

文章编号: 1001-3806(2003)03-0236-04

## Nd YVO<sub>4</sub>/KTP 全固化倍频激光器的研究

郭明秀 陆雨田

(中国科学院上海光学精密机械研究所,上海,201800)

**摘要:** 介绍了两种腔型结构不同的 Nd YVO<sub>4</sub>/KTP 全固化倍频绿光激光器,对腔结构参数进行了优化计算;在相同的实验条件下,对这两种腔的输出和稳定性等特性进行了比较和深入分析,在此基础上得出结论,提出改进措施。该折叠腔方案已进入产品化阶段。

**关键词:** 绿光激光器;LD 泵浦;折叠腔

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

### Study on Nd YVO<sub>4</sub>/KTP all-solid-state frequency doubling laser

Guo Mingxiu, Lu Yutian

(Shanghai Institute of Optics & Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800)

**Abstract:** Nd YVO<sub>4</sub>/KTP all-solid-state frequency doubling lasers with two kinds of cavity structure are introduced, and their parameters are optimized based on calculation. On the same experiment conditions, their output and stability are compared and analyzed completely, and conclusions are deduced. Then, some better techniques are put forward. Based on the analyses, some products are made by the folded cavity.

**Key words:** green laser; LD pump; folded cavity

## 引言

近年来,因半导体激光器 LD (laser diode) 及其阵列的发展,各国掀起了一个半导体泵浦固体激光器 DPSSL (diode pumped solid-state laser) 研究热潮。

DPSSL 不仅能完成传统固体激光器的各种功能,还有下列优点:总体转换效率高;具有较高的频率稳定性和更窄的线宽;能得到极限衍射光束;可靠性高,寿命长;结构简单。532nm 处在人眼最敏感的光波长区域,较适合人眼观察;血液易吸收绿光;绿光易激发某些特殊材料,故绿光广泛应用在激光娱乐、准直和指示、医疗、光盘存储、海底形貌探测、机场导航、彩色打印与投影电视、致盲武器等方面。

国内外有很多研究机构已有绿光产品问世,国内公司有长春新产业公司、上海冠威、湖北光通、武汉凌云等以及一些高校和研究所;国外如相干公司,SDL, HIGH-POWER 等。但是,所有这些产品输出绿光功率主要集中在 200MW 以下或 2W 以上,中间功率产品相对较少,因此,有必要开发这一功率段

的产品。目前普遍认为全固体绿激光器的最佳组合是 Nd YVO<sub>4</sub>/KTP,随着 LD 和 DPSSL 技术的不断发展, Nd YVO<sub>4</sub>/KTP 绿激光器的成本在不断下降,质量不断提高,将会得到愈来愈广泛的应用。

## 1 理论分析和计算

### 1.1 腔型的选择

实验中分别采用图 1 直线腔和图 2 折叠腔<sup>[1]</sup>两种腔型。其中的泵浦耦合结构以及激光晶体和倍频晶体是相同的,这样有利于对两种腔型进行比较。

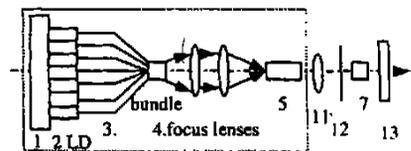


Fig. 1 Nd YVO<sub>4</sub>/KTP frequency doubling green laser line cavity device sketch

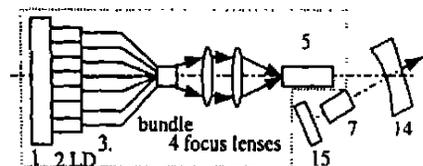


Fig. 2 Nd YVO<sub>4</sub>/KTP frequency doubling green laser folded cavity device sketch

**作者简介:** 郭明秀,女,1975 年 11 月出生。硕士。现从事 DPSSL 及 LD 光束整形的研究工作。

收稿日期:2002-08-12;收到修改稿日期:2002-10-08

## 1.2 激光晶体和倍频晶体的选择

在适合于 DPSSL 的激光晶体中, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体因其大的吸收带宽、高的吸收系数、高的增益、在 808nm 处吸收最大、在 1064nm 处增益最高、大的受激发射截面、偏振激光输出易于腔内倍频等特性而成为中小型激光器较为理想的一种工作材料。

