

BFEL 光学谐振腔真空机械五维精密 遥控调节装置*

张黎文 李永贵 王鸣凯 范耀辉

(中国科学院高能物理研究所 北京 100080)

摘要 论述了北京自由电子激光(BFEL)光学谐振腔真空机械五维精密遥控调节装置的设计考虑. 讨论了自由电子激光谐振腔不同于一般激光谐振腔的特点. 介绍了通过波纹管实现光腔真空室内外的位移及角度调节的传递方法. 采用粗细精三级传动精度设计, 使 BFEL 光腔腔镜不仅具有五维的精密遥控调节机能, 而且实现了调节范围 $\pm 5\text{mm}$, 分辨率 $2\mu\text{m}$, 角度调节范围 $\pm 3^\circ$, 分辨率 $0.5''$ 的实验结果. 该机构自 1992 年以来一直用于 BFEL 装置的出光实验中.

关键词 自由电子激光 光学谐振腔 腔镜调节装置

1 引言

北京自由电子激光是一台工作于中红外波段的大型激光设施^[1], 波长连续可调, 输出皮秒和微秒时间结构的光脉冲. 它主要由 30MeV 的电子直线加速器, 电子输运线, 摇摆器和光学谐振腔组成. 其中光学谐振腔是 BFEL 中的关键设备之一^[2]. 加速器产生的高品质脉冲电子束团通过时, 与光学谐振腔内的光场和摇摆器的磁场互作用, 在光波长的尺度上发生电子束团的群聚, 产生激光. 如图 1 所示. 在这里, 光学谐振腔提供了光学反馈, 调节光脉冲与电子脉冲的同步, 增强互相作用的职能. 两个腔镜放在真空室内不仅要求在 θ, ϕ 方向上严格对准, 而且腔镜的纵向距离要能精确调节. 真空室内外角度和位移的传

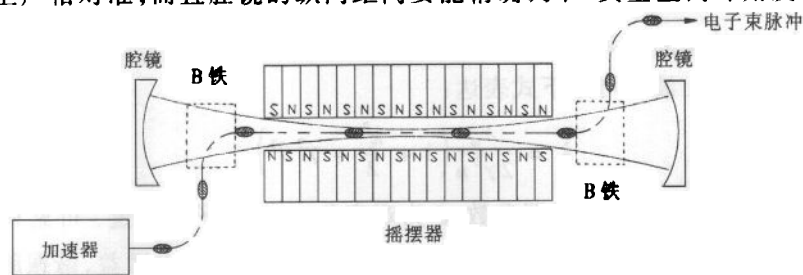


图 1 光腔结构示意图

2000-09-28 收稿

* 国家 863 计划激光领域资助

递要求平滑、准确。本文描述腔镜机械调节机构的设计考虑。

2 BFEL 光学谐振腔的特点

BFEL 装置中的光学谐振腔结构是激光器设计中难度比较大,要求比较苛刻的一种。同一般的激光器相比,它有下列几个特点:

1. 费涅尔数小:一般激光器的腔长在一米之内,最长 1.5m,而 FEL 的腔长要在 2.5—25m。受摇摆器磁铁间隙和真空管道限制,光腔横截面很小,因此,光腔费涅尔数小,一般在 1—2 之间。对 BFEL,腔长 2.52m,费涅尔数为 1.4。

2. 近共心结构:光腔结构接近准共心腔。由于束腰较细,因而,光腔调节难度大,装置稳定性要求高。在瑞利长度范围内,要求光束要和电子束直径(小于 1mm)很好地匹配。在装调过程中,还要使摇摆器轴、电子束轴和光腔光轴三轴共线。

3. 严格的腔长匹配要求:为获得高的激光增益,在腔内振荡的光脉冲,必须和加速器输出的电子微脉冲(电子脉冲空间长度 1.2mm,对应时间长度 4ps)在腔内行走时,时空结构相匹配,或者说在腔内保证光脉冲和电子束脉冲在空间相重合。这种时间上的重合被称作同步。为满足同步,腔长必须为站间距 $c/2f$ 的整数倍,这里 c 为光速, f 为加速器的射频频率。对 BFEL 装置, $f = 2856\text{MHz}$,该值为 52.5mm。

