

低反轰高梯度驻波加速管的研究

顾本广 林小奇

(北京医疗器械研究所, 北京 100011)

摘要 高梯度驻波加速管常伴有电子反轰现象, 引起电子枪阴极过热及发射不稳定。介绍了在一个6MeV驻波加速管中开展降低反轰和提高加速梯度的设计和试验研究, 并分析了驻波加速管的电子反轰与磁控管及热阴极微波电子枪的不同。

关键词 电子反轰 加速梯度 驻波加速管

ABSTRACT The electron back bombardment phenomenon in high accelerating gradient standing wave linear accelerators has been analysed in comparison with that in magnetrons and microwave thermionic guns. The methods of lowering the electron back bombardment power on the electron gun cathode and simultaneously increasing the accelerating gradient along the accelerating structure are introduced.

KEY WORDS standing wave linear accelerator, high accelerating gradient, electron back bombardment.

0 引言

在超高频电真空器件中, 磁控管存在电子反轰现象是远从1938年即已知晓的事实^[1], 同样可视为超高频电真空器件的高梯度驻波加速管也存在电子反轰现象则是到1982年才为我们所注意到^[2, 3], 在热阴极微波电子枪中电子反轰亦是一个重要问题^[4]。

需要指出的是驻波加速管的电子反轰现象和磁控管及热阴极微波电子枪有所不同, 主要表现在以下几点: (1) 驻波加速管电子枪阴极与阳极间只有脉冲直流电场。磁控管阴极与阳极间除直流电场外还有直流磁场和高频场(阴极表面没有高频场)。热阴极微波电子枪没有直流电场和磁场, 但阴极处于高频场直接作用之下。(2) 驻波加速管的反轰电子能量较高, 主要是产生热电子发射效应。磁控管的电子反轰能量较低, 主要是产生次级电子发射效应, 其工作也主要靠次级电子发射而不是靠热电子发射维持^[5]。热阴极微波电子枪的发射在电子反轰作用下还受到肖特基效应的影响。

由上分析, 驻波加速管电子反轰主要引起电子枪阴极温度升高及发射电流增长, 阴极温度升高的程度和反轰功率的大小及阴极传热状况有关; 发射电流增长的程度和反轰功率的大小及电子枪的工作区域有关。当电子枪工作于空间电荷限制区域时, 阴极温度的变化对发射电流的影响比较小, 因而电子反轰引起的发射电流增长表现不明显, 但电子反轰引起的阴极温度升高会缩短阴极的寿命。当电子枪工作于温度限制区域时, 除了阴极温度升高会缩短阴极寿命外, 阴极温度的变化对发射电流的影响比较大, 因而电子反轰引起的发射电流增长比较明显, 同时发射电流随阴极温度变化的波动也比较大。

1995年10月13日收到原稿, 1996年8月26日收到修改稿。

驻波加速管所用电子枪一般都工作于空间电荷限制区域, 不过我们可以利用温度限制区域对电子反轰比较敏感这一特点, 在需要时调整到温度限制区域来检验电子反轰的影响。

驻波加速管的另一个问题是提高加速结构单位长度上的加速能量即加速梯度, 因为在许多应用情况下, 加速管的安装空间受到限制, 提高加速梯度可以在有限的长度上获得更高的能量, 但是这一问题与前一问题是有联系的, 因为电子反轰正是在高梯度驻波加速管中才表现明显。

电子反轰对驻波加速管是一种有害而又难以完全消除的现象, 我们的目标是在有限的加速结构长度上, 尽可能地提高加速梯度以获取较高的能量, 同时使电子反轰降低到最小的程度。

