

用于 DC-SC 超导光电子枪中的光阴极的研制*

向荣¹⁾ 全胜文 林林 丁原涛
鲁向阳 焦飞 王桂梅 赵夔

(北京大学重离子物理研究所射频超导加速器实验室 北京 100871)

摘要 DC-SC 超导光阴极微波电子枪是一种新型的高平均流强电子源,本文介绍了其中的关键部件——光阴极的研制.在自行研制的光阴极制备室里成功制备了两种光阴极:Cs₂Te 和 Cs₃Sb 光阴极. Cs₂Te 光阴极的寿命长,用 266nm 紫外光激发,量子效率 QE>2.5%,真空中(1×10⁻⁵Pa)寿命 50h. Cs₃Sb 光阴极是多层膜结构,用 532nm 激光激发,量子效率 2%,真空中(10⁻⁵Pa)寿命只有几个小时.两者都可以满足电子枪的设计要求,但是由于 Cs₂Te 光阴极更稳定,在目前的 DC-SC 超导光电子枪调试实验中采用这种光阴极.

关键词 Cs₂Te Cs₃Sb 光阴极 量子效率 超导光电子枪

1 引言

北京大学超导加速器装置(PKU-SCAF)^[1]的任务是为自由电子激光(PKU-FEL)实验平台^[2]提供高平均流强电子束.它的注入器将采用 DC-SC 超导光电子枪^[3,4],这是一种新型注入器,第一次把 Pierce 枪和 1+1/2 射频超导加速腔组合在一起,既利用了超导腔的低损耗、大束孔的优点,又避免了光阴极对超导腔造成的不良影响.该设计可以输出能量为 2.6MeV,平均流强 1mA,发射度为 3mm·mrad 的电子束.

DC-SC 超导光电子枪对光阴极提出了很高的要求:效率高(QE>1%)、寿命长、阴极材料时间响应好(~ps 量级)、热发射低、对超导腔没有污染.

开展了两种光阴极的实验研究.其中 Cs₂Te 具有量子效率高、寿命长,时间响应上没有明显的拖尾^[5],暗电流小(上限是 0.4mA/cm²^[6])等优点.但是它的禁带宽度为 3.3eV,需要用紫外光激发,对激光倍频、紫外光传输提出了很高的要求.而 Cs₃Sb

可以工作在 532nm,相应时间在 ps 量级,进行 Cs₃Sb 的制备和研究可以降低对驱动激光的要求.

在研制 Cs₂Te 光阴极制备过程的基础上,设计加工了新的光阴极制备室,完成了 Cs₃Sb, Cs₂Te 光阴极的制备实验,并成功地与 DC-SC 超导光电子枪对接,在超高真空环境下把制备好的光阴极传输到 Pierce 结构中.

2 超高真空多功能光阴极制备室

制备光阴极需要 10⁻⁶—10⁻⁹Pa 的超高真空室来制备和保存光阴极,还要具备相同真空条件下的传输系统把阴极装到工作位置,为此设计加工了一套集制备和传输一体的光阴极制备室(见图 1),它由制备室和传输系统组成,制备室具有两个观察窗,可以用肉眼和监测光同时观察实验进程,并且把实际蒸镀区限制在体积为约 100cm³ 的范围内,有利于加快成膜的速度和提高均匀度.传输系统由一个磁力杆驱动的小车及其轨道、3 个磁性传输杆组成,

2003-10-21 收稿

* 973 计划(2002CB713600)和国家自然科学基金(10075006)(19985001)资助

1) E-mail: xiangrong 118@yahoo.com

可以协作运动把制备好的光阴极传输到 Pierce 枪的阴极上的固定位置, Pierce 阴极上可以加 -70kV 的高压. 通过烘烤, 系统真空可以达到 $1 \times 10^{-6}\text{Pa}$.

