

大口径倍频晶体高精度温控装置的研制

刘保麟, 张 鹏, 孙付仲, 张庆春, 卢礼华

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 非临界相位匹配条件下, 为保证大口径倍频晶体具有较高的温度稳定性与一致性, 在全口径范围内实现最优的倍频转换效率, 设计了一种采用电加热方法进行高精度温度控制的装置。在装置设计中, 充分考虑倍频晶体导热系数小、形状薄而大的特点, 通过热传导加热倍频晶体, 并同时加热装置其他部分, 形成自然对流, 均衡晶体温度。通过仿真和实验得到该装置温度分布的整体规律, 得到在不同加热长度下, 晶体稳定温度及稳定所需时长随晶体材料导热系数变化的规律。实验和仿真均表明: 该装置能加热 $\Phi 80$ mm 口径的倍频晶体至目标温度, 并将其温度一致性控制在 $\pm 0.15^\circ\text{C}$ 范围内。

关键词: 激光器; ADP 晶体; 温度控制; 非临界相位匹配; 惯性约束聚变

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0420001

Development of high precision temperature control device for large aperture frequency doubling crystal

Liu Baolin, Zhang Peng, Sun Fuzhong, Zhang Qingchun, Lu Lihua

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In noncritical phase matching condition, it is necessary to precisely control the stability and uniformity of the crystal temperature in full aperture. A device using resistive heater to control the temperature of the large aperture crystal was introduced. Taking full account of the low thermal conductivity and large aperture of the crystal, it was heated by thermal conduction and the natural convection of the inner air, which was heated up at the same time for temperature balancing. The characteristics of temperature distribution of the device were studied. Through experiments and simulations analysis, it was found that the crystal temperature of steady state and the necessary heating time varied with the heating length and the thermal conductivity of the crystal material. The result shows the practicability of the thermal control of the crystal with the aperture of $\Phi 80$ mm. The temperature difference of the crystal, in steady state, could be controlled within $\pm 0.15^\circ\text{C}$.

Key words: lasers; ADP crystal; temperature control; noncritical phase matching; inertial confinement fusion

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-09-15

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2014056); 教育部“春晖计划”合作项目(Z2014105)

作者简介: 刘保麟(1992-), 女, 硕士生, 主要从事大口径光学晶体温控技术等方面的研究。Email: liubl328@gmail.com

导师简介: 张鹏(1983-), 男, 副教授, 博士, 主要从事 ICF 终端光学组件、大口径晶体温度控制技术方面的研究。

Email: zp@hit.edu.cn

0 引言

出于对清洁能源的需要,世界各国都高度重视惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)装置的研制^[1]。为提高打靶效率,需使用能生长成大口径的倍频晶体材料以实现激光倍频,如 KDP、DKDP 和 ADP 晶体等。为克服角度相位匹配所存在的走离效应、实时调整晶体角度所需附加的复杂控制等问题,依靠精确控制晶体温度以达到高倍频转换效率的温度相位匹配技术(又称非临界相位匹配或 90°非临界相位匹配)开始受到重视^[2]。

在温度相位匹配条件下,晶体倍频效率对温度变化表现出高敏感性,仅当其工作在最佳匹配温度下时才能获得高功率输出^[3-5]。故,保证倍频晶体全口径上温度的稳定和一致至关重要。

目前,温度相位匹配条件在大口径倍频晶体中的使用正处于研究阶段,相应的满足温控精度要求的温控装置也鲜有报道。典型的高功率激光驱动器,如美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)的 Nova 装置、NIF 装置和 Mercury 装置,美国罗切斯特大学激光力能学实验室(Laboratory for Laser Energetics, LLE)制造的 Omega、Omega EP 装置,以及中国神光装置等都使用角度相位匹配条件,但其中一部分对倍频晶体的温度控制精度已相当高(主要是减少晶体形变及损伤^[6-7]),具有一定的借鉴意义。

