

文章编号: 1001-4322(2002)03-0456-03

# 用于高平均功率 FEL 的 DC-SC 光阴极注入器\*

郝建奎, 全胜文, 向蓉, 朱凤

(北京大学 重离子物理研究所, 北京 100871)

**摘 要:** 为获得用于高平均功率自由电子激光(FEL)的高平均流强电子束,设计了一种新型的DC-SC光阴极注入器,并对其进行了优化设计和束流动力学研究。该注入器由皮尔斯直流引出结构、 $1+1/2$ 超导腔和同轴功率耦合系统组成,可以提供高品质、CW模式或高占空比的电子束。模拟和优化结果表明DC-SC光阴极注入器完全可以用于高平均功率自由电子激光。模型腔实验验证了理论模拟的可靠性。

**关键词:** 注入器; 超导腔; 自由电子激光

**中图分类号:** TL503; TN248.6 **文献标识码:** A

高平均功率自由电子激光(FEL)在科学研究中有着巨大应用价值。1999年7月,美国杰弗逊实验室率先实现了kW级平均功率红外自由电子激光(1.72kW)的输出<sup>[1]</sup>,到2001年8月,其平均功率达到了2.2kW<sup>[2]</sup>。而高平均功率FEL输出的前提是高平均流强的电子束<sup>[3]</sup>,这就要求注入器能够提供高品质的电子束,能量在2~3MeV,脉宽小于10ps,束团电荷约为60pC,束流发射度在小于 $10\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ,脉冲重复频率为几十MHz,平均流强在1~5mA左右。北京大学在直流光电子枪的基础上,设计出了一种适合高平均功率FEL的直流枪与超导腔结合的DC-SC光阴极注入器。

## 1 DC-SC 光阴极注入器设计方案

北京大学射频超导实验室对直流光电子枪进行的研究表明,当电子束能量不高时,空间电荷效应引起的束团拉长现象比较严重。要提高电子束能量就必须提高直流加速电压,并且还需要有聚束和预加速以保证电子束团品质,为得到高平均流强,聚束腔也需工作在连续波(CW)模式,这必然使得装置的规模比较大,且增添了许多难度。而目前的RF光阴极注入器大都工作在常温下,由于腔壁损耗过大,只能工作在脉冲模式,输出功率很小。要获得毫安量级的平均流强,注入器工作最好工作于CW模式,这正是超导腔的特点,因为超导腔腔壁损耗极小。国外已经有人进行了采用超导谐振腔作为高亮度注入器引出腔的研究<sup>[4,5]</sup>。用超导腔引出电子束关键在于解决超导腔与光阴极的相容性问题。

为解决以上问题,北京大学射频超导实验室设计了一种新型的DC-SC(直流-超导)光阴极注入器,其结构如图1所示。该注入器主要由皮尔斯电子枪、 $1+1/2$ 超导腔和同轴型主耦合器组成。该注入器把光阴极从超导腔中移出,置于皮尔斯枪的阴极上,激光打到光阴极上产生光电子,由皮尔斯电极引出后经超导腔加速,最终得到高品质的电子束。该注入器在径向有聚焦特性,此外,进入超导腔后,很高的加速场使电子束团获得能量的同时得到进一步的聚焦和聚束。由于光阴极到超导腔之间的距离很短,因而空间电荷效应引起的发射度增长不严重。射频功率的馈入采用同轴型主耦合器<sup>[6]</sup>,消除了非对称结构对电子束团品质的影响。

由以上可知,DC-SC光阴极注入器可工作于CW模式,提供高亮度、强流、低发射度的高品质电子束。

## 2 DC-SC 光阴极注入器的优化设计

### 2.1 超导腔型的优化

为研究DC-SC光阴极注入器的特性,用电磁场计算程序SUPERFISH和POISSON对整个注入器进行了优化设计。首腔腔型的优化设计非常关键,它直接关系到引出电子束的品质。为提高电子束品质,要求超导腔半腔底部中心场强( $E_m$ )应尽量的高,使得电子进入超导腔后能尽快加速到接近光速,以减小空间电荷效应对发射度的影响。由超导腔设计原理知<sup>[7]</sup>,要提高超导腔的加速梯度,需要尽可能的减小 $E_{\text{peak}}/E_{\text{in}}$ 和 $B_{\text{peak}}/E_{\text{in}}$ ,

