

反射式 NEA GaN 光电阴极量子效率恢复研究*

乔建良^{1)2)†} 常本康¹⁾ 钱芸生¹⁾ 杜晓晴³⁾ 王晓晖¹⁾ 郭向阳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)

3)(重庆大学光电工程学院, 重庆 400030)

(2010 年 4 月 24 日收到; 2010 年 5 月 11 日收到修改稿)

以反射式 NEA GaN 光电阴极充分激活、衰减以及补 Cs 后的量子效率曲线为依据, 针对阴极量子效率的衰减规律和补 Cs 后的恢复状况, 论述了 NEA GaN 光电阴极量子效率的衰减和恢复机理. 经过重新 Cs 化处理, 反射式 NEA GaN 光电阴极量子效率在 240 nm 到 300 nm 的短波区域恢复到激活后最好状态的 94% 以上, 300 nm 到 375 nm 的长波区域恢复到 88% 以上. 结合反射式 NEA GaN 光电阴极衰减前后的表面势垒形状和反射式 GaN 光电阴极量子效率的计算公式, 得到了量子效率曲线的衰减规律以及补 Cs 后的恢复状况与表面势垒形状改变之间的关系.

关键词: 反射式, NEA, GaN 光电阴极, 量子效率

PACS: 79.60.-i, 72.80.Eg, 73.61.Ey, 73.20.At

1. 引言

NEA GaN 光电阴极不但具有量子效率高、暗发射小、发射电子能量分布集中等优点, 而且具有较好的稳定性^[1-4]. 基于 NEA GaN 光电阴极的紫外探测器, 在器件的低暗电流、高响应速度和高灵敏度等特性方面大大优于其他类型的紫外探测器^[5-7]. NEA GaN 光电阴极在紫外探测和电子束平面印刷等领域有着广阔的应用前景^[8]. 这些领域不仅要求阴极具有高的灵敏度和好的发射性能, 更要求对其发射特性的衰减, 也就是对阴极量子效率的稳定性提出了较高的要求. 为了充分利用 NEA GaN 光电阴极的优异性能, 在保证 GaN 光电阴极量子效率进一步提高的前提下, 研究其量子效率的衰减机理以及衰减后恢复的原因, 对进一步提高其稳定性能是非常必要的^[9-11].

国内对 GaN 光电阴极已经进行了初步的研究, 但目前针对 GaN 光电阴极在真空系统中的衰减机理及其量子效率的恢复等方面的研究还鲜见报道. 探索 GaN 光电阴极量子效率的衰减机理, 研究量子效率在真空系统中衰减以及恢复的根本原因, 尽量延长其使用寿命, 对当前 GaN 光电阴极的研究与应

用是十分迫切的. 本文以反射式 NEA GaN 光电阴极为研究对象, 通过对其量子效率的衰减变化特点以及补 Cs 后阴极量子效率的恢复状况的研究, 探索了 GaN 光电阴极量子效率的衰减及其恢复机理.

2. 反射式 NEA GaN 光电阴极量子效率衰减及其恢复实验

2.1. 量子效率衰减实验

实验采用的样品是掺 Mg 的 p 型 GaN, 掺杂浓度为 $1.37 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, Cs/O 激活过程采用 Cs 源持续, O 源断续的交替方法^[12], 激活完成后立即原位测试了阴极量子效率曲线^[13]. 为了测试阴极量子效率的衰减情况, 在我们的真空室中放置 6 h 后再次原位测试量子效率, NEA GaN 光电阴极衰减前后的量子效率曲线的变化情况如图 1 所示. 可见充分激活后经过 6 h 衰减, 量子效率曲线整体下移, 阴极量子效率产生了明显的衰减, 而且短波区域下移幅度较小, 长波区域下移幅度较大. 说明短波区域量子效率损失较少, 而长波区域量子效率损失较多. 量子效率曲线的这种变化表明, 随着波长的增大, 量子效率损失量增大.

* 国家自然科学基金 (批准号: 60871012, 60701013) 和河南省教育厅自然科学研究计划项目 (批准号: 2010C510009) 资助的课题.

