

小半径器件的电流密度大相一致。然后,提出了 APDs 器件的总电流模型分析器件的暗电流,台面侧表面的状况等效为电阻 R_1 。相对较低的反偏电压下,器件的暗电流与光敏面半径成正比,此时表面漏电是组成器件暗电流的主要原因;但是近雪崩击穿时,暗电流却与半径的平方成正比,在此电压下体内漏电是引起器件暗电流的主要原因。并根据直接带隙带间隧穿模型分析了近雪崩击穿时的电流——造成体内漏电最主要的机制,试验结果说明增加倍增区宽度可以有效的降低带间隧穿电流对器件性能的影响,但是反而会增加雪崩击穿电压。。

提高 APDs 器件的性能,要降低表面漏电的影响。传统的方法是优化干法刻蚀工艺、刻蚀后的表面处理以及生长钝化层等,工艺操作过程中都会有局限性。提出了一种利用表面薄 p 层材料而在台面侧表面形成表面耗尽层的方法,仿真结果说明它可以有效的降低台面侧表面的电场。为了验证方法的可行性,通过两次 ICP 刻蚀而制备了具有双台面的器件,半径为 $15\mu\text{m}$ 的器件的暗电流减小~3.2 倍,而半径为 $20\mu\text{m}$ 的器件的暗电流减小~3.8 倍,显著地降低了器件的暗电流。

概括起来,本章从材料结构设计、材料评价、器件制备和测试以及结构优化等方面来研究了正照式 GaN 基 APDs 器件的制备和性能,并从理论上分析了引起器件暗电流的机制,探索降低器件暗电流的方法。

参考文献

- [1] Turgut Tut, M.G, Bayram Butun, Serkan Butun Erkin Ulker and Ekmel Ozbay, Experimental evaluation of impact ionization coefficients in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ based avalanche photodiodes. *Appl.Phys.Lett.* 89, 183524(2006).
- [2] V.A.Dmitriev, K.G.Irvine, C.H.Carter, N.I.Kuznetsov and E.V.Kalinina, Electric breakdown in GaN p-n junctions. *Appl.Phys.Lett.* 68(2), 1996.
- [3] K.A.McIntosh, R.J.M., L.J.Mahoney, A.Lightfoot, M.W.Geis, K.M.Molvar, GaN avalanche photodiodes grown by hydride vapor-phase epitaxy. *Appl.Phys.Lett.* 75(22), 1999.
- [4] J.L.Pau, C.Bayram, R.McClintock, M.Razeghi and D.Silversmith, Back-illuminated separate absorption and multiplication GaN avalanche photodiodes. *Appl.Phys.Lett.* 92, 101120(2008).
- [5] R.McClintock, J.L.Pau, K.Minder, C.Bayram, P.Kung, and M.Razeghi, Hole-initiated multiplication in back-illuminated GaN avalanche photodiodes. *Appl.Phys.Lett.* 90, 141112(2007).
- [6] M. L. Nakarmi, K.H.Kim, J. Li, J. Y. Lin, and H. X. Jiang, Enhanced p-type conduction in GaN and AlGaIn by Mg-d-doping. *Appl.Phys.Lett.* 82(18), pp.3041-3043, 2003.
- [7] Huaibing Wang, J.Li, Nanhui Niu, Guangdi Shen, Shuming Zhang, Enhanced performance of p-GaN by Mg d doping. *Journal of Crystal Growth* 304, pp7-10, 2007.
- [8] T. Li, C.Sam, M. Wegscheider, A. Navarro-Quezada, M. Quast, K. Schmidegg, A. Bonanni, GaN:d-Mg grown by MOVPE: Structural properties and their effect on the electronic and optical behavior. *Journal of Crystal Growth* 310, pp13-21, 2008.
- [9] Y.B. Pan, Z.J.Yu, Z.T. Chen, Y. Lu, T.J. Yu, X.D. Hu, K. Xu, G.Y. Zhang, Reduction of threading

- edge dislocation density in n-type GaN by Si delta-doping. *Journal of Crystal Growth* 286,pp255-258, 2006.
- [10] CHEN Jie, X.Jintong, WANG Ling, LI Xiangyang, ZHANG Yan, Low-damage wet chemical etching for GaN-based visible-blind p-i-n detector. *Proc. of SPIE Vol. 6621 66211C* (2007) .
- [11] Guo, Xiangyi, High Performance Ultraviolet 4H-SiC Avalanche Photodiodes. 美国德州大学博士论文, (2005) .
- [12] K. Minder, J.L.Pau, R. McClintock, P. Kung, C. Bayram, M. Razeghi and D. Silversmith, Scaling in back-illuminated GaN avalanche photodiodes. *Appl.Phys.Lett.* 91, 073513(2007).
- [13] Rayan M^c-Clintock, J.L.P., Can Bayram, Bruno Fain, Paul Geidraitis, Manijeh Razeghi and Melville P.Ulmer, III-Nitride avalanche photodiodes. *Proc. of SPIE 73661F(p12)*,2009.
- [14] Michele Moresco, F.Brancesco Bertazzi, and Enrico Bellotti, Theory of high field carrier transport and impact ionization in wurtzite GaN. Part II: Application to avalanche photodetectors. *J.Appl.Phys.*106,063719(2009).
- [15] S. Verghese, K.McIntosh, R. Molnar, L. Mahoney, R. Aggarwal, M. Geis, K. Molvar, E. Duerr, and I. Melngailis, *IEEE Trans.Electron Devices* 48,502(2001)
- [16] R.L. Aggarwal, I.Melngailis, S. Verghese, R.J. Molnar, M.W. Geis, L.J. Mahoney, Temperature dependence of the breakdown voltage for reverse-biased GaN p-i-n⁺ diodes. *Solid State Communications* ,117,pp.549-553,2001.
- [17] Gauri Vibhakar Karve, Avalanche photodiodes as single photon detectors. 美国德州大学博士论文, 2005.
- [18] Antanas Reklaitis, Monte Carlo investigation of current voltage and avalanche noise in GaN double-drift impact diodes. *J.Appl.Phys.*97,043709,2005.
- [19] Moll J L 1964 *Physics of Semiconductors* (New York:McGraw-Hill)
- [20] Zhang, Yun, Fabrication Characterization of GaN Visible-blind Ultraviolet avalanche photodiodes. 乔治亚理工大学博士论文, 2009.
- [21] W.Liu, *Fundamentals of III-V Devices: HBTs, MESFETs and HFETs/HEMTs*, 1ed. 1999.
- [22] Ja'n Kolm'k, I.s.H.O.u., Kevin F. Brennan,Rongping Wang and P. Paul Ruden, Monte Carlo calculation of electron initiated impact ionization in bulk zinc-blende and wurtzite GaN. *J. Appl. Phys.* 81 (2), pp.726-733,(1997).
- [23] M.Razeghi and A.Rogalshi, semiconductor ultraviolet detectors *J.Appl.Phys.* 79(10) ,pp.7433-7473,1996.
- [24] P. Hacke, T. Detchprohm, K. Hiramatsu, N. Sawaki, K. Tadatomo, and K. Miyake, analysis of deep levels in n-type GaN by transient capacitance methodes, *J. Appl. Phys.* 76, 304 ,1994.
- [25] Z. Q. Fang, D. C. Look, J. Jasinski, M. Benamara, Z. Liliental-Weber, and R. J. Molnar, Evolution of deep centers in GaN grown by hydride vapor phase epitaxy, *Appl. Phys. Lett.* 78, 332 ,2001.
- [26] H. M. Chung, W.C.Chuang, Y. C. Pan, C. C. Tsai, M. C. Lee, W. H. Chen, W. K. Chen, C. I. Chiang, C. H. Lin, and H. Chang, Electrical characterization of isoelectronic In-doping effects in GaN films grown by metalorganic vapor phase epitaxy, *Appl. Phys.Lett.* 76, 897 ,2000.
- [27] C. H. Seager, A. F. Wright, J. Yu, and W. Götz, Role of carbon in GaN, *J. Appl. Phys.* 92, 6553, 2002.
- [28] A. Armstrong, A. R. Arehart, D. Green, U. K. Mishra, J. S. Speck, and S.A. Ringel, Impact of deep levels on the electrical conductivity and luminescence of gallium nitride codoped with carbon and silicon, *J. Appl. Phys.* 98, 053704 ,2005.
- [29] Julien Pernota and Pierre Muret,Electronic properties of the $E_C-0.6$ eV electron trap in n-type

- GaN. J. Appl. Phys. 103, 023704,2008.
- [30] L. Polenta, A. Castaldini and A. Cavallini, Defect characterization in GaN: Possible influence of dislocations in the yellow-band features. J. Appl. Phys. 102, 063702,2007.
- [31] W B Liu, D G Zhao, X Sun, S Zhang, D S Jiang, H Wang, S M Zhang, Z S Liu, J J Zhu, Y T Wang, L H Duan and H Yang, Stable multiplication gain in GaN p-i-n avalanche photodiodes with large device area. J.Phys.D: Appl.Phys.42,015108,2009.

