

# 微脉冲电子枪模拟计算\*

唐传祥 蒋占峰 田凯 王英 徐亿勇  
(清华大学工程物理系 北京 100084)

**摘要** 用模拟计算的方法,研究了微脉冲电子枪的束流动力学行为.基于微脉冲电子枪的工作原理和束流动力学特点,用 VC++ 语言编制了微脉冲电子枪的辅助设计软件——SEEG 对微脉冲电子枪中电子的三维运动进行多粒子跟踪模拟.文中给出了模拟计算的基本原理,经过 SEEG 程序稳定性的测试,最后应用 SEEG 程序模拟了一个微脉冲电子枪的束流运动特性.

**关键词** 微脉冲电子枪 二次发射电子 空间电荷效应 模拟计算

## 1 引言

随着加速器及高功率微波的不断发展,人们对强流电子源的要求也越来越高.利用次级电子倍增现象设计的微脉冲电子枪(Micro-Pulse Gun)是一个新兴的研究课题,它具有不需要外界激发、脉冲短、流强高、寿命长<sup>[1,2]</sup>等优点,非常适合应用于各类加速器及高功率微波源,具有广阔的应用前景.

微脉冲电子枪(也称为二次发射电子枪)是在次级电子倍增现象的基础上发展而来的.次级电子倍增现象早在 20 世纪 30 年代就被人们所认识,直到近年来才开始利用它制造电子枪.其基本原理如图 1 所示,两块平行金属板组成一对电极,极板的材料具有次级电子倍增特性.在两极之间加高频交变电场,由于电场的作用,极板表面会发射出一些电子.假设初始发射电子的为阴极,电子从阴极出发,由于受到电场的加速而向阳极运动.当电子到达阳极,由于极板材料具有电子倍增的特性,会在一个电子的撞击下产生多于一个的电子.如果此时电场刚好反向,这些新产生的电子就会在电场作用下向阴极运动,到达阴极时会倍增出更多的电子.通过选择适当的高频电压、极板间距、微波频率等参数<sup>[1]</sup>,可以使电子在极板间运动的时间恰为交变电压半周期的奇数倍,这样次级电子从极板发射出来时将处于

和初级电子逸出时相同的外界条件下.一旦这种过程开始,就会一直往复下去,电流不断振荡放大.微脉冲电子枪中阳极是一栅网结构,到达阳极的电子有一部分透射出去,形成电子枪的发射电流.振荡电流在二次电子倍增效应及电子空间电荷效应等因素的影响下最终达到饱和.

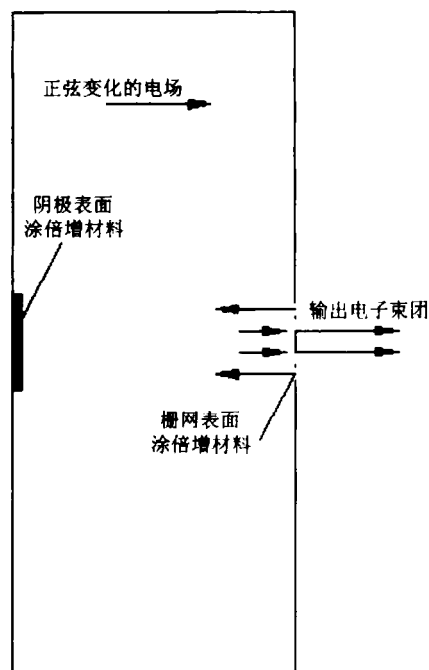


图 1 微脉冲电子枪原理图

2002-07-30 收稿,2002-10-17 收修改稿

\* 国家高技术发展计划 863 经费资助

国外对微脉冲电子枪的理论、模拟<sup>[3]</sup>和实验<sup>[4]</sup>研究均取得了相当大的进展,而国内在这方面的研究刚刚开始<sup>[5]</sup>.我们在理论分析的基础上,编写了 VC++ 程序,对电子的三维运动进行了模拟.我们在研究微脉冲电子枪粒子动力学基础上编写的模拟计算软件 SEEG (Secondary Electron Emission Gun) 经过初步测试,能比较形象地反映微脉冲电子枪中电子运动的物理过程,为微脉冲电子枪的设计提供了方便的工具.

