

前沿领域综述

负电子亲和势 GaN 光电阴极的研究进展*

付小倩¹⁾²⁾ 常本康^{1)†} 李 颀¹⁾ 王晓晖¹⁾ 乔建良¹⁾

1) (南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

2) (济南大学信息科学与工程学院, 济南 250022)

(2010年5月22日收到; 2010年7月9日收到修改稿)

GaN 材料由于其优良的性能, 成为紫外探测和真空电子源领域极具发展潜力的材料之一; 目前制备的反射式 GaN 光电阴极的量子效率已达到 70% 以上, 透射式也达到了 30%. 本文对 GaN 光电阴极的结构设计、表面清洗和 Cs/O 激活三大方面进行了综述, 分析了影响量子效率的关键因素, 并对今后可能的发展方向进行了展望.

关键词: GaN 光电阴极, 负电子亲和势, 量子效率, 进展

PACS: 85.60.Ha, 61.72.uj, 61.72.U-, 81.65.-b

1. 引言

GaN 作为第三代半导体的典型代表, 具有宽带隙、高饱和漂移速度、高量子效率和低噪声等突出优点, 是大功率、高温、高频、抗辐照应用场合下极为理想的半导体材料. GaN 材料的禁带宽度为 3.4 eV, 截止波长在 365 nm 左右, 具有良好的“日盲”特性, 在紫外探测和真空电子源领域中有重要的应用价值, 受到了国内外研究机构的广泛重视.

经过近几年的发展, GaN 光电阴极的量子效率有了明显的提高, 其中反射式已经获得了高达 70% 以上的量子效率, 透射式也达到了 30%^[1-9]. 而一直困扰 GaN 外延质量的匹配衬底问题也有了进一步的发展, 通过在掺杂中引入变掺杂、共掺杂和调制掺杂, 对阴极量子效率的提高产生了重要影响. 本文根据 GaN 光电阴极的国内外发展情况, 从结构设计、表面清洗和激活工艺三大方面做系统评述, 并在此基础上探讨新的研究方向.

2. 结构设计

结构设计在高量子效率的 GaN 光电阴极制备

过程中有着重要的地位, 因为 GaN 光电阴极的许多电学和光学性质很大程度上取决于阴极本身的结构. 而不断优化阴极的结构设计也成为目前该领域的研究重点之一. GaN 阴极的结构设计包括衬底的选择、缓冲层的设计、掺杂设计以及发射层厚度的设计.

2.1. 衬底材料的选择

生长出高质量的 GaN 外延层是制备 GaN 光电阴极的第一步. 然而 GaN 材料一直没有晶格常数匹配的合适衬底, 在很大程度上制约了 GaN 外延层的生长质量. 在选择衬底材料时, 除了考虑要与 GaN 具有较小的晶格失配度和相近的热膨胀系数外, 价格和尺寸也是衡量衬底材料的因素之一. 表 1^[10,11] 列出了可以用作 GaN 外延层的衬底材料及其性能参数.

就性能来说, GaN 是最理想的衬底材料, 但 GaN 所能获得的单晶尺寸太小, 而且直接在 GaN 衬底上生长 GaN 外延层需要较高的工艺做保障, 因此, 目前 GaN 光电阴极结构一般采用蓝宝石、SiC 或 Si 为衬底, 和 GaN 材料性能相匹配的 GaN, AlN 和 ZnO 为缓冲层的结构较为常见. 相比较而言, SiC 与 GaN 具有较小的晶格失配和热失配, 是更好的衬底材

* 国家自然科学基金(批准号:60871012)资助的课题.

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

料^[12,13]. 但由于 SiC 晶片很小, 且比较昂贵, 所以实际使用中更多的是采用蓝宝石作为衬底. 为在蓝宝石衬底上获得高质量的 GaN 外延层, 研究人员在生长工艺上进行了探索, 例如彭冬生等人^[14]采用了化学腐蚀 C 面-蓝宝石衬底形成一定图案, 然后利用 LP-MOCVD 方法生长 GaN 外延层, 得到了较低的位错密度和较好的晶体质量. LiGaO₂ 和 LiAlO₂ 具有和 GaN 最小的晶格失配, 分别为 0.2% 和 1.4%, 成为极具发展前景的 GaN 衬底材料, 也逐渐受到重视^[15-19]. 但目前还没有将 LiGaO₂ 和 LiAlO₂ 作为光电阴极的衬底的实验研究报道, 其可行性有待于进一步研究.

