

DPSSL 系统中矩形截面 BBO 倍频晶体 热分析的研究*

史 彭¹ 何化岳¹ 李 隆^{1,2,3} 白晋涛² 甘安生¹

(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, 西北大学光电子技术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 利用新的解析热分析方法得出了矩形截面非线性晶体在 TEM₀₀ 模式辐射下产生的温度场计算表达式, 分析了影响非线性晶体内部温度场分布的各种因素, 对比分析了矩形截面和近似圆形截面时所存在的差异及产生的原因. 得出的结论为后续研究由于温升引起的位相失配等系列问题提供了理论基础, 同时对于提高 DPSSL 系统输出功率具有指导意义.

关键词 矩形截面; 非线性光学晶体; 解析热分析方法; TEM₀₀ 模式; 温度场分布

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

自 20 世纪 80 年代发展起来的激光二极管 (LD) 泵浦的全固态激光系统 (DPSSL) 已经成为当今激光工业发展的主流. 依据 DPSSL 系统为平台, 发展各种波长的激光器更引起人们的广泛关注^[1], 如利用 BBO、LBO、KTP、CLBO 等非线性晶体的倍频技术^[2]、参量转换技术^[3]、周期极化^[4]等技术, 已经使得 DPSSL 输出激光波长从深紫外^[5]延伸到了中红外的波段范围.

DPSSL 系统有腔外倍频和腔内倍频两种方式. 采用腔外共振倍频发展的 DPSSL 系统, 具有调整灵活、稳定性好等特点, 但是具有倍频效率低、易损坏晶体、对于腔匹配条件要求苛刻等缺点^[6], 因此目前发展的 DPSSL 激光系统大多采用腔内倍频的方式. 谐振腔内振荡的基频光有着较高的功率密度和相对稳定的模式, 将非线性光学晶体置于腔内束腰处, 可获得较高的谐波转换效率, 而且激光器具有输出光束发散角小和模式稳定等特点^[7].

非线性光学晶体吸收部分基频光能量, 辐射产生极化的同时, 也引起了在通光方向上局域的温升. 当基频光功率稳定、外部冷却恒温时, 便在晶体内部形成一个相对稳定的温度场分布^[8]. 这种局域的温升破坏了晶体的位相匹配条件, 引起晶体内折射率的变化严重地影响了晶体的谐波转换效率, 并使得输出光束质量变差^[9]. 分析、减少这种热效应影响

的关键基础工作是对晶体内部温度场进行准确计算与分析, 因此对于非线性光学晶体温度场的研究将是进一步提高 DPSSL 系统输出功率的关键工作.

实际使用的非线性光学晶体截面大多数为矩形, 晶体内部通过具有 TEM₀₀ 模式的基频光, 晶体吸收部分激光能量后在晶体内部产生具有高斯分布形式的热源. 由于热源与热模型不具有对称性, 计算晶体内部温度场十分困难. 以往的研究^[10,11]均将横截面简化为圆形截面近似处理, 所得出的结论与实际情况存在着一定的差异.

本文对 DPSSL 系统中矩形截面 BBO 晶体在内部通过 TEM₀₀ 模激光情况下的温度场分布进行了理论分析, 建立了符合实际工作条件下的动态温度场工作模型, 并通过热传导方程及边界条件, 利用一种新解析热分析方法得出了 BBO 晶体内部温度场的解析解, 国内外公开发表的文献未见类似报道. 并分析了影响温度场分布的各种因素, 比较分析了矩形截面与近似圆形截面时 BBO 晶体温度场的差异及产生的原因. 得出的结论为今后研究由于温度场引起位相失配等系列问题提供了理论基础, 为提高 DPSSL 系统输出功率提供指导.

