

GaAs 光电阴极激活时 Cs 的吸附效率研究*

牛 军¹⁾²⁾ 张益军¹⁾ 常本康^{1)†} 熊雅娟¹⁾

1) (南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

2) (南阳理工学院电子与电气工程系, 南阳 473004)

(2010年6月19日收到; 2010年7月19日收到修改稿)

从 NEA GaAs 光电阴极的激活光电流曲线发现, 当系统真空度不很高时, 在首次 Cs 激活阶段, 表面掺杂浓度较低的阴极材料, 其光电流产生需要的时间也较长. 同时, 随着系统真空度的提高, 这种时间上的差异又变得不再明显. 该现象表明, Cs 原子在阴极表面的吸附效率同表面层掺杂浓度以及系统真空度之间有直接的联系. 为定量分析这种关系, 本文根据实验数据建立了 Cs 在阴极表面吸附效率的数学模型, 利用该模型仿真的结果同实验现象非常符合. 该研究对进一步开展变掺杂阴极结构设计和制备工艺研究具有重要的价值和意义.

关键词: GaAs 光电阴极, 吸附效率, 真空度, 表面掺杂浓度

PACS: 42. 70. Gi, 42. 79. Pw, 71. 55. Eq, 72. 10. Bg

1. 引言

负电子亲和势 (NEA) GaAs 光电阴极作为三代微光像增强器的核心, 它的灵敏度和稳定性直接影响着微光像增强器性能的优劣. 变掺杂 GaAs 光电阴极由于在体内形成了一定的内建电场, 能够促进光电子向阴极表面的输运, 从而使阴极的量子效率得到有效的提高, 因此成为了当前研究的热点^[1-7].

由于要在体内产生一定的掺杂浓度差, 所以变掺杂阴极材料的表面掺杂浓度往往比均匀掺杂阴极要低. 这种较低的表面掺杂浓度, 会对激活过程中 Cs 原子在阴极表面的吸附情况产生一定的影响, 也就致使变掺杂阴极的制备工艺相对均匀掺杂阴极来说要有所不同. 因此, 在对变掺杂阴极进行激活实验的基础上, 进一步开展变掺杂阴极激活工艺研究, 通过深入的实验分析与理论建模仿真, 研究表面掺杂浓度、系统真空度等因素对激活过程中 Cs 在阴极表面吸附效果的影响规律, 探索更加适合变掺杂阴极制备的工艺要求, 对提高变掺杂阴极的制备水平和产品性能有着非常重要的作用. 目前, 对变掺杂阴极制备工艺的探索已取得了一定的成果^[8-10], 但是关于 Cs 在阴极表面吸附效率的研究,

还未见报道.

2. 实验

我们采用分子束外延 (MBE) 技术分别生长了两种 p 型重掺杂的 GaAs 光电阴极样品, 厚度均为 $1.6 \mu\text{m}$, 其中样品 1 是表面掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 的变掺杂阴极, 样品 2 是掺杂浓度为 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 的均匀掺杂阴极. 样品在激活前先进行化学清洗, 主要作用是脱脂, 去除表面氧化物等杂质和消除机械抛光给样品表面造成的缺陷. 然后迅速送入超高真空激活系统的加热位置, 在系统真空度不低于一定值时进行加热处理, 以获得原子级清洁的阴极表面. 加热结束, 待样品自然冷却到 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右开始激活. 对样品的激活我们采用“高一低温两步激活”法^[11,12], 高温处理温度为 $640 \text{ }^\circ\text{C}$, 低温处理温度为 $580 \text{ }^\circ\text{C}$. 激活采用 Cs 源持续、O 源断续的工艺进行.