表 1 GaN 衬底材料特性^[10,11]

材料	晶体结构	晶格常数 /nm	失配度 ($\Delta a/a$)/%	热膨胀系数 / 10^{-6}K^{-1}
Al ₂ O ₃	六方	$a = 0.4758 \text{ c} = 1.2991$	14	7.5/3.17
Si	四方	$a = 0.5430$	17	3.59
6H-SiC	六方	$a = 0.308 \text{ c} = 1.512$	3.5	10.3
ZnO	六方	$a = 0.3252 \text{ c} = 0.5313$	2.2	2.9/4.75
AlN	六方	$a = 0.3112 \text{ c} = 0.4982$	2	4.2/3.17
LiGaO ₂	四方	$a = 0.5407 \text{ c} = 0.5014$	0.2	11/3.8
LiAlO ₂	四方	$a = 0.517 \text{ c} = 0.626$	1.4	5.0/6.7
GaN	六方	$a = 0.3189 \text{ c} = 0.5185$	0	5.59/3.17

2.2. 缓冲层的设计

目前 GaN 光电阴极常用的缓冲层材料包括 GaN, AlN, ZnO 和多层 AlN/GaN 或 AlGaIn/GaN 的超晶格结构. 缓冲层的引入可以缓解在晶体生长后的冷却过程中, 由于蓝宝石和 GaN 的热膨胀系数不匹配而产生的拉伸应力导致裂缝的产生问题, 从而获得高质量的 GaN 外延层.

选择 AlN 作为缓冲层是由于 AlN 与 GaN 之间的晶格常数比较接近, 不易引入位错. AlN 的引入还可以确定 GaN 光电阴极的短波截止波长. 另外, AlN 具有 6.2 eV 的禁带宽度, 在与 p 型 GaN 接触时可以在界面产生较大的势垒, 阻挡光生电子向基底方向移动, 从而对提高电子的逸出概率有一定帮助.

除 AlN 之外, GaN 也常作为缓冲层材料. Nakamura^[18]在生长 GaN 外延层之前, 先在蓝宝石上以低温 450—600 °C 生长一层非晶 GaN 层. 结果发现在其上所长出的 GaN 外延层在室温的空穴迁移率高达 600 cm²/V·s 以上, 在 77 K 达到了 1500

cm²/V·s, 比使用 AlN 缓冲层的 350—430 cm²/V·s 高出许多, 并指出了最佳的 GaN 缓冲层的厚度为 20 nm.

但采用 GaN 作为缓冲层的阴极结构也有明显的缺点. 未掺杂的 GaN 表现为 n 型半导体的性质, 有很高的电子浓度 (10^{18} cm^{-3}), 和 p 型 GaN 发射层接触, 由于费米能级拉平效应, 会在界面产生能带弯曲引入内建电场, 这个电场会吸引光生电子向衬底方向移动, 因此会对电子的逸出概率产生负面影响.

ZnO 由于和 GaN 具有较小的晶格失配度, 也常用作缓冲层^[20,21]. 另一种比较常见的缓冲层结构是在 GaN 发射层和基底之间插入多层 AlN/GaN 或 AlGaIn/GaN 超晶格作为缓冲层^[9,22-25]. 这种多层 AlN/GaN 或 AlGaIn/GaN 超晶格缓冲层的结构, 通过在生长过程中引入应变应力, 消除了外延 GaN 层中的残余应力的影响, 降低了 GaN 外延层的位错密度减少了裂缝, 从而大大提高了 GaN 外延层的质量.

2.3. 掺杂设计

掺杂设计是 GaN 光电阴极的结构设计中的重要部分, 如果说衬底和缓冲层的设计主要是为了获得高质量的 GaN 外延层, 那么掺杂设计则会对 GaN 的电学和光学性能等产生重要影响, 可以认为是阴极结构设计中影响量子效率最关键的环节.

