

自由电子激光器谐振腔内电子束和激光脉冲的时间同步*

王明常 周蕙芬 冯诚士 陆载通 张立芬 王之江
(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

研究自由电子激光器谐振腔内电子束和辐射的时间同步问题. 这是激光器谐振腔设计中的一个重要问题. 本文讨论了腔内布儒斯特窗片对光路的影响. 研制出由微机控制谐振腔的精密微调装置, 扫描范围为 ± 3 cm, 微调精度达 $1 \mu\text{m}$.

关键词 自由电子激光器, 时间同步.

1 引 言

光学谐振腔是激光器的关键部件. 它将影响到振荡的建立, 功率的增长和饱和. 射频自由电子激光器谐振腔和普通激光器的谐振腔不同, 其腔内电子束和辐射束在时间和空间上必须严格匹配. 北京自由电子激光器谐振腔的设计要求之一, 是给定腔长后, 选择腔型以保证腔内的光脉冲空间分布和电子束空间分布相重叠^[1]. 本文则研究在时间结构上相同步问题. 讨论了腔内布儒斯特窗对光路的影响.

为了获得稳定运转, 自由电子激光谐振腔对反射镜倾斜和腔长调整有严格要求, 这将会直接影响激光增益和振荡. 为此, 本文研制出谐振腔精密微调装置, 可精确调整谐振腔长度. 它优于1988年意大利LELA自由电子激光器的微机控制机械调整装置的技术指标(其动态范围为 ± 1 cm, 调整精度为 $1.25 \mu\text{m}$)^[2].

2 射频自由电子激光器辐射的时间特性

北京射频自由电子激光器, 相对论电子束的能量为 $10\sim 30$ MeV. S 波段的电子束微波加速频率为 $\nu_{\text{RF}} = 2856$ MHz. 宏脉冲宽度约为 $4 \mu\text{s}$. 它由一系列微脉冲组成, 每个微脉冲宽度为 4 ps, 微脉冲间隔为 0.35 ns^[3]. 图1示出电子束时间结构特性.

为保证激光振荡, 自由电子激光谐振腔内的光脉冲在腔内往返一周后必须和后续电子脉冲相重叠. 要求腔长 L_c 满足

$$L_c = nc/\nu_{\text{RF}}$$

式中 n 为整数取 24 , $c = 2.9979 \times 10^8$ m/s 为光速, 则谐振腔长度 L_c 取为 2519.233 mm.

这只是近似腔长, 考虑到自由电子激光器特有的“滑动”效应, 腔长还应适当缩短. “滑动”

收稿日期: 1992年3月7日

* 国家高技术计划激光领域资助课题.

效应指激光脉冲经过每个波荡器(Wiggler)波长,会比电子脉冲超前滑动一个光波长^[4].在通过 $N = 50$ 个 Wiggler 周期后,光波会超前滑动距离 $N\lambda_s$.如波长 $\lambda_s = 10.6 \mu\text{m}$,则滑动距离为 $500 \mu\text{m}$.而 4 ps 微脉冲宽度相当于 1.2 mm ,似乎也太短了.再考虑到腔的 Q 值,将提出更高要求.例如允许 10% 光脉冲滑出,约为 $120 \mu\text{m}$.若 Q 值为 100 ,则允许腔长调整公差为 $1 \approx 2 \mu\text{m}$.

洛斯·阿拉莫斯实验室的振荡实验,给出自由电子激光器输出功率与谐振腔长度失谐的关系^[5],失谐曲线宽度约为 $60 \mu\text{m}$,这是谐振腔镜在纵向移动的允许范围,而调整精度要求为 $1 \mu\text{m}$,以达到输出功率最佳位置.两相邻电子束脉冲距离的一半为精密调整范围,可满足要求,我们取 $\pm 3 \text{ cm}$ 作为调整范围,相对精度为 10^{-5} ,足以与微波频率的漂移精度 $\Delta v_{\text{RF}}/v_{\text{RF}}$ 相当.

图 2 为北京自由电子激光器(BFEL)谐振腔示意图. BFEL 结构参数列于表 1.

