

文章编号: 1001-4322(2002)03-0437-04

强流电子束无箔二极管结构与特性研究*

张永辉, 常安碧, 江金生, 陈洪斌, 康 强

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 主要叙述大功率二极管的理论模型和结构设计, 采用基于引导磁场和相对论近似情况下的空间电荷限制流模型, 对磁浸没无箔二极管产生的空心相对论电子束进行了动态数值模拟, 研究了二极管几何结构及引导磁场对二极管束流特性的影响。

关键词: 电子束; 无箔二极管; 引导磁场; 数值模拟

中图分类号: TN 321 **文献标识码:** A

强流电子束二极管把脉冲形成线提供的高压脉冲功率转换为电子束功率^[1,2], 是高功率微波源的一个关键部件。只有产生高质量的高功率电子束, 才有可能实现高效率的束波转换, 进而产生高功率微波。对于磁绝缘无箔二极管, 由于外加轴向磁场的作用, 二极管内部的物理过程相当复杂, 包括电子的运动、爆炸发射形成的阴极等离子体的发展、二极管内电磁场的变化等, 都不可能给出精确的解析解, 有关无箔二极管的理论研究大多是在理想的极限条件下, 利用一系列简化处理进行的, 不能将上述所有因素都考虑进去, 因此只能给出二极管行为的一些定性规律。但这些规律往往能给二极管设计和实验提供一定的参考, 协助二极管的工程设计及实验操作。

1 无箔二极管的理论模型^[2-5]

无箔二极管理论模型主要有两种, 第一种是实心束无箔二极管, 即二极管阴极产生的电子束是实心的。按照该模型, 二极管空间电荷限制流 I_1 可由下式近似给出

$$I_1 = \frac{m_0 c^3}{e} \frac{(\mathcal{Y}_0^{2/3} - 1)^{3/2}}{1 + 2 \ln(R_A/r_2)} \quad (1)$$

式中: R_A 和 r_2 分别是漂移管阳极半径和阴极外半径; $\mathcal{Y}_0 = 1 + eV_0/m_0 c^2$, 其中 V_0 为二极管阴阳极间隙电压, m_0 为电子质量, c 为光速, e 为电子电荷量。

第二种模型是环形束无箔二极管, 即二极管阴极产生的电子束是空心的, 在引导磁场的作用下沿着漂移管的内侧以螺旋状向前运动。该二极管模型产生的空间电荷限制流 I_1 为

$$I_1 = (\mathcal{Y}_0^{2/3} - 1)^{3/2} \frac{m_0 c^3}{e} \left[1 + 2 \ln \frac{R_A}{r_2} - \frac{2r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right]^{-1} \quad (2)$$

式中 r_1, r_2 分别是二极管阴极内外半径。

这两种模型的无箔二极管都需要外加引导磁场以控制束流的扩散, 引导束流传输并进入微波器件中的互作用区。第二种模型的二极管产生的环形电子束空间电荷限制流明显大于实心束模型。因此, 在微波器件实验中常常使用环形电子束, 一方面是因为环形电子束可以传输大的电流强度, 另一方面是因为环形电子束可以以更高的效率在微波器件中进行束波互作用。

在我们的设计中, 采用第二种理论模型, 即基于引导磁场和环形电子束的空间电荷限制流模型进行理论计算。这种磁浸没阴极发射的电子束流沿磁力线方向运动, 但束流受空间电荷限制流的限制。

经计算, 我们设计的二极管的阴极束流远小于空间电荷限制流。因此, 所设计的二极管结构传输 3kA 电流是不受空间电荷限制流限制的。

阴极发射电流由下式确定: 如果空心束的厚度 $h \ll r_1$, 则

* 四川省电子学会第二届高能电子学学术交流会优秀论文。

收稿日期: 2001-09-21; 修订日期: 2001-12-25

基金项目: 国家 863 激光技术领域资助课题(863-410-7-3)

作者简介: 张永辉(1973-), 男, 硕士, 主要从事高功率脉冲功率技术研究工作; 绵阳 919-1015 信箱。

$$I = \frac{17r_b(\gamma_0^{2/3} - 1)^{3/2}}{R_A - r_2} \left\{ \ln \left[\frac{8(R_A - r_2)}{h} \right] \right\}^{-1} \quad (3)$$

式中 $r_b = (r_1 + r_2)/2$ 。

2 二极管结构设计

二极管结构设计包括阴阳极结构与绝缘子结构两方面。合理的设计不但可以降低绝缘子表面及三相交界处的电场强度,提高输出束流强度及其稳定性,而且可以延长绝缘子使用寿命^[6]。

