

文章编号: 1007-4627(2015)S1-0038-05

静电自会聚六硼化镧电子枪的研究

林祖伦¹, 王小菊¹, 祁康成¹, 曹贵川¹, 于海波²

(1. 电子科技大学光电信息学院, 成都 610054;
2. 成都创元电子有限公司, 成都 610000)

摘要: 设计并制作了一种用于X射线管的电子枪。以具有优异电子发射能力的六硼化镧阴极代替传统钨阴极, 采用石墨热子加热的夹持式阴极结构; 电子光学系统采用静电自聚焦方式, 设计了具有梯形聚焦槽的单圆筒电极聚焦结构, 避免了聚焦电极的引出; 完成了阴极罩、阴极筒以及陶瓷芯柱等阴极组件的设计与封接。测试结果表明, 当六硼化镧阴极为 4.5 mm×0.8 mm 的平面发射体结构时, 在阴极温度 1500 °C, 阴阳极间距 3.5 mm, 阳极电压 2500 V 条件下, 热发射电流达到 65 mA, 且发射稳定性良好。在 120 kV 阳极电压下, 电子枪在X射线样管中的性能测试结果表明, 样管具有良好的电压电流开关特性, 验证了该电子枪用于X射线管的优越性。

关键词: X射线管; 电子枪; LaB₆ 热阴极; 发射性能; 热发射电流

中图分类号: TH703 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.S1.38

1 引言

随着X射线成像系统的发展, 高功率、大电流密度、细聚焦X射线源在工业无损探伤、医学成像、安全技术等领域具有广泛的应用^[1-3], 对于小型化、低能耗、高性能X射线源的需求越来越突出。目前, 电子束打靶、同步辐射源、激光等离子体源、慢速多荷离子打靶等方式均能产生X射线。这些方法虽然原理不同, 但其本质上均是通过高能粒子与靶材的相互作用产生X射线。其中, 同步辐射法、激光等离子体源、电子束离子阱的设备复杂, 造价昂贵, 维护费用高, 难以实现实用化^[4-6]。因此, 利用传统电子束打靶产生X射线的方法设计一种具有大电流密度、小体积、低功耗的X射线源, 对于提高成像空间分辨率、降低设备成本等方面具有重大的意义^[7-8]。

目前, 大多数电子束打靶X射线源仍采用钨阴极作为电子源。钨阴极熔点高、优劣系数小; 但其逸出功高、发射效率低、化学稳定性差, 高温下易与残余水汽产生反应。同时, 钨阴极工作温度高, 电子束发散度大, 电子束的利用效率很低。因此, 采用新型热电子发射材料代替传统钨阴极已成为国内外X射线源的研究热点。六硼化镧(LaB₆)热电子发射材料工作温度较低, 蒸发率低, 发射电流密度大, 在压强 5×10^{-5} pa下, 使用寿命已达10000小时以上^[9-10]。因此, 本文采用具

有优异电子发射能力的六硼化镧阴极代替传统X射线管中的钨阴极。

根据目前医用X光管的使用要求, 在120 kV阳极电压下, 产生X射线束的光斑大小约为1 mm×1 mm, 阳极电流为10 mA以上。在此设计指标下, 对LaB₆阴极结构进行了设计; 采用梯形聚焦槽的单圆筒电极作为聚焦极, 对阴极发射的电子束进行静电自聚焦; 在此基础上完成对阴极罩、阴极筒以及陶瓷芯柱等阴极组件的设计与封接; 最后对该电子枪的发射性能进行测试。

2 电子枪结构设计与制作

2.1 阴极结构设计

根据X光管对阴极电子发射能力的要求及计算机模拟结果, 以多晶LaB₆材料作为发射体, 具体结构参数为发射面为矩形、尺寸为0.8 mm×4.5 mm。当温度达到1500 °C时, 阴极零场发射电流密度可达20 A/cm²以上。因此, 我们所设计的LaB₆发射面尺寸完全能够满足设计需要。

LaB₆热电子发射系统按加热方式可分为直热式和间热式两种。与直热式相比, 间热式阴极结构相对复杂、阴极热惯性大; 但间热式阴极结构能够实现平面发射, 束斑均匀且固定、热形变小、使用寿命长。因此, 本文采用间热式结构对LaB₆阴极发射体进行加热。