第四章 背照式 GaN 基 APDs 器件的制备与性能研究

本章主要介绍背照式 GaN 基 APDs 器件的研制及性能分析, 其中首先用异质结极化理论来研究 N 面生长的 GaN/AlGaIn 异质结界面处极化电荷, 根据计算结果而简要画出了 p-GaN/i-GaN/n-AlGaIn 结构材料的能带图; 其次利用 TCAD 技术研究了器件的电流-电压特性, 采用不同的电流机制对器件的暗电流进行拟合, 研究不同的反偏电压下起主要作用的电流机制, 并得到了器件的电场分布; 再次介绍了器件的制备、测试系统及性能分析; 最后制备了日盲波段小光敏面探测器 (p-Al_{0.45}Ga_{0.55}N/i-Al_{0.45}Ga_{0.55}N/n-Al_{0.65}Ga_{0.35}N), 并得到了其电流-电压特性曲线, 对其进行初步探索, 为研究 GaN 基日盲 APDs 器件打下基础。

4.1 引言

背照式 GaN 基 APDs 器件的优点主要集中在两个方面: 第一, 易于与 Si 读出电路互连, 有利于实现规模器件的集成化; 第二, 根据第二章的计算结果, 在某电场范围内 GaN 基材料中空穴的碰撞电离系数大于电子碰撞电离系数, 空穴倍增因子大, 易于降低 APDs 器件的雪崩过剩噪声, 而紫外光线从衬底入射就可实现空穴引起雪崩倍增。2007 年, 美国西北大学 M. Razaghi 小组发表了数篇有关背照式 p-i-n 结构 GaN 基 APDs 的文章, 阐述了从器件研制、测试到结果分析等一系列问题, 研究了暗电流、倍增因子随半径变化趋势^[1], 改变 p、i、n 层厚度而分析这些因素对器件性能的影响^[1], 测试得到了光敏面面积为 225 μm² APDs 器件的单光子探测率为 20%, 暗计数率小于 10 kHz^[2]。该研究小组在 2008 年^[1]和 2009^[3, 4]年又报道了具有 SAM 结构 GaN 基 APDs 器件, 获得了较大的倍增因子 41200, 通过比较两种结构器件性能 (普通 p-i-n 与 SAM 结构), 这种复杂的 SAM 结构可以有效地降低器件暗电流提高倍增因子。通过这些努力而使得器件的性能得到了很大的提高, 促进了 GaN 基 APDs 器件的发展。

然而, 背照式器件存在的一个最大问题是 n 层材料的光吸收以及少子扩散长度小, 影响 n 层内光生空穴向本征区内的注入, 进而降低器件的内量子效率, 尤其是会减小盖革模式 APDs 器件的单光子探测效率。目前主要的解决方案有: 减小 n 层材料的厚度或采用 n-AlGaIn/i-GaN 异质结结构, 但是每种结构都有各自的局限型, 前者则是影响器件的 n 电极的制备, 而后者由于晶格失配而在 i 层引入大的缺陷密度, 会增加器件的暗电流, 降低雪崩倍增因子。2008 年, M. Razaghi 小组^[1]通过对比 p-GaN/i-GaN/n-GaN (100 nm) / n-AlGa(In)N (100 nm) 和 p-GaN / i-GaN / n-AlGa(In)N (200 nm) 结构器件性能, 在具有前一结构的器件上获得了较低的暗电流和较大的倍增因子, 但是在后一器件上却获得了较大的内量子效率。两种结构的器件中都存在 GaN

/AlGaIn异质结结构，到目前为止，还没有看到有关报道异质结结构的存在对倍增区内电场影响的文章，尤其是极化电荷产生的电场对GaN基材料中雪崩倍增效应的影响。

4.2 异质结基本理论

4.2.1 GaN/AlGaIn异质结界面极化电荷计算

纤锌矿GaN基材料具有极强的压电极化与自发极化效应，比传统的III-V和II-VI半导体材料或ZnO中的极化高至少十倍，某些情况下有自发极化引起的电场强度高达3MV/cm，在AlGaIn/GaN或InGaIn/GaN异质结处压电极化引起的电场强度约为2MV/cm，如此高的极化电场会在界面处引起界面极化电荷或者是GaN基量子阱结构中电子或空穴波函数的空间分布[5]。纤锌矿结构具有非对称性(沿着某些轴具有方向相反的两个不同的原子层)，因而表现出不同的极化方式。GaN基材料可分为Ga面或是N面：其中Ga面沿[0001]方向极化；N面沿[000-1]方向极化，但是只有通过试验才能确定利用MOCVD技术生长的GaN材料是何种极化方式。(0001)面和(000-1)面是不同的，使得材料具有不同的物理和化学性质^[6]，如Ga面粗糙度低，化学稳定性好，等^[7]。根据Matthews-Blakesslee和Fischer模型可知，在 $Al_xGa_{1-x}N$ ($x>0.15$)/GaN结构，满足条件 $d_{AlGaIn} \gg 65nm$ 时，就不考虑 $Al_xGa_{1-x}N$ 层内的压电极化，材料层内应力能够完全释放。图4.1给出了本文所用的材料结构及各层材料内的极化情况。I层厚度仅为100 nm，所以计算时考虑了这一层材料的自发极化和压电极化(同时忽略了n型材料内掺杂杂质的影响)。

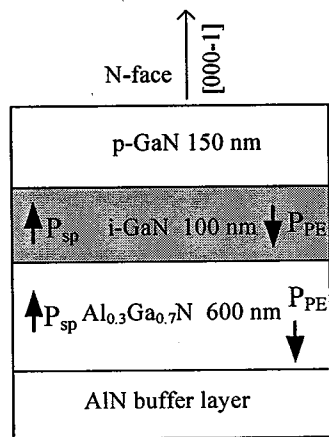


图 4.1 材料结构及压电极化、自发极化方向
Fig 4.1 Structure of material and directions of spontaneous and piezoelectric polarization

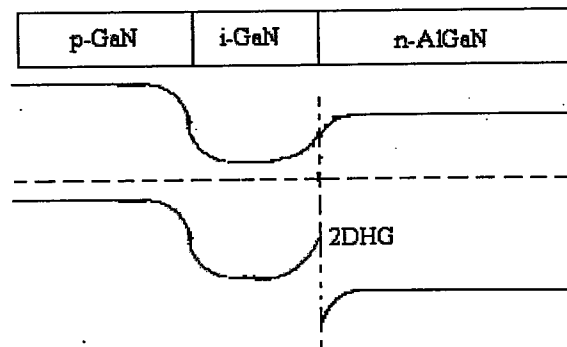


图 4.2 零偏下器件的能带结构
Fig 4.2 Band structure of material at zero voltage

用式4.1来表示半导体材料的压电极化, 其中a为外延材料的晶格常数, a₀为衬底材料的晶格常数。

$$P_{PE} = 2 \frac{a - a_0}{a_0} (e_{31} - e_{33} \frac{C_{13}}{C_{33}}) \quad (4.1)$$

由压电极化和自发极化而产生的界面极化电荷表示为式4.2:

$$\begin{aligned} \sigma &= P(top) - P(bottom) \\ &= [P_{SP}(GaN) + P_{PE}(GaN)] - [P_{SP}(AlGaN) + P_{PE}(AlGaN)] \end{aligned} \quad (4.2)$$

Al_xGa_{1-x}N的参数通过GaN与AlN的相关参数通过线性内插法得到(P代表任何参量):

$$P(Al_xGa_{1-x}N) = P(GaN) + x(P(AlN) - P(GaN)) \quad (4.3)$$

根据表4.1所示的GaN和AlN参数取值而得到Al_{0.3}Ga_{0.7}N的极化参数为:

$$P_{PE}(GaN) = 0.008967C/m^2 \quad (\text{方向为}[0001])$$

$$P_{PE}(Al_{0.3}Ga_{0.7}N) = 0.02812C/m^2 \quad (\text{方向为}[0001])$$

$$P_{sp}(GaN) = -0.029C/m^2 \quad (\text{方向为}[000-1])$$

$$P_{sp}(Al_{0.3}Ga_{0.7}N) = -0.0446C/m^2 \quad (\text{方向为}[000-1])$$

表4.1 极化的相关参数列表(ref.8)

