

# 关于热阴极微波电子枪中电子反轰问题的研究

唐传祥 林郁正

(清华大学工程物理系, 北京 100084)

**摘 要** 提出在热阴极微波电子枪的设计中可以通过缩短腔长减小电子反轰功率, 并通过模拟计算详细研究了腔长对电子反轰及枪出口束流品质的影响。

**关键词** 热阴极微波电子枪 电子反轰 腔长

**ABSTRACT** In this paper the back bombardment of electrons in rf thermionic guns is studied for cavity design. We put forward that shortening the length of cavities can decrease the back bombardment power sharply and obtain electron bunches with better qualities. The simulation results of back bombardment power and electron beam parameters at exit of rf guns with various cavity lengths are presented. The idea has been adopted in the multi-cavity rf thermionic gun for BFEL.

**KEY WORDS** electron back bombardment, rf thermionic gun, cavity length

## 0 引 言

随着自由电子激光技术的发展及下一代超高能电子直线对撞机研究的进一步深入, 对电子注入器的要求越来越高。自 1985 年, 第一台热阴极微波电子枪作为 MARK III 的电子源<sup>[1]</sup>产生了当时最高亮度的电子束以来, 热阴极微波电子枪便以其亮度高及结构简单、紧凑等特点, 一直受到人们的重视。但, 热阴极微波电子枪中阴极在微波加速场作用下发射电子, 部分发射的电子因得不到足够的能量到达腔外, 而被高频电场反向加速打到阴极上, 形成电子反轰。电子反轰会使阴极工作不稳定, 严重者会损害阴极。

目前国际上为减小热阴极微波电子枪的电子反轰, 一般采用: 1) 在阴极面附近加横向磁场使反轰电子偏离阴极<sup>[2, 3]</sup>。由于束团偏离轴线加速, 使束团受到高频场非轴对称力的横向作用, 同时也增大了高频场非线性分量对束团的影响。2) 对于  $1/2+1$  腔结构的热阴极微波电子枪, 多采用增大后面整腔和  $1/2$  腔峰值场强之间比值  $\alpha = E_{p2}/E_{p1}$  来减小电子反轰<sup>[4, 5]</sup>。本文提出了通过缩短腔长减小电子反轰的设计思想, 并利用自己编写的热阴极微波电子枪模拟计算程序 HOTGUN<sup>[6]</sup> 对单腔及多腔结构的热阴极微波电子枪在腔长改变后的电子反轰及枪出口束流品质进行了研究。这一设计思想已应用于 BFEL 的多腔热阴极微波电子枪的设计中。

## 1 热阴极微波电子枪中的电子反轰

微波电子枪中电子的纵向运动方程为

1995 年 5 月 4 日收到原稿, 1995 年 10 月 10 日收到修改稿。

$$W_e = W_{inj} + \int_0^L e E_z(z) \sin(\omega t + \Phi_0) dz$$

$$z = \int_0^t v dt$$
(1)

其中,  $W_e$  为电子能量,  $W_{inj}$  为电子的初始发射能量,  $E_z(z)$  为高频电场幅值,  $t$  为电子从阴极发射算起的时刻,  $v$  电子速度,  $\Phi_0$  电子发射的初始相位,  $z$  为从阴极面算起的位移,  $L$  高频腔的长度。电子通过一加速腔获得的能量主要由电场幅值、腔长及该电子的初始发射相位决定。热阴极微波电子枪中, 阴极在高频加速场的作用下发射电子, 但初始发射相位  $\Phi_0$  大于某个相位  $\Phi_M$  的电子在到达腔出口前, 将在高频减速场的作用下回轰到阴极表面;  $\Phi_M$  的大小取决于腔长、电场强度等因素。反轰电子的能量也主要是由电场幅值、腔长及该电子的初始发射相位决定的, 因而, 降低高频电场的幅值或缩短腔长都可以减小反轰电子的能量, 并且, 缩短腔长一般可增加俘获, 从而还可以减少反轰电子的数目。通过下面的模拟计算可以看出缩短腔长能更有效地减小电子反轰功率, 而且, 对于多腔热阴极微波电子枪适当调节各腔长度能在枪出口得到较好的束流品质。