1 降低电子反轰的措施

驻波加速管电子反轰主要发生于注入阶段, 其中大部分发生于首腔之中。根据分析, 在诸多影响电子反轰的因素中, 能有效地降低电子反轰的并不多, 影响较大的是首腔的加速电场幅值和俘获系数, 和后续加速腔内加速电场关系不大, 因此可以采取下列措施:

a. 缩短首腔长度

在分析纵向运动对电子反轰的影响时^[2], 可以看出, 缩短首腔长度可以提高俘获系数, 降低反轰系数。

在原来的 6MeV 驻波加速管中^[6], 采用了 6 个加速腔, 其中首腔为半腔, 其余为整腔, 各加速腔形状尺寸一致, 首腔长度为 $(1/4)\lambda$, λ 为工作波长。本设计研究中将首腔长度缩短到 $(1/5)\lambda$ 左右, 首腔形状尺寸与后续各加速腔不同。

b. 降低首腔加速电场

在分析纵向运动对电子反轰的影响时, 还可以看出, 降低首腔加速电场幅值可以明显地降低反轰系数, 但所得正向能量相应地也会明显降低, 因此降低首腔内加速电场幅值的程度由阴极所能承受的反轰功率及允许的能量损失综合决定。本设计研究中将首腔加速电场幅值降低到原来的 $1/2$ 左右。

2 提高加速梯度的措施

在采取了以上降低反轰措施以后, 为了保持整管的加速梯度要求, 必须提高后续加速腔的加速电场幅值, 补偿由于降低首腔加速电场幅值带来的能量损失。同时要求加速腔内金属表面最大电场 E_p 不超过击穿允许值。提高后续加速腔内加速电场的措施主要有:

a. 在不增加馈入功率的前提下, 通过改进腔形设计, 进一步提高后续加速腔的有效分路阻抗, 以获得较高的加速电场。改进后理论分路阻抗达 $169.5\text{M}\Omega/\text{m}$, 理论有效分路阻抗达 $118.9\text{M}\Omega/\text{m}$ 。

b. 缩小各腔之间的耦合孔面积, 减少由于耦合孔引起的实际有效分路阻抗的降低。使加速腔与耦合腔之间的耦合系数 k 降到 0.01 左右, 而以往一般短驻波加速管的腔间耦合系数取在 $0.02 \sim 0.03$ 之间。

3 束流动力学计算结果

在考虑横向运动对电子反轰影响的前提下, 反轰功率可用下面的公式计算^[3].

$$P_c = \frac{i_A}{2\pi e k_A} \int_{\Delta\varphi_B} F\left(\frac{R_c}{R_B(\varphi_0)}\right) W(\varphi_0) d\varphi_0 \quad (1)$$

式中 i_A 为平均加速电流, e 为电子电荷, k_A 为俘获率, R_c 为注入束流孔道半径, R_B 为反向束流包络半径, W 为阴极表面处反轰电子的能量 (eV), φ_0 为注入相位, $\Delta\varphi_B$ 为反轰电子相位范围,

$$F(x) = \begin{cases} 1 & (\text{当 } x \geq 1) \\ x^2 & (\text{当 } x < 1) \end{cases}$$

计算结果表明: 在加速管入口功率为 2.2MW, 平均加速流强为 100 μ A 时, 计算平均反轰功率为 8.36W; 而在相同输入和负载条件下, 改进设计前的计算反轰功率为 15.18W.

图 1 表示可以通过束流孔道加速到底的电子的加速能量与注入相位的关系, 其中高于 6MeV 的注入相位范围约占 95°, 最大反轰能量为 275keV.

图 2 表示不同注入相位下的相轨道曲线。图 3 表示不同注入相位下的束流包络曲线。可以看出, 当采用负注入角以会聚的束流注入加速腔时, 反轰电子的包络是发散的, 有利于减少直接轰向阴极表面的电流。图 4 表示反轰电子能量与反轰包络半径的关系。可以看出, 高能量的反轰电子集中于包络半径较小的范围, 这意味着反轰功率集中于阴极中心区。

