

doi: 10.3788/gzxb20164504.0425001

负电子亲和势 GaN 光电阴极铯吸附机理研究

乔建良¹, 徐源², 高有堂¹, 牛军¹, 常本康²

(1 南阳理工学院 电子与电气工程学院, 河南 南阳 473004)

(2 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

摘 要: 为了得到铯吸附与阴极电子亲和势变化之间的定量关系, 利用 NEA 光电阴极激活评估实验系统对 GaN 光电阴极进行了铯激活. 根据半导体光电发射理论和双偶极层模型, 通过对电子亲和势随铯覆盖度变化的实验结果进行拟合运算, 得到电子亲和势与铯覆盖度之间的函数关系式. 分析了铯的吸附机理, 得到激活过程中铯的吸附过程与 GaN 材料有效电子亲和势下降之间的关系. 实验表明: 负电子亲和势 GaN 光电阴极材料在铯激活时光电流随着铯覆盖度的增加而从本底值增为极大值, 激活过程中 GaN 电子能量分布曲线低动能截止点的位置决定于铯的覆盖度. 当铯的覆盖度从 0、1/2、2/3 到 1 个单层变化时, 低动能截止点依次向左移动, 当覆盖度从 0 增加到 1 个单层时, 低动能截止点向左移动了约 3eV 的距离. 研究表明, 低动能截止点左移本质上是由于对电子逸出起促进作用的有效偶极子 [GaN(Mg):Cs] 数量的增多造成的, 有效偶极子数量的增多带来了材料表面真空能级的下降.

关键词: 半导体材料; 负电子亲和势; 双偶极层模型; GaN; 光电阴极; 光电流; 铯吸附

中图分类号: TN219

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)04-0425001-6

Cs Adsorption Mechanism for Negative Electron Affinity GaN Photocathode

QIAO Jian-liang¹, XU Yuan², GAO You-tang¹, NIU Jun¹, CHANG Ben-kang²

(1 School of Electronic and Electrical Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang, Henan 473004, China)

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

Abstract: In order to get the quantitative relationship between Cs adsorption and cathode electron affinity variation, GaN photocathode was activated with Cs using the experimental system for activating and evaluating NEA photocathode. According to the theory of semiconductor photoemission and the double dipole layer model, the electron affinity changes with the Cs coverage degree, the function relation between electron affinity and Cs coverage degree were gotten. Cs adsorption mechanism was analyzed, the relationship between the Cs adsorption course and the decrease of effective electron affinity was gotten. The experiment results show: during the course of activation with Cs for negative electron affinity GaN photocathode material, the photocurrent increases from the background value to the maximum according to Cs coverage degree. The position of low kinetic energy cutoff in the electron energy distribution curve is decided by Cs coverage degree during the activation process. When Cs coverage degree varies from 0, 1/2, 2/3 to 1 monolayer, the position of low kinetic energy cutoff shifts to the left in turn. The position of low kinetic energy cutoff will shift to the left about 3eV when Cs coverage degree increases from 0 to 1 monolayer. The reason of the left shifting is the quantity increase of the dipole [GaN(Mg):Cs] that help the electrons to escape into the vacuum. The quantity increase of the dipole results in the decrease of vacuum energy level of the surface.

Key words: Semiconductor material; Negative electron affinity; Double dipole layer model; GaN; Photocathode; Photocurrent; Cs adsorption

OCIS Codes: 250.0040; 240.6675; 160.1890; 160.5293

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61371058) 资助

第一作者: 乔建良 (1974-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电材料及其测试. Email: qsyxn@163.com

收稿日期: 2015-09-25; 录用日期: 2015-11-19

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

随着半导体集成电路集成度的日益提高,传统光刻印刷术受光波长的减小极限限制,已经成为制约集成电路制造技术发展的瓶颈,采用传统光刻印刷技术的集成电路制造工艺已经不能满足要求.在这种情况下,可解决该问题的电子束平版印刷技术应运而生.电子束平版印刷技术要求在电子束源处建立电子平行系统,需要一种产生均匀有效电子束的面电子源,因而对面电子源的性能提出了较高标准^[1-2].新一代电子加速器要求产生的电子束强度高、能量与角度分布集中、脉冲宽度短和脉冲时间间隔可调,对产生电子束的电子源提出了更高的性能要求^[3-4].