对应于 Nd:YVO<sub>4</sub>1064nm 激光倍频, 目前最佳倍频晶体为 KTP 和 LBO。为提高 2 次谐波转换效率, 应选择非线性系数大和破坏阈值高的非线性晶体; 同时减少晶体处的束腰面积以提高基波功率密度, 均需要破坏阈值高的倍频晶体。虽然 LBO 破坏阈值高, 但 LBO 非线性系数比 KTP 晶体小很多, 且由于对温度敏感其输出功率抖动比较大; 而 KTP 具有大的工作角度和工作温度范围、小的偏离角、较高的破坏阈值等特性, 所以最后选择 KTP。

## 1.3 腔结构的计算

(1) 将 Nd:YVO<sub>4</sub> 一个端面镀膜作为腔镜, 一是因为 Nd:YVO<sub>4</sub> 表面易于镀膜, 二是为了减少使用腔镜额外引入的损耗, 三是结构简单且易于调整。

(2) 计算主要从腔内束腰半径和腔的稳定性来考虑。对于 Nd:YVO<sub>4</sub>, 腔内束腰半径应较大, 对泵浦光, 光纤芯径 400 $\mu$ m, 则激光晶体处光斑束腰半径要略微大于 200 $\mu$ m 较好。这就要求倍频晶体处光斑束腰半径要小, 这样倍频晶体上的基频光密度大; 腔的稳定性要高。

但是, 在高功率密度激光的长时间作用下, KTP 晶体会出现所谓的“灰线问题”, 导致激光输出功率下降; 同时因为 KTP 晶体端面的激光腔模较小, KTP 晶体两端的膜层较易损坏。因此, 在较大功率时必须扩大 KTP 上的基模光斑半径以降低其上的功率密度和保护膜层。KTP 长度的选择也很重要, 过短的晶体不能获得足够的 2 次谐波转换效率, 而过长的晶体又限制了腔内基波功率的提高。实验中采用较长的倍频晶体, 以获得更高的转换效率。

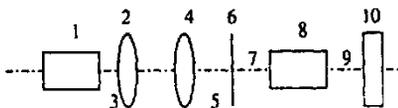


Fig. 3 Line cavity calculating model

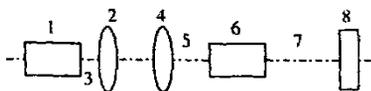


Fig. 4 Folded cavity calculating model

针对两种结构, 用软件进行了理论计算。图 1

和图 2 可分别简化为图 3 和图 4。

图 3 所示的直线腔计算模型中, 输入参数有: 1 为 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 输入晶体长度和折射率; 2 为热透镜焦距; 3 是 4 和 1 之间的距离; 4 为腔内透镜, 输入焦距; 5 为 6 和 4 之间的距离; 6 为隔离片; 7 为 4 和 8 之间的距离; 8 为 KTP 晶体, 输入晶体长度和折射率; 9 是 8 和 10 的距离; 10 为平面全反镜。图 4 所示的折叠腔计算模型中, 输入参数有: 1 为 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 输入晶体长度和折射率; 2 为热透镜焦距; 3 是 4 和 1 之间的距离; 4 为绿光输出耦合镜, 输入其焦距大小和倾斜角度; 5 为 4 和 6 之间的距离; 6 为 KTP 晶体, 输入晶体长度和折射率; 7 是 6 和 8 间的距离; 8 为全反镜, 输入其焦距大小。

两种方案中, 均取热透镜焦距为 500mm, 各光学元件参数见第 2 节。图 3 最后参数选择是: 3 为 100mm; 5 为 35mm; 7 为 6mm; 9 为 20mm。图 4 中计算全反镜 8, 发现其曲率半径对腔内束腰半径和腔的稳定性影响很小, 简单起见, 选为平面全反镜; 折叠腔的角度小于 15° 较好, 但太小系统装配调试较困难, 最后定为 15°, 3 为 150mm; 5 为 53mm; 7 为 3mm。