\* 第六届全国激光科学技术青年学术交流会优秀论文。

收稿日期: 2001-11-15; 修订日期: 2002-02-21

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(19735004)

作者简介: 郝建奎(1972-),男,讲师,博士,主要从事加速器物理研究。

$E_{\text{peak}}$  和  $B_{\text{peak}}$  分别是峰值电场和峰值磁场。超导腔的工作频率选在 1.3GHz。超导腔的后壁有一 5 的倾角, 以减小光阴极和超导腔之间的距离, 同时使其在径向有聚焦效果。通过调节首腔的横向尺寸、长度和 Iris 半径, 得到不同的参数, 综合考虑谐振频率、峰值电场、磁场  $E_{\text{in}}$  以及  $E_{\text{peak}}/E_{\text{in}}$  和  $B_{\text{peak}}/E_{\text{in}}$  等因素, 得到了最后优化的参数, 首腔长度定为 57.7mm, Iris 半径为 34mm, 横向半径为 105mm。

## 2.2 皮尔斯引出结构的优化

把光阴极移出超导腔, 解决了光阴极与超导腔的相容性问题<sup>[8]</sup>: 避免了光阴极的介质损耗造成的 Q 值下降, 超导腔可以工作在很高的加速梯度及工作在 CW 模式; 可以有效的防止在高的阴极表面场下, 由于光阴极场致发射而引起的较大的暗电流; 直流段与超导腔之间较细的孔道使得从光阴极表面反射的激光不会打在超导腔壁上, 避免了由于超导腔内壁的光电发射引起的腔体失超。对皮尔斯引出结构进行优化设计时, 其中最重要的一个参数是阳极鼻锥顶角<sup>[9]</sup>, 它影响到发射度的大小以及聚焦的效果。阳极鼻锥顶角越小, 聚焦效果越强, 但光阴极到超导腔的距离将增大, 由于空间电荷效应引起的发射度增长就越大。综合考虑各参数得到的最优化结果是阳极鼻锥顶角为 65°; 直流加速间隙为 15mm, 引出高压为 70kV。

## 3 束流动力学模拟

为研究 DC-SC 光阴极注入器的束流动力学, 用程序 PARMELA 对束流传输特性进行了模拟。模拟计算的初始条件为: 束团半径为 3.0mm, 脉宽为 10ps, 电荷为 60pC, 初始发射度为 0.0mm·mrad, 超导腔轴向平均加速电场为 15MV/m。表 1 给出了模拟计算的初步结果。此时, 超导腔出口处电子束团的脉宽为 7.8ps。

表 1 超导腔出口处电子束团的品质

Table 1 Parameters of the output beam from the superconducting cavity

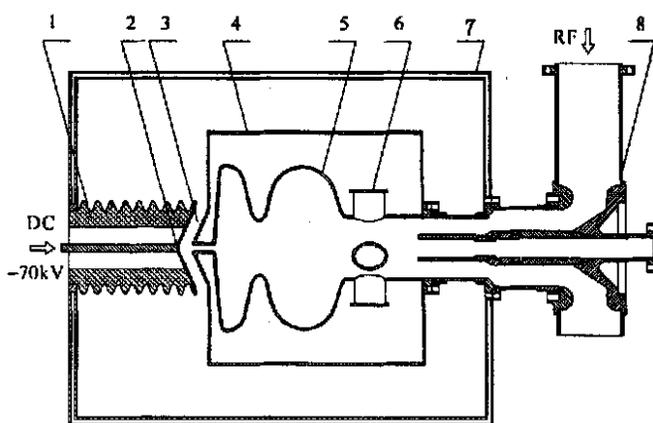
$E_k/\text{MeV}$	$R/\text{mm}$	$\Delta E_k/E_k(\text{mm/s})$	$\epsilon_x(90\%, n)/(\text{mm} \cdot \text{mrad})$	$\epsilon_y(90\%, n)/(\text{mm} \cdot \text{mrad})$	$\epsilon_z(90\%, n)/(\text{keV} \cdot \text{ps})$
2.42	2.8	2.6%	8.2	8.3	55