Table 4.1 The parameter of GaN and AlN spontaneous and piezoelectric polarization (ref.8)

参数	AlN	Al _{0.3} Ga _{0.7} N	GaN
禁带宽度/eV	6.2	4.03	3.4
晶格常数/nm	0.3112	0.31659	0.3189
静态相对介电常数	8.5	8.78	8.9
P _{SP} / (C/m ²)	-0.081	-0.0446	-0.029
压电常数e ₃₁ / (C/m ²)	-0.58	-0.426	-0.36
压电常数e ₃₃ / (C/m ²)	1.55	1.165	1
弹性模量 ε ₃₁ /GPa	158	116.7	99
弹性模量 ε ₃₃ /GPa	267	352.4	389

由此计算得到i-GaN/n-Al_{0.3}Ga_{0.7}N界面极化电荷为负, 大小为0.00352C/m² (2.2×10¹²/cm²)。根据电荷守恒原理可知, 在Al_{0.3}Ga_{0.7}N界面处存在二维空穴气(2DHG)。考虑界面极化电荷后,

材料的能带结构(零偏压下)如图4.2所示, 在同型异质结处存在一个价带带阶(ΔE_v)。

从上面的计算结果可知, [000-1]方向极化的GaN/AlGaIn异质界面处存在负的极化电荷, 面密度为 $10^{12}/\text{cm}^2$ 量级, 它会在i层内产生电场, 但是方向恰好与材料内建电场的方向相反。因此, 这个方向极化的p-GaN/i-GaN/n-AlGaIn器件本征区内电场是极化电荷产生的电场与内建电场的叠加, 小于没有异质结时器件的内建电场值(图4.3所示)。

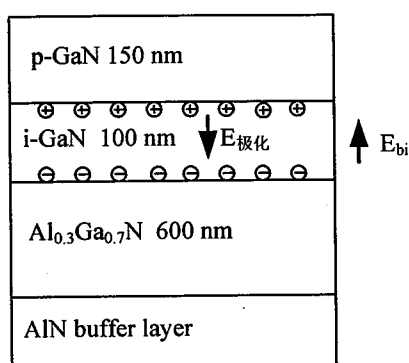


图 4.3 极化电荷电场与内建电场方向

Fig 4.3 The directions of electric field generated by polarized charges and built-in electric field

4.2.2 TCAD 仿真结果^[9]

4.2.2.1 本征区内电场分布

4.2.1 节的计算结果可知, 在 i-GaN/n-AlGaIn 异质结处存在一层负的极化电荷, 它的存在会降低本征区内电场强度, 为了探索它对雪崩器件的暗电流的影响, 我们为物理室提供试验数据而用 TCAD 软件^[9]对 p-GaN(150 nm)/i-GaN(180 nm)/n-AlGaIn(700 nm)结构器件的电流-电压特性(电压从 0V 到-73V)进行了研究, 图 4.4 为器件中电场强度分布(反偏电压为 70V), 其中计算时考虑了不同的极化电荷密度。由图可知, p 层和 i 层内电场强度随着极化电荷密度的增加而减小, 但是在异质结处产生的电场强度则是越大。需要指明的是这一层负的界面极化电荷没有得到试验的验证, 只是根据暗电流曲线拟合得到的, 还需进一步开展这方面的研究。另一个方面, 在此反偏电压下, 电场强度向 p 层材料内扩展得很厉害, 文献 4 通过采用 δ 掺杂技术提高 p 层掺杂浓度而有效地抑制了 p 层材料内电场扩展效应, 可以有效地降低 p 层内的电场强度, 进而减小了器件暗电流, 提高了倍增因子。模拟结果说明在本实验中所采用外延材料中 p 层材料的掺杂浓度并不能满足把电场限制在本征区内的要求, 不利于制备 GaN 基 APDs 器件。

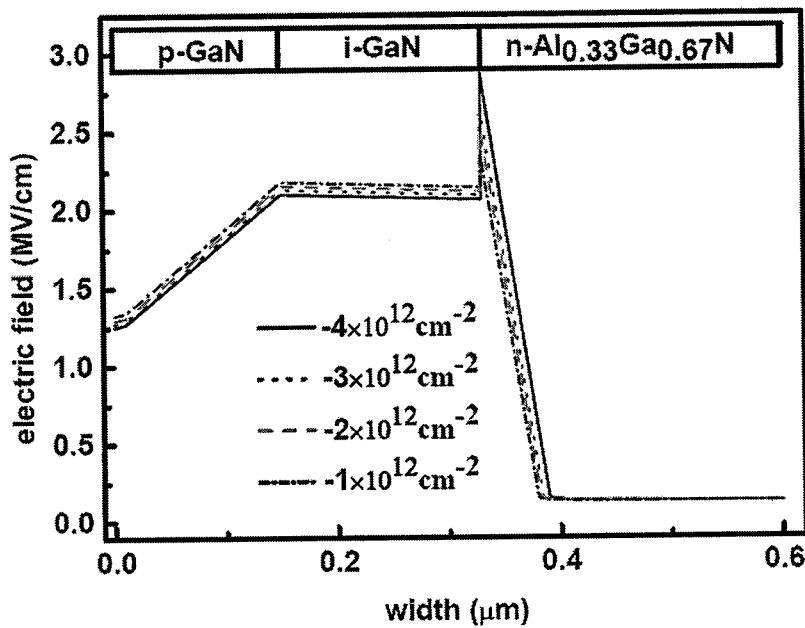


图 4.4 考虑极化电荷后器件内电场分布(反偏电压为 70V) (ref.9)

Fig 4.4 Electric field profiles of GaN-based APDs with different density of polarized charges under the same reverse bias (ref. 9)

4.2.2.2 电流-电压特性

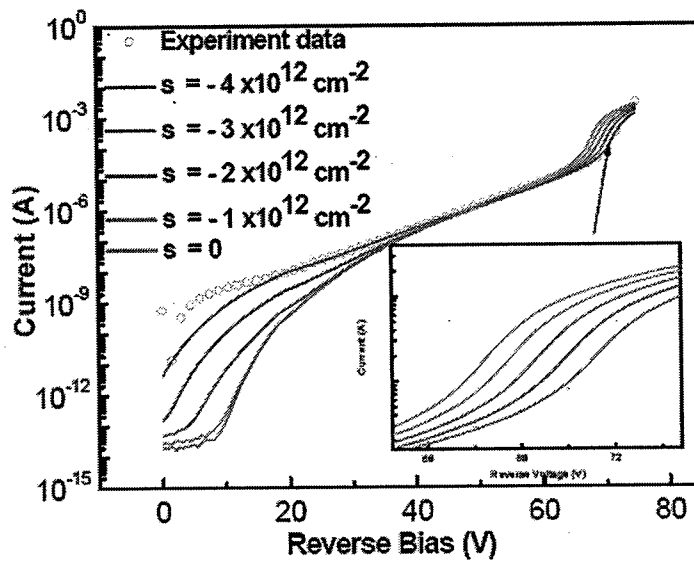


图 4.5 不同的极化电荷时拟合得到的器件的电流-电压特性曲线(ref.9)

Fig 4.5 The simulated current-voltage curves with different polarized charges at GaN/AlGaIn(ref.9)

通过考虑异质结处极化电荷以及带间隧穿电流机制，拟合了 p-GaN (150 nm)/i-GaN (180 nm)/n-AlGaIn(700 nm)结构器件的电流-电压特性曲线，如图 4.5 所示。从图中可以看到，反偏

电压高于 20V, 界面极化电荷密度为 $-4 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 时, 计算结果与试验结果相吻合。而反偏电压近雪崩击穿电压时, 带间隧穿电流是引起器件暗电流最主要的机制, 这在第三章中详细叙述。由图 4.4 可知, 极化电荷对本征区内以及界面处电场有很大的影响, 但是反应在 I-V 特性曲线上则是雪崩击穿电压随着极化电荷密度的增加而增加。图 4.5 中, 反偏电压小于 50V 时, 电流随着极化电荷密度的增加而增加, 变化十分明显。但是随着反偏电压的增加, 这一变化趋势发生了变化, 尤其是近雪崩击穿电压时, 电流随着极化电荷的增加而减小, 此情况下, 带间隧穿电流是主要的电流机制, 由第三章的计算结果可知, 带间隧穿电流受电场的影响很大。理论模拟结果、第三章计算和试验结果可知, 极化电荷又是引起雪崩器件暗电流的机制之一, 不同的反偏下起主要作用的电流机制不同(表面漏电、带间隧穿及缺陷辅助隧穿和极化电荷的影响), 相对较低的反偏电压时, 极化电荷与台面侧面漏电为主, 但是在近雪崩击穿之后, 带间隧穿则是主要的电流机制。

