

文章编号: 1007-4627(2000)02-0121-06

光阴极微波电子枪优化设计的考虑*

杨 希, 赵 夔, 郝建奎, 张保澄, 张令翊

唐渝兴, 张云驰, 陈佳洱

(北京大学重离子物理研究所, 北京 100871)

摘 要: 对光阴极微波电子枪进行了优化设计, 给出了光阴极微波腔的形状、电参数和电场分布. 电子束团初始参数对束流横向发射度的影响, 用 Parmela 程序对其进行了优化, 得到了一组最优参数. 考虑了补偿线圈对束流发射度的影响, 对线圈的位置和电流的大小做了优化. 经过优化后得到腔出口处的横向发射度为 $1.39 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$, 达到了设计时的要求.

关键词: 自由电子激光; 光阴极微波电子枪; 发射度补偿

中图分类号: TL503.3

文献标识码: A

1 引言

随着前沿科学领域的迅速发展, 人们迫切需要高亮度、短脉冲、可调的相干 X 射线光源, 这些需求促使人们对第四代光源(X 射线激光)^[1]进行探索性研究. 第四代光源是在第三代(同步辐射)光源后发展起来的新一代光源. 从目前的趋势来看, 这种新一代光源将是高增益自由电子激光(SASE FEL). SASE^[2]既不需要反射镜也不借助外光源, 它是通过自放大自发辐射原理(即高增益机制)实现的: 当电子束团穿过扭摆器时, 一次就可以把光从自发辐射受激放大到饱和, 产生短至 1Å 的高亮度硬 X 射线激光, 其峰值亮度比当前的第三代同步辐射光源高近 10 个量级; 平均亮度高 3~5 个量级; 脉冲长度小 2 个量级, 达到亚 ps 的水平且完全横向相干. 其实用 SASE 产生高亮度、短波长、相干光的想法在由自由电子激光的高增益机制发现的时候就提出来了, 起初想用在束流品质相对较好的储存环上产生软 X 射线, 但是由于峰值电流不能满足要求, 使该想法未能继续发展下去. 基于 SASE 的高增益自由电子激光对电子束流的品质要求比较严格: 能量要达到几个到几十个 GeV, 相对能散度小于千分之一, 峰值流强达到几千 A, 归一化均方

根发射度为几个 $\pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$, 脉冲长度为几百个 fs. 随着电子直线加速器技术和光阴极微波电子枪^[3]的进展使得 SASE 的实现成为可能. 特别是光阴极微波电子枪的发展为 SASE 的发展开辟了新的出路. 光阴极微波电子枪可以产生 1nC、几个 ps 的低发射度高品质电子束, 辅之以发射度补偿技术^[4], 最低归一化均方根横向发射度可达 $1 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 左右. 本文对 SASE FEL 的关键部件光阴极微波电子枪的研制做了一些前期工作, 主要进行了光阴极微波腔的优化设计并初步考虑了电子束团的发射度补偿技术, 最后对电子束团的初始参数和补偿线圈进行了优化.

2 光阴极微波电子枪的优化设计

2.1 光阴极微波电子枪的概述

光阴极微波电子枪的设计思想是采用激光驱动. 光阴极直接置于腔壁的中心, 这样就可利用微波腔在光阴极处高场强特性, 将电子束团及时引出, 从而产生出高品质的电子束. 采用激光驱动的光阴极微波电子枪具有热阴极微波电子枪及场致发射微波电子枪所无法比拟的优越性, 能产生出高亮度、低发射度、短脉冲长度的高品质电子束,

* 收稿日期: 1999-09-17

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19685002, 19735004)

作者简介: 杨 希(1975-), 男(汉族), 湖南益阳人, 硕士研究生, 从事加速器的新原理与新技术研究.

这为 SASE 的发展提供了契机. 光阴极微波电子枪主要由微波腔、光阴极、激光系统和激光-微波腔同步系统组成.

要使光阴极微波电子枪能产生出高品质的电子束团, 需要对上述部件作全面优化.

