

文章编号: 1001-4322(2003)08-0788-05

微脉冲电子枪的动力学研究*

唐传祥, 田 凯, 陈怀璧, 李泉凤, 蒋占峰, 王 英, 徐亿勇

(清华大学 工程物理系, 北京 100084)

摘 要: 利用 SEEG 程序模拟计算了微脉冲电子枪束流动力学问题。在不考虑空间电荷效应的情况下, 模拟了在微脉冲电子枪中电子纵向聚束的过程。进而详细研究了在空间电荷效应作用及相聚过程共同作用下形成饱和电流的过程。在此基础上, 给出了经过优化后的微脉冲电子枪腔型特性, 使用 SEEG 程序对该枪进行束流动力学模拟计算。最后给出一个实验用微脉冲电子枪的物理设计。

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

中图分类号: TL54

文献标识码: A

微脉冲电子枪(也称为二次发射电子枪)主要基于微波电子枪及次级电子倍增的物理原理而工作的^[6]。国外对微脉冲电子枪的理论、模拟和实验研究均取得了相当大的进展^[1~4], 而国内在这方面的研究刚刚开始^[5~7]。在理论分析的基础上, 我们编制了二次发射电子枪模拟计算程序 SEEG, 并对电子在微脉冲电子枪中的三维运动进行了模拟^[6]。利用 SEEG 对微脉冲电子枪的束流动力学特性进行了进一步的研究, 在此基础上对一个 S 波段的二次发射电子枪进行了物理设计。

本文将给出 SEEG 程序模拟微脉冲电子枪束流动力学参数的一些具体结果, 以及 S 波段微脉冲电子枪物理设计的初步结果。

1 不考虑空间电荷效应的电子的纵向运动

在忽略电子之间的空间电荷力作用的简化条件下, 模拟了电子在微波场作用下在圆柱型的微脉冲电子枪中的运动。计算条件为: 微波场在腔体内建立起电场的峰值电压 $V_{rf} = 148\text{kV}$, 微波谐振频率 $f = 2.998\text{GHz}$, 谐振腔的长度 $d = 1.5\text{cm}$, 在模拟的过程中, 将微波电场简化为正弦场, 把一个微波周期分成 1000 份, 即 $dt = T/1000$ 。在每个 dt 内对电子的位置进行计算, 计算的公式为

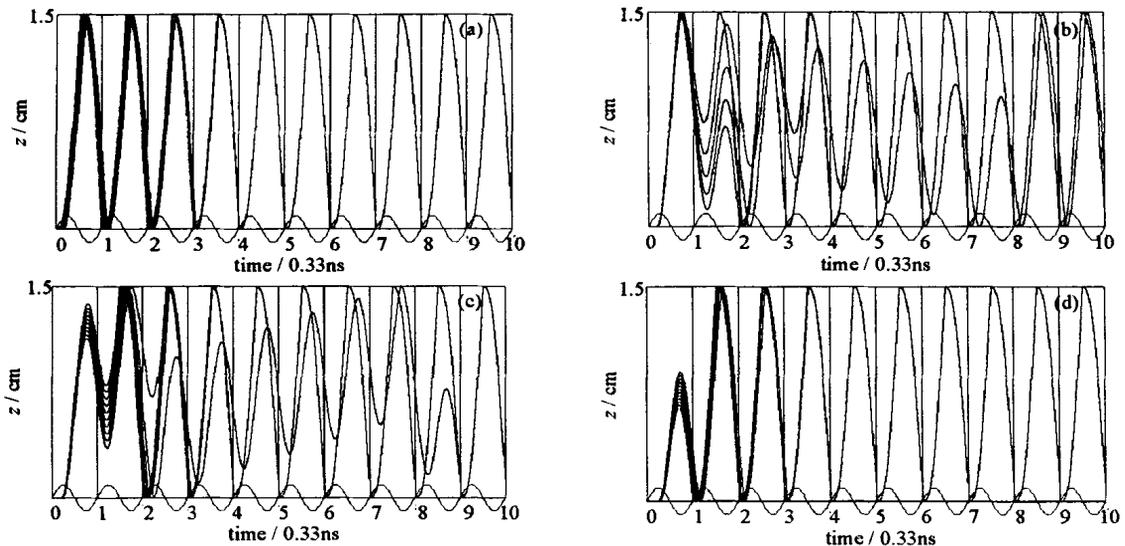


Fig. 1 Trace of the electrons emitting at different phase

图 1 不同发射相位的电子运动轨迹

* 收稿日期: 2003-01-24; 修订日期: 2003-04-13

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 唐传祥(1967-), 男, 副研究员, 从事加速器物理和高亮度注入器的研究; E-mail: tang.xuh@mail.tsinghua.edu.cn.

