

自由电子激光器腔长的调节装置

张秉钧 王明常 莽燕萍

(中国科学院上海光机所, 201800)

提要: 本文论述了自由电子激光器腔长调节的基本原理及方法。用微机控制的精密机械调整装置实现了精细调节;用微机控制的电致伸缩器件实现了超精细调节。精细调节的范围为 $\pm 3\text{cm}$,精度优于 $0.5\mu\text{m}$;超精细调节的范围为 $\pm 5\mu\text{m}$,精度优于 $0.1\mu\text{m}$ 。

关键词: 自由电子激光器, 谐振腔, 调节范围, 分辨力, 电致伸缩器件, 步进电机

Tuning device for FEL optical cavity

Zhang Bingjun, Wang Mingchang, Mang Yanping

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: The importance, fundamental principles and methods of tuning optical cavity for free-electron lasers are described. An adjustable mechanical device controlled by a microcomputer is used for adjusting with a fine resolution, and an electrostrictive device controlled by the same microcomputer is used for adjusting with superfine resolution. The fine adjusting range is 6 cm, and the resolution is better than $0.5\mu\text{m}$. The superfine adjusting range is $10\mu\text{m}$, and the resolution is better than $0.1\mu\text{m}$.

Key words: free-electron laser, optical cavity, adjusting range, resolution, electrostrictive device, step-motor

自由电子激光器(以下简称 FEL)的谐振腔包括两个反射镜——上游反射镜(Upstream mirror)和下游反射镜(Downstream mirror)、起波器(Undulator)和带有几个光学窗口的金属外壳(见图 1)。

起波器的几组磁铁和用于导向、监控电子束的传输通道都占据较大的空间,使得两面镜子至少分开几米的距离。FEL 特性要求只有保证 FEL 的谐振腔的谐振频率严格地与电子束微脉冲的重复频率同步,才能有激光输出。加之谐振腔的特性对于镜子位置的偏移、倾斜及机械扰动非常敏感,因此,使电子束的轨道与起波器中腔的基本模式的 optical 轴完全重合,并且保证腔长稳定地等于最佳腔长是关系到 FEL 能

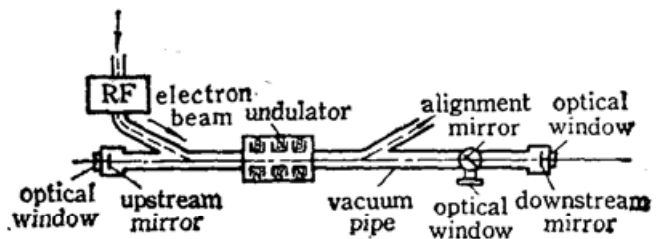


Fig. 1 Principle schematic of FEL cavity structure

否正常运转的一个首要问题。本文重点论述了对腔长的调节。

腔长的调节分成两个步骤：在根据理论计算的数值安装好谐振腔之后，首先用微机控制步进电机对腔长进行精细调节，使腔长进入正常运转区域，然后用微机控制电致伸缩器件 (Electrostrictive device, 以下简称 ESD) 对腔长进行超精细自动调节，使谐振腔稳定地工作在最佳状态。

一、工作原理

谐振腔中两面镜子的距离 d 及驱动微电子束的射频频率 ν_{RF} 之间满足以下关系^[1]：

$$2d = nc / \nu_{RF} \quad (1)$$

此处： c 为光速， n 为一个整数。式(1)只是一个近似的公式，因为在微电子束与起波器相互作用之后，光脉冲变慢。因此，实际的最佳腔长要比由公式(1)计算出来的值小一些。

基于上述原因，即使谐振腔中的反射镜按计算值准确装定，FEL 仍不会有激光输出，只有在腔长处于最佳腔长附近 $\pm 75 \mu\text{m}$ 的范围内，才能有激光输出。而最佳工作状态必须在腔失谐范围满足下式时才能得到：

$$\Delta d / d = 10^{-6} \quad (2)$$

式中 Δd 为腔长相对最佳腔长的偏移量。

实验中，射频频率 $\nu_{RF} = 2856 \text{ MHz}$ ，腔长 $d = 2.519244 \text{ m}$ ，则 Δd 约为 $2.5 \mu\text{m}$ 。

另外，长期工作，谐振腔会由于热效应而引起长度的改变，所以 FEL 在运转中也需要进行腔长的校准。

镜子初始位置的偏差及热效应引起的偏差都会使已存储于腔中的光脉冲和直接从电子束发出的光脉冲有一个超前或迟后。超前象征着腔长比最佳腔长要短，迟后象征着腔长比最佳腔长要长(见图 2)^[2]。由于腔的损耗使光脉冲的包络线好象带有一个向一侧伸展的尾巴。这个包络可以用快响应红外光电探测器在下游反射镜后面测得，其形状如图 3 所示。

