

紧凑型静电加速管的原理设计

祝大军¹, 雷翔¹, 严萍²

(1. 电子科技大学物理电子学院 成都 610054; 2. 中国科学院电子研究所 北京 海淀区 100080)

【摘要】提出了利用紧凑型静电加速管对强流相对论电子束进行加速的概念。通过理论分析及粒子模拟,对1 kA、500 kV的初始入射电子束,在约0.8 m的加速段加速使其达到10 MeV,在没有聚束磁场的前提下电子束可以得到传输和加速。通过优化设计可使加速腔的最大场强降为 $20 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

关键词 静电加速管; 强流相对论电子束; 数值模拟; 最大场强
中图分类号 O411.3 **文献标识码** A

Design of a Novel Compact Electrostatic Accelerator Cube

ZHU Da-jun¹, LEI Xiang¹, and YAN Ping²

(1. School of Physical Electronics, University of Electronics Science and Technology of China Chengdu 610054;
2. Institute of Electronics, China Academy of Science Haidian Beijing 100080)

Abstract This paper presents a novel conception that intense relativistic electron beam is accelerated by compact electrostatic accelerator cube. According to the theoretic analysis and PIC, the electron beam with current 1 kA and initial voltage 500 kV is accelerated in the accelerator of 0.8 m and it becomes 10 MeV. The beam is transported and accelerated without focusing magnetic field. The biggest electronic field can be decreased 20 MV/m by optimization design.

Key words compact electrostatic accelerator cube; intense relativeistic electron beam; PIC; the biggest electronic field

1931年美国的Tuve在范德格拉夫研制成电压高达1.5 MV的静电高压发生器,并在1933年用其成功地建成了静电加速器。由于静电加速器结构简单、成本相对较低且束流稳定可调等特点,因而一直是1~6 MeV能量范围内最常用和最接近理想的加速器^[1]。提高能量也一直是发展静电加速器的基本动力^[2]。现有的静电加速管将1 kA、500 kV的强流相对论电子束的能量提高到十兆伏级较为困难,随着科学技术和材料绝缘性能的提高,对静电加速器的加速管结构进行优化,通过该结构对电子束加速来获得强流电子束。

1 紧凑型静电加速器物理模型的建立

1.1 结构模型的建立

根据电子光学原理,本文将多个单膜孔电极片组合形成的紧凑型静电加速管如图1所示。粒子的加速过程在加速腔中进行,加速通道总长为0.8 m,共有9个电极,板间的距离为99 mm,加速通道半径为

100 mm。

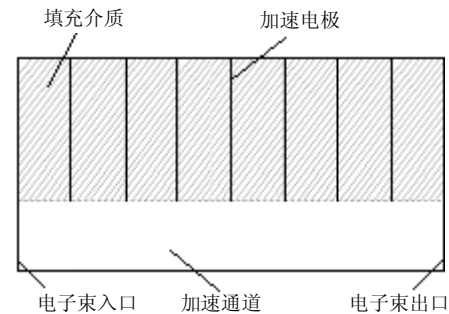


图1 紧凑型静电加速器

1.2 电子束流源及加速电场的建立

在实际的加速器中电子束流由注入器产生,发射采用爆炸式发射,进入加速腔时已经形成一定能量的电子束。在数值模拟过程中没有考虑注入器模型,采用在加速腔入口前端的束发射模型,产生1 kA、0.5 MeV的电子束流,以此作为束流源。

由于电子束流由注入器产生,而每个加速电极由一个圆孔膜片构成,根据电子光学原理可以将加

速电极看作一个浸没物镜, 因此, 每个电极上的电位分布可以由单膜孔的电位分布解析式改写得到^[3-4]:

$$V_i(z) = -\frac{1}{2}(E_{i1} + E_{i2})z + \frac{R}{\pi}(E_{i1} - E_{i2})\left(\frac{z}{R}\arctan \mu + 1\right) + V_{i0} \quad (1)$$

而在圆孔膜片中心($r = z = 0$)有:

$$V_{i0}(0) = \frac{R(E_{i1} - E_{i2})}{\pi} + V_i \quad (2)$$

式中 V_i 、 V_{i0} 分别代表第*i*个电极的电位和轴上电位; E_{i1} 、 E_{i2} 分别代表第*i*个电极左右两侧的电场。因此, 在每个电极上通过施加1.5 MV的电压求解泊松方程得到电场分布, 也以此作为加速电场。

2 数值模拟

本文使用2.5维MAGIC软件对该加速器进行数值模拟, 从而优化该加速器结构。MAGIC软件是美国MISSIONRESEARC公司不断开发完善的一个电磁粒子模拟软件, 其求解过程是采用有限差分法求解离散化的Maxwell's方程和粒子运动方程。