4.3 器件的制备

根据材料结构、组分及透射谱选择样品, 划片及打标后清洗样品表面, 清洗步骤及所用的有机溶剂为: 三氯甲烷、乙醚、丙酮和酒精, 去离子水冲洗后, 氮气吹干; 表面处理及等离子体处理后电子束蒸发生长 Ni/Au/Ni/Au; 第一次光刻, 利用 Ni 与 Au 腐蚀液去除未被光刻胶覆盖的金属, 而得到 p 电极, 去胶后在空气中 550°C 快速热退火以形成好的接触电极; 第二次光刻, 高温短时间后烘, ICP 刻蚀, 根据刻蚀条件及台面的高度而选择刻蚀速度; 去胶, 表面处理(主要是去除刻蚀产物及表面损伤等); 生长 Si_3N_4 (300 nm)钝化层(与上步工艺的连续性); 第三次光刻, 缓冲 HF 溶液腐蚀 Si_3N_4 , 开 n/p 电极孔; 去胶后, 第三次光刻, 生长 Ti/Al/Ti/Au, 制备 n 电极; 浮胶后, N_2 气氛中快速热退火, 以在 n-AlGaIn 上得到欧姆接触电极(与第三章所叙述的器件制备工艺间的最大不同之处); 清洗干净样品表面, 磁控溅射生长薄层 SiO_2 ; 第四次光刻, 腐蚀钝化层开 n/p 电极孔; 第五次光刻, 生长加厚电极及 p 电极的延伸电极; 划片、焊接、测试。

4.3.1 p-GaN/i-GaN/n-AlGaIn APDs 结构

材料结构如图 4.3 所示, 由图 4.6 可以看出, 这种材料具有较好的吸收边, 并且长波方向的透过率相对较大(平均在 80%左右), 反应出较好的材料质量。

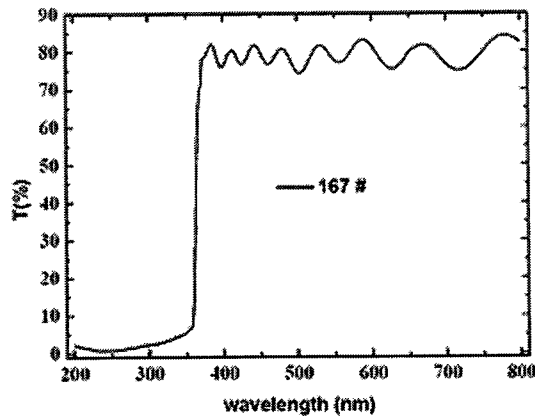


图 4.6 p-GaN/i-GaN/n-AlGaN 结构材料的透射谱

Fig 4.6 Transmission of p-GaN/i-GaN/n-AlGaN multilayer material

4.3.2 日盲小光敏面器件的制备

GaN 基材料和技术的发展满足了紫外探测技术对日盲探测器的需求, 可以实现不加滤光系统而对深紫外目标进行探测。但是, 目前来看, 如何提高探测系统的信噪比仍是困扰研究者的最大难题之一。除了提高普通探测器的电流响应率, 具有内增益的雪崩器件也就成了研究焦点, 雪崩器件甚至可以在弱信号探测甚至单光子探测时应用, 因而更加可以有效地提高信噪比。为了制备日盲 GaN 基 APDs 器件, 从 AlGaN 材料生长(尤其是高 Al 组分)到制备工艺等都有许多要解决的关键科学问题。本实验仅仅是对有关 p-Al_{0.45}Ga_{0.55}N/i-Al_{0.45}Ga_{0.55}N/n-Al_{0.65}Ga_{0.35}N 结构日盲器件探索性的研究。

p+-GaN 10 nm
p-Al _{0.45} Ga _{0.55} N ~0.3μm
i-Al _{0.45} Ga _{0.55} N ~0.22μm
n+-Al _{0.65} Ga _{0.35} N ~0.6 μm
AlN
AlN buffer layer
sapphire

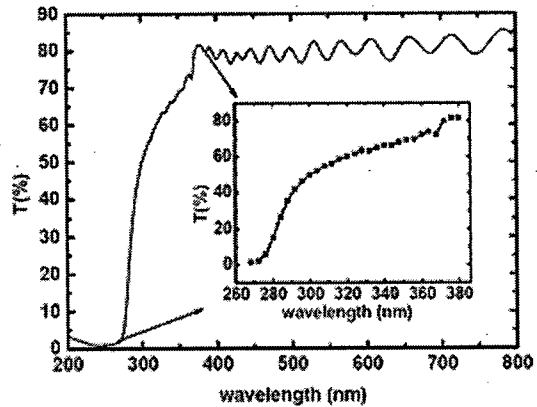


图 4.7 材料结构与透射谱

Fig 4.7 The transmission of solar blind AlGaN material

图 4.7 所示为制备器件所用到的材料结构(左图)及其透射谱(右图)。右图插图为材料在吸收边附近的透射谱(波长范围为 272 nm~376 nm), 在日盲波段(280 nm 左右)有一吸收边, 但是波长从 300 nm 增加到 376 nm, 材料的透射率一直缓慢增加。材料的这一吸收边特性说明了

其具有大的消光系数, 晶体质量不好, 材料内杂质含量高、缺陷密度大(存在紫外光线的带间吸收现象)或者是应力较大。而在长波方向, 随着波长的增加而震荡最小值的间距增加, 由材料内的杂质散射引起。

按照4.3节所述制备工艺得到了光敏面半径为 $15\mu\text{m}$ 和 $20\mu\text{m}$ 的日盲小光敏面紫外探测器, 为了了解器件的电学性能, 测试得到了器件的暗电流(图4.8)。插图中可以看出, 反偏电压大于 20V , $\log(I)$ - V 基本为线性特性, 一直到 -83.5V 时电流随电压增加而增加, 但是随后反而有所降低。但是, 器件的暗电流较大, 如 -40V 时, 电流为 $1.89\mu\text{A}$; -83.5V 时, 电流为 0.58mA 。然而, 再随着电压的增加, 暗电流没有继续增加反而减小, -84V 时, 暗电流为 0.535mA 。从测试结果分析可知, 材料质量以及电极接触电阻对器件的电学性能有重要影响。到目前为止, 有关日盲紫外探测器中雪崩倍增效应的研究工作开展甚少, 有文献报道的试验结果, 2005年, 美国西北大学R.McClintock等^[10]制备了结构为 $\text{p-Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{N}/\text{i-Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{N}/\text{n-Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{N}/\text{n}^+-\text{Al}_{0.5}\text{InGa}_{0.5}\text{N}$ 日盲器件, 同样是遇到因材料内缺陷密度大而使得暗电流较大的问题, 而得到的倍增因子开始时随着反偏电压增加而指数增加。但是当反偏电压增加到 60V 后, 倍增因子出现饱和现象, 随反偏电压不再增加反而有所降低。在整个测试电压范围内, 器件没有表现处盖革模式雪崩击穿现象。

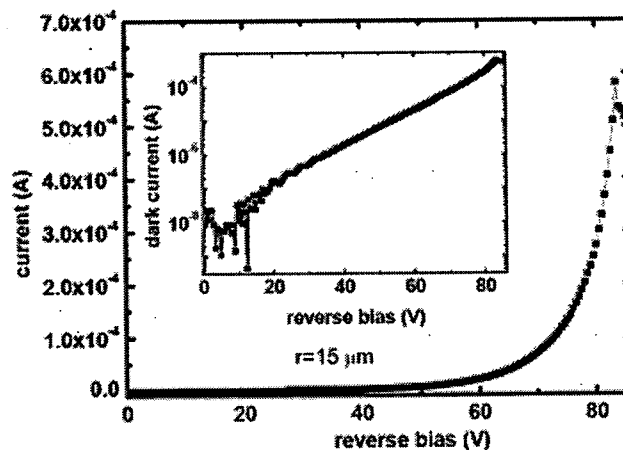


图 4.8 日盲器件 ($r=15\mu\text{m}$) 的电流-电压伏安曲线

Fig 4.8 Current-voltage characteristics of UV-solar blind devices ($r=15\mu\text{m}$)

