

# 大功率全固态激光器腔内倍频晶体 KTP 温度场的解析分析

李 隆<sup>1,2,3</sup>, 史 彭<sup>1</sup>, 李东亮<sup>1</sup>, 甘安生<sup>1</sup>, 任兆玉<sup>2</sup>, 白晋涛<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学理学院, 西安 710055;

2. 西北大学光子学与光子技术研究所, 西安大学光电子省级重点开放实验室, 西安 710069)

3. 西安交通大学电子与信息工程学院, 西安 710049)

**摘要:**在激光二极管泵浦的全固态激光器系统中谐振腔内有较高的基频光功率密度,非线性晶体采用腔内倍频方式可提高晶体的谐波转换效率。但是非线性晶体吸收基频光辐射也会引起内部非均匀的温升,导致晶体内部各点的折射率的改变,破坏晶体本征的位相匹配条件,从而影响了晶体的谐波转换效率。通过对谐振腔内非线性晶体工作状态的分析,利用解析的方法得出了全固态激光器中非线性晶体 KTP 内部温度场的精确计算方法,并分析了影响 KTP 晶体内部温度场变化的各种因素。所得出的结果具有一定的普适性,可以应用到具有轴对称形式内热源的其它热模型温度场的计算分析中,对连续波腔内倍频激光系统的设计将起到指导作用。

**关键词:** KTP 晶体;腔内倍频;谐波转换效率;温度场解析分析

中图分类号: TN248.1\*3

文献标识码: A

文章编号: 0253-2743(2004)03-0016-03

## Temperature field analytical - analysis of intracavity doubling frequency crystal KTP in High power all - solid - state laser

LI Long<sup>1,2,3</sup>, SHI Peng<sup>1</sup>, LI Dong-liang<sup>1</sup>, GAN An-sheng<sup>1</sup>, REN Zhao-yu<sup>2</sup>, BAI Jin-tao<sup>2</sup>

(1. Faculty of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. Institute of Photonics & Photo - Technology and Provincial Key Laboratory of Photoelectronic Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China

3. School of Electronic & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In diode - pumped all - solid - state laser system, fundamental frequency light have higher power density in resonant. Nonlinear crystal adopted intracavity double frequency can improve crystal's harmonic conversion efficiency. However nonlinear crystal inevitably absorbs fundamental light radiation, this will induce nonlinear crystal interior non - uniform temperature raise, which will cause crystal's refractive index changed and destroy crystal's intrinsic phase matching condition. The thermal phenomena ultimately will influence nonlinear crystal's harmonics conversion efficiency. According to intracavity nonlinear crystal working - state analysis, in high power all - solid - state laser system nonlinear crystal KTP interior precise temperature field is obtained by analytical thermal analysis method, and all kinds of relevant parameters influenced crystal interior temperature field distribution are analyzed. The analysis method and research results have ordinary applied character, and can be applied to analysis that models which have axis - symmetrical and inner heat source or other thermal models. These works will play instructive effect at the optimum design of continuous wave intracavity double frequency laser system.

**Key words:** Ktp crystal; intracavity frequency double; harmonic conversion efficiency; temperature field analytical analysis

## 1 引言

激光二极管(LD)泵浦的全固态绿光激光器具有体积小、结构紧凑、寿命长、效率高、运转可靠等优点<sup>[1]</sup>,这使它在许多场合可以取代传统的气体激光器和染料激光器,在人们生产、科研、生活中扮演了越来越重要的角色。

非线性晶体 KTP 具有非线性系数大、透光波段宽、不潮解、破坏阈值高等特点,在激光频率变换尤其是腔内倍频固体激光器中获得了广泛的应用<sup>[2]</sup>。谐振腔内基频光的功率高、而光斑半径较小,有利于非线性晶体获得高的谐波转换效率。

但是非线性晶体不可避免的要吸收基频光能量,引起晶体内部不均匀分布的温升。这种局部的温升会改变基频光在非线性晶体中的折射率,而 KTP 晶体为双轴激光晶体,其双折射效应对于温度的变化较敏感。T. Sasaki 等对于 KTP 晶体的波片作用进行了研究,发现随着晶体温度的改变,腔内基频光的偏振态及倍频光的功率都会发生周期性的变化<sup>[3]</sup>。

目前对于腔内倍频 KTP 晶体温度梯度场分布的理论研究很多,但是多为数值解,其方法是对热模型、热源进行离散后,利用层层叠代方式计算出热模型各点温度场的数值。对于具体的模型计算方法的选取方法可以不相同,并且数量巨大的叠代次数,都会给温度场的计算结果带来较大的误差。

