

自由电子激光器的掠射环形谐振腔

王明常 袁幼龙* 封碧波 周慧芬 冯诚士 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

研究一种新型自由电子激光谐振腔结构。采用双曲面-抛物面非球面镜组合的扩束系统, 使振荡光束在腔内口径扩大6倍。提高了反射膜层抗激光破坏能力。本文讨论了扩束倍数、非球面参量、谐振腔长度和掠射光斑尺寸等参量对光学系统像差的影响。

关键词: 自由电子激光器, 环形腔。

一、引 言

光学谐振腔是激光振荡器的关键部件。它影响到激光振荡的建立、功率增长和饱和以及输出光束质量等。与传统激光器不同之处在于, 自由电子激光器对光学谐振腔有新的设计要求, 电子束是产生辐射的介质, 设计要求电子束和腔内光束在时间上和空间上完全匹配, 而且还要考虑自由电子激光器摆动磁场间隙小(均1cm左右), 长度很长(1~3m)等特点, 通常采用介于共心腔和共焦腔的腔型结构^[1]。输出耦合采用一端反射镜全反, 另一端部分透射。这在高功率自由电子激光器输出时, 将会遇到困难。这是由于自由电子激光器的特点之一是高功率、高效率。腔内有很高功率密度(几百 MW/cm²~几千 MW/cm²)^[2], 谐振腔反射镜的功率破坏是自由电子激光器设计面临的突出问题, 有待解决。

采用共心腔结构, 可使镜面处光斑尺寸增大。对摆动磁场长而且间隙小的结构, 振荡光束在磁场的出入口处就有很大的衍射损耗。早期的办法是拉长腔长, 使镜面上的光斑增大, 以降低能流密度, 但拉长腔长又会遇到一些新问题。器件结构变得庞大。长腔使输出功率对反射镜倾斜更为灵敏, 增加了对腔镜调整的精度, 更为重要的是, 射频自由电子激光器电子束宏脉冲宽度一般在10 μs左右, 而激光振荡一次的时间为 $2L/3$, 为了保持有足够的振荡次数也不允许腔长 L 过长。为了降低腔镜的承受功率密度, Bhowmik 提出采用掠射环形谐振腔。这无疑给谐振腔研究开辟了一条新路。但对这种复杂光学系统, 如何获得高质量的激光性能, 使系统的像差最小也非易事, 且文献[3]也没给出像差和系统各结构参量的定量关系。

本文设计了一种双曲面-抛物面非球面镜组合的扩束系统作激光谐振腔, 它使振荡光束在腔内口径扩大6倍以提高腔镜抗激光碰坏的能力。文中从几何光学的光线追踪出发, 给出了扩束倍数, 非球面参量, 腔长和掠射光斑尺寸等参量对光学系统像差的影响, 作者认为该光学设计可为射频自由电子激光谐振腔研究开辟新径。

收稿日期: 1990年4月17日; 收到修改稿日期: 1990年5月30日

* 第十研究室。

二、系统结构

掠射环形激光谐振腔如图 1 所示。这是共焦而不共轴的双曲面-抛物面望远镜系统。望远镜入射截面是摆动磁场 W 中心的光腰 w_0 。光束以很大掠角入射到双曲面上, 反射至抛物面镜上, 由抛物面镜射出时已变为平行光束。再经另一组抛物面-双曲面望远镜系统, 又回到光腰处。形成光束在腔内往返一周。轴 AB 和 BC 分别为双曲面和抛物面的回转轴。 B 为其共同焦点, 而 A 为双曲面的另一焦点。