## 2 模拟计算

### 2.1 计算原理

热阴极微波电子枪, 束团长 (阴极在  $0^\circ \sim 180^\circ$  的高频相位发射电子), 束团能散大, 并且存在反轰现象, 用解析的方法无法对其进行准确、全面的描述。我们主要通过数值模拟计算对热阴极微波电子枪的电子反轰现象进行研究。

热阴极微波电子枪中粒子运动方程为

$$\frac{d}{dt} (\gamma \beta_x) = E_x + \beta_y B_z - \beta_z B_y$$

$$\frac{d}{dt} (\gamma \beta_y) = E_y + \beta_z B_x - \beta_x B_z$$

$$\frac{d}{dt} (\gamma \beta_z) = E_z + \beta_x B_y - \beta_y B_x$$
(2)

其中各电磁场分量为

$$E_x = \{ [E_{rA} \sin(2\pi t + \Phi_A) + E_{rC} \sin(2\pi t + \Phi_C)] r + E_q + E_{rSC} \} x / r$$

$$E_y = \{ [E_{rA} \sin(2\pi t + \Phi_A) + E_{rC} \sin(2\pi t + \Phi_C)] r - E_q + E_{rSC} \} y / r$$

$$E_z = E_{zA} \sin(2\pi t + \Phi_A) + E_{zC} \sin(2\pi t + \Phi_C) + E_{zSC}$$

$$B_x = [B_{\phi A} \sin(2\pi t + \Phi_A) + E_{\phi C} \sin(2\pi t + \Phi_C)] r \cdot (-y) / r$$

$$B_y = [B_{\phi A} \sin(2\pi t + \Phi_A) + E_{\phi C} \sin(2\pi t + \Phi_C)] r \cdot x / r$$

$$B_z = B_z$$
(3)

式中  $E_{rA}, B_{\phi A}$  为加速腔中射频场  $r, \phi$  方向分量线性化系数;  $E_{rC}, B_{\phi C}$  为耦合腔中射频场  $r, \phi$  方向分量线性化系数;  $E_q$  为耦合孔所致四极分量;  $E_{rSC}, E_{zSC}$  为  $r$  及  $z$  方向的空间电荷场。以上各量均为无量纲量,  $\bar{x} = x/\lambda, \bar{y} = y/\lambda, \bar{z} = z/\lambda, \bar{t} = t/\lambda, E = \frac{eT}{m_e c} \bar{E}$ ,

$B = \frac{eT}{m_e} \bar{B}$ ;  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \bar{r}, \bar{E}, \bar{B}$  为 SI 单位制,  $\lambda, T$  分别为射频场在真空中的波长和周期。

模拟计算中考虑了射频场外, 还充分考虑了空间电荷效应、肖特基效应及稳态负载效应等。该模拟计算程序的部分结果已经得到实验验证<sup>[6]</sup>。

### 2.2 单腔微波电子枪

这里主要讨论在单个高频腔中电子反轰功率随腔长的变化情况, 为了简单起见, 模拟计算用的腔形如图 1 所示, 通过改变 DT 来改变腔长  $L$ 。

在直径  $D=3\text{mm}$ , 温度  $T=1700\text{K}$ , 零场发射电流密度  $J_0=16\text{A/cm}^2$  的阴极参数及馈入微波频率  $f=2856\text{MHz}$ , 功率  $P=0.8\text{MW}$ , 脉冲宽度  $\tau=4.0\mu\text{s}$ , 重复频率为  $50\text{Hz}$  的微波参数下, 图 2 给出了平均反轰功率随腔长的变化。

