

大口径强激光倍频系统精密调整架的研制

苏建良 沈振军 秦新捷 沈耀宗 孙麟治

(上海大学精密机械工程系 上海 201800)

朱宝强 詹廷宇

(上海光学精密机械研究所 上海 201800)

摘要 叙述了大口径高功率固体激光器,利用两块级联晶体的二阶非线性效应,对激光输出进行谐波转换,实现三次谐波输出的方法。介绍了实现倍频和混频过程所需的精密调整架的结构设计要点及其精度分析。研制的8套倍频器系统在同一台控制电源集中控制下,可获得高精度要求。

关键词 激光器 倍频晶体 倍频器 精密调整架

1 前言

随着惯性约束核聚变(ICF)实验的发展,人们进一步认识到利用短波长高功率激光打靶的优越性,因其可以大幅度提高靶丸对激光的吸收率,能够大量减少超热电子的影响。另外,拉曼散射、Brillouin 散射等现象都将随波长的变短而减小。因此短波长激光的应用研究已成为目前高功率激光系统发展方向之一。目前国外已有好几个实验室的高功率固体激光装置都建立了大口径三倍频系统,采用三次谐波打靶取得满意的实验结果。

为了满足我国(ICF)实验的要求和相应技术的发展,提出了高效率转换的谐波输出要求,具体的指标是:对 n_s 级的基频脉冲激光二倍频效率高于65%,三倍频效率应高于55%,这将成为本研制工作的主要技术研究目标。

2 三倍频激光的产生

目前高效的三次谐波都是利用晶体的二阶非线性效应,通过倍频和混频来实现的。其倍频和混频过程可由耦合波方程来描述。

假设光沿 Z 轴传播的线偏振光, 采用慢变振幅近似对具有 Kleinman 对称 ($d_{14} = d_{36}$) 的晶体, 例如 KDP 晶体, 我们不难得到以下方程组(1):

$$\left. \begin{aligned} dE_1/dz &= -\frac{1}{2}r_1E_1 - iKE_3E_2 \times \exp(-i\Delta k \cdot z) \\ dE_2/dz &= -\frac{1}{2}r_2E_2 - i(\omega/\omega)KE_3E_1 \times \exp(-i\Delta k \cdot z) \\ dE_3/dz &= -\frac{1}{2}r_3E_3 - i(\omega/\omega)KE_2E_1 \times \exp(i\Delta k \cdot z) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 $E_j = n_j E_j$, n_j 为折射率, $j = 1, 2, 3$

$$K = - (n_1 n_2 n_3)^{-1/2} \omega d_{36} \sin r \theta_m / 2c \quad \begin{array}{ll} r = 1 & \text{对 I 类晶体} \\ r = 2 & \text{对 II 类晶体} \end{array}$$

θ_m 为匹配角, $\Delta k = k_3 - (k_1 + k_2)$, r_j 为晶体的吸收系数。

在相位匹配条件下 ($\Delta k = 0$), 只有输入到三倍频晶体上的 2ω 和 1ω 的光子数相等时才能得到最高的三倍频转换效率。换句话说就是要选择一种倍频器使 $M = I(2\omega)/I(1\omega) = 67\%$ 。根据此原则级联产生三倍频有以下几种方案:

- 角度失谐方案(图 1a) 通常的做法是选 I 类晶体作倍频器, 选 II 类晶体作混频晶体, 这种匹配方式靠选择适当的晶体厚度和失谐角 $\Delta\theta_i$ 来保证 $M = 67\%$ 。
- 偏振失配方案(图 1b) 二块晶体都采用 II 类匹配, 它通过入射的基频电矢量偏振方向与 o 方向(指倍频晶体) 成 35.3° 来保证一个入射 e 光子伴有二个 o 光子。
- 偏振旁路方案(图 1c) 除了采用二块 I 类晶体外, 它的物理思路与偏振失配方案一样, 但由于采用二块 I 类晶体 η_{ω} 随 $\Delta\theta_i, \Delta\theta_o$ 变化都很灵敏, 另外倍频时它只有部分光参与, 对同样的入射光强要完成同样的转换效率晶体要求较厚。现阶段实用上还没有看到采用这种方案的报道。