## 2 模拟的原理

微脉冲电子枪中电子运动的物理过程具有以下特点:1) 电子能量低,电子的运动速度随时间变化较大;2) 电子束团在微波电场及空间电荷效应的共同作用下运动,微波电场使电子聚束,而空间电荷效应使电子束团纵向散开;3) 电子束团在到达阴极及阳极时存在电子倍增效应,并且在阳极栅网处,电子束团部分输出.基于以上特点,在对微脉冲电子枪电子运动过程的模拟计算中,对时间、空间及空间电荷力计算过程等作了离散化处理.

在模拟计算中,采用宏粒子的概念,即用一定数量的宏粒子来模拟一定电量的电子束团.每个宏粒子除了自身的空间位置及动量等运动状态外,还具有半径和电量.两个运动宏粒子之间的空间电荷力的计算见公式(1).两个宏粒子之间的距离如果小于宏粒子半径,则计算空间电荷作用力时,宏粒子间距取为宏粒子半径.这样避免了为了减少计算量而引入宏粒子所带来的当两个宏粒子相距过近产生的模拟计算突然发散的现象.宏粒子半径的选择很重要,宏粒子半径太小可能还会引起模拟计算发散,太大则使对空间电荷力的计算偏小,致使宏粒子快速相聚.因此宏粒子半径需要通过 SEEG 程序测试后确定.

$$F_s = \begin{cases} \frac{1}{4\pi\epsilon_0\gamma} \frac{q_1 q_2}{r^2} & r > r_0 \\ \frac{1}{4\pi\epsilon_0\gamma} \frac{q_1 q_2}{r_0^2} & r \leq r_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $F_s$  为两个运动宏粒子之间的空间电荷力,  $q_1$ ,  $q_2$  分别为两个宏粒子的电量,  $r_0$  为宏粒子的半径,  $r$  为两个宏粒子的间距,  $\gamma$  为运动粒子的相对论能量.

在时间离散化的过程中,把时间离散成有限步长,每个时间步长  $dt$ .空间在  $z$  方向离散化成许多小格子,各个格子内有数个宏粒子不等,格子的存在

是为了计算空间电荷力方便,格子是根据电子团的位置和形状动态划分的,在每个时间步长  $dt$  都重新划分网格并统计每个格子中的电量.

空间电荷效应也是离散化的,一个宏粒子受到的空间电荷力由以下两部分叠加而成:

(1) 与该宏粒子在相同格子内的宏粒子对它的电磁力之和.在计算中采用“点-点”计算,如图 2 所示.

(2) 与该宏粒子不在相同格子的宏粒子对它的电磁力之和.因为其他格子内的宏粒子与该宏粒子的距离相对较远,因此计算中把一个格子里的所有宏粒子的空间位置都近似在该格子的中心.

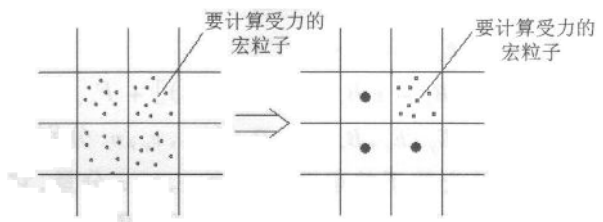


图 2 计算空间电荷力的简化模型

## 3 计算公式

宏粒子的位置和速度是连续量,每过一个  $dt$ ,都要重新递推一次,递推方法如下:

如果宏粒子不碰壁,则直接根据狭义相对论,由  $x, y, z$  方向的速度得出各方向动量,见公式(2):

$$\begin{cases} \gamma_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_{x1}^2 - \beta_{y1}^2 - \beta_{z1}^2}} \\ p_{x1} = m_0 \gamma_1 v_{x1} \\ p_{y1} = m_0 \gamma_1 v_{y1} \\ p_{z1} = m_0 \gamma_1 v_{z1} \end{cases} \quad (2)$$