为了研究系统真空度对阴极激活效果的影响, 分别在三种不同真空度条件下进行了多次激活实验, 激活过程中, 这三种情况下的系统真空度分别保持在 $5 \times 10^{-7} \text{ Pa}$, $1 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ 和 $1 \times 10^{-8} \text{ Pa}$. 每次实验中都对阴极的激活光电流曲线进行了记录, 图

* 国家自然科学基金 (批准号: 60678043), 南京理工大学自主科研专项计划 (批准号: 2010ZYTS032) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: bkchang@mail.njust.edu.cn

1,2,3 分别给出了在这三种真空度条件下的 Cs 激活阶段,光电流曲线从无到有的变化过程. 在图 1—图 3 中,(a),(b)分别为样品 1 在高温和低温下的实验曲线,(c),(d)分别为样品 2 在高温和低温下的实验曲线.

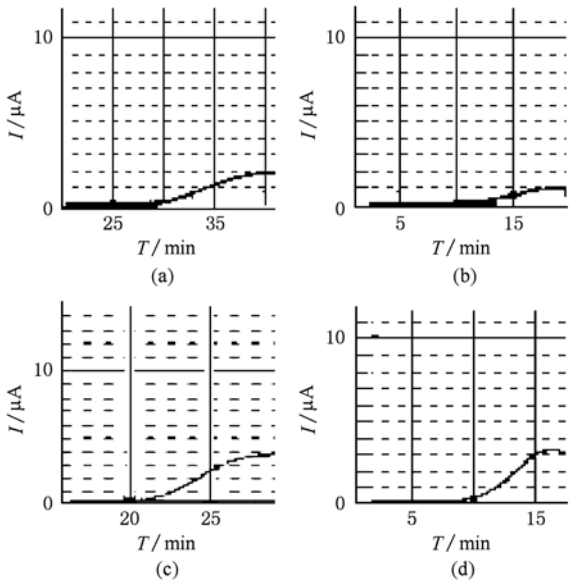


图 1 系统真空度为 5×10^{-7} Pa 时的阴极光电流曲线 (a) 样品 1 高温;(b)样品 1 低温;(c)样品 2 高温;(d)样品 2 低温

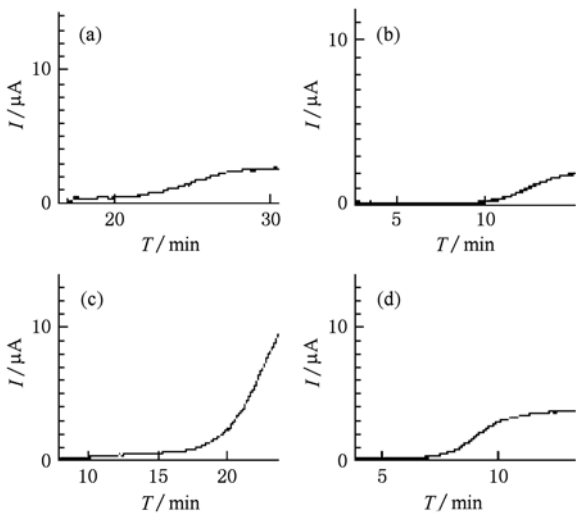


图 2 系统真空度为 1×10^{-7} Pa 时的阴极光电流曲线 (a) 样品 1 高温;(b)样品 1 低温;(c)样品 2 高温;(d)样品 2 低温

3. 实验分析与理论建模

对比图 1—图 3 中的曲线可以看出,在这三种

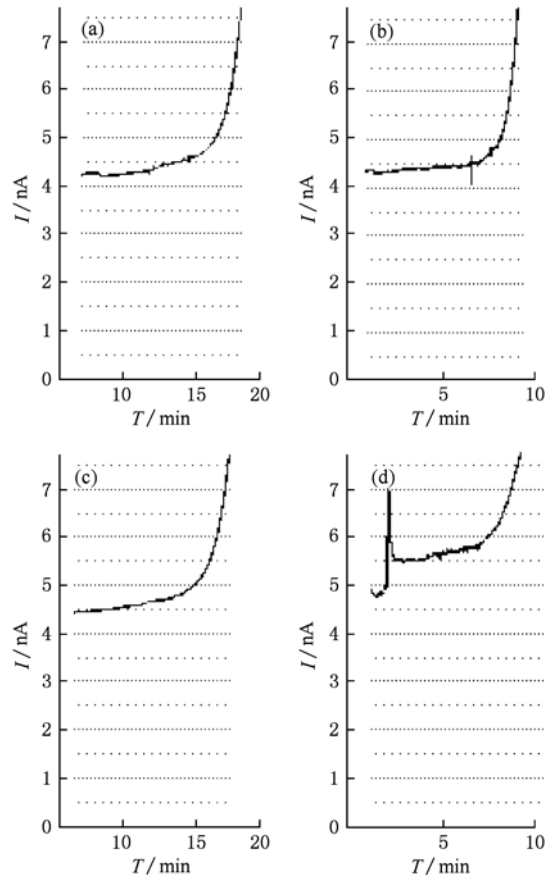


图 3 系统真空度为 1×10^{-8} Pa 时的阴极光电流曲线 (a) 样品 1 高温;(b)样品 1 低温;(c)样品 2 高温;(d)样品 2 低温