收稿日期: 2014-10-19; 修改日期: 2015-03-12

作者简介: 林祖伦(1950-), 男, 四川成都人, 教授, 从事物理电子与显示技术研究; E-mail: zllin@uestc.edu.cn。

目前, 常用的间热式阴极有两种加热方式: 电子轰击加热与热子加热。其中, 轰击式阴极结构如图 1(a) 所示。灯丝在电流 I 的作用下发射电子, 电子在轰击电压 U_b 的加速下轰击阴极发射体, 使发射体温度升高产生热发射电子, 并通过聚焦电极形成电子束。轰击式阴极加热时间短、功耗低, 但其结构较复杂, 多用于各种大型动态真空设备中。热子加热式阴极结构如图 1(b) 所示, 阴极发射体经热子加热后产生热电子发射, 发射电子通过聚焦电极形成电子束。与轰击式阴极相比, 热子加热式结构简单, 只需选择适当的热子与夹持方式即可完成结构设计。因此, 本文采用热子加热方式对 LaB_6 阴极结构进行设计。

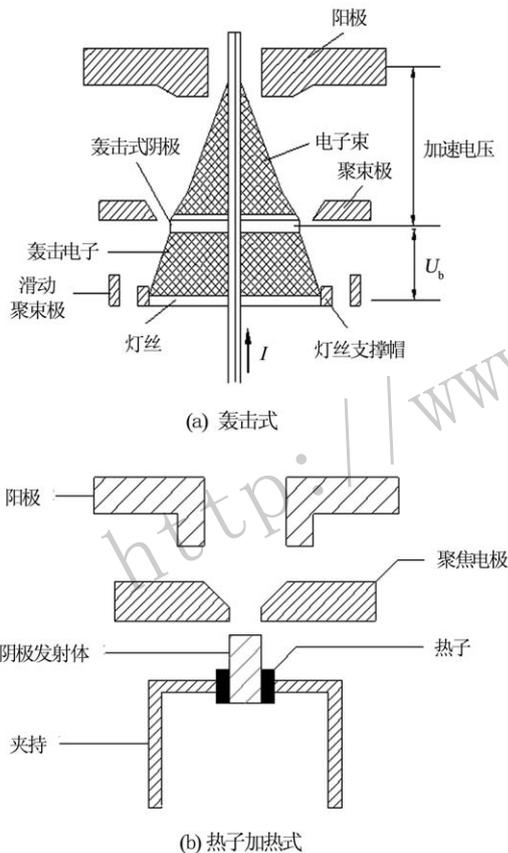


图 1 间热式阴极的两种加热方式

LaB_6 材料具有优异的电子发射性能, 但在高温下几乎与所有难熔金属 (W, Mo, Ta 等) 发生化学反应, 体积小的 B 原子向这些基金属晶格中扩散, 形成填隙式化合物, 致使 B 框架崩溃, La 原子蒸发, 产生所谓的阴极中毒; 另一方面, 由于 B 原子侵入到支撑金属中, 金属被腐蚀变脆, 形成所谓的“硼脆病”, 导致阴极毁坏。为防止这一现象产生, 采用石墨热子对 LaB_6 阴极发射体进行加热。夹持式 LaB_6 阴极结构如图 2 所示。

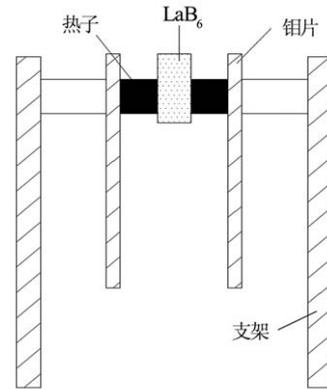


图 2 夹持式 LaB_6 阴极结构示意图

2.2 聚焦极结构设计

电子逸出阴极表面时, 其运动方向与阴极表面具有一定的发散角, 直接导致阳极的电子束斑很大, 无效 X 射线剂量增加。因此, 电子束打靶 X 射线源需要通过聚焦系统将阴极产生的电子会聚成电子束, 再经电场加速后轰击阳极靶材产生 X 射线。目前, 常用的电子聚焦系统分为磁聚焦与静电聚焦系统。

磁聚焦系统的优点在于容易满足傍轴条件、球差比较小, 但其结构复杂、系统功耗大、调焦困难, 主要应用于行波管、电子扫描显微镜等大型设备中。静电聚焦系统体积小、结构简单、没有功率损耗。根据设计要求, 本文所设计的聚焦电子束直径在毫米量级, 因此采用静电聚焦完全能够满足设计要求。