2.3.1. 掺杂浓度的确定

GaN 光电阴极的量子效率受电子扩散长度和逸出概率的影响, 而这两个因素都与掺杂浓度有关. 一方面, 掺杂浓度提高会导致晶格缺陷增加, 电子的复合中心增加, 从而减小电子的寿命, 导致电子扩散长度的减小. 而另一方面, 高的掺杂浓度可以获得较大的表面能带弯曲量以及表面势垒厚度的降低, 从而增加了光生电子的逸出概率. 因此, GaN 阴极的掺杂浓度应该有一个最佳值来平衡其对电子扩散长度和逸出概率影响的矛盾. Uchiiyama 等人^[1]研究了掺杂浓度与量子效率的关系, 发现在 Mg 的掺杂浓度为 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时量子效率最高, 小于和大于此浓度量子效率都有明显减少, 从实验的角度验证了 GaN 光电阴极的 p 型掺杂浓度应该有一个最佳值. 过去由于技术的限制, 制备的 GaN 光电阴极只有 10^{17} cm^{-3} 量级的掺杂浓度, 而目前国产 GaN 光电阴极的掺杂浓度已经得到了很大提高. 厦门大学的黄生荣等人^[26]采用激光诱导的办法, 用

Zn 对 GaN 进行 p 型掺杂,在表面获得了高达 10^{18} — 10^{19} cm^{-3} 的掺杂浓度. 这一研究成果表明了制备出高掺杂浓度的 GaN 光电阴极的可能性.

2.3.2. 变掺杂结构设计

我研究小组在对 GaAs 光电阴极的掺杂设计中采用了由体内到表面掺杂浓度逐渐减小的梯度掺杂方式并获得了较高的量子效率和灵敏度^[27-29]. 这种梯度掺杂的结构设计主要是通过增加光生电子的逸出概率的方式来提高阴极的量子效率的,而电子逸出概率和到达表面的电子能量的空间分布和势垒的形状有关. 相对于均匀掺杂而言,这种设计方式可以在掺杂浓度不同的界面产生的能带弯曲区引入内建电场,由体内到表面多个内建电场的引入使得光生电子加速向表面运动并获得了更高的能量隧穿表面势垒逸出. 通过不断优化梯度掺杂结构,我们又在此基础上引入了指数掺杂结构,即通过逐步降低浓度梯度值,在阴极体内建立均匀的内建电场,克服了梯度掺杂中不同波长光子产生的电子受到电场强度不同对量子效率的影响^[30-32].

2.3.3. 共掺杂和调制掺杂设计

Ulmer 等人^[6]研究发现, GaN 量子效率除了跟掺杂浓度有关外,也会随着电导率的提高而增加. 因此,提高 GaN 阴极的电导率成为获得高量子效率的另一个有效途径. 而共掺杂和调制掺杂设计法正是通过提高材料电导率的方式来提高阴极量子效率的.

共掺杂提高电导率主要通过以下方式:即提高平衡溶度、降低 Mg 受主的电离能以及改变载流子的迁移率^[33]. 以 Mg-O 共掺为例,形成的 Mg-O 结构会使受主能级降低,施主能级升高,导致更高的空穴浓度. 同时,短程偶极散射代替了杂质电荷的长程库仑散射,散射强度变弱,提高了空穴迁移率. 采用 Be-O 或 Mg-O 共掺的设计可以获得 $(1-5) \times 10^{18}$ cm^{-3} 的空穴浓度以及 $70-150$ $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 和最高为 40 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 的电子迁移率^[34-37].

另外,掺杂时随着 Mg 的浓度增加,由于 Mg 的自补偿效应,它会和 GaN 中的施主缺陷或空位相结合,反而降低了空穴浓度,而采用调制掺杂通过降低 Mg 的激活能和自补偿效应也得到了较高的空穴浓度 (10^{18} cm^{-3}) 和电导率,并且调制掺杂可以降低位错密度获得高质量的晶体表面结构^[38-41].

2.4. 发射层厚度的设计

目前实验采用的 GaN 光电阴极结构中发射层

的厚度在 $100-1000$ nm 之间不等. 从理论上讲,发射层的厚度受材料的光吸收系数和电子扩散长度的影响. 即我们既要保证入射光子在一定厚度内的完全吸收,又要保证光生电子在其扩散长度范围内能有效逸出. 而光吸收系数和晶体本身的质量和波长有密切关系. 张进城等^[42]测量了以蓝宝石为衬底的 GaN 外延层的透射曲线,表明 364 nm 以下为 GaN 的强吸收区. 杜晓晴^[43]测量的国产 GaN 光电阴极 364 nm 以下的光吸收系数约为 10^5 cm^{-1} . Bandic 等人^[44]和 Kumakura 等人^[45]对电子的扩散长度进行了研究,测量了空穴浓度为 $(1-4) \times 10^{17}$ cm^{-3} 的 GaN 中的电子扩散长度大约为 (0.2 ± 0.05) μm . 就反射式 GaN 光电阴极而言,由于其光的入射表面和电子的出射表面都是同一个表面即发射层表面,发射层厚度的最小值由吸收长度决定. 而当采用透射式光照时,发射层的最大厚度由电子扩散长度决定,因此发射层最佳的厚度值应在 $100-200$ nm 之间.