† E-mail: qjlqsy@sohu.com

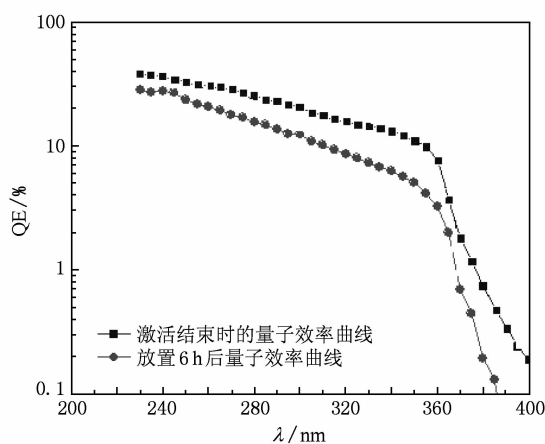


图1 放置6 h后 NEA GaN 光电阴极量子效率的变化曲线

表1给出了经过6 h衰减之后反射式 GaN 光电阴极在几个波长点的量子效率 QE 的数值. 由表可见: 所有波长点对应的量子效率数值都减小了. 230 nm 对应的最大量子效率下降为 28.05%, 下降到原始值的 75%; 300 nm 处的量子效率下降为 12.35%, 下降到原始值的 59%; 360 nm 处的量子效

表1 经过6 h 衰减之后反射式 GaN 光电阴极的量子效率

波长/nm	230	255	300	350	360	375	400	抑制比率
激活后 QE/%	37.40	30.17	20.85	10.81	7.47	1.17	0.19	197
6 h 后 QE/%	28.05	21.73	12.35	5.05	3.23	0.44	0.01	2805
6 h 后 QE 占激活后 QE 百分比/%	75	72	59	47	43	38	5	

注: 抑制比率为 230 nm 处的量子效率与 400 nm 处量子效率的比值.

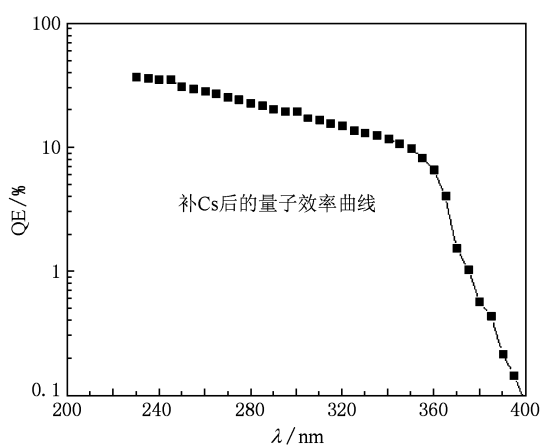


图2 补 Cs 后 NEA GaN 光电阴极量子效率的变化曲线

率下降为原始值的 43%; 375 nm 处量子效率下降为原始值的 38%; 400 nm 处只有原始值的 5%.

2.2. 量子效率恢复实验

有效偶极子数量的减小造成的阴极灵敏度下降是部分可逆的, 通过补 Cs 可使部分被破坏的偶极子得到修复, 从而使对电子逸出起重要作用的有效偶极子的数量重新变多, 最终使得下降的阴极灵敏度可以得到部分恢复^[14]. 为了进一步探索阴极量子效率衰减的原因, 比较深入地了解 Cs 对阴极激活以及维持阴极稳定的重要作用, 我们将 6 h 后量子效率已经衰减的阴极进行重新 Cs 化处理, 结果显示光电流随着 Cs 的补充重新得到恢复, 可见 Cs 对阴极的充分激活以及维持阴极性能的稳定是非常必要的. 补 Cs 后 NEA GaN 光电阴极量子效率的变化曲线如图 2 所示. 曲线整体上得到较好的恢复, 300 nm 以下的短波区域恢复得更好一些, 300 nm 以上的长波区域也恢复到 88% 以上, 说明补 Cs 对阴极量子效率的恢复效果非常好.

表2给出了补 Cs 后反射式 GaN 光电阴极在几个波长点的量子效率数值. 由表可见, 在 230 nm 处量子效率恢复到 37.40%, 300 nm 处量子效率恢复到 19.59%, 350 nm 处量子效率恢复到 9.90%, 在 375 nm 处量子效率恢复到 1.03%, 400 nm 处量子效率恢复到 0.09%. 曲线在阈值处仍然表现出良好的锐截止特性, 230 nm 和 400 nm 之间的抑制比率为 416 (37.40% / 0.09%), 而首次激活时算出的 230 nm 和 400 nm 之间的抑制比率为 197, 补 Cs 后 GaN 光电阴极量子效率曲线所示的抑制比率较首次激活结束时大是由于长波区域量子效率没有短波区域恢复的好造成的.

