

电功率 20GW 重复频率强流电子束二极管研究^{*}

张永辉^{1)†} 常安碧¹⁾ 向 飞¹⁾ 宋法伦¹⁾ 康 强¹⁾ 罗 敏¹⁾ 李名加¹⁾ 龚胜刚¹⁾

1) 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

2) 中国工程物理研究院北京研究生部, 北京 100088)

(2007 年 3 月 4 日收到, 2007 年 3 月 15 日收到修改稿)

采用静电场模拟对二极管结构及导引磁场位形分布进行了优化设计, 并在 20 GW 脉冲功率源上进行了重复频率运行实验研究, 二极管输出电子束电压超过 1 MV, 电流达 20 kA, 脉冲宽度 45 ns, 重复频率 100 Hz, 达到了设计指标.

关键词: 二极管, 重复频率, 电子束

PACC: 4180D, 2921, 2925B

1. 引 言

重复频率强流电子束二极管是高功率微波 (HPM) 源的关键部件之一, 它的性能直接影响到 HPM 源的能量转换效率和微波输出功率. 随着强流脉冲技术及 HPM 技术的发展, 对脉冲功率技术的要求越来越高, 不但要求整个系统有高的峰值功率, 更要求有高的平均功率. 研制电功率 20 GW 脉冲功率源是为更高输出功率的 HPM 器件研制及其相关关键技术研究提供实验平台, 而 20 GW 重复脉冲强流电子束二极管则是该平台的重要组成部分, 是其中的关键技术之一. 对于电功率如此高的重复脉冲强流电子束二极管的研究, 在国际上也是一项难度非常大的课题. 俄罗斯托木斯科大电流研究所目前只做到了 $1.5 \text{ MV}/15 \text{ kA}/40 \text{ ns}/100 \text{ Hz}^{[1-5]}$. 在国内, 开展如此高指标的二极管研制工作, 许多关键技术都处于探索研究之中. 本文利用静电场模拟对二极管阴阳极、绝缘子结构及磁场位形分布等进行了优化设计, 在此基础上进行了重复频率 20 GW 强流电子束二极管实验研究.

2. 技术指标及总体考虑

根据 20 GW 脉冲功率源总体方案分解指标, 重

复频率强流电子束二极管的技术指标为: 二极管阻抗 $\sim 50 \Omega$, 电子束能量 1 MeV, 束流强度 20 kA, 束流脉冲宽度 $\sim 40 \text{ ns}$, 脉冲重复频率 100 Hz.

从总体上考虑, 20 GW 二极管将采用径向绝缘技术, 其中需要重点考虑的是降低绝缘子表面及三相(真空、绝缘子与金属)点的电场强度, 同时提高输出束流的稳定性; 另外还要考虑减小回流电子对绝缘子的轰击, 避免绝缘子产生表面闪络, 以延长绝缘子使用寿命. 阴极发射采用场致爆炸发射方式, 阴极端面均匀浸没在轴向磁场中. 绝缘子采用锥形结构, 一方面可以延长绝缘子沿面距离, 另一方面可以保证磁力线不与绝缘子表面相交, 从而避免回流电子的轰击; 引导磁场采用 1_s 螺线管, 用于产生并传输强流电子束, 同时利用接地电感减小或消除二极管预脉冲干扰; 分别利用电容分压器和 Rogowski 线圈测量二极管电子束电压和电流.

3. 物理设计及工程考虑

根据 20 GW 二极管设计要求, 同时结合 CHP01 二极管研究结果以及实际应用条件^[6-8], 绝缘子设计中主要考虑以下几点:

1) 选择单体绝缘子, 不带均压环, 简化工程设计;

^{*} 国家高技术研究发展计划(批准号 2005AA833010)资助的课题.