## 2 实验装置和结果

### 2.1 实验装置

图 1 和图 2 虚线框中的装置是一样的, KTP 也是同一块。说明如下: 1 为半导体致冷器; 2 为 LD 光纤耦合输出模块, 中心波长 808nm, 该模块由 7 个 LD 分别耦合进 7 根光纤中再并束, 由一根芯径为 400 $\mu$ m 光纤输出, 其最大输出功率 5W, 但最后实际工作时只有 4.8W; 3 为耦合光纤输出; 4 为两个焦距均为 20mm 的非球面透镜组, 第 1 个透镜将光纤输出的光束准直, 第 2 个再将其重新聚焦到 Nd:YVO<sub>4</sub> 端面上作为泵浦光, 得到均匀泵浦, 该透镜组的总体耦合传输效率约 88%; 5 为 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光晶体, 掺杂 0.7at%, 沿 a 轴切割, 一面镀 AR808nm/HR1064nm 膜做为腔镜, 另一面镀 AR1064nm 膜, 其尺寸为 3mm $\times$ 3mm $\times$ 5mm, 通光长度为 5mm; 7 为 KTP 倍频晶体, 类相位匹配,  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 23.5^\circ$ , 其尺寸为 3mm $\times$ 3mm $\times$ 5mm, 通光长度为 5mm, 其两端均镀 AR1064nm/AR532nm 双色膜; 11 为一焦距为 50mm 的聚焦透镜, 镀 AR1064nm 膜; 12 为隔离片, 镀 HR532nm/HT1064nm 膜; 13 为输出平面耦合镜, 镀 HR1064nm/HT532nm 膜, 输出透过率  $T = 6\%$ ; 14

为  $R = 100\text{mm}$  的平凹镜,其凹面镀  $7.5^\circ\text{HR1064nm}$  膜,平面镀  $7.5^\circ\text{HT532nm}$  膜,该平凹镜与主光轴倾斜  $7.5^\circ$  放置,为绿光输出镜;15 为一平面镜,其靠近 KTP 面镀  $0^\circ\text{HR1064nm}/\text{HR532nm}$  膜。Nd:YVO<sub>4</sub> 和 KTP 非通光面均用铝箔包裹,用带槽的铜散热片自然散热。

### 2.2 实验结果和讨论

采用上述两种腔结构实验结果如下:图 1 方案绿光最大输出功率曾达到  $450\text{mW}$  ( $1064\text{nm}$  光功率为  $1.8\text{W}$ ),此时泵浦光功率为  $4.2\text{W}$ ,但输出非常不稳定,在一段时间里,其输出功率很快下降  $30\%$  以上;在较长时间后,其最大输出功率下降到只有  $280\text{mW}$  ( $1064\text{nm}$  光功率为  $1.3\text{W}$ );但在短时间内输出还较稳定,其功率曲线如图 5 中 A 线所示;最后完全稳定下来只有  $80\text{mW}$  左右。图 2 方案获得了最大  $580\text{mW}$  的绿光,此时泵浦光功率为  $4.2\text{W}$ ,光光转换效率为  $13.8\%$ ,其输出功率稳定性(小于  $4\%$ )较好。绿光和泵浦光功率关系如图 5 中 B 线所示。

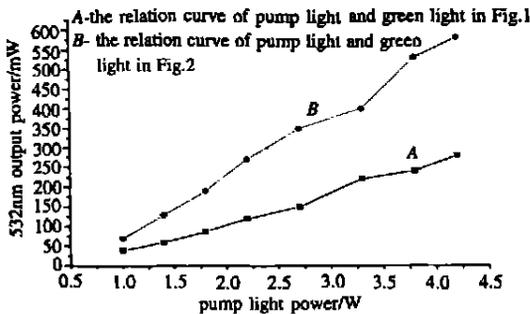


Fig. 5 532nm and pump light power relation

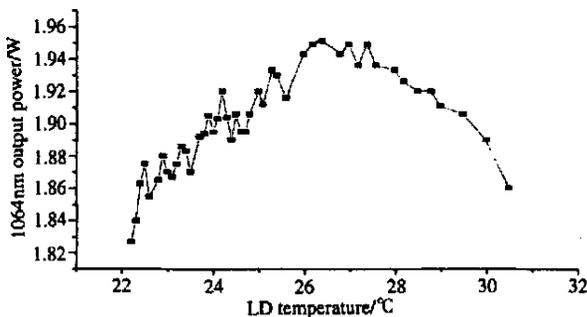


Fig. 6 The relation of 1064nm power and LD temperature

另外,在实验中测量了  $1064\text{nm}$  光输出功率和 LD 温度的关系,如图 6 所示。随着 LD 温度的变化,激光输出功率发生了一定的变化;当温度较高或较低时,功率下降的趋势很明显。可见系统工作时,对 LD 来说存在一个最佳温度范围( $27^\circ\text{C}$  左右),值得注意的是,图中峰值对应的温度范围较大,约有  $5 \sim 8^\circ\text{C}$ ,这也正说明了 Nd:YVO<sub>4</sub> 吸收谱线较宽,