其中 Nova 装置已于 1999 年退役,所使用的倍频晶体温控方法为循环气体温控法^[8-9]。其倍频晶体为口径 27 cm×27 cm 的薄片状 KDP 晶体,三倍频系统倍频转换效率能达到 56%以上。OMEGA 装置上整体也使用气体温控线,将倍频晶体放置在专门设计的隔热室中,温度的微小波动则通过精确调整晶体角度的办法来弥补。但实时调整角度的实现较为复杂,并且无法避免温度梯度的影响。目前世界上最大的 ICF 装置 NIF 所使用的倍频晶体通光口径达 40 cm×40 cm^[10]。氮气冷却线的使用,使带有倍频晶体的终端光学组件(Final Optics Assembly, FOA)模块的环境温度波动在 20±0.28℃范围内^[11]。壁面所使用的水覆盖层(Water Jacket)温度最佳能达到±0.03℃,并能保持在±0.1℃范围内^[12],三倍频

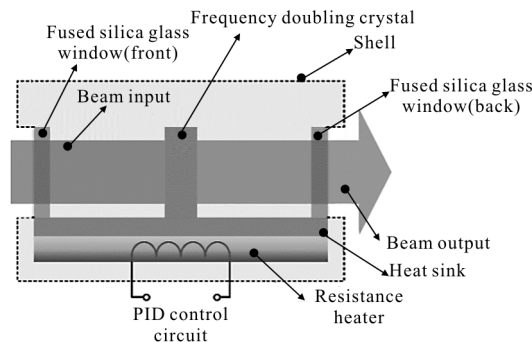
效率达 80%。中国神光 II 系统上 FOA 中倍频晶体所采用的温度控制方式为 PID 控制的二级水循环系统^[13]。该温控系统能工作在 10~40℃室温环境下,将出水温度控制在 20.0±0.1℃。

以上这些装置中倍频晶体工作在角度相位匹配条件下,可选择与环境温度相近的目标温度。而在温度相位匹配条件下则需将每块晶体的最佳匹配温度作为装置的目标温度。与环境温度相差越大,热梯度也越大,实现精确而稳定的温控就越困难。小口径倍频晶体(一般口径仅为十几毫米)由于整体质量较小,热惯性相对较小,相当于对某点温度进行控制,实现途径多样,并不断有新的方法出现^[14],具有一定启发性。其难点在于解决连续激光器或高重复频率激光器上晶体的温升问题^[15]。目前,由于功率、稳定性、成本等因素,能实际应用于温度相位匹配条件下的大口径倍频晶体温控的装置并不多见。

文中使用电加热的方法实现对倍频晶体的温控。研究了该装置温度分布的整体趋势,得出不同加热长度下,晶体稳定温度及其稳定所需时长随晶体导热系数变化的规律。

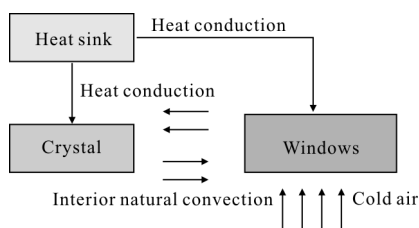
1 温控装置原理

为保证倍频转换效率,要求晶体温度在较长时间段内稳定在最佳温度(依晶体不同,可能为 20~60℃间的任一温度)附近,且使口径为 Φ80 mm 的晶体面温度差异不超过±0.15℃。温控装置的原理如图 1(a)所示。电阻丝作为热源直接加热热沉,加热温度由高精度温度传感器和 PID 控制电路保证,得到恒温热沉。



(a) 装置原理图

(a) Device schematic diagram



(b) 装置传热框图

(b) Heat transfer diagram of device

图 1 大口径倍频晶体高精度温控装置

Fig.1 High precision temperature control device for large aperture frequency doubling crystal

