

穿透型 V 形坑对 GaN 基 p-i-n 结构紫外探测器 反向漏电的影响^{*}

张 爽 赵德刚[†] 刘宗顺 朱建军 张书明 王玉田 段俐宏 刘文宝 江德生 杨 辉

(中国科学院半导体研究所集成光电子国家重点联合实验室, 北京 100083)

(2008 年 7 月 7 日收到, 2009 年 2 月 19 日收到修改稿)

研究了 GaN 基 p-i-n (p-AlGaIn/i-GaN/n-GaN) 结构紫外探测器的漏电机理. 实验发现, 在位错密度几乎相同的情况下, 基于表面有较高密度的 V 形坑缺陷材料制备的器件表现出较高的反向漏电. 进一步的 SEM 测试发现, 这种 V 形坑穿透到有源区 i-GaN, 甚至 n-GaN 层. 在制备 p-AlGaIn 电极时, 许多金属会落在 V 形坑中, 从而与 i-GaN 形成了肖特基接触, 有些甚至直接和 n-GaN 形成欧姆接触. 正是由于并联的肖特基接触和欧姆接触的存在导致了漏电的增加.

关键词: GaN, 紫外探测器, V 形坑, 反向漏电

PACC: 7380E, 7340L

1. 引言

近年来, 具有直接禁带的 GaN 基材料引起人们广泛的关注和研究. 通过引入 Al 或 In 组分, GaN 基材料的禁带宽度可以在很宽的范围内变化(0.7—6.2 eV), 覆盖了近红外到紫外波段, 被称为第三代半导体. 其中, GaN 及 AlGaIn 材料具有 3.4 eV 以上的禁带宽度. 利用 GaN 及 AlGaIn 材料制作的紫外探测器对可见光本征地不产生响应, 从而大幅度地降低了探测器工作时的背景噪声, 使探测器在实际应用中不需要附加滤光片, 简化了探测器的整体结构. 另一方面, GaN 及 AlGaIn 材料紫外探测器通常工作在零偏或较低反向偏压下, 无需额外的电源向它供给高压; 而且利用半导体制造工艺制成的 GaN 及 AlGaIn 紫外探测器体积很小, 易于集成, 因此非常适合制作成轻巧便携的探测设备, 例如紫外探测器焦平面阵列, 并可以进一步制成紫外相机^[1]. GaN 及 AlGaIn 紫外探测器可以采用不同的结构, 如光电导型探测器^[2], p-i-n 型探测器^[3-5], Schottky 型探测器^[6,7], MSM 型探测器^[8]等. 采用 GaN 及 AlGaIn 材料制作的紫外探测器在火箭羽烟探测、燃烧控制、火焰

预警以及天文和生物等方面都具有广泛的应用前景.

在实际工作中, 紫外探测器的噪声是影响器件性能的一个重要因素, 它决定了器件的噪声等效功率, 进一步影响到器件的探测灵敏度. 在 GaN 基紫外探测器中, 反向漏电流(leakage current)是一个非常重要的噪声来源. 为了抑制噪声, 改善探测器的性能, 必须深入理解和研究 GaN 基紫外探测器的漏电机理. 造成反向漏电的因素很多, 其中一个重要的漏电通道是 GaN 基器件中的位错^[9]. 器件制作的工艺过程中对 GaN 基材料进行的干法刻蚀会对平台侧壁造成损伤, 也会引起漏电^[10]. 本文对 GaN 基 p-i-n (p-AlGaIn/i-GaN/n-GaN) 结构紫外探测器的漏电机理进行了研究. 实验发现, 在 p-AlGaIn 层表面存在穿透型 V 形坑, 其深度超过表层单一组分材料, 并且穿透型 V 形坑的密度与探测器的漏电强度之间存在密切关系. 文中分析了穿透型 V 形坑引发漏电的物理机理, 这一机理对于认识 GaN 基紫外探测器中的漏电因素、进一步抑制器件中的漏电具有重要意义.

2. 实验方法

本文所研究的探测器器件结构为 p-i-n (p-

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60776047, 60506001, 60476021, 60576003, 60836003)资助的课题.

