

新型注铯镁金属光阴极的实验研究*

唐渝兴 赵 坤 郝建奎 王莉芳 全胜文 杨 希 张云驰 张保澄 赵 夔

(北京大学重离子所超导腔组,北京 100871)

(1999 年 9 月 10 日收到;1999 年 11 月 5 日收到修改稿)

报道了用于激光驱动高亮度注入器的新型光阴极的实验研究.用铯离子注入的方法得到了在镁基底上的掺铯合金光阴极,研究了注入、溅射及光电发射的机制和参数.用此阴极得到了比纯金属镁阴极高约一个量级的量子效率和绿光下的单光子发射效应,为用于强流短脉冲电子束的光阴极研究提供了新的途径.

PACC: 7906; 6180J

1 引 言

八十年代中期以来,在加速器物理和技术的发展过程中,科学家对电子束流的亮度要求越来越高,这刺激了激光驱动的高亮度电子束源的出现.十多年来,它的应用从高能物理、自由电子激光等领域迅速拓宽到固体物理、微束团簇物理、相干光源等领域.近年来,在第四代光源、激光-电子束团相互作用、硬 X 射线产生等研究的过程中,一种能提供低发射度强流电子束的光阴极微波电子枪获得了成功的发展.光阴极微波电子枪是当代激光技术和加速器技术飞速发展的结晶,它可以提供几个 ps 脉宽,电荷 1 nC,归一化发射度 1π -mm-mrad 的高亮度电子束.它的高品质性能为第四代光源(SASE)的发展提供了良好的机遇.

半导体和金属是光阴极微波电子枪采用的阴极材料.前者量子效率高,但寿命相对较短,真空要求苛刻,且不能承受大功率激光.金属光阴极坚固耐用而且寿命长,可耐受较差的真空环境,响应时间快,能承受大功率激光,但它的高逸出功限制了其在激光下的电子产额,量子效率一般比半导体阴极低两、三个量级,这就对激光器的功率提出了很高的要求,使整体造价大大提高.

如果将金属铯蒸镀到具有高逸出功的金属的表面(约 10^{14} — 10^{15} cm^{-2}),则能大大降低其逸出功并增加其量子效率^[1].由于蒸镀的薄膜不能承受强激光,我们考虑用离子注入的方法在金属表面 30 nm

内形成均匀的掺铯合金,这样的合金应该具有较高的量子效率、稳定的寿命和高损坏阈值,能结合半导体和金属材料两者的优点.

在研制光阴极微波电子枪之前,金属光阴极几乎没有应用价值,因而关于离子注入合金光电发射性能的研究非常少.最近几个月中,我们在这方面进行了一些尝试性的实验.由于金属镁较高的量子效率,我们选择它作为注入的基底^[2].注入参数由 TRIM96 程序来进行优化,最后选择了 25 keV, $1.5 \times 10^{-6} \text{ A}$ 的铯离子进行注入.

2 离子注入合金光阴极的制备

本实验建造了一套包括铯离子源、光阴极制备室、引出室的高真空设备.在铯离子源中,通过与多孔钨的电荷交换,被加热的铯蒸气变成 Cs^+ 离子.整个铯源被置于 +25 kV 高压上, Cs^+ 则以 25 keV 的能量注入到 Mg 基底表面.

首先,将一块直径 6 mm,厚度 3 mm 的高纯镁块镶在不锈钢基底的头部.用 $0.5 \mu\text{m}$ 的抛光膏将其抛光至镜面,然后清洗并装入制备室中.在注入前,基底被加热到约 200°C 出气,并用 20 MW/cm^2 , 532 nm 的强激光进一步清洗.在 $6.2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 真空下, 25 keV, $1.5 \times 10^{-6} \text{ A}$ 的 Cs^+ 离子被注入到镁阴极中,注入时间 1 小时,通量约 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$.利用聚焦和偏转电极,可以让铯离子均匀分布到镁阴极的表面. Cs^+ 离子与基底垂直面的夹角为 30°,溅射系数约为 8,因此注入的同时许多镁原子被溅射掉,此

*国家自然科学基金(批准号 69381005,19735004)资助的课题.

