

# 激光驱动的钠钾铯光电阴极的稳定性研究

刘燕文 张耿民 刘惟敏 吴锦雷 薛增泉 吴全德

(北京大学无线电电子学系, 北京 100871)

**提要** 测得了YAG激光(波长为 $1.06\ \mu\text{m}$ 和 $0.53\ \mu\text{m}$ ,脉冲宽度为 $50\ \text{ps}$ )作用下的透射式和反射式钠钾铯阴极具有稳定光电发射最大激光光强并对其进行了讨论。当光强继续增加一定值时,阴极薄膜将被蒸发。

**关键词** 钠钾铯阴极,超短激光脉冲,阴极的稳定性

## 1 引言

光阴极与超导腔结合的高亮度电子注入器是近年来发展的为自由电子激光器和TEV级直线对撞机研制的新型电子注入器,这种注入器不但能提供高亮度的电子束流,极快的响应速度,且其具有低的能量散度,低的发射度等优点<sup>[1]</sup>。这就要求作为电子注入器的光电阴极必须能提供大的电流密度和低发射度的电子束流。另外,超导腔具有很高的瞬时电场强度,从而使从阴极发射的电子能够很快接近光速,因此减弱了空间电荷效应引起的发射度增大,保证了束流的高品质。这就要求置于强场中的光电阴极具有低的场致发射,从而保证具有较低噪声。目前主要有两类用于激光脉冲驱动的高亮度光阴极<sup>[2]</sup>。一类是金属光电发射体,如金、铜、不锈钢等。这类阴极可以暴露于空气,不需要激活就能在激光作用下发射电子,但它们的量子效率很低( $\eta \sim 10^{-7}$ );另一类是高量子效率的实用光电阴极,如铯铷阴极、多碱阴极等,这类阴极具有很高的量子效率( $\eta \sim 0.3$ )。但需要在高真空系统中制备和使用,因为它们很容易被污染,造成阴极中毒。在强激光作用下,阴极材料很容易被分解蒸发,造成阴极的稳定性差、寿命短。对于第二类阴极,目前人们研究较多的是铯铷阴极<sup>[3]</sup>。在激光作用下的光电流密度可达 $200\ \text{A}/\text{cm}^2$ ,亮度达 $10^9\ \text{A}/\text{m}^2 \cdot \text{rad}$ 。但这种阴极容易与残余的活泼气体反应,其中的铯在被加速的残余气体的离子轰击和激光作用下容易分解出来并脱附,而这些铯被吸附到超导腔内壁上会引起腔内表面的场发射和热损耗,以致影响腔体内壁的超导特性。另外这种阴极具有很强的场致发射,不利于在自由电子激光器中使用。基于以上原因,我们为超导腔加速器的电子注入器研究制备了反射式钠钾铯( $\text{Na}_2\text{KSb}$ )阴极。这种阴极具有较高的量子效率,并且它不含有铯;能在 $180\ \text{C}$ 的环境下工作,耐恶劣环境的能力较好。因此这种阴极在强激光作用下比其他含铯铷化合物阴极的稳定性好。在强电场作用下,场致发射能力低。我们测试的钠钾铯阴极在波长为 $0.53\ \mu\text{m}$ 的超短脉冲激光照射下的量子效率及峰值电流密度分别为 $3.1\%$ 和 $780\ \text{A}/\text{cm}^2$ <sup>[4]</sup>。为了更

详细地了解钠钾铯阴极在激光作用下的特性,本文研究了它的稳定性。

## 2 阴极的稳定性研究

激光照射在阴极上,将会使阴极的温度上升,从而造成阴极的不稳定性。阴极被破坏的阈值不仅与材料的导热系数、比重、热容等本身性质有关,而且与激光的功率密度、能量分布、作用时间等参数有直接关系,加上激光与材料的相互作用会与材料的吸收、反射、热辐射、热传导以及等离子体效应等有关系。从而使激光与阴极的相互作用变得十分复杂,因此激光对薄膜材料的破坏作用虽然已有许多研究<sup>[5,6]</sup>,但其破坏机理仍不十分清楚。由于碱金属铯化物光电阴极不能在 200 °C 以上稳定工作,因此激光对这种阴极的影响很大<sup>[7]</sup>,故有人利用具有很高热导率的金刚石薄膜作基底<sup>[8]</sup>,以此来降低阴极的温度。这也是我们在实验中采用热导率比较高的无氧铜和不锈钢作阴极基底的原因之一。