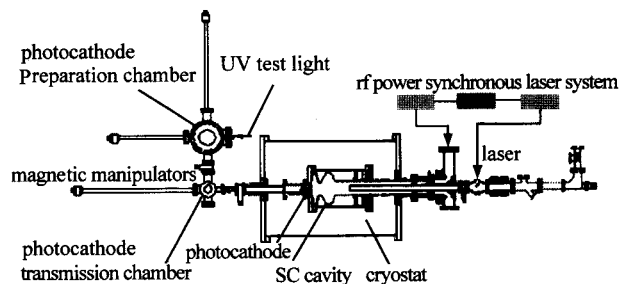


图 1 超高真空多功能光阴极制备室和 DC-SC 光电子枪

Te 源、Sb 源和 Cs 源的加热器采用了相同的设计, 即利用氮化硼陶瓷良好的导电性和绝缘性, 制成加热炉, 加热丝用电阻率大的镍铬丝, 阴极加热采用阴极座间接加热的办法, 制备时用 Cs_2CrO_4 和 ZrAl 粉末化学反应生成 Cs 原子. 为使反应充分, 反应物颗粒大小都是微米量级, 使用前在 $550^\circ\text{--}600^\circ$ 及低气压下进行去气和烧结. Cs 源距阴极基底表面 2cm , 沉积角度偏离垂直方向 $10^\circ\text{--}20^\circ$. 碲源用 99.999% 的纯碲粉末, 位置与 Cs 源对称. 不锈钢阴极面竖直放置, 有效沉积面积约 0.8cm^2 . 为了监测制备进程, 在距离阴极表面 1cm 的位置设计了偏压为 $+300\text{V}$ 的阳极, 在阴极表面形成场强约 30kV/m 的光电子引出场. 检测光源用的是医用汞灯 (主要波长 253.7nm), 阴极表面处的紫外辐照度为 $200\mu\text{W}/\text{cm}^2$. 用电流积分仪监测光电流.

3 Cs_2Te 光阴极制备实验

Cs_2Te 阴极的制备条件很苛刻^[7], 首先是要严格控制 Te 源和 Cs 源的蒸发速度, 以便得到厚度约 30nm 、非常均匀的电子发射层, 并精确控制基底温度, 以使化学反应快速平稳地进行.

2002 年我们完成了单层膜 Cs_2Te 的预研^[8]. 首先对阴极基底进行抛光、丙酮清洗、高纯水冲洗, 然后放入制备室中烘烤并抽真空. 加热基底至 110° , 完成 10nm 的 Te 膜生长后进行 Cs 激活, 当观察到光电流达到最大值然后开始下降时, 保持阴极 $110^\circ\text{--}120^\circ$ 以使化合反应继续进行和除去表面多余的铯. 结果得到量子效率最大到 10% , $1 \times 10^{-5}\text{Pa}$

真空中维持量子效率 2.5% 到 50h 的光阴极.

进一步实验发现对于 Cs_2Te 阴极还可以进行进一步的品质提高. 上述制备过程中 Cs 激活之后, 不是马上除去多余的 Cs, 而是在保持温度的同时, 再次蒸镀微量 Te, 使之与表面的 Cs 反应, 光电流会继续上升, 到达一个新的最大值后呈下降趋势. 继续保持阴极基底的反应温度, Cs_2Te 发射层会重结晶, 光电流还会重新增大. 这个过程中需要注意控制 Te 的蒸镀速率, 否则会造成表面 Te 过量.

图 2 中的 Cs_2Te 阴极 6-25-#1 制备真空条件为 10^{-5}Pa , 采用上述的方法使阴极效率提高了 3 倍. 从这张图上可以清晰地看出薄膜生长的各个阶段: Cs 激活时光电流第一次增长, 等下降了 10% 时结束 Cs 源的蒸镀, 以很慢的速度蒸镀一层 Te, 形成阴极效率的第二次增长, 其后因为阴极基底以 2.6 度/分钟的较慢速度降温, 光阴极材料得以重结晶, 效率得到了第三次提高.

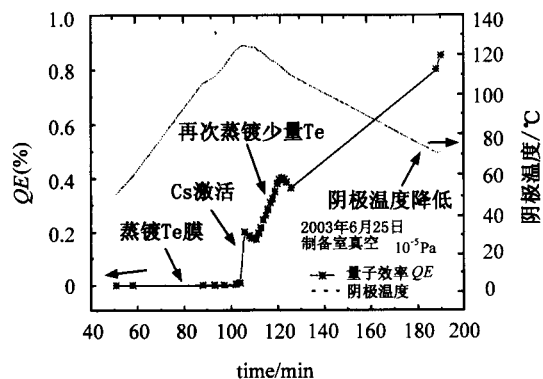


图 2 Cs_2Te 阴极的制备过程

因为光阴极发射电子能力的均匀性直接影响到电子束的横向均匀性. 在制备实验完成后, 我们对阴极 6-25-#1 表面均匀性进行了扫描. 阴极的量子效率沿轴向 360° 的分布呈波浪形, 90° 时效率偏低, 270° 时效率偏高, 但偏差仅为 3% , 已足以提供载束实验需要的均匀电子束.