为实现同步条件,光腔端镜至少应有 $\pm 5\text{mm}$ 的轴向调节范围。由于光速快于电子脉冲速度,本来同步运行的光脉冲和电子脉冲经过一段距离后,会逐渐失去同步,在空间互相错开,称作滑移。这种滑移,导致光脉冲的前沿幅度增长慢,后沿拖长,且幅度增长快,既所谓光脉冲增长的“呆滞”现象^[3],为保证电子束与腔内光场的有效互作用,必须将光腔缩短一个失谐量 δ_{tr} ,

$$\delta_{\text{tr}} = \frac{g_0 \Delta}{4} \cdot \frac{\theta}{1 + \mu_0/3}$$

$$\Delta = N_w \lambda_e$$

这里, Δ 为滑移距离, g_0 为增益因子, N_w 为摇摆器周期数, λ_e 为激光波长, $\theta = 0.456$ 为延迟参数, μ_0 为耦合参数,是滑移距离与电子束团平均长度之比。对 BFEL 可求得 $\delta_{\text{tr}} = 8\mu\text{m}$ 。这说明光腔的镜间距离调节要有微米量级调节精度。

此外,激光的输出波长可用下式表达:

$$\lambda = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2 n} \left(1 + \frac{k^2}{2} + \gamma^2 \theta^2 \right)$$

这里, λ_w 为摇摆器周期, k 为摇摆器参数, θ 为观察角, γ 为电子束能量。可见只要 γ 有变化,就引起 λ 的变化, λ 的变化又引起滑移量的变化。为得到最大增益,谐振腔长度就要求改变,该改变量也在几个微米左右。这样,BFEL 的腔长需要有几十毫米的调节范围,又要有微米量级的调节精度。

4. 五维调节功能:光学腔有方位、俯仰和三维平移共 5 个自由度的调节功能。该调节要有大的调节范围,又要有较高的分辨率和重复性,所以在设计和调节时有很大的难度。

光腔腔镜方位角 ϕ 和俯仰角 θ 的调节精度可用下式估计^[4]: $\Delta\theta \approx \left[\frac{2\lambda_0}{\pi d} \right]^{1/2} (1-g)^{1/4} (1+g)^{3/4}$, 其中 d 为谐振腔腔长, g 为谐振腔腔参数, $\delta = 1 - \frac{R}{d}$, R 为腔镜曲率半径, 对 BFEL 装置, $R = 1.75\text{m}$, $d = 2.52\text{m}$, 当 $\lambda_0 = 10\mu\text{m}$ 时, 可求得 $\Delta\theta$ 为 1.7mrad . 实际调节精度要远小于该值.

5. 工作在真空条件下: 光学腔镜放在真空系统中, 真空度优于 10^{-6}Torr .

6. 遥控调节: 一般激光器都是人工手动调节, 而对于 BFEL 中的光学腔因其处在放射性环境, 这就要求光学腔的五维自由度的机械调节具有遥控的功能.

3 五维精密调节机械的设计

BFEL 光学腔设计起来有相当的难度, 为满足以上六点的要求, 对装架光腔腔镜的机械调节, 拟订了以下的方案, 腔镜装卡在具有 θ, ϕ 精调功能的压电陶瓷上, 压电陶瓷又放在具有 θ, ϕ 细调功能的调节架上, 该调节架置于真空室内, 真空室又在具有 x, y, z 粗调功能的三维遥控调节台上, 这样整个装置分粗、细、精三级调节.

真空室外位移粗调分 x, y, z ; 真空室内角度细调分 θ, ϕ ; PZT 精调 θ, ϕ, z . 其中 z 向表示光腔的轴向. x 为水平方向, y 为竖直方向, θ 表示竖直平面内调节的俯仰角, ϕ 表示水平面内调节的方位角. 一般来说, x, y 方向移动精度要求不高, 有 0.01mm 的调节精度即可. z 向必须有优于 $1\mu\text{m}$ 的调节精度.

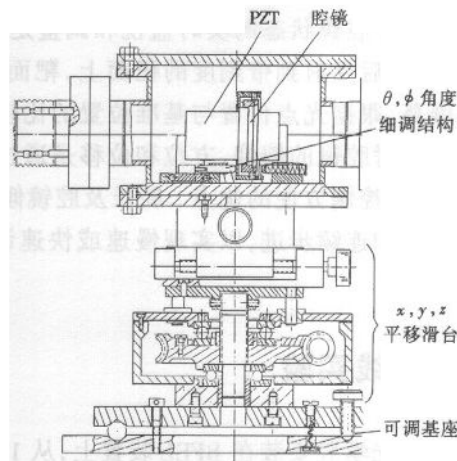


图2 五维精密遥控调节

五维调节参数的范围和分辨如表1.