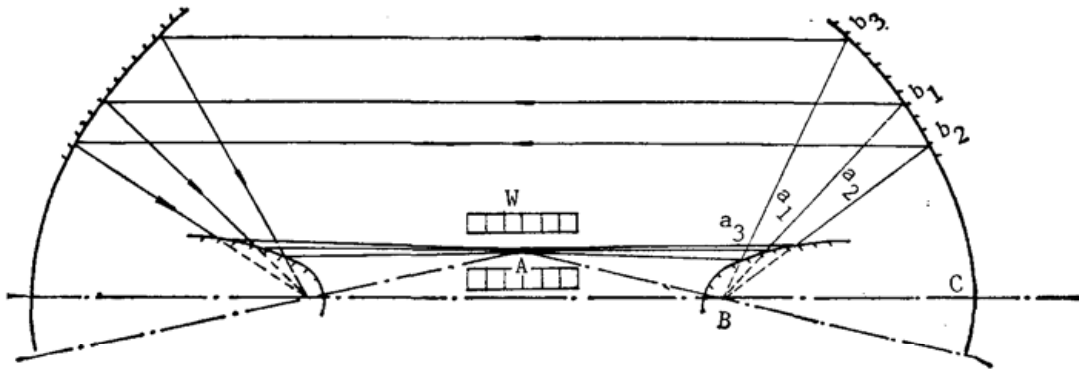


Fig. 1 Schematic of FEL with grazing incidence ring cavity

假设只考虑子午面情况 ($z=0$), 回转双曲面方程为

$$y^2 = 2Rx + (m-1)x^2. \quad (1)$$

回转抛物面方程为

$$y^2 = 4fx, \quad (2)$$

式中 R 为双曲面顶点曲率半径。 m 为双曲面参量, 由计算定双曲面与抛物面轴在子午面内夹角为 u_0 , f 为抛物面焦距。

入射光线与双曲面相交于 a_1, a_2, a_3 三点。用下标 1, 2, 3 分别表示子午面内中心, 上, 下光线。光线与抛物面相交于 b_1, b_2, b_3 三点。定义线段 $L_1 = Aa$, $L_2 = aB$ 。则双曲面放大倍率为 $g = (L_1/L_2)$ 。又令 u_0 表示入射光线 ab 与 AB 轴 (x 轴) 的夹角, u_1 表示反射光线 ab 与 AB 轴的夹角。 θ_i 表示光线在双曲面上的入射角。 dy 为光束从抛物面反射后在子午面内的上下宽度。

本文的设计是根据几何光学的光线追踪法, 编制计算程序。来研究各参量之间关系。中心入射光线与抛物面光轴平行。坐标原点取在抛物面顶点 C 处, BC 为 x 轴, y 轴如图 1 所示。考虑在赛德成像系统中, 将激光腰视做一个几何点。对于这种结构, A 、 B 分别是两个回转非球面的轴上点。轴外点的情况更为复杂。

由于光腰处光斑相对系统张角很小, 由轴外点引起的正弦差忽略不计; 但是由于两个回转面是离轴使用, 两面又是非共轴的, 所以光瞳上不同位置的光线放大倍数不等。这导致出射光束变形(即瞳孔变形)。

考虑到光束放大倍数(即平行光束口径 b), 瞳孔变形(只考虑子午面内上、下光线对于中心光线的不对称), 光束在双曲面处掠射面积不能太小等因素。程序对双曲面放大率 g 及

抛物面焦距 f , 进行人工“干预”。以求得较为理想的外形尺寸, 同时亦确定了非球面的诸参数 P 、 mR 以及夹角 α 。

掠射到双曲面镜上光斑尺寸比垂直入射时增大 $(\cos \theta_i)^{-1}$ 倍。假定入射角范围为 $80^\circ < \theta_i < 87^\circ$, 则反射镜面上光斑增大 $5.8 < (\cos \theta_i)^{-1} < 19$ 倍。反射镜承受的能流密度则降低相应的平方倍。而且, 在这一入射角范围内, 多数介质膜和金属的反射率近于 1。

三、设计结果及讨论

光学计算的程序是, 给定参量如腔长 L , 双曲面短半轴 b , 放大倍率 g , 并以抛物面焦距 f 作参变量, 求出系统扩束倍数 η , 光腔参量变形 Δy 以及双曲面顶点曲率半径 R 等结构。

适当选择 $g-f$, 同时亦可求得平行光束在子午面内光束变形最小 (即上、下光线对于中心光线不对称最小)。如果在系统中, 在平行光束部分对称地在左右两半加入两个相对的平面反射镜, 对平行光束“成像”为 -1 倍。那么系统在束腰处是 $+1$ 倍, 此时瞳孔变形影响就消除了^[5]。