[†] E-mail: zhyhcaep@yahoo.com.cn

2) 尽可能降低三相点的电场强度, 以减少或消除初始电子的产生;

3) 尽量使阴极电压沿绝缘子表面均匀下降, 避免局部产生高场强。

根据上述考虑, 实际工程中二极管绝缘子采用单体锥形结构, 用尼龙 1010 材料制作, 整体加工而成。绝缘子沿面距离长为 420 mm。由于二极管引导磁场的存在, 绝缘子锥度选择除了应考虑具体制造工艺限制之外, 还应尽可能减少磁力线与绝缘子表面相交, 以避免或减少回流电子对绝缘子表面的轰击, 提高沿面闪络电压^[9]。

根据马丁公式 $E_{BD} t^{1/6} A^{1/10} = 175$, 结合绝缘子设计参数及二极管物理设计参数, 计算可得绝缘子表面闪络电压阈值 $E_{BD} \approx 197 \text{ kV/cm}$ 。考虑到二极管以重复频率运行时, 表面闪络电压阈值更低, 因此设计中取 $0.6E_{BD} \approx 118 \text{ kV/cm}$, 即实际运行场强只要不超过 118 kV/cm 即可保证绝缘子沿面不发生闪络。图 1 为 20 GW 二极管结构示意图。

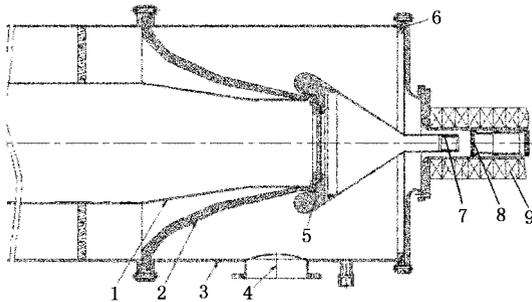


图 1 20 GW 二极管结构示意图 1 示形成线内导体 2 示绝缘子 3 示真空腔 4 示真空接口 5 示阴极屏蔽座 6 示 Rogowski 线圈 7 示阴极 8 示阳极 9 示磁场

采用阴极屏蔽座可以减小三相结合点的电场强度, 同时可以改善绝缘子表面的电场分布。利用静电场模拟分析, 可以确定出最优的阴极屏蔽座形状及尺寸。同时, 为了有效屏蔽回流电子对绝缘子的轰击及二次电子发射, 阴极座形状应基本上与磁力线在此处的形状一致。

图 2 为绝缘子沿面电场分布, 图 3 为二极管内总的静电场电场模拟分布, 图 4 为绝缘子沿面电场幅值。可以看出, 绝缘子沿面上的电位分布在阴极屏蔽座的抬升下变得趋于均匀, 并大大减小了绝缘子、阴极及真空三结合点的电场强度。由模拟结果可知, 阴极座表面最大场强 $\sim 246 \text{ kV/cm}$; 绝缘子沿面电场相对比较均匀, 平均场强为 83 kV/cm , 最大场强为

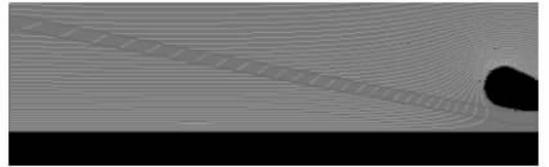


图 2 绝缘子沿面电场分布

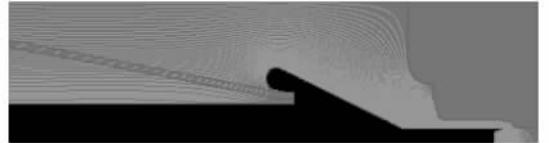


图 3 二极管内电场分布

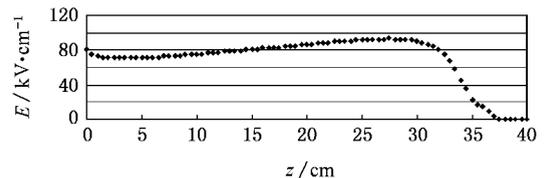


图 4 绝缘子沿面电场幅值

94 kV/cm , 三结合点电场强度达到最小 (10 kV/cm), 均低于设计允许场强值。二极管内电场分布合理, 场强最大处在阴极尖端附近, 有利于爆炸电子发射。

4. 引导磁场设计

引导磁场的设计与阴阳极结构的设计是紧密相关的, 磁场的位形分布决定着阴极电子的发射和传输^[10-13]。设计中要求磁力线尽可能不与绝缘子沿面直接相交, 以减小或消除回流电子对绝缘表面的轰击; 同时, 必须使阴极发射端面完全沉浸在磁场均匀区, 而且磁场大小必须满足电子束稳定传输条件, 以使电子束保持低发散度。图 5 为由设计的二极管几何尺寸及电子束参数所确定的磁场幅值和相对位置分布曲线。