真空度条件下对阴极进行 Cs 激活时,样品 1 的激活光电流产生时间总是比样品 2 要长. 同时,随着系统真空度的不断提高,这种时间上的差距也在逐渐变得不甚明显. 阴极光电流的产生是由于真空室中 Cs 原子吸附到阴极表面后,和阴极表面层的掺杂离子 Be 形成了 Be-Cs 偶极子,降低了阴极表面的功函数,从而使阴极体内的部分光电子能够越过表面势垒而逸出到真空中. Cs 在阴极表面吸附得越快,产生光电流的时间也就越短. 上述实验现象表明,Cs 原子在阴极表面的吸附效率同阴极表面掺杂浓度有关,同时受系统真空度条件的影响也很大. 在前面的实验中,我们分别记录下了阴极样品的光电流产生时间,如表 1 所示,时间单位为 min.

表 1 不同真空度条件下样品的光电流产生时间

系统真空度/Pa	样品 1/min		样品 2/min	
	高温	低温	高温	低温
5×10^{-7}	31	14	21	10
1×10^{-7}	22	10	18	8
1×10^{-8}	17	8	16	7

如果用 F 表示 Cs 原子在阴极表面的吸附效率,观察表 1 中的数据可以发现, F 同表面掺杂浓度和系统真空度之间的关系具有如下特点:

- 1) 随系统真空度的提高, F 提高很快;
- 2) 相同真空度条件下,表面掺杂浓度较高的阴极材料,其 F 值也较大;
- 3) 真空度越高, F 随表面掺杂浓度增大而增大的程度则越小.

为了进一步明确 Cs 原子在阴极表面的吸附效率 F 同阴极表面掺杂浓度和系统真空度的关系,我们根据实验结果建立了 Cs 原子在阴极表面吸附效率的数学模型,如下式所示:

$$F \propto (K_1 \cdot N_V)^{(V_C/K_2)}, \quad (1)$$

式中, K_1, K_2 为常数,分别称为浓度因子和真空度因子, N_V 取阴极表面层每 cm^3 中的掺杂个数, V_C 为激活系统的真空度与压强单位 Pa 的比值. F 数值越大,代表 Cs 的吸附效率越高.

通过拟合计算,我们确定了 K_1, K_2 的值,当 $K_1 = 4.5 \times 10^{-20}, K_2 = 2.5 \times 10^{-6}$ 时,利用(1)式计算得到的 Cs 的相对吸附效率 F 的值,能够同实验现象吻合的比较好. 具体计算结果如表 2 所示.