钠钾铯阴极的制备装置及工艺见文献[4]。我们制备的光阴极积分灵敏度一般为 30~60  $\mu\text{A}/\text{lm}$ 。图 1 给出了测试装置简图。光源采用 Nd:YAG 染料锁模激光器,波长为 1.06  $\mu\text{m}$  的锁模脉冲序列,每个序列由十个左右的脉冲组成,脉冲宽度为 50 ps,脉冲间距为 4.5 ns,脉冲序列的能量为 10 mJ。利用倍频晶体可产生波长为 0.53  $\mu\text{m}$  的绿光。激光束经半透半反镜后,一束经衰减片照射在样品上,另一束经光电二极管后由存储示波器(HP54502A 型)显示。激光能量可用衰减片改变。激光能量的测量是把能量测试仪放在光阴极样品的位置上,这样能量测试仪上显示的能量就对应示波器上显示的一个光脉冲的高度,从而可以求出单位高的光脉冲所对应的激光能量。我们在实验中记录十组数据,取其平均值作为实验标准值。照射在阴极上每个激光脉冲的能量由示波器上显示的光脉冲的高度乘以这个标准值得到。

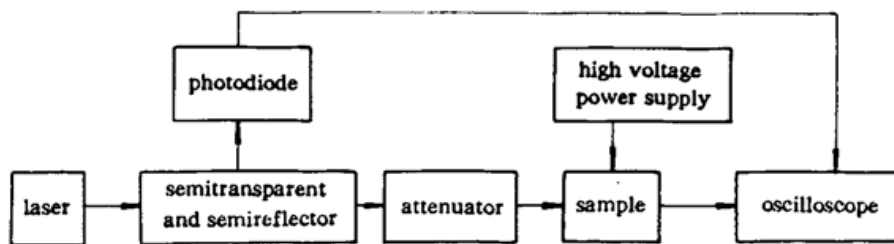


Fig. 1 Schematic diagram of an experimental system of photocathode characteristics driven by laser pulses

图 2 给出了不同波长的激光照射下的不同基底阴极的电流密度与激光光强的关系。

从图 2 (a) 上可看出,对于波长为 0.53  $\mu\text{m}$  的激光,当光强较低时,阴极的光电流密度与光强成正比,当光强增大到一定值时,光电流密度不再与光强成正比。从图 2 (b) 可看出,对于波长为 1.06  $\mu\text{m}$  的激光,当光强较低时,阴极的光电流密度的对数与光强成正比,其斜率约为 2。当光强增大到一定值时,光电流密度的对数不再与光强成线性关系。