表1 五维调节参数表

	x		y		z		θ, φ	
	范围	分辨	范围	分辨	范围	分辨	范围	分辨
粗调	±5mm	2μm	±5mm	0.1μm	±5mm	2μm	±15°	1°
细调							±3°	20"
精调					±2μm	0.1μm	±10"	0.5"

真空室外位移粗调部分: y 方向为垂直升降调节台, 采用了蜗轮、蜗杆装置, 这种装置传动比大, 运动平稳, 升降台的精密丝杠传动, 采用特殊的设计, 为防止丝杠传动间隙, 设计了调节紧固螺母, 使其传动精度可达到 $0.1\mu\text{m}$. x, z 为滑台的两个水平方向, 采用滚珠滑台和精密丝杠结构, 两滑台不平度均小于 0.005mm , 并经过淬火和研磨处理.

真空室内的角度细调部分: θ, ϕ 细调部分处在 10^{-6}Torr 的真空中, 空间位置有限, 中

心高度仅 30mm,其内部无马达传动装置.设计上必须考虑将真空室外部由马达产生的不同方向的转动,变成真空室内互相正交的两个平移,再通过滑块实现反射镜 θ, ϕ 方向的调节.即:通过电机→波纹管→滑块→顶杆→正交支撑镜框的传动,最终实现角度的调节.

真空室内精调部分: θ, ϕ, z 精调部分和细调部分连在一起,同处在于 10^{-6} Torr 的真空中,精调由特殊设计的双层 PZT 圆筒实现.驱动电压由真空电接头进入真空容器传给 PZT, PZT 圆筒上沿周向均布 3 个电极,改变加在不同电极上的电压,控制 PZT 上不同电极的长度变化,实现角度的调节.实验上达到对 θ, ϕ 角度调节为 $20''$,分辨率为 $0.5''$;对 z 轴的平移调节范围为 $\pm 2\mu\text{m}$,精度为 $0.1\mu\text{m}$ 的结果. PZT 驱动控制器是我们研制的 BFEL 光腔精密微调控制器,可保证上述调节的范围精度和线性要求.

4 光腔腔镜状态及微机控制

光腔腔镜状态的实时监视和调整是由微机进行远距离控制的.准直激光入射到腔镜背面,然后反射到带刻度的靶面上,靶面上的光点位置通过 CCD 摄像头送入主控室的微机屏幕,根据光点位置与基准位置的比较能实时反映被调腔镜位置状态.

反射腔镜的俯仰、方位和位移是通过步进电机控制的,步进电机具有定位精度高,运动平稳,控制方便的优点.腔长及腔镜倾斜角度通过计算机手动步进控制,步进电机可预置单步和连续步进,以实现慢速或快速调节.数字表可随时显示并记忆步进电机运动位置状态.

5 在线实验

该光学腔安装在 BFEL 装置上,从 1991 年起一直运行到现在.该装置在自发辐射、受激辐射、饱和振荡和目前的 BFEL 应用实验中都起到了重要的作用.不管 z 向的大范围调节和小范围方位角的调整,都能达到设计要求.但同时也感到它的不足,在抽真空的情况下,由于波纹管联结使得腔体与腔镜有个向内的倾斜,这时需要在抽真空的情况下重新准直.为此我们又对光学腔的支撑部分进行改进,即在腔镜 z 向调节的方向上,在真空容器的两边,分别安装两段波纹管,使承载腔镜的真空容器处于真空受力的平衡位置上.这样,保证了抽真空前后腔镜位置和角度不发生变化.在线实验证明,这套装置用于 BFEL 的实验是成功的.

参考文献 (References)

- 1 XIE Jia-Lin et al. High Power Laser and Particle Beams, 1989, 1(4):289 (in Chinese)
(谢家麟等. 强激光与离子束, 1989, 1(4):289)
- 2 LI Yong-Gui et al. Optical cavity in BFEL. Proceeding on the First Asian Symposium of FEL. Beijing, 1993, 330
- 3 Dattoli G et al. IL NUDVO CIMENTO, 1990, D12:21
- 4 Brau C A. Free Electron Lasers. Academic Press Inc, 1990, 328

BFEL Optical Cavity's 5-D Precise Remote-Control Adjuster

ZHANG Li-Wen LI Yong-Gui WANG Ming-Kai FAN Yao-Hui

(*Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100080, China*)

Abstract The design of the BFEL optical cavity's 5-D precise remote-control adjuster is described. This paper discusses the special characteristic of the FEL cavity, and introduces how to implement the transfer of the cavity's displacement and angle adjusting inside and outside the vacuum chamber. This optical cavity adjuster is designed with 3-level control precision, its displacement's adjustment range is $\pm 5\text{mm}$, the resolution is $2\mu\text{m}$, the angle's adjustment range is $\pm 3^\circ$ and the resolution is $0.5''$. This control system has been used in BFEL's experiments.

Key words free electron laser, optical cavity, cavity's adjuster

Received 28 September 2000

* Supported by National 863 Plan Laser Field of China.