很显然, 在我们的 ICF 装置中, 选择第二种 2-2 类匹配的偏振失配方案, 不仅可以降低谐波转换对失配角的灵敏度, 而且, 只要将第二块晶体转过 90° 就能直接作为二倍频使用。

图 2 所示为实现这一方案的光路, 列出了激光偏振、晶体光轴和调整架、调整轴的排布, 其中二块 II 类 KDP 晶体厚度为 13mm, 分别安装在同一台高精度伺服调整架的二个平行法兰框架内。

图中 $\Psi = 35.3^\circ$ 将保证混频过程中倍频光和基频光的能量平衡, 并且倍频晶体和三倍频晶体的相位匹配都能通过一维调整来实现。在图中, 对倍频晶体的相位匹配只要绕竖直轴调整就能实现, 此时如果在相位匹配位置附近绕水平轴转动了 α 角, 它对晶体匹配角的改变量仅为 $0.3\alpha^2$ 。同样, 调节三倍频晶体匹配, 只要绕水平轴调整, 此时晶体随竖直轴调整量的变化也将是二阶小量, 可忽略。

由此可见, 当将这两块晶体装在同一调整架上时, 只要保证两块晶体的晶轴分别与调整架的转轴垂直, 由于寻找晶体匹配量很小, 调节倍频晶体和三倍频晶体的相位匹配角将是相互独立的。

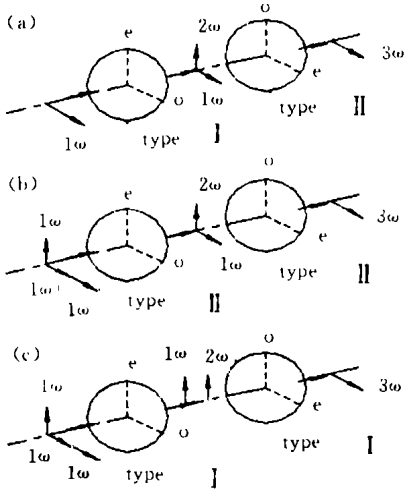


Fig. 1 Crystal arrangement of three type THG

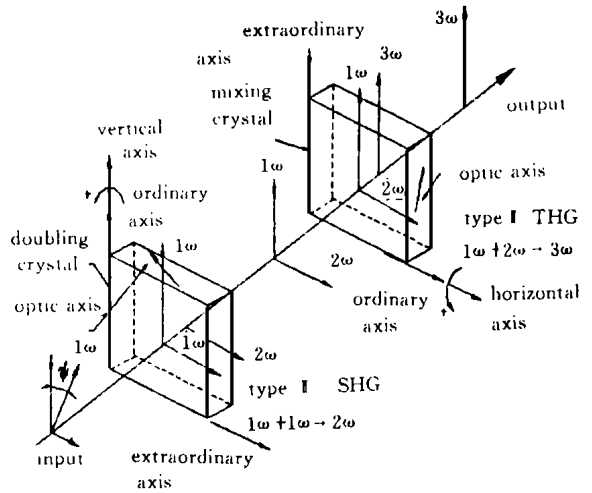


Fig. 2 Crystal arrangement and polarization directions for Type I THG

针对 ICF 的激光参数, 考虑到晶体的加工误差、环境温度的变化, 以及基频本身的光束质量会带来无法补偿的失配等因素, 按总体要求, 调整控制系统应保证失配角小于 $100\mu\text{rad}$, 根据上述原理和要求, 确定倍频器调整架的技术指标如下。

3 倍频调整架的设计指标

- | | |
|---|------------------------------------|
| 1) 倍频晶体的尺寸 × 厚度 | $\Phi 270 \times 13\text{mm}$ |
| 通光口径 | $\Phi 250\text{mm}$ |
| 2) 二块 KDP 晶体装在同一台高精度伺服调整架上 | |
| 伺服偏转调整分辨率 | 2 / step |
| 伺服偏转调整重复精度 | 2 |
| 偏转调整范围 | ± 40 |
| 竖直和水平偏转调整相互独立, 影响小于 2 | |
| 二块晶体分别绕自身转动调节, 调节大于 5° ; 精度 2 | |
| 二块晶体相对可调平行度, 优于 5 | |
| 3) 为了满足不同偏振基频光, KDP 晶体和伺服调整架整体能绕箱体水平轴 (x 轴) 转动 | |
| 转动范围 | $\pm 80^\circ$ 调整分辨率 5 / step |
| 调整精度 | 5 |