同时对研究高性能的绿激光器也是十分重要的。所以,进行温控对整个系统是很有必要的。

可见无论从转换效率还是稳定性都应优先选择折叠腔。下面对实验进行分析讨论。

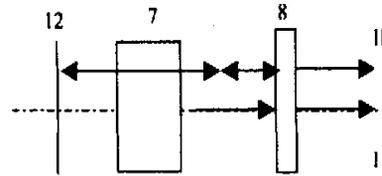


Fig. 7 532nm output in Fig. 1

(1) 两种腔的绿光输出。图 1 的绿光输出见图 7,  $532\text{nm}$  光束是基频光经过 KTP 倍频后直接输出,另一束是基频光被输出平面镜 8 反射回来再次经过 KTP 倍频后从 KTP 另一端输出反向  $532\text{nm}$ ,再由隔离片反射回来经平面镜 8 输出,由于光程不一样,两束光间的相位差是变化的,导致绿光输出不稳。实验中发现,移走隔离片后其输出功率下降,但稳定性提高了,也说明了这一点。作为一种改进措施,一美国专利用一片镀  $45^\circ\text{HR532nm}$  膜的玻璃片代替隔离片,见图 8,只让一束绿光输出,

则被玻璃片作为损耗反射掉,虽然输出功率有所下降,但稳定性提高了。图 2 折叠腔优点:一是将基频光和基频光分开,减少了 Nd:YVO<sub>4</sub> 对绿光的吸

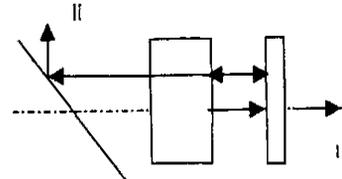


Fig. 8 532nm output in a line cavity

收;二是可同时产生两个束腰,将激光晶体和倍频晶体分别放在两个束腰处,从而实现在激光晶体所在臂上满足基频光斑略大于泵浦光斑的模匹配条件及在倍频晶体所在臂上获得较小的光腰半径,得到较大的光功率密度和倍频转换效率的目的;三是输出腔镜凹面镀有  $\text{HR1064nm}/\text{HT532nm}$  膜,而后输出镜镀有  $\text{HR1064nm}/\text{HR532nm}$  膜能实现腔内双通倍频,有效提取反向传播的倍频光,实现倍频光的单向输出;四是使腔内倍频光在被反馈到基模振荡腔之前就被引出腔外,不影响基频光在腔内的振荡,激光功率基本是普通线性腔的 2 倍。但绿光的输出实际是双向的,使效率降低,其输出功率不可能是普通线性腔的 2 倍。所以,实验中镀制高质量的光学膜层也是提高效率的一项重要措施。

(2) 造成绿光输出不稳定的原因:一是倍频晶体的温控系统精度不够;二是由于腔内各振荡纵模通

过合频所产生的非线性耦合作用导致了光能在各个纵模间不断转换使绿光输出功率波动,即所谓的“绿光问题”;三是由于 Nd:YVO<sub>4</sub> 的导热性较差,当泵浦功率超过一定值时,可能出现热透镜效应,使绿光输出功率下降;KTP 虽然采用的是位相匹配,但是也受温度影响。故 LD, Nd:YVO<sub>4</sub>, KTP 均应采取严格的温控措施。