表2 反射式 NEA GaN 光电阴极重新补 Cs 激活后的量子效率

波长/nm	230	255	300	350	360	375	400	抑制比率
激活后 QE/%	37.40	30.17	20.85	10.81	7.47	1.17	0.19	197
6 h 后 QE/%	28.05	21.73	12.35	5.05	3.23	0.44	0.01	2805
补 Cs 后 QE/%	37.40	29.59	19.59	9.90	6.56	1.03	0.09	416

注: 抑制比率为 230 nm 处的量子效率与 400 nm 处量子效率的比值.

3. 结果讨论

3.1. 反射式 NEA GaN 光电阴极量子效率衰减结果讨论

根据成功激活后激活层中 O 和 Cs 形成的双偶极层模型,激活层中偶极子[GaN(Mg):Cs] 和 O-Cs 的数量和朝向对电子的逸出起着决定性的作用^[15]. 在阴极衰减过程中,成功激活后的 GaN 阴极激活层表面的 Cs 会发生脱附现象,同时还会受到周围杂质的影响,系统中的杂质会吸附在激活层表面,这些作用会破坏激活层中的偶极子,使对电子逸出起重要作用的有效偶极子的数量减少. 这种改变将显著降低阴极的量子效率,使量子效率曲线整体下移^[16].

由前所述,激活后经过 6 h,反射式 GaN 阴极量子效率曲线整体下移,阴极量子效率产生了明显的衰减,而且长波段的衰减比短波段更加明显. 量子效率的损失量随着波长的增大而增大. 但衰减后曲线在阈值处仍表现出良好的锐截止特性,230 nm 和 400 nm 之间的抑制比率超过 3 个数量级($28.05\% / 0.0085\% = 2805$). 相对于衰减前,抑制比率的大幅增加是由于长波区域量子效率比短波区域衰减量更大造成的.

由表 1 可见,230 nm 处的量子效率是阴极激活后测试波段内的最大值,经过 6 h 衰减,测试波段内的反射式 GaN 阴极量子效率的峰值波长位置没有发生变化,仍然是 230 nm. 在表 1 给出的经过 6 h 衰减之后量子效率 QE 占激活后量子效率 QE 的百分比中,在测试的起始波长 230 nm 处为 75%,衰减了 25%. 随着波长的增加,衰减量也不断增加,在 360 nm 处衰减到原值的 43%,衰减了 57%. 400 nm 处衰减到原值的 5%,衰减了 95%,使得衰减后 400 nm 处的光谱响应基本处于截止状态. 也就是说,量子效率的这种衰减规律总伴随着阴极光谱响应长波端截止波长的减小.

量子效率的损失量随着波长的增大而增大,长波段低能光电子对应的量子效率具有较大衰减. 这种下降正是由反射式 GaN 光电阴极表面势垒的形状造成的. 反射式 GaN 光电阴极衰减前后能带与表面势垒结构如图 3 所示^[16,17],激活后的 NEA GaN 光电阴极衰减前的表面势垒以实线表示,阴极衰减后表面势垒形状发生了如图中的虚线所示的变化,

即 I 势垒和 II 势垒的宽度和高度都发生了变化. 正是表面势垒形状的这种变化,造成了反射式 GaN 阴极长波段量子效率下降快,而短波段下降慢,使得量子效率曲线如图 1 所示变得越来越倾斜.