整体转动范围内对竖直偏转轴和水平偏转轴的影响小于 5

整体转轴 (x 轴) 与竖直偏转调整轴 (y 轴) 和水平偏转调整轴 (z 轴) 线的交点偏离量小于 0.2mm 。

4) 对伺服控制系统的要求

八路倍频器的水平偏转、竖直偏转以及整体的绕轴转动均采用步进电机驱动。远距离集中控制, 并且各自独立、互不干扰。

各路偏转和整体绕轴转动调节均能手动, 手动-自动控制切换方便。

倍频器应能自锁、消间隙, 并保证停调位置上的稳定性优于 10。

4 机械结构布置的工作原理

基于上述要求, 可见这个倍频器调整架将是一台多维运动的精密机械, 其机械结构如图 3 所示, 主要分为底座和主体两大部分。

4.1 底座部分

箱体座的四角分别设有调平机构, 通过改变调节螺钉的高度, 实现对倍频器中心高以及整台倍频器绕 x 轴、 z 轴方向的粗调整, 箱体底安放在平行底座上, 在其两侧, 设有四个调节螺钉, 使倍频器绕铅垂直能整体偏转, 实现倍频晶体能于激光光束粗调垂直, 然后用锁紧螺钉锁紧。

4.2 主体部分

主体部分分为箱体、外框、中框、内框以及晶体法兰盘五个部分, 法兰盘内安装 KDP 晶体, 两个法兰盘分别从左右两侧装入内框, 内框与中框之间设有精密滚动轴承以及竖直偏转调整机构, 调节该机构可以使内框连同晶体法兰绕竖直轴偏转, 中框与外框之间同样以精密滚动轴承联结, 并设有水平偏转调整机构, 用以实现中框、内框以及晶体法兰绕水平轴偏转。中框与内、外框之间的转轴相互精加工垂直, 从而保证水平、竖直调整时互不影响, 外框外缘支承在箱体上, 用于实现伺服调整架整体绕 x 轴转动。

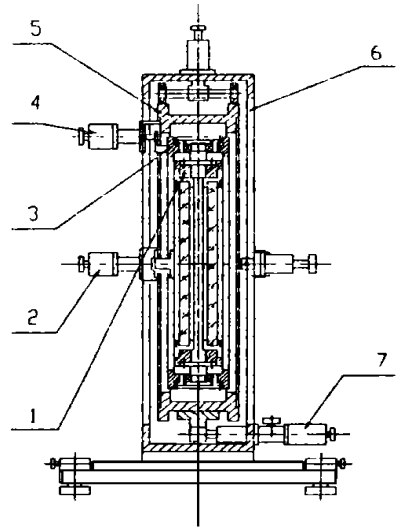
水平、竖直以及外框的转动分别由三个步进马达驱动的调整机构推动, 见图 3 所示 2、4、7 三个部件, 通过控制器对此三个步进马达的分别调整, 达到倍频器在水平、竖直以及绕 x 轴转动三个自由度上的正确定位。

4.3 晶体的安装和固定

晶体安装的好坏, 将直接影响相位匹配的调节, 为了保证高效稳定的三倍频输出, 我们必须正确安置晶体。

为了尽可能减小安装时对晶体产生内应力, 晶体与法兰盘的接触采用圆周三点支承法, 支承带均匀分布在晶体外缘直径 $\phi 260 \sim \phi 270$ 处, 支承带面经过精心研磨, 保证同一高度和平面度。与此相对应的三块压板与晶体顶面间采用软接触压紧, 用于保证均匀的接触压力。

从技术指标当中, 我们可以看到, 两块晶体在装入法兰盘后, 还有绕轴转动和面平行度可调等要求, 所以, 在此我们对法兰盘作了特别的设计。



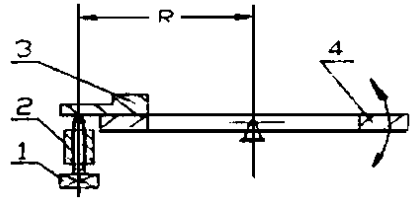
1. vertical trimming frame
2. vertical trimming motor
3. horizontal trimming frame
4. horizontal trimming motor
5. whole rotate frame
6. trunk 7. trunk rotate motor
Fig. 3 Adjust of frequency doubler