本文对激光二极管泵浦的腔内倍频全固态激光器中的非线性晶体 KTP 的工作状态进行了分析,建立了符合工作条件下的温度场热模型,并根据合理的假设,得出了晶体内部温度场的解析表达式,而且分析了影响 KTP 晶体温度场的分

布的各种因素。研究方法和所得出的结论具有一定的普适性,可以应用到具有轴对称形式内热源的其它热模型温度场的计算分析中,对连续波腔内倍频激光系统的设计将起到指导作用。

## 2 非线性晶体温度场的解析计算方法

非线性晶体 KTP 腔内倍频的全固态激光器,其谐振腔的种类很多,但是常用的有两种形式:直腔式结构<sup>[4]</sup>和三镜 V 型折叠腔结构<sup>[5]</sup>。其中三镜 V 型折叠腔结构如图 1 所示。

### 2.1 倍频晶体的热模型及其假设条件

非线性晶体吸收基频光能量,引起晶体内部温度的升高。为了降低晶体温升,对于晶体采用强冷却措施。在晶体的侧面涂抹银粉,再用钨膜包裹,放置到精心设计的四周通有冷却水的紫铜块中。用冷却器抽运冷却水对于紫铜块进行循环冷却。其非线性晶体的工作热模型示意图,如图 2 所示。

对非线性晶体工作状态分析,建立热模型条件:

(1) 非线性晶体的两个通光端面与空气相接触,两端面可做绝热假设处理。其原因非线性晶体的周边用紫铜块以热传导方式使晶体的热量扩散,紫铜的热传导系数远远大于晶体热传导系数,从晶体侧面热传导流出的热量远大于从两端面和空气热交换流出的热量,故可忽略从两端面流出的热量,假设晶体两端面绝热;

(2) 非线性晶体应置于于折叠腔的第二个光腰处,以求获得高的基频光功率密度。由于非线性倍频晶体半径比激光束束腰大得多,故将入射基频光束假设为具有平行光面,半径为  $a$  的圆柱型均匀光强光束;

(3) 非线性晶体对于  $1.064\mu\text{m}$  的基频光和  $0.532\mu\text{m}$  的倍频光都有吸收,其线性吸收系数如表 1 所示<sup>[6]</sup>。但是谐振腔中基频光功率远远的大于倍频光功率,则可忽略晶体吸收倍频光产生的热量,仅计算 KTP 晶体吸收基频光能量产生的热量;

收稿日期: 2003 - 12 - 18

基金项目: 西安建筑科技大学青年基金资助(AJ12020)

作者简介: 李隆(1972 - )男,河南人,讲师,博士生,从事激光二极管泵浦的全固态激光器,超快光谱等方面的研究工作。

表1 KTP晶体的线性吸收系数

(μm)	(cm <sup>-1</sup> )	备注
0.43~0.78	<0.004	氧气氛退火,掺Ce
0.53~0.78	<0.005	氧气氛退火,掺Ce
0.532	0.04	沿倍频方向l
1.064	0.006	沿倍频方向l

(4) 由于非线性晶体对基频光的吸收率 = 0.6%cm<sup>-1</sup> 较小如表1所示,这里也可忽略由于晶体吸收引起的基频光能量的减小,可假设基频光在谐振腔内的光强保持不变;

(5) 非线性晶体放置于紫铜冷却块中,并且与紫铜保持了良好的热接触,则在倍频工作中晶体侧面温度保持与铜块温度一致,在分析中先假设晶体侧面温度为0(相对)。

2.2 非线性晶体内部的热传导方程及解析分析

由于非线性晶体吸收基频光能量产生的热量,属于内部

有热源问题,内部热传导遵守 Poisson 方程。在柱坐标系中 Poisson 方程表达式为:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{q_v}{k} = 0 \quad (1)$$

其中:  $q_v$  为热功率密度,即单位体积内非线性晶体的发热率;  $k$  为非线性晶体导热系数或称为热导率。

由于非线性晶体的热模型具有轴对称性,产生的热流线只沿晶体的径向传播,则有

$$\frac{\partial u}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial u}{\partial z} = 0$$

温度场函数可简化为  $u(r, \theta, z) = u(r)$

方程(1)可简化为:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{q_v}{k} = 0 \quad (2)$$

对于(2)式二次积分可得方程的解

$$u = -\frac{1}{4} \frac{1}{r} \left( \frac{q_v}{k} r^2 \right) + C_1 \ln r + C_2 \quad (3)$$