1 矩形截面倍频晶体温度场的计算方法

1.1 晶体的热模型

在 DPSSL 系统中, 用于腔内倍频的 BBO 晶体一般为长方体形, 通光端面为正方形, 如 $3 \times 3 \text{ mm}^2$ 等, 采用 I 类位相匹配和角度调谐, 对于 $1.064 \mu\text{m}$ 的基频光波进行倍频, 匹配角度为 $\theta = 22^\circ$, 并且其光轴与入射平面法线的夹角约为 36° . 为了尽快地降低晶体中的温升, 晶体一般采用周遍冷却措施, 依

*陕西省教育厅 2004 年专项科研项目 (04JK129) 资助、西安建筑科技大学青年基金资助

Tel: 029-82213944 Email: pshi56@sohu.com

收稿日期: 2004-05-09

据晶体尺寸设计紫铜夹块,用循环水冷却或半导体制冷的方式对于铜块进行冷却.为了保持晶体与铜块的良好热接触,晶体外侧面涂抹银粉后用铜膜包裹,再置入紫铜夹块中.晶体的冷却装置正视图如图 1.取笛卡儿直角坐标系,图 2 为晶体通光工作的侧视图.晶体三边长度分别为 a 、 b 、 L ,基频光束通过截面中心.

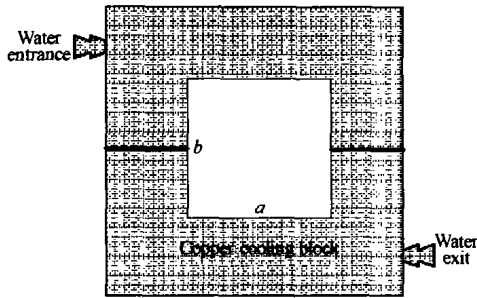


图 1 BBO 晶体水冷装置正视图示意图

Fig. 1 Schematic diagram of water-cooling BBO crystal arrangement by face-glanced

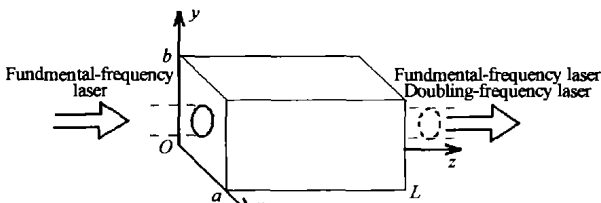


图 2 BBO 晶体倍频工作侧视图

Fig. 2 Side-glance diagram of BBO crystal doubling frequency

通过 BBO 晶体实际工作状态分析,建立热物理模型:

1) 由于采用了周遍强冷却措施,其侧面温度保持恒定,设定冷却环境温度为 u_w . 作为热模型数学处理可设其为 0(相对),得出温度场后,再叠加入冷却环境温度 u_w ;

2) BBO 晶体的两个通光端面与空气相接触,从两端面和空气热交换流出的热量远远小于从晶体侧面通过传导流出的热量,因此可假设晶体的两端面满足绝热条件;

3) 假设激光器稳定运转在基模状态,腔内基频光具有 TEM_{00} 模式.基频光沿着 Z 轴方向通过 BBO 晶体,并辐射在 BBO 晶体的中心,在其横截面 (X - Y 面)上基频光的光场分布表达式为

$$I(x, y) = I_0 e^{-2 \frac{(x-\frac{a}{2})^2 + (y-\frac{b}{2})^2}{w^2}} \quad (1)$$

式中 I_0 为基频光中心处的功率密度, w 为基频光束的光斑半径.

设腔内振荡的基频光功率为 I_m , 则有

$$I_m = \int_0^a \int_0^b I_0 e^{-2 \frac{r^2}{w^2}} 2\pi r dr \quad (2)$$

可得出

$$I_0 = \frac{I_m}{2\pi \int_0^a \int_0^b e^{-2 \frac{r^2}{w^2}} r dr} \quad (3)$$

4) 通过 BBO 晶体的基频光的光强远远大于倍频光的光强,在计算时仅考虑 BBO 晶体吸收基频光能量产生的热量.假设非线性倍频晶体介质对基频光吸收率为 β ,则在距离晶体通光轴中心为 r 处产生的热功率密度为

$$q_v(x, y) = I(x, y)\beta = I_0 \beta e^{-2 \frac{(x-\frac{a}{2})^2 + (y-\frac{b}{2})^2}{w^2}} \quad (4)$$

5) 由于晶体对基频光的吸收率较小,这里可忽略由于晶体的吸收引起的腔内基频光能量的减小,并假设基频光的光强度保持不变.

1.2 晶体内部的热传导方程及解

由于 BBO 晶体内部存在着热源,则晶体内部的热传导遵循 Poisson 方程^[12]

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\frac{q_v}{\lambda} \quad (5)$$

式中: q_v 为热功率密度,即单位体积内的发热率, λ 为晶体导热系数或称为热导率.

