

热阴极微波电子枪的电子反轰现象

许 州 胡克松 刘锡三 黄孙仁

(中物院应用电子学研究所, 成都 527-58信箱, 610003)

摘 要 利用数值模拟方法研究了热阴极微波电子枪在高重复率(200Hz)时电子反轰运动以及输出束流品质与腔长的关系, 并讨论了抑制电子反轰的措施。

关键词 微波电子枪 电子反轰 腔长

ABSTRACT In this paper, electron backbom and the beam qualities of the RF-gun in the real conditions is investigated by means of particles simulations. The influences of the cavity length and amplitude of electric field are presented. And the methodes decreasing the power of backbom are discussed.

KEY WORDS RF-gun, electron back bombardment, cavity length

0 引 言

自由电子激光(FEL)的发展迫切需要一种高亮度的电子源。1984年, J.Madey 建议在微波腔中直接放置热阴极。美国的SSRL 1988年开始研制 $1 + \frac{1}{2}$ 微波电子枪。中国工程物理研究院1992年研制成功了S波段六硼化镧热阴极 $1 + \frac{1}{2}$ 腔微波电子枪^[1], 并发现当宏脉冲频率上升到125Hz时, 灯丝加热功率下降到约1W, 仍有总平均电流 $420\mu\text{A}$ 的输出。文献[2]、[3]也报道了微波电子枪中的电子反轰现象。电子反轰现象在各种驻波加速管中也是一个普遍现象, 尤其是当微波电子枪工作在高重复频率时更为严重。反轰电子加热阴极, 导致阴极在宏脉冲期间内发射更多的电子, 宏脉冲出现斜顶, 这很不利于自由电子激光器的运行, 因为FEL需要稳定的电流, 同时过大的反轰降低了阴极的使用寿命。

文献[4]用相轨道方法分析了驻波加速管中的电子反轰现象, 没有考虑空间电荷效应和径向电场的作用。本文利用计算机进行粒子动力学数值模拟, 综合考虑了空间电荷效应和径向电场的作用, 定量研究了热阴极微波电子枪在实际工作参数下的整管性能, 及在此基础上的电子反轰现象, 阐述了各种因素对电子反轰的能量、功率的影响, 并从解决问题的角度讨论了抑制电子反轰的措施。

1 热场阴极发射的特点

由热阴极发射的电流, 其密度由下面的Richardson方程给出:

$$J_0 = AT^2 \exp(-e\Phi/kT) \quad (1)$$

J_0 是阴极电流密度, A/cm^2 ; A 是Richardson常数, Φ 是阴极的逸出功, eV ; Boltzman常数 $k = 8.625 \times 10^{-5} \text{eV}$; T 是阴极温度, K 。由此方程可知, 发射电流主要取决于表面逸出功和表面温度, 选择 LaB_6 作为阴极($\Phi = 2.6\text{eV}$, $A = 120\text{A}/\text{cm}^2\text{K}^2$)。此外, 微波电场能够增加发射电流密度, 这是因为电场降低了阴极的表面势垒, 这个效应称之为Schottky效应

$$J = J_0 \exp[0.4403(E_c \sin\theta)^{1/2} / T] \quad (2)$$

1995年6月20日收到原稿, 1996年6月17日收到修改稿。

式中, J 是发射电流密度, A/cm^2 ; E_c 是阴极表面的最大射频电场, V/m ; θ 是阴极表面处的射频相位。对于微波电子枪而言, 由于阴极处在很强的射频场中, 必须考虑 Schottky 效应。根据上述阴极发射特性, 修改了 PARMELA 程序, 并将它移到微机上, 使之完全能够适用于微波电子枪的动力学数值模拟计算。

2 动力学模拟计算结果

以 S 波段 $4 + \frac{1}{2}$ 腔热阴极微波电子枪^[5](亦可称之为热阴极轴耦合驻波加速管)为例, 研究不同条件下的电子反轰现象。腔型如图 1 所示。

初始条件是: 阴极半径为 0.2cm, 阴极 LaB_6 与阴极端板平齐, 阴极温度 $T=1750K$, 初始电子能量为 1eV, 微波频率为 2856MHz, 注入粒子总数为 10^4 。发射电子在阴极面上的位置是随机的, 但是, 发射电子的注入相位满足 (1) 和 (2) 式。根据微波源和加速腔的参数, 取各腔平均场强 $E_i=30MV/m$ ($i=2, 3, 4, 5$), E_1 取不同的值, 功率源是一个 3.5MW 的速调管, 脉冲宽度是 $6\mu s$, 宏脉冲电子束宽度为 $4.6\mu s$, 宏脉冲频率是 200Hz。

反轰电子的平均功率和输出束流的平均功率分别为

$$\bar{P}_{back} = Q F_m \tau F_p \eta W_{back} / e, \quad \bar{P}_{out} = Q F_m K \tau F_p W_{out} / e \quad (3)$$