Machuca 等人^[46]对发射层厚度分别为 0.5 μm 和 0.1 μm 的 GaN 进行了研究,结果表明 0.5 μm 的发射层在反射式光照情况下获得了 $0.1\%-0.4\%$ 的量子效率,而 0.1 μm 的发射层同等情况下获得了 $25\%-50\%$ 的量子效率,也验证了 $100-200$ nm 的发射层厚度能产生更高的量子效率. 周梅等^[47,48]的研究结果也表明通过降低 p 型 GaN 发射层厚度可以获得高的量子效率.

我研究小组根据以上分析,优化了 GaN 光电阴极的结构设计,采用 AlN 薄层取代了原来的 GaN 厚层作为缓冲层,引入了梯度掺杂设计,浓度梯度为 4 层,并将发射层的厚度设计从原来的 500 nm 降为 180 nm,此结构经过表面清洗和铯氧激活,目前在 240 nm 处获得了最高为 56% 的量子效率,更进一步的实验研究还在进行当中.

3. 表面清洗

表面清洗的原则是去除吸附在阴极表面的碳、碳氢化合物以及氧和氢氧化物,获得原子级的清洁表面,并且保证表面粗糙度不受到影响,以及保持发射层的电子结构,如价带最大值 (VBM)、表面能带弯曲量和表面电子亲和势等,为进行 Cs/O 激活获得负电子亲和势 (NEA) 做准备.

常规的表面清洗步骤包括:表面刻蚀,主要采

用甲醇、乙醇、丙酮、去离子水和超声波清洗等方式,目的是去除表面油污;热化学清洗,主要是采用不同种类、浓度和配比的酸去除表面的氧和氧化物.目前常用热化学清洗的物质主要有 HCl, HF, KOH, NH₄OH, HNO₃, H₂SO₄, H₃SO₄, UV/O₃, H₂O₂, 去离子水等多种试剂;最后是进行一定环境下的高温退火,以去除表面的碳、碳化物和残留的氧化物等.退火环境有超高真空环境、高压强下的氨气环境以及采用氮离子溅射等方式,采用的方法不同最终得到的结论也各不相同^[49-53].

Machuca 等人^[49]采用 51% H₂SO₄ 和 30% 的 H₂O₂ 以 4:1 的比例混合后进行清洗,在真空中进行 700 °C 下高温退火,最终得到了 C, O 含量为一个单层的百分之几. Smith 等人^[50]指出,采用盐酸和去离子水进行化学清洗可以获得最少的 C, O 含量,但就真空加热退火后总的去除效果来说,以 HF 为主要试剂的清洗方式得到的 C, O 含量最少.要完全去除 C 和 O,真空中的加热温度要达到 950 °C 以上,但过高的温度会造成 Ga 的分解,破坏表面结构并引入缺陷. Tracy 等人^[51]采用 HCl 和去离子水清洗后,在 860 °C 氨气氛中 10⁻⁴ Torr (1 Torr = 1.33322 × 10² Pa) 下进行高温退火,最终得到的碳氧含量低于 XPS 的可探测极限,并且其 p 型 GaN 测得了 0.8 eV 的表面能带弯曲量,表面电子亲和势为 2.6 ± 0.1 eV, Ga 和 N 的比例由 1.3 降为 1.0. Hunt 等人^[52]和 Lai 等人^[53]对氮离子溅射加高温退火的方法进行了研究,结果表明这种方式也可以有效去除表面的碳和氧,而且 N₂⁺ 或 N⁺ 会和表面的自由 Ga 结合,重新形成 GaN,使得 Ga 与 N 的比值接近于整数.

经过大量的实验证明,700 °C 的真空退火温度可以有效去除表面残留的碳和氧,得到原子级清洁表面.另外,通过测量显示,高温退火后已经出现了表面能带的向下弯曲,少量降低了表面电子亲和势,这也为有效进行 Cs/O 激活获得 NEA 状态打下了基础.