$$z_2 = z_1 + v_1 dt \tag{1}$$

$$p_2 = p_1 + V_{rf} \sin(\omega t + \phi) e dt / d \tag{2}$$

$$v_2 = p_2 / (m_0^2 + p_2^2 / c^2)^{1/2} \tag{3}$$

式中： z_2, p_2, v_2 分别为 $t + dt$ 时刻电子的位置、动量和速度； z_1, p_1, v_1 分别为 t 时刻电子的位置、动量和速度； m_0 为电子静止质量； e 为电子电量； c 为真空光速； ϕ 为电子在 0 时刻出射的相位。

基于上述的原理,对 0~180° 相位出射的所有电子的轨迹进行模拟计算,发现部分相位的电子有汇聚现象。图 1 给出其中一些相位区间的电子运动轨迹。其中横轴是时间,共 10 个周期,正弦波表示电场力,纵轴是电子的纵向位置。图 1(a) 表示出射相位为 0~60° 的电子在一个周期内的相位收敛情况:不同相位的电子逐渐收敛,直到完全同步。图 1(b),1(c) 和 1(d) 则分别表示了出射相位为 65~69°,74~83° 和 92~103° 的电子汇聚的情况。可以看到在这些相位上的一些电子不能在第一个周期就运动到栅网,很多电子经过几个周期才第一次运动到栅网,因而在这些相位上的电子无法形成比较稳定的共振。

2 对饱和电流密度的模拟计算

为了更好的对微脉冲电子枪中的粒子动力学特性进行研究,在考虑了电子之间的空间电荷力之后,我们使用 SEEG 程序进一步模拟了电子在圆柱腔中的纵向往复运动,并且进行了一系列的模拟实验,得出饱和电流的特性,下面就介绍一下这些模拟实验的结果。

2.1 达到饱和的过程中电流密度的变化情况

实验条件:腔长 $d = 1.5\text{cm}$,腔里电压幅值 $V_{rf} = 148\text{kV}$,频率 $f = 2.998\text{GHz}$,倍增系数 $m_{ul} = 10$,透出率 $T_T = 0.9677$,出射电子能量阈值设在 0,倍增延时 2.1ps。

计算结果如图 2 所示,上半部分是反射回来的电流密度,下半部分是射出的电流密度。从图中可以看到经过大概 10 个微波周期,腔内的电流达到饱和值。

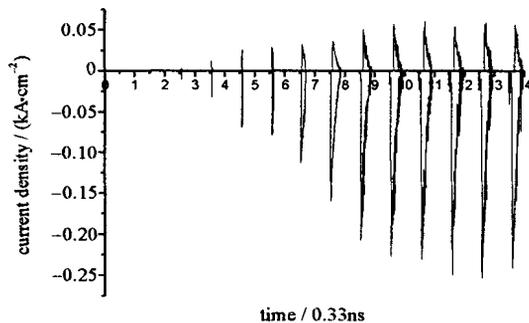


Fig. 2 Plot for current density vs time

图 2 电流密度随时间变化的曲线

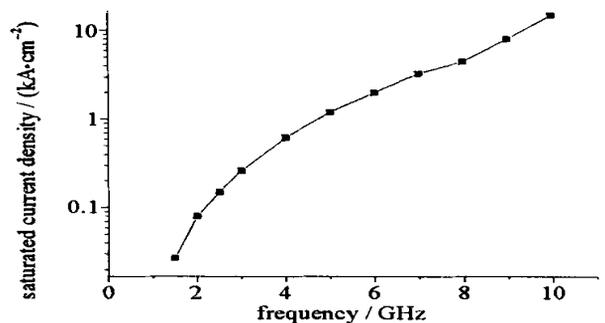


Fig. 3 Saturated current density vs frequency

图 3 饱和电流密度与频率的关系

2.2 饱和电流密度与频率的关系

实验条件:选取谐振腔的长度为 1cm,共振电子的出射相位定在 9.7°,由微脉冲电子枪的共振放大条件决定腔里电压幅值 V_{rf} ,选取倍增系数 $m_{ul} = 20$,透出率 $T_T = 0.9677$,出射电子能量阈值设在 $eV_{rf}/2$,倍增延时 2.1ps。使用 SEEG 计算出改变谐振频率所得到的饱和电流密度,关系曲线如图 3 所示。可以看出饱和电流密度大致与谐振频率的 3 次方成正比关系,这与理论结果^[2]是一致的。