对于钠钾铯阴极有

$$J = B_1 I_0 \quad (\lambda = 0.53 \mu\text{m}) \quad (1)$$

$$J = B_2 I_0^2 \quad (\lambda = 1.06 \mu\text{m}) \quad (2)$$

这与由图 3 给出的低光强部分的实验结果一致。当光强增大到一定值时,实验结果偏离理论值,这时阴极进入不稳定工作状态,激光光强阈值见表 1。

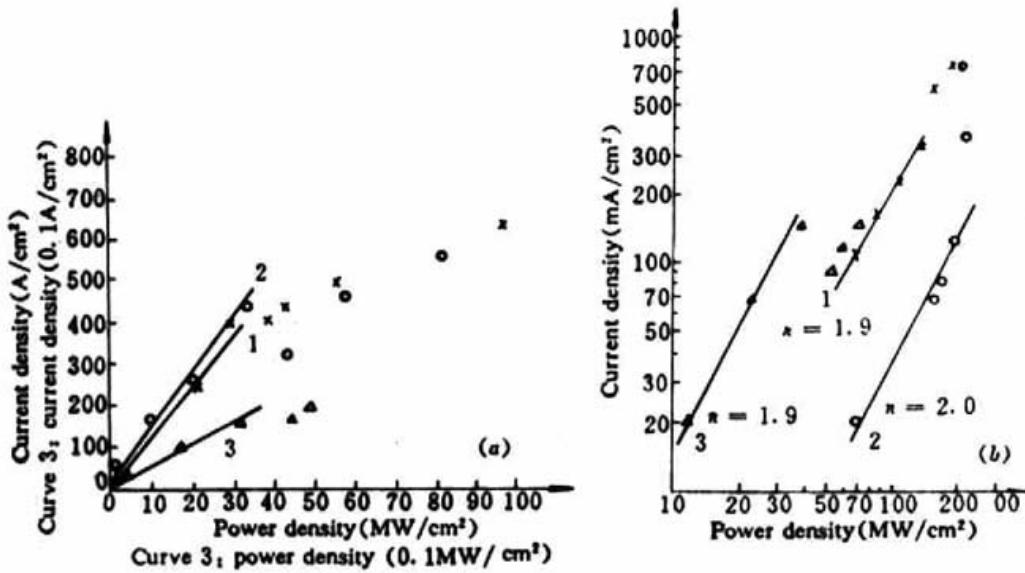


Fig. 2 Photocurrent density versus laser power. Laser wavelength (a)  $0.53 \mu\text{m}$ ; (b)  $1.06 \mu\text{m}$ . Photocathode's substrates, 1 is stainless steel; 2 is copper (without oxygen); 3 is glass

Table 1 Laser threshold power ( $\text{MW}/\text{cm}^2$ )

	$\lambda = 0.53 \mu\text{m}$	$\lambda = 1.06 \mu\text{m}$
Stainless steel	28.0	120.0
Copper (oxygen free)	38.0	194.0
Glass	3.5	40.0

激光照射在阴极上时,阴极的温度将升高,随着激光光强的增加,阴极的温度也上升。由于钠钾铋阴极在超过  $200^\circ\text{C}$  时不能稳定工作,所以当激光光强增加到一定值时阴极就不能稳定地工作。

由热传导方程可求出脉冲激光辐射将使阴极温度升高为<sup>[8]</sup>

$$\Delta T \sim I_0 \alpha / (2\kappa \rho C_v)^{1/2} \quad (3)$$

$\alpha$  为阴极的吸收系数,  $\kappa$ ,  $\rho$  和  $C_v$  分别为阴极与基底所组成系统的热导率、密度及热容,由于阴极较薄(约  $100 \text{ nm}$ ),所以这些参数将主要决定于基底的特性,因此  $\kappa$ ,  $\rho$  和  $C_v$  可近似取为基底的热导率、密度及热容<sup>[8]</sup>。为了说明这一点,下面进行一下简单分析。激光产生的电子通过与声子的相互作用将电子的动能转换为晶格的动能<sup>[9,10]</sup>,固体中声子的传播速度一般为  $3 \times 10^5 \text{ cm/s}$ <sup>[11]</sup>,  $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极光电子的逸出深度为  $55 \text{ nm}$ <sup>[12]</sup>,因此从  $\text{Na}_2\text{KSb}$  阴极薄膜距离基底  $100 - 55 = 45 \text{ nm}$  处的热能传导到基底的时间约为  $15 \text{ ps}$ ,这说明阴极薄膜的热量非常快地传导给基底。因此阴极薄膜的温度主要决定于基底的假设基本合理。不同基底的各项参数见表 2。

Table 2 The parameters of the photocathode's substrates

	$\kappa$ ( $\text{W}/\text{cmK}$ )	$\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$C_v$ ( $\text{J}/\text{gK}$ )
Stainless steel	0.80	7.87	0.46
Copper (oxygen free)	4.01	8.93	0.39
Glass	0.01	2.23	0.84