由于基频光光强不变假设,以及晶体的两通光端面绝热等假设条件下,晶体内部热量从侧面通过热传导流出,则热模型中的热流线垂直 z 轴,热模型中的温度场与 z 轴无关,则有 $u(x, y, z) = u(x, y)$,由式(5)得

$$\frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial y^2} = -\frac{q_v}{\lambda} \quad (6)$$

由周遍温度设为 0,可得出边界条件为

$$\begin{aligned} u(0, y) = u(a, y) = 0 \\ u(x, 0) = u(x, b) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Poisson 方程的解必须满足式(6)的同时还应满足其边界条件式(7).

因此晶体内部温度场的求解方法是:

① 根据边界条件确定 Poisson 方程解的本征函数族形式,由本征函数族组成 Poisson 方程的通解 $u(x, y)$,在 $u(x, y)$ 中有待定常数;

② 再将 $u(x, y)$ 代回到 Poisson 方程中,确定 $u(x, y)$ 中的待定常数,得出 $u(x, y)$ 的表达式;

③ 由于 $u(x, y)$ 既满足 Poisson 方程,又满足其边界条件,又因为 Poisson 方程的解具有唯一性,则 $u(x, y)$ 是泊松方程的唯一解.

当 x 和 y 变量的本征函数为 $\sin \frac{n\pi}{a}x$ 、 $\sin \frac{m\pi}{b}y$

(其中 n, m 为整数)时满足边界条件,设

$$u(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_{nm} \sin \frac{n\pi}{a}x \sin \frac{m\pi}{b}y \quad (8)$$

式中 A_{nm} 为待定常数.

将 $u(x, y)$ 带入泊松方程得

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left[\sum_{m=1}^{\infty} B_{nm} \sin \frac{n\pi}{a}x \right] \sin \frac{m\pi}{b}y = -\frac{q_v}{\lambda} \quad (9)$$

式中 $B_m = -A_m \left[\left(\frac{n\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{m\pi}{b} \right)^2 \right]$. 由本征函数的正交归一性条件

$$\int_0^b \sin \frac{m\pi}{b} y \sin \frac{k\pi}{b} y dy = \frac{b}{2} \delta_{mk} \quad (10)$$

给式(9)两边乘 $\sin \frac{k\pi}{b} y$, 再对 y 从 0 到 b 积分得

$$\sum_{m=1}^{\infty} B_m \sin \frac{n\pi}{a} x = -\frac{2}{\lambda b} \int_0^b q_v \sin \frac{m\pi}{b} y dy \quad (11)$$

由本征函数的正交归一性条件

$$\int_0^a \sin \frac{n\pi}{a} x \sin \frac{k\pi}{a} x dx = \frac{a}{2} \delta_{nk} \quad (12)$$

给式(11)两边乘 $\sin \frac{k\pi}{a} x$, 再对 x 从 0 到 a 积分得

$$B_m = -\frac{4}{\lambda a b} \int_0^a \int_0^b q_v \sin \frac{n\pi}{a} x \sin \frac{m\pi}{b} y dx dy \quad (13)$$

得出

$$A_{nm} = \frac{4 I_0 \beta a b}{\lambda \pi^2 (b^2 n^2 + a^2 m^2)} \int_0^a \int_0^b e^{-2 \frac{(x-\frac{a}{2})^2 + (y-\frac{b}{2})^2}{w^2}} \sin \frac{n\pi}{a} x \sin \frac{m\pi}{b} y dx dy \quad (14)$$

将得出的式(14)代入式(8)得出解

$$u(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_{nm} \sin \frac{n\pi}{a} x \sin \frac{m\pi}{b} y \quad (15)$$

利用 Mathematica 计算软件计算出 BBO 晶体内部各点的温度数值, 绘制出温度场的分布图形.