对于绝缘子的结构设计,主要是从降低绝缘子表面电场强度和减小回流电子对绝缘子的轰击方面进行优化考虑,同时还要结合阴极形状来具体设计。由文献[7, 8]知,两个平板电极之间的绝缘子侧面与电极成 45°角时,绝缘子表面闪络耐压高。因此,在所设计的同轴无箔二极管中,绝缘子也采用这种形状。

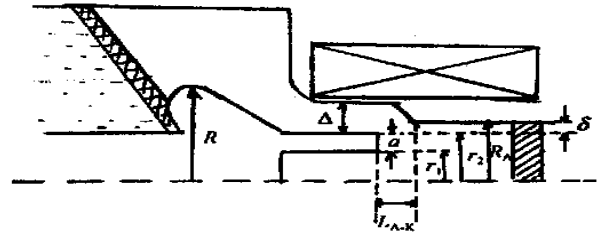


Fig 1 Geometric model of the foilless diode
图 1 无箔二极管几何模型

二极管阴阳极结构决定着二极管内的电场分布,同时也决定着二极管的束流特性。图 1 中 R 为阴极锥形底半径, Δ 为阴极到阳极室壁的距离, L_{A-K} 为阴阳极纵向间距, a 为阴极头端面厚度, r_1, r_2 分别为阴极头内外半径, R_A 为漂移管半径, δ 为电子束到漂移管管壁的距离。

阴极形状对二极管电场的影响非常明显,因此它对改善绝缘子表面电场具有重要作用。在理论计算中,将绝缘子的沿面取为近似直线型,计算结果如图 2 所示。

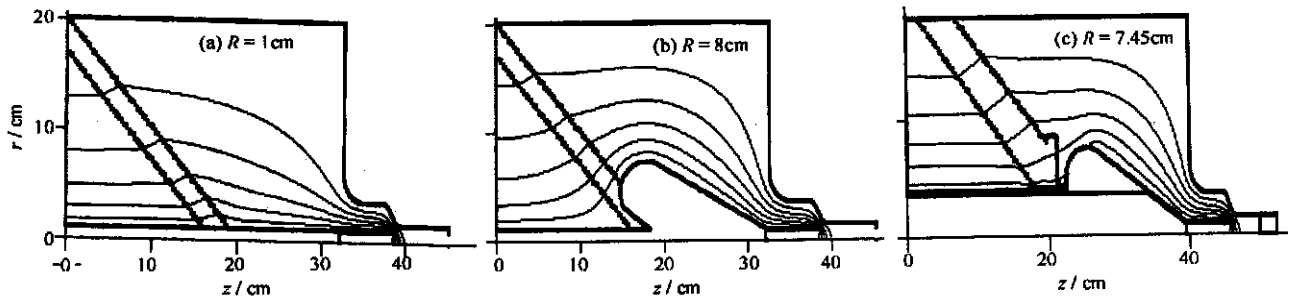


Fig 2 Varieties of equipotential line on the insulator surface
图 2 绝缘子表面等势线随阴极锥形底半径的变化曲线

可见,在绝缘子沿面上电力线的分布在阴极的抬升下逐渐变得均匀,大大减小了绝缘子、阴极及真空三结合点的电场强度,有效地阻止了绝缘子的表面闪络及真空击穿。当阴极锥形底最大半径 R_K 取为 7.45cm 时,绝缘子沿面及三相结合点的径向电场达到最小($\sim 30\text{kV/cm}$),见图 3。

在计算中,电子发射采用 $E_n = 0$ 条件下的自洽空间电荷限制流模型,引导磁场由螺线管产生,可以通过调节螺线管的安匝数及螺线管位置来调节磁场大小和形状。二极管电流及束流品质等参数分别在近阴极和远阳极区进行诊断。

3 二极管引导磁场的设计及其对束流特性的影响

二极管引导磁场的设计与阴阳极结构的设计是紧密相关的。本文拟采用阴极磁沉浸同轴无箔二极管,即将阴极浸没在一均匀的轴向磁场中,由阴极发射出来的电子将沿磁力线运动。

图 4 所示二极管将产生环形电子束(因为轴线上的轴向电场较低),为使发射均匀,阴极环厚度不能超过阴阳极间隙宽度,即

$$r_2 - r_1 < d_r \quad (4)$$

由磁隔离判据可估算出引导磁场的大小。电子最大的径向偏移为

$$s = 2\gamma_0 m_e E_r / eB_0^2 \quad (5)$$

为估计最小的 B_0 值,取 $s = d_r, E_r \sim V_0/d_r$, 则有

$$B_0 = (2\gamma_0 m_e V_0 / e d_r^2)^{1/2} = m_e c / e d_r [\gamma_0 (\gamma_0 - 1)]^{1/2} \quad (6)$$