式中, Q 是电子电量, C ; F_m 是微波频率, Hz ; τ 是电子束脉宽, s ; F_p 是宏脉冲频率, Hz ; W_{out} 是输出束流的平均能量, eV ; W_{back} 是反轰电子平均能量, eV ; K 是俘获系数; e 是电子电量; η 是反轰电子的比率, 即与打到阴极上的电子总数与阴极发射的总电子数之比。

目前, 热阴极微波电子枪开始采用 $n + \frac{1}{2}$ 腔的形式。这种射频枪整腔长度一般为 $\lambda/2$, λ 是微波波长, 半腔长度是 $\lambda/4$, 即相速分布为 $\beta_1=0.5$, $\beta_2=1$ ^[1, 2], 但是, 由于热阴极发射使得电子的注入电压非常小, 因此电子速度在首腔变化很大, 所以, 怎样的相速分布有利于提高束流品质就是一个十分重要的问题。针对 $4 + \frac{1}{2}$ 腔射频枪, 计算三种典型的相速分布与反轰电子的比率、能量、功率的关系。其中后三个腔的腔型完全相同。

图 2 给出了打到阴极表面上的反轰电子比率与腔长、场强的关系。由图中可以看到: 在同样的电场强度下, 较短的腔, 其反轰电子的比率也较小。图 3 给出了打到阴极上的反轰电

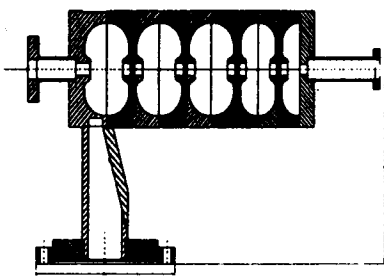


Fig. 1 $4 + \frac{1}{2}$ RF-gun

图 1 热阴极微波电子枪

表 1 三种典型的相速分布

Table Typical distribution of three phase speed

| | β_1 | β_2 | β_3 | β_4 | β_5 |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| A | 0.5 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| B | 0.45 | 0.9 | 1 | 1 | 1 |
| C | 0.4 | 0.8 | 1 | 1 | 1 |

子的平均能量与腔长、场强的关系。结果表明在同样的电场强度下, 较短的腔, 打到阴极上的反轰电子的平均能量也较低。图 2(c)给出了打到阴极表面的反轰电子的功率与腔长、场强的关系。显然, 在同样场强下, 较短的首腔, 其反轰电子的功率也较小。这是因为其反轰电子的平均能量和反轰比率都比较小的缘故。反轰电子的功率与场强近似呈线性关系, 且较短的腔链其反轰功率增长也较缓慢。

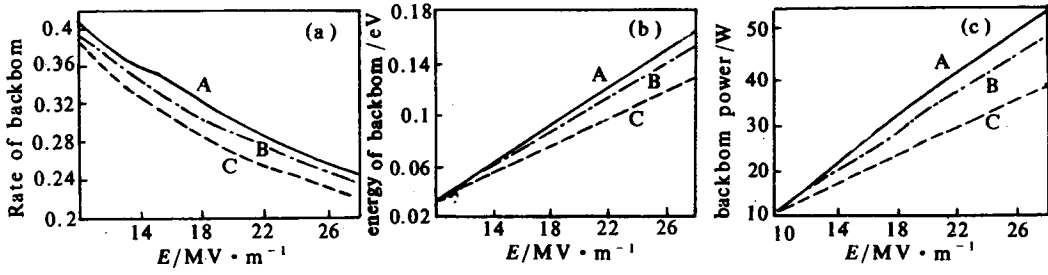


Fig.2 Rate, energy, power of backbom vs cavity length and field intensity E

图 2 反轰比率、能量、功率与腔长、场强的关系

图 3(a) 是输出束流的俘获系数与腔长度、场强的关系。较短的腔列，较高的电场，其俘获系数也较大。图 3(b) 是输出束流的平均能量与腔长度、场强的关系。在首腔电场较小时 ($E_1 \leq 18 \text{MV/m}$)，首腔较短的腔列，其输出束流的平均能量明显较高，这是因为首腔较短时，腔的相速与电子的相速匹配较好。由图 2(c) 可以看到此时的反轰功率还不到 25W，图 3(c) 是输出束流的功率与腔长度、场强的关系，同样显示了缩短腔长的好处。

图 4 是在首腔电场 15MV/m 时输出束流的能谱。横轴的能量区间是 0.1MeV，纵轴是落在每个能量区间的粒子数 n_i 与俘获粒子总数 N 之比。显然，采用较短的首腔可以获得较好能谱。对能量大于平均能量的粒子数所占俘获粒子总数的百分比，A 为 60.99%，B 为 62.68%，C 为 73.61%。

