

用于高平均功率自由电子激光器的 DC-RF 超导腔注入器*

胡岩乐 赵夔 陈佳洱 张保澄 郝建奎 王莉芳

(北京大学重离子所,北京大学技术物理系 北京 100871)

摘要 北京大学超导加速器实验室提出了新型 DC-RF 超导腔注入器的设计方案. 该注入器由皮尔斯引出结构、 $1 + 1/2$ 超导腔组成, 可以提供高品质的、CW 模式或高占空比(1%以上)的电子束. 对该注入器进行了分析计算和设计研究, 通过改变超导腔首腔腔形以增加聚焦效果, 采取措施缩短阴极到超导腔的距离, 从而有效地抑制束流发射度的增长. 用 PARMELA 对该注入器进行束流动力学研究, 以确定皮尔斯引出结构的形状以及超导腔的同步相位. 计算结果表明这种用于高平均功率自由电子激光的注入器的设计方案是可行的.

关键词 注入器 超导腔 高平均功率自由电子激光 皮尔斯引出结构

1 引言

高平均功率自由电子激光有着巨大的科学和应用价值. 1999年7月, Jefferson lab 用光阴极高亮度注入器和超导加速器获得了平均功率为 1.72kW 的输出^[1], 率先实现了千瓦级平均功率自由电子激光. 最近, 日本原子能研究所将自由电子激光的功率提高到了 2.34kW, 从而使这一技术朝应用方面又迈进了一步. 获得高平均功率输出的前提是高平均流强的电子束^[2], 这对注入器提出了严格的要求, 希望注入器能够提供能量在 2—3MeV, 脉宽小于 10ps, 束团电荷约为 60pC, 90% 归一化横向发射度在几个 $\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 脉冲重复频率为几十 MHz(超导腔的工作频率为 1300MHz), 平均流强在 5mA 左右的高品质电子束.

2 设计方案

北京大学超导加速器实验室在直流光电子枪上进行的大量实验研究表明, 由于电子束能量不高, 空间电荷效应引起的束团脉宽拉长现象比较严重. 如要提高直流引出高压,

2000-08-07 收稿

* 国家自然科学基金(19735004)资助

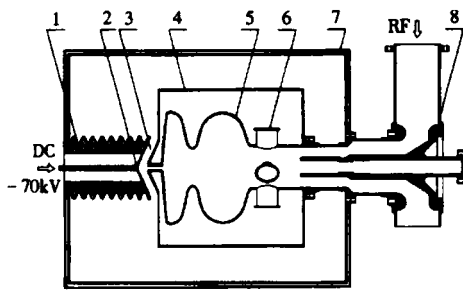


图 1 DC-RF 超导注入器结构示意图

1. 陶瓷绝缘; 2. 光阴极; 3. 皮尔斯引出结构;
4. LHe 容器; 5. 超导腔; 6. 3 个 HOM;
7. LN 容器; 8. 同轴型主耦合器。

装置建造规模过大,而且为保证注入器的束团品质,还需有聚束与预加速。如要求高平均流强,这段聚束腔也需工作在 CW 模式,因此超导腔是最好的选择。由此可以看出要对直流光电子枪做改进,工程量大、投入多,系统复杂性高。而目前建造的光阴极 RF 注入器则大部分都工作在常温下,由于腔壁损耗过大,只能工作在脉冲模式和比较小的功率输出。为了获得毫安量级的平均流强,注入器工作于 CW 模式是最好的选择。超导腔腔壁损耗极小,最大的特点是可工作于 CW 模式。采用超导谐振腔作为高亮度注入器的引出腔,国外已先后有几个

实验室进行研究^[3,4]。在实验过程中遇到了一些难点,其中超导腔与光阴极的相容性是最大的问题。

据上所述,我们提出了一种高平均流强、高亮度、可工作于 CW 模式、新型的 DC-RF 超导腔注入器。其结构如图 1 所示。该注入器由皮尔斯引出结构和 $1 + 1/2$ 超导 RF 腔组成。为了避开了光阴极与超导腔的相容性问题,将光阴极从超导腔中移出,置于皮尔斯引出结构的阴极上;同时对超导腔首腔进行优化,使其在径向有聚焦特性。由于从光阴极到超导腔之间的距离很短,因而电子束团通过该段时,空间电荷效应导致的发射度增长并不严重;当电子束团进入超导腔后,超导腔首腔的锥形后壁^[5]以及 RF 高梯度加速场自身的特性使得电子束团得到进一步的聚焦和聚束,从而得到高品质的电子束团。超导腔功率馈送则采用同轴耦合装置以消除超导腔非对称结构对电子束团品质的影响。

3 超导腔形的优化

在超导腔腔形的优化设计过程中,首腔腔形的设计是最为关键的一步。首腔腔形设计的物理要求是:超导腔半腔底部中心场强(E_{in})应尽量高,使得电子进入超导腔以后能尽快加速到接近光速,以减小非相对论情况下空间电荷效应对电子束发射度增长的影响。为了能够使超导腔工作于高的加速梯度,就必须使 E_{peak}/E_{in} 和 B_{peak}/E_{in} 要尽可能的小。