一方面,在恒温热沉上安装晶体,通过热传导对晶体进行加热。考虑到倍频晶体一般导热系数较小,承压能力有限^[16],与热沉间接触热阻较大,薄片状晶体仅依靠晶体四周的小面积进行热传导加热,速度相当缓慢,且容易产生较大热梯度,故增设壳体与窗口玻璃形成封闭腔体,在局部形成温度较为稳定的环境。另一方面,热沉还同时加热窗口玻璃和封闭腔体内部空气,从一定程度上减弱环境温度对晶体的影响,并通过空气的自然对流加热晶体面,均衡晶体温度,提高晶体温度一致性。

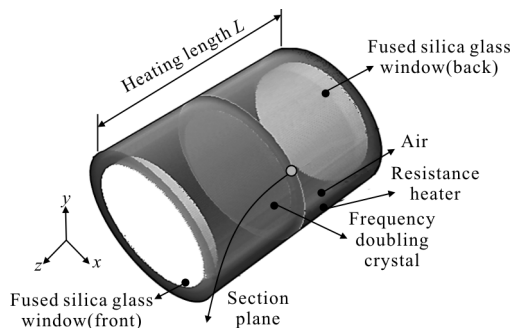
通过仿真和实验发现,影响晶体温度分布的因素有多种,如热沉温度的稳定性、窗口玻璃的导热性能、晶体导热性能及其与热沉间接触热阻的大小等。其中,为保持光路通光良好,窗口玻璃不能涂覆绝热材料,保温性能差,易受外界温度及其波动的干扰,直接降低封闭腔体内温度。仿真发现,增长箱体长度可有效降低窗口的影响。因此,下面将重点讨论在不同加热长度下,不同导热系数的晶体所能达到的稳定温度及其稳定所需的最少加热时长。

2 仿真与实验

2.1 仿真

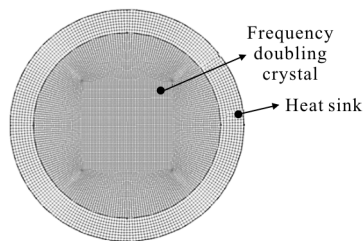
根据倍频晶体温控装置的传热框图(见图 1(b)),可将其抽象为一个典型的流-固-热耦合模型,如

图 2(a)所示。由于温度传感器置于热沉上,故仿真建模时简化电加热部分,热沉视为恒温。热沉(图 2 中为方便看到内部晶体,将其显示为棕色透明状,其长度即为加热长度 L)与口径为 $\Phi 80\text{ mm}$ 、厚度为 8 mm 的晶体接触。两端窗口玻璃口径为 $\Phi 80\text{ mm}$ 、厚度为 10 mm 。因实际情况中大口径倍频晶体表面需加工至光学质量,表面质量较高,而窗口玻璃表面相对粗糙,在仿真模型中根据实验结果设定不同接触热阻。网格划分时,采用“钱币”法得到结构化网格。图 2(a)中模型剖切面(section plane)处网格如图 2(b)所示。当加热长度设为 130 mm 时,总体网格数量达 160 万,且已验证满足网格无关性要求。



(a) 大口径倍频晶体温控装置

(a) Temperature control device for large aperture frequency doubling crystal



(b) 剖切面网格

(b) Grid of section plane

图 2 仿真模型图

Fig.2 Simulation model

仿真中所涉及的固体材料及其相关参数已列于表 1 中。目前,倍频晶体材料导热性能都较差,导热

表 1 仿真模拟所涉及的各固体材料相关参数

Tab.1 Relevant parameters of the solid materials involved in simulation

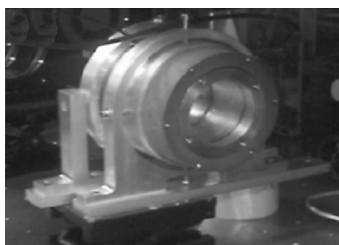
Material	PMMA	Fused silica	ADP crystal	Material 1	Material 2	Stainless steel	Brass
$C_p/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	1 464	790	476	476	476	450	390
Thermal conductivity/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	0.18	1.46	// c 0.52 ⊥ c 1.13	4.8	8.6	16.2	120

