频率运转需要精确的温度控制。最后, 探讨了该课题进一步发展要解决的问题。

关键词: 钕玻璃激光器; LD 抽运; 调 Q 技术; 人眼安全

中图分类号: TN248.1+2 **文献标识码:** A

Developing diode-pumped Q-switched erbium glass laser

LU Ying-bin, QING Guang-bi, LAN Ge
(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract The development, research level and developed trend of LD pumped Q-switched Er glass laser are introduced. The following aspects are included: erbium glass laser material, Q-switched technology and pumped system. High ion dopant concentration is the development trend of erbium glass. Both-sides symmetry pump can improve efficiency and reduce glass materials thermal aberration. $\text{Co}^{+2}:\text{MgAlO}_4$ crystal has recently become more popular passive Q-switched material. Precision in temperature control is needed when the laser operates at high repeat frequency. Finally, some questions to be solved for its further development are discussed.

Key words erbium glass laser; diode pumped Q-switched; eye safe

引 言

以钕玻璃为激活介质的激光器能发射出 1.54 μm 附近的激光。该波段的光为人眼最安全波段的光, 且穿透烟雾能力强和处于通信窗口^[1], 因此, 钕玻璃激光器被广泛地应用于人眼安全激光测距/目标指示、军事和光纤通信^[2-5]。

钕玻璃激光器的发展起于 1965 年, 此后受到广泛关注, 90 年代初, 随着半导体激光器抽运技术的发展, LD 抽运技术应用于钕玻璃激光器, 大大地推动了这个课题的发展。以后陆续出现了窄线宽输出、单模输出及单频输出、调 Q 及锁模输出^[6-8]。近年的研究热点是微片化、高重复频率化和大功率化。与钕光纤激光器相比, 钕玻璃激光器具有体积小、成本低的优点。同时, 钕玻璃激光器和能产生 1.54 μm 人眼安全的喇曼频移及光参量振荡技术各有优势, 并驾齐驱, 竞相发展^[9]。如果采用 LD 抽运方式, 钕玻璃激光器的重复频率、脉冲能量、转换效率就会得到很大提高, 其优势

将会更加突出。

目前, 从事 1.54 μm 钕玻璃激光器研究的单位中比较突出的有意大利 LAPORTA 教授领导的科研小组和美国的 Kiger 公司。前者以实验室研究为主, 后者更侧重于产品的开发^[10]。国内的西南技术物理研究所、上海光机所、电子部 11 所、南开大学等单位也对钕玻璃材料、调 Q 技术、LD 抽运 CW 输出等不同的专题进行了一定程度的研究, 但是研究和水平不高, 甚至对 LD 抽运调 Q 钕玻璃激光器的整体研究尚属空白。

1 钕玻璃材料的研究

国内研制钕玻璃材料的单位有西南技术物理研究所和上海光机所, 其产品热性能差、阈值高, 质量与国外的有一定差距。这里只就国外的情况作一些阐述。

迄今为止, 磷酸盐是最好的基质材料^[11, 12]。灯抽运的材料需要 Cr, Yb, Er 共掺^[13], LD 抽运的材料只需要 Yb, Er 共掺即可, Yb 和 Cr 都是起敏化作用。

一般情况下, Er^{+3} 的质量在 Er_2O_3 的 2% ~ 5% (或者 Er^{+3} 离子浓度在 $2 \times 10^{19} / \text{cm}^3 \sim 5 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 之间), Er^{+3} 只有足够低才能产生合理的激发阈值。 Er^{+3} 为三能级系统, 在达到阈值之前必须要大约 60% 的离