实际设计中, 磁场由 16 个螺线管串、并联组成, 线圈内径为 77 mm , 均由漆纸绝缘的截面积为 $2 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的铜线绕制, 线圈电阻为 0.35Ω 。各线圈之间留有绝缘缝隙, 利用变压器油循环冷却。图 6 为实测螺线管磁场位形。

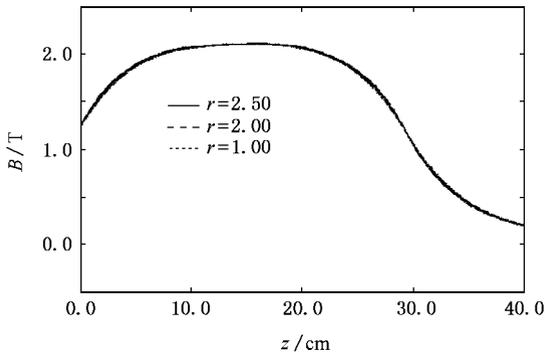


图 5 优化后磁场位形

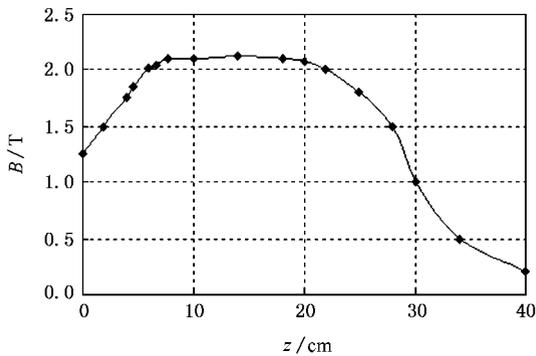


图 6 1s 磁场实测位形

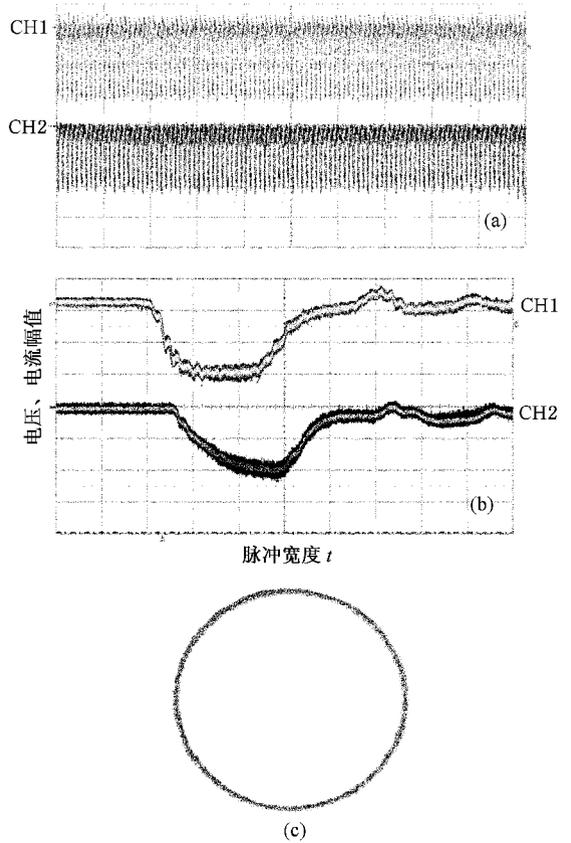


图 7 二极管重复频率输出波形及束斑 (a)示序列 (b)示重叠 (c)示束斑

5. 实验研究

在理论研究及粒子模拟的基础上,利用设计的二极管和螺线管磁场,在 20 GW 脉冲功率源上进行了重复频率电子束二极管初步实验研究.以下给出的是二极管以 100 Hz 重复频率运行时输出的电压、电流波形及单次打靶图像.

其中图 7(a)中 CH1 为经时间轴压缩之后的电压波形,CH2 为经时间轴压缩之后的电流波形,图 7(b)为 100 次电压电流波形展开后的重叠图像.其中上面为电压波形,下面为电流波形.由实验波形可以看出,二极管可以在 100 Hz 重复频率下稳定运行.输出电子束能量超过 1 MeV,电流超过 20 kA,脉冲宽度约 45 ns,达到设计指标.图 7(c)为束斑图像.通过测量二极管输出电子束的束斑几何尺寸,可以判定电子束的质量完全符合设计要求,满足 HPM 器件研究需求.