2.3 饱和电流与归一化电压的关系

归一化电压 V_0 是一个无量纲量,它是设计微脉冲枪的一个重要参数,涉及与电压、频率和尺寸之间的关系。以 ω 表示微波的圆频率,则它的解析表达式为

$$V_0 = eV_{rf} / m_0 (d)^2 \tag{4}$$

取圆柱谐振腔的长度 d 分别为 1 和 2cm,将谐振频率设置为 2GHz,然后在 0.20~0.34 之间给 V_0 取值,把 V_0 的数值再代入到公式(4)当中,可以得到其对应的 V_{rf} 的数值。以 V_{rf} 作为 SEEG 程序初始条件进行模拟计算,就可以得到在该条件下的饱和电流密度,这样就建立起了一组 V_0 与饱和电流之间的关系,最后将它们的关系绘成曲线,如图 4 所示。

试验中,其它参数设置为:倍增系数 $m_{ul} = 10$,透出率 $T_T = 0.9677$,出射电子能量阈值为 0,倍增延时为

5ps。从图中可以得到了 V_0 的最佳值 0.33,而在文献 [3]中得到的最佳值是 0.37。这可能是由于不同的模拟方法和精确程度导致了此值的变化。从非相对论的理论出发,可以得到 V_0 的表达式为

$$V_0 = eV_{d1} / m(\omega d)^2 = 1 / (\cos^2 + 2\sin^2) \quad (5)$$

可见这是个与共振相位紧密相关的量。关于它的相对论表达式,尚无完善的理论推导。

3 微脉冲电子枪的物理设计

3.1 微脉冲枪的腔型特性

根据 SEEG 程序模拟计算的结果,结合阴极倍增材料的特性,设计并优化了微脉冲电子枪的腔型,如图 5 所示;腔型主要尺寸参数见表 1。

表 1 微脉冲电子枪的腔型参数

D /mm	h /mm	R_1 /mm	R_2 /mm	Z /mm	l /mm
56.08	4	11.5	1.5	6	8

在实际的电子枪中,阴极的位置会有一些变化,这会对腔体的频率造成一些影响。因此,在阴极的上方,留有一个突起 0.3mm 的小平台,作为加工余量。使用 SUPERFISH 程序计算了阴极位置的扰动对腔体谐振频率的影响。其中阴极半径大小为 5mm,计算结果如表 2,3 所示。表 2 为阴极位置改变的情况下,腔体的物理参数的变化;表 3 是在栅网位置发生改变后,腔体物理参数的数值。其中 Z 表示栅网与阴极表面之间的距离, f 为腔体谐振频率, T 为渡越时间因子, ZT^2 为单位长度的有效分流阻抗, Q 为本征品质因数。

分析表 2 和表 3 中的数据,可以发现阴极和栅网的位置扰动对腔体的本征品质因数等参数影响不大,但是对谐振频率的影响值得注意。当栅网和阴极之中的任一个位置固定的时候,腔体的谐振频率随着栅网和阴极之间的距离 Z 的增大而增大,随着 Z 的减小而减小。其中栅网的位置扰动对频率的影响要大于阴极位置扰动对频率的影响,这就要求在实际的安装过程中,要对栅网的位置有比较精密的测量。同时,通过调整栅网和阴极的位置也可以对电子枪的谐振频率进行适度的调整。

表 2 阴极位置扰动的影响

Z /mm	f /MHz	T	ZT^2 /(M \cdot m $^{-1}$)	Q
6.9	3 012.685 09	0.704 972 8	55.329	7 091.25
6.6	3 009.205 08	0.699 328 7	56.861	7 085.59
6.3	3 004.436 70	0.691 603 5	58.176	7 078.03
6	2 997.662 60	0.681 631 1	59.217	7 067.71
5.7	2 987.714 02	0.669 476 3	59.923	7 048.66
5.4	2 974.711 37	0.655 626 3	60.377	7 023.15
5.1	2 958.716 93	0.640 475 5	60.643	6 991.11

表 3 栅网位置扰动的影响

Z /mm	f /MHz	T	ZT^2 /(M \cdot m $^{-1}$)	Q
6.9	3 034.938 41	0.592 053 3	39.589	7 123.07
6.6	3 025.188 61	0.621 222 0	45.339	7 107.95
6.3	3 013.063 56	0.651 147 5	51.864	7 089.73
6	2 997.662 60	0.681 631 1	59.217	7 067.71
5.7	2 977.654 90	0.712 481 2	67.315	7 027.27
5.4	2 952.928 52	0.74 3091 1	76.166	6 976.38
5.1	2 923.182 44	0.773 019 6	85.720	6 914.53