一般电子源采用传统热阴极与场发射阴极,而基于负电子亲和势(Negative Electron Affinity, NEA)的电子源则以其量子效率高、发射电子能量与角度分布集中、发射电流密度大、发射电子束脉冲宽度可调且可实现均匀平面电子发射等众多优点,成为电子束平版印刷技术和新一代电子加速器中电子源的首选,NEA光电阴极在这些领域具有很好的应用前景^[5-6].伴随着GaN材料研究的不断进步,NEA GaN光电阴极具有量子效率高、暗发射小、发射电子能量分布及角度分布集中等优点^[7-10],紫外探测、高能物理、微电子技术以及电子显微镜等领域应用较多^[11-14].

国内对NEA GaN光电阴极的研究还处于起步阶段,针对NEA GaN光电阴极激活时铯和氧的吸附机理研究鲜见报道,对GaN光电阴极的光电发射机理和制备工艺的研究亟待弥补. NEA光电阴极材料激活时Cs的吸附是非常关键的一步,直接决定了激活的成功与否,是决定光电阴极量子效率高以及能否实现有效面电子发射的关键.本文根据光电发射的理论,结合成功激活后材料表面的双偶极层模型,从光电流曲线的增长特点和GaN电子能量分布曲线的低动能截止点位置随铯的覆盖度的变化情况入手,研究了GaN光电阴极制备过程中铯的吸附机理.

1 NEA GaN 光电阴极铯吸附实验

NEA GaN光电阴极铯吸附实验是在NEA光电阴极激活与评估实验系统中完成的,实验系统综合运用超高真空的保持、现代计算机应用、微弱信号与信息处理以及表面分析等先进的复杂技术,具有功能强大、自动化程度高、测试对象丰富以及测试精度高等突出优点.实验系统主要由超高真空激活系统、多信息量在线测控系统和表面分析系统组成,原理见图1.

铯的吸附实验采用Mg掺杂、掺杂浓度为 $1.37 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的p型GaN样品,样品首先通过化学清洗进行脱脂并去除表面氧化物,接着通过在真空中700℃

下加热净化获得较为理想的原子级清洁表面.净化后立即进行铯的吸附实验,对样品进行激活.

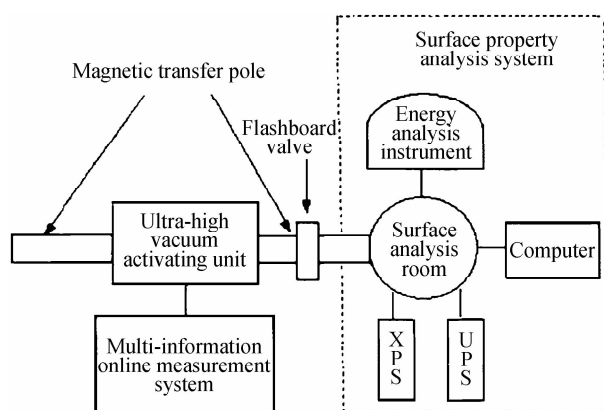


图1 NEA光电阴极激活评估实验系统原理

Fig. 1 Block diagram of experimental system for activating and evaluating NEA photocathode

图2给出了样品激活的光电流变化曲线.因实验采用的是固态Cs源,开启后需要一个预热过程,Cs源电流在3 min内从0.5A逐渐增大到1.6A,并逐渐稳定,在激活开始后约第4 min光电流开始了明显增长,呈现出类似指数函数的增长规律,一直持续到第25 min,此时光电流达到了铯吸附情况下的极值 $1.546 \mu\text{A}$,表明Cs已经达到GaN样品表面的饱和覆盖.