在首腔的设计中,为了减小从光阴极到超导腔之间的距离,可以将超导腔的后壁倾斜一定的角度(5°),使其后壁呈锥形,以配合皮尔斯引出结构的形状,减小光阴极到超导腔之间的距离。超导腔的锥形后壁改变了超导腔中的电场分布,使其在径向方向上有聚焦效果。首腔后的整腔尺寸基于 DESY 的设计报告^[6]。通过调节首腔的横向尺寸,可以改变超导腔的谐振频率和 E_{peak}/E_{in} 以及 B_{peak}/E_{in} ,改变首腔的长度,可以改变特定谐振频率处(1300MHz)的场形分布。而改变 Iris 的半径,则可以增强首腔的场强。其变化关系如表 1 所示:

表 1 超导腔特征参数与首腔横向尺寸的关系

首腔长度 (mm)	Iris 半径 (mm)	最大横向 半径(mm)	谐振频率 (MHz)	$E_{peak}/(MV/m)$	$B_{peak}/(A/m)$	$E_{in}/(MV/m)$	F_{peak}/E_{in}	B_{peak}/E_{in}
57.7	35	105.0	1302.76	2.523	4886.86	1.856	1.36	2.63
		106.0	1299.50	2.336	4130.16	1.170	2.00	3.53
57.7	34	104.8	1301.50	2.686	5316.73	2.043	1.31	2.60
		105.0	1300.08	2.489	4795.87	1.911	1.30	2.51
		105.3	1299.26	2.232	4206.93	1.593	1.40	2.64
58.7	35	105.5	1299.97	2.296	4035.07	1.293	1.77	3.12
		105.1	1301.17	2.238	4096.38	1.558	1.44	2.63
59.7	35	105.0	1300.62	2.250	3904.89	1.447	1.55	2.70
		105.2	1300.04	2.287	4009.37	1.318	1.74	3.04
58.7	34	105.5	1299.34	2.335	4139.50	1.147	2.04	3.61
		104.5	1301.60	2.723	5296.09	2.062	1.32	2.57
		104.8	1300.10	2.398	4605.06	1.777	1.35	2.60
		105.0	1299.29	2.198	4179.62	1.604	1.37	2.61

从上表可以看出,虽然改变首腔的长度可以改善其场形分布,但是总的而言,在谐振频率为 1300MHz 的时候,超导腔半腔底部中心场强 (E_{in}) 总是较弱,从而导致 E_{peak}/E_{in} 和 B_{peak}/E_{in} 值较大,不利于超导腔加速梯度的提高. 因此需要适当地改变 Iris 的半径,以提高 E_{in} . 综合考虑谐振频率,峰值电场、磁场, E_{in} 以及 E_{peak}/E_{in} 和 B_{peak}/E_{in} 等因素,我们将首腔长度定为 57.7mm, Iris 半径为 34mm, 横向半径为 105mm. 此时,谐振频率为 1300.08MHz. 优化后超导腔中的电场分布及轴线上的场强分布如下图 2 所示.

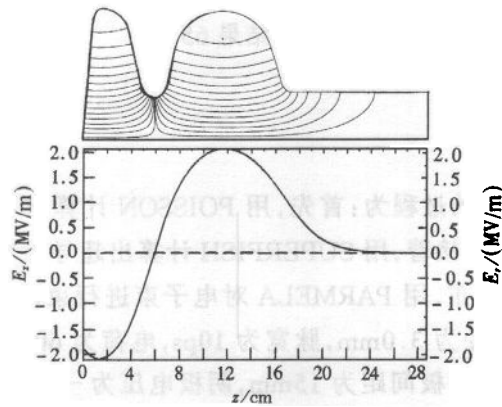


图 2 超导腔中的电场分布以及轴线上的场强分布
 - - - - E_r , — E_z .

4 皮尔斯引出结构形状确定

由于目前光阴极与超导腔的相容性仍是制约高亮度注入器发展的主要技术难题,因此,我们考虑将光阴极移出超导腔.这样做有以下几个优点^[7]:首先,由于光阴极不在超导腔内,避免了光阴极的介质损耗造成的 Q 值下降,所以超导腔可以工作在很高的加速梯度,并且可以工作在CW模式.其次,光阴极与超导腔的分离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.再者,由于直流段与超导腔之间有较细的孔道半径,所以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.而且,由于皮尔斯阴极与超导腔相接,从光阴极到超导腔之间的距离很短,因而,由于空间电荷效应引起的发射度增长仍在可接受的范围.