作者简介: 路英宾 (1978-), 男, 硕士研究生, 主要从事固体激光器件的研究工作。

* 通讯联系人。Email: gxcr123@126.com

收稿日期: 2004-02-26 收到修改稿日期: 2004-04-14

子得到激发,另一方面, Er^{+3} 的离子浓度也必须足够高,以便从 Yb^{+3} 到 Er^{+3} 的能量转移效率比较高^[14]。所以,Er玻璃中 Yb^{+3} 的离子浓度是 $1.5 \times 10^{21} / cm^3 \sim 5 \times 10^{21} / cm^3$, Er^{+3} 的离子浓度为 $10^{19} / cm^3$ 量级^[15]。但是高掺杂离子浓度的材料无疑有如下优点: (1) 在小的长度内有高的抽运效率; (2) 单位体积内的高的能量存储; (3) 单位长度的高增益; (4) 稀土离子之间的高的能量转移效率。

在 Er 和 Yb 共掺磷酸盐玻璃中,抽运能量首先被 Yb^{+3} 吸收,再转移到 Er^{+3} 。能量的吸收和转移见图 1。 Yb^{+3} 吸收 900nm ~ 1000nm 的抽运光,从 $^2F_{7/2}$ 态跃迁到 $^2F_{5/2}$ 态,激发态寿命为 2ms。能量无辐射的从 $^2F_{5/2}$ 态以共振转移的方式转移到 Er^{+3} 的 $^4I_{1/2}$ (大约 500μs),再快速 (小于 1μs) 的无辐射衰变到 $^4I_{3/2}$ 态^[16], Er^{+3} 的 $^4I_{3/2}$ 态的寿命为 8ms。1.54μm 的激光辐射就是由 Er^{+3} 从 $^4I_{3/2}$ 态转移到 $^4I_{5/2}$ 态产生的。

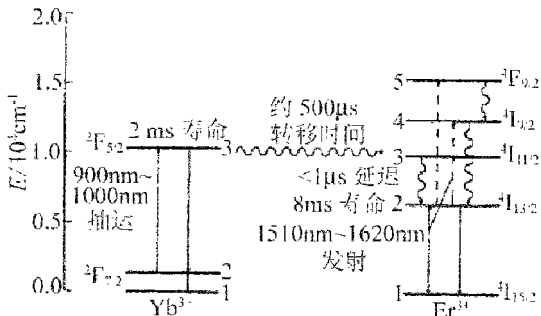


图 1 Yb^{+3} 和 Er^{+3} 的能量吸收和转移过程

掺 Yb^{+3} 磷酸盐玻璃的吸收谱线为图 2。主要的吸收波长落在 915nm ~ 980nm, 吸收峰值为 976nm。

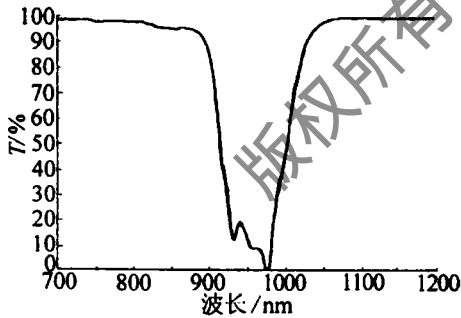


图 2 掺 Yb^{+3} 磷酸盐玻璃的吸收谱

基于微型激光器高能量储存能力和高单位尺寸增益的材料需要,美国的 RUKUN 等人对高 Yb^{+3} 离子浓度的材料进行了研究。 Yb^{+3} 和 Er^{+3} 之间的能量转移效率可表达为: $E_{eff} = K_{ET} [Er] / K$, 其中, $K = K_{Yb} + K_{ET} [Er]$, $K_{ET} = 9247s^{-1} / 1\%$ (表示 Er_2O_3 质量分数为 1% 时的传输时间的倒数), $[Er]$ 为材料中 Er_2O_3 的质量分数, $K_{Yb} = 499.04s^{-1}$ 。如在 Yb_2O_3 和 Er_2O_3 质量分数分别为 19% 和 0.5% 的磷酸盐中, Yb^{+3} 和 Er^{+3} 之间的能量转移效率为 90%, 与理论估算值一致,但当用连续抽运时,两者间的能量传递效率降到 80% 以下^[17]。