在继续进Cs的情况下,光电流呈现稍微下降趋势,曾一度降到 $1.50 \mu\text{A}$,表明此时Cs过量了,光电流出现了“Cs中毒”现象.铯吸附过程中光电流的这种变化规律是由有效电子亲和势的下降决定的.

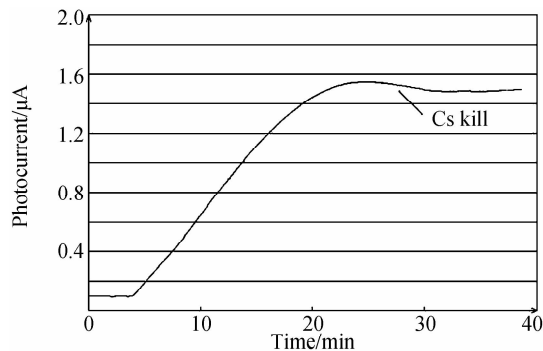


图2 GaN材料Cs吸附过程中光电流变化曲线

Fig. 2 The time evolution of photocurrent during Cs adsorption process for GaN

2 铯的吸附与电子亲和势的变化关系

NEA GaN光电阴极采用p型基底加n型表面结构,可以使表面产生向下的能带弯曲,有利于受激电子逸出表面进入真空. GaN光电阴极材料在仅用Cs的情况下,即可成功激活,获得明显的NEA特性^[15].因为,铯的有效吸附是成功激活的关键.图3是参考斯坦福大学F. Machuca等研究者给出的数据,绘制出的GaN

表面经过 Cs 处理之后电子亲和势的变化情况和电子能量分布曲线示意图^[1].

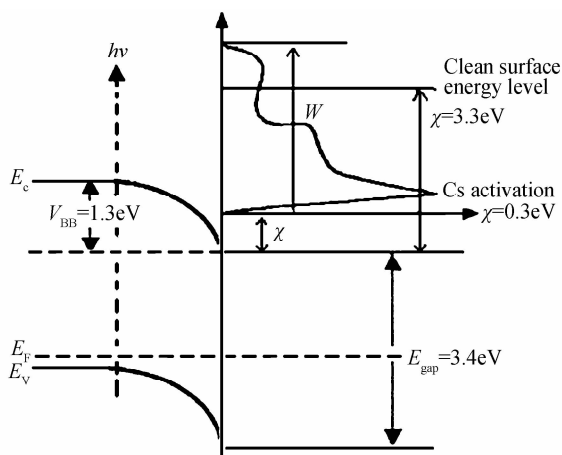


图 3 Cs 和 Cs/O 处理之后 GaN 真空能级变化情况和电子能量分布曲线

Fig. 3 The change of GaN vacuum energy level after being dealt with Cs and Cs/O and electron energy distribution curve

p 型重掺杂 GaN 光电阴极具有约 1.3 eV 向下的能带弯曲量,其费米能级 E_F 位于价带顶 E_V 以上约 0.1 eV 处.能带的这种弯曲特点有利于电子逸出表面的形成,是形成双偶极层表面的基础.从图 3 可以看出,对 GaN 光电阴极,单独用 Cs 就可获得 3.0 eV 的电子亲和势改变量,将真空能级移到导带底以下大约 1.0 eV 处,有效电子亲和势为 -1.0 eV,获得显著的 NEA 特性.共同用 Cs/O 处理可将真空能级再降低 0.2 eV,即有效电子亲和势为 -1.2 eV.

具有最高能量的待逃逸电子是与表面价带顶处的态密度相对应的,具有最低能量的待逃逸电子是处于导带底的次级热化电子.由图 3 可见,次级电子的分布被表面的真空能级截断,这就是低动能截止点.其中 W 是低动能截止点与来自价带顶待逃逸电子的最高能量截止点的差值.