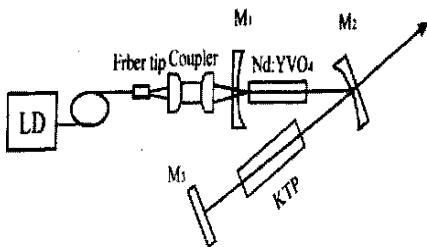


图1 LD端面泵浦的三镜V型折叠腔 Nd:YVO4/KTP激光器

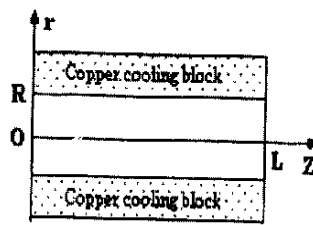


图2 非线性晶体热模型示意图

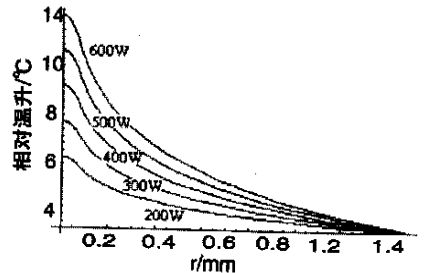


图3 腔内不同的基频光束功率时 KTP 晶体温度场分布

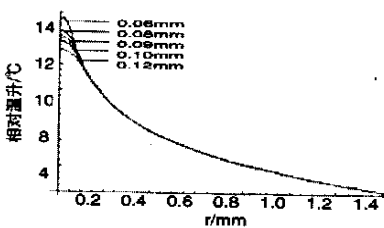


图4 不同基模光斑尺寸在 KTP 晶体产生的温度场分布

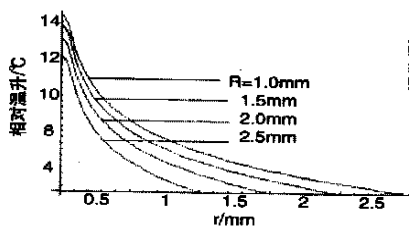


图5 KTP 晶体具有不同半径时温度场的分布

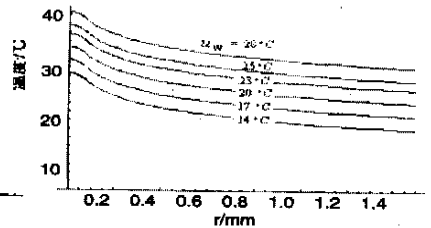


图6 KTP 晶体冷却温度不同温度场的分布

由于在非线性晶体内部,径向  $0 < r < a$  区内有热源,  $a < r < R$  区内无热源,设这两个区内温度场分别为  $u_1, u_2$ ,分区分析:

在  $0 < r < a$  区中,热功率密度为常数,  $q_v = I_w = \frac{I}{a^2}$ ,其中  $I$  为非线性晶体的吸收率,  $I_w$  为谐振腔内基频光光强,  $I$  为基频光光强密度。对于(3)式进行积分可得温度场  $u_1(r)$  表达式

$$u_1 = -\frac{q_v}{4} r^2 + C_1 \ln r + C_2 \quad (0 < r < a) \quad (4)$$

温度场在边界条件  $r=0$  处有限,则(4)式中  $C_1=0$  温度场  $u_1$  的表达式为:

$$u_1 = -\frac{q_v}{4} r^2 + C_2 \quad (0 < r < a) \quad (5)$$

在  $a < r < R$  区中,热功率密度  $q_v=0$ ,由(3)得

$$u_2 = C_3 \ln r + C_4 \quad (a < r < R) \quad (6)$$

边界条件:  $r=R$  处有  $u(R)=0$ ,则  $C_4 = -C_3 \ln R$ ,代入(6)

$$u_2 = C_3 \ln(r/R) \quad (a < r < R) \quad (7)$$

连续条件1:在  $r=a$  两边非线性晶体介质相同

$$\frac{\partial u_1}{\partial r} \Big|_{r=a} = \frac{\partial u_2}{\partial r} \Big|_{r=a}$$

可得  $C_3 = -\frac{q_v a^2}{2}$  (8)

连续条件2:在  $r=a$  处温度场一致连续  $u_1 = u_2$

则有  $-\frac{q_v}{4} a^2 + C_2 = -\frac{q_v a^2}{2} \ln \frac{a}{R}$  成立。

故  $C_2 = \frac{q_v a^2}{4} - \frac{q_v a^2}{2} \ln \frac{a}{R}$  (9)