4.4 p-GaN/i-GaN/n-AlGaN APDs 器件的性能

4.4.1 倍增因子

- 第一种测试方法

利用 3.3.1 所示的方法, 测试得到了器件($r=15 \mu\text{m}$)的暗电流、正照时器件的光电流以及根据测试数据计算(式 2.5)的器件倍增因子 (如图 4.9 所示)。由图可知, 反偏电压小于 25V 时, 加光照时电流没有表现出明显的增加, 因此选择的电流参考值为反偏电压 20V 时的光电流。插图器件的倍增因子, 反偏电压为 53.2V, 最大雪崩倍增因子为 757。

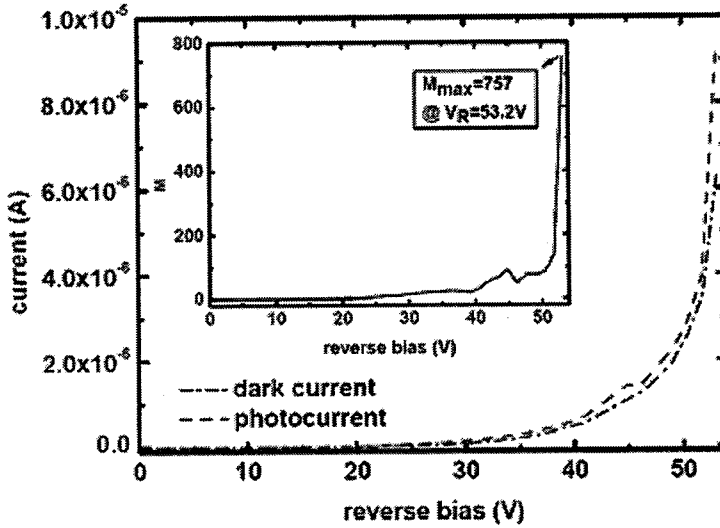


图 4.9 器件的暗电流、光电流及计算得到的雪崩倍增因子

Fig 4.9 Dark current and photocurrent at front illumination and multiplication v.s reverse bias

• 第二种测试方法

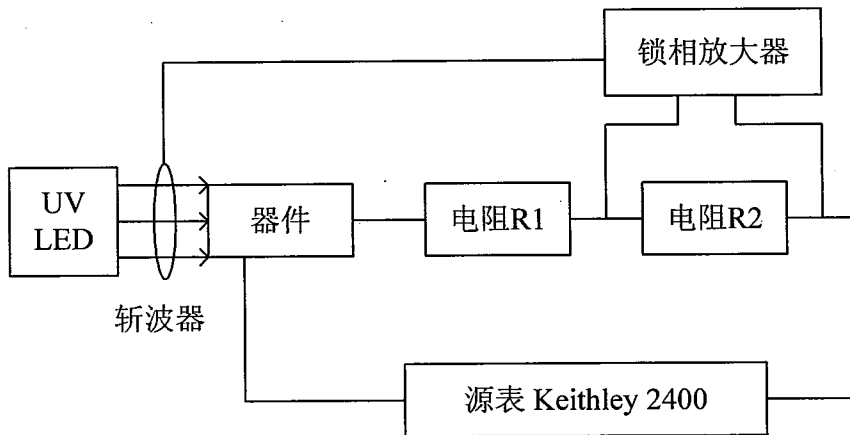


图 4.10 调制光照时, 测试系统

Fig. 4.10 The testing system for modulated illumination

分析上述第一种测试方法不难看到这一测试系统的特点: 1) 优点, 使用方便; 2) 局限性很大, 如测试系统噪声大, 不能单独提取调制光照下的光电流以及不能让光线从衬底入射而

对器件进行背照式测试。为此，搭建了另外一套测试系统，如图 4.10 所示，图中电阻 R_1 为电路的保护电阻，阻值选为 $1\text{ M}\Omega$ ，电阻 R_2 为采样电阻，阻值为 $50\text{ k}\Omega$ 。光源为大功率的紫外 LED，经斩波器而入射到装入测试柱瓦内器件上(可以完成光线的背照射，并且能对器件进行电、磁屏蔽)，锁相放大器读取电阻两端的电压(光电流信号)，计算机编程控制源表 keythley 2400 为器件提供反向偏置电压，同时检测电路中电流的变化，以及锁相放大器的读数，就可以直接提取电路中的光电流。

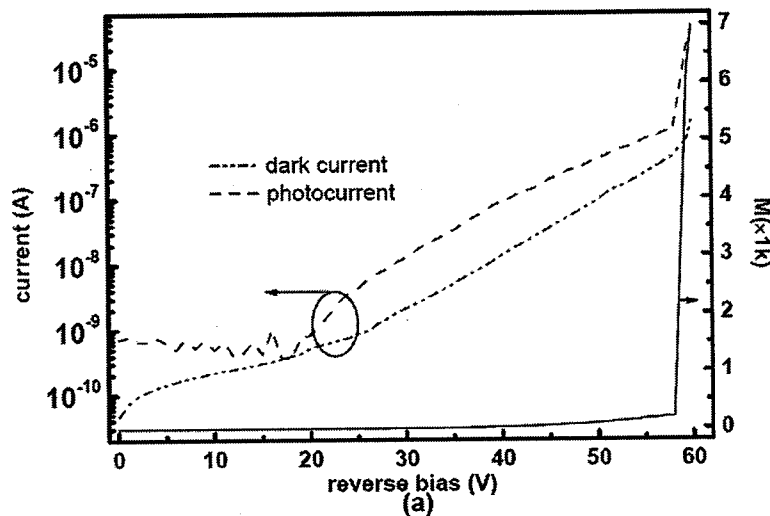


图 4.11 (a) 器件的暗电流、紫外光背照时的电流以及计算得到直流放大倍数
Fig 4.11(a) The dark current, back-illuminated total current and dc multiplication factor

根据测试数据计算出电路中电流的放大倍数(直流放大倍数(dc M), 图 4.11(a)) 与信号放大倍数(交流放大倍数(ac M), 图 4.11(b))。由图 4.9(a)可知，电路中的电流在-20V 时很明显的增加，-20V 和 0V 时采样电阻的电压变化并不明显(图 4.11(b))，所以计算直流倍增因子时用 -20V 时的电流为参考值，根据式 2.5 计算得到了器件的直流倍增因子，而交流倍增因子的电压参考值为 0V 时采样电阻的电压。GaN 基材料的雪崩击穿临界电场强度^[1]和 GaN 基 APDs 测试数据^[3]都表明，p-GaN/i-GaN/n-GaN 结构器件的雪崩击穿时平均电场强度为 3 MV/cm 。此时，i 层厚度只有 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ ，雪崩击穿电压大于 55 V ，而反偏电压 55 V 能够使 p-GaN(高掺杂)/i-GaN/n-GaN 结构器件的本征区电场强度高达 5 MV/cm 。根据上述计算与模拟结果可知，i-GaN/n- $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 界面处负极化电荷以及电场向 p 区内的扩展效应都会降低本征区的电场强度，增大雪崩发生所需要的反偏电压，但是这两种因素又增加了反偏电压小于 55 V 的暗电流，使得暗电流 $\log(I)\text{-V}$ 曲线近似线性迅速增加，如从 $4.253 \times 10^{-9}\text{ A}$ (-25V)变化到 $8.02 \times 10^{-7}\text{ A}$ (-55V)。可知，我们在相同的器件获上得了不同的雪崩倍增因子，如反偏电压为 60 V 时，最大直流放

大倍数为 6900, 在此电压下获得的最大交流放大倍数为 133。在此两种情况下, 器件都表现出了盖革工作模式。

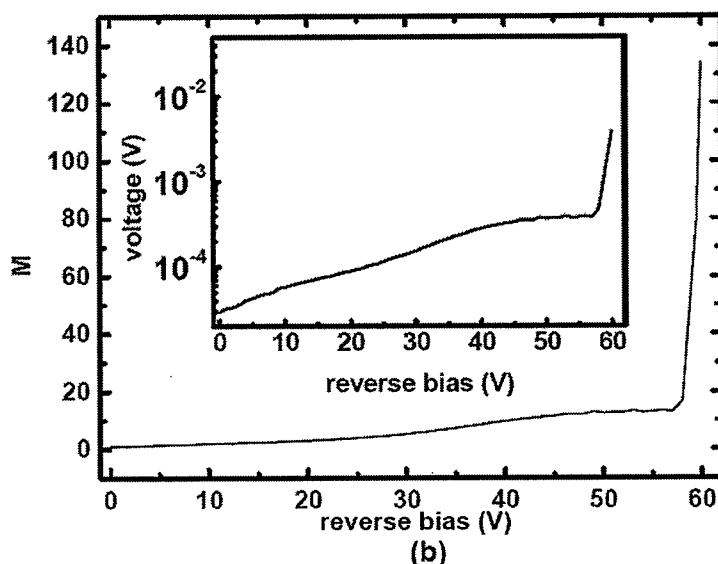


图 4.11(b) 紫外光背照时, 采样电阻的电压变化以及由此计算得到的交流放大倍数

Fig 4.11(b) At back illumination, the voltage variation of sampling resistor and ac multiplication factor

