

## GaN 光电阴极的研究及其发展\*

李 飙<sup>1)</sup> 常本康<sup>1)†</sup> 徐 源<sup>1)</sup> 杜晓晴<sup>2)</sup> 杜玉杰<sup>1)</sup> 王晓晖<sup>1)</sup> 张俊举<sup>1)</sup>

1) (南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

2) (重庆大学光电工程学院, 重庆 400030)

(2010 年 10 月 20 日收到; 2010 年 12 月 30 日收到修改稿)

GaN 光电阴极的理论研究主要集中在量子产额、电子能量分布和表面模型三个方面. 国内对 GaN 光电阴极的研究尚处于起步阶段, 存在基础理论不太明确、关键制备工艺欠成熟的问题. 重点探讨了 GaN 光电阴极在发射机理、材料生长、表面净化、激活工艺的优化、变掺杂结构设计和稳定性等方面的研究动向、存在的相关问题及应采取的措施. 根据实验结果提出了制备 GaN 光电阴极的可行性工艺流程.

**关键词:** GaN, 光电阴极, 发展

**PACS:** 85. 60. Ha

## 1. 引言

近年来, 紫外探测技术已广泛应用于多个领域, 如近紫外探测可用于电晕放电观察、火情监测、生物制剂和半导体材料质量检测、紫外激光成像探测与测距等<sup>[1]</sup>, 在军事上可用于导弹预警, 在民用上可用于宇宙探测和臭氧监测等<sup>[2,3]</sup>. 光电阴极作为紫外探测器的核心部分, 直接决定了紫外探测器件的整体性能, 寻找合适的光电阴极已成为紫外探测技术的关键. 当前最常用的紫外光电阴极 CsTe 和 CsI 存在着如下缺点: 仅适用于远紫外范围, 量子效率较低(仅为 10% 左右), 量子效率响应对波长的依赖性较大. 人们需求的是既具有高量子效率, 又具有平坦波长响应的高性能紫外光电阴极, GaN 基光电子材料优良的内在属性(宽带隙、直接跃迁、化学稳定性强)使其成为理想的紫外光电阴极材料. 为了提高 GaN 光电阴极的发射性能, 当前广泛采用的是基于负电子亲和势(NEA)光电发射的 GaN 紫外光电阴极. 基于 NEA 光电发射的 GaN 紫外光电阴极具有量子效率高、暗发射小、发射电子能量分布集中等独特优点<sup>[4]</sup>, 是满足微弱紫外探测要求的理想且具有发展潜力的新型紫外光电阴极, 在众多领域都显示出明显的优势和潜力.

国外近年来加大了对具有 NEA 特性的 GaN 光

电阴极的研究力度, 美国加利福尼亚大学<sup>[4]</sup>、西北大学<sup>[2,5,6]</sup>、普林斯顿大学<sup>[7,8]</sup>、斯坦福大学<sup>[9]</sup>、日本滨松公司<sup>[10]</sup>等多家研究机构在 2000 年左右相继报道了 p 型 GaN 可以通过典型的 Cs 或 Cs/O 激活工艺获得 NEA 状态, 具有 NEA 特性的 GaN 光电阴极的高量子效率、电子能量分布集中和高稳定性的优点得到证实.

国内开展 GaN 光电阴极的研究单位主要有中国电子科技集团公司<sup>[11,12]</sup>、重庆大学<sup>[13,14]</sup>和南京理工大学<sup>[15,16]</sup>等, 开展了 GaN 外延材料的结构、生长和阴极的制备工艺以及 GaN 光电阴极的基础研究. 虽然这些初步研究取得了一定的成绩, 但与国际先进水平相比, 研究并不是很深入, 在灵敏度、稳定性方面仍有一定差距, 这在很大程度上限制了国内真空紫外探测器件性能的提高.

影响 GaN 光电阴极发射性能的因素主要有阴极材料、阴极表面结构和激活工艺等, 这些因素均制约着阴极的整体性能. 本文将从性能评估的角度出发, 对国内外 GaN 光电阴极的性能进行比较, 找出性能参数上存在的差别并分析其相应的原因. 采用多信息量测试评估手段, 以提高 GaN 光电阴极的性能为前提, 探讨 GaN 光电阴极在发射机理、材料生长、表面净化、激活工艺的优化、变掺杂结构设计和稳定性等方面的研究动向、存在的相关问题, 并给出了解决问题时应采取的措施.

\* 国家自然科学基金(批准号:60871012, 60701013)资助的课题.

