

# 合肥软X射线波段自由电子激光注入器模拟优化\*

张善才<sup>1)</sup> 何多慧

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

**摘要** 合肥软X射线波段自由电子激光项目是基于直线加速器的软X射线光源. 其注入器由光阴极微波电子枪与两个直线加速3米段构成. 光阴极微波电子枪产生束团电荷量1nc、峰值流强100A、重复频率10Hz电子束流, 并利用螺线管磁场在其出口处进行发射度补偿, 在经过一段漂移距离后电子束流进入增强直线段加速. 使在低能端由于空间电荷效应产生的横向发射度增长基本被完全补偿. 本文中利用PARMELA对注入器进行了模拟计算, 对发射度的补偿效果进行了优化, 同时对注入器内各元件的布置也进行了优化. 在注入器出口可以得到归一化横向发射度小于1.5mm·mrad的低发射度束流.

**关键词** 光阴极微波电子枪 自由电子激光 PARMELA

## 1 引言

中国科学技术大学国家同步辐射实验室(NSRL)800MeV电子储存环采用200MeV电子直线加速器作为注入器. 当前的电子直线加速器采用热阴极常规电子枪作为电子源. 电子枪产生能量为80keV的电子束, 电子束通过预聚束段、聚束段后进入电子直线加速器加速到200MeV后通过输运线注入到储存环内. 直线加速器在每日运行中, 除了为储存环提供电子外, 其余时间大量空余. 因此将现有的系统适当改造后, 可以作为深紫外到软X射线波段自由电子激光的驱动器.

深紫外到软X射线波段自由电子激光器对电子束流的品质要求很高: 电子束归一化发射度要小于2.5mm·mrad, 峰值流强要达到600A以上, 能散小于0.1%, 这是现有装置达不到的. 如果将现有的热阴极常规电子枪替换为光阴极微波电子枪, 采用螺线管进行发射度补偿, 在电子枪处产生归一化发射度<1.5mm·mrad的电子束流. 在加速过程中, 对电子束流的纵向进行压缩, 则可以获得满足要求的电子束流.

## 2 注入器系统设计

在光阴极微波电子枪中, 空间电荷效应和高频加

速场是发射度增加的两个最主要原因. Kim<sup>[1]</sup>给出了电子枪中空间电荷效应引起的发射度增长为

$$\varepsilon_i^{sc} = \frac{\pi}{4} \frac{1}{\alpha k} \frac{1}{\sin(\theta_0)} \frac{I_p}{I_A} \mu_i(A), \quad (1)$$

其中 $k = 2\pi/\lambda_{rf}$ 是波数, 由腔的结构决定.  $\theta_0$ 是激光入射到阴极表面相对于高频加速场的相位,  $\theta_0 = 0^\circ$ 相当于高频场等于零处,  $\theta_0 = 90^\circ$ 则是相当于高频场处于波峰时.  $I_p$ 是峰值电流强度,  $I_A = 17\text{kA}$ 是阿尔芬(Alfvén)电流.  $\alpha$ 是归一化的场强梯度,  $A$ 是横纵向rms束团尺寸的比值 $A = \sigma_x/\sigma_z$ . 对高斯分布的电子束

$$\mu_i(A) \approx \begin{cases} \frac{1}{3A+5} & i=x \\ \frac{1.1}{1+4.5A+2.9A^2} & i=z \end{cases}. \quad (2)$$

横向空间电荷因子 $\mu_x$ 因为非线性透镜效应, 对高斯分布电子束流不能消除, 但是对均匀分布电子束这一项为零. 纵向空间电荷因子, 是与电子相对束团中心位置有关的, 对均匀分布电子束这一项依然存在. 线性空间电荷效应引起的发射度增长可以通过发射度补偿得到完全校正.

微波电子枪中的高频加速场在电子枪出口处表现为一个对电子束的散焦作用, 从而引起电子束发射度的增长.

\* 中国科学院知识创新工程项目(XJCX2-N03), 国家自然科学基金重大基金(10299020)和高校博士点基金(20040358053)资助  
1) E-mail: shancai@ustc.edu.cn

对高斯分布电子束,

$$\varepsilon_x^{\text{rf}} = \frac{\alpha k^3 \sigma_x^2 \sigma_z^2}{\sqrt{2}}. \quad (3)$$

对均匀分布电子束:

$$\varepsilon_x^{\text{rf}} = \frac{\alpha a^2 k^3 L^2}{4\sqrt{6!}}. \quad (4)$$

可以看到, 均匀分布的电子束流横向最小发射度约为高斯分布的一半.