由图 3 可得

$$\chi = h\nu - (W + E_{gsp}) \quad (1)$$

式中, χ 为激活后的相对电子亲和势, $h\nu$ 是入射光子能量, W 可通过能量分布曲线 (EDC) 测得, E_{gsp} 是 GaN 的禁带宽度.所以可以通过对能量分布曲线中 W 的测量,研究铯的吸附与电子亲和势变化的关系,计算激活后的电子亲和势.

图 4 给出了 p 型 GaN 材料的低动能截止点随铯覆盖度增加时的变化情况^[1].该图是 F. Machuca 等研究者在 40 eV 光子能量下由同步加速器测得的.由于超出了能量分析器的最大计数极限,电子能量分布曲线的顶部没能完全显示出来.

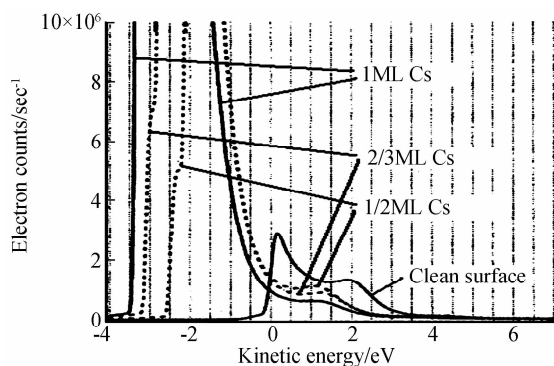


图 4 GaN 的低动能截止点随铯覆盖度增加时的变化情况^[1]

Fig. 4 The low kinetic energy cutoff for GaN is changed with the increasing of Cs coverage^[1]

图 4 给出的电子能量分布曲线中低动能截止点的左移与铯吸附过程中材料表面真空能级的下降是对应的.由图 4 可见,设清洁表面的 GaN 的低动能截止点约在 0eV 处,与图 3 中 $\chi = 3.3$ eV 的真空能级位置对应.若将铯的饱和覆盖定义为一个单层,当铯的覆盖度增加到 1/2 个单层时,GaN 的低动能截止点就向左移至约 -2 eV 处,变化非常明显.当铯的覆盖度增加到 2/3 个单层时,GaN 的低动能截止点进一步向左移至约 -2.6 eV 处,电子能量分布曲线在能带图中的位置进一步下移.当铯的覆盖度增加到 1 个单层时,GaN 的低动能截止点最终向左移至约 -3eV 处,与图 3 中 $\chi = 0.3$ eV 的真空能级位置对应,此时电子能量分布曲线在能带图中的位置下移到最低值,如图 3 所示,这也是测得的仅用铯激活时真空能级所能下降到的最低值.

图 5 是电子亲和势随着铯的覆盖度而下降的情况.图中的数据是 F. Machuca 等研究者根据式(1)由测得的 W 值计算出来的^[1].图中横坐标采用一个单层的铯的覆盖度作单位,纵坐标是相对电子亲和势.由图 5 可见,清洁表面的相对电子亲和势为 3.3 eV,在铯从开始到一个单层的覆盖过程中,电子亲和势从 3.3 eV 下降到 0.3 eV.

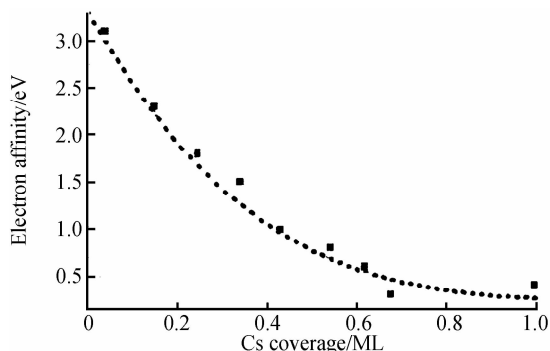


图 5 电子亲和势随着铯的覆盖度变化的情况^[1]

Fig. 5 The electron affinity for GaN is changed with the increasing of Cs coverage^[1]

通过拟合运算可得到与图 5 对应的电子亲和势与铯覆盖度之间的函数关系式,即

$$\chi(x) = 3.14868 \exp(-x/0.30134) + 0.18547 \quad (2)$$

式中, $\chi(x)$ 为电子亲和势, x 表示铯的覆盖度. 由式(2)可见, 在从 0 到一个单层铯的覆盖过程中, 电子亲和势随铯的覆盖度而变化, 二者近似满足指数衰减函数的关系, 在 0.5 个单层铯覆盖之前, 电子亲和势快速下降, 之后缓慢下降.