当今能生产高质量铒玻璃材料的有俄罗斯无线电工程和电子学研究所和美国的 Kigre 公司。他们的产品阈值达到几个焦耳,热性能比较好。其中前者 LGS-DE-glass 的热膨胀系数为 $90 \times 10^{-7} K^{-1}$, 热导率为 $0.75W / (m \cdot K)$, 适合 LD 抽运^[18]。俄罗斯的 KGSS 也已经商业化。美国 Kigre 公司的 QE-7S 和 QE/Er 玻璃是最风靡世界的材料。

2 对调 Q 技术的研究

国内在调 Q 方面也取得了一些结果:西南技术物理研究所用 $Co^{2+} : Al_2O_3$ 可饱和吸收体 Q 开关,获得了 10mJ 85ns 的脉冲^[19], 该课题组还用单 45°LN 晶体电光调 Q 得到了 22mJ 72ns 的巨脉冲^[20]。华北光电技术物理研究所的裴博等利用 $U^{2+} : CaF_2$ 为被动 Q 开关获得脉宽 53.9ns 单脉冲 10.5mJ 的脉冲,重复频率 5Hz 这是目前国内最好的调 Q 结果^[21]。但国内的结果与国外还有一段差距。

激光测距需要纳秒量级高峰值功率的激光脉冲,皮秒量级的脉冲在光纤通信上有很大的应用潜力。

铒玻璃的被动调 Q 研究是最活跃,发展最快的方向。被动调 Q 材料应该有相对长的激发态寿命,大的吸收截面,小的饱和损耗,高的破坏阈值。

人们对掺 Co^{2+} 晶体用于调 Q 铒玻璃激光器研究最多: $Y_3Al_2D_{12}$, $Y_3Sc_2Ga_8O_{12}$, $ZnSe$, $LaMgAl_1O_{19}$, $MgAl_2O_4$, LGa_5O_8 ^[22-27]。据报道, $Co^{2+} : MgAl_2O_4$ 是当今最为流行的 1.54μm 铒玻璃激光器的被动调 Q 材料^[28]。表 1 可以说明它的优点。

表 1 $U^{2+} : CaF_2$ 和 $Co^{2+} : MgAl_2O_4$ 调 Q 结果比较^[29]

调 Q 材料	样品厚度/mm	输出耦合/%	抽运能量/mJ	调 Q 输出能量/mJ	调 Q 脉宽/ns	模式
CaF_2	0.5	90	246	0.317	15.8	TEM_{00}
CaF_2	0.7	90	288	0	0	0
CaF_2	0.3	85	131	0.019	700	TEM_{00}
CaF_2	0.5	85	228	0.232	17	TEM_{10}
Co^{2+}	0.7	85	219	0.5	10	TEM_{10}

不过,利用 $Co^{2+} : LaMgAl_1O_{19}$ 可以得到小于 10ns 的脉冲^[30], 而且利用其双折射特性可以获得激光雷达需要的双频脉冲^[31]。其它调 Q 方式也在发展:利用破坏受抑全内反射 (FTIR) Q 开关可以获得 10mJ, 40ns, 50Hz 的脉冲;用可饱和半导体吸收镜 (SESAM) 用作被动调 Q 开关获得了 84ns, 1kHz 的脉冲^[32]。

由于 BBO 的低插入损耗和高的激光破坏阈值,也被用于电光调 Q 的 1.54μm 铒玻璃激光器,并且得到了理想的结果。美国 Kigre 公司的 RUKUN 等人得到的数据和被动调 Q 的比较,见表 2。

BBO 最佳结果是 1MW, 30mJ, 30ns 的 TEM_{00} 模脉

表 2 电光与被动调 Q 比较

调 Q 方式	LD 阵列 /bar	抽运电流 /A	抽运脉宽 /ms	抽运能量 /J	输出能量 /mJ	脉冲宽度 /ns
被动	48	50	1.00	4.67	3.5	43
被动	24	50	2.45	6.34	4.0	42
被动	24	50	2.50	6.52	3.5	36
电光	24	50	2.10	5.39	8	35