表 2 Cs 的相对吸附效率计算结果

V_C	$N_V = 1 \times 10^{18}$	$N_V = 1 \times 10^{19}$
5×10^{-7}	0.5378	0.8524
1×10^{-7}	0.8833	0.9686
1×10^{-8}	0.9877	0.9968

从表 2 中的数据可以看出:

- 1) 在系统真空度为 5×10^{-7} Pa 时, F 受 N_V 的影响比较大,差距达到了 1:1.6.
- 2) 当系统真空度提高到 1×10^{-7} Pa 时, F 受 N_V 的影响明显减小,差距仅为 1:1.1. 同时,在 $V_C = 1 \times 10^{-7}, N_V = 1 \times 10^{18}$ 时计算得到的 F 值,同 $V_C = 5 \times 10^{-7}, N_V = 1 \times 10^{19}$ 时得到的 F 值比较接近.
- 3) 当系统真空度提高到 1×10^{-8} Pa 时, F 受 N_V 的影响已不再明显. 而且在 $V_C = 1 \times 10^{-7}, N_V = 1 \times 10^{19}$ 时计算得到的 F 值,同 $V_C = 1 \times 10^{-8}$ 时两种情况下得到的 F 值都比较接近.

对比表 1 和表 2 中的数据可知,表 2 中的计算结果同表 1 中的实验结果非常符合. 为了进一步检验该模型的准确性,我们又利用他人的实验结果进行了验证. 国外学者在这方面的研究很少,文献 [13] 对不同掺杂阴极的首次 Cs 激活现象进行了

实验研究,并记录了高温激活中不同样品在表面达到明显 Cs 过量状态时所需的时间,如表 3 所示. 我们利用(1)式计算了这些样品的 Cs 相对吸附效率,结果如表 4 所示.

表 3 文献[13]中不同样品达到表面 Cs 过量状态时所需时间(min)

系统真空度/Pa	样品 1 ($1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)	样品 2 ($7 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)	样品 3 ($1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$)
1×10^{-6}	140	65	40

表 4 对文献[13]中不同样品的 Cs 相对吸附效率 F 计算结果

	样品 1	样品 2	样品 3
F	0.2893	0.6300	0.7266

比较表 3,4 中的数据可知:样品 1 和 2 的 Cs 相对吸附效率,其计算结果比值为 1:2.18,实验数据比值为 1:2.15,二者非常相符;样品 3 和样品 1,2 相比,其计算结果同实验数据存在一定的误差,这主要是因为表 3 中记录的是表面达到 Cs 过量状态时所需的时间,而模型是基于光电流的产生时间建立的,因此计算时会有一定的偏差. 但是可以发现,该模型计算结果所反映的 Cs 吸附效率的变化规律同实验结果是完全一致的.

上述分析表明,在取 $K_1 = 4.5 \times 10^{-20}, K_2 = 2.5 \times 10^{-6}$ 时,利用(1)式对 Cs 原子在阴极表面的吸附效率进行理论仿真是符合实验规律的.

4. 讨 论

超高真空室中的 Cs 原子到达阴极表面后,和阴极体内表面层附近的杂质 Be 离子作用,形成了 Be-Cs 偶极子,这种作用能够使 Cs 原子有效吸附到阴极表面上. 由于阴极表面层杂质掺杂浓度的不同,掺杂浓度高的材料在单位体积内含有的杂质离子数量多,在相同的 Cs 蒸气暴露量下,单位时间内能够有效吸附到阴极表面的 Cs 原子就多,因而光电流产生的就快. 同时,系统中的残气成分对 Cs 原子的有效吸附也有很大的影响. 当系统真空度较低时,残气中的 H 原子将与 Cs 原子竞争并率先占据表面的有利位置,这将阻碍 Cs 原子在表面的吸附,致使 Cs 原子的吸附效率不高. 为了进一步明确表面掺杂浓度、系统真空度对 Cs 的吸附效率的影响程度,我们依据(1)式所建立的数学模型对 Cs 的吸附效率进行了仿真,结果如图 4,5 所示,分别为 Cs 的吸附

效率同系统真空度和阴极表面层掺杂浓度间的变化关系. 从图 4, 图 5 可以看出, 当系统真空度达到 1×10^{-8} Pa 以上时, Cs 在阴极表面的吸附效率已接近一个恒定的值, 不再随着真空度的提高以及表面掺杂浓度的提高而有明显的改变; 对于表面掺杂浓度低于 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的阴极, 当系统真空度低于 1×10^{-7} Pa 时, Cs 的吸附效率随真空度的降低下降很快. 而对表面掺杂浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的阴极, 当系统真空度低于 3×10^{-7} Pa 时才开始有明显的下降.