光阴极微波腔的示意图如图 1 所示. 光阴极置于半腔的腔壁上, 激光沿轴线以极小的角度入射; 微波耦合采用轴向对称耦合, 两个螺线管线圈起发射度补偿作用. 微波耦合采用轴对称耦合, 其好处为: (1) 能有效抑制由于场分布的不对称性对束团发射度的影响; (2) 允许用作发射度补偿的聚焦螺线管线圈放在最佳的位置上.

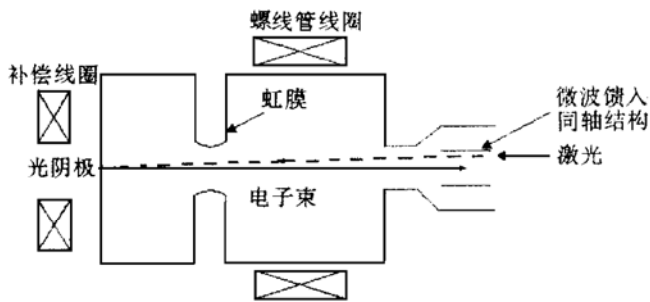


图 1 光阴极微波腔结构示意图

2.2 腔形设计

为了产生高流强、低发射度、短脉冲长度的电子束, 腔形设计非常关键. 腔形设计的物理要求^[5]是: (1) 要在光阴极处产生足够高的峰值加速电场, 使电子尽快加速至相对论速度, 从而减少非相对论情况下由于空间电荷效应引起的发射度增长; (2) 使腔中的微波径向场 E_r 随 r 分布的线性区域尽量大, 从而减少非线性微波场对电子束发射度增长的影响; (3) 腔的束流传输孔径要大, 可以遏制尾场对电子束流的影响; (4) 为了增加高频功率转化为电子束能量的效率, 应使腔的有效分路阻抗尽量大. 当然在腔形设计当中, 完全兼顾以上四条要求是不可能的. 一般只能取各种因素的折衷, 或者只考虑其中几条, 其它要求则采取一定的方法来补救.

在腔形设计中, 首先要确定频率, 一般考虑使微波腔的工作频率与直线加速器的工作频率一致, 直线加速器的工作频率一般工作在 S 波段(如: SLAC 的直线加速器)和 L 波段(如: TESLA 直线

加速器). 高频的优点是加速梯度高, 因而加速器相对较短, 造价低; 而低频的优点是束流品质相对要好. 为了获得好的束流品质我们倾向于采用 1.3 GHz 频率. 为了达到在光阴极处产生足够高的峰值加速电场, 在设计上需要采用 $n+1/2$ 个腔结构, 我们准备用 1.5 个腔, 工作模式为 π 模式. 其腔形示意图参见图 1.

考虑到基波 TM₀₁₀ 模式在轴线附近场分布的具体形式, 为了满足在轴线附近微波径向场 E_r 随 r 的分布呈线性即 $E_r = A(z, t)r$, 其中 $A(z, t)$ 表示 E_r 随 z 和时间 t 变化的函数关系. $E_z(0, z)$ (轴线上电场的 z 分量) 必须满足下面的方程^[6]:

$$\frac{d^2 E_z(0, z)}{dz^2} + k^2 E_z(0, z) = 0. \quad (1)$$

KT McDonald 从此方程出发, 推导出了满足此微波场方程的腔壁方程, 从而得到在虹膜附近的腔壁半径公式^[7]:

$$r(z) = \sqrt{a^2 - \left| \frac{4d}{\pi} \right|^2 \ln \left| \sin \left| \frac{\pi z}{2d} \right| \right|}, \quad (2)$$

其中: z 为纵向坐标, d 为半腔的长度, a 为 $z = d$ 时的孔径.