冲运转^[33]。其缺点是工作电压较高,因此,产生对整个电路较大的干扰。

虽然各种方式的调 Q 都得到了一定的结果,但用于 1.54μm 钇玻璃激光器的被动调 Q 技术有绝对优势。

3 抽运系统设计

LD 抽运技术使得钇玻璃激光器应用于人眼安全雷达和高重复频率激光测距成为可能。钇玻璃有很低的导热能力,在灯抽运情况下使得其重复频率不会满足要求。与灯抽运相比,LD 抽运有更高的效率,产生更少的废热,且有更好的光束质量。Yb³⁺和 Er³⁺共掺的磷酸盐的吸收峰在 976nm,故要求抽运波长在 980nm 左右,因而用脉冲或准连续 InGaAs 半导体二极管激光器或阵列较为合适,其发射波长为 950nm ~ 980nm。

抽运方式有端面抽运和侧面抽运。端面抽运可以使得抽运模和腔体模有比较好的匹配,且输出光束质量比较高,为器件的微型化提供了可能,但是其系统受热透镜效应影响较大。图 3 为一个端面抽运原理图。

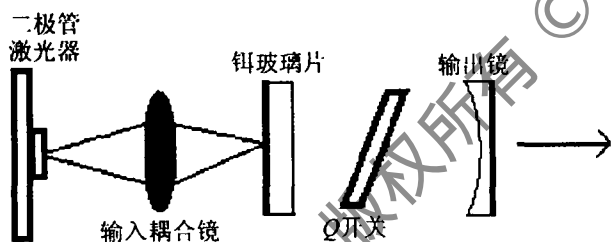


图 3 端面抽运基本结果

这种方式,要求抽运光在空间分布均匀。输入准直系统用锥型的透镜导管去扩展快轴的光,压缩慢轴的光,从而达到均匀抽运。侧面抽运的效率不如端面抽运高,但是易于确定其抽运强度的大小,所以适用于高功率系统。侧面抽运发射表面的大纵横比能够很容易地与激光介质匹配,大面积的散热也比较容易。侧面抽

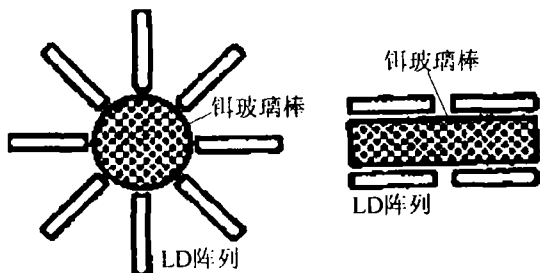


图 4 侧面抽运的基本结构

运结构见图 4。

日本发展了如图 5 所示的结构:用 1.7mm × 1.7mm × 10mm 条形钇玻璃做介质^[34],用平行于棒的钼薄片做棒的散热片,用水冷的铝片做 LD 阵列的散热片,抽运光通过一个相似于透镜导管的棱镜耦合进入激光介质。其特点是抽运效率和散热效率都很高。

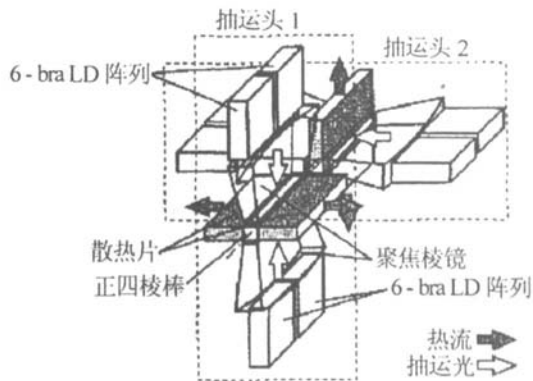


图 5 钇玻璃激光器的结构

图 6 是 Kigre 公司发展的小型 LD 抽运调 Q 钇玻璃激光器^[29]。这个装置由两个 1cm 的 LD 阵列以“蝴蝶状”侧面抽运 1.3mm × 12mm 钇玻璃棒。这种结构有足够的抽运强度和序列增益,适合于调 Q 运转。