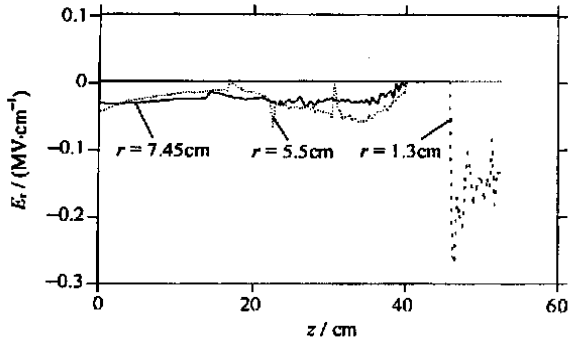


Fig 3 Radial electric-field of the diode

图 3 二极管径向电场

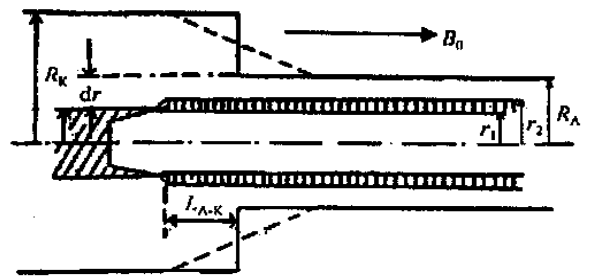


Fig 4 Diode structure and electron beam character

图 4 二极管阴阳极结构及电子束特征

式中: $\gamma_0 = 1 + eV_0/m_0c^2$ 。对于相对论性较强的电子束, 阳极处电子发散角为

$$\Delta\theta = v_r/c \quad E_r/B_0 \tag{7}$$

可见要产生低发散度的电子束, 必须使用较强的外加磁场, 使阴极发射的电子在电磁场的作用下不越过电极间隙。

当取 $L_{A-K} = 0.5\text{cm}$, 阴极所加电压为 400kV 的情况下, 改变螺线管的安匝数及磁场线圈电流值, 模拟计算了不同磁场时的束流特性。

图 5 为二极管束流随磁场的变化曲线, 由图可以看出, 当初始磁场值小于临界磁场时, 从阴极杆侧面及阴极头发射的电子的回旋半径大于阴阳极径向间隙, 有很大一部分电子打到阳极而被吸收, 因此引出的电子束流很小。随着外磁场强度的增加, 从阴极头发射的电子和越来越多的从阴极杆侧面发射的电子通过阳极漂移管被引出来, 束流随之增加。当磁场达到临界值时, 二极管束流达到最大。以后随着磁场的增大, 电子回旋半径减小, 束流厚度逐渐变薄。当磁场过大时, 由于许多从阴极杆侧面发射出来的电子又回到阴极杆上, 因此二极管束流又逐渐减小。当磁场大到一定程度时, 阴极杆上发射的电子可以忽略不计, 二极管束流主要由阴极端头发射的电子束提供, 因此, 二极管束流最终稳定在一个相对比较固定的值。