3 NEA GaN 光电阴极 Cs 的吸附机理

NEA GaN 光电阴极材料在表面净化处理之后, 用低逸出功材料覆盖通过净化工艺获得的原子级清洁表面是获得 NEA 特性的关键一步. 目前最常用的低逸出功材料是铯和氧. GaN 光电阴极材料在仅用 Cs 的情况下即可成功激活, 获得明显的 NEA 特性, 即铯的吸附对 GaN 材料的激活是充分的.

根据半导体光电发射理论, 为了得到有效的电子发射, 必须是 p 型半导体与 n 型表面态杂质结合. NEA GaN 光电阴极材料采用 p 型基底加 n 型表面的结构, 这样可以使表面产生向下的能带弯曲, 有利于受激电子逸出表面进入真空^[16-17]. p 型 GaN 材料的获得可通过掺杂 Mg 来实现. 半导体中的杂质可分为间隙式杂质和代位式杂质, 通常情况下代位式杂质的原子半径大小和价电子壳层结构与被取代本体原子比较接近. 对于 Mg 在 GaN 中的掺杂, Mg 将取代 Ga 的位置成为代位式杂质. 由于 Mg 的外围电子层排布为 $3s^2$, Ga 的外围电子层排布为 $4s^2 4p^1$, 因此 Mg 取代 Ga 的位置时会从附近获得一个电子, 而在 Mg 的附近留下一个空穴, 需要电子来填充. 所以可以把包含 Mg 的这样一个结构表示为 $[\text{GaN}(\text{Mg})]$, 它等效为一个带正电的簇团结构, 这为铯的吸附提供了必要的条件.

当 p 型 GaN 材料表面吸附铯原子后, 体内的以 Mg 杂质原子为中心的簇团结构 $[\text{GaN}(\text{Mg})]$ 就相当于受主, 而吸附于表面的铯原子在给出电子后就会带正电荷, 内部的簇团结构 $[\text{GaN}(\text{Mg})]$ 接受电子带负电, 这样就使 GaN 材料表面能带向下弯曲, 使表面电子亲和势下降. p 型材料的掺杂浓度应尽量大一些, 因为重掺杂技术能在发射层表面提供尽可能窄的耗尽层宽度, 这样可使电离杂质移动的距离最小化, 从而降低了光电子在穿越表面势垒过程中的散射影响.

净化之后 GaN 光电阴极材料的本体结构是原子级清洁表面, 铯的吸附是在超高真空环境中通过固态铯的蒸发进行的. 一般情况下, Cs 以原子团的形式被蒸发到原子级清洁表面附近, 为了与 $[\text{GaN}(\text{Mg})]$ 构成偶极子, 蒸发到 GaN 表面的 Cs 会发生离化, 并给出电子. 从电荷转移的角度看, 一个以 Mg 原子为中心的 $[\text{GaN}(\text{Mg})]$ 单元只能与一个 Cs 原子构成结构为

$[\text{GaN}(\text{Mg}):\text{Cs}]$ 的偶极子. 这样的偶极子是偶极层形成的基础, 也是降低材料表面真空能级的基本单元^[18]. 由这样的偶极子构成了 $[\text{GaN}(\text{Mg}):\text{Cs}]$ 偶极层, 其总势能为所有偶极子的势能之和.