根据皮尔斯电子枪理论, 对于具有一定规则尺寸的阴极, 可在其外部同轴地放置一个零电位的金属圆筒对其发射的电子束进行聚焦。改变金属圆筒位置与形状, 可有效改善电子束的聚焦情况, 得到所需的电子注。同时, 聚焦极电位为零, 可避免聚焦电极的引出, 极大简化聚焦极结构。根据计算机模拟结果, 本文设计的静电自会聚 LaB_6 电子枪结构如图 3 所示, 图 4 为装配后的 LaB_6 电子枪照片。

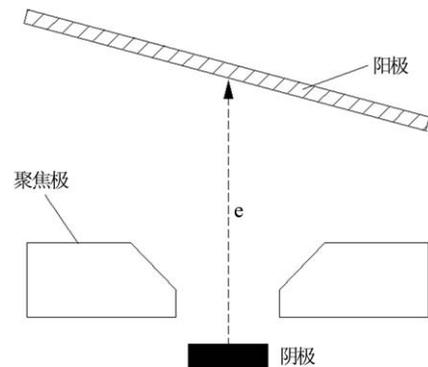


图 3 静电自会聚 LaB_6 电子枪结构图



图 4 (在线彩图) 静电自会聚 LaB₆ 电子枪照片

3 电子枪发射性能测试

3.1 阴极发射体热发射性能测试

图 5 为 LaB₆ 发射体热电子发射测试系统原理图。在真空度 1.5×10^{-4} Pa 下, 通过调整直流稳压电源电压, 分别测试阴极发射体在 1 300, 1 400, 1 500 °C 下的伏安特性, 其伏安特性曲线如图 6 所示。

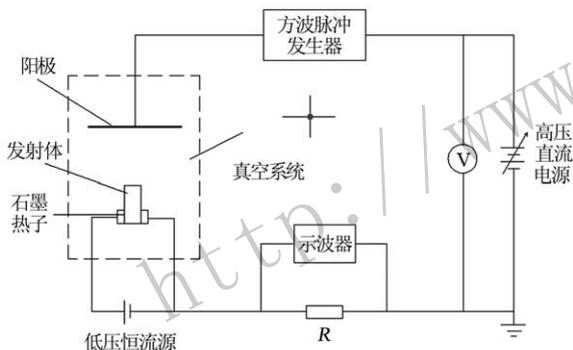


图 5 LaB₆ 发射体热电子发射测试系统

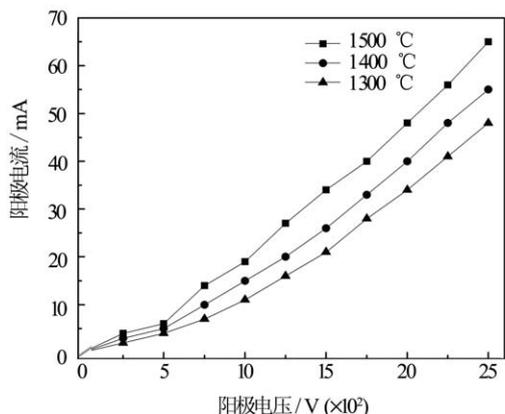


图 6 LaB₆ 阴极热电子发射伏安特性曲线

由图 6 可知, 在一定的温度下, 发射电流随阳极电压的增加显著增大。当阳极电压大于 1 000 V 后, 发射

电流的增加几乎呈线性; 当温度为 1 500 °C, 阳极电压为 2 500 V 时, 发射电流达到 65 mA, 对应的阴极发射电流密度为 18 A/cm², 此时阴极的发射远未达到饱和, 阴极仍工作在空间电荷限制区。

表 1 给出了阴极温度 1 500 °C、阳极电压 2 500 V 下, 阴极连续工作 120 min 的电压-电流关系。在测试初始阶段, 由于石墨热子与取样电阻 R 的负温度特性, 在一定的加热电压下, 回路中的电流升高, 阴极加热功率增大, 阴极温度上升。在 10 min 时, 发射电流达到 67 mA, 此时通过光学温度计测得阴极温度已达到 1 530 °C。因此, 在测试过程中, 需不断调整阴极加热电压使阴极温度稳定在 1 500 °C。由表 1 可知, 当阴极温度稳定时, 阳极电流稳定在 65 mA, 阴极发射稳定性良好。根据设计要求, X 射线源需在 120 kV 电压下工作, 阳极电流需达到 10 mA 以上。结合表 1 的数据, 我们可以得出结论, 本文设计的 LaB₆ 发射体热电子发射性能完全能够满足该要求。