系数一般小于 $10 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。为更准确地模拟该范围内晶体温度的分布特点，除使用实际材料(PMMA、平行和垂直 ADP 晶体晶轴方向、不锈钢和黄铜)所具有的导热系数外，还补充了材料 1 和材料 2(其热容参照 ADP 晶体)进行仿真模拟。

使用流体软件 Fluent 进行求解计算。模型边界条件设置如下：热沉视为恒温热源，在研究装置温度分布特性时设为 $333.15 \text{ K}(60^\circ\text{C})$ ；配合实验仿真时，则使用实验中所用倍频晶体的最佳匹配温度。两端窗口玻璃考虑与外界冷空气对流，对流系数设为 $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ；外界环境温度设为 $293.15 \text{ K}(20^\circ\text{C})$ ；压力为标准大气压；整体初始化温度设为 $293.15 \text{ K}(20^\circ\text{C})$ 。计算时采用标准 $k-\varepsilon$ 模型；封闭腔体内自然对流为低速流动，空气视为不可压流体，采用 SIMPLE 算法；控制方程各项的离散格式采用二阶迎风格式。仿真过程中，若计算时长 5 min 内，监测点温度变化不超过 2% 则视为达到稳态(监测点分布见下文)，仿真结束。

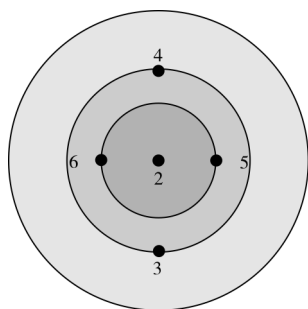
2.2 实验

实验装置如图 3(a)所示，两端窗口材料采用石英玻璃，加热长度为 130 mm。装置置于温度为 $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 的恒温室内。实验中选用口径为 $\Phi 80 \text{ mm}$ 、厚度为 8 mm 的 ADP 晶体，研究非临界相位匹配条



(a) 实物图

(a) Photo of the device



(b) 晶体上温度监测点分布

(b) Distribution of temperature monitoring points on crystal

图 3 温控装置

Fig.3 Temperature control device

件下，晶体温度分布对激光由二倍频(2 W)向四倍频(4 W)转换时效率的影响。

为保证光路畅通，晶体通光口径上不允许放置温度传感器。采用能量计测出激光倍频转换效率(二倍频转换为四倍频)的方法间接得到晶体温度。这种方法在光学晶体材料性能等研究中多有使用^[3-5]。该方法依赖于非临界相位匹配条件下，倍频晶体倍频转换效率与温度间的对应关系。实验测得该实验中所用的 ADP 晶体倍频转换效率与温度间的关系如图 4 所示^[3-5]。得到该 ADP 晶体的最佳匹配温度为 305.83 K ，此时倍频转换效率为 87%。

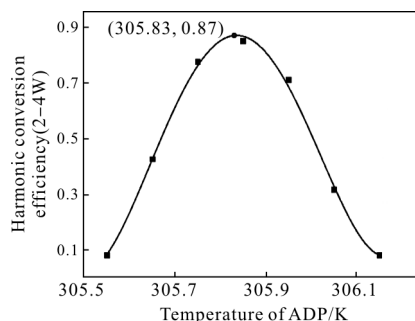


图 4 实验中所用 ADP 晶体倍频转换效率与温度间的关系

Fig.4 Function between harmonic conversion efficiency of the ADP crystal and temperature

仿真发现，自然对流虽能均衡并提升晶体温度，但由于接触热阻和晶体本身热阻等因素存在，晶体温度仍略低于目标温度。故在进行实验时，将目标温度设为 $306.05 \text{ K}(32.9^\circ\text{C})$ 。

