

# 热阴极微波电子枪中建场瞬态过程的研究

唐传祥 林郁正 童德春

(清华大学工程物理系, 北京, 100084)

通过对热阴极微波电子枪中建场瞬态过程的研究, 在考虑了阴极发射电流的 Schottky 效应等因素的基础上, 给出了建场过程的微分方程及电子能量增益与耦合度的关系式。并以用于北京自由电子激光器的多腔热阴极微波电子枪为例, 给出了其最佳耦合度以及建场过程的计算结果。

关键词 热阴极微波电子枪 瞬态过程 束流负载 最佳耦合度

自由电子激光器是 20 世纪 70 年代开始兴起的新型光源, 它具有波长大范围连续可调以及它以自由电子作为工作介质, 不会出现介质的击穿和因介质的热效应而影响激光的单色性等特点得到迅速发展。为给自由电子激光提供强流、低发射度和能散小的电子束, 高亮度电子注入器已经成为人们研究的焦点。其中, 热阴极微波电子枪比较容易实现, 又能得到高亮度电子束, 在自由电子激光器的研究中占有重要的地位。

在热阴极微波电子枪的设计中, 除了要考虑电子反轰效应的抑制以及空间电荷效应、高频电磁场效应等束流动力学问题外, 还要考虑微波电子枪与外部微波馈送系统的耦合问题。本文通过解析分析得出热阴极微波电子枪建场的瞬态过程的微分方程和枪出口电子能量增益与耦合度的关系式。在阴极参数、腔形参数和微波功率参数已知的条件下, 利用这一解析结果可以直接得到最佳耦合度的值, 从而为热阴极微波电子枪最佳耦合度的确定提供依据。

## 1 建场瞬态过程

热阴极微波电子枪将阴极直接放入高频加速腔内, 阴极发射电流的大小除取决于阴极参数外, 根据肖特基效应还要受到阴极表面电场强度的影响。因此, 其建场的瞬态过程比通常的驻波加速器复杂, 其中关键是热阴极微波电子枪中的束流负载在建场过程中是时间的函数。

在一个高频周期中, 阴极在  $0-180^\circ$  相位发射电子。根据肖特基效应, 阴极在不同高频相位发射的电流密度不相同。这里  $I_a(t)$  是在一个高频周期中的平均电流, 在综合考虑了反轰电子及由于横向运动损失的电子后, 引入了一个因子  $\eta$  用来表示实际被加速的电子的比例。

$$I_a(t) = I_0 \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^\pi \exp[0.4403(E_{z0} \sin \varphi)^{1/2} / T_c] d\varphi \cdot \eta \quad (1)$$

其中,  $I_0$  是阴极的零场发射电流,  $T_c$  是阴极温度,  $E_{z0}$  阴极表面电场幅值

$$E_{z0}(t) = A \cdot U(t)^{1/2} \quad (2)$$

$A$  是联系阴极表面电场强度幅值和微波电子枪腔链内储能  $U(t)$  的系数, 可以通过腔型优化设计程序 SUPERFISH<sup>[1]</sup>、URMEL<sup>[2]</sup> 等得到。本文利用多项式近似, 可得到

$$I_a(t) = \frac{I_0}{2} \left( 1 + 0.3358 \frac{E_{z0}^{1/2}}{T_c} + 0.0956 \frac{E_{z0}}{T_c^2} \right) \cdot \eta \quad (3)$$

在阴极温度为 1800 K, 阴极直径  $D = 3 \text{ mm}$ , 零场发射电流密度  $J_0 = 18 \text{ A/cm}^2$ ,  $\eta = 0.6$  时分别由式(1)和(3)得到的  $I_a$  随阴极表面电场强度幅值  $E_{z0}$  的变化曲线示于图 1。可以看出, 式(3)在本工作关心的  $E_{z0}$  的范围内比较好地反映了阴极发射电流与阴极表面电场的关系。