法兰盘装入内框以后,通过装于法兰与内框之间的千分螺丝调整机构,可以使法兰随同晶体一起绕轴线在 8 范围内可调。为了满足法兰顶绕轴转动可调,法兰与内框之间采用了三顶三拉固定方式以此满足两块晶体之间的平行度优于 5 的要求。

4.4 轴系和微调机构的精度估算

整个倍频器主要包括俯仰偏转轴、方位偏转轴和外框整体转轴三套轴系,其中俯仰和方位轴系将是精密轴系,外框轴系则是精密的空间轴系。俯仰轴位于外框和中框之间,轴线为水平方向,方位轴位于中框和内框之间,轴线为竖直方向。

鉴于方位轴(俯仰轴)的偏转角很小,轴承孔和框轴均经精密加工制作,采用了 D204(17×40×12)高精度轴承,由此估算出的轴系误差小于 0.14,方位轴(俯仰轴)的偏转,见图 4 所示,即是在中框 4(内框)的外缘装有联接杠杆 3,由步进电机 1 和精密微调机构 2 带动实现往复偏转。偏转角按正切机构计算得出偏转角的分辨率为:



1. stepping motor
2. precise trimming mechanism
3. connect lever
4. middle frame

Fig. 4 Diagram of inclination mechanism

$$\theta = \frac{P \times N / 360}{R} (\text{rad}) = 2.1$$

其中 R —— 方位连接杠杆作用臂长 $214 \pm 1 \text{ mm}$

P —— 精密丝杆螺距 $5 \text{ mm} \pm 0.005 \text{ mm}$

N —— 步进电机步距角 $1.5^\circ \pm 0.15^\circ$

当最大偏转角 θ 为 40 时,由于采用正切机构引起的原理误差为

$$\Delta S = -\frac{R}{3} Q^3 = -\frac{214}{3} \times \left(\frac{40}{60 \times 57.3}\right)^3 = 0.112 \mu\text{m}$$

或者

$$\Delta\theta = \frac{0.112}{214} \times 216 = 0.11$$

式中 θ = 偏转角 40 R = 偏转杠杆臂长 214 mm

偏转系统的传动误差计算从公式[5]

$$\Delta\theta = \frac{\partial\theta}{\partial X} \times \Delta X = \frac{\partial\theta}{\partial P} \times \Delta P + \frac{\partial\theta}{\partial N} \times \Delta N + \frac{\partial\theta}{\partial R} \times \Delta R$$

代入各值,并按极限误差核算,得出

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{\max} &= \frac{N}{R \times 360} \times \Delta P + \frac{P}{R \times 360} \times \Delta N - \frac{P \times N}{360 \times R^2} \times \Delta R \\ &= 0.02 + 0.20 - 0.01 = 0.21 \end{aligned}$$

同理,可以计算出俯仰轴的偏转角分辨率为 2.3,最大偏转角 $\theta_{\max} = 40$ 时,正切机构的原理误差为 0.11,俯仰偏转系统的传动误差极限值为 0.24。

5 仪器的精度检验

倍频器在其配套的 $3 \times 8 = 24$ 路控制电源系统的控制下, 首先对仪器的主要功能进行了评定测试, 包括: 通光口径; 俯仰和方位偏转范围; 伺服调整体绕轴转动调整范围; 整体转轴与俯仰和方位轴线交点偏离; 俯仰定标尺相对于轴线的位置偏差; 方位定标尺相对于轴线的位置偏差; 以及两块晶体分别能绕轴转动调整范围等 8 项功能指标。试验表明 8 套倍频器均满足设计要求。

