

用于 DC-SC 光阴极微波电子枪中的 Cs₂Te 光阴极研制

向 蓉, 林 林, 张保澄, 鲁向阳, 全胜文, 王莉芳, 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: 文章介绍 DC-SC 光阴极微波电子枪中的关键部件——Cs₂Te 光阴极的研制。采用两种方法制得了高量子效率要求的 Cs₂Te 光阴极, 并实验比较了两种制备方法的效果。针对制备中的超高真空、精确控制 Cs 原子流量和阴极温度等关键问题, 设计了用于 DC-SC 光阴极微波电子枪中的光阴极制备室。

关键词: Cs₂Te; 光阴极; 量子效率; 超导电子枪

中图分类号: O434.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-6931(2004)02-0185-04

Research and Fabrication of the Photocathode Used in DC-SC Photocathode RF Electron Gun

XIANG Rong, LIN Lin, ZHANG Bao-cheng, LU Xiang-yang,
QUAN Sheng-wen, WANG Li-fang, ZHAO Kui

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

Abstract: DC-SC photocathode RF electron gun is the new injector based on the laser-driven superconducting RF gun. It has been designed and is on the way of operation at Peking University, in order to produce the beam with high average current required by SASE FEL experiments. High quantum efficiency cesium telluride photocathodes are fabricated in two methods, and the results are compared and analyzed. To resolve the key problems in the preparing process, such as the super high vacuum, the accurate controlling of Cs flux, the temperature of cathode, a new photocathode preparation chamber has been designed for the DC-SC electron gun.

Key words: Cs₂Te; photocathode; quantum efficiency; superconducting electron gun

1 光阴极品质的要求

PKU-SCAF^[1]的一项重要应用是为将来的 FEL 实验平台提供高平均流强的电子束, 为

此, 设计了 DC-SC 光阴极微波电子枪^[2,3]。新型注入器由皮尔斯枪、光阴极和 1 + 1/2 单元超导腔组成, 它可输出能量为 2.6 MeV、平均流

收稿日期: 2002-11-01; 修回日期: 2003-02-27

作者简介: 向 蓉(1976—), 女(土家族), 湖北宜昌人, 博士研究生, 核技术及应用专业

强 1 mA、发射度为 8 mm·mrad 的电子束,其中,光阴极发射的电子束团电荷为 10 ~ 60 pC,最大重复频率 81.25 MHz。

DC-SC 光阴极微波电子枪驱动激光器的参数为:波长,266 nm;脉冲重复频率,81.25 MHz;脉冲能量,10 nJ;脉冲宽度,10 ps;光斑半径,1 mm。为了达到设计中的高平均流强,对光阴极品质的要求如下:1) 工作波长在 266 nm 附近;2) 光阴极的最小量子效率 QE 1%,必须具有正常工作几百小时的寿命;3) 暗电流很小,否则,影响真空和超导腔工作;4) 光阴极的有效工作半径为 4 mm,可引出峰值电流 1.2 ~ 6 A,阴极材料需有优良导电性;5) 自由电子激光希望电子束的能散很小^[4],通过超导加速器时的相位抖动也应很小,电子束与驱动激光脉冲宽度保持一致等,这些均要求光阴极的响应时间越快越好,一般要求快于 ps。

对于光阴极的热发射影响,温度每降低 100 K,热发射则减小 $\sqrt{3}$ 倍^[5]。本光阴极工作在温度低于 70 K 的环境下,且驱动激光功率不大,平均功率为 0.8 ~ 4 W,因此,只要阴极的导热情况好,热发射引起的暗电流不必考虑。此外,超低温下的真空条件有利于延长阴极寿命。

2 光阴极材料的选择

常温电子枪一般采用 Cu 作阴极,量子效率为 10^{-5} 量级。采用 Mg 作阴极的常温 RF 电子枪的量子效率提高了一个量级^[6]。在半导体阴极中,GaAs 薄膜阴极的量子效率很高,但时间响应太慢(μs 量级); $\text{K}_2\text{CsSb} + \text{CsBr}$ 薄膜或 CsI 薄膜的量子效率可达到 3%^[7],但它们的暗电流比 Cs_2Te 的大^[8],会引起超导腔失超这样的严重后果。最适合作半导体阴极材料的是 Cs_2Te ,其最好纪录是工作在 0.5×10^{-7} Pa、100 MV/m 的条件下维持量子效率 QE > 7% 达 3 ~ 6 月, QE > 2% 约 2 a^[9]。此外, Cs_2Te 的脉冲增长小于 4 ps,时间响应上无明显拖尾^[10];暗电流很小,估计上限为 0.4 mA/cm^2 ^[8],且 Cs_2Te 被空气轻度污染后可部分恢复。DC-SC 光阴极微波电子枪中选用 Cs_2Te 作光阴极。

