

AlGaIn/GaN 异质结 Ni/Au 肖特基表面处理 及退火研究*

王 冲 冯 倩 郝 跃 万 辉

(西安电子科技大学微电子研究所,西安 710071)

(宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室,西安 710071)

(2006 年 2 月 17 日收到,2006 年 2 月 28 日收到修改稿)

采用 O_2 等离子体及 HF 溶液对 AlGaIn/GaN 异质结材料进行表面处理后, Ni/Au 肖特基接触特性比未处理有了明显改善,反向泄漏电流减小 3 个数量级.对制备的肖特基接触进行 200—600℃ 5min 的 N_2 气氛退火,发现退火冷却后肖特基反向泄漏电流随退火温度增大进一步减小. N_2 气中 600℃ 退火后肖特基二极管 $C-V$ 特性曲线在不同频率下一致性变好,这表明退火中 Ni 向材料表面扩散减小了表面缺陷密度; $C-V$ 特性曲线随退火温度增大向右移动,从二维电子气耗尽电压绝对值减小反映了肖特基势垒的提高.

关键词: AlGaIn/GaN, 肖特基接触, 表面处理, 退火

PACC: 7340N, 7360L, 7330

1. 引 言

基于 AlGaIn/GaN 异质结的高电子迁移率晶体管 (HEMT) 在高温器件及大功率微波器件方面有非常好的应用前景^[1]. 肖特基栅质量好是 AlGaIn/GaN HEMT 特性的决定性因素之一, 栅泄漏电流是低频噪声的主要来源^[2], 栅反向击穿电压决定着器件的工作电压和功率容限^[3]. 为了降低肖特基栅的反向漏电以及提高栅反向击穿电压, 需要在 AlGaIn/GaN 异质结构上制作高质量的肖特基接触. Ni/Au 金属体系经过国内外大量研究结果证明能在 AlGaIn/GaN 异质结上形成很好的肖特基接触. 对于不同的肖特基表面处理得到的肖特基接触性能差异很大^[4]. 国际上对表面处理和退火对肖特基特性提高的报道较多^[5,6], 而国内还未见报道. 本文研究了氧等离子体表面处理方法和 N_2 气氛热退火对于 AlGaIn/GaN 异质结构肖特基接触的影响, 得到了提高肖特基特性的有效表面处理方法和最佳退火条件, 这将为研制出高性能 AlGaIn/GaN HEMT 提供有益的工艺参考.

2. 实 验

采用 MOCVD 方法在蓝宝石衬底基片 (0001) 面上外延生长了 AlGaIn/GaN 异质结二维电子气 (2DEG) 材料. 蓝宝石衬底厚度为 330 μm , 材料层结构由下而上依次为 850nm 未掺杂 GaN 外延层, 5nm 未掺杂 AlGaIn 隔离层, 12nm Si 掺杂 AlGaIn 层 (Si 掺杂浓度 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$), 6nm 未掺杂 AlGaIn 帽层. PL 谱测量后计算得到的 AlGaIn 层 Al 组分为 27% ($Al_{0.27}Ga_{0.73}N$). Hall 效应测量显示, 室温下蓝宝石衬底上生长的材料电子迁移率 μ 和 2DEG 浓度分别为 $1028 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 和 $1.6 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$.

肖特基 $C-V$ 测试结构内外环直径分别为 120 μm 和 200 μm . 欧姆接触采用电子束蒸发 Ti/Al/Ni/Au (30nm/180nm/40nm/60nm) 830℃ N_2 中退火 30s, 肖特基接触采用电子束蒸发 Ni/Au (30nm/200nm) 样品表面未采用介质钝化. 采用感应耦合等离子体 (ICP) 在 400W 上电极功率下对即将蒸发肖特基金属的 AlGaIn/GaN 异质结表面进行 O_2 等离子体处理, 处理时反应室压力在 $3 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 以下从而保证不引入新

* 重大科技预研项目 (批准号: 41308060106), 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 批准号: 2002CB3119 资助的课题.