2.3 腔形的优化

为了达到腔形的优化, 用 Superfish 程序对腔形的尺寸和虹膜的厚度及半径作了仔细的调节, 以使频率、场型分布、工作模式与设计要求一致. 在进行虹膜设计的时候选择虹膜的孔径和厚度之比为 1, 因为这时能给出虹膜尺寸的最优估计^[8]. 在选择虹膜半径或厚度时采取折衷的选择: 一方面厚度提高有利于腔的冷却(加冷却管), 增加虹膜的导热性, 而且半径的增加能提高腔与腔之间的耦合, 极大地增加场的稳定程度; 另一方面, 增加虹膜的半径和厚度会降低腔的分路阻抗. 在此经过优化, 选择 2.00 cm. 半腔长度的选择上一般选择比 0.50 个腔要长一点, 主要是为了在横向上得到更多的聚焦, 从而可抑制横向发射度的增长, 但它是以增加纵向发射度为代价的. 同时由束流动力学模拟可知 E_1/E_2 (E_1 为半腔的峰值场强, E_2 为整腔的峰值场

强) 处在 0.7~ 1.5 范围里时对横向发射度的影响比较小, 我们对不同半腔长度作了认真考虑(见表 1).

表 1 半腔长度不同时各参数的变化

半腔长(腔)	F/MHz	$E_{\max}/(\text{MV}\cdot\text{m}^{-1})^a$	$\Delta E/\text{MeV}^b$	E_1/E_2	$\epsilon_{\text{发射}}/(\pi\text{mm}\cdot\text{mrad})^b$ 注: 用后面的参数 ^c
0.45	1 304.112	4.281	2.46	8.6	1.771 1
0.5	1 302.341	3.624	2.89	5.7	1.684 8
0.55	1 301.210	3.077	3.43	3.8	1.486 4
0.6	1 300.221	2.339	4.46	2.0	1.396 8
0.63	1 299.796	1.834	5.58	1.3	1.406 0

注: a 表示当腔轴线上归一化平均场强为 $1 \text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$ 时, 腔壁上的最大场强.

b 表示考虑腔壁上最大场强一定(为 $73.360 \text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$) 时, 在腔的出口处的电子的平均能量增益和电子束的发射度.

c 参数为 $E_{\text{bi-max}} = 73.36 \text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$, $q = 1\text{nC}$, $\delta\Phi = 3.5 \text{ ps}$, $\sigma_{\Phi} = 2.0 \text{ ps}$, $\Phi_{\text{max}} = 2.0 \text{ ps}$, $r_0 = 0.20 \text{ cm}$, $\alpha = 37^\circ$, 发射度为粒子数占总数的 90% 时的横向归一化均方根发射度.

表 2 腔的其它电参数

F/MHz	Stored energy/J	Power dissipation/W	Quality factor q	$Zl^2/(\text{M}\Omega\cdot\text{m}^{-1})$	Transit time factor t
1 299.796 08	0.007 176 4	2 140.008 7	27 387.2	27.702	0.56

E_1/E^2 描述了场的均衡性, 由表 1 可看出, 随着半腔长度的增加, 场更趋于均衡, 场越不均衡, 说明当轴线上平均场强一定时, 腔壁上的最大场强值越大. 但考虑腔壁的击穿场强一定, 所以场均衡性好的腔在轴线上有较高的平均场强, 从而有较大的能量增益. 由表 1 还可看出, 当半腔长为 0.6 个腔时, 电子束的横向发射度最小, 但考虑腔中场的均衡性和能量增益, 为此选择半腔长度约为 0.63 个腔.

由 Superfish 程序可得到腔的各种电参数, 计算结果如下:

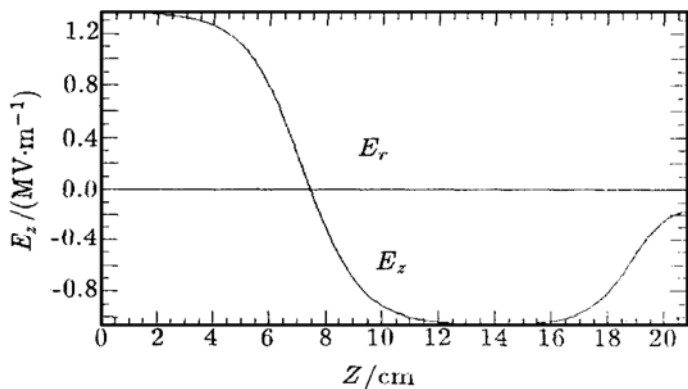


图 2 $E_z(r=0, z)$ 随纵向坐标 z 的曲线

(1) 微波腔轴上的电场分布 图 2 是轴平均电场为 1 MV/m 时, 电场 $E_z(z, r=0)$ 随 z 的分布曲线. 其中光阴极处的电场为 1.37 MV/m .