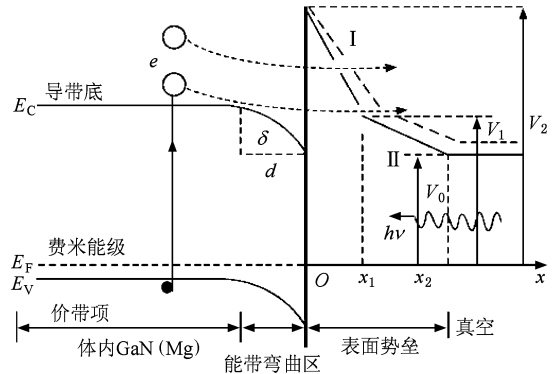


图 3 反射式 GaN 光电阴极衰减前后能带与表面势垒

为了更好地探讨 GaN 光电阴极在反射模式下量子效率的衰减机理,可结合反射式 NEA GaN 光电阴极量子效率的计算公式来理解,反射式 NEA GaN 光电阴极量子效率 QE 由下式决定:

$$QE = \frac{P\alpha L_D}{1 + \alpha L_D}(1 - R). \quad (1)$$

可以看出,影响反射式阴极量子效率 QE 的因素很多,但最终是通过电子表面逸出概率 P , 材料的光吸收系数 α , 载流子扩散长度 L_D 以及阴极材料对入射光的反射率 R 几个参数表现出来^[18], 而 α , R 和电子扩散长度 L_D 是由 GaN 材料本身决定的,与量子效率的衰减无关,真正影响量子效率衰减的参数是电子表面逸出概率 P . 所以,激活后的阴极在激活台内放置一段时间后,由于周围杂质的影响以及激活层表面 Cs 脱附现象的发生,破坏了激活层中已经形成的偶极子,进而使激活后阴极形成的表面势垒形状,即势垒的宽度和高度发生了改变. 而电子表面逸出概率 P 是不同能量电子隧穿一定形状表面势垒的透射系数,它与入射电子能量、表面势垒高度和宽度有关. 阴极衰减过程中有效偶极子的破坏造成了表面势垒形状的改变,而表面势垒形状的改变又影响到了不同波段的电子表面逸出概率 P , 从而最终造成量子效率的衰减下降.

3.2. 反射式 NEA GaN 光电阴极重新进 Cs 激活结果讨论

为了更加清楚地比较反射式 GaN 光电阴极量子效率的衰减变化以及阴极补 Cs 后量子效率的恢

复情况,将阴极激活后的量子效率曲线、激活后 6 h 量子效率曲线以及补 Cs 后的量子效率曲线重新画在一起,见图 4.

由图可见,衰减后的反射式 GaN 光电阴极经过重新进 Cs 激活,量子效率得到了较好的恢复,表 3 给出了补 Cs 后量子效率 QE 占首次激活后量子效率 QE 的百分比. 230 nm 和 235 nm 两个点上几乎恢复到首次激活完成时的最好值,从测试的 240 nm 开始,随着波长增加,恢复后的量子效率值与首次激活完成时存在越来越大的偏差,并不能恢复到最佳值. 240 nm 到 300 nm 的短波区域恢复到最好状态的 94% 以上, 300 nm 到 375 nm 的长波区域只能恢复到 88% 以上. 说明补 Cs 对量子效率的恢复效果非常好. 但也非常明显,通过重新 Cs 化并没有使量

子效率恢复到原始最佳值.

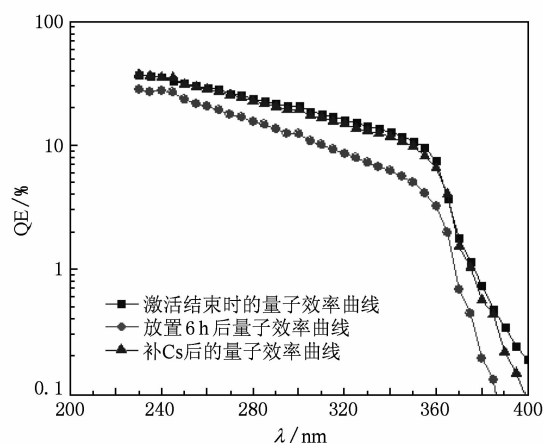


图4 激活后、激活后 6 h 以及补 Cs 后的量子效率曲线

表3 反射式 NEA GaN 光电阴极补 Cs 后量子效率 QE 占首次激活后量子效率 QE 的百分比

波长/nm	230	255	300	350	360	375	400
激活后 QE/%	37.40	30.17	20.85	10.81	7.47	1.17	0.19
补 Cs 后 QE/%	37.40	29.59	19.59	9.90	6.56	1.03	0.09
补 Cs 后 QE 占激活后 QE 百分比/%	100	98	94	92	88	88	47