传感器使用 A 级精度的 Pt100 热电阻，温度巡检仪显示分辨率为 0.1°C ，并在实验之前使用冰水混合物进行零点标定。温度监测点的分布如图 3(b)所示。倍频晶体中心布置一个温度监测点(点 2)， $\Phi 50$ 和 $\Phi 30$ 圆周处各布置两个(点 3、4、5 和点 6)，用于监测晶体温度并作为实验结束的依据。热沉上布置一个温度传感器(测点 1，在图中未画出)用于温度控制的反馈信号。通过 PID 控制电路将热沉稳定在目标温度上。其中比例、积分和微分三个参数的初始值根据 Ziegler-Nichols 经验公式进行预设。经多次实验调整，得到如图 5 所示的热沉温度控制效果。当将初始温度为 50°C 的热沉加热到目标温度 60°C 时，第一次达到目标温度的上升时间约为 750 s，超量为 0.1°C 。实验过程中，每隔 1 min 进行一次温度采

样。5 min 内各测点温度变化均不超过 0.1°C 时,则视为装置温度已稳定,实验结束。

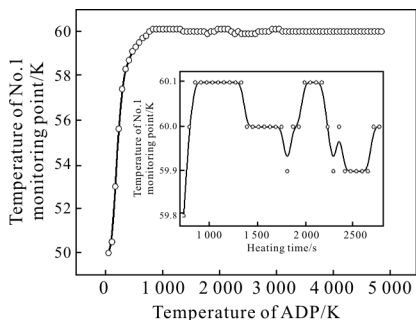


图 5 热沉温度响应曲线

Fig.5 Temperature response curve of heating sink

3 结果分析及讨论

3.1 整体温度分布

热沉温度为 333.15 K(60°C),整体初始化温度和环境温度为 293.15 K (20°C),晶体材料导热系数为 $1.13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 时,各加热长度的装置稳定温度分布云图如图 6 和图 7 所示。

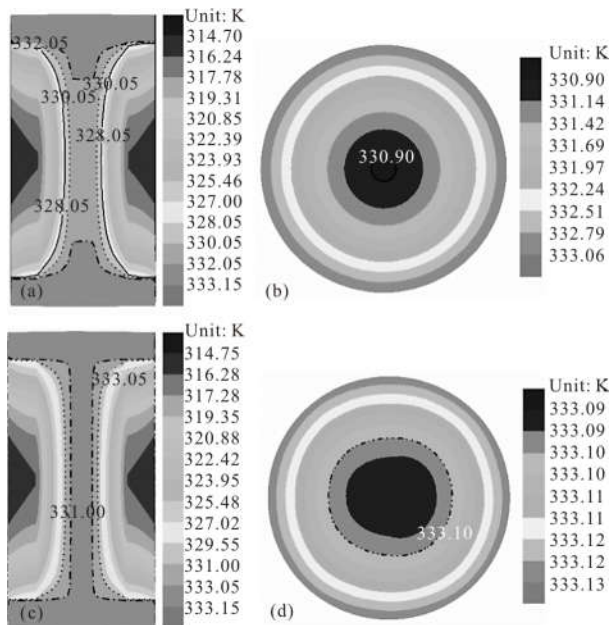
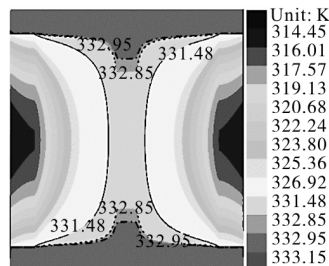


图 6 $L=50 \text{ mm}$ 时,稳态温度分布云图,晶体热导率为 $1.13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 时,(a)为装置剖面,(b)为晶体截面;晶体热导率为 $120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 时,(c)为装置剖面,(d)为晶体截面

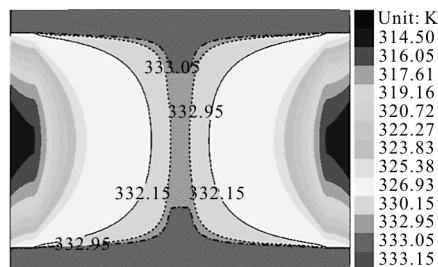
Fig.6 Steady state temperature distribution when $L=50 \text{ mm}$, cross section of device (a) and crystal (b),when the thermal conductivity of the crystal is $1.13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, cross section of device (c) and crystal (d), when the thermal conductivity of the crystal is $120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