(2) 微波径向电场与半径的关系 图 3 为微波径向场 $E_r(z, r)$ 与 r 的关系. 由图可知由于在腔形上的考虑, 半径在 $r = 2.0 \text{ cm}$ 内线性关系非常明显, 从而可有效的压制由于非线性电场力对发射度增长的影响.

(3) 腔的其它参数(见表 2).

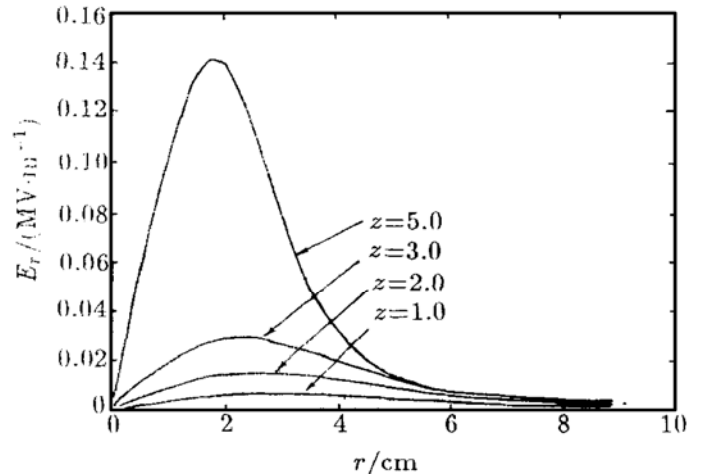


图 3 $z(\text{cm})$ 取不同的值时 E_r 与 r 的关系

3 发射度补偿

为了实现 SASE FEL, 在光阴极微波电子枪的设计中, 束流横向发射度是一个很重要的量. 为尽量减少横向发射度, 我们考虑了几种有效的方法.

3.1 引起横向发射度增长的原因

影响横向发射度增长的原因很复杂, 主要原因有:

(1) 空间电荷力 在电子从光阴极出来时的低能段, 空间电荷力对横向发射度增长的影响特别明显, 下面将详述针对空间电荷力对发射度的影响所采取的发射度补偿措施.

(2) 非线性电磁场力 这个因素的影响已经在腔形设计中得到了优化解决.

(3) 线性电磁场力 由于总是存在场分量 E_r 和 H_θ , 于是便产生了一径向力 $F_r = eE_r - e\mu_0 v H_\theta$, 从而对横向发射度产生影响, Serafini^[9] 建议用谐波模式来削弱由于 RF 场导致的发射度增长, 由 Serafini 的模拟可知, 让特定的谐波与基波共存, 可以削弱由于线性 RF 力对发射度增长的影响, 但制作基波和几个谐波共存的腔比较困难.

(4) 激光从光阴极打出电子时电子本身具有的热发射度的影响 在一般情况下, 光阴极发射度是可以忽略的, 但是对于大尺寸束斑, 这个发射度会变得重要起来. 由于光阴极本身产生的归一化热发射度的公式为^[10]

$$\epsilon_{x,y}^{\text{th}} = r \sqrt{\Delta E / (mc^2)}, \quad (3)$$

其中: r 为光阴极半径, ΔE 为激光能量与光阴极功函数的差值, m 为电子的静止质量. 这些参数由光阴极本身与激光参数来决定, 可以通过 Parmela 程序进行模拟优化得到电子束的初始参数, 即可得到对激光器参数的要求.