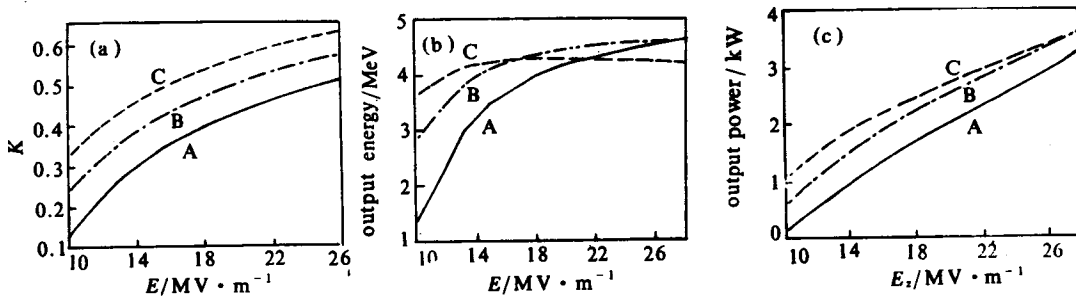


Fig.3 Capture efficiency, output energy and power vs cavity length and field intensity E

图 3 俘获系数、束流能量、功率与腔长、场强的关系

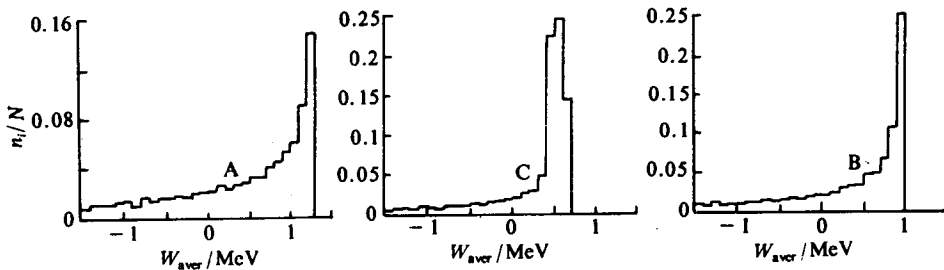


Fig.4 The electron numbers vs its energy at the gun exit ($E_1 = 15 \text{MV/m}$)

图 4 对应三种腔长的束流能谱

3 结 论

为了使阴极能够稳定发射并延长使用寿命, 应该抑制阴极处反轰电子功率。但是, 必须指出的是, 在研究电子反轰时, 不能孤立研究首腔的粒子动力学。因为, 为了获得加速管束流最佳输出品质, 电子枪的温度, 场强, 腔列长度等都是相关联的。因此, 各种参数应以保持整管性能为原则一起进行选择。计算表明, 电子反轰功率与腔的结构有密切的关系, 通过适当缩短首腔及第二腔的长度, 适当降低首腔的电场场强, 来减小电子反轰功率。从而既降低了反轰功率又提高了输出束流的平均能量并改善了束流能谱。

通过 $4 + \frac{1}{2}$ 射频枪的实例计算表明, 采取了以上措施后, 可以较好的抑制反轰, 这样, 在一般情况下就可以不用采用外加磁场和空心阴极的办法了, 前者, 增添了设备的复杂性, 同时外加磁场必然也要影响正向电子的运动; 后者使电子束截面增大, 影响了电子束的品质。

参 考 文 献

- 1 刘锡三等. S 波段 $1 + \frac{1}{2}$ 腔热阴极微波电子枪研究. 强激光与粒子束, 1994, 6(2): 161
- 2 Tranable E et al. A 2MeV microwave thermionic gun. SLAC-PUB-5054, 1989.
- 3 黄永章. 北京自由电子激光器用微波电子枪研究及束流输运线的设计与制造[博士论文]. 北京: 中科院物理研究所.
- 4 顾本广等. 驻波加速管中的电子反轰现象. 强激光与粒子束, 1991, 3(3): 286.
- 5 许州. 热阴极驻波加速管研究[博士论文]. 中物院应用电子学研究所.

RESEARCH ON BACK BOMBARDMENT OF ELECTRONS IN THERMIONIC RF-GUN

Xu Zhou, Hu Kesong, Liu Xisan, and Huang Sunren

Institute of Applied Electronics, CAEP, P.O.Box 527, Chengdu 610003

In this paper, by means of particles simulation, according to the real conditions of microwave source. The back bombardment of electrons are studied in thermionic RF-gun with $4 + \frac{1}{2}$ cavities and beam parameter at exit of RF-guns with various cavity lengths. The RF-gun is shown in Fig.1, and the different effects on back bombardment are given between shortening the length of the cavities (as shown in Table 1) and changing the rate of the electric strength in the cavities. The Fig. 2 (a, b, c) show the advantage of shorting cavities for decreasing the average power of electron back bombardment, in same time, Fig.3(a,b,c) also show that the beam qualities at the exit can be improved effectively by appropriately shorting the length of first cavity and second cavity and decreasing the electric field first cavity. This idea has been adopted in the multi-cavity thermionic RF-gun for some industry application.