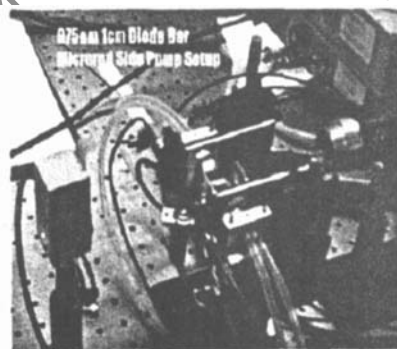


图 6 小型钇玻璃激光器

俄罗斯的 BOUTCHENON 认为提高钇玻璃激光器效率的关键因素是正确的抽运方式和合适的光腔结构^[35]。LEVOSHKIN 等人以局部速率方程和光线追迹技术相结合的数学模型对 LD 抽运的 Yb、Er 共掺磷酸盐玻璃激光器进行了分析。用相对抽运效率表征一个抽运系统,并发展了图 7 所示的腔型。

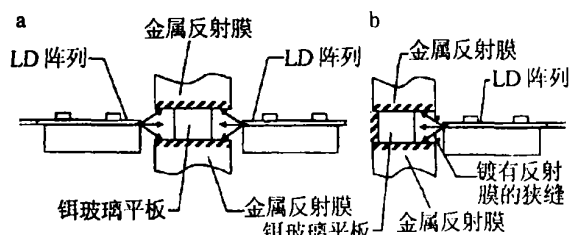


图 7 矩形平板的抽运^[15]

LEVOSHKIN 等人用类似于图 7a^[36]的抽运结构,设计成腔长为 35mm ~ 60mm,输出耦合为 96% 的平-凹谐振腔,其中全反射镜曲率为 500mm ~ 1000mm。LD 线阵抽运 1mm × 1mm × 10.5mm 钇玻璃棒,在抽运

脉冲为 32W, 8ms 时, 长脉宽输出能量为 11.2mJ, 这种结构最大优点时有利于系统散热和均匀抽运, 适合高重复频率运转。采用图 8a 结构有更高的抽运效率, 用输出 38W, 5.2ms 的 LD 为抽运源时, 自由运转输出达 25.6mJ。采用图 8b 的结构得到如下结果^[36]: 最大光-光效率达 2.5%, 最大斜率效率为 7.1%, 其重复频率只有 1Hz。当增加重复频率时, 其输出水平会有降低。据报道, 这是目前侧面抽运最佳结果。

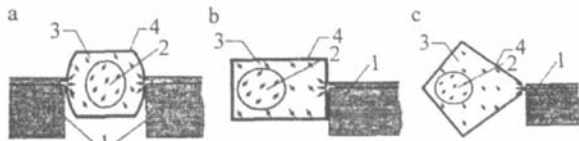


图 8 圆柱棒的抽运^[15]

1—LD 阵列 2—钕玻璃棒 3—抽运腔 4—反射膜

介质温度控制系统用重水液冷和金属散热片热传导较多, 对 LD 进行可靠的温度控制也很关键。

4 结束语

人眼安全的钕玻璃激光器将在军事和民用领域获得广泛应用。为得到高效、高重复频率、高能量、低脉冲宽度的钕玻璃激光器, 还在于以下几个方面的突破性发展: (1) 低阈值、高导热率、高破坏阈值的钕玻璃材料; (2) 合理的抽运光耦合方式和抽运方式; (3) 稳定、可靠的温度控制技术; (4) 理想的被动调 Q 材料; (5) 高光束质量的谐振腔技术。

以上几点都有很大的发展空间。随着技术的不断进步, 钕玻璃激光器会发展到令人满意的程度的!

