

用于短波长 FEL 的光阴极微波 电子枪设计研究*

赵 铤¹⁾ 李永贵

(中国科学院高能物理研究所 北京 100080)

摘要 高增益、短波长自由电子激光器需要发射度低、峰值电流高的短脉冲电子束流。采用发射度补偿技术,设计了一台 S 波段、一个半腔体的光阴极微波电子枪以用于建议中的 SDUV-FEL 装置。POISSON, SUPERFISH 和 PARMELA 程序的计算表明:当微脉冲电量为 2nC 时,这种设计能产生 $\epsilon_{n,mms} = 2.3\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 、 $E_k = 4.8\text{MeV}$ 的电子束流。报道了该枪的设计考虑和模拟结果。

关键词 微波电子枪 自由电子激光 发射度补偿

1 引言

短波长自由电子激光器对电子束的品质提出了更苛刻的要求。为得到深紫外以至 X 波段的自由电子激光,产生小发射度、大峰值电流和短脉冲的高亮度电子束是一个关键因素^[1,2]。自光阴极微波电子枪问世的十多年来,世界主要加速器实验室对其进行了大量的研究工作。尤其是随着高量子效率的光阴极材料、高能量短脉冲激光器和发射度补偿技术的发展,目前只有基于光阴极微波电子枪的注入器能产生满足短波长自由电子激光需求的电子束流。

建议中的上海深紫外自由电子激光装置(SDUV-FEL)将采用高增益谐波放大(HGHG)工作模式²⁾。该装置主要由专用的光阴极注入器、300MeV 电子直线加速器(与正在研制中的上海第三代同步辐射装置共用)、种子激光器和特殊的 Wiggler 组成。它要求电子枪能产生 $Q \approx 2.5\text{nC}/\text{bunch}$, $E_k \approx 4.5\text{MeV}$, $\sigma_z = 3-6\text{ps}$, $\epsilon_{n,mms} \approx 2\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 的束流。为此,必须选用光阴极微波电子枪。鉴于 BNL 等实验室在光阴极微波电子枪上取得的成功经验^[3,4],我们的设计中也采用一个半腔结构。在枪的出口设置聚焦螺线管,电子束经过适当的漂移距离后发射度得到补偿再进入加速管。本设计与国外同类工作的主要

2000-05-16 收稿, 2000-08-02 收修改稿

* 王宽诚教育基金, 博士后基金, 美国 SURF-Jlab 资助和上海 SDUV-FEL 项目资助

1) E-mail: zhaotq01@yahoo.com

2) 陈森玉, 何多慧, 赵小风, 李永贵, 上海深紫外自由电子激光装置建议书, 1999

区别是在获得大的电荷量(国外一般在 1nC 左右)的情况下,同时获得小的发射度和最大场强,这需要在腔型优化和发射度补偿方面给予特别考虑. 我们采用 SUPERFISH, POISSON 和 PARMELA 程序分别进行了 1.5 腔体、聚焦螺线管的设计和粒子动力学的模拟计算. 计算表明:当激光注入相位约为 30° 、阴极表面最大电场梯度为 100MV/m 时,这种设计能得到 $Q = 2\text{nC/bunch}$, $\epsilon_{n,\text{rms}} = 2.3\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$, $E_k = 4.8\text{MeV}$ 的电子束流.

2 设计考虑

在满足所需的电量下,获得低发射度的束流是本设计考虑的重点. 设计参数的选择要考虑到实际条件和技术限制.

(1) 影响发射度的主要因素

在光阴极注入器中,束流自身的空间电荷力和外部的横向射频场力是引起束流发射度增长的两个主要因素. 其中:线性空间电荷斥力引起的束流发射度增长可用适当的外部线性聚焦力(如:螺线管透镜)得到补偿^[5],即所谓的发射度补偿技术^[5,6];非线性空间电荷效应一般不能消除,但是阴极附近高的加速电场(在尽可能短的距离内把束流加速到相对论速度)和电子束团均匀的电荷分布都能减小这种效应;非线性径向射频场力可通过腔体形状的设计使其满足一定的条件来消除^[7];线性的时变射频场效应通常很难消除,小尺寸的束团有助于减弱这种效应.

所设计的高亮度微波电子枪工作在空间点荷占主导的区域,因而采用发射度补偿技术能有效地减小发射度的增长. 受空间位置的限制,聚焦螺线管放置在电子枪出口,同时在枪的末端加一小的反向螺线管以抵消阴极面附近的磁场. 所以,设计时必须选择和优化加速场梯度、注入相位、入射激光的束斑和长度、补偿螺线管的位置和磁场等参数,以获得最小发射度束流^[8].

(2) 主要参数的选取原则及其限制因素:

频率 选取与直线加速器相同的 2856MHz 作为微波腔的工作频率.