于是可以得到非线性晶体在整个区域内的温度场分布的解析表达式:

$$u(r) = \begin{cases} \frac{q_v}{4} (a^2 - r^2) - \frac{q_v a^2}{2} \ln \frac{a}{R} & (0 < r < a) \\ -\frac{q_v a^2}{2} \ln \frac{r}{R} & (a < r < R) \end{cases} \quad (10)$$

3 KTP 晶体温度场分布及热参量影响的分析

腔内倍频时,非线性晶体 KTP 一般采用 类相位匹配方式,切割匹配角为  $= 90^\circ, \phi = 23.6^\circ$ 。类相位匹配不仅要求基频光要满足偏振匹配条件,以及基频光在晶体中分解出的两个偏振光数值相等、方向相互正交,而且要求晶体在腔内起  $1/2$  波片的作用,否则会破坏腔内基频光的偏振态,除了

产生所谓“绿光问题”外,还会使倍频效率降低。晶体对1064nm波长的吸收率  $= 0.6\% \text{cm}^{-1}$ , 径向热导率  $= 0.13 \text{W/cm}^2 \text{K}^{-1}$ 。

### 3.1 基频光功率对于非线性晶体温度场的影响

非线性晶体的倍频效率与基频光束功率有着重要的关系。调节泵浦源的功率使得谐振腔内基频光功率升高,分别为200W,300W,400W,500W,600W,并且通过谐振腔的参数调整可控制入射晶体的光斑大小为0.08mm,取KTP晶体半径R为1.5mm,长度L为15mm,如图3所示。从图3中可以得到KTP晶体内部温度场随基频光功率同步变化,而且基频光功率主要影响近光轴部分的温度场。

### 3.2 基频光光斑尺寸对非线性晶体温度场的影响

入射到非线性晶体内的基频光光斑尺寸对于倍频效率有着重要影响。如果折叠腔的参数调整,则入射到非线性晶体内的基频光尺寸会发生较大的改变,则在非线性晶体内产生的温度场分布也会发生变化。稳定泵浦源的工作电流,控制基频光功率稳定在500W,考虑入射非线性晶体的光斑大小为0.06mm,0.08mm,0.09mm,0.10mm,0.12mm时,非线性晶体内部温度场分布如图4所示。KTP晶体尺寸仍为半径R为1.5mm,长度L为15mm。从图4中可以得到基频光光斑尺寸影响非线性晶体区域较小,仅影响近光轴部分的温度场。

### 3.3 晶体半径改变对非线性晶体温度场的影响

激光谐振腔内基频光功率较大,很容易将非线性晶体的表面损坏。因此非线性晶体需要有一定大的口径,这样可调整基频光入射位置,提高非线性晶体的使用率。基频光束功率控制在500W,入射晶体的基频光光斑大小为0.08mm,选择KTP晶体的半径R如果为1.0mm,1.5mm,2.0mm,2.5mm时,非线性晶体内部温度场分布如图5所示。

### 3.4 冷却温度对倍频晶体内部温度场的影响

非线性晶体采取紫铜块强制冷却的方式,降低晶体内部的温升。如果外围冷却温度不同,晶体内部的温度场分布规律

便不同。调控冷却温度分别为14,17,20,23,25,28<sup>[7]</sup>,基频光束功率为500W,入射晶体的光斑大小为0.08mm,KTP晶体尺寸为 $\varnothing 3 \times 15 \text{mm}$ 。KTP晶体内部温度场分布如图6所示。

谐振腔内倍频可大大的提高非线性激光晶体的谐波转换效率。但是倍频晶体吸收基频光能量会引起晶体内部不均匀温升,形成晶体内部不均匀温度场。非线性激光晶体的温升破坏位相匹配条件的同时,还会改变基频光的偏振状态,除了影响激光器的稳定性,还会影响输出激光的品质。消除、减弱、改善这种情况的基础是准确得出在实际工作条件下晶体内部的温度场。采用的解析热分析方法具有一定的普适性,也可以应用到其它具有轴对称形式内热源的其它热模型温度场的计算分析中,对连续波腔内倍频激光系统的设计将起到指导作用。