整体上,封闭腔体内部温度分布呈马鞍状,越靠近中间部分温度越高。形成的原因有:(1)中间区域存在晶体,与热沉直接接触,靠热传导升高了温度;(2)中间区域离两端窗口远,受外界环境影响小。对比图 6(a)和图 7(a)、(b)、(c)可以看出,在一定范围内增长加热长度可有效增大中间高温区域,同时提高该区域温度,晶体稳定温度不断接近目标温度。



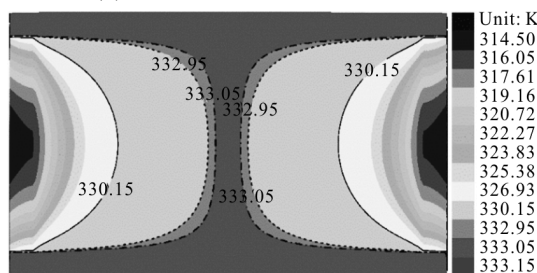
(a) 装置剖面, $L=90 \text{ mm}$

(a) Cross section of device, $L=90 \text{ mm}$



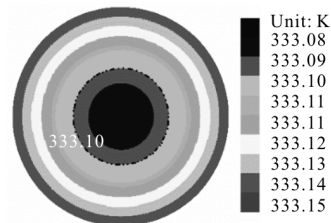
(b) 装置剖面, $L=130 \text{ mm}$

(b) Cross section of device, $L=130 \text{ mm}$



(c) 装置剖面, $L=170 \text{ mm}$

(c) Cross section of device, $L=170 \text{ mm}$



(d) 晶体截面, $L=170 \text{ mm}$

(d) Cross section of crystal, $L=170 \text{ mm}$

图 7 晶体导热系数为 $1.13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 时,稳态温度分布云图

Fig.7 Steady state temperature distribution, when the thermal conductivity of the crystal is $1.13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

当加热长度为 50 mm 时(见图 6 (a)), 晶体及其邻近区域温度仅能达到 328.05 K 左右, 且晶体平面方向温度分布相当不均匀, 温差高达 2.16 K, 与目标温度差距也较大; 当加热长度为 90 mm 时(见图 7(a)), 晶体及其邻近区域温度有明显提高, 保持在 331.48 K 左右; 当加热长度为 130 mm 时(见图 7(b)), 晶体及其邻近区域温度进一步提高到 332.15 K, 晶体外围温度也已经达到 332.95 K, 与目标温度相差仅 0.2 K; 当加热长度为 170 mm 时(见图 7(c、d)), 晶体及其邻近区域温度已达到 332.95 K, 晶体温度控制在了 333.05 ~ 333.15 K 之间。

同时从图 6 可以看到, 同一加热长度的装置, 晶体材料导热系数越高, 稳定时中心点温度与目标温度越接近。如, 加热长度为 50 mm 时, 若晶体材料导热系数为 $0.18 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 稳定时温度与目标温度相差 8 K; 而当晶体导热系数 $120 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 时, 晶体温度与目标温度接近, 晶体内部温度差也控制在了 0.1 K 内。

3.2 晶体稳定温度

依据仿真结果, 拟合不同导热系数的材料在不同加热长度下, 中心点所得到的稳定温度, 结果如图 8 所示。可以看到, 晶体材料导热系数越高时, 所能达到的稳定温度越接近于目标温度。从装置径向的温度分布可以看出晶体中心点温度最低, 这是由于热量从晶体四周向中间的低温区域导热时主要受晶体材料本身的导热性能影响。材料的导热性能由导热系数表征, 导热系数越大, 说明其导热性能越优良, 越有利于中心点温度的升高。同时, 加热长度增加也能提升晶体温度。当加热长度由 50 mm 增长到 90 mm 时, 稳定温度有较大提升, 之后再增长加热长度, 对晶体中心温度升高影响并不明显, 即此时环境