2.1 电子束流的传输

为了验证模拟过程中所加的电场是否正确, 按照最初的模型在没有介质以及不发射电子束的情况下, 本文利用MAGIC软件模拟测量对称轴上方10 mm处的电位, 然后与式(1)计算得到的电位进行对比, 如图2所示。从图2可以看出, 电极所加电压跟理论值基本吻合, 建立的电场是正确的。

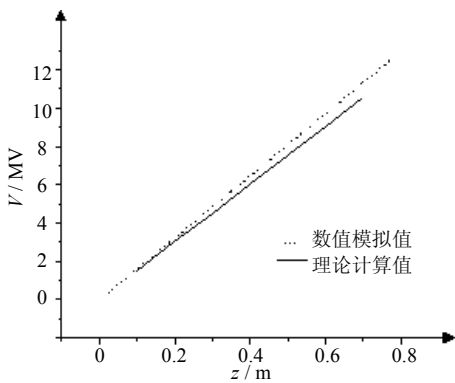


图2 轴线上方10 cm处电位

模拟仍然按照原有的加速器模型, 唯一不同之处是在每个极板间充满了 $\epsilon_r = 9$ 的介质。模拟结果显示, 虽然电子束能够顺利通过加速通道, 但沿z轴电子束由于空间电荷效应大于电场的汇聚作用而发散。因此, 该模型对电子束的聚焦效果不好, 这也是设计该加速器的关键所在。由于电子束满足傍轴条件, 要使电场的会聚作用大于空间电荷的发散作

用, 则修正后的傍轴方程为^[3]:

$$\frac{d^2r}{dz^2} + \frac{1}{2V} \frac{dV}{dz} \frac{dr}{dz} + \frac{1}{4V} \left(\frac{d^2V}{dz^2} + \frac{\rho}{\epsilon_0} \right) r = 0 \quad (3)$$

式中 r 、 z 分别为电子的径向和轴向坐标; V 为静电静电加速管中轴上电压; $\rho = I/\pi r_b \sqrt{2\eta V}$ 为空间电荷密度, r_b 为包络半径; ϵ_0 为真空介电常数, 必须有 $V'' > 0$, 即 $V'' + \rho/\epsilon_0 > 0$, $V'' > -\rho/\epsilon_0$ 。因此, 改变第二、三两根极板上所加的电压, 即第三根极板以后的极板间电位梯度不变, 而使第一、二两根电极板间的电位梯度小于后面极板间的电位梯度。在实际模拟中, 在第二根极板上加0.425 MV电压, 后面的极板上都加1.5 MV电压, 如图3所示; 电子束相空间图如图4所示。电子束能顺利通过加速腔。在150~250 mm长度内有一个能量很平缓的过程, 根据Scherzer方程可以得到电场对电子在轴向的作用力为^[3]:

$$F_z = -eE_z = eV' \quad (4)$$

由式(4)可知: $E_z < 0$ 时, 电子加速; $E_z > 0$ 时, 电子减速。在平行于对称轴上方1 cm处设置一条观测线, 观测z方向的电场, 如图5中虚线所示。可以看到在200 mm处, $E_z > 0$, 从而造成能量平缓。为了找出由空间电荷效应造成此处的电场大于零, 不发射电子束的情况下在对称轴上方1 cm处同样设置一根观察线测量z向电场, 发现在200 mm处的电场仍然大于零, 如图5中实线所示。由此可知, 空间电荷效应并不是造成电子束在此减速的原因。

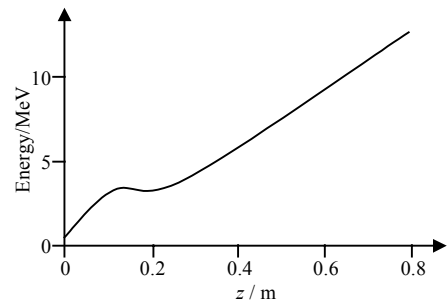


图3 在第二根极板上加0.425 MV电压时电子能量

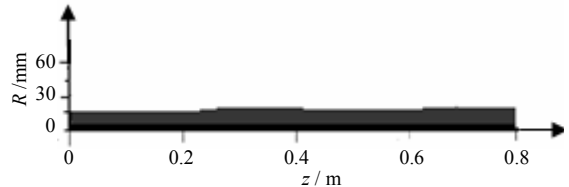


图4 电子束相空间图

在第二根极板上加0.9 MV的电压后重复上述工作, 如图6所示。从图中可以看出, 在发射电子束和不发射电子束的情况下, 200 mm处的电场均为-7.5 MV/m, 此刻电场小于零。从图7的能量图中也可以