通过观测到的光脉冲包络的波形，我们可以求出当时腔长的偏移量 Δd 。具体方法是在波形拖长的前沿或后沿的中间一段(此段线性较好)取一个数据点，计算出此点的倾斜 α' ，去除探测器的上升时间，得到真实斜率 α 。 α 与 Δd 满足下面的关系式：

$$\Delta d = c / (2\alpha Q) \quad (3)$$

此处 c 为光速， Q 为腔的品质因数。

计算出 Δd 值，就可以确定调节腔长的方向与大小，从而对腔长进行定量的调节。

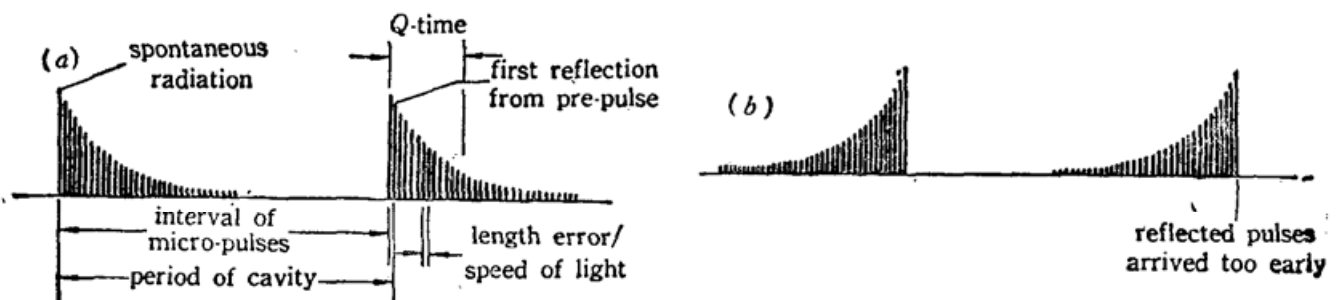


Fig. 2 Wave shape of optical pulses from spontaneous radiation

(a) Cavity length longer than the optimum value; (b) Cavity length shorter than the optimum value

二、腔长调节方案设计

前文已提到过,按公式(1)得到的只是近似值。按此数值装定两镜之后,要在较大的范围内对腔长进行极精细的调整,这一要求不能只用一种调整装置完成,必须分两步进行。第一步采用精密机械调整装置对下游反射镜的位置在 cm 级 范围内进行开环精细调节,让腔长逐步逼近最佳腔长,直到进入 FEL 的正常运转区。第二步切换到用 ESD 在 μm 级的范围内进行闭环超精细调节,使激光器进入并稳定在最佳工作状态。整套调整装置的原理图示于图 4。

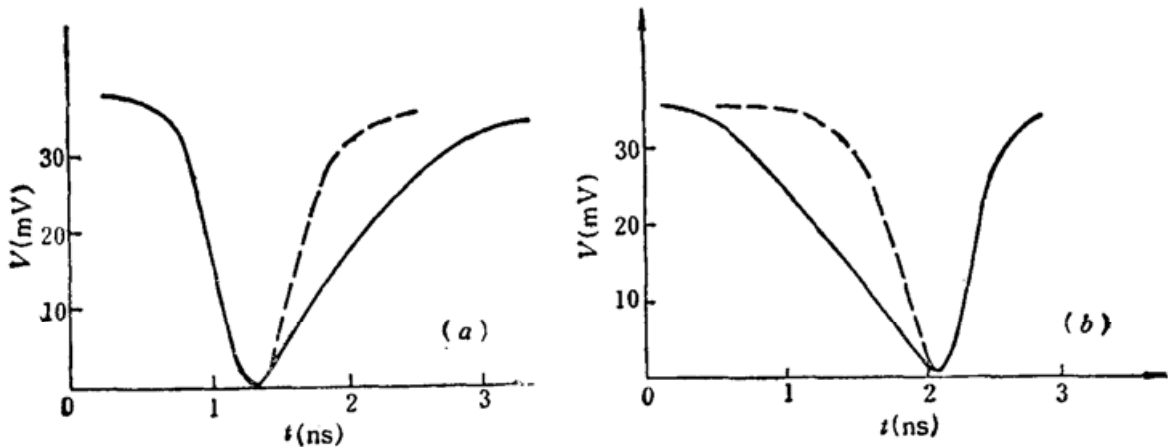


Fig. 3 Shape of optical pulses envelope (broken line denotes the optimum value)

(a) Cavity length longer than the optimum value; (b) Cavity length shorter than the optimum value

下游反射镜被固定在 ESD 上,它们又作为一个整体安装在支架上。一个极精密的螺杆带动支架在两条光滑的导轨上滑动。螺杆的转动是用微机控制步进电机带动一组齿轮实现的。ESD 与精密机械调整装置是串联安装的,因此 ESD 的位移量是叠加在精密机械调整装置的位移量上的,精密机械调整装置的位移量由 MT60M 型光栅尺来标定;ESD 的位移量由 DGS-6A 数显式电感测微仪来标定。

具体调整程序是将下游反射镜的透射光用快响应红外探测器接收,经放大器放大后同时加到 A/D 变换器及示波器上。A/D 变换器的输出端与微机相接。首先让 TP-801B 单板机在开环方式下去控制步进电机,用连续步进的方式对腔长进行