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

## 2. GaN 光电阴极的发射机理

GaN 光电阴极的发射机理研究主要集中在建立一个能合理描述阴极光电发射过程的理论模型,以揭示 GaN 光电阴极表面特性和阴极光电发射特性的内在联系.虽然通过在阴极表面交替吸附 Cs, O 等低逸出功元素激活阴极的工艺过程有效而实用,但对于 Cs, O 在阴极表面的具体吸附过程、结合状态及其降低表面逸出功并形成 NEA 的机理并不十分清楚.中外学者提出了许多表面模型来解释 NEA 阴极的表面形成机理,但至今也没有达成统一的观点和理论体系.对于 GaAs 阴极,提出了以下三种有影响的表面结构模型:异质结模型<sup>[17]</sup>、双偶极层模型<sup>[18,19]</sup>、铯的弱核力场效应模型<sup>[20]</sup>. GaN 阴极并没有完全继承这几种模型,研究者采用的大多是双偶极层模型<sup>[21]</sup>.

### 2.1. GaAs 双偶极层模型

Fisher 等<sup>[18]</sup>根据测试的 Cs-O 层厚度结果以及表面势垒要足够薄电子才可以隧穿的情况,提出了双偶极层模型.该模型能较好地预测和解释 GaAs 光电阴极的最佳激活层厚度,但不能解释界面势垒的形成以及低温激活前在阴极表面有 O 情况下为何还能获得更高的灵敏度等问题. Su 等<sup>[19]</sup>在“高低温两步激活”结果的基础上提出了一种新的双偶极层模型.新模型考虑了表面有 O 存在的情况,虽然能较好地解释实验结果,但对于 O 的作用以及在低温激活表面有 O 情况下为何还能取得更好的激活效果并未给出合理的解释.

### 2.2. GaN 双偶极层模型

乔建良等<sup>[21]</sup>在分析 GaN 光电阴极 Cs 及 Cs/O 激活过程中光电流变化规律的基础上,参考 Cs 及 Cs/O 激活后表面电子亲和势的改变情况,提出了 NEA 的 GaN 阴极光电发射模型 [GaN(Mg):Cs]:O-Cs, 如图 1 所示.

图 1(a) 所示为单独采用 Cs 激活时形成的 [GaN(Mg):Cs] 偶极子,图 1(b) 所示为共用 Cs/O 激活后形成的 O-Cs 偶极子,图 1(c) 所示为 GaN 阴极能带结构及表面势垒形状,其中  $E_c$  为导带底能级,  $E_F$  为费米能级,  $E_v$  为价带顶能级,  $E_g$  为禁带宽度,  $\delta$  为表面处的能带弯曲量,  $d$  为能带弯曲区的宽度, Cs/O 激活后的表面势垒可看作由两个线性的三角形势垒 I 和势垒 II 构成,势垒 I 和势垒 II 的末端

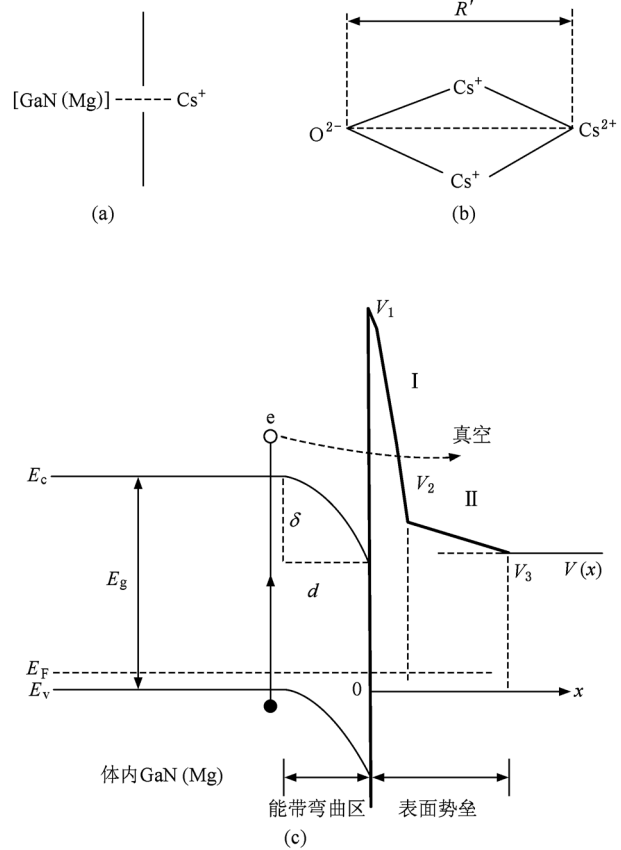


图 1 [GaN(Mg):Cs]:O-Cs 光电发射模型 (a) [GaN(Mg):Cs] 偶极子, (b) O-Cs 偶极子, (c) GaN 阴极能带结构及表面势垒示意图

高度分别为  $V_2$  和  $V_3$ , 势垒 I 的起始高度为  $V_1$ , 真空能级等于  $V_3$ . 该模型考虑了 p 型掺杂元素 Mg 的作用,使得建立的表面模型更切合实际,但该模型是在借鉴 GaAs 双偶极层模型的基础上提出的,也是一种理想情况下的假设,仍需要进一步加以完善.