杂质.采用 RTP-500 热退火炉对器件进行 N_2 中加温,退火后的测试均在样品完全冷却后进行.肖特基二极管直流和 $C-V$ 特性采用 Agilent-B1500A 精密半导体参数测试仪测量.由于退火实验具有一定程度的破坏性,选取了在同一个蓝宝石衬底上一次流片而成的多个肖特基二极管按不同退火条件分批测量.取退火后每批器件中泄漏电流最小的曲线作对比.采用 ULTRA X 射线光电子能谱仪(XPS)分析材料表面成分,GSM-6360 扫描电子显微镜(SEM)观察了表面污染和退火形貌.

3. 结果及其讨论

AlGaIn/GaN 异质结材料的表面状况对肖特基接触的性能有非常大的影响.表面形成的自然氧化层、C 的玷污使金属和半导体不能形成紧密接触,造成肖特基理想因子变大,势垒高度降低,泄漏电流增大^[7].AlGaIn/GaN 异质结材料不可避免会暴露于空气中,为了确认表面氧化层的存在,我们首先对 AlGaIn/GaN 异质结材料进行了 XPS 图谱测量,采用 Al 靶做主激发源,X 射线能量为 1460eV.从图 1 可以看出被 X 射线激发出的各元素不同壳层的光电子能谱,除了 Al,Ga,N 的峰比较明显外,还有 C 峰和 O 峰比较明显.对样品进行 Ar 离子轰击表面 5min,大约剥离了表面一个原子层后再次进行 XPS 图谱测量发现,C 峰消失而 O 峰依然存在,这说明 C 元素主要由表面有机污染所致,而 O 原子已经和 Al,Ga 形成了化学键.材料生长中可能存在 O 污染,但 O 杂质的密度不可能达到和 Al,Ga,N 同样的数量级,否则材料也不会有很好的光学和电学特性,所以 O 原子的主要来源是空气中的氧化.在工艺中不可避免地存在一些污染,如材料清洗效果不理想,显影后未完全去除的光刻胶薄层或引入的杂质等,这些都会对肖特基特性产生影响.图 2 为采用 SEM 观测到的光刻显影完后将要淀积肖特基金属区域,可以看出表面部分区域有玷污或残留物,未处理干净的物质会使肖特基特性恶化.

由于 AlGaIn/GaN 异质结界面势垒的存在,这使得肖特基二极管等效结构很复杂,不像体材料那样仅有金-半接触界面势垒,而且 AlGaIn 中的掺杂会产生隧道效应,所以在 AlGaIn/GaN 异质结上制备的肖特基接触势垒高度和理想因子很难采用 $C-V$ 或 $I-V$ 测量而准确计算得出.肖特基反向泄漏电流决定了