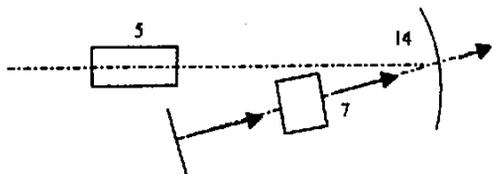


Fig. 9 532nm output of folded cavity

(3) 实验中所用的光纤束输出模块,其缺点是 7 个 LD 的波长不可能完全一致,对效率有影响。实验中也曾用 LD 经过整形后用 900 $\mu$ m 光纤耦合输出模块作为泵浦源。泵浦功率相同时,光纤束作为泵浦源时绿光输出功率较高,说明有一部分用来克服阈值的泵浦光也转换成了激光输出,但由于泵浦光场不均匀,7 个激光器分别在谐振腔内激发出 7 个激光振荡模场,它们通过衍射场耦合实现了相位相互锁定使激光器输出的光强分布呈现出对基模的

正弦或余弦函数形式的调制<sup>[2]</sup>;后者虽然泵浦光功率密度有所下降,其效率下降了,但绿光光束质量明显变好。另外,光纤对于泵浦光有退偏作用,选择光纤的长度,可得到某一个偏振方向较强或退偏的泵浦光;可用布儒斯特角放置的波片对三镜折叠腔像散补偿<sup>[3]</sup>。

### 3 结 论

研究了两种腔结构不同的 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP 全固化倍频绿光激光器,对腔结构参数进行了优化计算,在相同实验条件下,对这两种腔的输出和稳定性等进行了对比实验,并进行了深入的分析。实验结果说明,折叠腔有利于提高绿光的转换效率和输出稳定性,温控对于绿光输出稳定性有很明显的作用,并在此基础上提出了一些改进措施。折叠腔方案得到了 580mW 的绿光,且输出稳定性(4%)很好,产品的体积大小为 376mm  $\times$  218mm  $\times$  118mm。

#### 参 考 文 献

- [1] 王占山,檀慧明,余锦. 光学技术, 2001, 27(2): 153 ~ 155.
- [2] 刘宁,胡巍,廖常俊 *et al.* 中国激光, 1999, 26(2): 105 ~ 108.
- [3] 郑权,赵岭,檀慧明 *et al.* 激光杂志, 2001, 22(2): 6 ~ 7.

(上接第 177 页)

但是在计算和做实验时为了得到大的弯曲角度,要综合考虑上面得出的各种规律,同时也要考虑功率过大、板材太薄、扫描速度太小可能造成激光穿透板材。图 5 和图 6 中展示了板材朝两个方向的弯曲情况。



Fig. 6 Simulation of plant bending downwards

$P = 2000\text{W}$ ,  $D = 4\text{mm}$ ,  $v = 3\text{m/min}$ ,  $L = 40\text{mm}$ ,  $W = 20\text{mm}$ ,  $H = 2\text{mm}$ , bending angle  $0.305^\circ$

### 3 结 论

(1) 对于分析所选的材料,影响板材弯曲成型角度的主要几何参数是板厚和板宽。当其它参数不变的情况下,随着板厚的增加逐渐减少。随着板宽增加而增加,但增长的幅度逐渐减小。(2) 对于分析所

选的材料,影响板材弯曲成型角度的主要激光参数是激光功率,光斑直径和扫描速度。当其它参数不变的情况下,弯曲角度随着激光功率增加先增加后减少;随着光斑直径增大而减小;随着扫描速度的增加先增大后减小。(3) 对于分析所选的材料,当其它参数不变的情况下,板厚或激光扫描速度较大时板材将发生背向激光束方向的弯曲。

#### 参 考 文 献

- [1] 季忠,刘韧. 锻压机械, 1996(5): 23 ~ 24.
- [2] 王秀凤,王秀彦. 锻压机械, 1999(3): 8 ~ 10.
- [3] 李纬民,卢秀春,刘助柏. 中国有色金属学报, 1999, 1(9): 39 ~ 44.
- [4] 李纬民. 中国激光, 1998, 9(25): 859 ~ 864.
- [5] 季忠,刘庆斌. 航空精密制造技术, 1996, 3(32): 13 ~ 15.
- [6] Cheng P J, Lin S C. J Mater Process Technol, 2000, 101: 260 ~ 267.
- [7] Cheng P J, Lin S C. J Mater Process Technol, 2001, 108: 314 ~ 319.
- [8] Arnet H, Vollertsen F. Proc Instn Mech Engng, 1995, 209: 433 ~ 442.