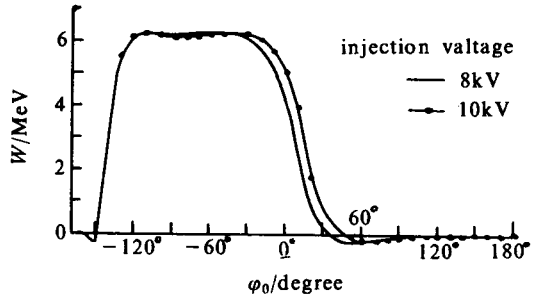


Fig.1 Output energy vs injection phase

图 1 输出能量与注入相位的关系

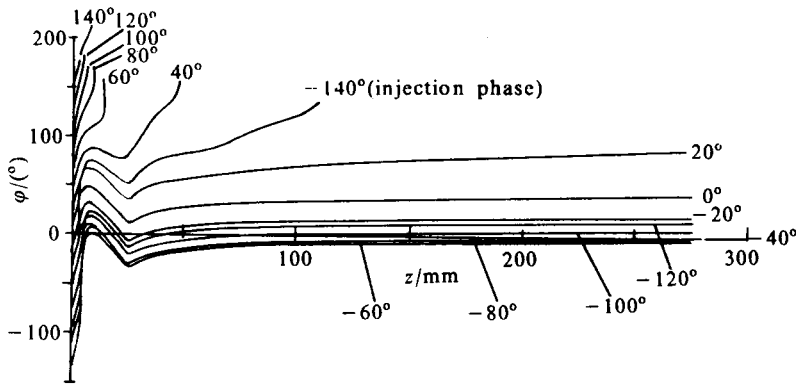


Fig.2 Phase trajectory curves

图 2 相轨道曲线

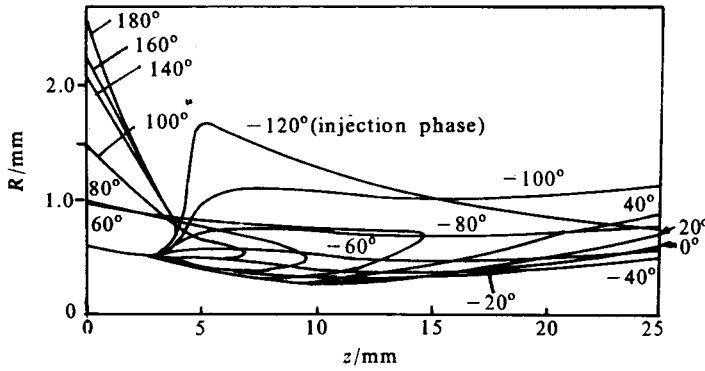


Fig. 3 Beam envelop curves
图 3 束流包络曲线

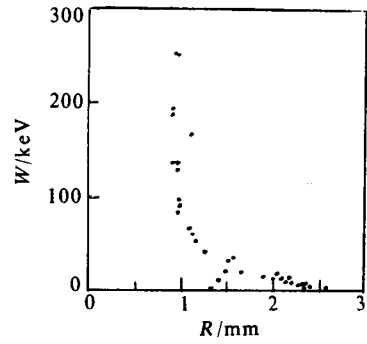


Fig. 4 Energy of back bombardment electron vs envelop radii
图 4 反轰电子能量与反轰包络半径的关系

4 RF 冷测调试结果

4.1 首腔场强的调整与测量

对于首腔为半腔(形状与后续主加速腔不同), 工作于 $\pi/2$ 模式的耦合腔链, 其后续主加速腔与首腔中加速电场幅值的比值为:

$$E_2/E_0 = -\sqrt{L_0/L_2} (k_{01}/k_{12} + 2/k_{01}k_{12}Q_0Q_1) \quad (2)$$

从首腔起各腔的编号顺序为 0, 1, 2, ..., 式中 L_0 和 L_2 分别代表首腔和后续主加速腔的等效电感, k_{01} 和 k_{12} 分别代表首腔与边耦合腔及边耦合腔与主加速腔之间的耦合系数, Q_0 和 Q_1 分别代表首腔和边耦合腔的品质因素。一般有 $L_0 \approx L_2$, 并且有 $2/k_{01}k_{12}Q_0Q_1 \ll k_{01}/k_{12}$, 所以有

$$|E_2/E_0| \approx k_{01}/k_{12} \quad (3)$$

如果各腔间的耦合系数相同, 即 $k_{01} = k_{12} = \dots$, 则首腔和后续主加速腔的加速电场幅值接近相等, 显然这样过高的首腔电场对电子反轰是不利的。

