

X 波段盘圈加速结构热阴极微波电子枪的研究

胡源 唐传祥¹⁾ 陈怀璧 童德春 林郁正

(清华大学工程物理系 北京 100084)

摘要 介绍了采用盘圈(DAW)加速结构在 11.43GHz 下研制的热阴极微波电子枪注入器,分析了注入器中 DAW 加速结构支撑杆对于微波特性的影响以及加速结构中的模式重叠问题.针对该结构的强腔间耦合以及次临近耦合不能忽略的特点,对其调谐方法进行了分析研究.给出了该长腔链热阴极微波电子枪注入器的物理设计及粒子动力学计算结果,电子能量为 5—6MeV,脉冲流强为 40mA,电子束发射度为 $3.4\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$.该微波电子枪的加工焊接已经完成,文中给出了其冷测结果.

关键词 盘圈(DAW)加速结构 热阴极微波电子枪 X 波段 腔间耦合

1 引言

DAW 加速结构是一种腔间耦合很强的双周期加速结构,它于 1972 年被前苏联人 V. G. Andreev 提出^[1].由于这种结构具有加工公差要求松,品质因数和分流阻抗高等特点,国际上有很多机构都曾经展开对它的研究^[2-4],日本和俄罗斯将这种结构进行了实际应用研究^[5,6].但是这种结构存在支撑杆和模式重叠的问题,因此进入 90 年代后,对这种结构的研究逐渐减少.

该微波电子枪将作为美国阿贡国家实验室(ANL)的介质慢波加速结构(DLA)研究的电子注入器.它与 DLA 加速结构使用同一个功率源(美国海军实验室(NRL)的 Magnicon^[7]),通过一个功率分配系统在两者之间分配功率.根据 DLA 实验的需要以及功率源的特点,对该电子注入器提出了以下设计要求:

电子出射能量: 5—6MeV;
束流脉冲宽度: 200 ns;
重复频率: 10Hz;
束流强度: 40mA;

工作频率: 11.430 GHz.

根据功率源的频率稳定性及频率调节范围,电子枪的有载品质因数 Q_L 要求小于 2000.

2 支撑杆及模式重叠问题

该电子枪中使用的 X 波段 DAW 加速结构如图 1 所示.该结构中的支撑杆用于支撑金属盘片,同时也用于传导出金属盘片上产生的热量.加上支撑杆后,加速模的品质因数和分流阻抗会有大幅度下降(见表 1).

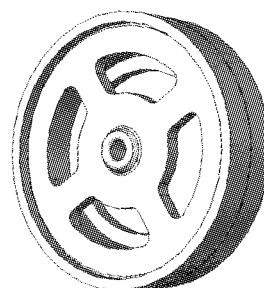


图 1 微波电子枪中采用的 X 波段 DAW 加速结构

2004-10-29 收稿

1) E-mail: tang.xuh@mail.tsinghua.edu.cn

表 1 给出了通过模拟计算得到的径向支撑杆对加速模类 TM02 模与耦合模式 TM01 模的谐振频率、品质因数以及有效分流阻抗的影响. 由于支撑杆处在类 TM02- π 模电力线与支撑杆表面平行的位置, 所以对类 TM02- π 模谐振频率的影响更大.

表 1 支撑杆对加速模与耦合模的影响

耦合模类 TM01- π 模			
	频率/GHz	品质因数 Q	$ZT^2/(M\Omega/m)$
无支撑杆	10.870	13396.9	0.024
有支撑杆	11.540	7768.0	0.016
加速模类 TM02- π 模			
	频率/GHz	品质因数 Q	$ZT^2/(M\Omega/m)$
无支撑杆	10.370	15205.3	192.3
有支撑杆	11.319	10484.6	103.5

该微波电子枪的束流崩溃问题主要来源于 DAW 加速结构的模式重叠问题. 在该加速结构中对束流动力学稳定性影响最大的是类 TM11 模, 这种模式的色散曲线如果通过工作频率点^[8], 会在 DAW 加速结构中直接激励起 TM11 模式, 支撑杆会对这种模式进行扰动, 改变它的色散曲线位置. 表 2 给出了通过模拟计算得到的径向支撑杆对 TM11-0 模和 TM11- π 模谐振频率、品质因数和纵向分流阻抗的影响.