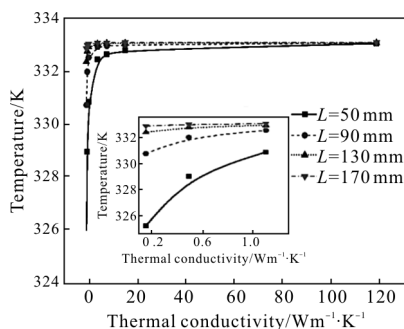


图 8 中心点稳定温度与晶体导热系数间关系
Fig.8 Steady state temperature of the center varies with the thermal conductivity of the crystal

温度对晶体的影响减弱。

图 9 为 ADP 晶体在加热长度为 130 mm, 环境温度为 293.15 K(20°C)条件下, 通过实验得到的晶体倍频转换效率和温度分布, 并进行相应仿真。由前面倍频转换效率与晶体温度关系曲线(见图 4)得到该 ADP 晶体的最佳匹配温度为 305.83 K。

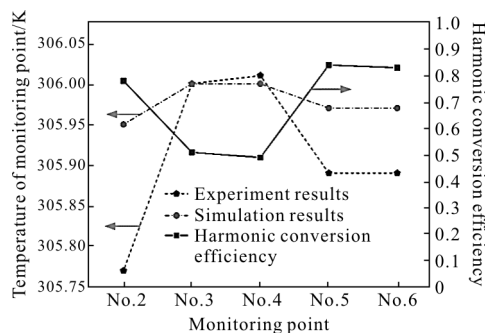


图 9 ADP 晶体倍频转换效率及监测点温度
Fig.9 Harmonic conversion efficiency and temperature of monitoring points on ADP crystal

从图 9 中可以看到, ADP 晶体在全口径范围内的倍频转换效率(2~4 W)在 50%~85%之间。实验与仿真结果都呈现晶体外围温度高, 中心温度低的趋势, 这是因为该加热方式中热量从装置内壁向中心传递, 受介质本身热阻和两端环境温度的共同影响。仿真所得晶体温差约为 0.05 K, 实验所得约为 0.24 K。仿真和实验所得监测点 3、4 的结果基本一致; 越靠近中心, 实验所得晶体温度越低于仿真结果, 在监测点 5、6 处相差 0.07 K, 而在点 2 处相差近 0.2 K。这表明装置密封不完全, 导致一定外界冷空气进入, 降低内部流场温度, 与仿真的完全密封条件尚有一定差距。

3.3 温度稳定所需时长

图 10 为不同导热系数的晶体材料在不同加热

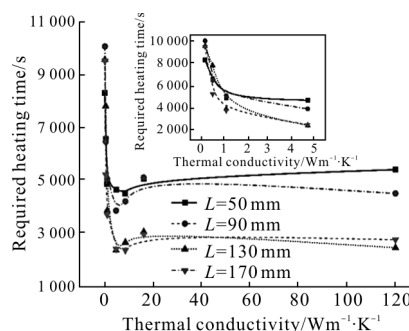


图 10 温度稳定所需时长与晶体导热系数间关系
Fig.10 Temperature required heating time varies with the thermal conductivity of the crystal

长度下,温度稳定所需最短时长。当晶体导热系数较低($<5 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)时,稳定时长受晶体导热系数的影响较大,温度稳定所需时长主要受导热系数限制,而受加热长度的影响较小。导热系数减小将导致稳定所需时长迅速增加。

当晶体导热系数较高($>5 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)时,加热长度成为影响加热时长的主要因素。当加热长度在50~90 mm时,所需加热时长在5 000 s左右,而当加热长度增加到130 mm或170 mm时,加热时长可减少一半。这种情况下,在一定范围内增加装置的加热长度可有效减少倍频晶体温度稳定所需时长。