总之,不同的表面模型都能对具有 NEA 特性的表面机理给予一定程度上的合理解释,但并未做到与实验结果、实验现象的完全符合.通过采用 Cs 或 Cs/O 对高浓度 p 型掺杂的 GaN 材料激活获得具有 NEA 特性的表面,制备出高性能的光电阴极, GaN 表面的形成机理研究对检验激活过程是否成功和进一步获得高性能光电阴极的意义重大.建立合理的 GaN 光电阴极表面模型,对深入研究 GaN 阴极并进一步提高 GaN 阴极的光电发射效率具有明显的理论指导意义.

## 3. GaN 光电阴极材料的生长

对于 GaN 材料,目前主要采用异质外延生长,

生长时多使用金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术,衬底材料通常选用蓝宝石。

### 3.1. GaN 材料的生长

由于很难得到大尺寸的 GaN 体单晶材料, GaN 阴极主要是采用蓝宝石衬底,通过异质外延方法制备. 目前制备 GaN 及其相关合金薄膜的主流生长技术主要有 MOCVD、分子束外延(MBE)和卤化物气相外延(HVPE)等<sup>[22]</sup>,生长时大多采用二步外延生长工艺。

MOCVD 技术<sup>[23]</sup>是最先成功制备出 GaN 及其异质结构的工艺技术,备受人们重视. 采用 MOCVD 技术具有以下三个优点:首先是产量大,生长周期短;其次,与传统的 III-V 族化合物半导体材料的 MOCVD 技术相比较,生长 GaN 时使用的 V 族化合物源材料是  $\text{NH}_3$ ,避免了使用砷烷和磷烷,因此危险性大大降低;第三,由于 MOCVD 生长 GaN 采用 1000 °C 以上的高温,因而对高熔点的 GaN 外延层的晶体质量有好处. MOCVD 技术生长速率适中,可用来进行大面积、均匀、超薄的半导体材料生长,是当前研制和生产 GaN 光电阴极材料最成功的外延生长方法. 不过,由于作为 N 源的  $\text{NH}_3$  难以裂解,并易于与 III 族金属有机物发生寄生反应,所以需要严格控制生长条件,并改进传统生长设备。

MBE 技术<sup>[24]</sup>最适于生长界限分明、组分控制精度高的阴极结构. 采用 MBE 技术时, GaN 阴极材料生长速率较慢,束流强度易于精确控制,膜层组分和掺杂浓度可随源的变化而迅速调整,可以精确地控制膜厚和组分. 但采用 MBE 技术生长阴极材料所用时间较长,不能满足大规模生产的要求,仅适用于科研工作中少量生长 GaN 阴极材料。

HVPE 技术<sup>[25]</sup>的优势是生长系统简单便宜,生长速率比 MOCVD 和 MBE 技术要高得多,可以达到  $10^2 \mu\text{m}/\text{h}$  量级. 该技术的主要缺点是很难精确控制膜厚、因反应气体对设备具有腐蚀性而影响 GaN 材料纯度的提高. 同时,还因组分很难控制,故难以生长三元氮化物半导体材料及异质结构(如  $\text{AlGaIn}$ ). 因此,此法只宜作为 MBE 和 MOCVD 法的辅助方法。

二步外延生长<sup>[26,27]</sup>工艺也就是低温缓冲层(low temperature buffer layers)技术. 首先在较低的温度(500—600 °C)下生长很薄的一层 GaN 或  $\text{AlN}$  作为缓冲层,再调到较高温度生长 GaN,在低温生长