表 2 径向支撑杆对 TM11 模的影响

TM11-0 模			
	频率/GHz	品质因数 Q	纵向分流阻抗 $Z_{//}/(M\Omega/m)$
无支撑杆	9.616	12606.8	931.8
有支撑杆	9.774	10058.6	521.8
TM11- π 模			
	频率/GHz	品质因数 Q	纵向分流阻抗 $Z_{//}/(M\Omega/m)$
无支撑杆	14.488	18174.6	2006.6
有支撑杆	7.967	6803.4	299.8

无支撑杆时, TM11-0 和 TM11- π 模分别在工作频率 11.430GHz 的两边, TM11 的色散曲线通过工作频率点. 加上支撑杆后, 两者都低于工作频率, TM11 的色散曲线被调离工作频率点. 同时, 再加上支撑杆后, 类 TM11 模的品质因数和横向分流阻抗也有大幅度下降, 这使得加速结构中束流崩溃的阈值电流提高^[9], 加速结构所能承受的束流强度加大.

3 调谐方法研究

由于 DAW 加速结构具有腔间耦合强, 次临近

耦合不能忽略的特点, 因此对该结构进行调谐时与普通加速结构有所不同.

对 DAW 加速结构采用串联并联混合等效电路, 使用串联电路等效加速腔, 并联电路等效耦合腔, 可以得到无损情况下的色散曲线方程为

$$k_0^2 \frac{1 - k_2 \sin^2 \frac{1}{2} \theta}{1 + k_2} = \left(1 - \frac{k_0^2}{1 + k_2} + k_1 \cos \theta - \frac{\omega_1^2}{\omega^2} \right) \times \left(\frac{\omega^2}{\omega_2^2} (1 - k_2^2) - 1 - k_2 \cos \theta \right), \quad (1)$$

式中 k_0 是加速腔与耦合腔之间的临近耦合系数, k_1 是加速腔之间的次临近耦合系数, k_2 是耦合腔之间的次临近耦合系数, θ 是两个加速腔或者两个耦合腔之间的相移.

图 2 给出了对热阴极微波电子枪注入器光速段的 DAW 加速结构测量得到的色散曲线.

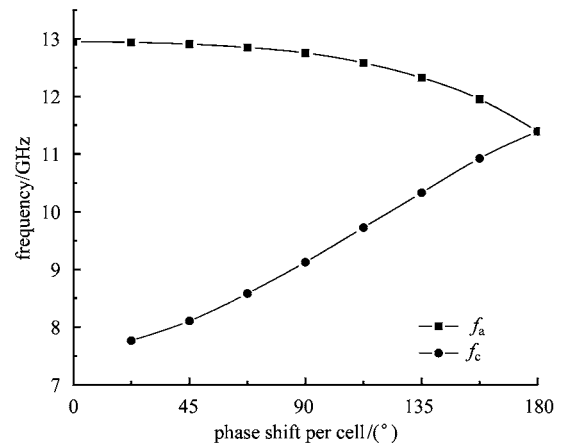


图 2 热阴极微波电子枪注入器光速段色散曲线

将各色散模式频率及相应的相移代入式(1), 通过最小二乘法得到该 X 波段 DAW 加速结构的耦合系数 $k_0 = 53.03\%$, $k_1 = -7.99\%$, $k_3 = 18.61\%$. DAW 加速结构的耦合系数远远大于其他驻波加速结构, 同时其次临近耦合也不能忽略.