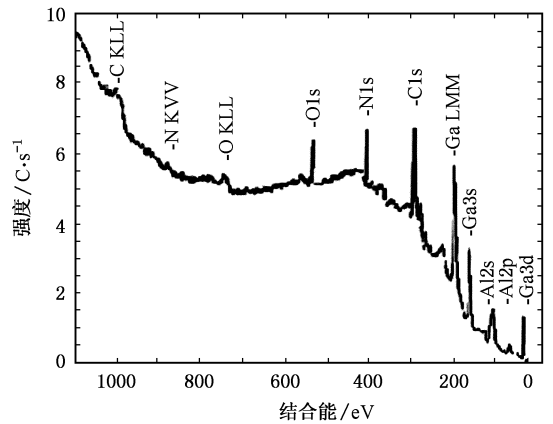


图 1 未经处理 AlGaIn/GaN 材料表面 XPS 图谱

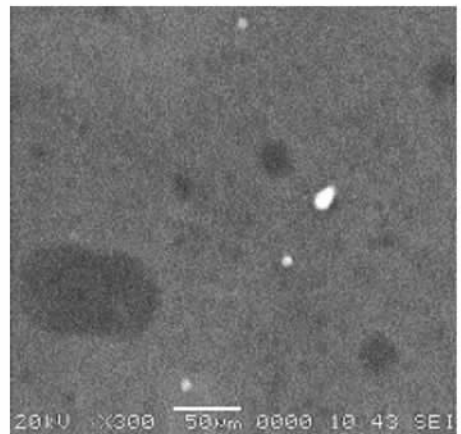


图 2 未经处理 AlGaIn/GaN 材料表面 SEM 图

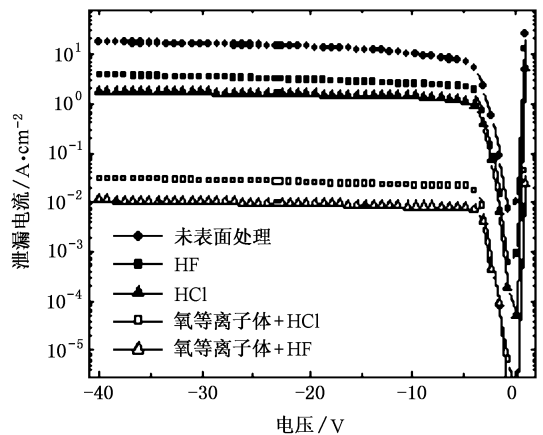


图 3 不同表面处理的肖特基反向漏电流对比

二极管的击穿特性,因而我们根据二极管的反向泄漏电流的大小来衡量 AlGaIn/GaN 异质结上的肖特基性能的优劣.碰撞电离、隧道效应和表面空穴导电等

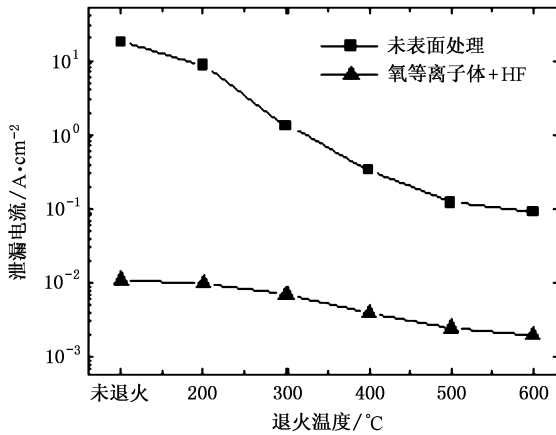


图4 肖特基反向漏电在不同温度退火后的变化

机理都影响着 AlGaIn/GaN 异质结肖特基反向泄漏电流^[8],对这些机理的研究还有待深入。

经过 HCl 或 HF 表面处理后的肖特基反向漏电比未处理减小近 1 个数量级,经过 O₂ 等离子体处理后再进行 HF 处理,肖特基反向漏电比未处理减小 3 个数量级,如图 3 所示。O₂ 等离子体处理能减小接触表面残留的光刻胶薄膜和未清洗干净的杂质玷污对肖特基特性的影响,同时也去除了酸处理氧化层时的阻碍层,这也使得 HCl 或 HF 对氧化层的去除效果更好。图 4 所示为未经表面处理和表面处理效果最好的 O₂ 等离子体 + HF 的肖特基反向漏电分别在 200—600°C 退火 5 min 后的变化趋势。未经表面处理的肖特基反向漏电随退火温度的升高减小较明显,600°C 退火后减小了 2 个数量级,而 O₂ 等离子体 + HF 处理的肖特基反向漏电流随退火温度的升高减小不多,在 600°C 退火后减小不到 1 个数量级。本文认为未经表面处理的肖特基在退火后反向漏电减小较明显的原因是退火中 Ni 向 AlGaIn 表面扩散穿透了材料表面未处理的介质层,同时材料表面氧原子会扩散到金属中,改善了接触质量,并且随退火温度升高金-半接触改善更为明显。而 O₂ 等离子体 + HF 的处理已经形成了较好的金属-AlGaIn 表面接触,所以随退火温度的升高肖特基反向漏电减小不明显。

肖特基二极管在较低频率测量 C-V 特性时,表面陷阱的俘获和释放会对 C-V 测量产生影响,使得不同频率下测量得到的 C-V 曲线一致性变差^[9]。AlGaIn/GaN 异质结材料存在表面陷阱,退火过程中 Ni 向 AlGaIn 层逐渐扩散能够填充 AlGaIn 表面的陷阱,使金-半接触性能改善,从而减小肖特基反向泄