电场 加速电场梯度越大越好^[8],但场强过大会诱发腔壁产生场致发射,所以设计时要使阴极表面和轴向电场尽可能大而腔体表面的场尽可能小. 这样分路阻抗不能最大.

脉冲 初始电子束团的尺寸和时间结构由入射激光脉冲决定. 束团半径太大,所受的非线性射频力显著;同时,热效应引起的束流初始发射度与半径大小成正比. 束团长度越长,引起的能散等越大,一般不大于 10° 射频相位. 受激光器技术的限制,目前最高的脉冲重复频率在 10^2MHz 左右^[9].

电量 微脉冲电量($Q[\text{nC}] = 8.07 \times 10^{-3} \eta[\%] \lambda[\text{nm}] W[\mu\text{J}]$)由光阴极材料的量子效率(η)、入射激光的波长(λ)和能量(W)决定. 量子效率不仅与材料的性质有关,而且和激光波长、脉冲长度、入射角以及真空、外电场等密切相关.

光阴极材料 多碱化合物的量子效率较高,但制备复杂,真空要求高,而且能承受的场梯度低. 虽然金属(如:铜)的量子效率较低,但是它寿命长、可在极高的场梯度下工作.

激光器 波长短、功率大、光斑小、重复频率高、幅值和时间空间稳定性好^[9]. 目前二极管泵浦的 Nd:YLF, Nd:YAG 和 Ti:Sapphire 锁模激光器能基本满足要求.

3 计算结果

利用 SUPERFISH/POISSON 程序分别进行了 1.5 腔体和聚焦螺线管的设计,并把计算得到的电磁场分布以文件形式给 PARMELA 程序,再用 PARMELA 程序进行粒子动力学的模拟计算.

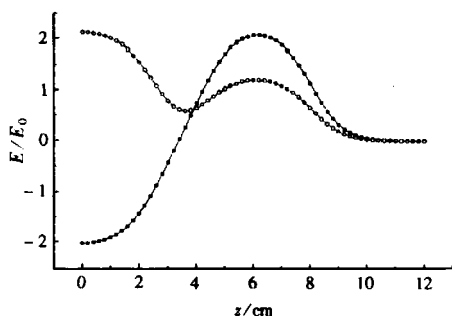


图 1 一个半微波腔体中轴向电场分布
■ π 模; ○ 0 模.

腔体设计成对称形,微波功率通过整腔馈入,再由大的轴向耦合孔到半腔,建立起 TM_{010} 型 π 模式驻波场. 为增大 RF 聚焦力、同时减低耦合孔口的峰值场强,设计中适当增加了半腔的长度. SUPERFISH 程序的计算结果如表 1. 轴向耦合孔壁上的最大场强与阴极面上的比为 1.03. 图 1 是微波腔中轴向的 π 模和 0 模电场分布,两者频率相差 3.46MHz.

表 1 微波电子枪腔体的主要参数

半腔长度	3.28cm	谐振频率	2856.02MHz
整腔长度	5.25cm	分路阻抗	55.3M Ω /m
腔内半径	4.2cm	品质因子	15404
盘片厚度	2.2cm	渡越因子	0.61
耦合孔径	2.5cm		

采用 POISSON 程序设计了一长 25cm、孔半径 4cm 的螺线管透镜,该螺线管放置在腔体电子束出口部位,如图 2 所示. 计算表明:最大电流为 200A 时,此螺线管能产生 3200Gs 的轴向磁场.