普通加速结构在对腔链中单独一个腔体进行测量时, 一般采用使腔链中其他腔体失谐的方法. 这相当于对其他腔体进行强烈的扰动, 必然会使耦合孔处的射频场分布发生变化. 对于一般加速结构而言, 耦合孔较小, 耦合孔处的变化不会对待测腔体的微波参量有大的影响. 对于 DAW 加速结构而言, 耦合孔处的变化可以看作是是整个腔体的边界发生变化, 不能忽略, 此时测量得到的是边界变化后的腔体的微波参量.

对该 X 波段 DAW 加速结构进行调谐时, 采用的是改变腔链中腔体单元个数的方法. 根据 DAW

加速结构中各模式可以被激励时需要满足的边界条件,对该结构测量加速模式和耦合模式频率时使用的腔体单元如图 3 所示.使用耦合模式测量单元组成的腔链两端为整腔,使用加速模式测量单元组成的腔链两端为半腔.

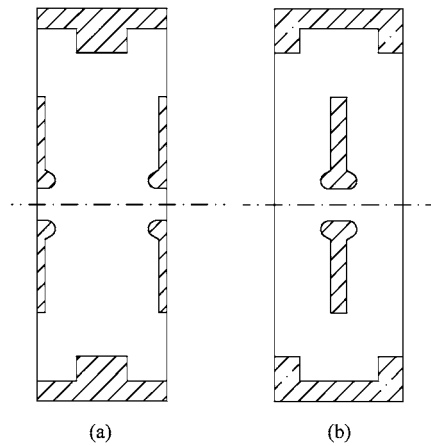


图 3 测量 DAW 加速结构时采用的腔体单元
(a)耦合模式测量单元;(b)加速模式测量单元.

忽略加工误差,设腔链中所有测量单元真实谐振频率都为 f_0 ,测量时使用的探针或耦合环对加速单元的扰动为 Δf ,可以得到测量频率 f 、真实谐振频率 f_0 与腔体中测量单元个数 n 的关系为

$$f = f_0 + \Delta f/n, \quad (2)$$

改变腔链中测量单元的个数,得到相应的测量频率,代入式(2)进行拟和可以消除扰动 Δf ,得到真实谐振频率 f_0 .图 4 为对类 TM01- π 模和类 TM02- π 模测量谐振频率时,测量频率随测量单元个数变化的情况.

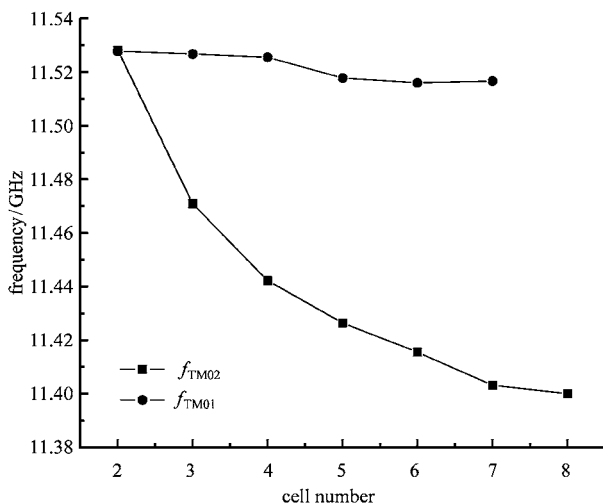


图 4 改变测量单元个数时的测量频率

对 TM02 模的测量频率及对应的测量单元个数代入(2)式拟合,可以得到此时 TM02- π 模的谐振频率为 11.3568GHz.对 TM01- π 模测量时使用的是耦合环,位置在腔体边缘,对腔体扰动较小.当腔链中测量单元个数为 6 和 7 时,测量频率之间的差别已小于测量误差,因此直接使用最后一次测量得到的频率作为真实谐振频率.

4 物理设计及动力学计算

热阴极微波电子枪注入器由阴极杆、X 波段 DAW 结构加速结构以及后面的四极透镜组组成.

微波电子枪中采用 LaB₆ 阴极.由 3 个四极磁透镜组成的聚焦系统用来调节输出电子束的相空间分布.