然后利用 0.1s 702 型光电自准直管及反射镜等检验工具, 按图 5 所示检验装置对 12 项精度指标进行了逐项测试。

表 1 列出了 8 套倍频器其中九项主要精度的平均值。

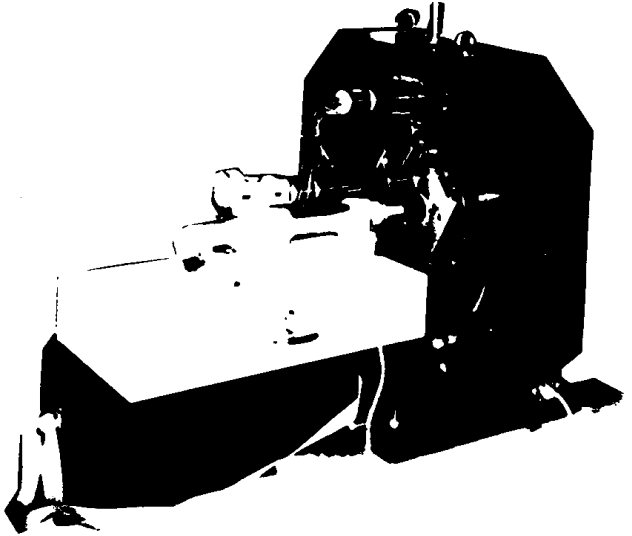


Fig.5 Calibrating apparatus

Table 1 Mean of real value of 9 precision target

measure content	design target	mean of real value
adjust precision of horizontal trimming	2 / step	$2.24 \pm 0.09 / \text{step}$
adjust extent of horizontal trimming	± 40	$> 2400_{\text{step}}(80)$
repeat precision of horizontal trimming	< 2	1.83
return stroke of horizontal adjust	< 2	2.05
adjust precision of vertical trimming	2 / step	$1.99 \pm 0.13 / \text{step}$
adjust extent of vertical trimming	± 40	$> 2400_{\text{step}}(80)$
repeat precision of vertical trimming	< 2	1.76
return stroke of vertical adjust	< 2	2.36
system stability in 10 hour	< 10	< 8.38

6 结束语

1) 本文采用的倍频晶体和混频晶体装在同一调整架上的一体化结构, 可以实现二块晶体分别调整, 获取相应的匹配角, 并使整个调整变得简单、容易控制。

2) 该调整架具有多维运动的调整系统, 其功能要求和偏转角的精度要求都很高, 研制采用的结构设计及其另部件的选配和精度设计分配合理, 可以达到指标要求。

3) 8 套倍频系统精密调整架在与配套研制的控制电源联动控制下(调整架所需的配套控制电源系统将有另文报道), 可以实现 $3 \times 8 = 24$ 路集中控制, 并可获得自锁和在停调位置上的

稳定性优于 10 的要求。

4) 晶体的安装以及三倍频光学系统的装校有待于在下一阶段激光系统中验证。

参 考 文 献

- 1 朱宝强,詹廷宇等.三倍频装置的研制.高功率激光及等离子体物理研究论文集,1995:73~77
- 2 Cracton R S, Tacobs S D. IEEE. T Q Elet, 1981, QE- 17: 1782
- 3 Laser Programme Annual Report 84 LLNL. Livemore Calif UCRL: 6~15
- 4 Laser Programme Annual Report 87 LLNL. Livemore Calif UCRL: 4~59
- 5 叶琪根等.机构精确度.成都:西北电讯工程学院出版社,1986

The Design and Invention of Precision Mount for Frequency-conversion Scheme of Large-aperture High-power Laser

SU Jian-Liang, SHEN Zhen-Jun, QIN Xin-Jie, SHEN Yao-Zong, SUN Lin-Zhi
(*Dept. of Precision Mechanical Engineering Shanghai University, Shanghai 201800*)

ZHU Bao-Qiang, ZHAN Ting-Yu
(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*)

Abstract

The method for third harmonic generation of large-aperture high-power solid laser is described which is the second nonlinear effect of two cascade crystals in this paper. The key point of structure design and accuracy analysis in precision mount which is needed in the procession to obtain second and third harmonics generation is introduced. The perfected 8 sets of high precision frequency-conversion scheme was controlled with a stepping-motor-driven paper supply and the high precision demand was satisfied.

Key words: Solid laser, Nonlinear crystal, Frequency-conversion scheme, Precision mount

苏建良 男,1966年生,助研,1989年毕业于东南大学,硕士学位。现从事精密机械及仪器设计方面的研究。参加研制的三米激光丝杠动态测量仪获上海市科技进步一等奖。