## 4 DC-SC 光阴极注入器模型腔实验

为进一步研究 DC-SC 光阴极注入器的性能, 加工了  $1+1/2$  模型腔, 对模型腔进行了性能测试。对  $1+1/2$  腔进行了谐振模式的测量, 得到了在基频时  $\pi/2$  模和  $\pi$  模谐振频率分别为 1.299GHz 和 1.318GHz。用小球微扰法对模型腔轴线电场分布进行了测量。测量线路如图 2 所示, 测量结果如图 3 和图 4 所示, 其中图 3 为程序计算得出的轴上场强分布, 图 4 为微扰法测得的轴上场强分布。可见实验结果与程序模拟结果相符合。

## 5 小结

本文对北京大学射频超导实验室的新型 DC-SC 光阴极注入器方案进行了计算分析和设计优化, 给出了有聚焦效果的超导腔腔型。为了得到 1~5mA 左右的电子束, 在脉冲重复频率为 81.25MHz (超导腔工作频率 130MHz 的 16 分频) 的情况下, 单个束团的电荷量不低于 60pC。根据这些条件, 用 PARMELA 进行了初步的束流动力学研究, 确定出了最优的皮尔斯引出结构阳极鼻锥顶角以及最优的超导腔同步相位, 从而证明了该注入器的设计方案是可行的。进行了模型腔实验, 验证了理论计算的可靠性。同时, 对该注入器整体结构的可行性做了分析, 对主耦合器进行了设计计算和实验验证。超导腔和恒温器的加工正在进行, 下一步要进行 DC-SC 的出束实验研究。



1. insulating ceramics; 2. photocathode; 3. Pierce-type extractor; 4. liquid nitrogen vessel; 5. superconductor cavity; 6. high order mode coupler; 7. liquid helium vessel; 8. co-axial main coupler

Fig. 1 Structure of DC-SC photocathode injector

图 1 DC-SC 光阴极注入器结构示意图

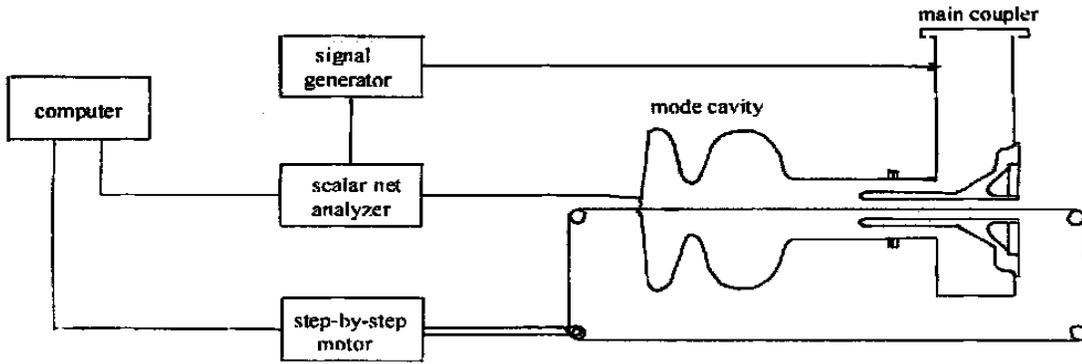


Fig. 2 Diagram electric field distribution measurement for along the axis of DC-SC resonant cavity