此外, 从图 1—3 的实验曲线可以看出, 在样品低温激活阶段, Cs 原子在阴极表面的吸附效率要比高温阶段快很多, 而且这种差别不受真空度条件的影响, 三种情况下的吸附效率都大约提高了 1 倍. 效率提高的原因主要是经过高温热处理后的阴极表面是一个富 Ga 的表面, 而杂质离子在材料内是代替了 Ga 的位置, Cs 原子沉积到富 Ga 表面后会同第一层的杂质 Be 离子紧密接触, 因此不能形成有效的 Be-Cs 偶极子, Be-Cs 偶极子的形成只能从第二层的 Be 离子开始; 而阴极再经过一次低温热处理后, 由于 As 原子的扩散能力较强, 材料内部的 As 原子将向表面扩散, 最终在表面形成富 As 状态, 同时表

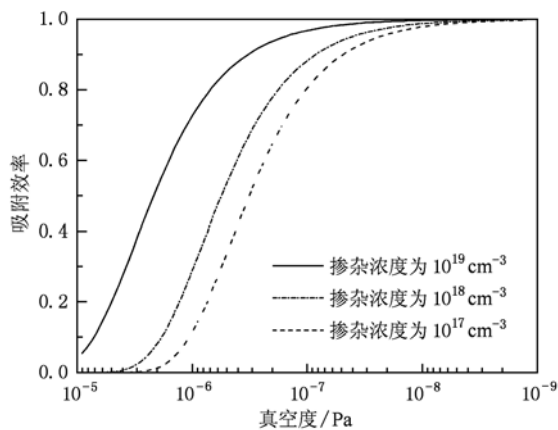


图 4 Cs 在阴极表面的吸附效率同系统真空度间的关系

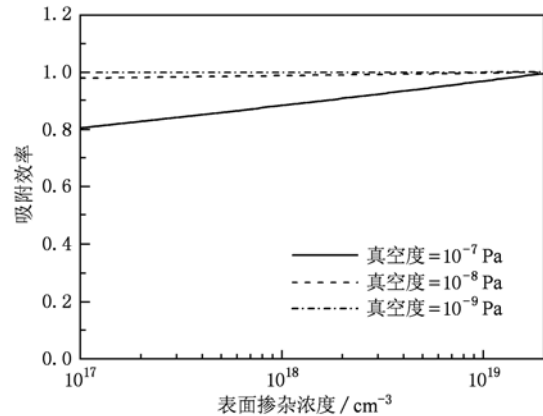


图 5 Cs 的吸附效率同阴极表面层掺杂浓度的关系

面结构更加有序, 更有利于 Cs 的吸附和 Be-Cs 偶极子的形成, 所以 Cs 的吸附效率会有所提高. 但是为什么低温激活时的 Cs 原子吸附效率总是比高温激活时提高 1 倍, 这个问题还值得做进一步的理论分析.

5. 结 论

在 GaAs 光电阴极激活过程中, Cs 原子在阴极表面的吸附效率同表面层掺杂浓度、系统真空度之间具有一定的关系. 本文根据实验现象, 并结合实验数据, 构建了 Cs 的吸附效率同阴极表面掺杂浓度、系统真空度间关系的数学模型, 利用该模型计算的结果同实验现象非常吻合. 理论仿真结果表明, 对于表面掺杂浓度低于 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的阴极, 当系统真空度低于 1×10^{-7} Pa 时, Cs 的吸附效率随真空度的降低下降很快. 因此, 要提高阴极的制备效果, 首先要提高激活系统的真空度. 同时, 在系统真空度受到实验设备水平的限制难以改善时, 还应该根据情况设计合适的阴极结构, 才能够提高实验的成功率. 本文的研究结果及方法对深入开展变掺杂 GaAs 光电阴极的制备工艺研究具有积极的意义和重要的参考价值.