看出,该图的能量加速不再像图4那样有一个长距离的平缓。

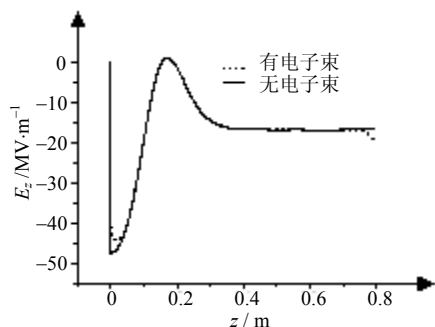


图5 在第二根极板上加0.452 MV电压时,对称轴上方1 cm处z向电场

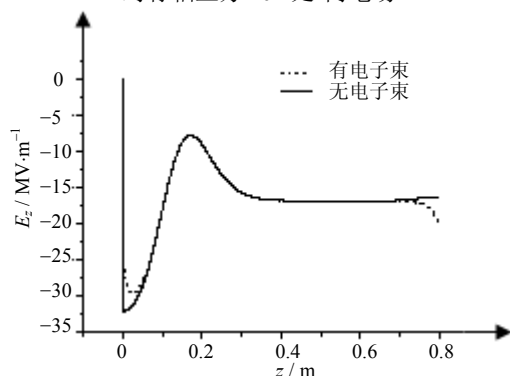


图6 在第二根极板上加0.9 MV电压时,对称轴上方1 cm处z向电场

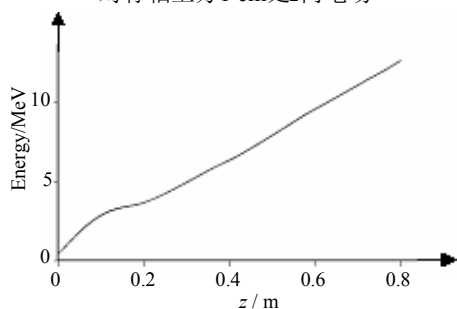


图7 在第二根极板上加0.9 MV电压时电子能量

2.2 最大场强点

电介质在强电场作用下保持绝缘性能的能力之一就是绝缘介质是否被击穿^[5],因此对加速器的设计除了电子束顺利通过加速腔外,另一个关键之处就是找出最大场强,降低场强并找出适合作该加速器的填充介质。

在本文的束传输模拟中,极板间填充 $\epsilon_r = 9$ 的介质,通过模拟得到在纵向60~140 mm、径向50~100 mm的矩形区域内电场强度最大,达到122.5 MV/m,该点位于对称轴上方99~100 mm,第二根极板中心,而其他区域的场强相对较弱。由于第二、三两根极板间的电位梯度大于其他极板间的

电位梯度,增大第二、三两根极板间的距离,观察其最大场强和束流传输情况如图8所示。从图8中可以看出,随着第二、三两根极板间距的增大,最大束流半径逐渐减小到20 mm,当加速器的长度超过870 mm以后粒子束就开始发散;而随加速器的增长最大场强减小到58 MV/m后又开始增大。在整个模拟过程当中,随着加速器长度的增加,最大场强的位置也从第二个极板逐渐变长为850 mm(第二、三两根极板间距为159 mm,其他极板间距仍为99 mm)。在不发射电子束的情况下,改变 ϵ_r 值^[6]进行模拟,如图9所示。当 $\epsilon_r = 11$ 时,最大场强达到一个最低值20 MV/m。

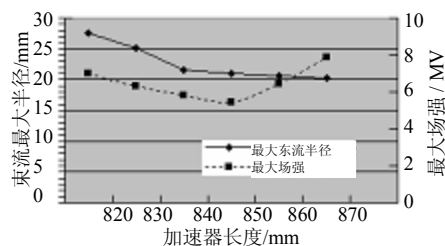


图8 最大场强和束流半径随加速器长度的变化情况

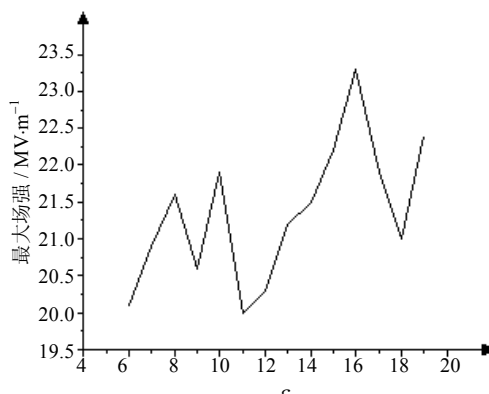


图9 最大场强与 ϵ_r 的关系

参 考 文 献

- [1] 叶铭汉. 静电加速器[M]. 北京: 科学出版社, 1965.
- [2] 杨肖. 强流高压加速管电子束运输研究[D]. 北京: 中国物理工程研究院, 2005.
- [3] 杜秉初, 汪健如. 电子光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [4] 殷学军, 夏佳文, 刘振灏, 等. 强流电子强电子光学性能的研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(2): 246-250.
- [5] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [6] 李翰如. 电介质物理导论[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1990.

编辑 税红