3.2 空间电荷发射度的补偿

空间电荷力在束团中央最强, 随着与中央距离的增加而递减. 依据这种受力分布, Carlsten 发展了一套适应于微波电子枪的发射度补偿技术^[4].

由于束团中央与尾端受到的空间电荷力不一样, 使得束团在相空间中扇形一般展开, 如果在微

波腔的恰当位置放上一个起聚焦作用的螺线管, 在它的聚焦力作用下, 使得扇形相图得到反转, 再经过一段飘浮距离, 扇形相图会得到收缩, 从而使发射度得到补偿.

得到补偿后的电子束达到了相对论速度, 故以后的空间电荷力对发射度的影响很小. 由以上论述可以看出螺线管的位置、强度、焦距等参量对发射度补偿具有显著作用.

4 用 Parmela 程序对电子束初始参数和补偿线圈进行优化

横向发射度是光阴极微波腔设计时最重要的考虑参数. 下面的模拟和优化主要是为了尽量减小电子束团的横向发射度而进行的, 考虑粒子数占总数的 90% 时的束流方均根 横向归一化发射度.

4.1 束团的初始半径和时间结构对束流横向发射度的影响

当束团处于低能时, 由于束流各部分受到的空间电荷力不一样, 横向和纵向发射度都将会显著提高. 对于给定的束团电荷(本文给定为 1nC), 初始时刻不同的束流半径和时间结构的选择对改善束流横向发射度特别重要, 所以我们要对各初始参数进行模拟优化: 假设束团在径向方向上电荷密度分布均匀, 在时间上分布为有平顶的高斯分布, 定义 σ_Φ 为高斯分布的半高宽(FWHM)的一半, 也近似为束流的上升时间, $2\Phi_{\text{max}}$ 为高斯分布的截止宽度, $\delta\Phi$ 为高斯分布的平顶宽度, r_0 为初始电子束斑半径的大小, E_0 为轴上平均电场强度, α 为参考粒子入射时的相位. 所采取的优化策略为: 先使一个参数变化而固定其它参数不变, 得到最优值, 然后固定这个参数再用同样的方法考虑其它参数的优化, 最后得出各个参数的最优值; 没有最优值时考虑实际的限制, 取一个容易实现的值. 这种优化方法要求各参数是相互独立的, 优化结果见表3.

参数取最优时, 由 Parmela 模拟可得腔出口处的束流参数(见表4) 和束流相空间的相图(见图4).

由图4可看出在腔的出口处, 横向发射度得到了很好的抑制, 基本上达到了我们预想的目标. 并且在出口处, 束斑的半径约为 0.50 cm, 没有超越线性

区(为2.0 cm).

表3 优化后的参数值

σ_r/cm	σ_Φ/ps	$\delta\Phi/\text{ps}$	$E_0/(\text{MV}\cdot\text{m}^{-1})$	$\alpha/(\text{°})$	q/nC	$\Phi_{\text{max}}/\text{ps}$
0.20	2.0	3.5	40.0	37	1	2.0

表4 腔出口处由 Parmela 模拟得到的束流参数

$X(\text{rms}, n)/\text{cm}$	$E_{\text{max}, n}(x, 90\%)$ $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$	$Y(\text{rms}, n)/\text{cm}$	$E_{\text{max}, n}(90\%)$ $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$	$Z(\text{rms})/(\text{°})$	$Z\text{-mittance}(90\%)$ $(\text{°})\text{-keV}$
0.28	1.406 0	0.26	1.258 9	3.326	14.781