6. 总 结

通过静电场模拟,对强流电子束二极管绝缘子形状、阴阳极结构、磁场位形等进行了优化设计,利用 20 GW 脉冲功率源进行了初步实验研究.实验结果表明,设计的二极管很好地解决了三结合点的场击穿和绝缘子表面的真空闪络问题,设计的引导磁场完全满足实际应用的需要,二极管输出电子束能量超过 1 MeV,电流超过 20 kA,脉冲宽度约 45 ns,重复频率达到 100 Hz.

在实验测试中,对于重复频率输出波形的测量都是取其平均值,然后对每一个脉冲波进行详细测量,包括幅值及脉宽,最后进行偏差概率统计,发现 20 GW 二极管输出电压最大偏差小于 4.5%,电流最大偏差小于 5%,均满足 HPM 器件实验要求.

- [1] Korovin S D , Rostov V V 1996 *Russian Physics Journal* **39** 1177
- [2] Mesyats G A , Shpak V G , Yalandin M I 1991 *Proc. 8-th IEEE Int. Pulsed Power Conf. San Diego , USA* 73
- [3] Mesyats G A , Korovin S D , Rostov V V 2004 *Proc. of the IEEE* **92** 1166
- [4] Gubanov V P , Gunin A V , Korovin S D 2001 *IEEE Conf. of Pulsed Power Plasma Science* p336
- [5] Mesyats G A , Korovin S D , Gunin A V 2003 *Laser and Particle Beams* **21** 197
- [6] Michael E J , Lester E T 1980 *J. Appl. Phys.* **51** 5212
- [7] Zhang Y H , Ma Q S , Chang A B , Zhou C M , Gan Y Q , Liu Z. 2004 *High Power Laser and Particle Beams* **16** 1437(in Chinese) [张永辉、马乔生、常安碧、周传明、甘延青、刘 忠 2004 强激光与粒子束 **16** 1437]
- [8] Ma Q S , Zhang Y H , Chang A B , Zhou C M 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 609 (in Chinese) [马乔生、张永辉、常安碧、周传明 2005 强激光与粒子束 **17** 609]
- [9] Gennady A M 1991 *IEEE Trans. on Plasma Sci.* **19** 683
- [10] Zhang Y H , Chang A B , Xiang F , Gan Y Q , Liu Z , Zhou C M 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 1423 (in Chinese) [张永辉、常安碧、向 飞、甘延青、刘 忠、周传明 2005 强激光与粒子束 **17** 1423]
- [11] Zhang Y H , Ma Q S , Xiang F , Gan Y Q , Chang A B , Liu Z , Zhou C M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3111 (in Chinese) [张永辉、马乔生、向 飞、甘延青、常安碧、刘 忠、周传明 2005 物理学报 **54** 3111]
- [12] Liu G Z , Huang W H , Yang Z F 2005 *Chin. Phys.* **14** 949
- [13] Xia L S , Zhang H , Chen D B , Zhang K Z , Shi J S , Zhang L W 2005 *Chin. Phys.* **14** 1779

Repetition rate of intense current electron-beam diodes using 20 GW pulsed source *

Zhang Yong-Hui^{1,2)†} Chang An-Bi¹⁾ Xiang Fei¹⁾ Song Fa-Lun¹⁾ Kang Qiang¹⁾
Luo Min¹⁾ Li Ming-Jia¹⁾ Gong Sheng-Gang¹⁾

1 ǻ Institute of Applied Electronics , China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 , China)

2 ǻ Postgraduate Department , China Academy of Engineering Physics , Beijing 100088 , China)

(Received 4 March 2007 ; revised manuscript received 15 March 2007)

Abstract

Based on the static electric-field simulation , the structures of 20 GW diode and its insulator , as well as the position and shape of guide magnetic-field are designed and optimized. Then the experiments on the repetition rate of intense current electron-beam diode are carried out on 20 GW pulsed power source , it can deliver intense electron-beam pulses of 1MV/20 kA with pulse width 45 ns and repetition rate 100 Hz.

Keywords : diode , repetitive frequency , electron-beam

PACC : 4180D , 2921 , 2925B

* Project supported by the National High Technology Joint Research Program of China (Grant No. 2005AA833010).

† E-mail : zhyhcaep@yahoo.com.cn