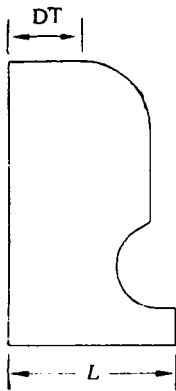


Fig.1 Schematic diagram of the cavity used in simulations

图 1 模拟计算腔形简图

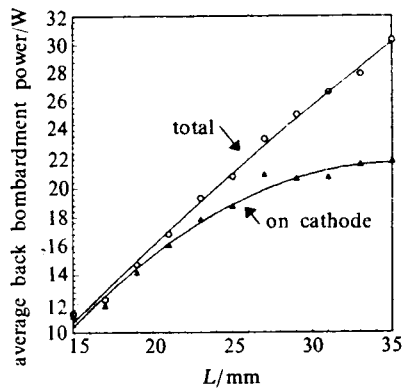


Fig.2 Average back bombardment power vs cavity length

图 2 平均反轰功率随腔长的变化

由图 2 可以看出缩短腔长能大大减小电子的反轰功率, 但是, 对单腔微波电子枪腔长的缩短同时也减小了枪出口的电子能量, 并且使电子束团得不到有效的聚焦<sup>[7]</sup>。但是, 实际应用中的单腔热阴极微波电子枪利用聚焦鼻锥加强对束团的聚焦作用<sup>[8]</sup>。

### 2.3 多腔热阴极微波电子枪

目前,  $1/2+1$  腔热阴极微波电子枪一般由首腔为长  $\lambda/4$  的半腔, 第二个腔为等效波速为光速的整腔组成, 并采用降低首腔电场强度幅值的方法来减小电子反轰。图 3 给出了这样的一个微波电子枪在第二个腔的峰值场强  $E_{p2}=40\text{MV/m}$  其它参数除馈入微波功率外同图 2 的条件下, 平均反轰功率及脉冲流强随第二个腔与首腔的峰值场强之比  $\alpha = E_{p2}/E_{p1}$  的变化。

这里, 我们首先在保持首腔及第二腔的峰值场强  $E_{p1}=E_{p2}=40\text{MV/m}$  改变首腔的长度 (其它参数同图 3) 得到图 4 所示各关系曲线; 然后, 在首腔长度  $L_1=17\text{mm}$  ( $\sim \lambda/6$ ),  $E_{p1}=E_{p2}=40\text{MV/m}$  的条件下, 改变第二腔的长度  $L_2$  (其它参数同图 3) 得到图 5 所示的各关系曲线。

由图 3、4 可以看出, 缩短首腔的长度不但大大减小了反轰功率, 而且提高了枪出口的束流强度。由图 5 可以看出, 第二腔的长度对打到阴极上的平均反轰功率影响不大,

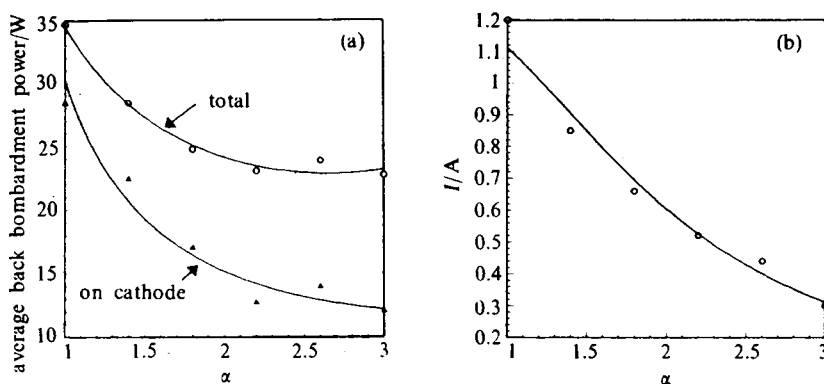


Fig.3 Average back bombardment power and the beam current at exit vs  $\alpha$

图 3 a)平均反轰功率及 b)脉冲流强  $I$  随  $\alpha$  的变化

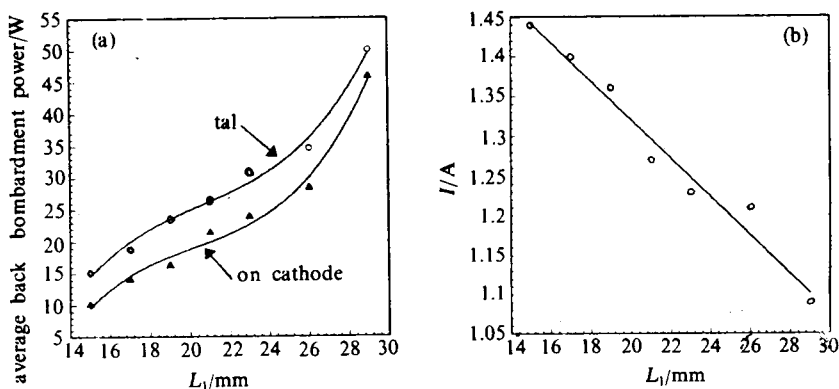


Fig.4 Average back bombardment power and the beam current at exit vs length of the first cavity