合肥自由电子激光注入器系统包括一个光阴极微波电子枪, 一个发射度补偿螺线管线圈和一个 6 米直线增强能量段. 其布局如图 1 所示.

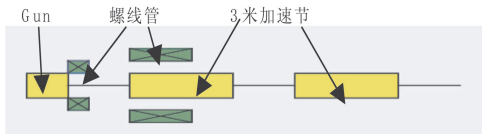


图 1 注入器布局图

光阴极微波电子枪采用 BNL 型 1.6 腔结构, 利用一个置于腔出口处的螺线管线圈对因为空间电荷效应引起的发射度增长进行补偿. 腔长为 15cm. 发射度补偿螺线管线圈紧贴腔放置在距离阴极 10cm 处以求尽可能早地对发射度进行补偿, 以减小空间电荷的影响, 螺线管线圈设计为强场短作用范围磁铁, 使在阴极处剩余磁场可以忽略, 以免引起附加的发射度增长. 在经过一段漂移段之后是两段 3 米等梯度型 S 波段行波加速结构加速段对电子束进行加速. 加速段采用 slac 标准等梯度加速结构, 采用同一个 80MW 束调管提供功率. 将补偿后的发射度稳定在很小上, 电子束能量迅速提高到 130MeV, 减少空间电荷效应对电子束的影响. 在第一个三米段起始部分, 90cm 长的螺线管包裹在加速管外, 用于电子束的聚焦.

### 3 注入器的数值模拟优化

为了研究注入相位、激光脉冲分布、阴极横向束团尺寸、螺线管线圈聚焦强度、增强直线段的起始位置和螺线管聚焦等因素对发射度的影响. 利用 PARMELA<sup>[2]</sup> 对注入器进行了数值模拟计算. 在计算中注入器的布置如图 1 所示. 腔的场分布采用 SUPERFISH<sup>[3]</sup> 计算, 并带入到 PARMELA 中.

在本文中计算中, 固定电子枪腔内峰值加速场为 100MV/m, 电荷量固定为 1nC, 束团长度半高全宽为 10ps, 直线段加速场强为 21MV/m 不变.

#### 3.1 注入相位的影响

不同的激光注入相位, 产生的电子束的能量不同, 电子束在电子枪内看到的场在强度上也有所不同, 因此发射度的增长也会不一样. 对不同的相位的电子束进行模拟计算, 得到如图 2 所示的结果. 图中发射度是经过发射度补偿并加速后的值. 可以看到归一化发射度的最佳值与能量最大值并不在同一相位. 在以后的优化中, 都选取归一化发射度的最佳值的相位作为优化相位.

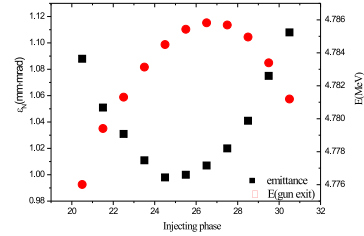


图 2 注入相位与发射度和能量的关系

#### 3.2 电子束团分布的影响

从公式(1)–(4)可见不同的电子束分布对发射度的影响很大. 注入激光的脉冲分布决定了电子束的分布. 为了比较不同分布的影响, 对横向和纵向的各种分布进行了模拟计算得到图 3. 图中 U 代表均匀分布, G 代表高斯分布. 曲线 a 电子束横向纵向都是均匀分布, 曲线 b 横向是均匀分布, 纵向是高斯分布, 曲线 c 横向纵向都是高斯分布. 束团分布对发射度的影响明显, 横纵向均匀分布可以得到最佳的发射度, 这与公式的结果是一致的.

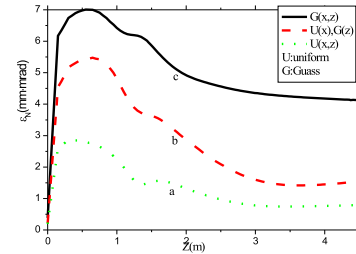


图 3 不同分布对发射度的影响

在本文其他计算中, 横向采用均匀分布, 纵向采用近似均匀分布的平顶脉冲, 脉冲的上升和下降时间均为 0.5ps.