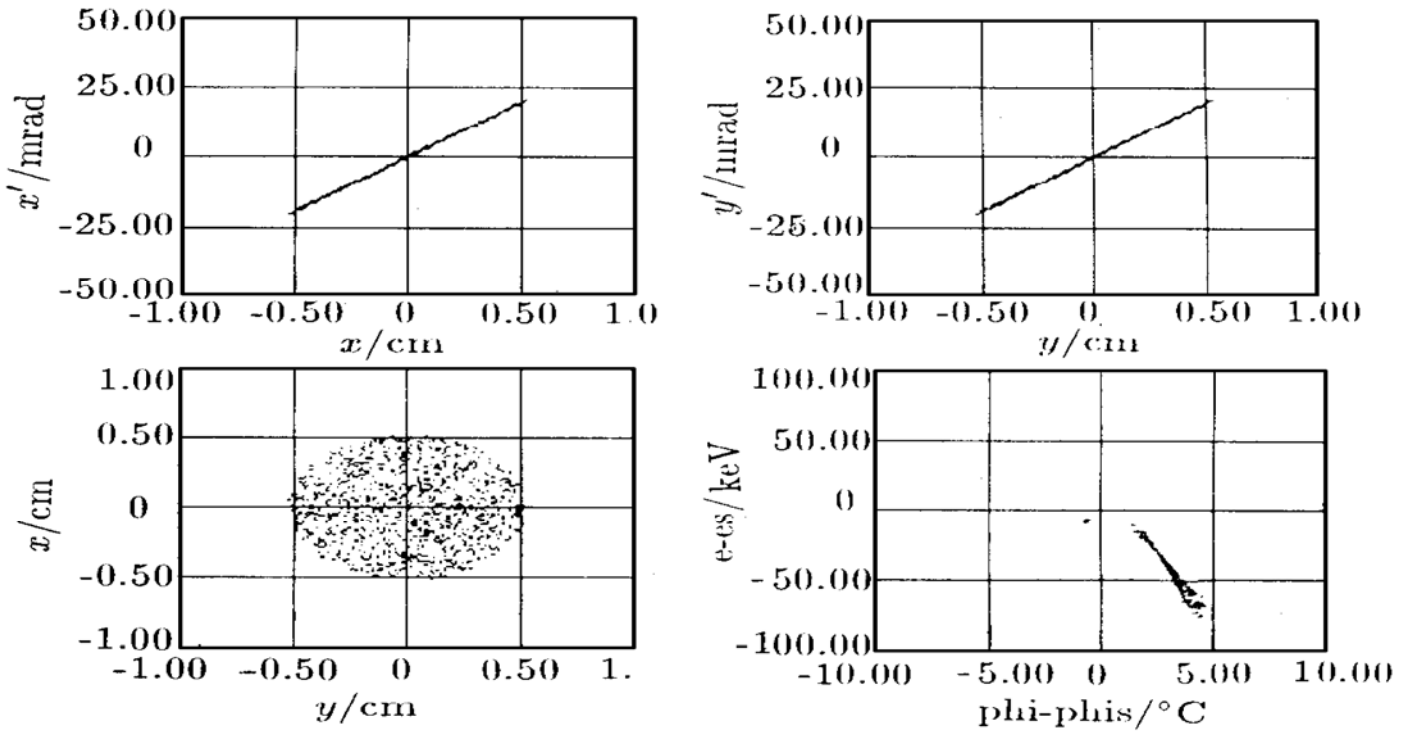


图4 电子束在腔出口处的 x' 与 x (左上角, x 平面上的相图)、 y' 与 y (右上角, y 平面上的相图)、 x 与 y (左下角, 横截面上电子的分布) 和 $e\text{-es}$ 与 phi-phis (右下角, 能量与相位之间的关系) 的相图

$e\text{-es}$ 代表粒子能量与参考粒子能量之差; phi-phis 代表粒子相位与参考粒子相位之差.

4.2 补偿线圈对横向发射度的补偿作用

由前面我们知道了螺线管线圈对发射度补偿的原理, 其补偿作用与线圈的位置与线圈产生磁场的大小密切相关, 要对其进行仔细优化. 由于在前述因素给定的条件下, 线圈的位置与所产生磁场的大小对发射度的影响不是独立的, 所以不能采取与上面相同的优化方法. 经过仔细调节得出一较好值, 当线圈的位置为12.50 cm, 电流大小为20 A 时发射度为1.390 $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$.