参 考 文 献

[1] FROMZEL V, KUCHMA I, SET L *et al* Efficiency and tuning of the erbium-doped glass lasers [J]. *SPIE*, 1991, 1839: 166~172

[2] HAMLIN S, MYERS J D, MYERS M J *et al* High repetition rate Q-switched erbium glass lasers [J]. *SPIE*, 1981, 1419: 100

[3] ANSILE B, J A review of the fabrication and properties of erbium doped fibers for optical waveguides [J]. *IEEE J Lightwave Technol*, 1991, 9: 220

[4] LAPORTA P, TECCHIO S, LONGHI S *et al* Erbium-ytterbium micro lasers optical properties and lasing characteristics [J]. *Opt Mater*, 1999, 11: 269~288

[5] WU R K, MYERS J D, MYERS M J *et al* Diode pumped miniature eye-safe laser Q-switched by $U^{+2}:\text{CaF}_2$ and $\text{Co}^{+2}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ [J]. *SPIE*, 2002, 4630: 94~95

[6] TACCHEO S, LAPORTA P, LONGHI S *et al* Diode pumped bulk erbium-ytterbium lasers [J]. *Appl Phys*, 1996, B63(5): 425~436

[7] LAPORTA P, LONGHI S, TACCHEO S *et al* 10kHz linewidth diode-pumped Er:Yb glass laser [J]. *Electron Lett*, 1992, 28(22): 2067~2069

[8] TANGYU E, POCHOCCE J P, FEUGNET G *et al* Mechanically Q-switched codoped Er:Yb glass laser under Ti:sapphire nanosecond pumping [J]. *Electron Lett*, 1995, 31(6): 458~459

[9] 钟鸣, 张向阳, 韩凯 *et al* 微型钕玻璃激光器研究 [J]. *发光学报*, 1996, 16: 584~586

[10] 柳祝平, 胡丽丽, 戴世勋 *et al* 激光二极管抽运的 Er^{+3} , Yb^{+3} 共

掺磷酸盐玻璃激光器 [J]. *发光学报*, 2002, 22(9): 1129~1131

[11] WU R K, MYERS J D. Characteristics of diode pumping erbium yttrium doped glass laser [J]. *SPIE*, 1997, 2986: 16~18

[12] JIANG S, MYERS J D, RHONEHOUSE D L. Laser and thermal performance of a new erbium doped phosphate laser glass [J]. *SPIE*, 1999, 2138: 166~174

[13] 晓晨. 新的高效钕玻璃 [J]. *激光与光电子学进展*, 1999(11): 35

[14] 克希耐尔 W. 固体激光工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 58

[15] LEVOSHKIN A, MONTAGNE J E. Efficient diode pumping for Q-switched Yb:Er glass lasers [J]. *Appl Opt*, 2001, 40(18): 3023~3032

[16] ALEKSEEV N E, GAPONTOV V P, ZHABOTINSKI M E *et al*. Laser phosphate glasses [M]. Moscow: Nauka Publishing, 1983: 25

[17] WU R K, MYERS J D, MYERS M J *et al*. Fluorescence lifetime and 980nm pump energy transfer dynamics in erbium and ytterbium codoped phosphate laser glasses [J]. *SPIE*, 2003, 4968: 11~17

[18] IZYNEEV A A, SADOVSKI P I. Family of highly efficient erbium-doped phosphate glasses [J]. *SPIE*, 2000, 4350: 62~67

[19] 高剑波, 陈德章, 李名强 *et al*. 钕玻璃激光被动 Q 开关实验研究 [J]. *激光技术*, 1999, 23(6): 381~383

[20] 陈德章, 高剑波, 卿光弼 *et al*. 54μm 钕玻璃激光光电调 Q 技术 [J]. *激光技术*, 2001, 25(2): 95~96

[21] 裴博, 王克强, 包照昌, 格图 *et al*. 被动 Q 开关的钕玻璃激光器特性研究 [J]. *激光与红外*, 1999, 29(4): 209~211

[22] WU R K, CHEN T L, MYERS J D *et al*. Multipulses behavior in erbium glass Q-switched cobalt spinel [J]. *SPIE*, 2003, 5086: 21~25

