

射频自由电子激光腔的实用设计

王明常 王之江 周慧芬 冯诚士

(中国科学院上海光机所, 201800)

提要: 给出 $10\ \mu\text{m}$ 射频自由电子激光谐振腔的实用设计。按高斯光束分布计算出给定腔长的反射镜曲率半径、光腰及镜面处光斑尺寸等参量。解决了细长波导中辐射和电子束的空间匹配问题, 并讨论了时间同步问题。

关键词: 自由电子激光器, 谐振腔

Practical design of resonant cavity for a RF free electron laser

Wang Mingchang, Wang Zhijiang, Zhou Huifen, Feng Chengshi

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

Abstract: Practical design of the resonant cavity for a RF free electron laser at $10.6\ \mu\text{m}$ is proposed. For a given cavity length, the parameters, including the curvature of reflector, waist radius and spot size on reflectors, are calculated according to the Gaussian profile. The problem of spatial match between the radiation and the beam in a long narrow waveguide has been solved and the synchronization is discussed.

Key words: free electron laser, resonant cavity

一、引言

自由电子激光器问世十余年来, 发展极为迅速。为了有效利用电子束、激光和摆动磁场的相互作用长度, 研制实用化的高效率器件, 射频自由电子激光器多由放大器结构改进为振荡器结构^[1]。

这种结构变化带来一系列新的课题^[2]。例如, 要求电子束有较高的峰值电流以缩短振荡建立时间, 要求电子束宏脉冲有足够的宽度以维持一定的振荡次数, 还要选择合适的光学谐振腔以保证电子束和光束的耦合问题等等。

自由电子激光器的谐振腔和普通激光器的不同, 存在电子束和光束在时间和空间上严格耦合问题。普通激光器通常采用共焦腔和半共焦腔, 它们的衍射损失最小, 这是因为腔反射镜的有限尺寸是产生衍射损耗的根源。在自由电子激光器中, 摆动磁场的间隙必须尽可能地小, 以保持足够高的磁场强度; 而磁场又必须尽可能地长, 以保证器件有足够的单程增益。因此, 在谐振腔内形成细长的波导结构。谐振腔反射镜的尺寸往往比摆动磁场间隙大得多, 后者将造成衍射损耗。

选择自由电子激光谐振腔结构, 使得光束和电子束空间匹配。一是光腰位置要和束腰位

置重合,二是腔内高斯光束分布尽量覆盖电子束空间分布。电子束在束腰处半径很小,约为 $0.5\sim 1\text{ mm}$,自由电子激光器通常采用共心腔腔型^[3]。

对于细长波导情况,共心腔中的光束由于光束分布变化陡峭,离开光腰后迅速扩展,会被波导阻挡造成损耗。共焦腔光束分布变化平缓,但光腰处光斑太大而与束斑匹配不好。我们采用的腔型介于共焦腔和共心腔之间,使光腰处光斑略大于束斑 $1.4\sim 2.0$ 倍,从而解决了这一问题。

本文给出 $10\ \mu\text{m}$ 射频自由电子激光振荡器谐振腔的实用设计。对于给定的谐振腔长 2519.244 mm ,计算出三组高斯光束分布曲线,给出它们的特征参量:光腰位置、光腰处光斑大小、瑞利长度、反射镜曲率半径和光斑等。它们均满足光学腔的稳定条件。最后讨论了光脉冲和电子束脉冲的时间同步问题,要求腔长的调整精度为 $1\ \mu\text{m}$ 。

二、设计考虑

从物理光学观点,为使衍射损失最小,要求一个反射镜在第二个反射镜处所张的半角 a_1/L 需比由第二个反射镜的有限尺寸而引起的近似平面波的远场衍射花样的半角 $\lambda/2a_2$ 稍大一些,即要求满足 $a_1a_2/\lambda L \geq 1$ 。

现腔长 $L=2519.244\text{ mm}$,波长 $\lambda=10.6\ \mu\text{m}$,则要求 $a_{1,2} \geq 5.2\text{ mm}$,选取的腔镜半径大于 10 mm ,满足上述要求。

光学谐振腔维持低(衍射)损耗模式的能力与反射镜间距 L 及其曲率半径 R_1 和 R_2 有关。从光学腔的稳定图可看出:需采用介于共焦腔和共心腔之间的谐振腔结构。介于共焦腔和平面平行腔之间的大 R 腔结构虽然也能满足稳定性条件,但由于光腰处光斑尺寸过大而不适用。另外,共心腔 ($R_{1,2}=L/2$)、共焦腔 ($R_{1,2}=L$) 和平面平行腔 ($R_{1,2}=\infty$) 都靠近非稳定区,只要参量有微小的偏离就会引起严重的损耗。介于共心腔和共焦腔之间的腔型允许参量有一定的偏离仍能维持稳定区。只要满足

$$0 \leq (1-L/R_1)(1-L/R_2) \leq 1 \quad (1)$$

考虑高斯光束的传播。对于对称谐振腔,有 $R_1=R_2=R$ 。共焦腔光腰处的最小光斑尺寸 W_0 为

$$(W_0)_{\text{共焦}} = (\lambda L/2\pi)^{1/2} \quad (2)$$

镜面处光斑尺寸为

$$(W_{1,2})_{\text{共焦}} = \sqrt{2} (W_0)_{\text{共焦}} \quad (3)$$

而对于给定 L/R 值的一般谐振腔,镜面处光斑尺寸与共焦腔时的最小镜面光斑尺寸之比为^[4]

$$\frac{W_{1,2}}{(W_{1,2})_{\text{共焦}}} = \left\{ \frac{1}{(L/R)[2-(L/R)]} \right\}^{1/4} \quad (4)$$