造成这一现象的原因可能为: 一是计算直流倍增因子: 采用的时加、不加光照时电流的差值计算, 然后与参考电流值进行比较而得到, 计算过程不可避免的会引入计算误差, 同时受到暗电流与噪声的影响; 二是限流电阻 R_1 的影响, 随着雪崩效应的出现, 电路中的交流信号电流偏离原来设想的正弦变化, 影响了信号的增加, 在实际应用方面有意义。为了确定影响因素, 还需要进一步的实验, 如变换限流电阻 R_1 的大小。但是, 这一正/背照式测试系统对光源的强度要求很高, 光电流信号足够大以致能被锁相放大器捕捉, 而氙灯加单色仪的方案在此并不适用。

4.4.2 变温电流-电压特性

正的击穿电压温度系数是区分器件发生雪崩击穿最有力的证据, 较高的温度下晶格振动加剧, 载流子因与晶格振动碰撞而损失的能量增加, 因而引起载流子的碰撞电离就需要更高的反偏电压, 图 4.12 为对器件两个温度点时的电流-电压特性曲线。温度分别为 270K 和 297K, 对应的击穿电压分别为 49.7V 和 57.4V。

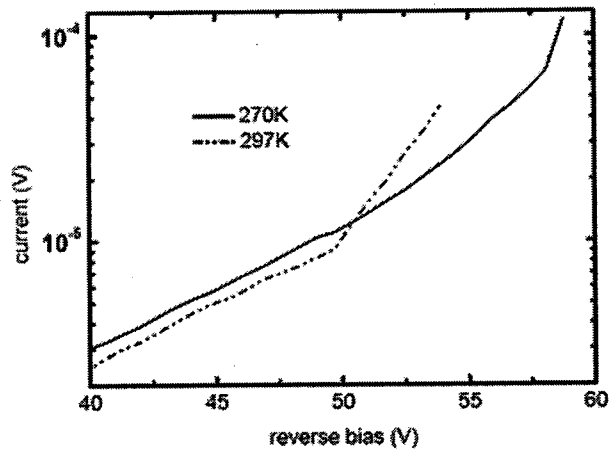


图 4.12 270K 和 297K 时器件(半径为 15 μm)的电流-电压特性曲线

Fig 4.12 Temperature-dependent evolution of the breakdown voltage at 270K 和 297K for a device($r=\mu\text{m}$)

4.4.3 响应特性

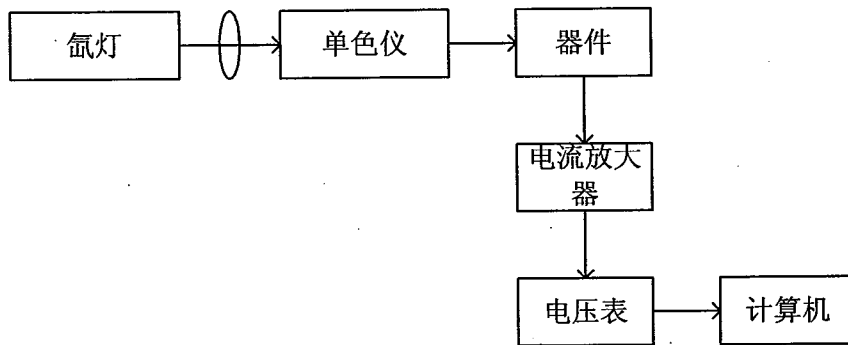


图 4.13 响应光谱测试系统

Fig 4.13 The testing system for calculating responsivity

零偏下, 紫外光正、背向入射时器件的电流响应率如图 4.14 所示, 测试系统如图 4.13 所示。正照时, 波长为 364 nm, 最大响应率(R_F)0.148A/W; 背照时, 波长为 290-360 nm, 响应率(R_B)为 0.18A/W 左右, 存在一个响应窗口, 两种情况下, 器件的信噪比都大于 200。由图可知, 器件的长波截止特性较好, 但是在短波方向的情况则是不同, 光线正向入射时由于 p 层材料的吸收作用而使响应率随着波长变短而降低。而且在响应峰值波长时, R_F 小于 R_B , 在 p 区内产生的光生少数载流子只有极少一部分扩散进入 i 层而对响应率有贡献; 另一方面, 表面反射或复合又会降低光子吸收。从光伏器件的工作原理可知, 对 p-i-n 结构探测器加反偏电压时, 器件的电流响应率随着反偏电压的增加而增加。图 4.15 是反偏电压低于 30V 时, 根据采样电阻的电压而计算得到的电路中光电流随反偏电压的变化关系。反偏电压小于 20V 时,

电路中的光电流随着反偏电压近似线性增加,如零偏时,光电流为 5.84×10^{-10} A,而-20V 时,光电流为 1.77×10^{-9} A,增加仅 3 倍,但是在高于 20V 时,电流迅速增加。

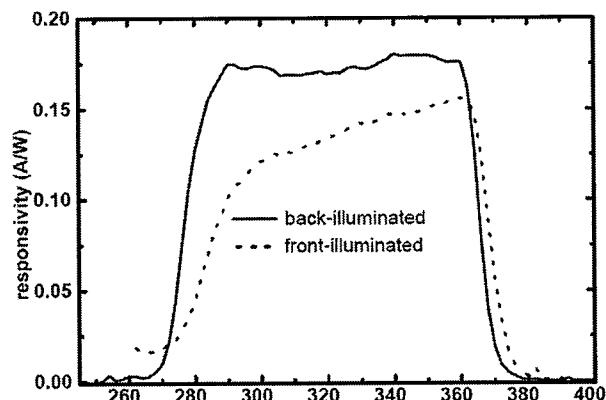


图 4.14 光线正、背入射时器件的电流响应率
Fig 4.14 The responsivity of a device ($r=15\mu\text{m}$) at front- and back-illumination

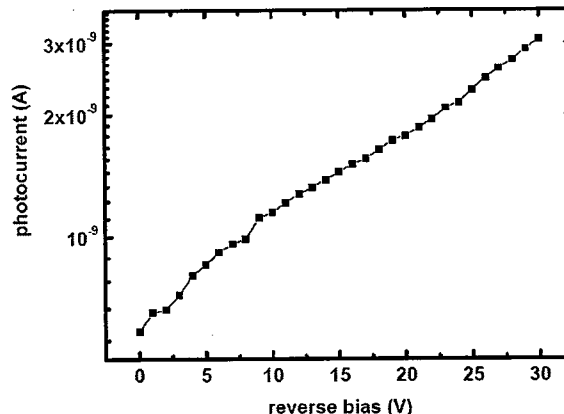


图 4.15 光电流随反偏电压的变化关系
Fig 4.15 Photocurrent with increasing reverse bias .

4.4.4 碰撞电离系数

碰撞电离系数被定义为载流子走过单位距离产生的电子-空穴对的数目,影响器件的倍增因子与过剩噪声因子^[11]。目前,GaN基APDs器件研究和应用基本上还处于发展阶段,虽然存在一些有关电子高电场输运性质的试验数据,但是一般低于碰撞电离所需要的电场强度,尤其是有关低电场下空穴迁移率的信息了解甚少^[12,13]。在半导体能带结构及载流子-声子相互作用的基础上,已经存在载流子碰撞电离系数理论计算^[14-16],但是其中存在一些假设,尤其是载流子-声子相互作用中存在的一些拟合参数值的选择等,并且计算过程中并没有考虑器件结构以及与试验结果的对比。然而,随着GaN基APDs器件性能的提高以及其表现出来的诱人前景,相关的理论计算工作又提上了研究者们的工作日程。2009年,波斯顿大学的Francesco Bertazzi等人^[17]又利用EMC法对纤锌矿GaN中电子和空穴在高电场中的输运性能进行了研究,与前人的计算过程不同之处则是他们考虑了高电场下的带间隧穿效应,这种效应在高电场下起着关键作用,比考虑隧穿效应时的载流子碰撞电离系数大。并用理论计算对p-i-n结构器件的倍增因子进行了研究,有关电子和雪崩倍增因子随反偏电压(击穿电压)的变化关系理论计算结果与试验数据相吻合。但是,无论在理论计算还是试验,有关研究p-GaN/i-GaN/n-AlGaIn结构器件的碰撞电离系数的报道是少之又少。