[†] E-mail: dgzhao@red.semi.ac.cn

AlGaIn/i-GaN/n-GaN)结构,其材料采用金属-有机物化学气相淀积(MOCVD)方法制成.具体材料生长过程如下:在蓝宝石衬底上生长一薄层低温 GaN 缓冲层,在其上生长 3 μm 载流子浓度为 $\sim 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 Si 掺杂 n-GaN 层,随后生长一层 0.4 μm 非故意掺杂的 i-GaN(弱 n 型),其 n 型载流子浓度约为 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,最后生长 0.1 μm 载流子浓度为 $\sim 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的 Mg 掺杂 p-AlGaIn 层,其 Al 组分为 10%.在生长过程中,我们固定了 n-GaN 层和 i-GaN 层的生长条件,通过调节 p-AlGaIn 生长过程中的 V/III 比、反应室压力等参数生长出两个样品 A 和 B,它们的分层结构相同.

利用上述 A、B 两种样品分别制作 p-i-n 结构紫外探测器,工艺步骤完全相同.工艺流程包括:采用感应耦合等离子体(ICP)刻蚀方法刻蚀出器件台面,刻蚀深度为 0.7 μm,以露出高浓度 n 型掺杂 GaN 材料.采用等离子体增强化学气相淀积(PECVD)方法生长一层厚度为 350 nm 的 SiO₂ 薄膜,作为台面侧壁的钝化膜,光刻后腐蚀并露出光敏面和 n 型接触区域.利用电子束蒸发蒸镀 Ni/Au(5 nm/5 nm)薄膜并进行金属剥离(lift-off),而后在氮气和氧气混合气氛中于 500 ℃ 下快速热退火 5 min,在光敏面上形成 p 型欧姆电极.最后用电子束蒸发蒸镀 Ti/Al/Ti/Au(15 nm/250 nm/50 nm/150 nm)薄膜并进行金属剥离,形成 p 型欧姆电极上的压焊电极和 n 型欧姆电极.器件分层结构如图 1 中所示,有效光敏面积为 1.24 mm².

3. 实验结果和讨论

用样品 A 和 B 分别制成的 A、B 两组 p-i-n 紫外

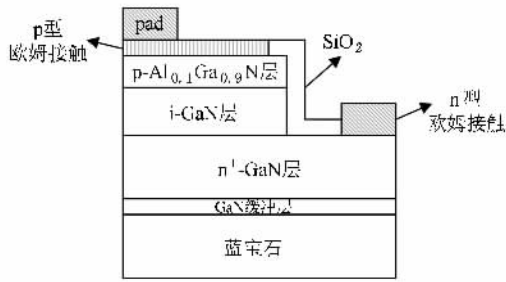


图 1 GaN 基紫外探测器器件结构剖面图

探测器,其 I - V 特性如图 2 所示.

从图中可以看出,尽管采用了同样的工艺流程,A、B 两组器件的反向漏电流存在很大差异.A 组中测试的 4 个器件反向电流随偏压增大上升得很快,相比 B 组的 4 个器件,反向漏电流强度大了两个量级以上.在 10 V 反向偏压下,A 组器件的平均漏电流密度为 $5.66 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$,而 B 组器件的平均漏电流为 $4.96 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$.此外,两组器件的正向开启电压都在 1 V 左右,与文献中^[11]报道的 GaN 基 p-i-n 结构的器件相比偏小.

如前所述,较大的位错密度是导致器件漏电增加的一个重要因素,但是在 A 和 B 两个样品生长的过程中,除了 p-AlGaIn 生长条件变化以外,其他生长条件完全相同.也就是说,这两个样品 i-GaN 层中的位错密度基本相同,而且它们的工艺制作过程也完全相同.这样就排除了位错密度或工艺制作造成的漏电强度的变化,说明器件中还存在其他的漏电通道.我们利用扫描电子显微镜(SEM)观测 A、B 两种样品,发现在它们的表面存在不同密度的 V 形坑,观测结果如图 3 中所示.