4. Cs/O 激活

Cs/O 激活的目的是使 GaN 光电阴极表面形成有效的负电子亲和势,从而有利于光生电子逸出.激活方式的选择对于获得高量子效率的阴极有着重要意义.阴极常用的激活方式包括 Cs/O 交替激活和 Cs 源连续、O 源断续激活方式.在 GaAs 光电阴

极的激活过程中,通过采用高低温两步激活法,即 yo-yo 激活法,量子效率得到了很大提高^[54,55]. 杜晓晴^[56]采用高低温两步激活法对 GaN 光电阴极进行了激活实验,但量子效率并未出现明显的提高.我们小组进行了两步高温激活实验,尚未发现对提高量子效率有积极的影响,更进一步的实验正在进行当中. Mulhollan 等人^[57]针对 GaAs 光电阴极提出了一种新的激活方式,即在 Cs/O 激活的同时,采用第二种碱金属 Li 或 Na 进行覆盖,结果比传统激活方式最高增加了 60% 的量子效率.但这种方法应用于 GaN 光电阴极的激活目前还未见报道.除此之外,激活时 Cs/O 流量比^[58]的选择、O 的通断时间的掌握以及采用自动激活方式相比于手动激活的有效性^[59]也是激活的研究内容之一.

Cs/O 激活后, GaN 光电阴极的表面能带弯曲量可达 1.3 eV 左右^[60,61],单独进行 Cs 激活就可以使表面真空能级降到导带底以下, Cs/O 激活可以将真空能级再进行少量降低.我们小组采用了 [GaN (Mg):Cs]:O-Cs 的双偶极层模型解释了 Cs/O 激活后的 NEA 形成机理^[62].

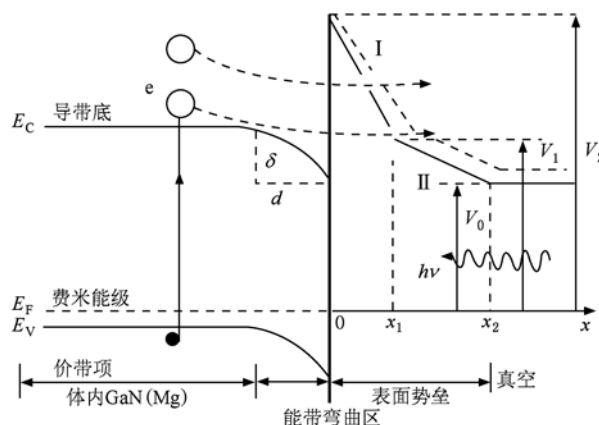


图1 反射式 GaN 光电阴极能带与表面势垒^[62]

从图 1 可以看出,单独进 Cs 所形成的势垒 I 的末端高度就已经位于导带底以下,因此到达阴极表面的电子只要隧穿势垒 I 就可以向真空中发射,势垒 I 的厚度大小将直接影响电子的逸出概率.但是随着阴极稳定性的降低,势垒 I 和 II 的厚度和末端高度都在增加,这将不利于光生电子,尤其是低能电子的逸出.目前我们需要经过实验研究和理论分析对 [GaN (Mg):Cs]:O-Cs 模型的正确性进行进一步的论证.

Cs/O 激活所造成的 GaN 阴极表面能带弯曲量

也会影响有效的 NEA 状态的获得^[63,64]. 从理论上来说,如果能带弯曲量能达到禁带宽度值即 3.4 eV,而 Cs 的功函数为 1.8 eV,则经过 Cs 激活,可以获得 -1.6 eV 的电子亲和势,NEA 状态更容易达到.

从目前的实验研究结果来看,能带弯曲量一般在 1.3 eV 左右. 有研究表明,GaN 的最大能带弯曲量与禁带宽度有关,大约在 1.9 eV 左右^[63].

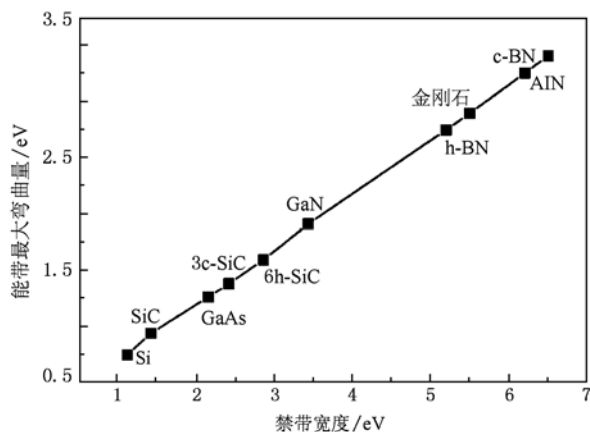


图2 能带最大弯曲量与禁带宽度的关系曲线^[63]

在进行 Cs/O 覆盖后,表面总的能带弯曲量 $\Delta\Phi$ ^[65]可以写为

$$\Delta\phi = N_A d^2 / Z \epsilon, \quad (1)$$

其中 ϵ 为介电常数, $Z = 1/2\pi e$, 为常数, N_A 为受主浓度. 因此可以通过控制掺杂达到其最大的能带弯曲量从而得到更有效的 NEA 状态.