定义光束扩束倍数 η 为平行光束截面与入射光瞳截面之比。扩束倍数与 g, f 的关系如图 2 所示。以 f 为参变量, η 随 g 增加而变大。对于相同的 g , η 随 f 增加而增大。

对于双曲面镜, a 为长半轴, b 为短半轴。它们之间关系有 $b^2 = a^2 - c^2$, 双曲面焦距 $f' =$

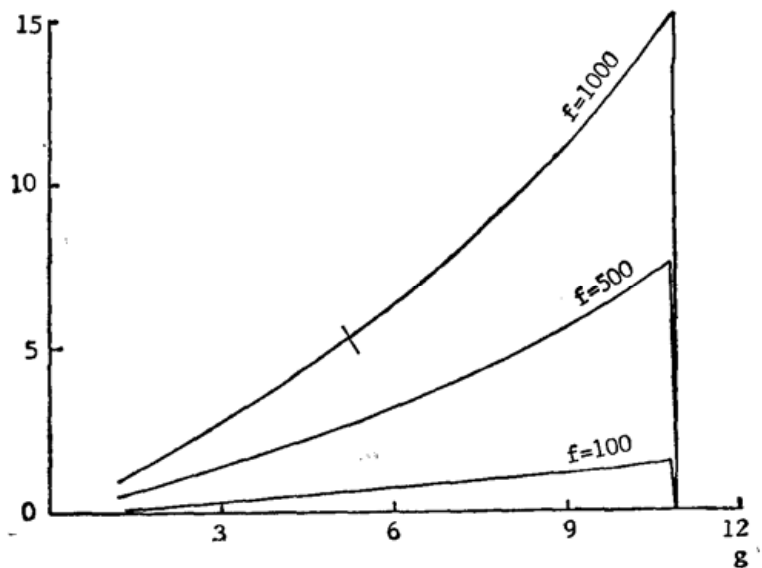


Fig. 2 Dependence of the beam expansion η on the magnification of hyperboloid g . Focal length of the paraboloid f is a variable parameter