激活后经过一段时间阴极量子效率发生了衰减的原因是由于对电子逸出起重要作用的有效偶极子的数量减少了. 经过重新 Cs 化处理,量子效率能得到较好恢复,说明重新进 Cs 激活时,由于 Cs 的脱附造成的偶极子的破坏得到了较好的修复,使得在 GaN 阈值 365 nm 以下的波段量子效率都能恢复到 88% 以上. 量子效率不能通过补 Cs 百分之百地恢复,是由于破坏偶极子的原因还有系统中杂质的吸附作用. 在 Cs 的脱附发生时,由于脱附作用留下的空位就会被杂质吸附占有,这样即使补 Cs 时 Cs 源充分,也无法再去占有已经被杂质占用的位置,这些位置处原来的有效偶极子将被永久破坏,不能恢复. 在 365 nm 以下恢复度最低能达到 88%,最高接近 100% 的水平,说明在破坏偶极子的两大因素中, Cs 的脱附是主要的,杂质的吸附起的破坏作用较小. 由于真空系统有抽气泵不断工作,系统内的杂质等气体将很难长时间滞留,它们造成的破坏作用当然也不会太大,但 Cs 的脱附在动态工作的真空系统中会更容易发生.

另一方面,实验表明,经过重新 Cs 化处理后,恢复的量子效率 QE 占激活后量子效率 QE 的百分比,即量子效率的恢复程度随着波长的增加而减小. 造成这种现象的原因可以用表面势垒形状的变化来

解释. 图 3 所示的反射式 GaN 光电阴极能带与表面势垒中势垒形状发生的变化会随着重新 Cs 化而一定程度上复原,即两个势垒的宽度和末端高度都会一定程度上向着首次激活后的位置复原,使得阴极量子效率较好地恢复. 但同样由于杂质吸附造成的永久破坏,使两个势垒的宽度和末端高度不能完全恢复,这样的恢复效果使得重新 Cs 化恢复后阴极量子效率曲线的倾斜度位于首次激活后与衰减后之间. 恢复后的势垒形状依然对长波端能量较低电子的量子效率影响较大,这正是量子效率的恢复程度随着波长的增加而减小的原因.

综上所述,通过重新 Cs 化处理,修复了大部分被破坏的偶极子,阴极表面势垒的形状也恢复为接近首次激活后的形状,不同波段的电子表面逸出概率 P 也就随着得到不同程度的恢复,从而最终使量子效率曲线趋向整体恢复.

4. 结 论

本文以反射式 NEA GaN 光电阴极为研究对象,针对阴极量子效率的衰减规律以及补 Cs 后量子效率曲线的恢复状况,论述了反射式 NEA GaN 光电阴极量子效率的衰减和恢复机理. 结合反射式 GaN 光

电阴极衰减前后的能带与表面势垒形状和反射式 NEA GaN 光电阴极量子效率的计算公式,得到了量子效率曲线的衰减规律以及补 Cs 后的恢复状况与表面势垒形状改变之间的关系. 反射式 GaN 阴极量子效率的衰减量随着波长的增大而增大,这是由于阴极衰减过程中有效偶极子的破坏造成了表面 I, II 势垒形状的改变,而表面势垒形状的改变又影响到了不同波段的电子表面逸出概率,从而最终造成

量子效率衰减的程度随入射光波长的变化而变化. 经过重新 Cs 化处理,反射式 NEA GaN 光电阴极量子效率曲线得到了较好的恢复,说明重新进 Cs 激活时,由于 Cs 的脱附造成的偶极子的破坏得到了较好的修复,同时表明保持阴极周围一定的 Cs 气氛对维持阴极的稳定性也是至关重要的,但由于系统中杂质的吸附占有了 Cs 脱附留下的空位,量子效率不能通过补 Cs 百分之百地恢复.