理想的清洁 GaN 表面会发生重构现象, 重构的结果就会在表面形成类似“台脚”和“洞穴”的位置. 在铯的吸附过程中, 考虑到平衡与稳定的问题, 铯首先被吸附到 GaN 表面“台脚”的位置上, 如图 6, “台脚”上的铯优先与表面层最近的以杂质原子 Mg 为中心的簇团结构单元 $[\text{GaN}(\text{Mg})]$ 形成偶极子 $[\text{GaN}(\text{Mg}):\text{Cs}]$, 如图 7, 偶极子的正端朝向表面一侧.

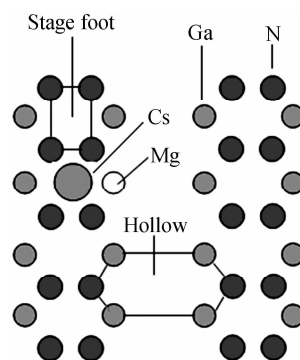


图 6 铯在 GaN 表面吸附位置示意图

Fig. 6 Cesium adsorption position on GaN surface

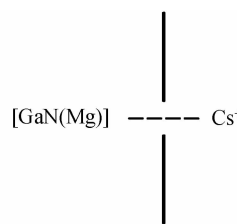


图 7 $[\text{GaN}(\text{Mg}):\text{Cs}]$ 偶极子

Fig. 7 $[\text{GaN}(\text{Mg}):\text{Cs}]$ dipole

在铯达到饱和状态的一个单层前, 偶极子 $[\text{GaN}(\text{Mg}):\text{Cs}]$ 的数量随着铯的吸附不断增加, 表面真空能级随之相应地下降, 激活过程中测得的光电流也就相应地上升, 如图 2. 显然, 吸附刚开始时, 因光电阴极材料表面未被占据的“台脚”位置多, 有效偶极子数量随时间增长的速率就大, 对应偶极层的总势能迅速增大, GaN 表面电子亲和势在此阶段下降速率也最大, 光电流增长也最迅速. 之后未被占据的“台脚”位置逐渐变少, 铯的有效吸附速率下降, 造成电子亲和势下降速率变缓, 光电流增长也随之变缓. 吸附过程中随着铯进一步沉积到表面, 铯逐渐达到接近饱和的一个单层, 此时表面上可吸附的台脚位置被占满, $[\text{GaN}(\text{Mg}):\text{Cs}]$ 偶极子的数量也接近饱和, 表面真空能级得到了最大程度的下降, 此时测量的光电流也达到极大值.

在整个吸附过程中, 通过图 2 光电流曲线的变化可知, 光电流经历了快速增长、缓慢增长、到达最大值三个时期, 说明 GaN 表面电子亲和势随着铯的覆盖也

经历了快速下降、缓速下降以及下降到最小值三个时期.这与图 5 所示的电子亲和势随铯覆盖度变化的情况是一致的.图 5 在铯的覆盖度为 0~0.5 个单层期间电子亲和势快速下降,在 0.5~1.0 个单层期间电子亲和势缓速下降,到 1.0 个单层时达到最小值.

激活后 NEA GaN 阴的表面势垒如图 8,其中势垒 I 即为 $[\text{GaN}(\text{Mg});\text{Cs}]$ 偶极层形成的,图中势垒 II 为进一步吸附氧后形成的.