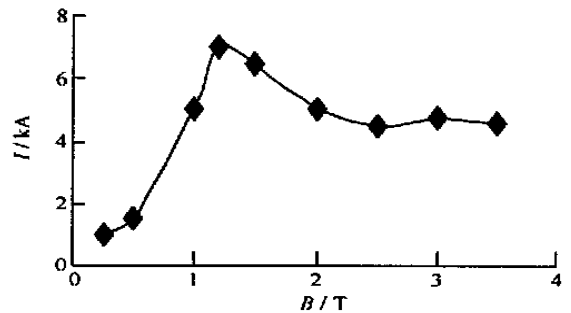


Fig 5 Electron beam current as a function of the magnetic-field

图 5 二极管束流随磁场变化曲线

4 二极管几何参数对束流的影响

4.1 阴阳极纵向间距 L_{A-K} 的影响

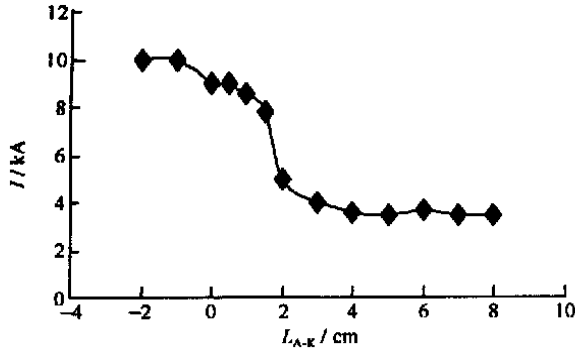
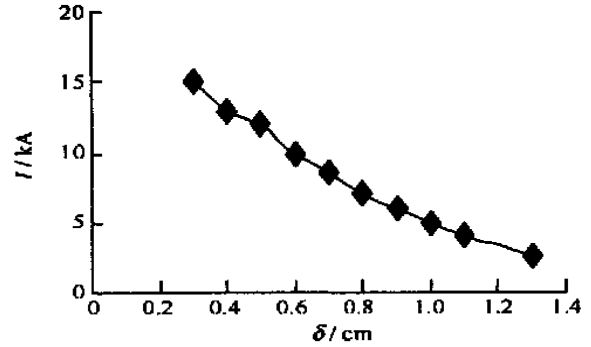
在模拟时给阴阳极加电压 500kV , 磁场确定为 2.21T , 阳极漂移管半径 R_A 取为 1.5cm , 阴极外半径 r_2 取为 1cm , 环状阴极端头厚度 a 取为 0.3cm 。模拟结果由图 6 给出。可以看出, 束流随 L_{A-K} 的增大而减小。当 L_{A-K} 较小和较大时, 束流趋于稳定。这是因为当 L_{A-K} 很小时, 二极管束流和阻抗由电子束厚度和阴阳极径向间隙距离 δ 确定; 当 L_{A-K} 较大时, 由阴极杆到阳极的距离 Δ 决定, 这时, 阳极收缩段的影响可以忽略。在中间区域, 随着 L_{A-K} 的增加, 阴阳极间隙也在增加, 阴极发射面的电场强度相应降低, 因此发射束流降低。而二极管阻抗的变化正好与束流变化相反。在实际工作中, 我们可以通过调节 L_{A-K} 值来调节二极管的阻抗。

4.2 束流与漂移管间距 δ 对束流的影响

改变阳极漂移管半径 R_A 及阴极外半径 r_2 的值可以改变 δ 。物理参数与前面相同, 只改变 δ 的大小, 由图 7 可以发现, 二极管输出束流随 δ 的增加而减小。

5 结束语

通过上述对二极管束流输出特性的分析, 使我们对强流电子束无箔二极管特性有了更进一步的认识, 对二极管引导磁场的设计有了理论参考。在此基础上, 我们进一步对二极管的几何结构及引导磁场进行了优化设

Fig 6 Electron-beam current as a function of the change of L_{A-K} 图6 二极管束流随阴阳极纵向间隙 L_{A-K} 的变化Fig 7 Electron-beam as a function of the change of δ 图7 束流与漂移管间距 δ 对束流的影响

计,各项指标在理论上都达到了设计要求,为后边的实验工作奠定了基础。

参考文献

- [1] Pai S T, Qi Z. Introduction to high power pulse technology[M]. London: Press of World Scientific, 1995.
- [2] 米勒 R B, 刘锡三. 强流带电粒子束物理学导论[M]. 北京: 原子能出版社, 1990 (Miller R B, Liu X S. An introduction to the physics of intense charged particle beams. New York and London: Plenum Press, 1982).
- [3] Knoblauch A, Wilbertz C, Miller T, et al. Field electron emission properties of a supertip[J]. *J Phys D Appl Phys*, 1996, **29**: 470—473.
- [4] 邵浩, 刘国治, 宋志敏, 等. 向内发射同轴型二极管电流电压关系二维修正[J]. 强激光与粒子束, 2001, **13**(5): 631—636 (Shao H, Liu G Z, Song Z M, et al. 2-D modification to the current-voltage correlation in inward-emitting coaxial diode. *High power laser and particle beams*, 2001, **13**(5): 631—636).
- [5] Turchi P J, Jr Peterkin R E. Modeling of impedance collapse in high-voltage diodes[A]. 11th IEEE International Pulsed Power Interference [C]. 1998. 1363—1368.
- [6] Gennady A M. Vacuum discharge effects in the diodes of high-current electron accelerators[J]. *IEEE Trans on Plasma Sci*, 1991, **19**(5): 683—689.
- [7] Jaitly N C, Sudarshan T S. Novel insulator designs for superior DC hold-off in bridged vacuum gaps[J]. *IEEE Trans on Electrical Insulation*, 1987, **22**(6): 801—810.
- [8] Craig M H. Flashover of insulators in vacuum: review of the phenomena and techniques to improve holdoff voltage[J]. *IEEE Trans on Electrical Insulation*, 1993, **28**(4): 512—527.

Structure design and characteristic of high-current electron-beam foilless diode

ZHANG Yong-hui, CHANG An-bi, JIANG Jin-sheng, CHEN Hong-bin, KANG Qiang
(Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1015, Mianyang 621900, China)

Abstract The theoretical models and the structure designs of the high power diode are described in this paper. The insulator, the structure of cathode and anode, the guide magnetic-field are analyzed and calculated in detail. The space charge limited current model, based on guide magnetic-field and theory of relativity approximation, is used to simulate the relativity electron-beam and study the influence of diode structure and guide magnetic-field on the characteristic of foilless diode beam-current.

Key words electron-beam; foilless diode; guide magnetic-field; numerical simulation