的缓冲层上可获得高质量的 GaN 外延薄膜,降低了 GaN 外延薄膜的缺陷浓度. 低温缓冲层的作用在于解决晶格失配问题,为外延生长提供成核中心和应力释放中心。

总之,当前较成熟的外延生长技术是 MOCVD,此外 MBE 在某些方面也具有其优势。

### 3.2. GaN 材料的生长后处理(p 型掺杂)

早期的 GaN 都表现为 n 型掺杂,即使是故意掺杂的情况,由于缺乏相应的 p 型 GaN 材料生长技术,使 GaN 材料在相当长一段时间内缺少应有的关注. 1989 年, Amano 等<sup>[28]</sup>以  $\text{Cp}_2\text{Mg}$  为掺杂剂,用高纯  $\text{H}_2$  作为载气,采用低能电子束辐射(LLEEBI)处理技术得到了空穴浓度为  $10^{17} \text{cm}^{-3}$  量级的 p 型 GaN 薄膜;随后, Nakamura 等<sup>[29]</sup>利用在  $\text{N}_2$  气氛下的生长后热处理技术得到更高 p 型掺杂浓度的 GaN,空穴浓度提高到  $10^{18} \text{cm}^{-3}$  量级;张国义等<sup>[30]</sup>于 1997 年通过低压金属有机气相外延直接获得 p 型 GaN 薄膜. 上述这些 p 型 GaN 薄膜制备技术的重大突破,也促进了 GaN 基半导体器件的高速发展. p 型 GaN 晶体的生长质量和掺杂浓度直接影响着 GaN 光电阴极量子效率的提高, GaN 晶体生长技术的不断进步是制备高性能 GaN 光电阴极的基础。

## 4. GaN 光电阴极的表面净化

原子级清洁表面的获取是成功制备高性能光电阴极的必备条件,采用何种方法才能更高效地获得原子级清洁表面是大家共同追求的目标. 生长后的 GaN 外延片不可避免地要暴露在大气中,会受到不同程度的 C, O 等杂质污染,表面还残存有加工过程中产生的无机附着物. 阴极表面的各种玷污物会阻止激活时 Cs, O 和阴极表面的结合,妨碍有效 Cs, O 激活层的形成,导致在阴极表面形成很高的界面势垒,影响光电子的逸出,使阴极的激活效果明显变差。

化学处理后加热退火是一种常用的 GaN 阴极表面净化方法,也是研究最多的方法<sup>[31]</sup>. 该方法首先对阴极进行化学清洗,以去除表面的油脂和加工中残留的无机附着物,然后在高真空室中高温加热,去除 C, O 等吸附杂质,达到原子级清洁程度. 用这种方法处理过的阴极可以具有很高的灵敏度. 真空中的加热退火处理,除了有净化作用外,还有优化阴极材料性能的作用<sup>[32]</sup>,可明显减少阴极薄膜内

的点、线和二维缺陷浓度<sup>[33]</sup>. 到目前为止, 高灵敏度的阴极都是通过热处理后得到的, 但过高的加热温度会对阴极表面造成破坏, 甚至导致 Ga 含量和 N 含量的比例失调. 因此, 仍有待进一步探索出优化的加热净化工艺.

### 5. GaN 光电阴极的激活

成功激活是制备 GaN 阴极的关键步骤, 直接决定了阴极性能的高低. 激活的本质是采用低逸出功元素(最常用的元素是 Cs 和 O)覆盖阴极表面, 降低材料表面的逸出功, 获得有效的 NEA, 使制备出的光电阴极量子效率更高. GaAs 光电阴极采用的是高低温两步退火激活工艺, 第二次低温激活比第一次高温激活后的阴极灵敏度提高了 30% 左右<sup>[34]</sup>. 由于 GaN 和 GaAs 材料的不同, 两者的激活工艺也不同. 对于 GaN 光电阴极, Machuca<sup>[9]</sup>采用 700 °C 高温退火后激活, 在 310 nm 处获得了高达 50% 的量子效率; 杜晓晴等<sup>[13]</sup>采用了和 GaAs 类似的高低温两步激活, 经过低温净化后 GaN 表面仍具有光电发射能力, 进一步 Cs/O 激活后可将阴极光电流恢复到接近高温激活结束后的水平, 得出 GaN 阴极材料的制备只需单步高温激活就可完成的结论; 乔建良等<sup>[15,16]</sup>利用双偶极层模型对 GaN 阴极的激活机理进行了有益探讨.

GaN 光电阴极的激活是制备工艺中的重要步

骤, 能否成功激活取决于材料本身质量、材料掺杂浓度、清洗净化工艺及激活设备等众多因素, 任何一个环节都是成功激活的先决条件. 可以借鉴 GaAs 成熟的激活工艺, 结合激活中光电流、真空度等信息量的变化情况, 探讨 GaN 光电阴极电子亲和势随激活过程的变化, 进而达到优化 GaN 光电阴极的掺杂浓度和激活工艺的目的.

### 6. GaN 变掺杂光电阴极的优势结构

GaN 阴极的变掺杂结构给阴极增加了系列内建电场, 相当于场助光电阴极的发射, 提高了发射效率, 是光电阴极的发展趋势.