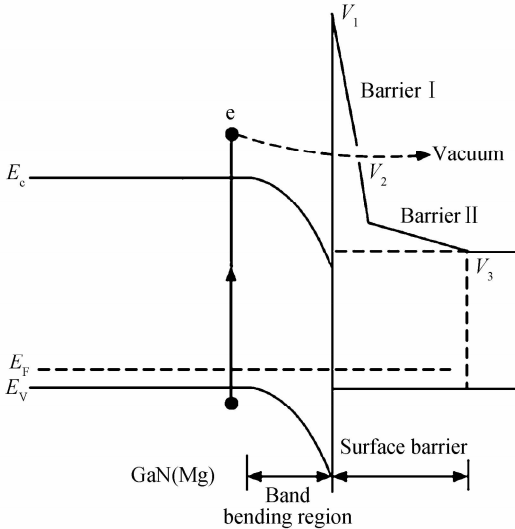


图 8 激活后 NEA GaN 阴的表面势垒

Fig. 8 The surface barrier for NEA GaN cathode after being activated

随着 Cs 的沉积超过一个饱和的单层,光电流曲线出现了“Cs 中毒”现象,即光电流达到极大值后又出现了下降的现象,如图 2. “Cs 中毒”现象的出现是铯氧激活实验中进氧时间的控制节点,必须及时跟进,否则会影响最终的激活效果.此时处于超高真空系统中的 GaN 样品表面的有效偶极子已经失去了最佳的排列与平衡.这种情况下,处于表面层内较远的以杂质原子 Mg 为中心的簇团结构会与过多吸附的 Cs 形成弱偶极子,因为构成弱偶极子的 Cs 没有离化或离化很小,过多吸附的 Cs 既会影响到先前形成的有效偶极子,也会与后来吸附的 Cs 构成金属 Cs 膜.这样就破坏了一个单层铯时的最佳平衡,最终影响到光电阴极产生的光电流,形成了 Cs 吸附时的“Cs 中毒”现象.这时若关闭铯源,由于超高真空系统中抽气泵的工作,这双重倾向的影响将逐渐变小,表面偶极层的最佳状态会得到恢复.

4 结论

NEA GaN 光电阴极材料在仅用铯的情况下就可以成功激活,成功激活后材料的表面可以用双偶极层模型来表示. GaN 电子能量分布曲线的低动能截止点位置随铯覆盖度左移的本质是由于对电子逸出起促进

作用的有效偶极子 $[\text{GaN}(\text{Mg});\text{Cs}]$ 数量的增多造成的. GaN 表面电子亲和势随铯的覆盖经历了快速下降、缓速下降以及下降到最小值三个时期.激活光电流实验结果与 F. Machuca 等研究者给出的相对电子亲和势随铯覆盖度的变化情况一致,在此基础上本文进一步解释了这种变化的内在机理.铯吸附机理的研究为 NEA GaN 光电阴极材料激活工艺的优化提供了参考依据.

参考文献

- [1] MACHUCA F. A thin film p-type GaN photocathode: prospect for a high performance electron emitter[D]. Stanford University, 2003: 23-29.
- [2] LIU Z. Surface characterization of semiconductor photocathode structures[D]. Stanford University, 2005: 92-101.
- [3] NAKANISHI T, TOGAWA K, BABA T, *et al.* Polarized electron source for a linear collider in Japan [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2000, **455** (1): 109-112.
- [4] TSENTALOVICH, BARKHUFF D, CHEN J, *et al.* Development of a polarized electron source for the MIT-bates linear accelerator center[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2007, **582**(2): 413-428.
- [5] QIAO Jian-liang, CHANG Ben-kang, NIU Jun, *et al.* Similarities and differences between negative electron affinity GaN and GaAs photocathode activation mechanisms [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*. 2009, **29** (2): 115-118.
乔建良, 常本康, 牛军, 等. NEA GaN 和 GaAs 光电阴极激活机理对比研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2009, **29** (2): 115-118.
- [6] CHEN Liang, QIAN Yun-sheng, CHANG Ben-kang. Reflection on surface photovoltage spectroscopy for transmission - mode GaAs photocathodes of different active layer thickness[J]. *Acta Photonica Sinica*. 2011, **40**(7): 1008-1012.
陈亮, 钱芸生, 常本康. 发射层厚度对透射式 GaAs 光电阴极表面光电电压谱的影响[J]. *光子学报*, 2011, **40**(7): 1008-1012.
- [7] LI Jian-hua, CUI Yuan-shun, CHEN Gui-bin. Structural phase transition, electronic structures and optical properties of GaN[J]. *Acta Photonica Sinica*. 2013, **42**(2): 161-166.
李建华, 崔元顺, 陈贵宾. GaN 结构相变、电子结构和光学性质[J]. *光子学报*, 2013, **42**(2): 161-166.
- [8] LI Wei, YUE Qing-yang, KONG Fan-min, *et al.* Influence of surface ZnO nano-structures on the light emitting efficiency of GaN-based LED[J]. *Acta Photonica Sinica*. 2013, **42**(4): 409-416.
李伟, 岳庆扬, 孔繁敏, 等. 顶端 ZnO 纳米结构对 GaN 基 LED 光提取效率的影响[J]. *光子学报*, 2013, **42**(4): 409-416.
- [9] HAO Guang-hui, CHANG Ben-kang, CHEN Xin-long, *et al.* A study of spectral response for reflection-mode GaN photocathodes in UVA band[J]. *Acta Physica. Sinica*. 2013, **62**(9): 097901.
郝广辉, 常本康, 陈鑫龙, 等. 近紫外波段 NEA GaN 阴极响应特性的研究[J]. *物理学报*, 2013, **62**(9): 097901.
- [10] YANG Yong-fu, FU Rong-guo, MA Li, *et al.* Effect of surface potential barrier on quantum efficiency decay of reflection-mode GaN photocathode [J]. *Acta Physica. Sinica*. 2012, **61**(12): 128504.
杨永富, 富容国, 马力, 等. 反射式 GaN 光电阴极表面势垒对