3 Cs_2Te 光阴极制备

高品质 Cs_2Te 阴极的制备条件很苛刻^[11]:首先,需要好于 10^{-7} Pa 的真空室用以制备和保存光阴极;其次,需严格控制 Te 源和 Cs 源的蒸发速度,以便得到厚度约 30 nm、非常均匀的电子发射层;另外,还需处理好阴极基底材料,并能精确控制基底温度,以使化学反应快速平稳进行以及最后对阴极进行焙烤。

本实验采用的光阴极制备装置于 1995 年建成,并用以完成了 Mg 阴极 Cs 离子注入改性^[6]以及 Cs_2Te 光阴极的研究。整个装置制备前的真空度为 10^{-5} Pa 量级,制备过程中真空度为 10^{-4} Pa,未达到 10^{-7} Pa 的实验要求,这对制备出的 Cs_2Te 光阴极的量子效率和寿命影响很大。制备过程需要高真空,但蒸镀过程又需足够的蒸气压,为此,在真空室中放置了一相对独立的小阴极制备室(图 1),体积约 115 cm^3 , Cs_2Te 阴极在此小制备室中制得。

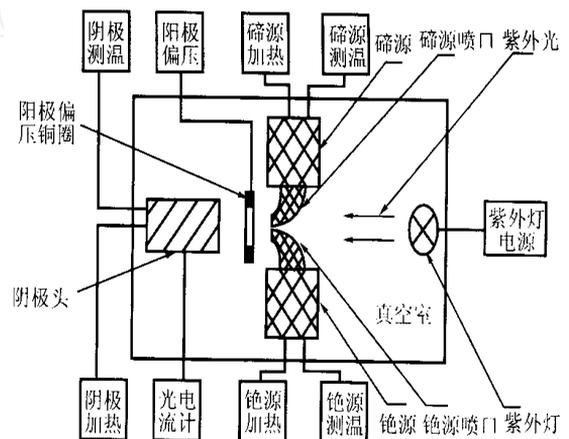


图 1 制备光阴极的实验装置示意图

Fig. 1 Scheme of facility for the cathode preparation

本工作采用两种方法制备 Cs_2Te 光阴极。

第 1 种制备方法是用 Cs_2CrO_4 和 ZrAl 粉末化学反应生成的 Cs 激活 Te 膜。为使反应充分,反应物颗粒大小均为 μm 量级,使用前,在 550 ~ 600 °C、低气压下进行除气和烧结。用镍铬丝和氮化硼陶瓷制成的加热器加热 99.999 9% 的纯碲粉末作为 Te 源,源口距阴极基底表

面约 2 cm,沉积角度偏离垂直方向约 10°~20°。Cs 源装置和位置与 Te 源的相似。不锈钢阴极面竖直放置,有效沉积面积约 0.8 cm²。阴极表面场强约 30 kV/m。紫外光源使用医用汞灯,阴极表面处的紫外辐照度为 200 μW/cm²。用电流积分仪监测光电流。

Te 膜蒸镀速率的测量方法是用卢瑟福背散射(RBS)离线测量某温度下蒸镀的 Te 膜厚度,再计算出该温度下的平均蒸镀速率。RBS 测量的精确度为 0.5 nm。图 2 示出 RBS 测得的在 SiO₂ 基底上蒸镀的 Te 膜厚度。