精细地扫描,当从示波器上观察到图 3 中的波形时,扫描停止,说明此时腔长已接近最佳腔长。根据前面提到的方法计算出腔长的偏移量及偏移方向,然后用预置步数的方式,让镜子走到最佳位置上。接着,将 TP-801B 单板机切换到闭环工作状态,转而控制 ESD,让它在较小的范围内进行超精细调节,当调节 FEL 输出功率最大时,激光器就自动地稳定工作在最佳工作状态

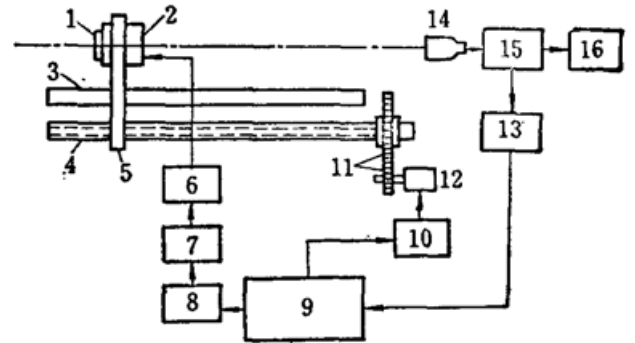


Fig. 4 Principle schematic of the cavity adjustment device

- 1—downstream mirror; 2—electrostrictive device; 3—slideway; 4—screw; 5—holder; 6—balancer; 7—driver; 8—D/A converter; 9—microcomputer; 10—driver; 11—gear group; 12—step-motor; 13—A/D converter; 14—detector; 15—amplifier; 16—monitor

上, 即输出功率保持在最大值。

在本调整装置中, 微机控制步进电机所带动的机械调整装置的调整范围为 $\pm 3\text{cm}$, 调节精度优于 $0.5\ \mu\text{m}$; 微机控制的 ESD 的调整范围为 $\pm 5\ \mu\text{m}$, 调节精度优于 $0.1\ \mu\text{m}$ 。

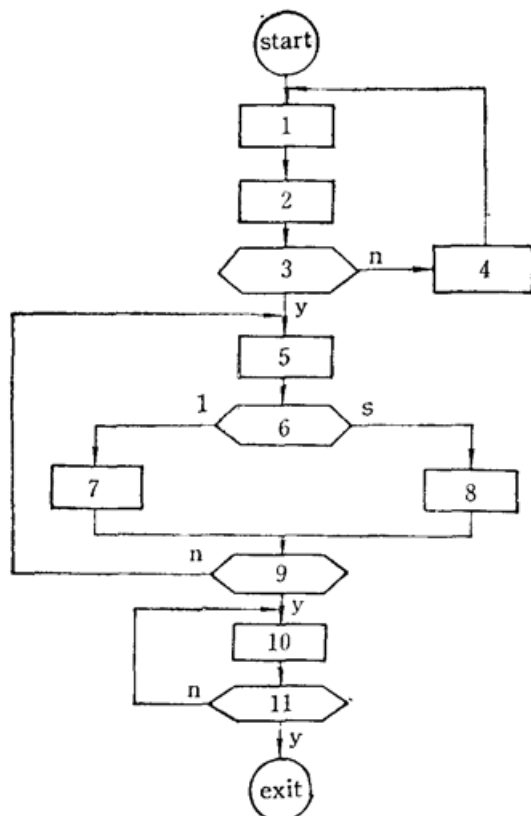
三、微机及其接口

单板机对机械调整装置的控制是通过步进电机实现的。步进电机定位精度高, 没有误差积累, 控制方便, 对于这种实时的调节是很适合的。

单板机对机械调整装置的控制具有以下功能: 1. 按连续步进方式或者按预置步数方式进行工作; 2. 方便地选择机械调整装置的运动方向; 3. 方便地选择机械调整装置的运动速度; 4. 方便地选择步进电机的步距角; 5. 随时显示出步进电机的运行状态。

单板机对 ESD 的控制具有以下功能: 1. 根据接收到的信号的强弱, 按比例地控制 ESD, 控制超调量; 2. 估算闭环系统的时间常数, 避免产生振荡。

单板机除了对机械调整装置和 ESD 进行控制, 对自发辐射及受激发射所产生的光脉冲进行实时采集之外, 还要对整个调整过程进行控制, 这一过程可以用图 5 所示的简化流程图来说明。



1—adjusting mechanical device; 2—selecting data of the light from spontaneous radiation; 3—light increase or not? 4—to change adjusted direction; 5—monitoring optical pulses shape; 6—cavity is longer or shorter? 7—to shorten cavity length; 8—to extend cavity length; 9—stimulated emission occurs or not? 10—auto-controlling ESD; 11—to exit or not?

Fig. 5 Simple schematic of adjustment procedure

参加本工作的还有冯诚士、周慧芬、李如凤等同志。

参 考 文 献

- 1 A. Deangelis *et al.*, *Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Res.*, **A237**, 220~224 (1985)
- 2 G. R. Neil, *Free Electron Lasers, Beijing Institute of Modern Physics Series*, **2**, 244 (1988)