电子枪由 24 个腔体组成,前 5 个腔为聚束段,首腔是一个 $\beta = 0.5$ 的半腔,后面跟着两个 $\beta = 0.6$ 的腔体和两个 $\beta = 0.9$ 的腔体.耦合器在最后一个腔上,是一个变形的整腔.相邻腔体的支撑杆交错排列,以减小次临近耦合.

经过优化设计以及与实际测量的对照,得到热阴极微波电子枪轴线上的轴向电场如图 5(a)所示,实际测量得到的轴向电场如图 5(b)所示.

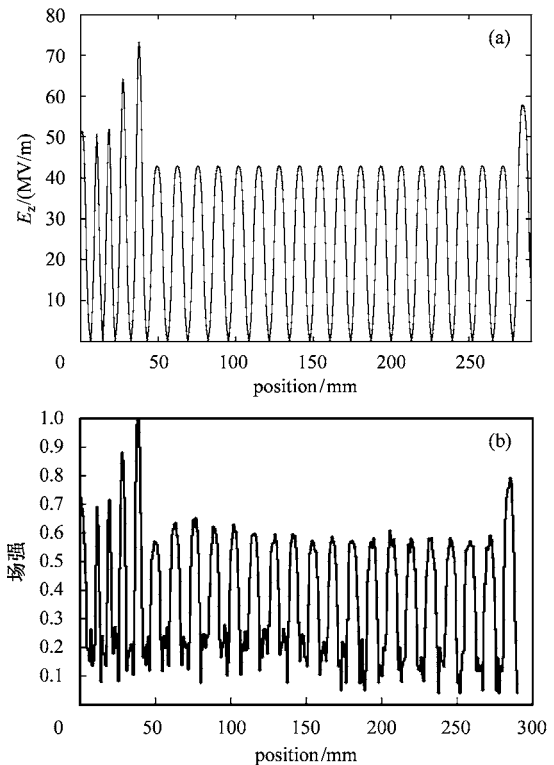


图 5 (a)动力学设计轴向电场;(b)实际测量得到轴向电场

图中聚束段在前,耦合器在后.由于DAW加速结构的腔间耦合系数非常大,使得对聚束段场强的调节很困难,同时聚束段的腔长小,鼻锥之间距离短,使得聚束段场强高于光速段.计算得到在微波加速的半个周期中发射的电子有20%能被俘获,当出射束流强度为40mA时,平均反轰功率为0.0564W.

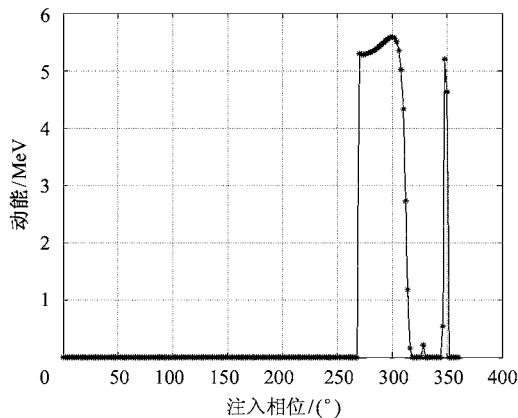


图6 出射粒子能谱

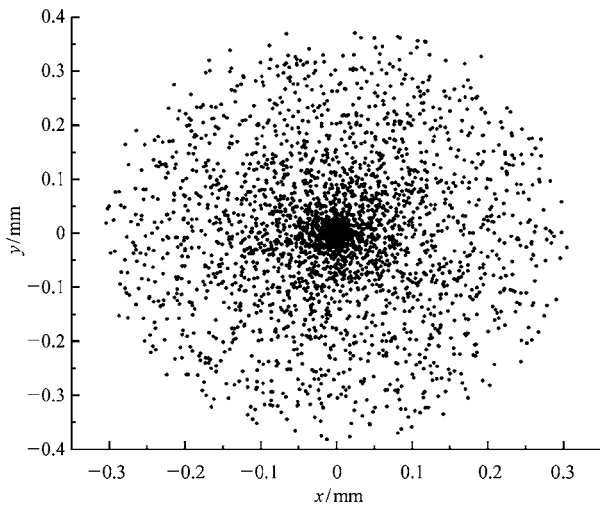


图7 注入器出口处电子束斑

模拟计算得到在图5(a)所示场分布下,粒子出射能量与入射相位的关系如图6所示,电子的出射能量在5.3—5.6MeV,达到设计要求.