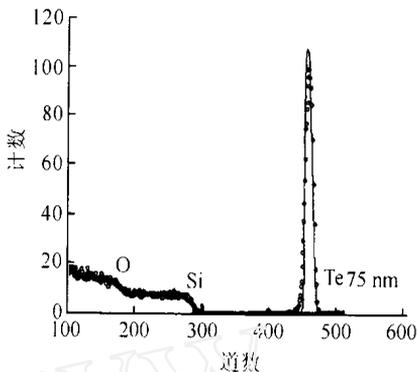


图 2 RBS 测得的 SiO₂ 基底上蒸 Te 膜厚度

Fig. 2 Thickness of Te film on SiO₂ measured by RBS

因 Cs 须在超高真空下保存,因此,不能离线测量厚度,在线测量一般采用石英晶体厚度监视仪。本实验未测量 Cs 源的绝对蒸镀速率,而是通过 Cs₂Te 形成过程中光电流的上升趋势判断蒸镀 Cs 的相对速度,并控制 Cs 的反应速度和蒸镀时间。先蒸镀 10 nm 厚的 Te 膜,后加热 Cs 源,稳定工作在 700 °C,同时用紫外灯照射阴极表面。随着 Cs 激活的不断进行,光电流很快上升,约 10 min 后开始下降,这时,停止加热 Cs 源,使阴极温度维持在 110 °C 左右,让 Te 与 Cs 继续反应,同时去除多余 Cs 及其他杂质,5 min 后,停止阴极加热。用此方法制备光阴极,其量子效率为 6.0%~11%。

实验发现,阴极暗电流和制备系统造成的暗电流可达 3.6 μA,甚至在 Cs₂Te 生成初期远超过光电流值(图 3)。这是因为 Cs 源加热器温度高,距离阴极只有 3~4 cm,严重影响阴极温度,可能使阴极产生热发射,使暗电流增大。图 3 显示,Cs₂Te 刚生成时(45 min),暗电流很大,Cs 源加热器温度下降后,暗电流值随之减小,监测电流则以光电流为主。此后,反应仍进

行,从 72 min 开始,于 150 °C 下焙烤阴极基底,使表面附着的 Cs 与 Te 膜继续反应,阴极效率明显增大,在加热焙烤后,量子效率达到 9%。实际上,量子效率有可能达到更高。因受到暗电流的影响,此时已不能通过光电流上升趋势来判断 Cs 的蒸镀速度和沉积量。Cs 过量可通过焙烤除去,但若 Cs 沉积量不够,则 Te 膜未被 Cs 充分激活,光阴极未能达到最大效率。

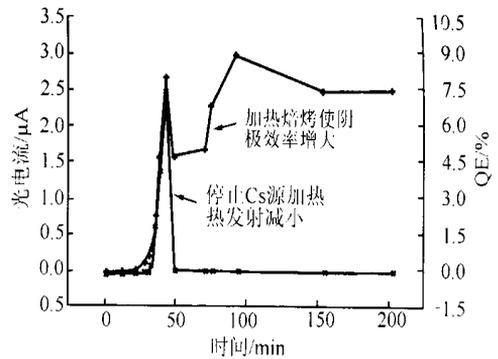


图 3 光电流和 QE 随时间的变化曲线

Fig. 3 Curves of photocurrent and QE with the time

+ ——监测电流; * ——热发射电流

可见:上述制备方法除受暗电流影响和 Cs 沉积量可能失控外,还存在因 Cs 源采用极细的 Cs₂CrO₄ 和 ZrAl 粉末而影响制备室内的真空问题;内置的 Cs 源加热器靠近阴极基底,且温度很高,严重影响了对反应温度的控制。

为了解决这些问题,设计了第 2 种制备方法,即用纯金属 Cs 直接蒸发的 Cs 蒸气去激活 Te 膜。在这一方法中,铯炉通过真空阀与真空室相接,将纯 Cs 加热到 170 °C 蒸发,由真空阀控制 Cs 原子流量。这样,铯炉对暗电流无贡献,监测电流仅是光电流,有利于控制 Cs 元素的沉积;Cs 源对真空度无影响,也不影响阴极基底温度,可以精确控制反应温度,消除了基底温度对制备过程的影响。

图 4 是采用纯 Cs 源制备光阴极时,不同基底温度下的 QE 曲线。基底不加热时,附着在阴极表面的 Cs 不与 Te 反应,而被缓慢氧化,导致量子效率下降很快;在 100 °C 下对基底处理,阴极效率得以部分恢复。制备过程中,基底保持 140 °C 的反应温度,Cs 持续平稳地与 Te

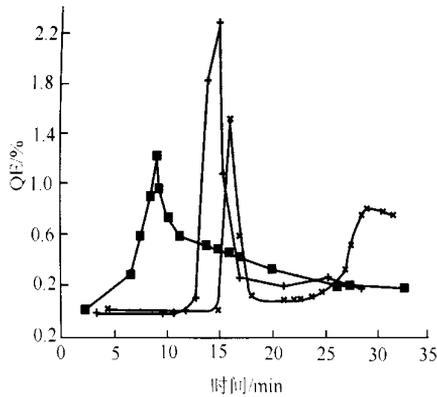


图4 采用纯Cs源时不同基底温度下的制备过程

Fig. 4 The fabricating process in alterable cathode temperature using pure Cs source