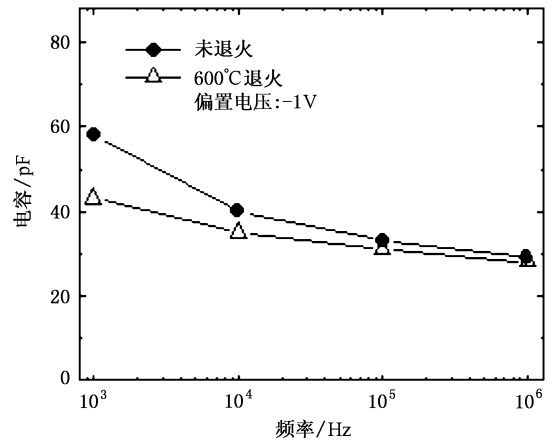


图5 相同偏置电压不同频率下的 C-V 电容值比较

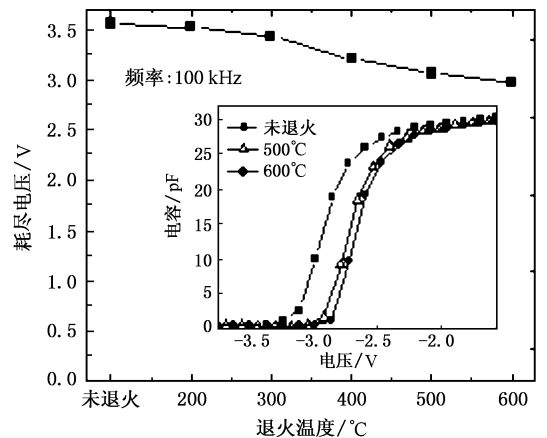


图6 退火后肖特基 C-V 曲线耗尽电压变化趋势

漏电流。我们可以从退火前后不同频率下肖特基 C-V 曲线的一致性变化反映退火对表面陷阱的影响。其中 C-V 测试采用 1kHz 到 1MHz 的不同频率,电压偏置为 -1V 时电容和电导的变化来反应表面陷阱的变化(选择电压偏置为 -1V 是因为,该偏压下 2DEG 未耗尽,表面陷阱的影响较明显而材料内部的陷阱影响较弱)。从图 5 可以看出 600°C 退火后材料在相同偏置电压、不同频率下 C-V 电容值的一致性变好,表明退火后表面陷阱密度减小。对比 C-V 曲线退火前后一致性的变化,采用 O₂ 等离子体 + HF 表面处理的材料具有较理想表面状况,更有利于研究退火中 Ni 的扩散对材料表面陷阱的影响。

采用 C-V 测量 2DEG 密度的变化能反映退火对 AlGaIn/GaN 异质结 Ni/Au 肖特基特性的改善。2DEG 密度与肖特基势垒高度关系如下^[10]：

$$N_{S2D} = \sigma_{\text{pol}}/q - (\epsilon_0 \epsilon_1 / dq^2) \{ q\Phi_B - \Delta E_c \} + N_D (d - d_i)^2 / 2d,$$

其中 N_{s2D} 为 2DEG 密度, σ_{pol} 为极化电荷, q 为电子电量, ϵ_0 和 ϵ_1 分别为空气和 AlGaIn 的介电常数, $q\Phi_B$ 为肖特基势垒高度, ΔE_C 为导带不连续性, N_D 为 AlGaIn 掺杂浓度, d 和 d_i 分别为 AlGaIn 层总厚度和空间隔离层的厚度. 从上式看出, 提高势垒高度会减小 2DEG 密度. 在 $C-V$ 测量中所加的反向偏压较小时出现一个电容平台, 随着反向偏压的增大 2DEG 被耗尽后电容变得很小, 这里我们采用: 当 $C-V$ 曲线由高变低时所加的电压为 2DEG 耗尽电压. 从图 6 可以看出, 2DEG 的耗尽电压绝对值随退火温度增大而变小, 即表明 2DEG 密度的减小. 而图 6 内的插图为 $C-V$ 曲线在 500°C 和 600°C 退火后与未退火的曲线比较, 由图看出提高退火温度使曲线向右移动, 根据传输线模型测试计算得到退火后材料方块电阻和欧姆接触电阻未发生变化, 而退火后 $C-V$ 曲线的右移即耗尽电压的减小应归结为肖特基势垒高度的提高. 通过对退火后肖特基金属形貌 SEM 观察, 发现 600°C 退火后表面有少量起泡现象而 500°C 未出现. 根据图 4 和图 6 的插图可以看出当退火温度从 500°C 提高到 600°C 时, 肖特基特性未发生明显改善, 所以采用 500°C N_2 中退火 5min 不但能使肖特基特性得到较大改善而且表面形貌也很好.