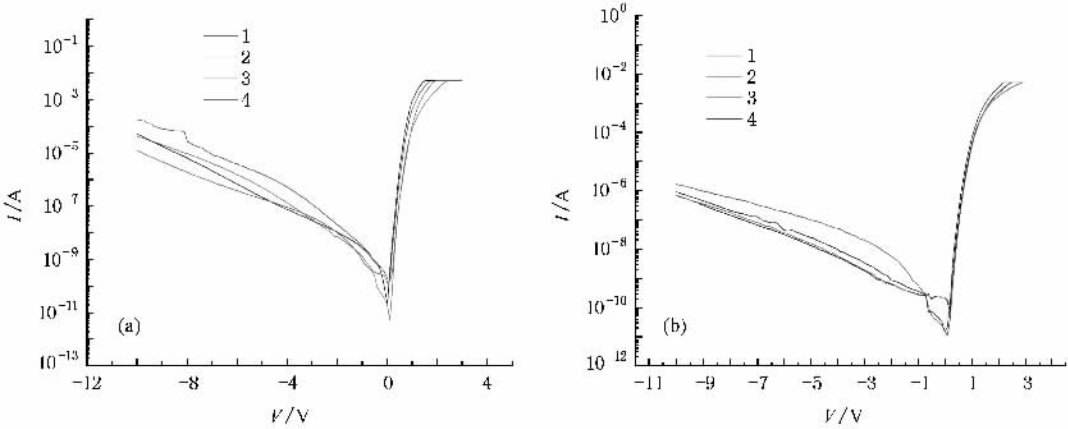


图 2 A、B 两组紫外探测器的 I - V 特性曲线图 (a)A 组 (b)B 组

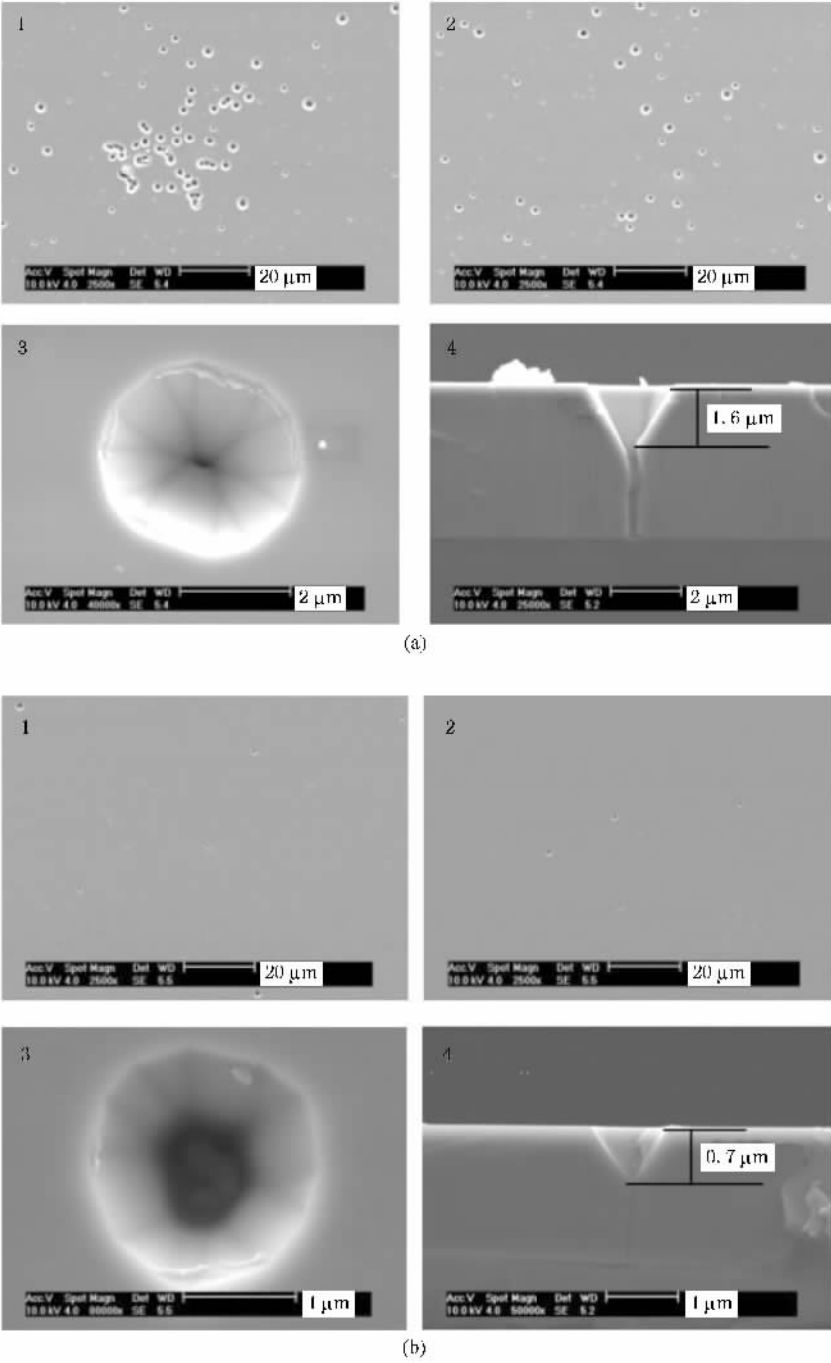


图 3 *A* (a), *B* (b) 两种样品表面 V 形坑密度(1, 2)及形貌(3, 4)的 SEM 图像

图 3 中左侧一列是分别在 *A*, *B* 两个样品表面各取两个典型区域获得的显示表面 V 形坑密度的图像, 右侧一列则是其放大后的典型形貌和截面图. 可以看到, 在 *B* 样品表面 V 形坑较稀疏, 典型尺寸也较小. 而 *A* 样品表面布满 V 形坑, 最大的 V 形坑直径在 $2\text{ }\mu\text{m}$ 以上. 截面图还显示出两个样品中 V 形坑的深度都达到了 $0.7\text{ }\mu\text{m}$ 以上. 由于样品中 $\text{p-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 和 i-GaN 两层的总厚度约为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$, 深达 0.7

μm 的 V 形坑已经穿透了这两层材料, 进而扩展到了 n-GaN 层中. 我们将这种深度超过表层单一组分材料的 V 形坑称为穿透型 V 形坑. 此外, 在截面图中还可以发现, 两个样品中的 V 形坑都呈漏斗形, 在坑的底部存在一个狭长的通道, 深入到样品内部. 在 *A* 样品穿透型 V 形坑的截面图中可以清晰的看到, 该通道穿透了整个外延层, 一直延伸到 GaN 缓冲层. 由于这两个器件除了表面 V 形坑的密度有明

显的差异外并无不同,并且 V 形坑密度较大的样品 A 具有更大的漏电强度,可以推想,V 形坑和器件的漏电流之间有内在的密切联系.

为了理解 V 形坑对器件漏电流的影响,我们对器件中表面 V 形坑的作用机理建立了物理模型.根据 SEM 图像所显示的 V 形坑形貌,当表面存在穿透型 V 形坑时,在电子束蒸发 Ni/Au 金属电极的时候,穿透型 V 形坑中 Ni/Au 电极就会与非表层材料接触,如图 4 所示.