图 4 a)平均反轰功率及 b)脉冲流强  $I$  随首腔长度  $L_1$  的变化

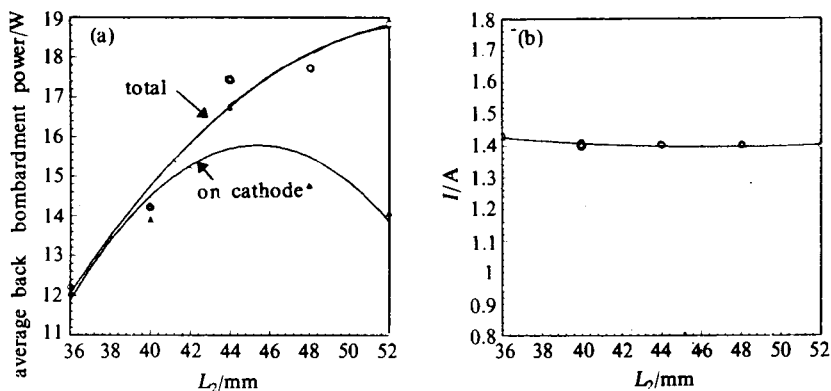


Fig.5 Average back bombardment power and the beam current at exit vs length of the second cavity

图 5 a)平均反轰功率及 b)脉冲流强  $I$  随第二腔长度  $L_2$  的变化

这是因为从第二个腔反轰的电子大都打到了腔壁上。为了说明这一点，我们在图 6 给出了一个关于反轰电子的轨迹的例子（为能给出清晰的反轰电子的轨迹，我们使阴极从  $90^\circ$  开始发射电子，并且每个步长发射 5 个宏粒子）。

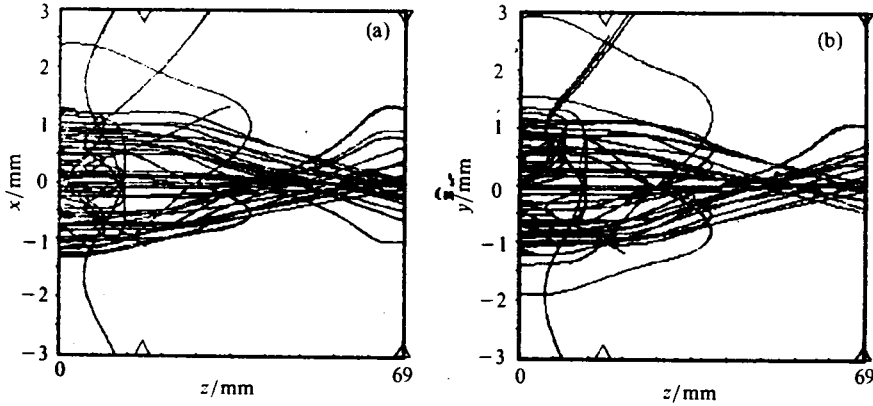


Fig.6 Transverse traces of back bombardment electrons (“Δ” shows the position of each cavity)  
 图 6 反轰粒子的 x 及 y 方向粒子轨迹 (“Δ”标示出每个腔的位置)

与小型驻波加速管中的粒子动力学过程相似,多腔热阴极微波电子枪中电子束团的纵向聚束及横向聚焦都主要是在高频场的作用下完成的,通过调节高频腔的腔长可以改变高频场对束团的纵向及横向作用。因而,调节多腔热阴极微波电子枪的首腔及后面各腔的长度,并在首腔加适当的聚焦鼻锥,可以在减小反轰功率的同时在枪出口得到品质较好的束流。表 1 给出了两个多腔热阴极微波电子枪的模拟结果的比较,在模拟计算过程中除了两个枪的腔长及首腔腔型(1号枪的首腔有聚焦鼻锥)不同外其它参数都相同: $E_{p1}=25\text{MV/m}$ ,  $E_{p2}=E_{p3}=40\text{MV/m}$ ,除馈入微波功率外的其它微波参数及阴极参数同图 2。由表 1 可以看出,将首腔长度由 26mm ( $\sim \lambda/4$ ) 缩短到 20mm ( $\sim \lambda/5$ ) 的同时第