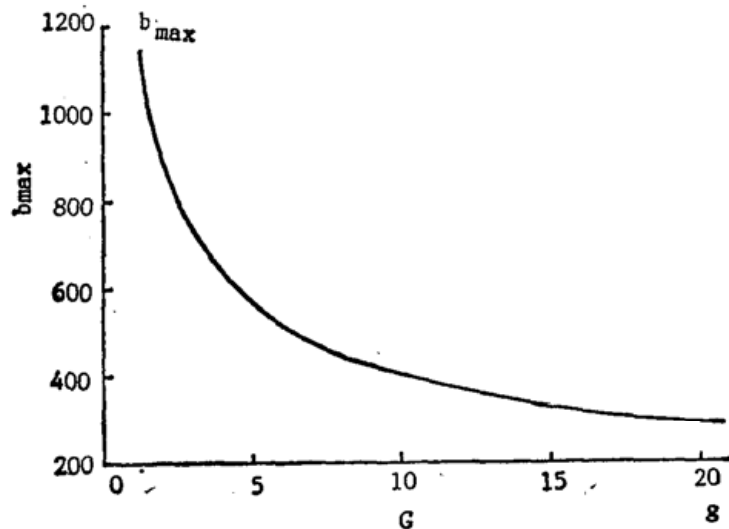


Fig. 3 Maximum of hyperboloid short axis b_{max} versus g

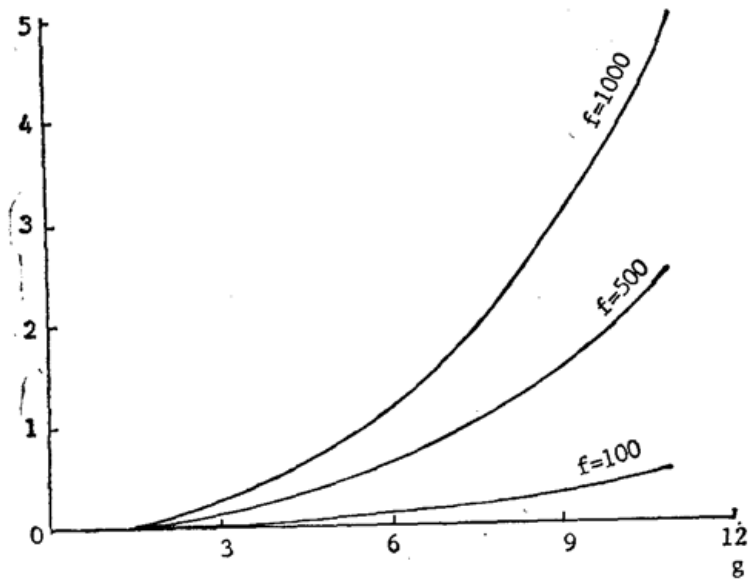


Fig. 4 Pupil deformation Δy versus g , f is a variable parameter

Table 1 Typical Parameters of a Cavity

system parameters	
length of cavity	$L = 2500 \text{ mm}$
cross section of I.P.	$d = 8.7 \text{ mm}$
cross section of E.P.	$D = 49.5 \text{ mm}$
expansion magnification	$= 5.7$
pupil deformation	$y = 0.7 \text{ mm}$
wavelength	$= 1.06 \text{ } \mu\text{m}$
hyperboloid	
incidence angle	$= 83,8^\circ$
large half axis	$a = 312.5 \text{ mm}$
short half axis	$b = 100.0 \text{ mm}$
radius of curvature	$R = 32.0 \text{ mm}$
charact. parameter	$m = 1.1$
magnification	$g = 2.0$
focal length	$f = 3500 \text{ mm}$

$\theta - \alpha$, 顶点曲率 $R = 2f'$ 。在图 2 和图 4 的计算曲线, 选定 $b = 250.0 \text{ mm}$ 。

由于反射镜的几何尺寸, 为了保证光束的掠射, 双曲面 b 值有极大值限制。对于不同的 g , b_{\max} 不同。如图 3 所示, b_{\max} 随 g 增加而非线性减少。其范围在 $200 \sim 1000$ 之间。

定义瞳孔变形参量以 Δy 表示, 它等于上、下两光束截面之差。图 4 表明对于不同参量 f , Δy 随 g 的变化关系。瞳孔变形随 g 变化单调增加, 而且随 f 增加显著变大。

Δy 的大小实质上影响到平行光束中心轴线的偏离。如输出耦合镜放置平行光束处是很不利的, 所以要选 Δy 尽量小的结构。

根据计算结果, 选取一组典型的谐振腔参量如表 1 所列, 同时列出双曲面及抛物面的特征参数。

所谓典型谐振腔是指结构合理, 能够加工制造而言。比如双曲面镜的 b 值既不能选的太大, 也不能选的太小。由于像差 Δy 的限制, g 值选在 2 左右为好。由图 2 可以看出, 扩束倍率 η 并不能做的很大。而由图 3 也可算出 b_{\max} 的范围。

光学计算表明, 共焦型双曲-抛物面望远镜结构, 光学成像质量最好。这种非同轴系统, 使像差讨论变得复杂。本文只限于子午面情况。若考虑弧矢面情况, 则将另文讨论。

参 考 文 献

- [1] 王明常, 王之江等;《中国激光》, 1990, 17, No. 7 (Jul), 40~44.
- [2] S. V. Benson, J. M. J. Madey *et al.*; *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, 1986, 250A, 39~43.
- [3] A. Bhowmik, R. A. Cover *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, 24, No. 5 (May), 802~811.
- [4] 王之江;《光学设计理论基础》, (科学出版社, 北京, 1985), 296.
- [5] G. C. Shin: 《FEL Resonator》, Beijing Institute of Modern Physics Series, 1988, Vol. 2, 286.

A free electron laser with grazing incidence ring resonator

WANG MINGCHANG, YUAN YOULONG, FENG BIBO, ZHOU HUIFEN,

FENG CHENGSHI AND WANG ZHIJIANG

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

(Received 17 April 1990; revised 30 May 1990)

Abstract

A novel cavity construction of FEL has been investigated. Using a hyperboloid-paraboloid grazing incidence telescopes, the cross section of the beam in cavity is expanded approximately by a factor of six, thus the ability of resonator film against laser damage is improved.

The effect of the beam expansion the parameters of the aspheric mirrors, the length of the cavity and the spot size of the grazing incidence on the optical quality of the system.

Key words: free electron laser, ring resonator.