制备好的 Cs_2Te 阴极 6-25-#1 在 10^{-6}Pa 真空中, 用磁性传输杆传送到 DC-SC 超导光电子枪中的阴极固定位置. 功率为 720mW 的 266nm 紫外激光通过石英玻璃窗, 再经反射镜, 与阴极面近似垂直入射, 激发出的电子被静电场加速. 静电场加速实验中, 因为当时引出电源的限制, 阴极电压只有 -4kV , 引出电场仅为 270kV/m , 加速电流到 $120\mu\text{A}$ 的时候出现了饱和现象.

4 Cs₃Sb 光阴极制备实验

Cs₃Sb 光阴极是一种对可见光敏感的阴极, 进行 Cs₃Sb 的制备研究可以减少对驱动激光的要求. 类似的还有双碱光阴极, 如 K₂CsSb, Na₂KsSb, Rb₂CsSb, 和多碱光阴极 (Cs)Na₂KsSb, 但是 Cs₃Sb 的结构最简单. 我们制备 Cs₃Sb 光阴极的过程采用了“yo-yo”方法, 即多次重复蒸镀使量子效率逐渐上升的方法.

首先以 0.5nm/s 的速率蒸镀到阴极基底上, 然后加热基底至 160℃, 用 Cs 蒸汽激活 Sb 膜. 同时用绿光二极管 (532—535nm, 在阴极表面的光功率约为 480μW) 作为监测光源观察光电流. 当光电流上升到最大值后开始下降时, 停止 Cs 源反应, 保持基底温度, 再次蒸镀 Sb, 同时观察光电流的变化趋势, 当光电流上升到最大值并开始下降时, 停止蒸 Sb, 再次用 Cs 蒸汽激活, …… , 直到量子效率达到实验要求, 或者量子效率不再增大为止. 图 3 是一个很典型的“yo-yo”过程, 第一次完成 Cs 激活时量子效率为 0.05%, 实验在第三次蒸镀 Cs 后结束, 这时光阴极的量子效率是 1.3%. 已经完成的光阴极实验中, 量子效率最大达到了 2%, 维持 1% 以上 5 个小时.

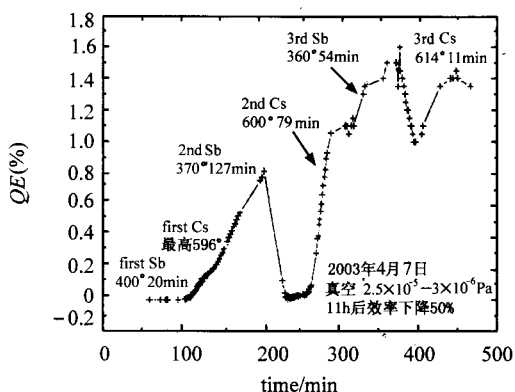


图 3 制备 Cs₃Sb 光阴极时的“yo-yo”过程

5 新的制备方法——Co-evaporation

下一步的实验研究将会采用同时蒸镀 (co-evaporation) 的方法. 从理论上, 这种同步法可以制备出更均匀的膜, 得到更好的初始电子束品质. 但是

需要更精确的控制反应物的蒸镀速率, 必须计算相对蒸发速率, 同时用石英晶体厚度监视器监控两种源, 以使反应可以充分进行.

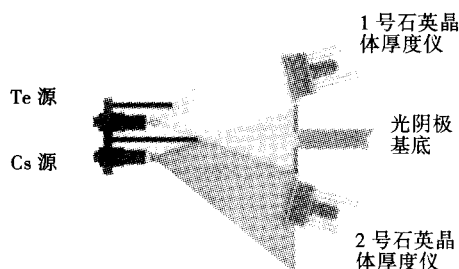


图 4 同步法制备 Cs₂Te 的示意图

首先计算单位时间内两种元素达到阴极表面附近的原子数: $N_c^{Te} = s_1^{Te} \times f^{Te}$, $N_c^{Cs} = s_2^{Cs} \times f^{Cs}$, s_1^{Te} 是一号石英晶体厚度监视器测到的 Te 膜蒸镀速率, N_c^{Te} 是光阴极表面附近的 Te 原子数/秒, s_2^{Cs} 是一号石英晶体厚度监视器测到的 Cs 膜蒸镀速率, N_c^{Cs} 是光阴极表面附近的 Cs 原子数/秒, f^{Te} , f^{Cs} 是通过理论计算和实验共同确定的两个常数.