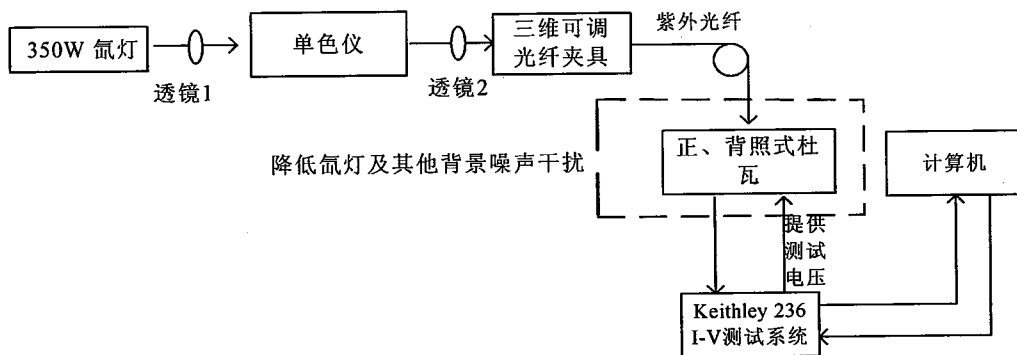


图 4.16 碰撞电离系数测试系统

Fig 4.16 Testing system for calculating electron/hole impact ionization coefficients

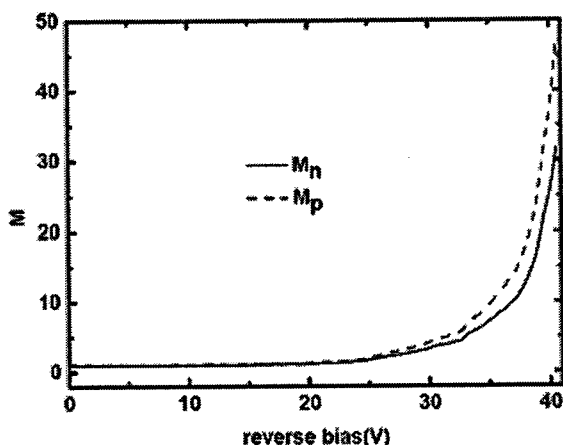


图 4.17 电子(M_n)与空穴(M_p)倍增因子

Fig 4.17 M_n and M_p as a function of reverse bias

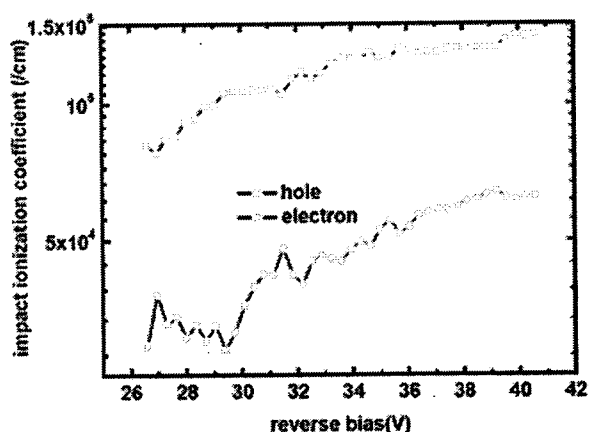


图 4.18 p-GaN/i-GaN/n-AlGaIn 结构器件中 GaN 材料的碰撞电离系数

Fig 4.18 Carriers impact ionization coefficients in GaN for p-GaN/i-GaN/n-AlGaIn devices

实验上, 往往根据式 2.6 和 2.7 计算电子与空穴碰撞电离系数, 但是要测试并计算得到同一器件的电子与空穴倍增因子。为此, 在图 4.13 所示的光谱测试系统基础上, 通过改进得到了采用实验数据而计算器件电子和雪崩倍增因子的测试系统(如图 4.16 所示), 为了避免氙灯对器件电流-电压特性的影响, 单色仪出来的紫外光经光纤耦合而入射到放在屏蔽盒中的器件, 由暗电流和正、背照式的电流计算得到空穴(M_p)与电子(M_n)倍增因子(图 4.17 所示)。测试电压范围内, $M_p > M_n$ 。图 4.18 给出了电子与空穴碰撞电离系数与电压之间的关系。假设极化电荷对电场强度没有影响, 与 Francesco Bertazzi et al[16]计算结果对比可知, 电子碰撞电离系数比他们没有考虑隧穿时的碰撞电离系数小, 但是空穴的碰撞电离系数比他们的计算结果大。究其原因可能为: 一是我们的器件结构为 p-GaN/i-GaN/n-AlGaIn, 计算电场时没有考

虑极化电荷的影响, 器件的实际电场可能比计算结果小; 二是异质结的存在及 i 层材料只有 $0.1\mu\text{m}$, 使得 i 层材料内缺陷密度大。

4.5 小结

本章首先简单介绍了背照式 APDs 器件的优点, 分析影响器件性能的关键参数而解决提高器件性能的关键技术问题, 然后是器件的制备工艺, 设计测试系统以及性能分析。制备工艺过程中解决欧姆接触电极、减小表面密度及钝化层三者之间存在的矛盾, 找到了一种较合理的步骤。对器件的测试在此主要采用了三种方法: 一是正照式器件测试所使用的方法, 得到了光线正向入射时的最大倍增因子为 800; 二是设计了另外一种可以测试光电流随着反偏电压变化而变化的测试系统, 对由 UV LED 发出的紫外光而进行频率调制, 利用锁相放大器而读出采样电阻电压值(由光电流引起), Labview 编程控制仪器的运行并得到实验数据, 通过计算而得到了背照时最大直流倍增因子为 6900, 而最大交流倍增因子仅为 133; 三是测试计算得到了背照时的电流峰值响应率为 0.18A/W , 而正照时为 0.148A/W , 经过修改这一测试系统得到器件正、背照时的倍增因子, 由此计算电子和空穴的碰撞电离系数。

另一方面, p-GaN/i-GaN/n-AlGaIn 结构中存在 i-GaN/n-AlGaIn 异质结结构, 由于 III-V 族材料较强的离子性, 在界面处会由于压电极化和自发极化而存在极化电荷。以异质结基本理论为基础, 而计算了 i-GaN (100 nm)/n-AlGaIn(600 nm)异质结界面处的极化电荷为负, 面电荷密度为 $2.2\times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ 。为了探索引起器件暗电流的机制, 而利用 TCAD 软件对器件的电流-电压特性曲线进行仿真, 在 p-GaN (150 nm)/i-GaN(180 nm)/n-AlGaIn(700 nm)结构器件的 i-GaN(180 nm)/n-AlGaIn(700 nm)界面处引入负的极化电荷, 随着极化电荷面密度增加而本征区内的电场强度减小, 界面处的极化电场增强, 但是反而击穿电压增加, 这一研究结果为我们提高背照式器件性能找到了理论依据。最后则是制备了具有 p- $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{N}$ /i- $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{N}$ /n- $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ 结构的日盲器件, 测试其高反偏电压下的暗电流, 为制备背照式日盲器件而进行初步探索实验。

参考文献

- [1] K. Minder, J.L.Pau, R. McClintock, P. Kung, C. Bayram, M. Razeghi and D. Silversmith, Scaling in back-illuminated GaN avalanche photodiodes. *Appl.Phys.Lett.* 91, 073513(2007).
- [2] J.L.Pau, R.McClintock, K.Minder, C.Bayram,P.Kung and M.Razeghi Geiger-mode operation of back-illumination GaN avalanche photodiodes. *Appl.Phys.Lett.* 91,041104, 2007.
- [3] R.McClintock, J.L.Pau,K.Minder,C.Bayram,P.Kung,andM.Razeghi,Hole-initiated multiplicaiton in back-illuminated GaN avalanche photodiodes. *Appl.Phys.Lett.* 90, 141112(2007).
- [4] Ryan McClintock, J.L.Pau, Can Bayram, Bruno Fain, Paul Giedraitis, Manijeh Razeghi, and