由此根据动量定理可以得到经过下一个时间步长后各方向的动量分量:

$$\begin{cases} p_{x2} = p_{x1} + F_x \cdot dt \\ p_{y2} = p_{y1} + F_y \cdot dt \\ p_{z2} = p_{z1} + F_z \cdot dt \end{cases} \quad (3)$$

宏粒子新的空间位置及  $x, y, z$  方向的速度分别通过公式(4),(5)计算:

$$\begin{cases} x_2 = x_1 + v_{x1} \cdot dt \\ y_2 = y_1 + v_{y1} \cdot dt \\ z_2 = z_1 + v_{z1} \cdot dt \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} v_{x2} = \frac{p_{x2} \cdot c}{\sqrt{p_{x2}^2 + p_{y2}^2 + p_{z2}^2 + (m_0 c)^2}} \\ v_{y2} = \frac{p_{y2} \cdot c}{\sqrt{p_{x2}^2 + p_{y2}^2 + p_{z2}^2 + (m_0 c)^2}} \\ v_{z2} = \frac{p_{z2} \cdot c}{\sqrt{p_{x2}^2 + p_{y2}^2 + p_{z2}^2 + (m_0 c)^2}} \end{cases} \quad (5)$$

其中的  $F_x, F_y, F_z$  是该宏粒子在微波和空间电荷产生的电磁场中受到电磁场力的各方向分量:

$$\begin{cases} F_x = q [ E_x \sin(\omega t + \phi_0) + (v_y B_z - v_z B_y) \cos(\omega t + \phi_0) ] + F_{i,x} \\ F_y = q [ E_y \sin(\omega t + \phi_0) + (v_z B_x - v_x B_z) \cos(\omega t + \phi_0) ] + F_{i,y} \\ F_z = q [ E_z \sin(\omega t + \phi_0) + (v_x B_y - v_y B_x) \cos(\omega t + \phi_0) ] + F_{i,z} \end{cases} \quad (6)$$

上式中的  $E_x, E_y, E_z, B_x, B_y, B_z$  及  $v_x, v_y, v_z$  分别为电场、磁场及宏粒子的运动速度的  $x, y, z$  分量, 它们都是空间位置的函数.  $\omega$  为高频场的角频率,  $\phi_0$  为宏粒子进入谐振腔的初始相位.  $F_{i,x}, F_{i,y}, F_{i,z}$  分别为宏粒子受到的空间电荷力在  $x, y, z$  方向的分量.  $q$  为宏粒子的电量.

如果宏粒子打到阴极或栅网上, 情况相对比较复杂. 电子打到倍增材料上后, 倍增电子的产生存在一定的延时, 一般延时几个 ps. 所以判断一个时刻是否有倍增的宏粒子出来, 主要取决于两点: (1) 在延时时间之前是否有宏粒子打到阴极或栅网上; (2) 新产生的倍增粒子受到的总的电磁场力的方向是否允许倍增粒子进入谐振腔.

### 4 稳定性测试

在计算机模拟的过程中, 为了将复杂问题简单化, 将时间、空间及某些物理量的计算离散化, 必然导致模拟结果与实际结果出现偏差. 当这些量不断细化, 模拟结果将不断接近真实情况, 当细化到一定程度时, 模拟结果的变化很小, 就可以认为模拟结果与实际情况非常接近, 可以满足误差要求. 图 3 给出了在其他条件不变的情况下, 单独变化时间步长、参与计算的宏粒子数目、计算区域划分网格的数目及宏粒子半径等离散化参数时, SEEG 程序计算得到的  $x$  方向几何发射度的变化趋势.

在图 3(a) 的模拟计算中把一个高频周期  $T$  划分成  $NT$  个时间步长  $dt$ .  $NT$  的数目越大,  $dt$  越小, 越接近实际情况. 由图 3(a) 可见, 当时间步长  $dt <$