表 1 LaB₆ 阴极发射体发射稳定性测试

时间/min	阳极电流/mA	时间/min	阳极电流/mA
0	65	70	65
10	67	80	65
20	65	90	65
30	65	100	65
40	65	110	65
50	65	120	65
60	65		

3.2 X 射线管发射电流与稳定性测试

为了验证该电子枪用于 X 光管的可行性, 本文在 X 射线管测试台中进行了基于静电自会聚 LaB₆ 电子枪 X 射线管的性能测试。图 7 为该样品照片。表 2 给出了不同阴极温度下阳极电流 I_a 达到 10 mA 时的电压值。可以看出, 当温度为 1 150 °C 时, 20 kV 阳极电压下, 阳极电流达到 10 mA, 这比同等条件下钨丝阴极的工作温度



图 7 (在线彩图) 静电自会聚 LaB₆ X 射线管

要低 1000 °C 以上。因此可以得出结论: 采用 LaB₆ 代替传统钨阴极, 可有效降低阴极加热功耗, 并避免高温工作下因材料蒸发而导致的 X 光管损坏。

表 2 不同阴极温度下 $I_a = 10 \text{ mA}$ 的电压值

阴极温度/°C	阳极电压/kV	阳极电流/mA
1 150	20	10
1 250	17.5	10
1 350	8	10
1 450	7.8	10

当阳极电压 U_a 为 20 kV 时, 不同阴极温度下的发射电流稳定性如图 8 所示。当阴极温度较低时, 发射电流随时间的增加而降低, 但降低的幅度很小。当阴极温度大于 1 150 °C 后, 发射电流基本不随时间增加而变化。测试结果表明, X 射线管能在 1 150 °C 以上稳定工作。

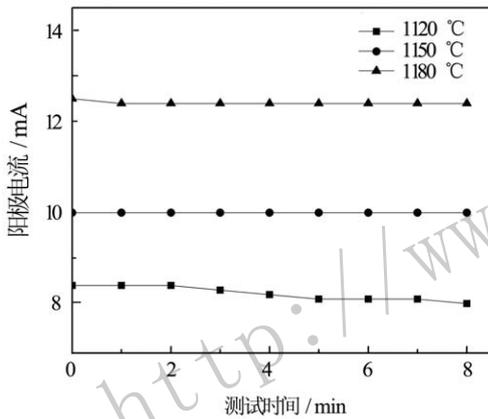


图 8 不同 LaB₆ 阴极温度下的发射电流稳定性

3.3 X射线管开关特性测试

为了在保证图像质量的前提下达到最小辐射剂量, 现代医学对 X 射线源的动态响应特性提出了要求。由于 X 射线源的管电压、管电流的输出需随生物组织结构、尺寸的变化而变化, 这就要求 X 射线源的电压电流响应尽可能快, 即能实现动态响应。图 9(a) 与 (b) 分别给出了静电自会聚 LaB₆ 电子枪 X 射线管在阳极电压为 60, 120 kV 方波脉冲工作条件下, 电流随电压的变化曲线。测试过程中对 X 射线源进行了限流, 电流大小 2.2 mA。其中, CH₁ 通道为阳极电压, CH₂ 通道为阳极电流。从图中可看出, 当阳极电压为 60 kV 时, 在电压的上升沿与下降沿, 电流变化均有明显的滞后, 滞后时间约为 40 ms; 当阳极电压为 120 kV 时, 电流随电压的变化几乎没有迟滞。测试结果表明, 在 120 kV 工作电压下, X 射线样管具有良好的电压电流开关特性。