在阴极退火工艺、激活工艺、表面势垒和逸出概率相同的前提下, 到达阴极表面的光激发电子越多, 阴极对入射光的响应就越好. 均匀掺杂情况下, 表面和体内存在浓度差, 被入射光激发出的电子是以扩散形式向体表运动, 输运过程中一些电子在多次与晶格碰撞损失能量后被复合, 无法逸出. 采取适当的变掺杂结构(梯度掺杂、指数掺杂等), 可以在材料体内产生有利于电子向表面运动的内建电场, 使激发到导带的电子在向表面运动的过程中既存在体内和表面间的浓度差引起的扩散运动, 又存在内建电场作用下的漂移运动, 扩散加上漂移的运动方式可以增加电子到达阴极表面的概率<sup>[35]</sup>.

反射式均匀掺杂和梯度掺杂 GaN 阴极样品的

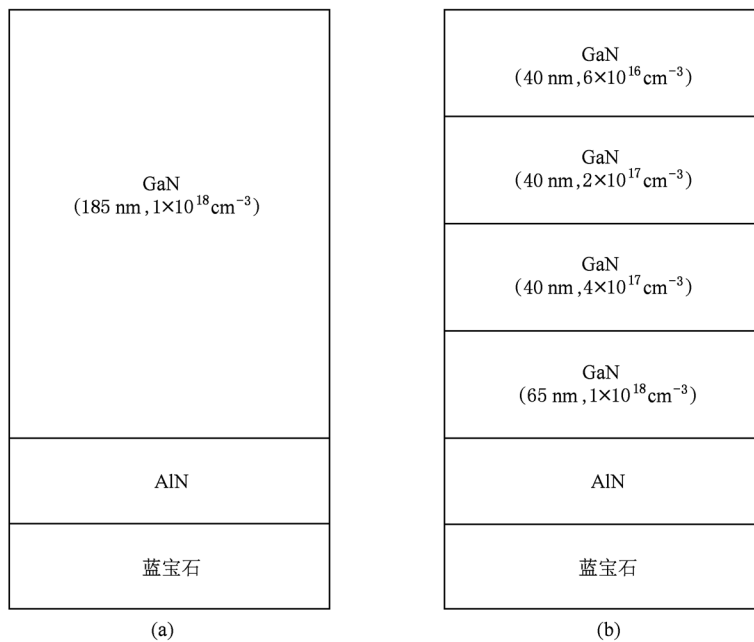


图 2 反射式均匀掺杂和梯度掺杂 GaN 样品的结构 (a) 反射式均匀掺杂(样品 A), (b) 反射式梯度掺杂(样品 B)

结构如图 2 所示.

由图 2 可知:样品 A 和样品 B 衬底相同,均为蓝宝石衬底,缓冲层均为 AlN 外延层, GaN 外延发射层厚度均为 185 nm. 两个样品均采用 MOCVD 作为外延生长方式, 掺杂原子同为 Mg. 两个样品的不同点在于掺杂方式和掺杂浓度. 样品 A 为均匀掺杂结构, 整个 GaN 发射层的掺杂浓度保持一致, 均为  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ; 样品 B 为梯度掺杂结构, GaN 发射层被分成 4 个掺杂区域, 掺杂浓度分别为  $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 掺杂浓度从体内到表面依次减小. 不同的掺杂结构使两个样品具有不同的能带结构<sup>[36]</sup>, 如图 3 所示, 其中  $E_0$  为阴极表面处真空能级.