[23] WU R K, MYERS J D, MYERS M J. $\text{Co}^{+2}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ crystal passive Q-switching performance at 1.34, 1.44 and 1.54μm [J]. *SPIE*, 2000, 3929: 42~45

[24] CAMARGO B, STULTZ R D, BRNBAUM M. $\text{Co}^{+2}:\text{YSGG}$ saturable absorber Q-switch for infrared erbium lasers [J]. *Opt Lett*, 1995, 20: 339~341

[25] PDLIPENSKY A V, STUITS V G, KALESHOV N V *et al*. $\text{Cr}^{+2}:\text{ZnSe}$ and $\text{Co}^{+2}:\text{ZnSe}$ saturable-absorber Q-switched for 1.54μm Er glass lasers [J]. *Opt Lett*, 1999, 24: 960

[26] YUMASHEV K V, DENISOV I A, FOSNOV N N *et al*. Nonlinear spectroscopy and passive Q-switching operation of a $\text{Co}^{+2}:\text{LaMgAl}_9\text{O}_{19}$ [J]. *JOSA*, 1999, B16: 2189~2194

[27] DENISOV I A, DEMCHUK M I, KALESHOV N V *et al*. $\text{Co}^{+2}:\text{LaGa}_5\text{O}_8$ saturable absorber passive Q-switch for 1.34μm $\text{Nd}^{+3}:\text{YAlO}_3$ and 1.54μm $\text{Er}^{+3}:\text{glass}$ lasers [J]. *APL*, 2000, 77: 2455~2457

[28] YUMASHEV K V. Saturable absorber $\text{Co}^{+2}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ crystal for Q-switching of 1.34μm $\text{Nd}^{+3}:\text{YAlO}_3$ and 1.54μm $\text{Er}^{+3}:\text{glass}$ lasers [J]. *Appl Opt*, 1999, 38(30): 6343

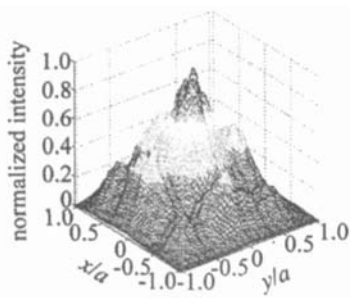
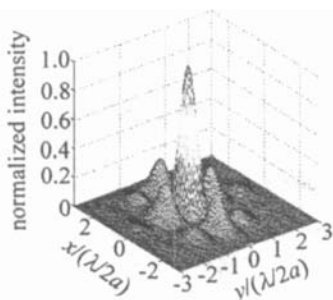
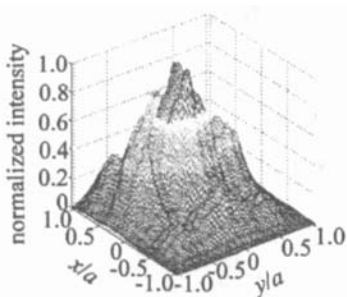
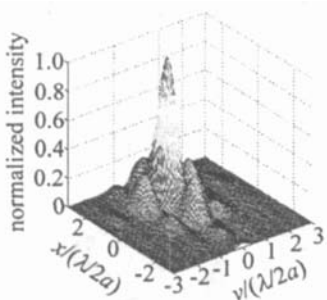
[29] WU R K, MYERS J D, MYERS M J. Diode pumped miniature eye-safe laser Q-switched by $U^{+2}:\text{CaF}_2$ and $\text{Co}^{+2}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ [J]. *SPIE*, 2002, 4630: 383~388

[30] THONY P, FERRAND B, MOLVA E. 1.55μm passive Q-switched microchip laser [J]. *OSA Trends in Optics and Photonics Series*, 1998, 19: 150~153

[31] LAN D, BRUNELM, BRETENA KERF *et al*. Two-frequency Er:Yb glass microchip laser passively Q-switched by a $\text{Co}^{+2}:\text{ASL}$ saturable absorber [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(5): 328~330