- 量子效率衰减的影响[J]. 物理学报, 2012, **61**(12): 128504.
- [11] SHAHEDIPOUR F S, ULMER M P, WESSELS B W, *et al.* Efficient GaN photocathodes for low-level ultraviolet signal detection[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, **38**(4): 333-335.
- [12] ULMER M P, WESSELS B W, HAN B, *et al.* Advances in wide-band-gap semiconductor based photocathode devices for low light level applications[C]. SPIE, 2003, **5164**: 144-154.
- [13] UCHIYAMA S, TAKAGI Y, NIIGAKI M, *et al.* GaN-based photocathodes with extremely high quantum efficiency[J]. *Applied Physics Letters*. 2005, **86**(10): 103511.
- [14] HAN Yu, GUO Wei-ling, FAN Xing, *et al.* Effects of electrostatic-discharge on GaN-based high voltage light-emitting diode [J]. *Acta Photonica Sinica*. 2014, **43**(8): 0823003.
韩禹, 郭伟玲, 樊星, 等. 静电对 GaN 基高压 LED 特性的影响 [J]. 光子学报, 2014, **43**(8): 0823003.
- [15] QIAO Jian-liang, TIAN Si, CHANG Ben-kang, *et al.* Activation mechanism of negative electron affinity GaN photocathode[J]. *Acta Physica Sinica*. 2009, **58**(8): 5847-5851.
乔建良, 田思, 常本康, 等. 负电子亲和势 GaN 光电阴极激活机理研究[J]. 物理学报, 2009, **58**(8): 5847-5851.
- [16] LI Xiao-feng, LU Qiang, GUO Qian. Characteristics of fluorescence spectrum of multi-alkali photocathode of FOP window[J]. *Acta Photonica Sinica*. 2013, **42**(2): 150-155.
李晓峰, 陆强, 郭骞. 光纤面板窗多碱光电阴极荧光谱特性研究[J]. 光子学报, 2013, **42**(2): 150-155.
- [17] WANG Xiao-hui, CHANG Ben-kang, ZHANG Yi-jun, *et al.* The spectral response analysis of activated GaN photocathode [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(10): 2655-2658.
王晓晖, 常本康, 张益军, 等. GaN 光电阴极激活后的光谱响应分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, **31**(10): 2655-2658.
- [18] QIAO Jian-liang, CHANG Ben-kang, QIAN Yun-sheng, *et al.* Quantum efficiency recovery of reflection-mode NEA GaN photocathode [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(1): 017903.
乔建良, 常本康, 钱芸生, 等. 反射式 NEA GaN 光电阴极量子效率恢复研究[J]. 物理学报, 2011, **60**(1): 017903.