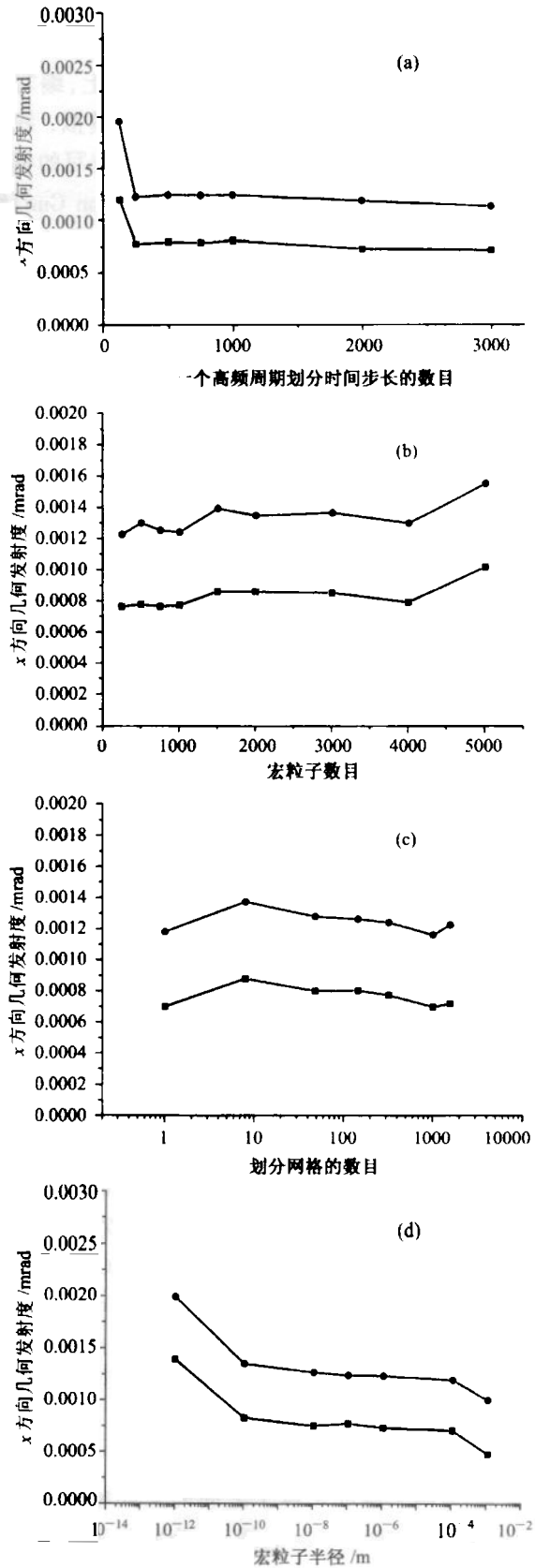


图 3 SEEG 程序稳定性测试结果

● 统计所有宏粒子的结果, ■ 只统计打到栅网范围内的宏粒子.

$T/1000$  时, SEEG 的模拟计算已经基本稳定. 图 3

(b)给出了宏粒子数目对模拟计算结果的影响. 宏粒子数目太少或太多都会使计算产生较大的误差. 宏粒子数目在 1500—4000 之间的模拟计算相对稳定. 与其他的多粒子跟踪模拟计算不同, 在微脉冲电子枪中, 当宏粒子到达阴极或作为阳极的栅网时, 会产生倍增现象. 为了减小计算量, 在倍增发生时, SEEG 程序不改变宏粒子的数目, 而是增加宏粒子的电量. 因此, 在宏粒子初始电量不变的条件下, 增加宏粒子的数目意味着增大了微脉冲电子枪中的初始发射电流密度. 图 3(c)给出了空间划分的网格数目对模拟计算的影响. 空间网格的划分主要目的在于简化空间电荷力的计算. 如前所述, 每个宏粒子受空间电荷力的计算分两部分, 一是来自本格子内的宏粒子的力通过“点-点”计算, 另外来自其他格子内的宏粒子的力以网格为单位计算. 因此当格子只有一个时, 所有宏粒子的受力只能按第一种情况进行“点-点”计算. 而当网格划分的足够细的时候, 每个格子里最多只能有一个宏粒子时, 宏粒子的受力按第二种情况逐格计算, 该计算等效于第一种情况的“点-点”计算. 因此在图 3(c)中, 随着网格数目的增大, 计算结果逐渐接近一个网格点的计算结果, 同时计算量也逐渐增大. 当网格数目大于 1000 时, 计算结果基本趋于稳定. 由图 3(d)的模拟计算结果可见, 宏粒子半径在  $10^{-5}$  m 到  $10^{-10}$  m 之间时, 计算结果比较稳定.