为了达到降低首腔内电场幅值的目的, 需适当调整腔间的耦合系数, 改变 k_{01}/k_{12} 的比值。在我们的情况下, $k_{12} = 0.01$ 左右, 如果想使 $E_0 = (1/2)E_2$, 就必须使 $k_{01} = 0.02$ 左右。图 5 表示经过调整后的加速管中心轴线上的电场分布曲线。

4.2 色散特性的测量

对于总数为 N , 首腔为半腔, 尾腔为整腔的耦合腔链, 由于首尾非对称性, 不能视为无限长周期腔链的一部分, 但由于首腔端板的镜象对称效应, 可以将它视为 $2N-1$ 个首尾均为整腔构成的腔链的一半, 而这样首尾对称的耦合腔链是可以视为无限长周期腔链的一部分的。

在忽略次邻近耦合并假设加速腔与耦合腔频率相等的条件下, 色散方程近似为:

$$\omega = \omega_0 / \sqrt{1 + k \cos(n\pi/2N)}, \quad n = 1, 3, \dots, N, N+2, \dots, 2N-1 \quad (4)$$

$\pi/2$ 模附近的模式间隔近似为:

$$\Delta f = k\pi / 2N \tag{5}$$

图 6 表示测量所得色散曲线, 最边缘两个由于讯号太弱未被记录。实际测量得 $\pi/2$ 模 $f_0=2995.46\text{MHz}$, 相邻两峰频率分别为 2990.460MHz , 3000.430MHz , 模式间隔 $\Delta f=5\text{MHz}$ 左右, 与上述近似公式计算所得 $\Delta f=4.58\text{MHz}$ 相近。从模式间隔的角度, 对于短驻波加速管, 取 k 等于 0.01 左右已足够了。

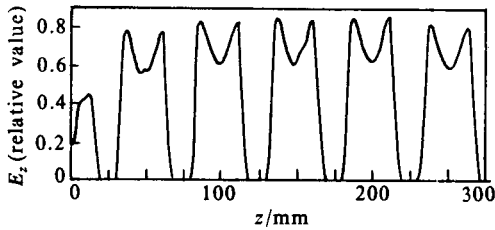


Fig. 5 Distribution curve of electric field on central axis

图 5 中心轴线上电场分布曲线

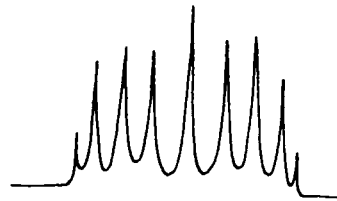


Fig. 6 Dispersion curve

图 6 色散曲线

5 RF 热测调试结果

5.1 X 射线能量的测量

加速管产生的 X 射线的能量用半价层方法测量, 用铜作吸收片。图 7 为半价层曲线, 由于能谱的影响, 该曲线在半对数坐标中不完全是一条直线, 其最大半价层厚度为 24mm , 对应的 X 射线峰值能量在 6MeV 以上。

5.2 剂量率测量

在不加准直系统的情况下, 在离靶 100cm 处, 用标准电离室及标准剂量仪测量射线的吸收剂量率, 测出离靶 1m 处每分钟最大吸收剂量在 8.6Gy 以上。

5.3 电子反轰影响的测量

关于电子反轰功率, 除理论计算外, 可以间接估计, 方法之一是: 如上所说先将电子枪工作点调整到接近空间电荷限制区域, 这时电子枪的发射电流对阴极加热功率不太敏感, 因而对微波频率变化也不太敏感, 测出此时灯丝电源功率及发射电流; 再将电子枪工作点调整到温度控制区域, 调节微波源频率。当工作频率与加速管谐振频率失谐时, 此时电子枪阴极不受电子反轰作用, 引起发射电流降低, 测出此时灯丝电源功率, 则可由前后灯丝电源功率差值估算电子反轰功率的大小。实际试验中, 电子枪阳极电压为 8kV , 灯丝功率为 10W , 电子枪工作点接近空间电荷控制区域, 在微