[32] HIRING R, PASCHOTTA R, FLUCK R *et al*. Passively Q-switched microchip laser at 1.55μm [J]. *JOSA*, 2001, B18(12): 1805~1812

[33] WU R K, MYERS J D, HAMLIN S J. 1Hz BBO E/O Q-switched diode pumped Er glass laser experiment [J]. *SPIE*, 1998, 3265: 70~74

Fig 6 Intensity distribution in near field for $\beta=80\mu\text{rad}$ Fig 7 Intensity distribution in far field for $\beta=80\mu\text{rad}$ Fig 8 Intensity distribution in near field for $\beta=200\mu\text{rad}$ Fig 9 Intensity distribution in far field for $\beta=200\mu\text{rad}$

极大值处也出现分裂趋势;由 $\beta=80\mu\text{rad}$ 、 $200\mu\text{rad}$ 时

的远场光强分布图 7 图 9 知,远场光强也逐渐向 x 轴正半轴偏移,其轴心偏移量分别为 $\theta=0.204\text{mrad}$ 、 0.519mrad 。同时光束发生畸变并逐渐与旁瓣相连,如前述讨论可知,此时光束质量下降,但由于 y 轴未发生倾斜,所以仍具有对称性。可以预见,当腔镜不沿特定方向倾斜时,光强分布将失去对称性,但远场光束倾斜方向与镜的倾斜方向仍将一致,这为对激光器进行准直、从而获得较理想的远场光束提供了操作依据。

3 结 论

用 Fox-L 迭代对方镜虚共焦非稳腔进行了数值计算,重构出未倾斜时及倾角 $\beta=80\mu\text{rad}$ 、 $200\mu\text{rad}$ 时近场及远场光强分布图,使得腔镜倾斜对光束影响效果变得更加直观。结果表明,腔镜倾斜将导致光束偏离理想光轴且光束畸变,光束质量下降,从而限制了激光器的实际应用。另外,激光腔镜热变形、激活介质增益分布不均匀等,也是导致光束质量下降的一个重要原因,研究工作将另文发表。

参 考 文 献

- [1] ENDO M, KAWAKAMI M, NARIK *et al*. Two dimensional simulation of an unstable resonator with a stable core [J]. Appl Opt 1999, 38 (15): 3298~ 3307.
- [2] 吕百达,马虹,罗时荣. 光学系统的失调对激光束发射性能的影响 [J]. 激光技术, 1999, 23(6): 356~ 359.
- [3] 蒋金波,程兆谷,李现勤 *et al*. 激光模式的远场特性和空间相干度的影响 [J]. 中国激光, 2001, A28(3): 220~ 224.
- [4] 程勇,王晓兵,孙斌 *et al*. 定向棱镜谐振腔的特性研究 [J]. 中国激光, 2000, A27(6): 537~ 541.
- [5] 胡亚红,邓年茂,何俊华 *et al*. 激光谐振腔自动稳定调节的一种方法 [J]. 光子学报, 2001, 30(7): 871~ 874.
- [6] 周炳琨,高以智,陈倜嵘 *et al*. 激光原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1984: 54.
- [7] 杜燕贻. 无源虚共焦腔光束特性模拟 [J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(2): 164~ 168.
- [8] 赵达尊,张怀玉 *et al*. 波动光学 [M]. 北京: 宇航出版社, 1988: 119~ 120.

(上接第 294 页)

- [34] YANAGISAWA T, ASAKA K, HAMAZU K *et al*. 11mJ 15Hz single-frequency diode pumped Q-switched Er:Yb:phosphate glass laser [J]. Opt Lett 2001, 26(16): 1262~ 1264.
- [35] BOUTCHENKOV V, KUCHMA I, LEVOSHKIN A *et al*. High efficiency

cy diode pumped Q-switched Yb:Er: glass laser [J]. Opt Commun 2002, 177: 383~ 388.

- [36] LEVOSHKIN A, PETROW A, MONTAGNE J E. High efficiency diode pumped Q-switched Yb:Er: glass laser [J]. Opt Commun 2000, 185: 399~ 405.