表 1 腔长不同的两个多腔热阴极微波电子枪的模拟结果的比较  
 (表中  $W_e$ 、 $I$  分别为枪出口电子能量与脉冲流强)

Table 1 The simulation results of two different multi-cavity rf thermionic guns  
 ( $W_e$  and  $I$  are the maximum electron energy and the pulse current at gun exit respectively.)

RF gun		No.1	No.2
cavity length/mm	1	20	26
	2	34	52
	3	52	52
$W_e$ / MeV		2.06	2.74
$I$ / A		0.724	0.683
average back bombardment power / W	total	15.0	37.4
	on cathode	11.1	17.8
RMS emittance/ ( $\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ )	x-direction	2.79	5.11
	y-direction	3.47	5.71

二个腔也由 52mm ( $\sim \lambda/2$ ) 缩短到 34mm ( $\sim \lambda/3$ ) 使总的平均反轰功出率减小为原来的 40%。为增加横向聚焦力在首腔加了适当的聚焦鼻锥,这样减小了枪出口束团的发射度;

但是, 由于该聚焦鼻锥对反轰电子的横向作用, 使打在阴极上的电子数占总反轰电子数的比例增大。最后, 缩短腔长并在首腔增加聚焦鼻锥后, 打在阴极上的平均反轰功率减小为原来的 62%, 枪出口束流发射度由约  $5\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$  减小为约  $3\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ , 束流流强由 0.68A 增加到 0.72A。

### 3 结 论

对多腔热阴极微波电子枪, 缩短腔长 (特别是首腔) 是有效的减小电子反轰的手段, 它允许首腔有较高的电场强度, 有利于对空间电荷效应的抑制和阴极发射电流密度的提高, 从而在枪出口可以得到高品质的束流。这一设计思想已经被应用于 BFEL 的多腔热阴极微波电子枪的设计中<sup>[7]</sup>。

### 参考文献

- 1 Benson S V. NIM, 1988, A272:22 ~ 28
- 2 Liu H. NIM, 1991, A302:535 ~ 546
- 3 Mekee C B & Madey J M J. NIM, 1991, A304:386 ~ 391
- 4 Tanade E & Borland M. A 2-MeV Microwave Thermionic Gun, SLAC-PUB-5054, 1989
- 5 刘锡三等. 强激光与粒子束, 1993, 6(2):161 ~ 170
- 6 唐传祥、杨越、林郁正. 热阴极微波电子枪模拟计算, 高能物理与核物理, 待发表
- 7 唐传祥、林郁正. 用于北京自由电子激光器的多腔热阴极微波电子枪的设计与研究, 清华大学加速器实验室, 内部报告
- 8 黄永章等. 高能物理与核物理, 1994, 18(7):658

## STUDIES ON BACK BOMBARDMENT OF ELECTRONS IN RF THERMIONIC GUNS

Tang Chuanxiang and Lin Yuzheng

(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

In order to suppress the back bombardment of electrons in rf thermionic guns, we have studied the back bombardment power and beam parameters at exit of rf guns with various cavity lengths by simulation. First, a single cavity rf thermionic gun is studied. The simulations show that the average back bombardment power of a rf gun with a cavity of 15mm ( $\sim \lambda/7$ ) long is only 1/3 of that of one with a cavity of 35mm ( $\sim \lambda/3$ ) long, at condition of constant rf power input (Fig.2). And then a 1/2+1 cell rf gun is studied about the different effects on back bombardment between shortening the length of the cavities and increasing the rate of the peak electric strength ( $\alpha = E_{p2}/E_{p1}$ ) in the two cavities. From Fig. 3, 4, 5 and Tab. 1, we can see that with appropriately shortening the first and the second cavities of a rf gun, not only the average back bombardment power decreases but also bunches with better qualities can be obtained at the gun exit. This idea has been adopted in the multi-cavity rf thermionic gun for BFEL.