Table 1 The parameters of Beijing free electron laser

RF-Accelerator			
Beam energy	$E = 10 \sim 30 \text{ MeV}$	Number of periods	$N = 50$
Peak current	$I = 10 \sim 20 \text{ A}$	Intensity	$B_w = 3 \text{ KG}$
Optical cavity			
Minimum beam diam.	$D_e = 1 \sim 2 \text{ mm}$	Wavelength	$\lambda_s = 10.6 \mu\text{m}$
Beam spread	$\Delta\gamma/\gamma = 0.5 \%$	Length of cavity	$L_c = 251.923 \text{ cm}$
Emittance	$\epsilon_N < 30 \text{ nmm mrad}$	Waist	$D_r = 2.78 \text{ mm}$
Macropulse width	$T_{\text{macro}} = 4 \mu\text{s}$	Diam. on mirror	$D_1 = D_2 = 6.7 \text{ mm}$
Micropulse width	$T_{\text{micro}} = 4 \text{ ps}$	Radius of curvature	$R_1 = R_2 = 1522.2 \text{ mm}$
Microwave frequency		Raleigh length	$L_r = 575.1 \text{ mm}$
$v_{\text{RF}} = 2856 \text{ MHz}$		Absorption index of	$\alpha = 1.2 \times 10^{-3}/\text{cm}$
Wiggler		ZnSe at $106 \mu\text{m}$	
Period	$\lambda_w = 3 \text{ cm}$		

3 布儒斯特窗的影响

谐振腔采用外腔结构.真空室两端用布儒斯特窗片,它是 $d = 4 \text{ mm}$ 厚的 ZnSe 平板.其在 $10.6 \mu\text{m}$ 处的折射率 $n = 2.4023$.由于 ZnSe 折射率较高,引起腔内轴向光线通过窗片时产生横向偏移和纵向光程变长.在调整时应予以考虑和修正.

图 3 示出布儒斯特窗片的光路. θ 为布儒斯特角,利用折射率可求得 $67^\circ 24'$.由简单的几何运算,可求得几何光程 $n_s = 10.40 \text{ mm}$.在没有布儒斯特窗片时,光线在 z 轴进行距离为 $g = 3.07 \text{ mm}$.所以由于增加二片布儒斯特窗,谐振腔内光线多走距离为 14.66 mm .腔长调整时,事先要缩短同样距离,才能保证腔内辐射与电子束微脉冲的时间同步.

轴上光线通过布儒斯特窗片后,在 y 轴上产生的位移为 $h = 3.05 \text{ mm}$.用 He-Ne 激光调好光轴后,应使反射镜事先在 y 轴方向上移动这一距离.以使光束经布儒斯特窗折射后仍保持在光轴中心位置.计算表明,色差引起的准直误差在小数点后百分位,可忽略不计.两布儒斯特窗片的吸收损耗为 1×10^{-3} .

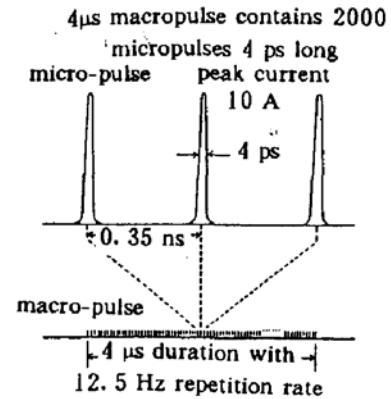


Fig. 1 Schematic diagram illustrating the $4 \mu\text{s}$, 0.35 ns and 4 ps time intervals

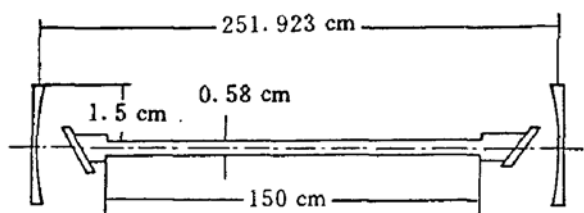


Fig. 2 Schematic of the BEFL optical cavity

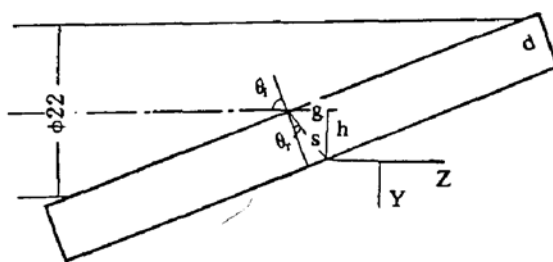


Fig. 3 Geometry for a beam to pass the Brewster window

4 谐振腔精密微调装置

谐振腔长度的精细调整是自由电子激光器研制中的关键技术之一. 谐振腔长度不可能精确地按要求事先严格装定, 即使是使用激光干涉仪也无济于事, 只能用机械的或压电技术扫描腔的长度, 逐渐逼近, 以期形成振荡条件并且得到最大的功率输出. 需要对谐振腔做宽范围内扫描和精细调节.