在对电流负载作上述近似处理后, 根据文献[4]对驻波加速器中考虑束流负载的建场瞬态过程的解析分析方法, 可得到热阴极微波电子枪中储能的微分方程

$$\frac{dU}{dt} + aU + bU^{3/4} + cU^{1/2} = 0 \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} a = \frac{\omega b}{Q_0} (1 + \beta) + 0.0956 \frac{A I_0 \eta}{2 T_c^2} \cdot \left( \frac{\omega Z T^2 L}{Q_0} \right)^{1/2} \\ b = 0.3358 \frac{A^{1/2} I_0 \eta}{2 T_c} \cdot \left( \frac{\omega Z T^2 L}{Q_0} \right)^{1/2} \\ c = 2 \left( \frac{\omega b}{Q_0} \right)^{1/2} \left[ \frac{I_0 \eta}{4 f} (Z T^2 L)^{1/2} - (P_0 \beta)^{1/2} \right] \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $Q_0$ ,  $\omega b$  和  $Z T^2 L$  分别为微波电子枪腔链的固有品质因数、固有圆频率和有效分流阻抗,  $P_0$  为入射微波功率,  $\beta$  为耦合度。

以用于北京自由电子激光器的多腔热阴极微波电子枪<sup>[3]</sup>为例, 给出其建场过程的冷测和计算结果。在整枪焊接前, 让一脉冲宽度  $\tau = 4 \mu\text{s}$ , 频率  $f = 2856.5 \text{ MHz}$  的微波脉冲馈入该微波电子枪的腔链, 得到了无载状态下的建场曲线(图 2 中曲线 1,  $E_{z0}$  是阴极表面电场的归一化值)。焊接前, 该枪的耦合度测量值约为 4.3。由腔型优化设计程序 SUPERFISH 及 URMEL 得到了该微波电子枪的有效分流阻抗  $Z T^2 L = 10.33 \text{ M}\Omega$ , 阴极表面电场幅值与枪内储能的关系系数  $A = 3.325 \times 10^7 \text{ J}^{1/2} \text{ m/V}$ 。根据初步测量值, 腔链的固有无载品质因数  $Q_0 = 13000$ , 阴极采用直径为 3 mm 的单晶 LaB<sub>6</sub>, 零场发射电流  $I_0 = 1.2 \text{ A}$ 。图 2 中曲线 2 是在耦合度为 4.3、束流负载为 0 的情况下由式(4)得到的阴极表面的建场曲线, 建场曲线的计算结果与实验结果比较符合。

## 2 电子能量增益与最佳耦合度

在热阴极微波电子枪中, 电子进入加速腔链的初始时刻为  $t = 0$ 。通过解微分方程(4), 并令  $t \rightarrow \infty$ , 可得到腔链值储能的稳态值。利用电子能量增益  $W_e$  与储能  $U$  的关系

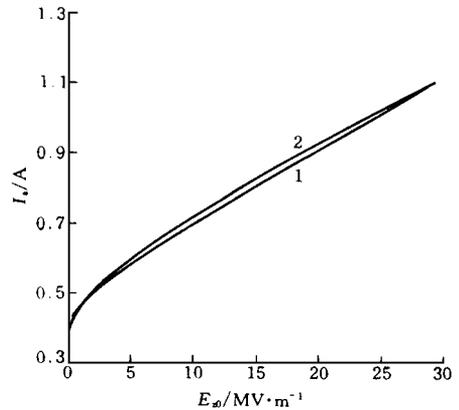


图 1 阴极发射电流  $I_a$  与阴极表面电场强度  $E_{z0}$  的关系曲线

Fig 1 Pulse current vs electric field strength at the cathode surface  
1——式(1)得出  $I_a$ - $E_{z0}$  的变化曲线;  
2——式(3)得出  $I_a$ - $E_{z0}$  的变化曲线

$$W_e = e(ZT^2L \frac{\omega U}{Q_0})^{1/2} \tag{6}$$

得到电子能量的增益公式

$$W_e = e(ZT^2L \frac{\omega}{Q_0})^{1/2} \cdot \frac{b^2 - 2ac - b\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a^2} \tag{7}$$

不考虑阴极的肖特基效应, 即令  $I_a = I$  为常数, 得到

$$\begin{cases} a = \frac{\omega}{Q_0} (\beta_c + 1) \\ b = 0 \\ c = 2(\frac{\omega P_0 \beta_c}{Q_0})^{1/2} [\frac{I}{2} (\frac{ZT^2L}{P_0 \beta_c})^{1/2} - 1] \end{cases} \tag{8}$$