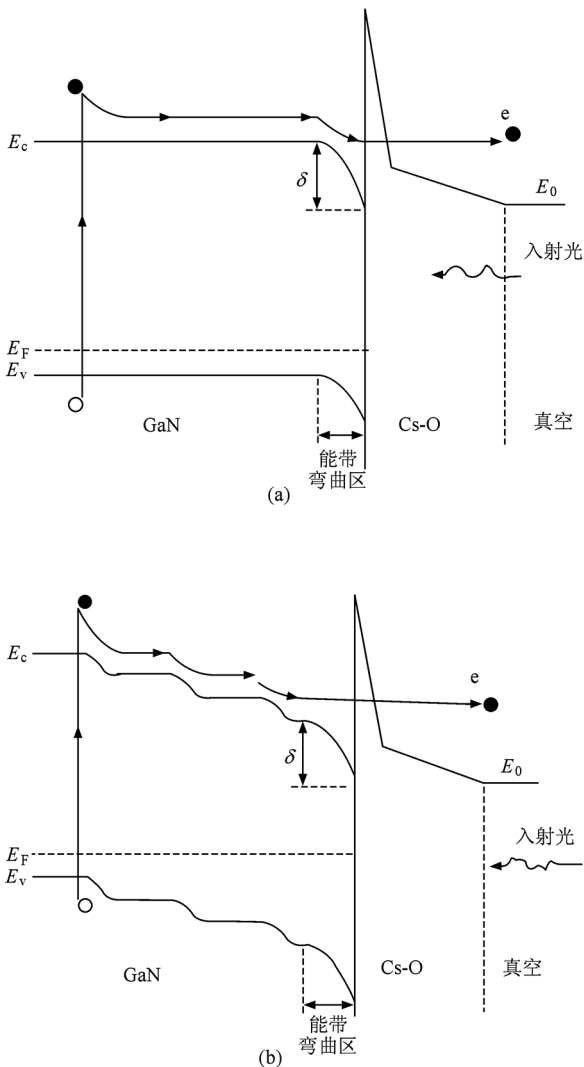


图 3 反射式均匀掺杂和梯度掺杂样品的能带结构示意图 (a) 均匀掺杂样品 A, (b) 梯度掺杂样品 B

和均匀掺杂结构 GaN 阴极相比, 梯度掺杂结构阴极成功激活后的量子效率更高. 采用场助光电阴极发射模型可以很好地解释两者间存在的差异, 梯度掺杂结构中内建电场的存在增加了电子向阴极表面的漂移运动, 提高了电子到达阴极表面的概率, 在实验中表现为光电流比较大, 量子产额比较高. 变掺杂 GaN 光电阴极的这种优势结构, 可以明显提升 GaN 阴极的性能, 是研究 GaN 阴极的一种合理并且有发展潜力的结构.

### 7. GaN 光电阴极在真空中的稳定性

GaN 光电阴极在真空中的稳定性研究就是要解决 GaN 光电阴极量子效率在真空系统中的衰减问题<sup>[37]</sup>. 为了使 GaN 光电阴极长时间地保持高量子效率, 对量子效率衰减原因的研究是非常必要的, 这样可以更好地延长阴极寿命和提高阴极稳定性. 光电阴极量子效率的稳定是保证相应的光电器件长时间正常工作的前提. 对含有光电阴极的电真空器件而言, 真空度的保持是器件工作寿命的重要保证. 尽可能地提高阴极所处环境的真空度, 可以大大延长阴极的寿命<sup>[38]</sup>.

稳定性研究的目的是根据不同波段对应量子效率衰减速度的不同, 结合量子效率衰减过程中表面势垒的变化, 分析 GaN 光电阴极量子效率衰减的具体原因以及不同波段对应的量子效率下降速度不相同的原因. 可以全面测试光照强度、光电流、铯气氛等参考量并分析这些因素对真空系统中阴极稳定性的影响. 基于杂质气体在阴极表面的吸附, 理论推导出阴极寿命与真空度的关系. 根据反射式阴极衰减过程中量子效率曲线的变化, 研究这种变化与阴极表面势垒形状之间的关系, 并结合阴极衰减过程中的变角 X 射线光电子能谱分析结果, 说明表面势垒的变化过程, 揭示 GaN 光电阴极的稳定性机理.

### 8. GaN 光电阴极的制备

实验样品由重庆光电研究所提供, 采用 MOCVD 作为外延生长方式, 蓝宝石衬底, 缓冲层为 AlN 外延层, 掺杂原子为 Mg. GaN 外延发射层厚度为 185 nm, 梯度掺杂结构, 分成 4 个掺杂区域, 掺杂浓度分别为  $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  和  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 掺杂浓度从体内到表面依次

减小. 具体结构如图 2(b) 所示.

首先对样品进行化学清洗<sup>[39]</sup>, 使用四氯化碳、丙酮、无水乙醇和去离子水四种清洗液清洁样品, 再使用上述四种清洗液对样品各进行 5 min 超声波清洗; 然后用 2:2:1 的浓硫酸、 $H_2O_2$  和去离子水的混合液刻蚀 10 min<sup>[40]</sup>; 最后用去离子水超声波清洗 3 min 完成化学清洗. 化学清洗能够去除样品表面的油脂和加工过程中残存的无机附着物<sup>[41]</sup>. 化学清洗后在超高真空室内对样品进行高温退火清洁, 以去除化学清洗后残留在样品表面的 C, O 等元素, 710 °C 下加热 20 min 使阴极表面粘附的杂质基本汽化挥发完毕, 挥发杂质气体不断被真空泵抽出后, 阴极表面可达到原子级清洁程度.