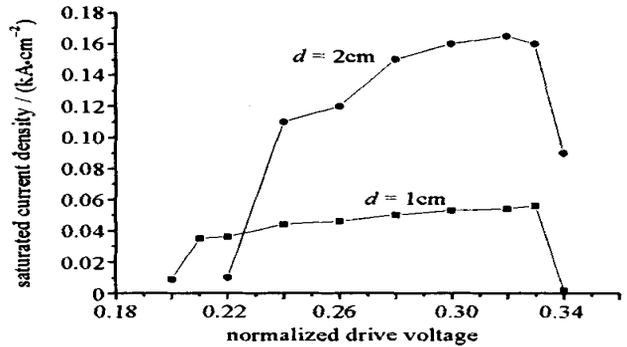


Fig. 4 Relationships between normalized voltage V_0 and saturated current density

图 4 归一化电压 V_0 与饱和电流密度之间的关系

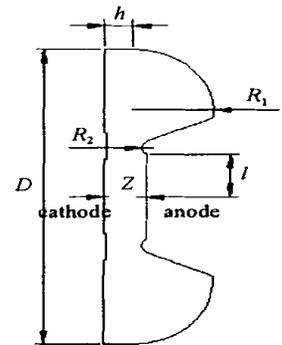


Fig. 5 Geometric shape of the cavity
图 5 腔体几何形状

3.2 微脉冲枪的束流动力学特性

使用 MAFIA 程序可以计算出上节确定的腔中的电磁场分布,进而将场型分布文件导入到 SEEG 程序中对其进行动力学计算。模拟计算的物理条件为:倍增材料 MgO,栅网透速率 0.8,微波频率 2 998.484MHz,腔内电压幅值 21.5kV。

模拟计算结果如图 6 所示,图 6 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平均峰值约为 29.2A/cm²,电流饱和后,每个周期的平均束流吸收功率为 96.76kW,电流密度峰值所在的相位在 180 左右,半高宽约 50ps,约占一周期的 15%。x 方向几何发射度 1.006 × 10⁻³m rad,y 方向几何发射度 9.98 × 10⁻⁴m rad。输出电子能量随时间的变化的峰值在相位 170 左右,两侧降低。