2 矩形截面非线性光学晶体温度场计算及分析

2.1 BBO 非线性光学晶体温度场计算

BBO 晶体(偏硼酸钡)是 20 世纪 80 年代由我国中科院福建物质结构所发明, 也是迄今为止用于紫外波段波长变换最优良的非线性晶体之一. 具有倍频系数大(约为 KDP 的 6 倍), 光损伤阈值高, 透光波段广等特点, 被广泛地应用于掺 Nd^{3+} 离子、氩离子等激光器的腔内谐波的产生技术、参量激光技术的研究中. BBO 晶体对 1064 nm 波长基频光的吸收率 $\beta = 0.001 \text{ cm}^{-1}$, 垂直光轴方向热导率 $\lambda = 1.2 \text{ W m}^{-1} \text{ V}^{-1}$ [8].

在 DPSSL 系统中, 影响 BBO 晶体温度场分布的主要因素有: 1) 腔内振荡的基频光功率; 2) 入射到晶体的基频光腰斑大小; 3) 晶体尺寸的大小; 4) 周遍冷却环境温度等. 分析这些因素对晶体内部温度场的影响时, 将相关数据带入温度场计算表达式, 更换相应的参量值, 可计算出相应的温度场分布.

2.1.1 矩形截面 BBO 晶体温度场分布规律

取 BBO 晶体半径几何尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times$

6 mm , 入射到晶体的基频光斑腰斑 w 为 $100 \mu\text{m}$, 谐振腔内基频光功率 100 W. 图 3、图 4 分别给出了 BBO 晶体温度场的三维图和等温线图. 图 5 给出了当 $x = a/2$ 时晶体温度随 y 变化图.

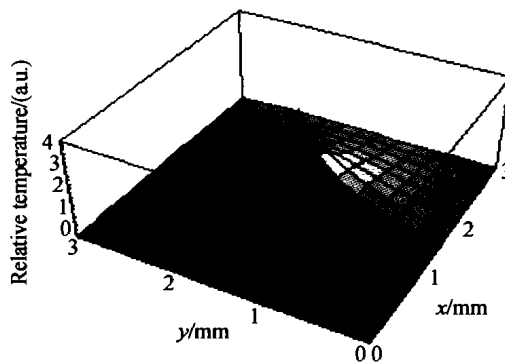


图 3 BBO 晶体三维温度场分布图
Fig. 3 Three-dimensional diagram of BBO crystal temperature field distribution

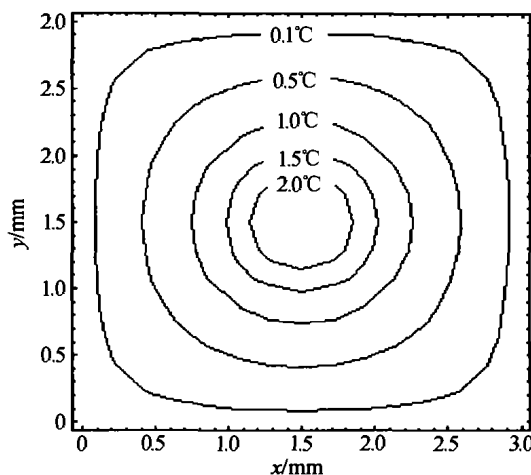


图 4 BBO 晶体内部等温线分布图
Fig. 4 Isotherm diagram of BBO crystal interior temperature field distribution

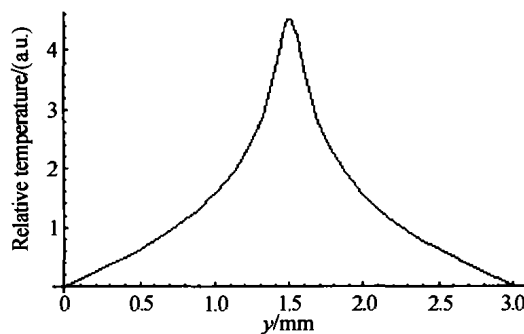


图 5 在晶体内部 $x = a/2$ 处温度场随 y 的变化图
Fig. 5 Temperature field distribution of BBO crystal vs. y for $x = a/2$

2.1.2 基频光功率对于 BBO 晶体温度场的影响

在其它条件与图 3 相同, 图 6 给出当谐振腔内振荡的基频光具有不同的功率时, 对于 BBO 晶体温度分布的影响. 从图 6 中可以得出基频光功率基本上与晶体中心处的温升成正比.