-
- [1] Shahedipour F S, Ulmer M P, Wessels B W, Joseph C L, Nihashi T 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 333
 - [2] Ulmer M P, Wessels B W, Han B, Gregie J, Tremsin A, Siegmund O H W 2003 *Proc. SPIE* **5164** 144
 - [3] Uchiyama S, Takagi Y, Niigaki M, Kan H 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 103511
 - [4] Siegmund O, Vallerga J, Mcphate J, Malloy J, Tremsin A, Martin A, Ulmer M, Wessels B 2006 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **567** 89
 - [5] Zhou M, Zuo S H, Zhao D G 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5513 (in Chinese) [周 梅、左淑华、赵德刚 2007 物理学报 **56** 5513]
 - [6] Zhou M, Zhao D G 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4570 (in Chinese) [周 梅、赵德刚 2008 物理学报 **57** 4570]
 - [7] Zhou M, Zhao D G 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7255 (in Chinese) [周 梅、赵德刚 2009 物理学报 **58** 7255]
 - [8] Machuca F 2003 *Ph. D. Dissertation* (Stanford: Stanford University)
 - [9] Yan J L, Zhu C C, Xiang S M 2001 *J. Infrared Millim. Waves* **20** 157 (in Chinese) [闫金良、朱长纯、向世明 2001 红外与毫米波学报 **20** 157]
 - [10] Guo T L, Gao H R 1993 *Proc. SPIE* **1982** 127
 - [11] Zou J J, Chang B K, Yang Z, Gao P, Qiao J L, Zeng Y P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6109 (in Chinese) [邹继军、常本康、杨智、高 频、乔建良、曾一平 2007 物理学报 **56** 6109]
 - [12] Qiao J L, Tian S, Chang B K, Du X Q, Gao P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5847 (in Chinese) [乔建良、田 思、常本康、杜晓晴、高 频 2009 物理学报 **58** 5847]
 - [13] Qiao J L, Chang B K, Qian Y S, Du X Q, Zhang Y J, Gao P, Wang X H, Guo X Y, Niu J, Gao Y T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3577 (in Chinese) [乔建良、常本康、钱芸生、杜晓晴、张益军、高 频、王晓晖、郭向阳、牛 军、高有堂 2010 物理学报 **59** 3577]
 - [14] Zou J J 2007 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing University of Science and Technology) (in Chinese) [邹继军 2007 博士学位论文 (南京理工大学)]
 - [15] Qiao J L, Niu J, Yang Z, Zou J J, Chang B K 2009 *Optical Technique* **35** 145 (in Chinese) [乔建良、牛 军、杨 智、邹继军、常本康 2009 光学技术 **35** 145]
 - [16] Qiao J L, Chang B K, Du X Q, Niu J, Zou J J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2855 (in Chinese) [乔建良、常本康、杜晓晴、牛 军、邹继军 2010 物理学报 **59** 2855]
 - [17] Zou J J, Chang B K, Du X Q, Yang Z 2007 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **27** 1465 (in Chinese) [邹继军、常本康、杜晓晴、杨 智 2007 光谱学与光谱分析 **27** 1465]
 - [18] 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]

Quantum efficiency recovery of reflection-mode NEA GaN photocathode^{*}

Qiao Jian-Liang^{1)2)†} Chang Ben-Kang¹⁾ Qian Yun-Sheng¹⁾ Du Xiao-Qing³⁾

Wang Xiao-Hui¹⁾ Guo Xiang-Yang¹⁾

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

2) (Department of electronic & electric Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

3) (College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

(Received 24 April 2010; revised manuscript received 11 May 2010)

Abstract

In order to investigate the decay tendency and the recovery status of the quantum efficiency of reflection-mode NEA GaN photocathode, the quantum efficiency curves have been studied after the photocathode was fully activated, stored in system and supplemented with Cs. The quantum efficiency decay and recovery processes of reflection-mode NEA GaN photocathode were observed and the mechanism was discussed. The quantum efficiency value of reflection-mode NEA GaN photocathode can be recovered up to more than 94% of the best value in the shortwave region between 240nm and 300nm, and more than 88% in the long wave region between 300nm and 375nm after Cs supplement. Based on the changes of surface potential barrier profiles of the reflection-mode NEA GaN photocathode before and after the quantum efficiency degradation and the quantum yield formula, the decay characteristic and the recovery status of quantum efficiency curve after supplement with Cs have been related to the changes of surface barrier shapes.

Keywords: reflection-mode, NEA, GaN photocathode, quantum efficiency

PACS: 79.60.-i, 72.80.Eg, 73.61.Ey, 73.20.At

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60871012, 60701013) and the Natural Science Research Program of Education Department of Henan Province, China (Grant No. 2010C510009).

[†] E-mail: qjlqsy@sohu.com