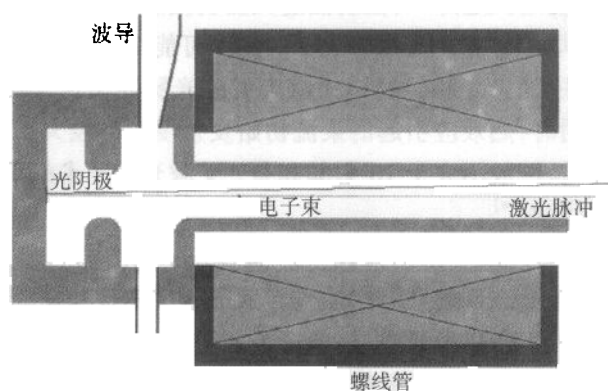


图 2 带有发射度补偿线圈的光阴极微波电子枪示意图

电子束从阴极发射经一个半腔加速和螺线管聚焦进入 2.5m 的漂移段,其整个粒子

动力学过程用 PARMELA 程序计算. 通过改变加速场梯度、注入相位、入射激光的半径和长度、聚焦螺线管的位置和磁场来优化束流的发射度、能量等参数. 由于变量多, 优化设计很复杂. 图 3 是微波腔中不同注入相位时束流能量的变化. 可见注入相位 20° — 35° 时, 束流在枪出口处的能量最大. 当激光束半径 1mm 、加速峰值场梯度 100MV/m 、聚焦螺线管磁场 2830Gs 、激光(电子束)注入相位 28° 、电子微脉冲电量 2nC 时, 发射度随纵向距离的变化关系如图 4. 由图 4 可知脉冲长度 5ps (rms) 时最小归一化发射度可为 $2.3\pi\cdot\text{mm}\cdot\text{mrad}$. 计算还表明: 本设计中, 非线性射频力对发射度的增长可以忽略; 当脉冲长度短时, 束团内电荷的不同分布对发射度有较大影响.

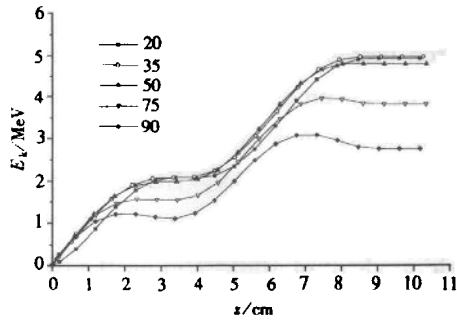


图 3 微波腔中不同注入相位时束流能量的变化

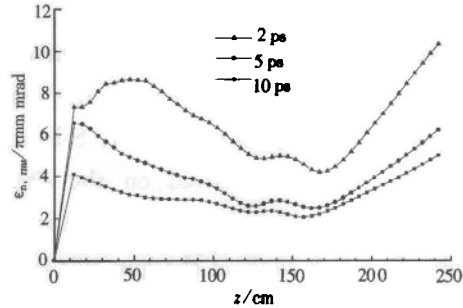


图 4 不同脉冲长度时横向发射度随纵向距离的变化

4 结语

本设计得到的电子束参数基本能满足 SDUV-FEL 的要求. 预加速管的位置、加速相位和梯度需要进一步设计以“冻结”发射度的增长. 同时要注意纵向发射度的增长. 整个注入器的设计将另作报道.

作者感谢谢家麟先生、庄杰佳研究员和上海核所赵小凤研究员对本工作的积极支持, 感谢 Jlab C. Sinclair 教授的邀请和帮助, 还要感谢 Jlab G. Krafft, B. Yunn, SLAC D. Palmer, LANL B. Carlsten 和 UCLA J. Rosenzweig 的有益的讨论以及 LANL J. Billen 提供的最新 POISSON/SUPERFISH 和 PARMELA 程序.

参考文献 (References)

- 1 Kim K J. Phys. Rev. Lett., 1986, **57**:1871
- 2 Hogan M et al. Phys. Rev. Lett., 1998, **80**:289
- 3 Batchelor K, Ben-zvi I, Fernow R et al. Proc. of EPAC, 1990. 541
- 4 Palmer D, Wang X, Miller R et al. Initial Commissioning Results of the Next Generation Photoinjector. In: Chattopadhyay S, McCullough J and Dahl P ed. Advanced Accelerator Concepts. New York: AIP Press, 1997. 695
- 5 Carlsten B. Nucl. Instr. & Meth., 1989, **A285**:313
- 6 Serafini L and Rosenzweig J. Phys. Rev., 1997, **E55**:7565

- 7 McDonald K. IEEE Trans. Electron Devices, 1988, **35**:2052
- 8 Kim K J. Nucl. Instr. & Meth., 1989, **A275**:201
- 9 Fry A R, Fitch M J, Melissinos A C et al. Nucl. Instr. & Meth., 1999, **A430**:180

Design Studies of a Photocathode RF Gun for Short-Wavelength FELs*

ZHAO Qiang¹⁾ LI Yong-Gui

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Low emittance and high intensity electron beams are needed for the high gain, short wavelength FELs. To meet the requirements of the proposed DUV FEL facility in Shanghai, we designed a 1.5-cell, S-band photocathode RF gun using the emittance compensation techniques. Based on the simulation codes of POISSON, SUPERFISH and PARMELA, this design aims at producing a beam of $\epsilon_{n,ms} = 2.3\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$, $Q = 2 \text{ nC/bunch}$, $E_k = 4.8 \text{ MeV}$ at the gun exit with the field gradient of 100 MV/m on the cathode. In this paper, we present the design considerations and the simulation results.

Key words RF gun, FEL, emittance compensation

Received 16 May 2000, Revised 2 August 2000

* Supported in part by K. C. Wong Education Foundation in Hong Kong, China Postdoctoral Science Foundation, SURF-Jlab in USA. and SDUV-FEL in SSRF

1) E-mail: zhaoq01@yahoo.com