### 5 计算实例

这里给出了利用 SEEG 程序对一个由简单的圆柱型谐振腔组成的微脉冲电子枪的模拟计算结果. 微脉冲电子枪的原理结构如图 1 所示, 圆柱形谐振腔的一个底面涂倍增材料作为阴极, 而另一底面由具有一定透出率并涂有倍增材料的栅网组成阳极. 谐振腔内馈入微波形成的 TM010 模的电磁场. 具体模拟计算的条件如表 1 所示.

表 1 圆柱型微脉冲电子枪的模拟实验参数设置

腔形参数		模拟参数	
腔体半径	3.827cm	一个高频周期步长数	3000
腔长	0.6cm	计算周期数	20
倍增材料	MgO	宏粒子半径	$10^{-7}$ m
栅网透出率	0.8		x 向 8 格
阴极及栅网的半径	5mm	网格划分	y 向 8 格
			z 向 8 格
1. 作条件			
微波频率	2.998GHz	宏粒子数目	1500
腔内电压幅值	21.5kV	粒子运动的最大半径	10mm

模拟计算结果如图 4 所示, 给出了该微脉冲电子枪输出束流的各项特性. 饱和后输出电流密度的峰值平均约为  $24.72\text{A}/\text{cm}^2$ , 电流密度峰值所在的相