图2 DC-SC 谐振腔轴上电场分布测量线路图

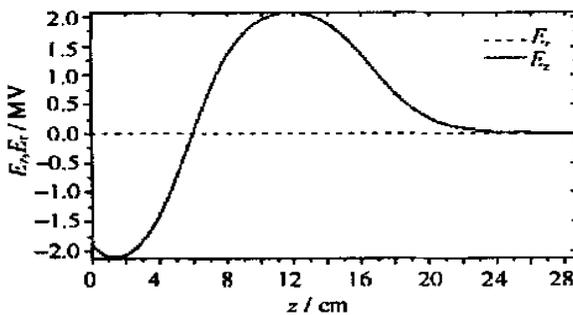


Fig. 3 Calculated electric field distribution along the axis by SUPERFISH

图3 SUPERFISH 计算得轴线上场强分布

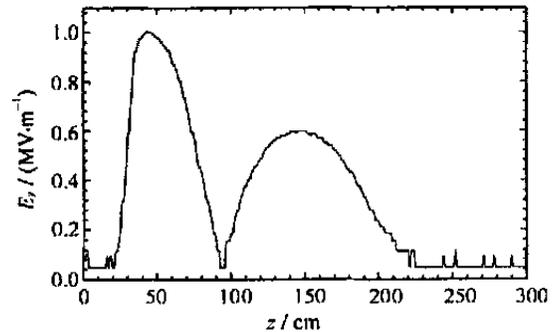


Fig. 4 Measured electric field distribution along the axis by perturbation method

图4 微扰法测得轴线上场强分布

## 参考文献

- [1] Neil G R, Bohn C L, Benson S V, et al Sustained kilowatt lasing in a free-electron laser with same-cell energy recovery[J], *Phys Rev Letter*, 2000, **84**(4): 662-665
- [2] Neil G R, et al Second Harmonic FEL Oscillation[A]. FEL 2001[C]. Darmstadt, FRG, 2001
- [3] Benson S, High power free-electron lasers[A], Proc of the PAC[C]. BNL, 1999. 212-216
- [4] Summary of Free-Electron Laser For Industry[R]. CEBAF, 1995, 12
- [5] Janssen D, et al The development of a superconducting RF gun: status of the drossel collaboration[A]. Proc of the PAC[C]. TRUMF, 1997. 2838-2839
- [6] 杨希, 赵夔, 郝建奎, 等. 同轴对称型主耦合器的研制[J]. 强激光与粒子束, **13**(1): 84-86 (Yang X, Zhao K, Hao J K, et al Design and manufacture of coaxial symmetric input coupler. *High power laser and particle beams* **13**(1): 84-86)
- [7] Strom D W. Review of low-beta superconducting structures[A]. Proceedings of the 6th workshop on RF superconductivity[C]. CEBAF, USA, 1993. 216
- [8] 杨希. 高亮度光阴极微波电子枪的设计及关键技术研究[D]. 北京: 北京大学重离子物理研究所, 2000 (Yang X. The design and research of the high brightness photocathode RF gun. Beijing: Key Laboratory of Heavy Ion Physics Peking University, 2000)
- [9] Zhao K, et al Design and construction of a DC high-brightness laser driven electron gun[J]. *Nucl Instr & Meth in Phys Res*. 1996, **A375**: 147-149

## DC-SC photocathode injector for high average power FEL

HAO Jian-kui, QUAN Sheng-wen, XIANG Rong, ZHU Feng

(MOE Key Laboratory of Heavy Ion Physics Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** To obtain high average current electron beams for high average power Free Electron Laser (FEL), a DC-SC photocathode injector is designed. It consists of DC extraction gap,  $1+1/2$  superconducting cavity and coaxial input system. High quality electron beams of CW mode or high duty factor can be obtained. The optimization of the injector and simulation of beam dynamics have been done. Model cavity experiments proved the correctness of the simulation.

**Key words** injector; superconducting cavity; FEL