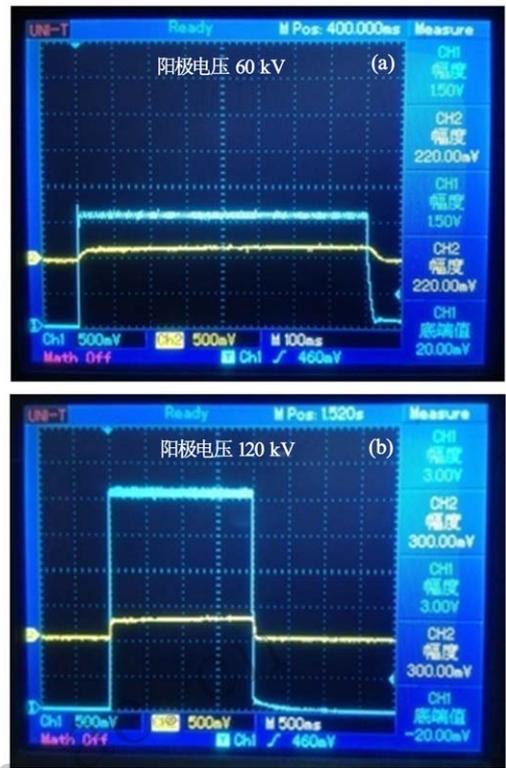


图 9 (在线彩图) 静电自会聚 LaB₆ X 射线管的电压电流响应

4 结论

本文对用于 X 射线源的 LaB₆ 电子枪进行了结构设计和制作, 并对其进行了发射性能测试。LaB₆ 发射体采用石墨热子加热的夹持式阴极结构, 发射面 0.8 mm×4.5 mm 平面结构; 聚焦极为梯形聚焦槽和矩形孔的单圆筒结构。对 LaB₆ 阴极发射体的发射性能测试结果表明, 当温度为 1 500 °C, 阳极电压为 2 500 V 时, 阳极电流为 65 mA, 发射稳定性良好。在 20 kV 下, 对 X 射线样管的性能测试结果表明, 当阴极温度为 1 150 °C, 样管的阳极电流达到 10 mA。样管在 120 kV 下的开关特性测试显示, 在 120 kV 工作电压下, 管电流对管电压变化的响应几乎没有时间迟滞。

参考文献:

- [1] TILLACK G R, NOCKEMANN C, BELLOM C. NDT & E International, 2000, **33**(7): 481.
- [2] FISHER A J, SMITH C A, THODEN J, et al. Biochemistry, 1995, **34**(28): 8960.
- [3] SAYRE D, CHAPMAN H N. Acta Crystallographica Section A: Foundations of Crystallography, 1995, **51**(3): 237.
- [4] ROUSSE A, PHUOC K T, SHAH R, et al. Physical review letters, 2004, **93**(13): 135.
- [5] TURCU C E, DANCE J B. Generation and Applications, 1999, **32**(11): 2227.

- [6] BEIERSDORFER P, MARRS R E, HENDERSON J R, *et al.* Review of Scientific Instruments, 1990, **61**(9): 2338.
- [7] TAN Weishi, CAI Honglin, WU Xiaosan. Journal of Changshu Institute of Technology, 2006, **20**(2): 97. (in Chinese)
(谭伟石, 蔡宏灵, 吴小山. 常熟理工学院学报, 2006, **20**(2): 97.)
- [8] DUDCHIK Y I, KOLCHEVSKY N. N. Nucl Instr Meth A, 1999, **421**(1): 361.
- [9] LIN Zulin. High Power Laser and Particle Beams, 1997, **9**(4): 591. (in Chinese)
(林祖伦. 强激光与粒子束, 1997, **9**(4): 591.)
- [10] CHENG J B, RAN Q J. Hexaboride Lanthanum Cathode[M]. Chengdu: Chengdu Institute of Telecommunication Engineering Press, 1988: 12. (in Chinese)
(成建波, 冉启钧, 译. LaB₆阴极[M]. 成都: 成都电讯工程学院出版社, 1988: 12.)

Research on Electrostatic Self-focusing Lanthanum Hexaboride Electron Gun

LIN Zulin^{1,1)}, WANG Xiaoju¹, QI Kangcheng¹, CAO Guichuan¹, YU Haibo²

(1. School of Opto-electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. Chengdu Chuang Yuan Electronics Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: An electron gun for X-ray tube is designed and produced. The clamping type lanthanum hexaboride cathode with graphite heater is used in replace of the traditional tungsten cathode owing to its excellent electron emission ability. To avoid the leads of focusing electrode, we design a single focusing electrode with a trapezoidal focusing groove and a rectangular hole. Finally, other cathode structures such as cathode cover, cathode support and insulating ceramics are designed and the assembling of electron emitting system is completed. Thermionic emission test shows that when the lanthanum hexaboride emitting area is 4.5 mm×0.8 mm, the temperature of cathode is 1500 °C, and the distance between anode and cathode is 3.5 mm, the anode current is 65 mA at anode voltage of 2 500 V, and the emission stability is excellent. The test of the X-ray tube based on lanthanum hexaboride electron gun shows that favorable switching performance is obtained at anode voltage of 120 kV.

Key words: X-ray tube; electron gun; lanthanum hexaboride cathode; emitting performance; thermionic emitting current