效应被 He^+ 的 RBS (卢瑟福背散射) 分析所证实. 图 1 显示了得到的 RBS 谱和由谱得到的铯含量分布, 从图中可见, 由于溅射剥离效应, 在镁表面下 30 nm 范围内得到约 2.1% 的铯离子均匀分布.

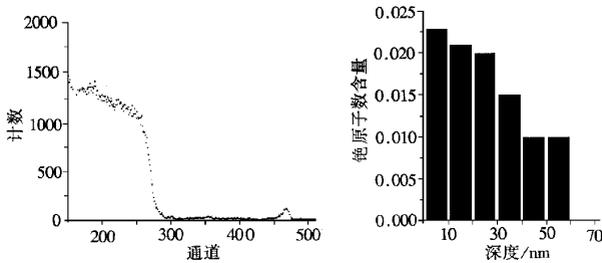


图 1 样品的 RBS 谱和铯含量分布

由于注入过程中会产生辐射损伤, 所以注入完成后镁铯合金被加热到 250°C 约 40 min, 以消除损伤并使铯分布更均匀^[3]. 热处理后, 阴极在高真空条件下被传输到引出室中, 引出室真空约为 2.0×10^{-6} Pa.

3 紫外激光下的光电发射

在实验中使用了一台 Nd:YAG 固体锁模激光器, 它可以产生 50 ps, 1 Hz 的 1064 nm, 532 nm, 266 nm 激光. 激光通过石英窗口射入引出室中, 它与阴极表面的垂直面的夹角为 74° (该角度是金属的 Brewster 角, 此角度下 p 光 (偏振方向垂直于金属表面) 的吸收率最高). 引出室是 35 kV 的直流 Pierce 电子枪, 表面场强为 1 MV/m.

首先采用 266 nm 的紫外激光作实验, 由于在以前文献中得到的量子效率各不相同^[4,6], 我们决定在本系统中相同条件下比较纯镁和注入后镁铯合金的光电发射. 图 2 是在不同紫外激光能量下得到的量子效率.

图中镁铯合金曲线的弯曲是由于激光能量太高而出现空间电荷限制, 使产生的电子不能被全部引出. 在完全引出区域, 纯镁的量子效率为 1.6×10^{-5} 电子/光子, 而镁铯合金的量子效率为 9.8×10^{-5} 电子/光子, 大约是纯镁的 6 倍. 从合金中得到的电荷为 45 pC/脉冲, 平均电流 0.9 A, 电流密度大于 100 A/cm^2 , 发射度约为 $(0.5-2) \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$, 归一化亮度为 $4.6 \times 10^{10} \text{ A/m}^2 \cdot \text{rad}^2$.

合金的表面在注入中和注入后始终保持银白色的镜面, 且阴极在 2×10^{-6} Pa 真空下保存了一个星

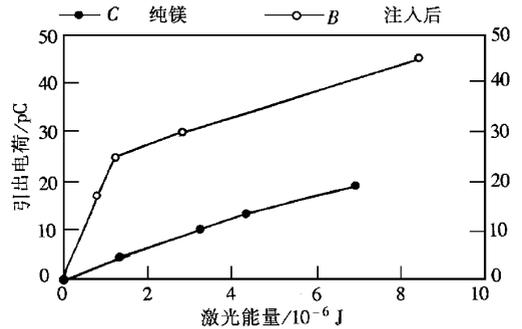


图 2 纯镁和镁铯合金的光电发射曲线

期而量子效率没有明显下降. 为了检验氧化对阴极的影响, 该离子注入阴极被暴露于大气约 15 min. 暴露后阴极对绿光和紫外光几乎没有响应, 但用 20 MW/cm^2 的强激光对表面进行清洗后, 该阴极的光电发射能恢复到原来的 60%, 约为纯镁的 4 倍. 并且表面在此过程中始终保持银白色. 这说明注入后紧接着的加热去掉了注入时可能留在表面的铯, 光电发射的确来自合金内部, 并且还证实了大功率激光可以作为一种获得金属阴极清洁表面的好方法.