谐振腔精密微调装置是由精密机械位移调整架, 步进电机控制电源和精密位移测量系统组成的. 精密机械位移调整架固定反射镜. 由步进电机带动消间隙齿轮减速系统(减速比为 1 : 5), 齿轮减速后再带动一套丝杆螺母系统(副转动为 0.5 mm), 再带动导轨上腔镜平移, 平移精度达 1 μm. 导轨需经研磨, 以保证腔镜平移时倾角误差小于 10". 腔镜可由伺服系统(见图 4)微调, 伺服系统调角精度为 1". 腔镜的移动由一台光栅尺数显系统直读, 数显分辨率为 0.5 μm.

微机控制电源能随意地选择连续或按予置步数的控制方式, 可按需要选择速度, 步距角和方向. 设有左右限位声光报警装置. 步距角可为 1.5°/step 和 3°/step. 方向可选正 z 和负 z 轴移动. 速度可在 43.2 step/min 和 8035.7 step/min 之间予置. 每步位移量为 0.42 μm.

张秉钧, 莽燕萍等提供微调腔步进电机控制电源. 马静明, 乔福堂等进行机械设计, 在此深表谢意.

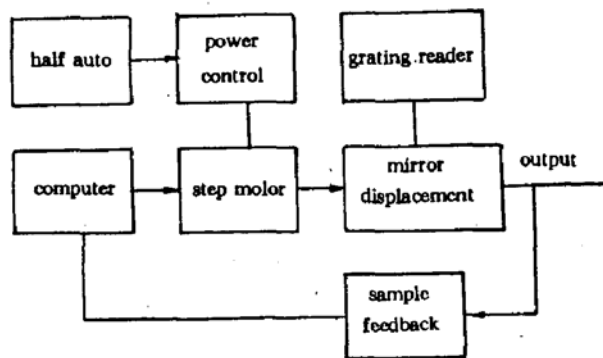


Fig. 4 Schematic diagram of servo-system

参 考 文 献

- [1] 王明常,王之江,周慧芬等, 射频自由电子激光腔的实用设计. 中国激光, 1990, 17(7): 386~389
- [2] Piero Patteri, M. A. Preger, M. Ambrosio *et al.*, Optical cavity alignment and mirror damage in the LELA FEL experiment. *Nucl. Instr. & Meth.*, 1987, A259: 88~93
- [3] 谢家麟, 庄杰佳, 钟世材等, 北京自由电子激光装置的设计研究. 强激光与粒子束, 1989, 1(4): 289~305
- [4] P. Sprangle, C. M. Tang, Initiation of a pulsed-beam FEL oscillator. *Phys. Rev. Lett.*, 1983, 50(22): 1775~1778
- [5] B. E. Newnam, R. W. Warren, R. L. Sheffield *et al.*, Optical performance of the los alamos FEL. *Nucl. Instr. & Meth.*, A237: 187~192

附录: 布儒斯特窗光路的几何运算

对于 ZnSe 晶体, $n_{10.6} = 2.4023$, $n_{0.6} = 2.5912$, $d = 4$ mm.

布儒斯特角 $\tan \theta_i = n$, $\theta_i = 67.40^\circ$.

按折射定律,

$$\sin \theta_r = \sin \theta_i / n, \quad \theta_r = 22.60^\circ, \quad s = d / \cos \theta_r = 4.33 \text{ mm}$$

s 为光线几何距离, 光程 ns 则为

$$ns = 10.40 \text{ mm}$$

在没有布儒斯特窗片时, 光线在 z 轴行进距离为 $g = s \cos(\theta_i - \theta_r) = 3.07$ mm

由于加布儒斯特窗片, 光线在 z 轴多走距离为 $ns - g = 7.33$ mm

调控时, 应缩短腔长 7.33×2 (两边) = 14.66 mm.

在 y 轴方向光线的位移为 $h = s \sin(\theta_i - \theta_r) = 3.05$ mm

The electron beam and radiation synchronization in the cavity of a free electron laser

WANG Mingchang ZHOU Huifen FENG Chengshi

LU Zaitong ZHANG Lifen WANG Zhijiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract

The electron beam and radiation synchronization in the cavity of a free electron laser has been investigated. This is important to the design of a laser cavity. The effect of Brewster window inside a cavity on the radiation trajectory is discussed in this paper. A fine adjustment device driven by a personal computer is developed, the cavity axis can be moved by the device in the range of ± 30 mm with a resolution of 1 μm .

Key words free electron laser, synchronization.