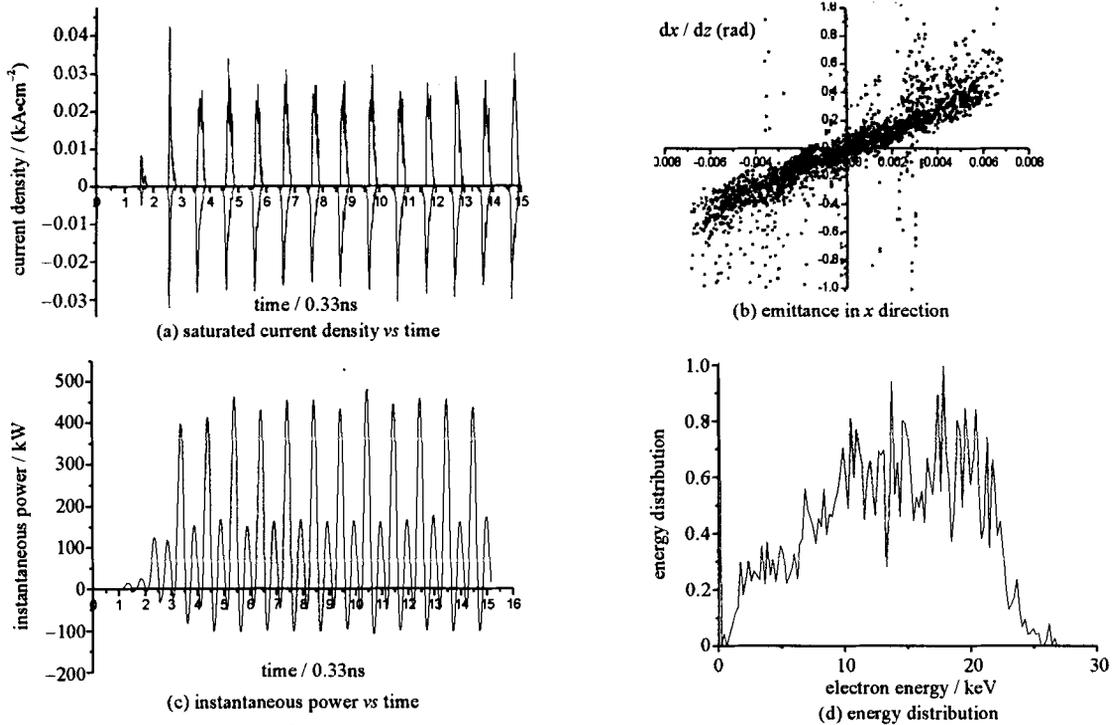


Fig. 6 Dynamics simulation results of a MPG

图 6 微脉冲枪束流动力学模拟计算结果

3.3 微脉冲电子枪的设计

以 SEEG 的模拟计算结果为依据,清华大学设计了一个微脉冲电子枪实验枪。目前正在加工当中。该枪的剖面结构简图如图 7 所示。整个系统工作频率为 2.998 GHz。其中腔体为柱状,工作模式 TM₀₁₀模。

4 结论

本文在文献[6]中对模拟程序 SEEG 稳定性的测试的基础上,使用该程序系统地研究了微脉冲电子枪中的束流动力学特性,结果与国外的文献相符合。这既验证了 SEEG 程序对束流动力学模拟的可靠性,同时为进一步设计微脉冲电子枪提供了很好的理论基础。目前,我们已经完成一个实验用微脉冲电子枪的设计工作,该枪正在加工过程当中。

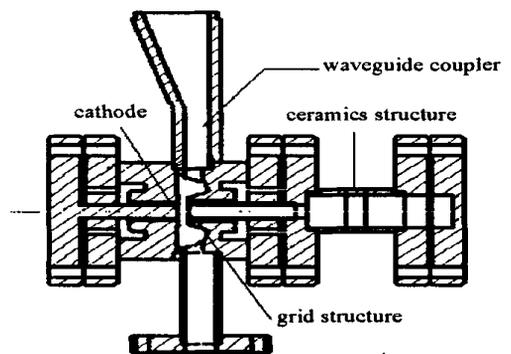


Fig. 7 Scheme of the micro pulse gun

图 7 微脉冲电子枪的结构图

参考文献:

[1] Len L K, Mako F M. Self-bunching electron guns[A]. Proceedings of the 1999 particle accelerator conference[C]. New York: Brookhaven National Laboratory, 1999, 1:70-74.

[2] Mako F M, Peter W. A high-current micro-pulse electron gun[A]. Proceedings of particle accelerator conference[C]. Washington DC: the American Physical Society, 1993, 4:2702-2704.

- [3] Mako F M, Peter W. Electron Gun[R]. US:EP0809271A2, 1997.
- [4] Guharay S K, Len L K, Mako F. High-current micro-pulse electron guns and accelerator applications[A]. Proceedings of the 2001 particle accelerator conference[C]. Chicago, 2001.
- [5] 何文灿,裴元吉,金凯,等. 二次发射微波电子枪的模拟计算及其特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(5):615—618. (He W C, Pei Y J, Jin K, et al. Simulation and analysis of secondary emission microwave electron gun. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(5):615—618)
- [6] 唐传祥,蒋占峰,田凯,等. 微脉冲电子枪模拟计算[J]. 高能物理与核物理, 2003, 27(6):546—550. (Tang C X, Jiang Z F, Tian K, et al. Simulation of micro-pulse electron guns. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2003, 27(6):546—550)
- [7] Yang X F, Xu Z, Jin X, et al. The research of micro-pulse gun[A]. Proceedings of the third international symposium on pulsed power and plasma applications[C]. Mianyang, Sichuan Province, 2002. 433—466.

Beam dynamics researches on micro-pulse electron gun

TANG Chuanxiang, TIAN Kai, CHEN Huaibi, LI Quanfeng, JIANG Zhanfeng, WANG Ying, XU Yiyong
(*Engineering Physics Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: In this paper, the beam dynamics in micro-pulse electron gun (MPG) is studied using SEEG (Secondary Electron Emission Gun) program. First, without the consideration of the space charge effect, the process of longitudinal direction beam bunching in MPG is given. Second, the formation of the saturation current affected by the space charge effect and bunching effect is studied in details. Then, the design and optimization of the micro-pulse gun cavity and the simulation results of the cavity by SEEG are given. At last, the scheme of a experimental micro-pulse gun designed by Tsinghua University is introduced.

Key words: Micro-pulse electron gun; Secondary electron emission; Space charge effect; Bunching effect; Dynamics simulation