4 结论

为了通过非临界相位匹配技术实现大口径倍频晶体频率转换效率的稳定可靠输出,研制了大口径倍频晶体高精度温控装置。仿真与实验结果均显示通过电加热的方法能将大口径倍频晶体的全口径温度一致性控制在 $\pm 0.15^\circ\text{C}$ 范围。建立流-固-热耦合仿真模型,得出不同导热系数的晶体材料与装置长度和温度稳定所需最少时长的关系,在保证温控要求的同时可降低制造和时间成本。仿真与实验结果均显示通过电加热的方法能将大口径倍频晶体的全口径全口径温度一致性控制在 $\pm 0.15^\circ\text{C}$ 范围。文中提出的大口径晶体温控技术及装置亦可用于其他需要精确控制光学晶体温度的场合。

参考文献:

- [1] Clery D. What's next for ICF[J]. *Science*, 2009, 324: 328-329.
- [2] Yang S T, Hensian M A, Weiland T L, et al. Noncritically phase-matched fourth harmonic generation of Nd: glass lasers in partially deuterated KDP crystals[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(10): 1824-1826.
- [3] Ji S, Zhang S, Xu M, et al. Non-critical phase-matching conditions for fourth harmonic generation of DKDP crystal[J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(6): 735-739.
- [4] Ji S, Wang F, Zhu L, et al. Non-critical phase-matching fourth harmonic generation of a 1053-nm laser in an ADP crystal[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(4): 1605.
- [5] Sun F, Zhang P, Xiang Y, et al. The influence of window thermal conductivity on the temperature distribution of the ADP crystal with large aperture [J]. *Optics Communications*, 2015, 345(12): 19-25.
- [6] Shen Hua, Zhang Yingcong, Zhu Rihong. Mathematical model and structure parameters optimization of KDP crystal optical absorption coefficient measurement with interferometry method based on photothermal displacement principle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3353-3357. (in Chinese)
沈华, 张英聪, 朱日宏. 基于光热位移原理的KDP晶体光吸收系数干涉测量方法的数学模型及结构参数优化 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(12): 3353-3357.
- [7] Feng Bo, Liu Bingguo, Chen Fengdong, et al. Final optics damage online inspection system for ICF[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2519-2524. (in Chinese)
冯博, 刘炳国, 陈凤东, 等. ICF终端光学元件损伤在线检测装置的研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2519-2524.
- [8] Coleman L W, Krupke W F, Strack J R. Laser program annual report[R]. US: Lawrence Livermore National Lab, 1981.
- [9] Lowdermilk W H, Campbell E M, Campbell J H, et al. The Nova upgrade facility [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1993, 11(2): 307-316.
- [10] Wegner P J, Auerbach J M, Biesiada Jr T A, et al. NIF final optics system: frequency conversion and beam conditioning[C]// SPIE, 2004, 5341: 180-189.
- [11] Bernardin J D. Experimental investigation of the thermal upset and recovery of the national ignition facility's optics module [R]. US: Los Alamos National Lab, 1999.
- [12] Parietti L, Martin R A. National ignition facility final optics assembly thermal effects of maintenance operations [R]. Office of Scientific and Technical Information Technical Reports, 1998, 8: 44-47.
- [13] Yuan Wenjun, Shen Zhenjun. Optimization design of 1 J-level optical parametric chirped-pulse amplification system [J]. *Modern Electronics Technique*, 2011, 34(7): 193-195. (in Chinese)
原文俊, 沈振军. 大范围高精度温控系统的控制算法研究[J]. 现代电子技术, 2011, 34(7): 193-195.
- [14] Rothhardt C, Rothhardt J, Klenke A, et al. BBO-sapphire sandwich structure for frequency conversion of high power lasers[J]. *Optical Materials Express*, 2014, 4(5): 1092-1103.
- [15] Tian Changqing, Xu Hongbo, Cao Hongzhang, et al. Cooling technology for high-power solid-state laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(7): 1686-1692. (in Chinese)
田长青, 徐洪波, 曹宏章, 等. 高功率固体激光器冷却技术[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1686-1692.
- [16] Su R, Liu H, Liang Y, et al. Mechanical and optical analysis of large-aperture optics mounted on a frame with a curved surface[J]. *Optics and Laser Technology*, 2014, 56(1): 189-195.