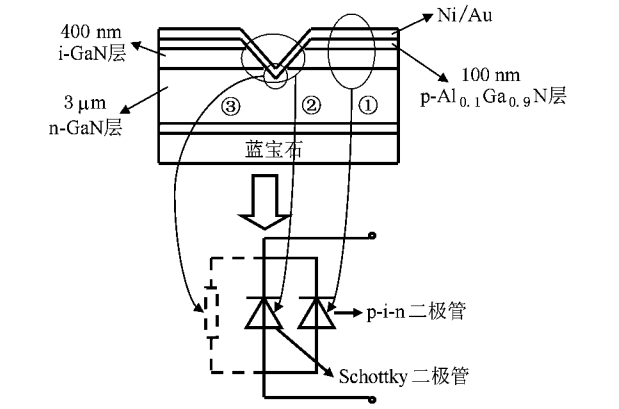


图 4 穿透型 V 形坑处 Ni/Au 金属电极与材料表面接触的物理模型

在图 4 中①所示的曲线围绕的椭圆形区域内,Ni/Au 电极覆盖在表层的 p 型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 层上,在退火后形成 p 型欧姆接触,与 i 型以及 n 型 GaN 层共同构成一个 p-i-n 结.而在②所示的曲线围绕的椭圆形区域内,由于穿透型 V 形坑的存在,Ni/Au 电极直接与 i 型以及 n^+ -GaN 层接触,在退火后界面处将会形成 Schottky 接触^[12].其中在③所示的曲线围绕的椭圆形区域内,也就是 Ni/Au 电极与 n^+ -GaN 层接触的部分,由于 n^+ -GaN 层中载流子浓度很高,Schottky 势垒相应降低并减薄,在一定反向偏压的情况下甚至可能穿通,成为一个并联的漏电通道,如图 4 中虚线所示,使漏电流迅速增强.此外,由于 Schottky 势垒高度与 p-i-n 结势垒高度相比更小,暗电流更容易通过 Schottky 势垒泄漏,即使有些穿透型 V 形坑深度较小,没有穿透到 n^+ -GaN 层,Ni/Au 电极与 i-GaN 层接触形成的 Schottky 结也会成为整个器件中漏电流相对较大的区域,从而进一步增大漏电流密度.

由此可见,每一个穿透型 V 形坑都会给器件带来额外的漏电,穿透型 V 形坑的密度越大,器件的反向漏电流就越强.

对样品表面穿透型 V 形坑密度的统计也表明

了它与紫外探测器的反向漏电流之间具有的对应关系,如表 1 所示.

表 1 穿透型 V 形坑密度与 -5 V 偏置和 -10 V 偏置下暗电流的对应关系

样品	穿透型 V 形坑 密度/ cm^{-2}	-5 V 偏置下暗电 流密度(A/cm^2)	-10 V 偏置下暗电 流密度(A/cm^2)
A	3.0×10^6	$1 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2} \sim 9 \times 10^{-1}$
B	1.0×10^5	$2 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-2}$

表 1 中穿透型 V 形坑密度是由 SEM 图像中显示的 V 形坑数目和取样面积计算得到的.从表 1 中可以看出,A 样品表面的穿透型 V 形坑密度比 B 样品大一个量级.相应地,A 组器件在 -5 V 和 -10 V 偏置下的暗电流密度也分别比 B 组器件平均大一个量级.

从图 2 中可以看出,当电流较小时,A,B 两组器件的正向电流与电压成 e 指数关系,可以用下式表示^[13]:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) - 1 \right],$$

其中 I_0 为饱和电流, n 为理想因子, E_a 为激活能.利用上式对 A,B 两组器件的正向电流-电压曲线进行拟合,分别得到 A 组器件的平均饱和电流为 6×10^{-5} A,平均理想因子为 1.51,平均激活能为 0.38 eV;B 组器件的平均饱和电流为 1×10^{-6} A,平均理想因子为 1.51,平均激活能为 0.37 eV.从以上数据可以看出,理想因子在 1 和 2 之间,说明正向电流中存在一部分产生-复合电流分量.而与位于 GaN 禁带中部的深能级中心(激活能约为 1.5 eV)相比^[14],穿透型 V 形坑引入的激活能在 0.38 eV 左右,载流子更容易通过穿透型 V 形坑在空间电荷区中发生复合.A 组器件中 V 形坑的密度更大,大量的漏电通道减弱了平均势垒高度,使载流子更容易渡越势垒层,引入了相对较大的饱和电流.

此外,我们还可以通过 A 组和 B 组器件的平均反向暗电流来量化地估算单个穿透型 V 形坑对器件反向暗电流的影响.根据上文所建立的模型,通过器件的反向暗电流应包括两个部分,一部分是 p-i-n 结所产生的饱和电流和漏电流之和 I_{pin} ,另一部分是器件表面所有穿透型 V 形坑产生的漏电流总量,假定在特定样品中,每个穿透型 V 形坑对这部分漏电流的贡献是相同的,那么由于各个穿透型 V 形坑之间是并联关系,这部分电流就与器件表面穿透型 V

形坑的数量成正比关系.这样,通过器件 A 和器件 B 的反响暗电流就可以表示为

$$I_A = I_{\text{pin}A} + n_A \times I_{\text{single}A}, \tag{1}$$

$$I_B = I_{\text{pin}B} + n_B \times I_{\text{single}B}, \tag{2}$$

其中, I_{pin} 为 p-i-n 结所产生的饱和电流和漏电流之和, n_A, n_B 分别为 A, B 两种器件中单个器件表面穿透型 V 形坑的个数, $I_{\text{single}A}, I_{\text{single}B}$ 则分别表示 A, B 两组器件中每个穿透型 V 形坑产生的平均反向暗电流, $n \times I_{\text{single}}$ 就是器件表面所有穿透型 V 形坑产生的漏电流总量. p-i-n 结所产生的饱和电流和漏电流比穿透型 V 形坑造成的漏电流小 4—5 个量级,因此在计算中可以忽略.而单个器件表面穿透型 V 形坑的个数可以表示为