- [1] Zou J J, Chang B K, Yang Z, Zhang Y J, Qiao J L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5842 (in Chinese) [邹继军、常本康、杨智、张益军、乔建良 2009 物理学报 **58** 5842]
- [2] Zou J J, Chang B K, Yang Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2992 (in Chinese) [邹继军、常本康、杨智 2007 物理学报 **56** 2992]

- [3] Niu J, Zhang Y J, Chang B K, Yang Z, Xiong Y J 2009 *Appl. Opt.* **48** 5445
- [4] Niu J, Yang Z, Chang B K, Qiao J L, Zhang Y J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5002 (in Chinese) [牛军、杨智、常本康、乔建良、张益军 2009 物理学报 **58** 5002]

- [5] Zhang Y J, Chang B K, Yang Z, Niu J, Xiong Y J, Shi F, Guo H, Zeng Y P 2009 *Appl. Opt.* **48** 1715
- [6] Zhang Y J, Chang B K, Yang Z, Niu J, Zou J J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4541
- [7] Yang Z, Zou J J, Chang B K 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4290 (in Chinese) [杨智、邹继军、常本康 2010 物理学报 **59** 4290]
- [8] Chen H L, Niu J, Chang B K 2009 *J. Func. Mate.* **40** 1951 (in Chinese) [陈怀林、牛军、常本康 2009 功能材料 **40** 1951]
- [9] Zou J J, Gao P, Yang Z, Chang B K 2007 *Chin. J. Vac. Sci. Techn.* **27** 222 (in Chinese) [邹继军、高频、杨智、常本康 2007 真空科学与技术学报 **27** 222]
- [10] Zou J J, Chang B K, Du X Q, Chen H L, Wang H, Gao P 2006 *Acta Photonica Sinica* **35** 1493 (in Chinese) [邹继军、常本康、杜晓晴、陈怀林、王惠、高频 2006 光子学报 **35** 1493]
- [11] Fisher D G 1974 *IEEE Transactions on Electron Devices* **ED-21** 541
- [12] Stocker B J 1975 *Surface Science* **47** 501
- [13] Du X Q 2005 *Study of GaAs photocathode with high performance* (Nanjing: Nanjing University of Science and Technology) p86 (in Chinese) [杜晓晴 2005 高性能 GaAs 光电阴极研究 (南京:南京理工大学) 第 86 页]

Adsorption efficiency of cesium in activation process for GaAs photocathode*

Niu Jun¹⁾²⁾ Zhang Yi-Jun¹⁾ Chang Ben-Kang^{1)†} Xiong Ya-Juan¹⁾

1)(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

2)(Department of Electron and Electric, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

(Received 19 June 2010; revised manuscript received 19 July 2010)

Abstract

Photocathode materials with the lower surface doping density need a longer time to raise photocurrent in the first Cesium activation process when the system vacuum level is not high enough, which can be found from the photocurrent curves during the activation of negative-electron-affinity (NEA) GaAs photocathodes. At the same time, with the enhancement of system vacuum level, these differences in time will become unobvious. It is indicated that the adsorption efficiency of Cesium on cathode surface has the direct relationships with the surface doping density and system vacuum level. In order to analyze these relationships quantitatively, in this paper, a mathematical model of the adsorption efficiency of Cesium on cathode surface is established according to the experimental data. The simulation results by the model are in good accordance with the experimental phenomenon. This study is of very important value and significance for the further investigation of structure design and preparation techniques for varying doping GaAs photocathode materials.

Keywords: GaAs photocathode, adsorption efficiency, vacuum level, surface doping density

PACS: 42.70.Gi, 42.79.Pw, 71.55.Eq, 72.10.Bg

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60678043), NUST Research Funding (Grant No. 2010ZYTS032).

† Corresponding author. E-mail: bkchang@mail.njust.edu.cn