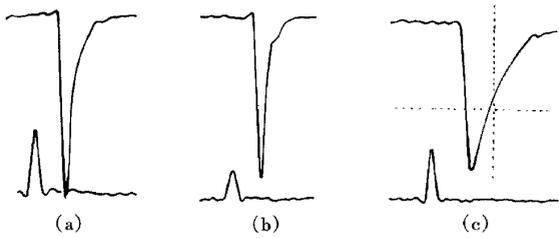
4 绿激光下的光电发射

利用该激光系统, 我们观察到了该合金阴极在 532 nm 激光下的单光子发射. 首先, 纯镁阴极在 532 nm 绿光下的双光子发射被验证, 其光电发射阈值约 4 MW/cm^2 , 在 8.1 MW/cm^2 绿光下量子效率为 6.6×10^7 , 当激光能量超过 21 MW/cm^2 时则出现我们不希望的等离子体发射 (等离子体发射一般为纳秒量级, 将破坏短脉冲性质).

对于镁铯合金, 光电发射阈值太低而无法测出, 在 1.8 MW/cm^2 绿光下的量子效率为 2.0×10^{-5} , 平均电流约 0.3 A, 这比纯镁的效率大大提高. 当绿光能量超过 14 MW/cm^2 也出现等离子体发射.

图 3 显示了在不同阴极和不同激光下的光电发射波形. 在其测量中引出高压和示波器的刻度始终保持不变. 从图中可以看到, 绿光照射到镁铯合金上得到的波形比绿光照射到纯镁上的波形要窄, 而是和紫外光照射到阴极上的波形一致, 而且量子效率提高了约一个量级, 从 6.6×10^{-7} 到了 2.0×10^{-5} , 这证明镁铯合金阴极的光电发射谱延伸到绿光范围而产生单光子发射.

这个发现有直观的应用价值, 因为目前常用的



(a) 紫外光作用于镁镉合金 (b) 绿光作用于镁镉合金 (c) 绿光作用于纯镁

图 3 不同阴极和不同激光下的光电发射波形

紫外固体激光器一般都是用绿光倍频得来,而倍频的效率一般不到 10%,如果有效率为 10^{-4} — 10^{-5} 量级的单光子响应,就可以直接用绿光作为驱动光源,这将大大降低对激光器的能量要求和造价。

我们还测量了极化绿光的光电发射。由于倍频的非线性效应,激光器出射的绿光几乎是无偏振的。经过一个偏振片后,就可以得到线偏振的激光,旋转偏振片,可得到沿不同方向的偏振光,且强度保持不变。将此偏振光沿 74° 角入射到阴极表面。改变偏振的方向,得到了如图 4 的响应曲线。

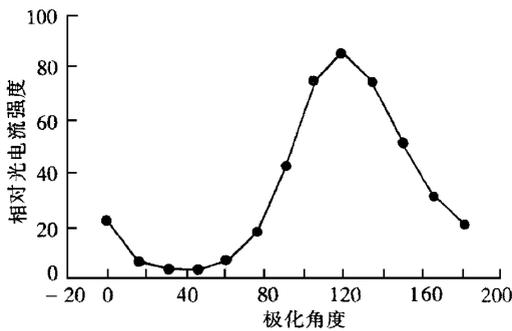


图 4 镁镉合金在不同偏振角下对绿光偏振光的发射曲线

$$I_p = I_0 \cos^2(\theta - \phi), I_s = I_0 \sin^2(\theta - \phi), \phi = 35^\circ$$