退火清洁结束后对样品进行了 Cs, O 激活, 通过在表面吸附 Cs, O 把样品的真空能级降低到导带以下, 使到达样品表面的光激发电子能够较容易地隧穿表面势垒逸出到真空, 对入射光形成有效的响应<sup>[15]</sup>. 整个激活过程中 Cs 源持续, O 源则根据光电流的变化情况进行通、断调整<sup>[13]</sup>. 激活结束后测试了样品的量子产额曲线, 结果如图 4 所示.

从图 4 可以看出, 梯度掺杂 GaN 阴极成功激活后阴极具有高的量子效率(240 nm 处对应量子产额为 56%), 这验证了相应工艺流程的可行性.

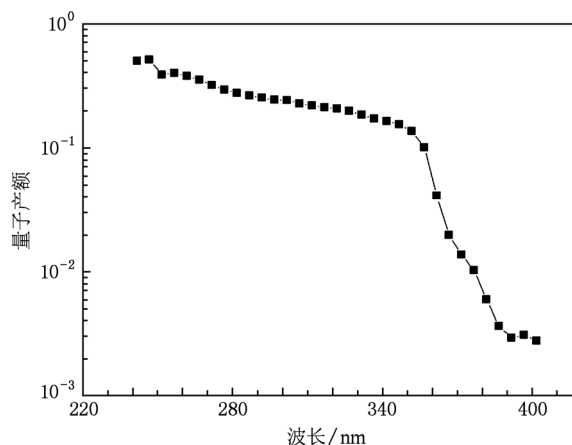


图 4 成功激活后 GaN 阴极的量子产额测试曲线

## 9. 结 论

本文针对 GaN 光电阴极的发射机理、材料生长、表面净化处理、高真空激活、阴极的变掺杂结构设计和稳定性等方面进行了总结和分析, 指出了 GaN 光电阴极的研究动向和影响阴极发展的因素, 并提出了相应的解决方案. 本文的工作可深化对阴极光电发射理论的认识, 为进一步研制高性能的光电发射材料以及改进光电阴极的制备工艺等提供了有意义的参考.

- [1] Mizuno I, Nihashi T, Nagai T, Niigaki M, Shimizu Y, Shimano K, Katoh K, Ihara T, Okano K, Matsumoto M, Tachino M 2008 *Proc. SPIE* **6945** 69451N1
- [2] Razeghi M, Rogalski A 1996 *J. Appl. Phys.* **79** 7433
- [3] Pearton S J, Zolper J C, Shul R J, Ren F 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 1
- [4] Siegmund O, Vallerger J, McPhate J, Malloy J, Tremsin A, Martin A, Ulmer M, Wessels B 2006 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **567** 89
- [5] Ulmer M P, Wessels W B, Shahedipour F, Korotkov R Y, Joseph C, Nihashi T 2001 *Proc. SPIE* **4288** 246
- [6] Shahedipour F S, Ulmer M P, Wessels B W, Joseph C L, Nihashi T 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 333
- [7] Wu C I, Kahn A 2000 *Appl. Surf. Sci.* **162–163** 250
- [8] Wu C I, Kahn A 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 3209
- [9] Machuca F 2004 *Ph. D. Dissertation* (Stanford: Stanford University)
- [10] Uchiyama S, Takagi Y, Niigaki M, Kan H, Kondoh H 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 103511
- [11] Li H R, Shen T J, Dai L Y, Ma J Y 2007 *Optoelectron. Techn.* **27** 73 (in Chinese) [李慧蕊、申屠军、戴丽英、马建一 2007 光电技术 **27** 73]
- [12] Li Z M, Zeng Z Q, Chen Q X 2008 *Vac. Cryog.* **14** 236 (in Chinese) [李朝木、曾正清、陈群霞 2008 真空与低温 **14** 236]
- [13] Du X Q, Chang B K, Qian Y S, Fu R G, Gao P, Qiao J L 2010 *Chin. J. Lasers* **37** 385 (in Chinese) [杜晓晴、常本康、钱芸生、富容国、高 频、乔建良 2010 中国激光 **37** 385]
- [14] Du X Q, Chang B K, Qian Y S, Qiao J L, Tian J 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 1 (in Chinese) [杜晓晴、常本康、钱芸生、乔建良、田 健 2010 光学学报 **30** 1]
- [15] 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]
- [16] Qiao J L, Chang B K, Niu J, Yang Z, Zou J J 2009 *Chin. J. Vac. Sci. Technol.* **29** 115 (in Chinese) [乔建良、常本康、牛军、杨 智、邹继军 2009 真空科学与技术学报 **29** 115]
- [17] Uebbing J J, James L W 1970 *J. Appl. Phys.* **41** 4505
- [18] Fisher D G, Enstrom R E, Escher J S, Williams B F 1972 *J. Appl. Phys.* **43** 3815
- [19] Su C Y, Chye P W, Pianetta P, Lindau I, Spicer W E 1979 *Surf. Sci.* **86** 894
- [20] Gao H R 1987 *J. Vac. Sci. Technol. A* **5** 295