5. 结论与展望

作为紫外探测和真空电子源领域的高性能材料, GaN 光电阴极的制备已经取得了较大的进展,

其中反射式得到了 70% 以上的量子效率,而透射式的最高量子效率达到了 30%. 本文通过对 GaN 阴极的结构设计、表面清洗和 Cs/O 激活三个大的方面发展现状的总结,认为针对阴极量子效率的进一步提高,可以着重在以下方面进行深入研究:

1. 新型衬底材料的应用. 例如探索以 LiGaO₂ 或 LiAlO₂ 为衬底直接生长 GaN 外延层对提高晶体质量的有效性.

2. 缓冲层的设计. 分别采用 AlN, GaN 以及多层 AlN/GaN (AlGaIn/GaN) 超晶格作为缓冲层,进行 GaN 外延生长,并比较不同结构下 GaN 外延层的质量及对量子效率的影响.

3. 变掺杂、共掺杂和调制掺杂设计. 不断优化梯度掺杂结构和采用共掺杂、调制掺杂方式制备 GaN 光电阴极,并考虑将共掺杂和调制掺杂以及共掺杂和梯度掺杂同时应用于 GaN 发射层的设计以研究对量子效率的影响.

4. Mg 的最佳掺杂浓度的确定. 通过制备不同掺杂浓度的 GaN 光电阴极探索 Mg 的最佳掺杂浓度,以平衡电子逸出概率和电子扩散长度对掺杂浓度的矛盾选择.

5. 发射层最佳厚度的设计. 根据理论计算和实验研究确定最佳的发射层厚度值.

6. 探索新的表面化学清洗和高温退火方式,并测试退火后阴极的电子结构参数,分析不同处理方式对碳氧去除效果、表面形态和阴极性能的影响.

7. Cs/O 激活后表面能带最大弯曲量的获得. 即如何通过控制掺杂浓度等方式获得最大的表面能带弯曲量,从而得到有效的 NEA 状态.

8. Cs/O 激活中, Cs/O 比例以及 O 覆盖时机的选择对量子效率的影响,探索 Cs 激活后,采用 Li 或 Na 进行附加激活的可能性.

[1] Uchiiyama S, Takagi Y, Niigaki M, Kan H 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 103511
 [2] Siegmund O, Vallerga J, McPhate J, Malloy J, Tremsin A, Martin A, Ulmer M, Wessels B 2006 *Nucl. Instrum. Meth. A* **567** 89
 [3] Leopold D J, Buckley J H, Rebillot P 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 043525
 [4] Siegmund O, Tremsin A, Vallerga J, McPhate J, Hull J, Malloy J, Dabiran A 2008 *Proc. SPIE* **7021** 70211B-1
 [5] Siegmund O H W, Tremsin A S, Martin A, Malloy J, Ulmer M, Wessels B 2003 *Proc. SPIE* **5164** 134

[6] Ulmer M P, Wessels B W, Han B, Gregie J, Tremsin A, Siegmund O H W 2003 *Proc. SPIE* **5164** 144
 [7] Stock J, Hilton G, Norton T, Woodgate B, Aslam S, Ulmer M 2005 *Proc. SPIE* **5898** 58980F-1
 [8] 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** 69451N
 [9] Fuke S, Sumiy M, Nihashi T, Hagino M, Matsumoto M, Kamo Y, Sato M, Ohtsuka K 2008 *Proc. SPIE* **6894** 68941F-1
 [10] Liliental-Weber Z, Jasinski J, Zakharov D N 2004 *Opto-*