$$n = \rho \times S, \tag{3}$$

其中 ρ 为表 1 中列出的样品表面穿透型 V 形坑的密度, S 为单个器件的面积.利用 (1)(2)(3) 式及表 1 中的数据,从图 2 可以得出器件 A 和器件 B 中每个穿透型 V 形坑所产生的平均反向暗电流 $I_{\text{single}A}, I_{\text{single}B}$, 如图 5 所示.在计算过程中分别采用 A, B 两组器件反向暗电流的平均值曲线作为 I_A, I_B , 以使获得的结果具有更好的普遍性.

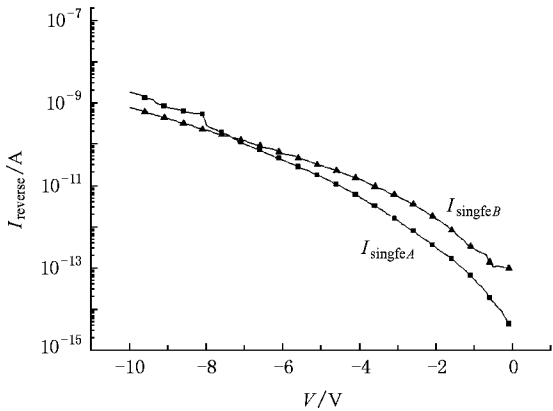


图 5 A, B 两组器件中每个穿透型 V 形坑所产生的平均反向暗电流

从图 5 中可以看出,在 A, B 两组器件中,每个穿透型 V 形坑所产生的平均反向暗电流在 -5 V 下达到了 10^{-11} A 的量级,并且都呈现出不饱和的形态,即它们随着反向偏压的升高明显增大.这说明穿透型 V 形坑符合漏电通道的特征,并且具有一定的并联电阻特性.进一步的分析发现, $I_{\text{single}A}$ 与 $I_{\text{single}B}$ 相比,随着电压升高增加得更快,曲线斜率较大,即样品 A 中穿透型 V 形坑的平均反向动态电阻较小.这

种差异的原因与样品 A, B 表面穿透型 V 形坑不同的尺寸分布有关.结合图 3 中样品 A, B 表面的 V 形坑形貌可以发现,样品 B 表面的 V 形坑大都尺寸较小,只有少数大尺寸 V 形坑;而样品 A 表面大尺寸 V 形坑占总 V 形坑数量的比例较大.根据上文中的物理模型,大尺寸 V 形坑引入的并联 Schottky 结的影响与小尺寸 V 形坑相当,但由于其中金属电极和 $\text{n}^+ \text{-GaN}$ 材料的接触面积更大,因此引入的并联电阻更小.与反向 Schottky 结和大的并联电阻相比,漏电流倾向于从较小的并联电阻处通过,因此,样品 A 表面比例较大的大尺寸 V 形坑,在 V 形坑造成的漏电流总量中引入了比例较大的并联电阻漏电流,使平均到每个穿透型 V 形坑中的反向暗电流随电压变化得更快.这与图 5 所示样品 A 中穿透型 V 形坑的反向动态电阻较小是一致的,说明器件 A 由穿透型 V 形坑引发的总漏电流中,并联电阻造成的漏电流所占比例较大.综合上述分析可知,单个穿透型 V 形坑引发的漏电流不仅具有不饱和特性,而且不饱和的程度与穿透型 V 形坑的尺寸有关.大尺寸的穿透型 V 形坑造成的漏电流随着反向偏压的增大增长得更快.

穿透型 V 形坑密度与紫外探测器漏电之间存在的这种对应关系,说明穿透型 V 形坑是造成器件漏电的重要因素.减小穿透型 V 形坑密度和尺寸能够显著地减小器件的反向漏电,改善器件性能.