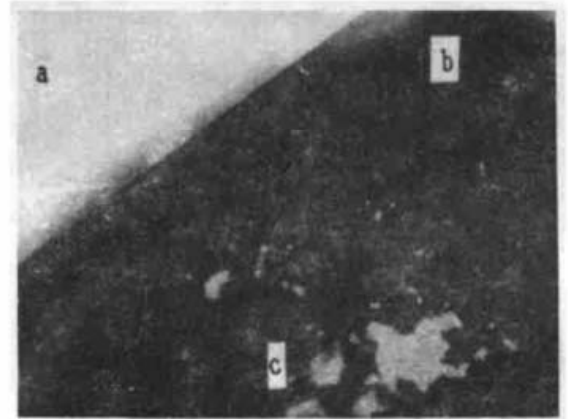


Fig. 3

因此利用公式(3)可求出不同基底的阴极能够稳定工作的最大光强之比为

$$I_s : I_c : I_g = 12 : 27 : 1$$

$I_s$ ,  $I_c$  和  $I_g$  是阴极基底分别为不锈钢、无氧铜和玻璃时阴极能够稳定工作的最大光强。

这与由表 1 得出的实验结果

$$\lambda = 0.53 \mu\text{m} \quad I_s : I_c : I_g = 12 : 17 : 2$$

$$\lambda = 1.06 \mu\text{m} \quad I_s : I_c : I_g = 12 : 20 : 4$$

基本上一致。由于激光能够透过玻璃基底,从而使以玻璃为基底的阴极能够稳定工作的最大光强值比理论值偏高。玻璃对红外光吸收率比绿光的小,因此以玻璃为基底的阴极能够稳定工作的最大红外光强比理论值偏高的程度更高。

从(3)式还可看出,对同一个阴极,由于阴极薄膜对不同波长激光的吸收系数不同,所以在波长不同的激光作用下,同一阴极稳定工作的最大光强也不同。根据文献[13]给出的吸收系数的经验公式

$$\alpha(h\nu) = [3.7503 - 10.7481h\nu + 11.1741(h\nu)^2 - 4.9060(h\nu)^3 + 0.8346(h\nu)^3] \times 10^5 \quad (4)$$

可知钠钾铯阴极对波长为  $0.53 \mu\text{m}$  和  $1.06 \mu\text{m}$  的激光的吸收系数之比近似为  $10 : 1$ , 所以由(3)式可知,在不同波长的激光作用下,同一个阴极稳定工作的最大光强之比为

$$I_1 : I_2 = 1 : 10$$

$I_1$  和  $I_2$  分别为激光波长是  $0.53 \mu\text{m}$  和  $1.06 \mu\text{m}$  时阴极稳定工作的最大光强。这与由表 1 得出的实验结果

$$\text{不锈钢} \quad I_1 : I_2 = 1 : 4$$

$$\text{无氧铜} \quad I_1 : I_2 = 1 : 5$$

$$\text{玻璃} \quad I_1 : I_2 = 1 : 11$$

定性地一致。

钠钾铯阴极能够稳定工作的最高温度约为  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , 以不锈钢为基底的阴极所对应的绿光光强由表 1 知为  $28 \text{ MW/cm}^2$ , 因此当绿光光强增加到  $200 \text{ MW/cm}^2$  时, 由公式(3)可知阴极的温度将上升至  $200 \times (200/28) = 1430 \text{ }^\circ\text{C}$ , 由此可知钠钾铯阴极薄膜将会被蒸发。

图 3 给出了当激光光强约为  $200 \text{ MW/cm}^2$  时阴极被破坏的情况(激光波长为  $0.53 \mu\text{m}$ , 阴极基底为不锈钢)。从图可看出阴极材料被蒸发而出现的斑点, 这说明光强为  $200 \text{ MW/cm}^2$  的脉冲激光照射下被完全破坏。