4. 结 论

采用 XPS 和 SEM 分析了 AlGaIn/GaN 异质结表面, 发现了氧化层和有机物玷污的存在. O_2 等离子体及 HF 溶液对 AlGaIn/GaN 异质结表面进行处理后, Ni/Au 肖特基接触特性比未处理有了明显改善, 反向泄漏电流减小 3 个数量级, 因而表面处理方法明显改善了肖特基接触性能. 对采用表面处理和未采用表面处理的材料进行 200—600°C 退火 5min 后发现, 未经处理的肖特基在退火后反向漏电减小更明显, 这是由于 Ni 向 AlGaIn 表面扩散改善了未经表面处理的肖特基接触质量; 而采用 O_2 等离子体 + HF 对表面进行处理的材料已有较好的肖特基接触性能, 所以退火后改善不明显. 600°C 退火后肖特基二极管在不同频率下测得的 $C-V$ 曲线一致性变好, 表明退火中 Ni 对 AlGaIn 表面的陷阱的填充减小了陷阱密度, 而退火后肖特基二极管 $C-V$ 特性曲线随退火温度增大向右移动(即二维电子气耗尽电压绝对值的减小)证实了肖特基势垒的提高. 但是 600°C 退火后肖特基金属表面会有少量起泡现象, 因而采用 500°C N_2 退火 5min 既能达到较好的退火效果而且保证表面形貌平整.

- [1] Trew R J, Shin M W, Gatto V 1997 *Solid-state Electronics* **41** 1561
 [2] Rumyantsev S L, Pala N, Shur M S *et al* 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 6726
 [3] Tan W S, Houston P A, Parbrook P J *et al* 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 3207
 [4] Bradley S T, Goss S H, Hwang J *et al* 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 1
 [5] Takuma Nanjo, Naruhisa Miura, Toshiyuki Oishi *et al* 2004 *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** 1925
 [6] Naruhisa Miura, Toshiyuki Oishi, Takuma Nanjo *et al* 2004 *IEEE*

Trans Electron. Device. **51** 58

- [7] Bradley S T, Goss S H, Hwang J *et al* 2004 *J. Appl. Phys.* **85** 1368
 [8] Arulkumaran S, Egawa T, Ishikawa H *et al* 2003 *Appl Phys Lett.* **80** 3207
 [9] Miller E J, Dang X Z, Wieder H H *et al* 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 8070
 [10] Zhang J F, Zhang J C, Hao Y 2004 *Chinese Physics* **13** 1334

Effect of pre-metallization processing and annealing on Ni/Au Schottky contacts in AlGaIn/GaN heterostructures^{*}

Wang Chong Feng Qian Hao Yue Wan Hui

(*The Institute of Microelectronics , Xidian University , Xi'an 710071 , China*)

(*Key Lab of Ministry of Education for Wide Band gap Semiconductor Materials and Devices , Xi'an 710071 , China*)

(Received 17 February 2006 ; revised manuscript received 28 February 2006)

Abstract

After pre-metallization processing of AlGaIn/GaN heterostructure with O₂ plasma and HF solution , the Ni/Au Schottky contact characteristics were improved obviously and reverse leakage current reduced by three orders. In addition , annealing experiments were carried out at 200—600°C for 5min in N₂ atmosphere on many batches of Schottky diodes , the reverse leakage current decreased further with annealing temperature increasing. Especially after annealing at 600°C for 5min in N₂ atmosphere , the better uniformity of *C-V* characteristics at different frequencies indicated that surface trap density was reduced when Ni diffused to AlGaIn/GaN surface during annealing. On the other hand , the *C-V* curves moved to the right and the reduction of absolute value of 2D electron gas depletion voltage proved that the Schottky barrier height was elevated when the annealing temperature increased.

Keywords : AlGaIn/GaN , Schottky contact , surface cleaning , annealing

PACC : 7340N , 7360L , 7330

^{*} Project Supported by the Technical Pre-Research Program of China (Grant No. 41308060106) , the National Key Basic Research and Development Program (973 Program) of China (No. 2002CB3119) .