由于在金属内部光电发射与偏振方向无关,因此该曲线反映了金属对偏振光的吸收本领。由图中可以看出该曲线基本上为正弦曲线,这符合金属对 p 光(偏振方向垂直于金属表面)和 s 光(偏振方向

平行于金属表面)的吸收规律,即在 Brewster 角附近对 p 光的吸收远远大于对 s 光的吸收。由图中还可以看出两者吸收之比为 $E_s/E_p = 4\%$ 。因此光电实验中使用 p 光的效率更高。

5 结 论

离子注入的镁镉合金光阴极在 532 nm 绿光下得到了 2.0×10^{-5} 的量子效率,在 266 nm 紫外光下为 9.8×10^{-5} ,远远高于纯镁的光电响应。同时还证实了该阴极是稳定的,能承受高功率激光照射,这说明铯原子对改变金属的光电特性有很明显的作用。实验还提供了用绿光而不是传统的紫外光驱动金属合金光阴极的可能性。可以考虑在下一步的工作中用混合注入等方法以增加铯含量,或试用不同的基底(绝对钨、金等高逸出功金属的作用更明显)^[1,5],应该会得到更有用的结果。这种离子注入光阴极将会给用于强流短脉冲电子束的光阴极研究提供新的途径。

- [1] A. H. Sommer, Photoemissive Materials, Preparation, Properties and Use (John Wiley & Sons, Inc., 1968).
- [2] Rong-li Geng, R&D of Critical Technology in High-Brightness Laser Driven Injector (Doctoral Thesis of Peking University, 1996) [in Chinese] 耿荣礼, 激光驱动超导高亮度注入器关键技术的实验研究和理论分析(北京大学博士论文,北京,1996)。
- [3] Yi-hua Wang, Zhen-qiong Hu, Ion Implantation and Basic Analysis (Aeronautic Industry Press, 1992) [in Chinese] 王贻华、胡正琼, 离子注入与分析技术, 航空工业出版社, 北京, 1992。
- [4] T. Srinivasan-Ran et al., *J. Appl. Phys.*, **69**(5) (1991), 3291.
- [5] Zeng-quan Xue, Quan-de Wu, Electron Emission & Electron Spectra (Peking Univ. Press, Beijing, 1993) [in Chinese] 薛增泉、吴全德, 电子发射与电子能谱, 北京大学出版社, 北京, 1993。
- [6] J. Ivri, L. A. Levin, *Appl. Phys. Lett.*, **62**(12) (1993), 1228.
- [7] K. Zhao, R. L. Geng et al., *Nucl. Instr. Meth., in Phys. Resear.*, **A375** (1996), 147.

EXPERIMENTAL STUDY OF NEW-TYPE Cs⁺ ION-IMPLANTED Mg PHOTOCATHODE*

TANG YU-XING ZHAO KUN HAO JIAN-KUI WANG LI-FANG QUAN SHENG-WEN

YANG XI ZHANG YU-CHI ZHANG BAO-CHENG ZHAO KUI

(*Superconductive Group ,Institute of Heavy Ion Physics ,Peking University ,Beijing 100871 ,China*)

(Received 10 September 1999 ; revised manuscript received 5 November 1999)

ABSTRACT

The development of a new-type photocathode for laser-driven high-brightness e-beam injector was reported. By the use of Cs⁺ ion implantation a Mg-Cs alloy photocathode on Mg substrate was made. Some parameters of the ion implantation ,the sputtering process ,the photoemission and its mechanism were studied. Compared with the pure Mg photocathode ,an order of magnitude improvement in the quantum efficiency from this photocathode has been obtained ,meanwhile , we have also obtained a single-photon electron emission under the driving of 532nm green laser ,the latter is a new development for the first time so far as we know in the world. Our experimental results provided a new way for the technology of high current ,ultra short pulse e-beam.

PACC : 7906 ; 6180J

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 69381005 ,19735004).