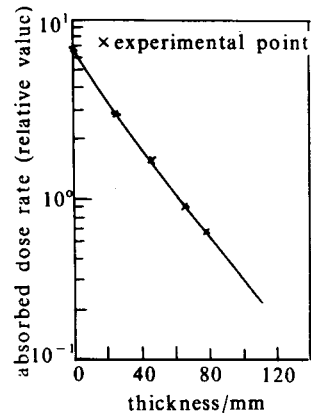


Fig. 7 Half value thickness curve

图 7 半价层厚度曲线

波功率未馈入时平均发射电流为 $380\mu\text{A}$ ，微波功率馈入后平均发射电流为 $400\mu\text{A}$ ，此时发射电流对微波频率不太敏感。以后将电子枪工作点调整到温度控制区域，灯丝功率降为 3.5W 左右，当工作频率偏离谐振频率即微波功率未馈入时，平均发射电流降低到 $100\mu\text{A}$ 左右，微波功率馈入后平均电流上升到 $360\mu\text{A}$ 左右，根据灯丝电源功率差值估计反轰功率有 6.5W 左右，与计算值接近。

6 结 语

本文介绍了一种适用于短驻波加速管的既可降低反轰功率又能适当提高整管加速梯度的措施。取得了以下的效果：

1. 反轰功率比原来减少了一半左右，改善了阴极的工作条件，发射电流的稳定性得到明显改善。

2. 在脉冲加速流强 100mA 时，加速管的平均加速梯度达到 22.2MV/m ，空载时加速腔内金属表面最大电场强度提高到 188MV/m 以上。

参考文献

- 1 Linder E G. Proc. Inst. Radio. Engrs, 1938, 26: 346
- 2 顾本广、林小奇、周 平. 驻波加速管中的电子反轰现象. 强激光与粒子束, 1991, 3 (3): 286 ~ 296
- 3 顾本广、王会章. 横向运动对驻波加速管电子反轰的影响. 强激光与粒子束, 1993, 5 (4): 608 ~ 614
- 4 Tanabe E et al. A 2 MeV Microwave Thermionic Gun. SLAC PUB-5054, 1989
- 5 Pikerling A H, Cooper B F. Proc. Congress International Tubes, Paris, 1964. 410 ~ 412
- 6 顾本广、周 平等. 6MeV全密封边耦合驻波加速管. 原子能科学技术, 1993, 27 (1): 23 ~ 28

INVESTIGATIONS OF LOW BACK BOMBARDMENT HIGH GRADIENT STANDING WAVE LINEAR ACCELERATORS

Gu Benguang, Lin Xiaoqi

Beijing Medical Equipment Institute, Beijing 100011

The electron back bombardment (EBB) phenomenon in high accelerating gradient standing wave (SW) linear accelerators has been analysed in comparison with that in magnetrons and microwave thermionic guns.

It should be indicated that the EBB in SW linear accelerators mainly causes heat electron emission and results in overheating of gun cathodes and instability of heat emission current, while that in magnetrons will cause occurrence of the secondary electron emission. The influences of EBB in microwave thermionic guns are similar to those in SW linear accelerators but where the Schottky effect has to be considered.

The EBB power in SW linear accelerators is related to many factors. In general, higher accelerating gradient leads to higher EBB power on electron gun cathodes.

The methods of lowering the EBB power on the electron gun cathode and simultaneously increasing the accelerating gradient along the accelerating structure are introduced. Since the EBB mainly occurs in the first accelerating cavity, reducing the magnitude of accelerating electric field in the first accelerating cavity will cause lowering of the EBB power on the electron gun cathode. Increasing the accelerating gradient is obtained by increasing the effective shunt impedance of following accelerating cavities and lowering the coupling coefficient between accelerating and coupling cavities. Shortening the length of the first accelerating cavity can increase the capture coefficient and reduced the number of backward motion electrons in the first accelerating cavity which also leads to reduction of the EBB power.

Design and experimental results of a 6MeV SW linear accelerator with consideration of reducing of the EBB power and increasing the accelerating gradient are described. The total length of the accelerating structure is 27cm, the average accelerating gradient under pulse accelerating current 100mA is 22.2MeV/m. The maximum RF field on the internal surface of accelerating cavities reaches to 188MV/m without beam loading. The EBB power on the electron gun cathode lowers to 6.5W which is approximately half of the EBB power of a similar 6MeV SW linear accelerator without taking above steps.