如果比值 $R = \frac{N_c^{Cs}}{N_c^{Te}}$ 被很好地控制, 就可以生成完美的 Cs₂Te 阴极, 此时的阴极膜层厚度可以计算: $d_{Cs_2Te} = \frac{1}{\rho_{Cs_2Te}} \int (M^{Te} \times N_c^{Te} + M^{Cs} \times N_c^{Cs}) dt$. M^{Te} , M^{Cs} 是 Te, Cs 的原子量.

6 小结

本文介绍了 DC-SC 超导光阴极微波电子枪的关键部件——光阴极的研制. 在自行研制的光阴极制备室里成功制备了两种光阴极: Cs₂Te 光阴极和 Cs₃Sb 光阴极. 在 Cs₂Te 光阴极预研的基础上, 发展了效率增高的新方法, 即不除去阴极表面多余的 Cs, 改为蒸镀微量 Te 使其继续反应, 而且实验后保持基底温度使其重结晶. 制备 Cs₃Sb 光阴极时采用多次重复蒸镀使量子效率逐渐上升的方法, 量子效率最好到 2%. 我们还在继续该课题的研究, 改良实验设备和采用新的实验方法, 使光阴极维持量子效率 2% 以上可以达到 100h.

参考文献 (References)

- 1 ZHAO Kui, QUAN Sheng-Wen, HAO Jian-Kui et al. Nucl. Instrum. Methods, 2002, A **483**: 125
- 2 ZHAO Kui, DING Yuan-Tao, HUANG Sen-Lin et al. FEL Project and Optimized Design of IR SASE FEL at Peking University. Proc. FEL 2003. Tsukuba, Ibaraki, Japan, 2003
- 3 HU Yan-Le et al. HEP&NP, 2001, **25**(8): 787(in Chinese)
(胡岩乐等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(8):787)
- 4 ZHAO Kui, HAO Jian-Kui, HU Yan-Le et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research 2001, **A474**: 564—568
- 5 Boscolo I, Michelato P. Nucl. Instrum. Methods, 2000, **A445**: 389—393
- 6 Aulenbachert K. RF Guns and the Production of Polarized Electrons. CLIC Note 303 01. 05. 1996, NLC-Note 20 Distribution: sources/injectors SLAC, 1 May 1996
- 7 Kong S H, Kinross-Wright J, Nguyen D C et al. Nucl. Instrum Methods, 1995 **A358**: 272—275
- 8 XIANG Rong, LIN Lin, ZHANG Bao-Cheng et al. Atomic Energy Science and Technology, China, 2004, **38**(2): 185—188 (in Chinese)
(向蓉, 林林, 张保澄等. 原子能科学技术, 2004, **38**(2): 185—188)

Research and Fabrication of the Photocathodes for DC-SC Photoinjector *

XIANG Rong¹⁾ QUAN Sheng-Wen LIN Lin DING Yuan-Tao
LU Xiang-Yang JIAO Fei WANG Gui-Mei ZHAO Kui

(RF Superconducting Accelerator Laboratory, Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract DC-SC photoinjector is a new injector based on the laser-driven photocathode. It is designed to produce the electron beam with high average current required by high average power FEL experiments. For this projector, Cs₂Te and Cs₃Sb photocathodes are fabricated in a self-designed preparation chamber, which is bakable and the vacuum can reach values of 10⁻⁶ Pa. Cs₂Te is excited by 266nm UV laser, and its quantum efficiency(QE) is above 2.5% for more than 50 hours, and the QE of Cs₃Sb at 532nm is about 2% and stable for only several hours in vacuum. They can provide enough electrons for our electron gun. Because of its stability, Cs₂Te is adopted in the test facility of the DC-SC photoinjector.

Key words Cs₂Te, Cs₃Sb, photocathode, quantum efficiency, superconducting photoinjector

Received 21 October 2003

* Supported by Chinese Department of Science and Technology under the National Basic Research Projects (2002CB713600) and by National Natural Science Foundation of China (10075006, 19985001)

1) E-mail: xiangrong 118@yahoo.com