### 3 结 论

本文利用超短脉冲激光器测试了我们制备的以不锈钢和无氧铜为基底的反射式及透射式钠钾铯阴极的稳定发射特性, 对于反射式阴极, 阴极能够稳定工作的最大光强约为  $10^7 \text{ W/cm}^2$  ( $\lambda = 0.53 \mu\text{m}$ ) 和  $10^8 \text{ W/cm}^2$  ( $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ ), 对于透射式阴极, 其最大光强为  $10^6 \text{ W/cm}^2$  ( $\lambda = 0.53 \mu\text{m}$ ) 和  $10^7 \text{ W/cm}^2$  ( $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ )。对于波长为  $0.53 \mu\text{m}$  的激光, 当光强增加到  $10^8 \text{ W/cm}^2$  时, 基底为不锈钢的钠钾铯阴极将被蒸发掉。

## 参 考 文 献

- 1 C. H. Lee, P. E. Oettinger, E. R. Pughet *et al.*. Electron emission of over 200 A/cm<sup>2</sup> from a pulsed laser irradiated photocathode. *Nucl. Sci.*, 1985, **32**(5): 3045~3047
- 2 L. Serafini. Numerical simulation results for the wuppertal sc RF gun. Proc. of 2nd EPAC. Conf. Nice (France), 1990. 294~296
- 3 C. H. Lee, P. E. Oettinger. Particle laser activated photoemissive electron source. *Rev. Sci. Inst.*, 1985, **56**: 560~563
- 4 刘燕文, 张耿民, 刘惟敏等. 激光驱动的钠钾铟光电阴极的研究. *真空科学与技术学报*, 1995, **15**(5): 304~309
- 5 M. J. Soileau. Ripple structures associated with ordered surface defects in dielectrics. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1984, **QE-20**: 464~467
- 6 C. D. Marris, W. N. Fath, J. H. Dancy *et al.*. Pulsed laser-induced damage of metals at 492 nm. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(22): 4063~4066
- 7 M. Boussoukaya. Photoemission in nanosecond and picosecond regimes. *Proc. Part. Accel. Conf., IEEE J. Quant. Electr.*, 1987, **CH2387**: 325~327
- 8 C. P. Beetz, B. Lincoln, K. Segall *et al.*. Application of diamond film to photocathode electron guns and accelerators. *Proc. Part. Accel. Conf., IEEE J. Quant. Electr.*, 1991, **CH3038**: 1981~1983
- 9 J. G. Fujimoto, J. M. Liu, E. P. Ippen. Femtosecond laser interaction with metallic tungsten and nonequilibrium electron and lattice temperature. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **53**(19): 1837~1840
- 10 H. E. Elasyed-Ali, T. B. Norris, M. A. Pessot *et al.*. Time-resolved observation of electron-phonon relaxation in copper. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(12): 1212~1215
- 11 孟宪章, 康昌鹤. 半导体物理学. 长春: 吉林大学出版社, 1993. 15
- 12 P. Dolizy. Optical method for investigating alkali antimonide photocathodes. *Vacuum*, 1980, **30**: 489~495
- 13 常本康, 刘元震, 谷文胜. 多碱阴极光吸收系数的研究. *光学学报*, 1992, **12**(1): 87~91

## Investigation on the Stability of Na<sub>2</sub>K<sub>2</sub>Sb Photocathode Stricken by Laser Pulses

Liu Yanwen   Zhang Gengmin   Liu Weimin   Wu Jinlei  
Xue Zengquan   Wu Quande

(Department of Radio-Electronics, Peking University, Beijing 100871)

**Abstract** In this paper, the stability of the Na<sub>2</sub>K<sub>2</sub>Sb photocathode stricken by an ultra-short pulsed laser (the wavelength is 1.06 μm and 0.53 μm, and the width of a pulse is 50 ps) is studied. The maximal value of laser power density under which photocathode can work stably is determined and discussed.

**Key words** Na<sub>2</sub>K<sub>2</sub>Sb photocathode, ultra short laser pulse, photocathode's stability