在微波电子枪注入器出口处的电子束斑形状如图7所示,电子在微波电子枪注入器出口处的归一化发射度为 $3.4\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$.

5 冷测结果

对微波电子枪中DAW结构光速段测量得到的色散曲线如图2所示,轴线上的轴向场分布如图5(b)所示.

焊接后对微波电子枪的测量结果为:工作模式的谐振频率为11.4295GHz,耦合度为8.5,加速管内部品质因数 Q_0 为9500,得到有载品质因数 Q_L 为1000,达到设计要求.加速管所需馈入功率为1.9MW.

由于功率源的脉冲长度仅为 $1\mu\text{s}$,因此需要考虑微波电子枪中的建场时间.驻波加速管的建成时间因子 $t_F = 2Q_L/\omega$,把测量得到的 Q_L 与谐振频率代入可以得到 t_F 为28ns.因此加速管在功率源的脉冲范围内有充足的时间建立稳定的射频场.

6 结论

注入器中由于DAW加速结构的模式重叠引起的束流崩溃问题由于支撑杆的影响得到解决.由于该加速结构的强腔间耦合的特点,对该注入器的调谐方法与一般加速结构有所不同.

对于热阴极微波电子枪注入器的设计、调谐以及冷测都已完成,测量结果符合设计要求.

参考文献 (References)

- 1 Andreev V G et al. Study of High-Energy Proton Linac Structure. Proc. of 1972 Proton Linac Conf, 1972. 114
- 2 Inagaki S et al. Development of Disk-and-Washer in KEK. IEEE Trans. on Nuclear Science, 1983, **NS-30**: 3592
- 3 Moretti A et al. An 805MHz Disk and Washer Structure for the Fermilab Linac Upgrade. Feimilab-Conf-88/145, October
- 4 Schriber S O. High Beta Linac Structure. Proc. of LINAC'79, Montauk, September 1979
- 5 Nezhevenko O A et al. Electron Preinjector for SIBERIA-2 SR Source. Proc. of PAC'91, 1991, 3186—3188
- 6 Shigemi Inagaki. Disk-and-Washer Cavities for an Accelerator. N.I.M. in Physics Research A, 1986, **251**: 417—436
- 7 Nezhevenko O A et al. Performance of X-Band Pulsed Magnicon Amplifier. Proc. of PAC'03. 1128—1130
- 8 HU Yuan et al. HEP & NP, 2001, **25**(9): 914—919 (in Chinese) (胡源等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(9): 914—919)
- 9 Wangler T P. Principle of RF Linear Accelerators. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998

Research of Multi-Cell Thermionic RF Gun Injector Based on X-band DAW Accelerating Structure

HU Yuan TANG Chuan-Xiang¹⁾ CHEN Huai-Bi TONG De-Chun LIN Yu-Zheng
(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A multi-cell thermionic RF gun injector based on X-band(11.43GHz) Disk-and-Washer(DAW) accelerating structure has been developed. The influence to the RF characteristic of the washer supports and the mode overlap problem of DAW structure are analysed in this paper. Because DAW accelerating structure has a large coupling coefficient and the next nearest neighbour coupling can't be ignored, a special tuning method was developed. The results of dynamic simulation of this injector are given. Simulation shows the gun can accelerate electron beams of 40mA to 5—6MeV, with an emittance of $3.4\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$. Manufacture and brazing of the RF gun have been finished, and the cold test results of it are also presented.

Key words Disk-and-Washer(DAW), thermionic RF gun, X-band, coupling between cavities