图 1 为各种腔型镜面处光斑尺寸之比值。选择腔型接近共焦腔,可使镜面光斑尽量小,避免自由电子激光器由于摆动磁场间隙过小而引起的真空管道挡光。

对称谐振腔的瑞利参量为

$$Z_0 = \left[\frac{(2R-L)L}{4} \right]^{1/4} \quad (5)$$

表1 光腔参量计算值(单位 mm)

R	1282.3	1312.2	1522.2	1438.8	1700.0
Z_0	168.9	257.4	575.1	475.0	744.8
W_0	0.76	0.93	1.39	1.26	1.59
$W_{1,2}$	5.68	4.66	3.35	3.59	3.12

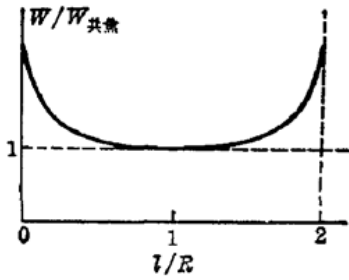


图1 在对称谐振腔镜面处的光斑尺寸与共焦腔($l/R=1$)镜面光斑尺寸之比值

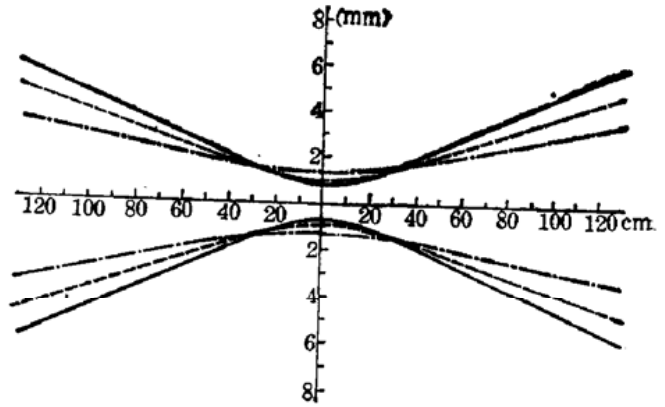


图2 谐振腔内的高斯光束线型
实线— $W_0=0.76, R=1282.3$; 虚线— $W_0=0.93, R=1312.2$; 点划线— $W_0=1.39, R=1522.2$

光腰处的最小光斑尺寸为

$$W_0 = (\lambda Z_0 / \pi)^{1/2} \tag{6}$$

镜面处光斑尺寸为

$$W_{1,2} = \left(\frac{\lambda L}{2\pi}\right)^{1/2} \left[\frac{2R^2}{L(R-L/2)}\right]^{1/4} \tag{7}$$

根据工厂现有 R 样板及给定的光腰尺寸, 按上述高斯光束传播公式, 计算出一组数值(表1)。

前三组高斯光束在腔内传播的线型计算值由图2示出。

对于不对称谐振腔的一般情况, 曲率半径为 R_1 和 R_2 的反射镜分别距光腰处距离为 Z_1 和 Z_2 , 如图3所示。符号规定是当曲率中心在镜面右边时, 取负值。即图中 Z_1 和 R_1 为负值, 腔长 $L = -Z_1 + Z_2$ 。给定 Z_0 后可求出反射镜曲率半径分别为

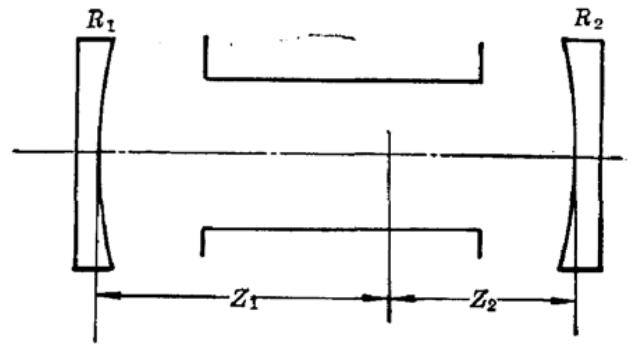


图3 不对称谐振腔的光腰位置

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= Z_1 + Z_0^2 / Z_1 \\ R_2 &= Z_2 + Z_0^2 / Z_2 \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

根据已有光学样板, 选定 R_1, R_2 值, 可求出瑞利长度:

$$Z_0^2 = \frac{L(-R_1-L)(R_2-L)(R_2-R_1-L)}{(R_2-R_1-2L)^2} \tag{9}$$

最小光斑尺寸可由式(6)求得。镜面光斑尺寸为

$$W_{1,2} = W_0 \left[1 + \left(\frac{Z_{1,2}}{Z_0}\right)^2\right]^{1/2} \tag{10}$$