代入式(7)得到

$$W_e = \frac{e}{\beta_c + 1} [2(\beta_c P_0 ZT^2L)^{1/2} - IZT^2L] \tag{9}$$

该式为驻波加速器的电子能量增益公式, 与文献[4]中得到的结论相同。

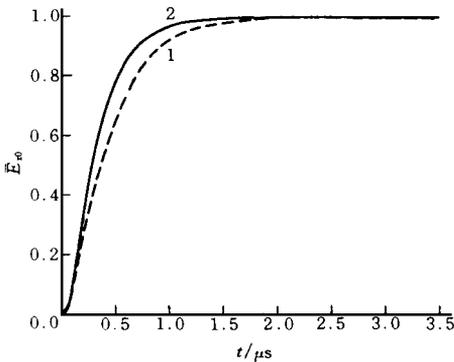


图 2 无载状态下建场的冷测及计算曲线

Fig 2 Experimental and calculation results of the RF fields transient process without beam loading  
1——冷测曲线; 2——计算曲线

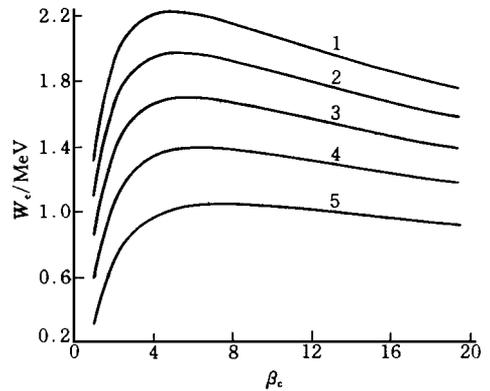


图 3 不同输入微波功率下的  $w_e - \beta_c$  曲线

Fig 3 Electron energy vs coupling at various input RF power  
1——2.4 MW; 2——2.0 MW; 3——1.6 MW;  
4——1.2 MW; 5——0.8 MW

仍以用于北京自由电子激光器的多腔热阴极微波电子枪为例, 给出其最佳耦合度的确定过程。有效分流阻抗  $ZT^2L$ , 阴极表面电场幅值与枪内储能的关系系数  $A$ , 腔链的固有无载品质因数  $Q_0$  等参数同上。阴极采用直径为 3 mm 的单晶 LaB<sub>6</sub>, 其零场发射电流强度  $I_0 = 1.2$  A。图 3 给出了在不同输入微波功率下, 该微波电子枪出口的电子能量增益与耦合度的关系曲线, 由曲线可得到不同入射微波功率下的最佳耦合度的值。

### 3 结论

热阴极微波电子枪中的束流动力学过程涉及到肖特基效应、空间电荷效应、电子反轰及其引起的阴极的热效应等,准确地确定其最佳耦合度是非常困难的。本文主要考虑了阴极发射电流的肖特基效应,在一定的近似下,给出了热阴极微波电子枪中的建场的瞬态过程。解析分析结果的意义在于,在阴极参数和腔形参数已知的情况下,可以得到不同入射微波功率下的最佳耦合度的值。

### 参 考 文 献

- 1 Halbach K, Holsinger RF. Superfish—A Computer Program for Evaluation of RF Cavities With Cylindrical Symmetry. Particle Accelerators, 1976, 7: 213-222
- 2 Palm C, van Rienen U, Weiland T. Umel and Umel-t User Guide: M-85-11. Hamburg: DESY, 1985
- 3 唐传祥. 用于北京自由电子激光器的多腔热阴极微波电子枪的研究[学位论文]. 北京: 清华大学工程物理系, 1996
- 4 林郁正. 低能电子直线加速器原理. 清华大学资料. 1982

## THEORETICAL INVESTIGATION OF THE TRANSIENT PROCESS IN RF GUNS WITH THERM IONIC CATHODE

Tang Chuanxiang Lin Yuzheng Tong Dechun

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

### ABSTRACT

In a RF gun with thermionic cathode, the electrons are drawn out of the cathode by RF fields at its surface. Due to the Schottky effect, the current in a RF gun is a function of time during the transient process. In this paper we treat the current function with a polynomial approximately, and obtain the differential equation of the transient process. Using the results of the paper the coupling of a RF gun from the relationship between the energy gain of electrons at the gun exit and the coupling can be optimized, if the parameters of the cathode and the accelerating cavities are known. These results have been used to design a multi-cavity RF gun with thermionic cathode successfully.

**Key words** RF guns with thermionic cathode Transient process Beam loading Optimum coupling