- [21] Qiao J L, Niu J, Yang Z, Zou J J, Chang B K 2009 *Opt. Techn.* **35** 145 (in Chinese) [乔建良、牛军、杨智、邹继军、常本康 2009 光学技术 **35** 145]
- [22] Wang S S, Gu B, Xu Y, Qin F W, Yang D Z 2002 *Chin. J. Electron. Dev.* **25** 1 (in Chinese) [王三胜、顾彪、徐茵、秦福文、杨大智 2002 电子器件 **25** 1]
- [23] Amano H, Sawaki N, Akasaki I, Toyoda Y 1986 *Appl. Phys. Lett.* **48** 353
- [24] Morkoç H, Botchkarev A, Salvador A, Sverdlov B 1995 *J. Cryst. Growth* **150** 887
- [25] Molnar R J, Götz W, Romano L T, Johnson N M 1997 *J. Cryst. Growth* **178** 147
- [26] Yoshida S, Misawa S, Gonda S 1983 *Appl. Phys. Lett.* **42** 427
- [27] Nakamura S 1991 *Jpn. J. Appl. Phys.* **30** L1705
- [28] Amano H, Kito M, Hiramatsu K, Akasaki I 1989 *Jpn. J. Appl. Phys.* **28** L2112
- [29] Nakamura S, Mukai T, Senoh M, Iwasa N 1992 *Jpn. J. Appl. Phys.* **31** L139
- [30] Zhang G Y, Yang Z J, Tong Y Z, Jin S X, Dang X Z, Wang S M 1997 *Chin. Phys. Lett.* **14** 637
- [31] Machuca F, Liu Z, Sun Y, Pianetta P, Spicer W E, Pease R F W 2002 *J. Vac. Sci. Technol. A* **20** 1784
- [32] Bourreca L E, Chasseb D R, Thambana P L S, Glossera R 2003 *Proc. SPIE* **4796** 11
- [33] Tracy K M, Mecouch W J, Davis R F, Nemanich R J 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 3163
- [34] Fisher D G 1974 *IEEE Trans. Electron Dev.* **21** 541
- [35] Du X Q, Chang B K, Zou J J, Li M 2005 *Acta Opt. Sin.* **25** 1411 (in Chinese) [杜晓晴、常本康、邹继军、李敏 2005 光学学报 **25** 1411]
- [36] Zou J J, Chang B K 2006 *Opt. Eng.* **45** 054001
- [37] 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]
- [38] Durek D, Frommberger F, Reichelt T, Westermann M 1999 *Appl. Surf. Sci.* **143** 319
- [39] Qiao J L 2010 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University of Science and Technology) (in Chinese) [乔建良 2010 博士学位论文 (南京: 南京理工大学)]
- [40] Liu Z, Sun Y, Machuca F, Pianetta P, Spicer W E, Pease R F W 2003 *J. Vac. Sci. Technol. B* **21** 1953
- [41] Tereshchenko O E, Shaibler G É, Yaroshevich A S 2004 *Phys. Solid State* **46** 1949

## Research and development of GaN photocathode<sup>\*</sup>

Li Biao<sup>1)</sup> Chang Ben-Kang<sup>1)†</sup> Xu Yuan<sup>1)</sup> Du Xiao-Qing<sup>2)</sup> Du Yu-Jie<sup>1)</sup> Wang Xiao-Hui<sup>1)</sup> Zhang Jun-Ju<sup>1)</sup>

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

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

(Received 20 October 2010; revised manuscript received 30 December 2010)

### Abstract

Negative electron affinity GaN photocathode with greatly advanced photoelectricity performance is described. The research of GaN photocathode focuses on the three points, i.e., quantum yield, electron energy distribution and surface model, in the last decade. The domestic research of GaN photocathode is still in its infancy, the basic theory is not established, and preparation technology is not mature. In this paper we review emission mechanism, material growth, surface cleaning, activation process optimization, varied-doping structure design and stability of GaN photocathode. The latest experimental results confirm that the fabrication technology of GaN photocathode is feasible.

**Keywords:** GaN, photocathode, development

**PACS:** 85.60.Ha

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60871012, 60701013).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: bkchang@mail.njust.edu.cn