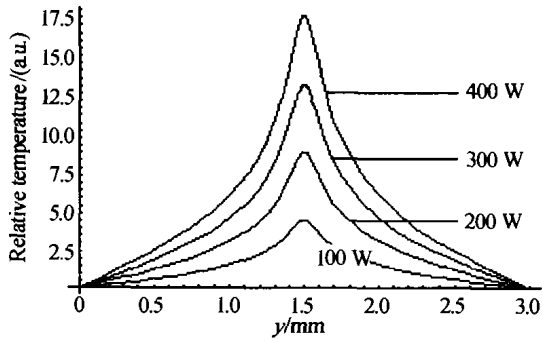


图6 当基频光功率不同时 BBO 晶体内的温度场分布对比图
Fig. 6 Contrast diagram of BBO crystal temperature field distribution under different fundamental-frequency laser power in resonate

2.1.3 基频光腰斑大小对于 BBO 晶体温度场的影响

在其它条件与图 3 相同,图 7 给出了如果入射到 BBO 晶体端面的基频光腰斑大小改变时,对 BBO 晶体内部温度分布的影响.从图 7 中可以得到基频光腰斑大小仅影响晶体中心附近的温度场,且腰斑越小,BBO 晶体通光中心处的温升越大.

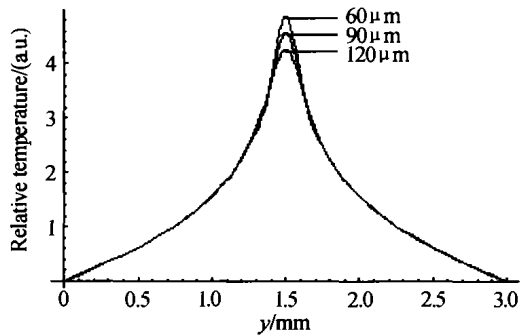


图7 不同基模腰斑时 BBO 晶体内的温度场分布对比图
Fig. 7 Contrast diagram of BBO crystal temperature field distribution under different fundamental modes radius

利用所得出的 BBO 晶体温度场分布计算表达式还可以计算分析晶体尺寸对晶体内部温度场分布的影响,以及周遍冷却环境温度对晶体内部温度场的影响等,所得出的结论与作者在文献[11]得出的结论基本一致.

2.2 与圆形截面晶体对比分析与讨论

在 DPSSL 系统中使用 BBO 晶体的横截面大多为矩形(正方形),为了便于计算分析,在以往的研究中均将其假设为圆柱形.作者在文献[11]中利用半解析热分析方法计算分析了圆形横截面 BBO 晶体内部温度场.用本文得出的结论对比分析,可以得出两者在 BBO 晶体中心处的温度场基本相同,基频光功率、基频光腰斑大小、晶体尺寸以及周遍冷却温度对 BBO 晶体内部温度场的影响也基本一致.分析两者的主要差异为:

1)在晶体边缘部分温度场分布有较大的差异,如矩形截面晶体边缘部分的等温线接近矩形,而圆形截面晶体边缘部分的等温线仍为圆形.

2)当晶体切割的通光端面为矩形截面(长方形)时,特别在长方形的两边相差较大时(实际情况很少见),两者所得出的结论差异很大.因此只有正方形截面晶体研究晶体中心附近温度场时才可近似为圆形截面晶体.

3)根据计算可以得出:将边长为 a 的正方形截面晶体假设为半径为 $a/2$ 的圆形截面晶体,其它条件不变时,圆形截面晶体计算出的最高温度偏低.如:将 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 正方形截面晶体假设为半径为 1.5 mm 的圆形截面晶体,其它条件与图 5 相同时,正方形截面晶体计算出的最高温度为 4.535°C ,圆形截面为 4.434°C ,这是由于圆形截面边缘相对中心距离近造成的,当把圆形截面增大 8% 时,两者一致.

3 结论

本文利用解析方法首次得出了矩形截面 BBO 晶体在 TEM_{00} 基波辐射下,所产生的温度场分布计算公式,对实际使用的 BBO 晶体温度场进行了计算分析,并分析了影响温度场的各种因素.所得出的结论为分析、消除、减少这种非均匀温升的影响提供了准确、可靠的基础工作.所得出的分析计算方法与公式也可以应用到其它形式内热源的热模型温度场计算分析中,对 DPSSL 系统的设计将起到指导作用.