#### 3.3 阴极横向束团尺寸的影响

激光脉冲在阴极表面上的横向尺寸也会影响到发射度. 大的尺寸看到更多高次和不均匀的高频加速电场, 引起发射度增加, 而太小的束团尺寸, 则受到太强的空间电荷力的作用, 发射度也会急剧增加. 图 4 中可以看到 1.3mm 是最佳值.

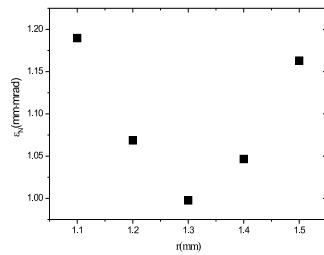


图4 阴极横向束团尺寸的影响

### 3.4 发射度补偿螺线管强度的影响

发射度补偿线圈的作用至关重要. 选取图5中最粗线条件 ( $B_{\max} = 0.2054\text{T}$ ) 为优化结果.

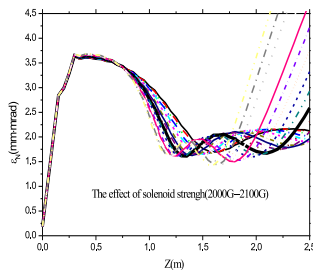


图5 补偿线圈磁感应强度的作用

### 3.5 增强直线段的螺线管聚焦的作用

增强直线段的螺线管聚焦也会在一定程度上影响到发射度. 对不同的聚焦强度进行模拟跟踪得到图6的结果.  $B = 0.750\text{T}$  是最佳的聚焦强度.

### 3.6 增强直线段的起始位置的影响

增强直线段的起始位置同样对发射度也有影响. 通过模拟计算优化可得表1.

表1

Z_start/m	归一化发射度/(mm·mrad)
1.30	1.103
1.40	0.998
1.50	1.13

1.40m 是增强能量段最佳的放置位置.

利用以上优化结果, 计算的发射度与束团包络在注入器中发展如图7所示. 曲线a是归一化发射度, 曲线b是束流包络.

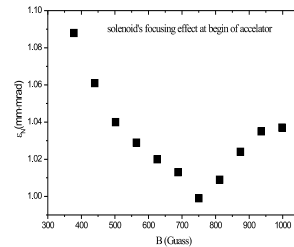


图6 增强直线段的螺线管聚焦的作用

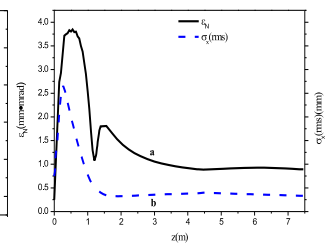


图7 注入器中束流发射度与包络

## 4 结论

为了获得高品质的电子束流, 光阴极微波电子枪的场强需要达到100MV/m 以上, 因此微波电子枪腔体的加工、焊接、冷却等有一定的难度. 同时, 光阴极微波电子枪必须对入射激光进行横向、纵向整形. 激光脉冲的横向不均匀性要小于10%, 纵向脉冲应尽量接近均匀分布, 要求其上升下降沿时间宽度小于1ps. 经过整形的入射激光产生的电子束在经过适当的发射度补偿后, 应可以获得合肥自由电子激光所需的电子束参数.

## 参考文献(References)

1 Kim K J. Nucl. Instr. & Methods, 1989, **A275**: 201

2 PARMELA. User Manual

3 Superfish. User Manual

## Optimization of Hefei Soft X-Ray FEL Photocathode Injector<sup>\*</sup>

ZHANG Shan-Cai<sup>1)</sup> HE Duo-Hui

(National Synchrotron Radiation Laboratory of University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

**Abstract** A photocathode RF gun is proposed to generate low emittance, low energy spread and high current electron beam for FEL experiment. In this paper an injector includes a photocathode RF gun, a solenoid, and a 6m long LINAC is simulated with PARMELA. A 1mm·mrad electron beam can be produced from the simulation.

**Key words** photocathode RF gun, FEL, PARMELA

<sup>\*</sup>Supported by Knowledge Innovation Project of The Chinese Academy of Sciences (XJCX2-N03), Major Program of National Natural Science Foundation of China (10299020) and SRFDP (20040358053)

1) E-mail: shancai@ustc.edu.cn