- Electron. Rev.* **12** 339
- [11] Liang C G, Zhang J 1999 *Chin. J. Semi.* **20** 89 (in Chinese) [梁春广、张冀 1999 半导体学报 **20** 89]
- [12] Feng Q, Hao Y, Zhang X J, Liu Y L 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 626 (in Chinese) [冯倩、郝跃、张晓菊、刘玉龙 2004 物理学报 **53** 626]
- [13] Hu Y F, Beling C D 2005 *Chin. Phys.* **14** 2293
- [14] Peng D S, Feng Y C, Wang W X, Liu X F, Shi W, Niu H B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3606 (in Chinese) [彭冬生、冯玉春、王文欣、刘晓峰、施炜、牛慈笨 2006 物理学报 **55** 3606]
- [15] Dikme Y, Gemmer P van, Chai B, Hill D, Szymakowski A, Kalisch H, Heuken M, Jansen R H 2005 *Phys. Stat. Sol. (c)* **2** 2161
- [16] Duan S K, Teng X G, Han P D, Lu D C 1998 *J. Cryst. Growth* **195** 304
- [17] Doolittle William A, Kang Sangbeom, Brown April 2000 *Solid-State Electron.* **44** 229
- [18] Nakamura S 1991 *Jpn. J. Appl. Phys.* **30** 1705
- [19] Zou Ju, Liu C X, Zhou S M, Wang J, Zhou J H, Huang T H, Han P, Xie Z L, Zhang R 2006 *Chin. Phys.* **15** 2706
- [20] Vispute R D, Talyansky V, Trajanovic Z, Choopun S, Downes M, Sharma R P, Venkatesan T, Woods M C, Lareau R T, Jones K A, Iliadis A A 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 2735
- [21] Sun X W, Xiao R F, Kwok H. S 1998 *J. Appl. Phys.* **84** 5776
- [22] Horie M, Ishihara Y, Uamamoto J, Kurimoto M, Takano Tand, Kawanishi H 2002 *Phys. Stat. Sol. (a)* **192** 151
- [23] Wu Y X, Zhu J J, Chen G F, Zhang S M, Jiang D S, Liu Z S, Zhao D G, Wang H, Wang Y T, Yang H 2010 *Chin. Phys. B* **19** 036801
- [24] Liu Z, Wang X L, Wang J X, Hu G X, Guo L C, Li J M 2007 *Chin. Phys.* **16** 1467
- [25] Ding Z B, Yao S D, Wang K, Cheng K 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2977 (in Chinese) [丁志博、姚淑德、王坤、程凯 2006 物理学报 **55** 2977]
- [26] Huang S R, Chen Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4596 (in Chinese) [黄生荣、陈朝 2007 物理学报 **56** 4596]
- [27] Yang Z, Chang B K, Zou J J, Qiao J L, Gao P, Zeng Y P, Li H 2007 *Appl. Opt.* **46** 7035
- [28] 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]
- [29] 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
- [30] Niu J, Yang Z, Chang B K 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 104202
- [31] Niu J, Zhang Y J, Chang B K, Yang Z, Xiong Y J 2009 *Appl. Opt.* **48** 5445
- [32] Zhang Y J, Chang BK, Yang Z, Niu J, Zou J J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4541
- [33] Korotkov R Y, Gregie J M, Wessels B W 2002 *Opto-Electron. Rev.* **10** 243
- [34] Kipshidze G, Kuryatkov V, Borisov B, Kudryavtsev Yu, Asomoza R, Nikishin S, Temkin H 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 2910
- [35] Pankove J. I, Torvik J. T, Qiu C. H, Grzegory I, Porowski S, Quigley P, Martin B 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 416
- [36] Korotkov R Y, Gregie J M, Wessels B W 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 222
- [37] Ploog K, Brandt O 1998 *J. Vac. Sci. Technol. A* **16** 1609
- [38] Wang H B, Liu J P, Niu N H, Shen G D, Zhang S M 2007 *J. Cryst. Growth* **304** 7
- [39] Xing Y H, Han J, Liu J P, Niu N H, Deng J, Li T, Shen G D 2008 *Vacuum* **82** 1
- [40] Wegscheider M, Simbrunner C, Li T, Jakie R, Navarro-Quezada A, Quast M, Sitter H, Bonanni A 2008 *Appl. Surf. Sci.* **255** 731
- [41] Li T, Wang H B, Liu J P, Niu N H, Zhang N G, Xing Y H, Han J, Liu Y, Gao G, Shen G D 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1036 (in Chinese) [李彤、王怀兵、刘建平、牛南辉、张念国、邢艳辉、韩军、刘莹、高国、沈光地 2007 物理学报 **56** 1036]
- [42] Zhang J C, Hao Y, Li P X, Fan L, Feng Q 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1243 (in Chinese) [张进城、郝跃、李培咸、范隆、冯倩 2004 物理学报 **53** 1243]
- [43] Du X Q 2010 *Optics and Optoelectronic Technology* **8** 76 (in Chinese) [杜晓晴 2010 光学与光电技术 **8** 76]
- [44] Bandic Z Z, Bridger P M, Piquette E C, McGill T C 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 3276
- [45] Kumakura K, Makimoto T, Kobayashi N, Hashizume T, Fukui T, Hasegawa H 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 052105
- [46] Machuca F, Sun Y, Liu Z, Ioakeimidi K, Pianetta P, Pease R F W 2000 *J. Vac. Sci. Technol. B* **18** 3042
- [47] 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]
- [48] 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]
- [49] Machuca F, Liu Z, Sun Y, Pianetta P, Spicer W E, Pease R F W 2002 *J. Vac. Sci. Technol. A* **20** 1784
- [50] Smith L L, King S W, Nemanich R J, Davis R. F 1996 *J. Electron. Mater.* **25** 805
- [51] Tracy K M, Mecouch W J, Davis R F 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 3163
- [52] Hunt R W, Vanzettia L, Castroa T, Chen K M, Sorb L, Cohen P I, Gladfelter W, Van Hove J M, Kuznia J N, Asif Khan M, Franciosi A 1993 *Physica B* **185** 415
- [53] Lai Y H, Yeh C T, Hwang J M, Hwang H L, Chen C T, Hung W H 2001 *J. Phys. Chem. B* **105** 10029
- [54] Fisher D G 1974 *IEEE Trans. Electron Devices* **21** 541
- [55] Stocker B J 1975 *Surf. Sci.* **47** 501
- [56] Du X Q 2010 *Acta Opt. Sin.* **37** 385 (in Chinese) [杜晓晴 2010 光学学报 **37** 385]
- [57] Mulhollan G A, Bierman J C U. S. Patent 2009/032222A1 [2009-01-26]
- [58] Zou J J, Chang B K, Du X Q, Chen H L, Wang H, Gao P 2006 *Acta Photon. Sin.* **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]