参考文献

- 干福熹,主编.信息材料.天津:天津大学出版社,2000. 537~598
Gan F X. Information Material Tianjin: Tianjin University Press, 2000. 537~598
- 李隆,田丰,赵致民,等. LD 端面泵浦折叠腔 Nd: YVO₄/LBO 激光器. 光子学报, 2004, 33(4): 396~399
Li L, Tian F, Zhao Z M, et al. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(4): 396~399
- 夏江帆,魏志义,张杰. BBO 晶体中非共线参量过程的带宽与增益特性研究. 物理学报, 2000, 49(2): 256~261
Xia J F, Wei Zh Y, Zhang J. Acta Physica Sinica, 2000, 49(2): 256~261
- Zhang Shaojun, Wang Qingpu, Xu Xiangang, et al. Diode-laser pumped passively Q-switched green laser by intracavity frequency-doubling with periodically poled LiNbO₃. Optics & Laser Technology, 2003, 35(3): 233~235
- 陈国夫,杜戈果,王贤华,等. LD 泵浦 Nd: YVO₄/KTP/BBO 紫外激光器. 光子学报, 1999, 28(8): 684~687
Chen G F, Du G G, Wang X H. Acta Photonica Sinica, 1999, 28(8): 684~687
- 何京良,卢兴强,贾玉磊,等. BBO 四倍频全固态 Nd:

- YVO₄ 紫外激光器. 物理学报, 2000, **49**(10): 2106~2107
- He J L, Lu X Q, Jia Y L, *et al.* *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(10): 2106~2108
- 7 李隆, 赵致民, 张伟, 等. 高功率端面泵浦 Nd: YVO₄/LBO 绿光激光器的研究. 西安交通大学学报, 2003, **37**(6): 642~645
- Li L, Zhao Zh M, Zhang W, *et al.* *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2003, **37**(6): 642~645
- 8 姚建铨, 著. 非线性光学频率变换及激光调谐技术. 北京: 科学出版社, 1995. 69~108
- Yao J Q. Technic of nonlinear optical frequency conversion and laser tunable technic. Beijing: Science Press, 1995. 69~108
- 9 Haas R A. Influence of a constant temperature gradient on the spectral-bandwidth of second-harmonic generation in nonlinear crystals. *Optics Comm*, 1995, **113**(4-6): 523~529
- 10 李隆, 史彭, 白晋涛, 等. 高功率 Nd: YVO₄/KTP 腔内倍频晶体温度分布的半解析热分析. 光学技术, 2004, **30**(1): 44~47
- Li L, Shi P, Bai J T, *et al.* *Optical Technique*, 2004, **30**(1): 44~47
- 11 史彭, 李隆, 白晋涛, 等. 连续波激光器腔内倍频晶体半解析分析方法的研究. 光子学报, 2004, **33**(4): 400~404
- Shi P, Li L, Bai J T, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 400~404
- 12 张洪济. 热传导. 北京: 高等教育出版社, 1992. 50~74
- Zhang H J. Heat conduction. Beijing: Higher Education Publishing Company, 1992. 50~74

Thermal Analysis of BBO Double Frequency Crystal with Rectangular Section in DPSSL System

Shi Peng¹, He Huayue¹, Li Long^{1,2,3}, Bai Jintao², Gan Ansheng¹

¹ Faculty of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055

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

³ School of Electronics & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

Received date: 2004-05-09

Abstract The general solution of crystal under TEM₀₀ with rectangular section interior temperature field distribution was obtained by a new semi-analytical thermal analysis method. Subsequently some relevant parameters, which would influence temperature field distribution, were analyzed. And discrepancy between the rectangular section crystal and the circular section crystal was compared. Research results will be theoretically established for further research, such as phase mismatching induced by non-uniform temperature raise, and play instructive effect at improvement of DPSSL's output power.

Keywords Rectangular section; Nonlinear optical crystal; Analytical thermal analysis method; TEM₀₀ mode; Temperature field distribution



Shi Peng was born in 1956, in Beijing. He graduated from Northwest University in 1982. Now he is a professor of Xi'an University of Architecture & Technology. His major direction is semi-analytical thermal analysis in optics and electronics devices.