应该指出, 本文中补偿线圈的调节没有考虑到腔后加别的元件, 如果再在其后加一段漂移管则补

偿线圈的位置和电流又必须重新优化. 要使横向发射度进一步减小, 有3种方法值得考虑:

- (1) 适当增加轴线上的平均场强 E_z ;
- (2) 减小初始束流脉冲的上升时间;
- (3) 在后续的加速单元上继续进行发射度补偿.

5 总结

本文通过对光阴极微波电子枪的优化设计和对发射度补偿技术的考虑, 给出了一组较好的参数, 由 Parmela 模拟得到的横向发射度为 1.390 $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$, 基本达到了设计要求, 如沿着上面说到

的优化方法进一步优化, 估计可进一步改善横向发射度到 $1 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$.

参 考 文 献:

- [1] 张令翊. 短波长高增益和 SASE 自由电子激光物理研究 [D]. 博士学位论文, 北京: 中科院高能所, 1998, 8~ 37.
- [2] Murphy J B, Pellegrini C. Free Electron Lasers for the XUV Spectral Region [J]. Nucl Instr and Meth, 1985, A237: 159~ 167.
- [3] Sheffield R L. Photocathode RF Guns [J]. In: Month M and Mdiens ed. Physics of Particle Accelerators, AIP, 1989, 184: 1 500~ 1 532.
- [4] Carlsten B E. New Photoelectric Injector Design for the Los Alamos National Laboratory XUV FEL Accelerator [J]. Nucl Instr and Meth, 1989, A285: 313~ 319.
- [5] 吴中发, 王玉芝. 高亮度 $1/2$ 超导腔光阴极注入器的腔形设计 [J]. 强激光与粒子束, 1992, 4(4): 547~ 556.
- [6] Gao J. Microwave Electron Gun Theory and Experiments [J]. Rev Sci Instrum, January, 1992, 63(1): 64~ 70.
- [7] McDonald K T. Design of the Laser-driven RF Electron Gun for the BNL Accelerator Test Facility [J]. IEEE Trans Electron Devices, 1988, ED-35 11: 2 052~ 2 059.
- [8] Dwersteg B, Sekutowicz J, Stolzenburg Ch *et al.* RF Gun Design for the TESLA VUV Free Electron Laser [J]. Sep 1996, TESLA-FEL 96(13): 55~ 59.
- [9] Serafini L, Rivolta R, Terzoli L *et al.* RF Gun Emittance Correction Using unsymmetrical RF Cavities [J]. Nucl Instr and Meth, 1992, A318: 275~ 281.
- [10] Christian Travier. An introduction to Photo-injector Design [J]. Nucl Instr and Meth, 1994, A340: 26~ 39.

Consideration of Optimized Design for Photocathode RF Gun*

YANG Xi, ZHAO Kui, HAO Jian-kui, ZHANG Bao-cheng, ZHANG Ling-yi,
TANG Yu-xing, ZHANG Yun-chi, CHEN Jia-er
(*Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: A 1.3 GHz photocathode RF gun is under study in Peking University. The photocathode RF gun, composed of gun cavity, photocathode and Laser system, is expected to deliver a electron beam with a normalized transverse rms emittance of $1 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ at a charge of 1nC. Its performance has been studied by the space-charge tracking code PARMELA. The influences of the initialized electron beam were also studied. The emittance compensation technique is employed. After optimization of the parameters was achieved, the normalized transverse emittance is $1.39 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ at the gun exit.

Key words: free electron laser(FEL); photocathode RF gun; emittance compensation

* **Foundation item:** NSFC(19685002, 19735004)

快 讯

接《中文核心期刊要目总览》(2000年版)编委会通知, 经过编委会严格的筛选, 从我国正在出版的近万种中文期刊中确定出1568种期刊为核心期刊. 《原子核物理评论》本次也被确认为核心期刊, 特此告知各位编委、论文作者和广大读者. 与此同时, 对各位编委、核物理界的同仁, 以及本刊的广大作者和读者多年来对本刊的关心和支持表示衷心感谢!

《原子核物理评论》编辑部