三、结果和讨论

对于对称谐振腔, 选取 $R_1 = R_2 = 1522.2 \text{ mm}$, 光腰在腔的中部。光腰处光斑 $W_0 = 1.39 \text{ mm}$, 比给定电子束最小半径 $r_e = 0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ 大 1.5 倍左右, 满足要求。在摆动磁场出口处 $Z = 750 \text{ mm}$, 光斑半径 $W = 2.29 \text{ mm}$, 小于波导管最小尺寸 2.90 mm , 不会挡光。

对于非对称谐振腔, 根据要求选取光腰位置为 $Z_1 = 1509.62$, $Z_2 = 1009.62$ 。由式(6)、(8)~(10)可求出满足要求的一组参量: $R_1 = 1762.0 \text{ mm}$, $R_2 = 1312.2 \text{ mm}$, $Z_0 = 575.5 \text{ mm}$, $W_0 = 1.39 \text{ mm}$, $W_1 = 3.91 \text{ mm}$, $W_2 = 2.81 \text{ mm}$ 。

谐振腔采用外腔式结构。真空管道用 ZnSe 布氏窗片封接, 材料在 $10.6 \mu\text{m}$ 处折射率为 2.4023, 布鲁斯特角为 67.40° 。材料吸收系数约为 $1.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ 。谐振腔反射镜系镀多层介质膜的 ZnSe 镜, 一端全反, 输出端透过率分别为 1% 和 3%。故总的腔内损耗(不包括耦合输出)理论上应小于 3%。

射频自由电子激光振荡器的特点是对腔长有较高的调整精度要求。我们考虑的持续时间为 $4 \mu\text{s}$ 的电子束大脉冲是由一系列等间隔的微脉冲组成。加速频率为 2856 MHz , 所以电子束微脉冲间隔 $\tau_e = 1/f_e = 0.35 \text{ ns}$ 。振荡的要求是要保证辐射往返谐振腔一周仍能与随后的电子束微脉冲严格同步。要求利用伺服系统调整谐振腔长度, 调整范围由脉冲间隔 τ_e 决定, 现约为 10.5 cm 。考虑到 2.5 m 腔长的测量误差, 实际调整范围可减少到 2 cm 。

微脉冲宽度决定了腔长调整精度。现宽度 $\tau_\mu = 4 \text{ ps}$, 相当于 1.2 mm 距离。腔长调整精度要保证辐射脉冲往返谐振腔一周后仍能落入第二个电子微脉冲内。由于近年来发现射频自由电子激光脉冲的“滑动”效应^[5], 使精度问题变得复杂。滑动效应是: 辐射经过每个摆动磁场的周期, 将比电子束脉冲超前滑动一个光波长的距离。现摆动磁场周期数 $N = 50$, 则滑动距离为 $530 \mu\text{m}$ 。对于 4 ps 的微脉冲已“跑出”一半, 可见滑动效应影响之严重。

如果允许 10% 的光束“滑出”微脉冲, 即滑出 $120 \mu\text{m}$ 。若腔内光束振荡 100 次, 则要求腔长调整公差为 $1.2 \mu\text{m}$ 。若振荡 200 次, 则要求调整公差为 $0.6 \mu\text{m}$ 。

实际上, 腔长有一允许调整范围。美国洛斯·阿拉莫斯的实验表明^[2], 腔长在 $40 \mu\text{m}$ 调整范围内均有激光输出, 只是输出幅度不同, 存在一极大值。很显然, 考虑到滑动效应的影响, 4 ps 的微脉冲宽度是太窄了, 对产生振荡会带来困难。

我们拟采用开环伺服系统精密调整腔长。实验时在控制室手控伺服电机电源, 驱动一个每步转动 1.5° 的伺服电机转动, 电机带动消间隙齿轮减速系统(减速比为 1:2), 齿轮减速后再带动一套丝杆螺母系统(副转动为 0.5 mm), 再带动导轨上腔镜的平移, 平移精度达 $1 \mu\text{m}$ 。导轨需经研磨, 以保证腔镜平移时倾角误差小于 $10''$ 。这也是伺服系统的调整角精度。腔镜的移动距离由一台光栅尺数显系统直读。数显器分辨率目前为 $5 \mu\text{m}$, 改进后达 $1 \mu\text{m}$ 以内。

参 考 文 献

- 1 R. W. Warren et al., *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-19**, 391 (1983)
- 2 B. E. Newman et al., *Nucl. Instr. & Methods in Phys. Res.*, **A237**, 187 (1985)
- 3 W. M. Grossman et al., *Free Electron Generator of Coherent Radiation*, eds. Brau, Jacobs and Scully SPIE 453, 86 (1984)
- 4 A. Yariv, *Quantum Electron*, by John Wiley and Sons, Inc. 1975, 136
- 5 H. Al-Abawi et al., *Phys. of Quant. Electr.*, **8**, 415 (1982)