- [59] Yang Z, Niu J, Qian Y S, Chang B K, Shi F, Zhang Y J, Qiao J L, Xiong Y J, Gao P 2009 *Chin. J. Vac. Sci. Technol.* **29** 669 (in Chinese) [杨智、牛军、钱芸生、常本康、石峰、张益军、乔建良、熊雅娟、高频 2009 真空科学与技术学报 **29** 669]
- [60] Machuca F 2003 *Ph. D. Dissertation* (Stanford: Stanford University) p83
- [61] Wu C I, Kahn A 2000 *Appl. Surf. Sci.* **162** 250
- [62] Qiao J L, Chang B K, Du X Q, Niu J, Zou J J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 855 (in Chinese) [乔建良、常本康、杜晓晴、牛军、邹继军 2010 物理学报 **59** 855]
- [63] Madelung O 1991 *Data in Science and Technology: Semiconductors-Group IV Elements and III-V Compounds* (Berlin: Springer) p5—150
- [64] Wang R Z, Wang B, Wang H, Zhou H, Huang A P, Zhu M K, Yan H, Yan X H 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 2782
- [65] Liu Y Z, Wang Z C, Dong Y Q 1995 *Electronic emission and photocathode* (Beijing: Beijing Institute of Technology Press) p310 (in Chinese) [刘元震、王仲春、董亚强 1995 电子发射与光电阴极 (北京: 北京理工大学出版社) 第 310 页]

Comprehensive Survey for the Frontier Disciplines

Progress of negative electron affinity GaN photocathode*

Fu Xiao-Qian¹⁾²⁾ Chang Ben-Kang^{1)†} Li Biao¹⁾ Wang Xiao-Hui¹⁾ Qiao Jian-Liang¹⁾

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

2) (School of Information Science and Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

(Received 22 May 2010; revised manuscript received 9 July 2010)

Abstract

GaN is becoming a promising material in ultraviolet detection and vacuum electronic source field for its good performance. High quantum efficiencies of greater than 70% and 30% have been achieved for the opaque mode and transparent mode GaN photocathode, respectively. This paper reviews the progress of GaN photocathode in three important fields, including structure design, surface cleaning and Cs/O activation, analyzes the key factors influencing the quantum efficiency, and evaluates the prospect for its development.

Keywords: GaN photocathode, negative electron affinity, quantum efficiency, progress

PACS: 85.60.Ha, 61.72.uj, 61.72.U-, 81.65.-b

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60871012).

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