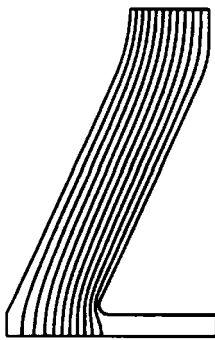


图3 皮尔斯引出结构中的电力线分布

将光阴极放在皮尔斯引出结构的阴极上,就需要对该引出结构进行优化.在优化的过程中,一个最重要的参数就是阳极鼻锥顶角^[8],该参数对发射度大小以及该引出结构的聚焦效果有直接的影响.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越大,由于空间电荷效应引起的发射度增长越大.此外,由于皮尔斯阴极引出结构与超导腔是相关联的,必须考虑两者的匹配问题.还有,引出结构阳极鼻锥顶角的改变将改变该引出结构的轴向尺寸,进而影响到电子束进入超导腔时的最优同步相位.鉴于此,就需要通过模拟计算同时定出阳极鼻锥顶角和超导腔最优同步相位.

皮尔斯引出结构阴极与阳极之间的间隙以及阴极上所加的负高压由实际工作经验决定.在这里,将间隙尺寸定为15mm,阴极上加70kV的负高压,这在实际的工作中是可以做到的.图3为皮尔斯引出结构中的电力线分布,其阳极鼻锥顶角采用优化后的结果 65° .

5 模拟计算

束流动力学模拟计算的过程为:首先,用POISSON计算出不同阳极鼻锥顶角下皮尔斯引出结构的电场分布;接着,用SUPERFISH计算出超导腔中的电场分布;然后,利用上述计算得到的场形分布,用PARMELA对电子束进行束流动力学模拟^[9].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 $0\text{mm}\cdot\text{mrad}$;皮尔斯引出结构阴、阳极间距为15mm,阴极电压为 -70kV ,阳极为地电位;超导腔轴向平均加速场为15MeV.表2给出了模拟计算的初步结果,其中阳极鼻锥顶角采用 65° ,超导腔同步相位采用 -50° ,均为最优值.此时,超导腔出口处电子束团的脉宽为7.8ps.

表 2 超导腔出口处电子束团的品质

E_k/MeV	R/mm	$(\Delta E_k/E_k)$	$\epsilon_x(90\%, n)$	$\epsilon_y(90\%, n)$	$\epsilon_z(90\%, n)$
		$/(\text{rms})(\%)$	$/(\text{cm}\cdot\text{mrad})$	$/(\text{cm}\cdot\text{mrad})$	$/(\text{keV}\cdot\text{ps})$
2.42564	2.8	2.63	0.8249	0.8332	55.223

6 总结

本文对北京大学超导加速器实验室的新型 DC-RF 超导腔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形.为了得到 5mA 左右的电子束,在脉冲重复频率为 81.25MHz(超导腔工作频率 1300MHz 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,得到了发射度小于 $3\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 的高品质电子束团,从而证明了该注入器的设计方案是可行的.

在此同时,北京大学超导加速器实验室对该注入器的整体结构的可行性做了分析.对关键部分——皮尔斯阴极与超导腔相连结构做了精细设计,对主耦合器进行了设计计算和实验验证.这两部分结构均需考虑从液氮温度到室温的变化,有较大的难度.目前模型腔实验已开始进行.

参考文献(References)

- 1 Neil G R, Bohn C L, Benson S V et al. Phys. Rev. Lett., 2000, 84(4):662—665
- 2 Benson S. High Power Free-Electron Lasers. In: Proc. of the PAC. BNL, 1999, 212—216
- 3 Summary of Free-Electron Laser for Industry. CEBAF, 1995, Vol. 2
- 4 Janssen D, Stein P vom, Bushuev A et al. The Development of a Superconducting RF Gun. In: Proc. of the PAC. TRIUMF, 1997, 2838—2839
- 5 Volkov V, Karliner M, Petrov V et al. Beam Dynamics in RF-Gun Cavity with a Modified First Cell. In: Proc. of the PAC. TRIUMF, 1997, 2796—2978
- 6 Edwards D. Tesla Test Facility-Design Report. Hamburg: DESY, 1995
- 7 YANG Xi. Design and Critical Technique Researches on High Brightness Photocathode RF Gun. Thesis of M S Degree in Peking University. 2000(in Chinese)
(杨希. 高亮度光阴极微波电子枪的设计及关键技术研究硕士研究生学位论文. 2000)
- 8 ZHAO K, GENG R L, WANG L F et al. Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Res., 1996, A375:147—149
- 9 James H Billen. PARMELA Documentation. LANL, 1997

Design of a New DC-RF Injector Used in High Average Power FEL

HU Yan-Le ZHAO Kui CHEN Jia-Er ZHANG Bao-Cheng
HAO Jian-Kui WANG Li-Fang

(*Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract Here we give the design proposal of a new DC-RF injector used in high average power FEL. The injector includes a Pierce gun and a $1 + 1/2$ SC cavity. It will be able to provide high average beam current because it can work in CW mode. By changing the shape of the first $1/2$ cell of SC cavity to enforce the focusing effect, we can decrease the distance between photocathode and SC cavity. Thus, the growth of emittance can be suppressed effectively. Through the simulation of particle dynamics with PARMELA, the shape of Pierce gun and the optimized synchronous phase of the SC cavity can be decided. The simulation results show that this kind of injector is feasible.

Key words injector, SC cavity, high average power FEL, Pierce gun

Received 7 August 2000

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19735004)