此外,根据图 4 所示的物理模型,在正向偏置的时候,由于 Schottky 势垒低于 p-i-n 结势垒, Schottky 结先于 p-i-n 结导通.因此在较低的电压下,正向电流就会通过穿透型 V 形坑处的 Schottky 结迅速增大.相应的,图 2 中 I - V 曲线具有 1 V 左右的开启电压.这一数值虽然并不符合 p-i-n 结的 I - V 特性规律,但是和 Schottky 结的开启电压相符合,也进一步证明了本文提出的 V 形坑增加器件漏电的物理模型的合理性.

4. 结 论

我们制作并测试了两组可比较的 GaN 基紫外探测器,它们的漏电强度存在量级上的差别.表面及截面扫描电子显微镜图像显示,两种材料表面都存在穿透型 V 形坑,但 V 形坑的密度不同.表面存在较高密度穿透型 V 形坑的材料,制作出的器件漏电强度明显偏大.穿透型 V 形坑的密度与器件漏电强

度密切相关. 研究表明, 穿透型 V 形坑是引发器件漏电的重要因素. 为了抑制漏电, 在材料生长中

应调整生长条件, 尽量避免穿透型 V 形坑的出现.

- [1] Khan M A , Kuznia J N , Olason D T , Van Hove J M , Blasingame M , Reitz L F 1992 *Appl. Phys. Lett.* **60** 2917
- [2] McClintock R , Mayes K , Yasan A , Shiell D , Kung P , Razeghi M 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 011117
- [3] Walker D , Saxler A , Kung P , Zhang X , Hamilton M , Diaz J , Razeghi M 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 25
- [4] Li T , Beck A L , Collins C , Dupuis R D , Campbell J C , Carrano J C , Schurman M J , Ferguson I A 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 16
- [5] Kuryatkov V V , Borisov B A , Nikishin S A , Kudryavtsev Y , Asomoza R , Kuchinskii V I , Sokolovskii G S , Song D Y , Holtz M 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 096104
- [6] Motayed A , Sharma A , Jones A K , Derenge M A , Iliadis A A , Mohammad S N 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 6
- [7] Sheu J K , Lee M L , Tun C J , Lin S W 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 043506
- [8] Xu H Z , Wang Z G , Kawabe M , Harrison I , Ansell B J , Foxon C T 2000 *J. Crystal Growth* **218** 1
- [9] Zhang H , Miller E J , Yu E T 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 023703
- [10] Fang Z Q , Look D C , Wang X L , Han J , Khan F A , Adesida I 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 10
- [11] Irokawa Y , Luo B , Kim J , LaRoche J R , Ren F , Baik K H , Pearton S J , Pan C C , Chen G T , Chyi J I , Park S S , Park Y J 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 11
- [12] Chuanxin Lian , Huili (Grace) Xing 2001 *Appl. Phys. Lett.* **88** 022112
- [13] Irokawa Y , Luo B , Kim J , LaRoche J R , Ren F 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 2271
- [14] Sah C T , Noyce R N , Schockley W 1957 *Proc. IRE* **45** 1228

Influence of penetrating V-pits on leakage current of GaN based p-i-n UV detector^{*}

Zhang Shuang Zhao De-Gang[†] Liu Zong-Shun Zhu Jian-Jun Zhang Shu-Ming Wang Yu-Tian

Duan Li-Hong Liu Wen-Bao Jiang De-Sheng Yang Hui

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics , Institute of Semiconductors ,
Chinese Academy of Sciences , Beijing 100083 , China)

(Received 7 July 2008 ; revised manuscript received 19 February 2009)

Abstract

The leakage mechanism of GaN-based p-i-n (p-AlGaN/i-GaN/n-GaN) UV detector has been investigated. With the same dislocation density , devices made from material with higher density of V-pits on surface produce larger leakage current. SEM images show that some V-pits penetrate into i-GaN layer , sometimes even the n-GaN layer. If p-ohmic contact metal (Ni/Au) deposits in the V-pits , Schottky contact would be formed at the interface of metal and i-GaN , or form ohmic contact at the interface of metal and n-GaN. The existence of parallel Schottky junction and ohmic contact resistance enhances the leakage current greatly.

Keywords : GaN , UV detector , V-pits , leakage current

PACC : 7380E , 7340L

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60776047 , 60506001 , 60476021 , 60576003 , 60836003).

[†] E-mail : dgzhao@red.semi.ac.cn