— 基底温度 140 ,180 退火;
+ — 基底没有加热处理;
× — 基底温度 70 ,100 退火

发生反应,未出现效率急剧降低的现象。

量子效率的绝对值与基底温度没有明显联系,但与实验中的真空度密切相关。这种方法制备的阴极的量子效率仅为 0.3% ~ 2%。装置的真空度目前仅保持在 10^{-4} Pa 量级,从铯炉蒸发出的 Cs 原子,须经 15 cm 长的 Cs 蒸气导管,在此过程中,Cs 原子易被氧化,沉积到 Te 膜表面已部分丧失活性,影响了最后制备的阴极效率和寿命。另外,在现有真空度水平下,铯炉中易形成一层 Cs 的氧化物薄膜,铯蒸气不易溢出,Cs 蒸气出现的时间不能预计,流量不易控制,致使制备的 Cs_2Te 层不均匀。制备室内 10^{-4} Pa 的真空水平使得阴极效率下降很快,在 200 min 内,效率降低了 80%。

4 新的光阴极制备室设计

为了得到高品质 Cs_2Te 光阴极,设计了新的光阴极制备室。在该设计中,分子泵附加 1 个液氮冷凝装置,整个系统增加 1 台离子泵,设计真空为 10^{-7} Pa。该制备室把实际蒸镀区限制在容积约为 100 cm^3 范围内。为了与 DC-SC 注入器的 1 + 1/2 超导腔连接,1 套精密的传输系统可把制备好的阴极在高真空下安装在注入器首部的皮尔斯枪中。

新的制备室已经正常运行,实验过程中真

空度可达 2×10^{-5} Pa。已用第 1 种方法在该制备室中制得效率高达 9% 的 Cs_2Te 光阴极。采用第 2 种方法制备时,预计可使 Cs_2Te 光阴极量子效率达 15%,阴极寿命有望超过 100 h。

参考文献:

- [1] Zhao Kui, Quan Shengwen, Hao Jiankui, et al. Peking University Superconducting Accelerator Facility for Free Electron Laser [J]. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A, 2002, 483:125~128.
- [2] 胡岩乐,赵夔,张保澄,等. 用于高平均功率自由电子激光器的 DC-RF 超导腔注入器 [J]. 高能物理与核物理, 2001, 25(8):787~792.
- [3] Zhao Kui, Hao Jiankui, Hu Yanle, et al. Research on DC-RF Superconducting Photocathode Injector for High Average Power FELs [J]. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A, 2001, 475:564~568.
- [4] Aulenbacher K. RF Guns and the Production of Polarized Electrons [R]. Stanford:SLAC, 1996.
- [5] Clendenin JE, Kotseroglou T, Mulhollan GA, et al. Generation of Low Emittance Beams Using V Semiconductor Photocathode in an RF Gun: SLAC-PUB-8355, LCLS-TN-00-02 [R]. Los Angeles:UCLA Faculty Center, 1999.
- [6] 唐渝兴. 强流电子束源中新型离子注入光阴极的研究 [D]. 北京:北京大学技术物理系, 2000.
- [7] Shefer E, Breskin A, Chechik R, et al. Coated Photocathodes for Visible Photon Imaging With Gaseous Photomultipliers [J]. Nucl Instrum Methods, 1999, A433:502~506.
- [8] Kong SH, Kinross-Wright J, Nguyen DC, et al. Performance of Cesium Telluride Photocathodes as an Electron Source for the Los Alamos Advanced FEL [J]. Nucl Instrum Methods, 1995, A358:284~286.
- [9] Boscolo I, Michelato P. Photocathodes: the State of the Art and Some News [J]. Nucl Instrum Methods, 2000, A445:389~393.
- [10] Kong SH, Kinross-Wright J, Nguyen DC, et al. Photocathodes for Free Electron Lasers [J]. Nucl Instrum Methods, 1995, A358:272~275.
- [11] Kong SH, Nguyen DC, Sheffield RL. Fabrication and Characterization of Cesium Telluride Photocathodes: A Promising Electron Source for the Los Alamos Advanced FEL [J]. Nucl Instrum Methods, 1995, A358:276~279.