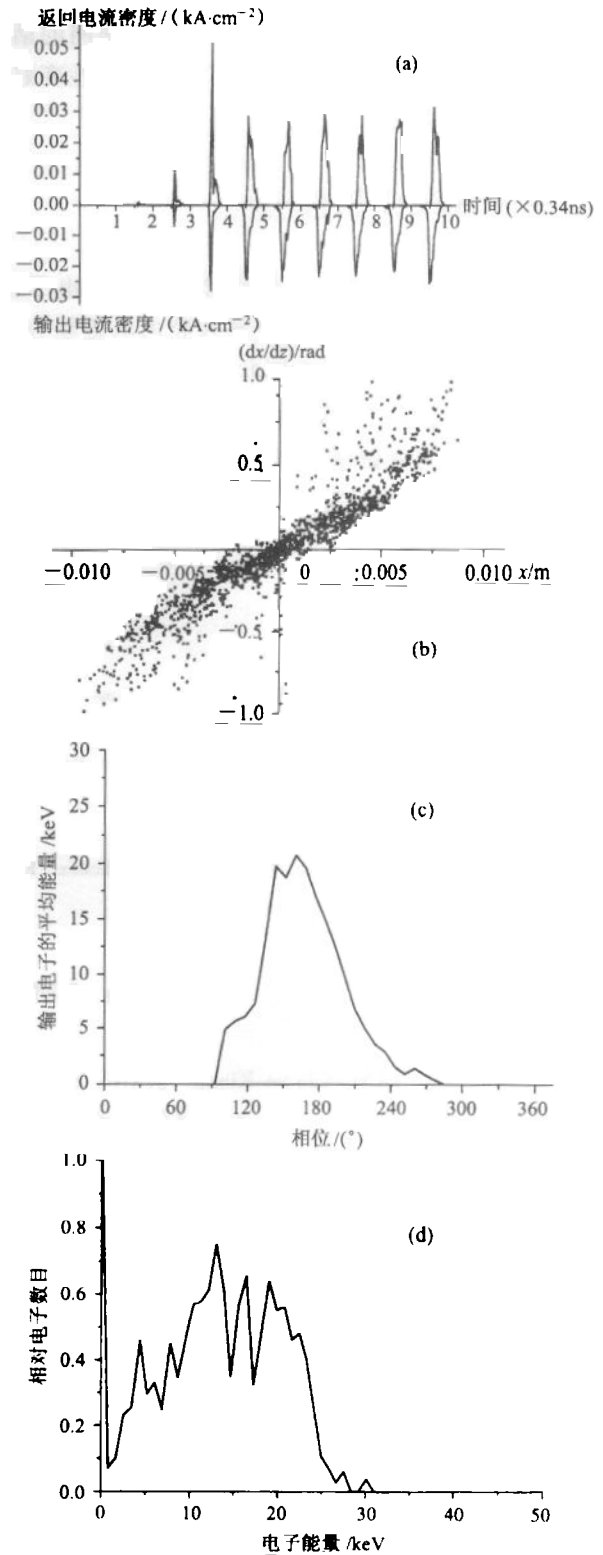


图 4 电子枪输出束流特性  
 (a) 电流密度; (b) 横向相空间图; (c) 输出电子能量随相位变化; (d) 电子在能量上的统计分布.

位在  $190^\circ$  左右, 半高宽约 50ps, 约占一周期的 15%。x 方向几何发射度  $1.046 \times 10^{-3}$  mrad, y 方向几何发射度  $1.003 \times 10^{-3}$  mrad。输出电子能量随时间的变化的峰值在相位  $170^\circ$  左右, 两侧降低, 因此如果在栅网外侧再加一层具有适当的选择电压的栅网的话, 就可以滤掉低能电子, 不但使束团的能散特性变好, 而且可以使束团变窄。

## 6 关于 SEEG 软件

SEEG 完全可以对更复杂形状的微脉冲电子枪进行模拟计算。程序具有一个导入腔内电磁场分布的接口函数, 以此对于复杂形状的微脉冲电子枪, 只要它的各项参数和工作条件确定, 即可先用 mafia 等软件算出腔内的电磁场分布, 然后将数值结果输入 SEEG 程序进行模拟计算。

SEEG 的运算时间随时间递推步数的增加和宏粒子数目的增加而加长。根据前面稳定性测试的结果, 一个周期分 2000 步, 用 2000 个宏粒子就基本上可以满足误差要求, 在奔腾 III 处理器的计算机上运行时间大约是一个小时; 如果只是定性地观看现象或分析问题, 可以选择更少的递推步数和宏粒子数目, 大大缩短运行时间。

## 7 结论

综上所述, 在微脉冲电子枪工作原理和束流动力学基础上编写的 SEEG 软件, 能比较准确全面的反映腔内电子的运动, 它为微脉冲电子枪的设计提供了一个有效的手段, 可以作为微脉冲电子枪的辅助设计软件。目前, 清华大学正利用该程序进行一个微脉冲电子枪的动力学设计。

## 参考文献 (References)

- 1 Len L K, Mako Frederick M. Self-Bunching Electron Guns. Proc. Particle Accelerator Conf. New York, 1999
- 2 Mako Frederick M, Peter William. A High-Current Micro-Pulse Electron Gun. Proc. Particle Accelerator Conf. IEEE Cat 93CH379-1, 2702, 1993
- 3 Mako Frederick M, Peter William. European Patent Application. European Patent Office, May 21, 1997
- 4 Guharay S K, Len L K, Mako F. High-Current Micro-Pulse Electron Guns and Accelerator Applications. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago
- 5 HE Wen-Can, PEI Yun-Ji, JIN Kai et al. High Power Laser and Particle Beams, 2001, 13(5):615 (in Chinese)  
(何文灿, 裴元吉, 金凯等. 强激光与粒子束, 2001, 13(5):615)

## Simulation of Micro-Pulse Electron Guns\*

TANG Chuan-Xiang JIANG Zhan-Feng TIAN Kai WANG Ying XU Yi-Yong

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

**Abstract** The beam dynamics in micro-pulse electron guns (MPG) is studied using simulation methods in this paper. Based on the working principle of MPGs and the characteristics of its beam dynamics, a multi-particle trace simulation about the three-dimensional movement of the electrons in a MPG cavity is given by a program SEEG (Secondary Electron Emission Gun) written in VC++ . The paper includes the principles of simulation and the stability tests of the program SEEG. A specific MPG is simulated using the program SEEG and the simulated beam dynamic results are given.

**Key words** micro-pulse electron gun, secondary electron emission, space charge effect, simulation

Received 30 July 2002, Revised 17 October 2002

\* Supported by National 863 High Technology Project