### 参考文献

- [1] 吕百达编著. 固体激光器件 [M]. 北京:北京邮电大学出版社 [M], 2002, 203 - 243.
- [2] 姚建铨著. 非线性光学频率变换及激光调谐技术 [M]. 北京:科学出版社, 1995, 69 - 108.
- [3] 沈德元, 王长青, 邵宗书等. 晶体温度对LD泵浦的Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP腔内倍频激光器输出的影响 [J]. 1996, 23(5): 385 - 388.
- [4] D. W. Anthon, D. L. Sipes, T. J. Pier, et al. Intracavity double of CW diode - pumped Nd:YAG lasers with KTP [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(4): 1148 - 1157.
- [5] Liu Junhai, Wang Changqing, L Junhai, et al. Diode - laser array single - end - pumped 5W Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP continuous - wave solid - state green laser [J]. Chin. Phys. Lett., 1999, 16(7): 508 - 509.
- [6] 干福熹, 信息材料 [M]. 天津:天津大学出版社, 2000, 569.
- [7] 刘均海, 王洪润, 崔岱岩等. 半导体激光器端面泵浦高功率高效Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP腔内倍频连续绿光激光器研究 [J]. 山东大学学报(自然科学版), 2000, 35(2): 202 - 206.

## 激光医学与医学

# 电子鼻咽喉镜下窥视外伤性鼓膜穿孔的体会

刘庆顺 杨 桦

(第三军医大学新桥医院耳鼻咽喉科, 重庆 400037)

## 1 临床资料和方法

我科于2002年~2004年共收治50例鼓膜穿孔患者,50例病例均为本院门诊就诊者。其中男36例,女14例,年龄在12~60岁之间,平均32.8岁。均为单耳受伤,其中左耳29例,右耳21例。受伤到就诊时间为1h~3d。受伤方式为拳掌击、掏耳、球击以及车祸,多见于拳掌击伤。

日本PENTAX(潘太克斯)VNL-1530T型电子鼻咽喉镜,SONY彩色监视仪,另配电脑图文检查处理系统。可选择并浏览20余幅图像,存入并打印4幅典型图像,供出具报告及查询之用。

就诊时均详细询问受伤情况,常规检查耳廓、外耳道及鼓膜。清除外耳道内的血迹、血痂及耵聍。患者取坐位,患耳朝向检查者,头靠于检查椅。检查者左手持电子鼻咽喉镜操作部,右手持该镜前端,经外耳道口缓慢导入镜管达外耳道中份。转动镜体,调整角度,窥清鼓膜受伤部位、形状、大小及出血情况。选择最佳图像存入电脑,以备出具报告之用。检查完毕,将电子鼻咽喉镜缓慢退出。

## 2 结果和讨论

本组50例鼓膜穿孔者为裂隙状、三角形、梭形以及圆形。其中裂隙状25例,三角形16例,梭形6例,圆形3例。均位于紧张部,以鼓脐及光锥后多见。穿孔大小按Rice分级标准判定<sup>[1]</sup>:穿孔大小在

8mm<sup>2</sup>以内者位型36例,穿孔大小在9~30mm<sup>2</sup>之间为型14例。

电子鼻咽喉镜是耳鼻咽喉科临床上检查鼻、鼻咽、口咽以及喉咽部疾病的诊断工具,随着其应用范围的普及与扩大,电子鼻咽喉镜继额镜、耳镜、电耳镜成为了又一新型鼓膜外伤诊断工具。电子鼻咽喉镜摄像头位于镜管前端,可直接拍摄鼓膜受伤情况,较额镜、耳镜、电耳镜视野更开阔,更清晰,并通过该镜匹配的监视器观察,提高了正确诊断鼓膜穿孔的可靠性<sup>[2]</sup>。以往外伤性鼓膜穿孔患者只能通过额镜、耳镜以及电耳镜进行检查,因其视野小,光线亮度不足,不易窥清鼓膜穿孔的部位及大小;同时由于其检查工具使用范围受限,只能检查者轮流检查而不能保留图像供检查者、伤者、肇事者、家属以及有关人员观看。电子鼻咽喉镜具有照明度强,视野广,放大功能;可仔细观察鼓膜穿孔的部位、大小、形态,达到早期、及时、准确诊断的目的。由于电子鼻咽喉镜配备图像监视器及电脑图文处理系统,可将检查结果、图像保存,有利于对患者伤情变化进行动态观察及临床资料的积累。同时又为临床诊断及伤情评定提供可靠的依据;是检查外伤性鼓膜穿孔理想的方法。

### 参考文献

- [1] 姜泗长, 顾瑞, 王正敏. 耳科学 [M]. 第二版. 上海:上海科学技术出版社, 2002, 48.
- [2] 王建群, 高下, 王健. 电子喉镜在喉部疾病诊治中的应用 [J]. 听力学及言语疾病杂志, 2004, 12(1): 44.