- a.M.P. Ulmer, III-Nitride avalanche photodiodes. Proc. of SPIE Vol. 7222 ,pp. 72220U-1-12, (2009).
- [5] A. Hangleiter, J. S. Im, H. Kollmer, S. Heppel, J. Off, and F. Scholz, the role of piezoelectric field in GaN-based quantum wells, MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 3, pp.15,1998.
- [6] Hellman, MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 3, pp.11 ,1998.
- [7] Tavernier, P.R., Piezoelectricity and Growth Polarization in III-V Nitrides 加利福尼亚大学圣巴巴拉分校博士论文, 2002.
- [8] Guo Bao-Zeng,Gong Na, and Yu Fu Qiang, Calculations of two dimensional electron gas distributions in AlGa_N/Ga_N material system, Chinese Physics B, 17(1), pp.290-295, 2008
- [9] Z. X. Cao, W.D.Hu, X.S.Chen, W.Lu, and L.Wang, X.Y.Li, Dark Current Simulation of GaN/AlGa_N p-i-n Avalanche Photodiode. NUSOD, pp.81-82,2009.
- [10] Ryan McClintock, Kathryn Minder, Alireza Yasan, Can Bayram, Frank Fuchs1, Patrick Kung, and Manijeh Razeghi, Solar-blind avalanche photodiodes, Proc. of SPIE Vol. 6127, 61271D ,2006
- [11] 施敏著, 黄振岗译, 魏策军校, 半导体器件物理, 1981.
- [12] P. Kozodoy, H.Xing, S. P. DenBaars, U. K. Mishra, A. Saxler, R. Perrin,S. Elhamri, and W. C. Mitchel,, J. Appl. Phys. 87, 1832,2000.
- [13] A. Bhattacharyya, W.Li, J. Cabalu, T. Moustakas, D. Smith, and R.Hervig,, Appl. Phys. Lett. 85, 4956,2004.
- [14] J. Kolník, Ī. H. Oğuzman, K. F. Brennan, R. P. Wang, P. P. Ruden, and Y.Wang, J. Appl. Phys. 78, 1033,1995.
- [15] Ī. H. Oğuzman, J. Kolník , K. F. Brennan, R. Wang, T.-N. Fang, and P. P.Ruden, J. Appl. Phys. 80, 4429,1996.
- [16] K. F. Brennan, E. Bellotti, M. Farahmand, H.-E. Nilsson, P. P. Ruden and Y. Zhang,, IEEE Trans. Electron Devices ED-47, 1882,2000.
- [17] Michele Moresco, Francesco Bertazziand Enrico Bellotti, Theory of high field carrier transport and impact ionization in wurtzite GaN. Part II: Application to avalanche photodetectors. J.Appl.Phys.106,063719(2009).

第五章 器件噪声分析

本章来讨论 GaN 基光电器件的噪声，主要是涉及噪声的测试，结果分析，以及从噪声基本理论出发来分析测试噪声的来源，以及不同的器件结构对噪声的影响。最后分析能够降低器件的措施，有助于设计和制备低噪声、高性能的 GaN 基光电器件，尤其是降低 APDs 器件的雪崩过剩噪声，有益于促进它的实用化进程。

5.1 引言

对于光电探测器来说，器件噪声是一个很重要的参数，不仅影响探测器的探测率，最终会降低探测系统的信噪比(1.1 节)。一般情况下，反偏电压下，光电器件的噪声主要有：散粒噪声、1/f 噪声和热噪声。其中，频率小于 1kHz 时，1/f 噪声为主；中频情况下(1kHz<f<1MHz)，产生-复合噪声为主；高频时(f>1MHz)，白噪声(与频率无关)为主，包括散粒噪声、热噪声和产生-复合噪声等。但是，视不同的半导体材料，不同频率下起主要作用的噪声机制也是不同的^[1]。但是，对于 APDs 器件来讲，载流子的碰撞电离过程具有随机性的特征，存在具有起伏性的倍增因子，既增益的均方值大于其平均值的平方，用公式 5.1 和 5.2 表示：

$$\langle M \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N M_i}{N} \quad (5.1)$$

$$F = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_i^2}{\langle M \rangle^2} \quad (5.2)$$

如果按照 McIntyre's 经典公式^[2]，其中载流子的离化系数之比 k 是影响雪崩过剩噪声最主要的因素，他指出 k 值越偏离 1，是越有利于降低 F 值。对于 GaN 基 APDs 器件来讲，为了更全面的掌握器件性能，理解噪声来源(尤其是 F 因子)具有很重要的意义，但是到目前为止，相关的报道甚少^[3,4]。

5.2 测试及结果分析

5.2.1 噪声基本理论

简单来说，总的半导体光电探测器的噪声电流可表示为：

$$\langle i_n^2 \rangle = \langle i_{1/f}^2 \rangle + \langle i_{shot}^2 \rangle + \langle i_j^2 \rangle \quad (5.3)$$

其中, $i_{1/f}$, i_{shot} , i_j 分别表示 $1/f$ 噪声、散粒噪声和热噪声, 结合电流噪声等效功率谱以及三种噪声的来源, 就可以很好的分析探测器的噪声, 有益于提高探测器性能。

式 5.4 表示 $1/f$ 噪声, 其中 B 为测试频率带宽:

$$\langle i_{1/f}^2 \rangle = \int_0^B S_n(f) df = \int_0^1 S_n(f) df + \int_1^B S_n(f) df \quad (5.4)$$

式 5.5 表示散粒噪声, 又称为产生-复合噪声, 主要是有杂质或缺陷造成的产生或复合中心引起:

$$\langle i_{shot}^2 \rangle = 2eI_d BW \quad (5.5)$$

式 5.6 表示热噪声, 与频率无关的白噪声, R_{eq} 为结电阻、负载电阻以及放大器输入电阻等三部分的等效电阻:

$$\langle i_j^2 \rangle = \frac{4kTBW}{R_{eq}} \quad (5.6)$$

而对于 APDs 器件来说, 用原始的肖特基公式来简单表示散粒噪声, 其中 I_0 为光电流, 有噪声电流等效功率谱根据式 5.7 就可以计算出 APDs 器件的过剩噪声因子:

$$S_I(0) = 2eI_0 F \langle M \rangle \langle M \rangle^2 \quad (5.7)$$

分析噪声来源, 也是为了进一步降低器件噪声, 过去的几十年里, 随着 Ge、Si、InGaAs 以及 HgCdTe APDs 的发展, 研究者就降低雪崩过剩噪声方面做了很多工作, 归纳起来, 主要有如下几个方面^[1,5]:

(1) 材料离子化系数比高的半导体材料

α 与 β 相差越大, 另一种载流子对碰撞电离过程的反馈作用越小, 而在图 2.6 中的起伏变化就会越小, 则 F 因子越小。窄禁带 Si 材料, $\alpha/\beta \sim 10$, 因此 Si APDs 器件具有较低的 F 因子, 但是它的晶格常数与 InGaAs 等材料的晶格常数不匹配, 同时禁带宽度太小。而有报道的 GaP、SiC 以及 GaN 基 APDs 器件中, GaP 和 GaN 基材料没有 4H-SiC 材料中具有有利于降低 F 因子的 α/β 值, 但是 4H-SiC 存在不利于探测日盲紫外信号的材料特点^[6]。

(2) 降低雪崩器件的倍增区宽度

早在上个世纪七十年代, Okuto 和 Crowell 就意识到载流子在电场内加速到引起雪崩碰撞电离需要一定的距离, 即存在“死区”效应(l_d)^[7]。倍增宽度较小时, 不能忽略 l_d 值, 结果某一个载流子引起的 M 值较小, 对 M_i 造成的起伏越不明显。但是, 第三章分析可知, 雪崩倍增

区宽度减小对抑制带间隧穿电流不利。

(3) 引入异质结结构

为了降低 APDs 器件的 F 因子, 异质结结构受到了很大的重视。几年前, I²E 理论研究表明, 得到了低噪声的 AlGaAs/GaAs APDs 器件, 其噪声比 Si APDs 器件低^[8,9]。但是, 有关引入异质结结构的引入能够降低雪崩过剩噪声有争议。2002 年^[10], 德州大学奥斯汀分校 Jr. and J.C.Campbell 研究小组用 MC 方法对具有不同结构的 GaAs APDs 器件进行了详细的计算, 计算结果表面过剩噪声因子与器件结构以及材料参数有关, 如每一层厚度, 材料吸收系数, 入射波长等, 并得到了低噪声的 APDs 器件。另一方面, 他们还指出在异质结结构、倍增区宽度较小的 APDs 器件中, α/β 值并不是表示 F 因子大小的唯一参数。

(4) 采用特殊结构

虽然 α/β 值不是表示某一器件 F 因子大小的唯一参数, 但是是影响 F 因子的很重要的参数。为了增加 α/β 值, 以及制备了许多具有特殊结构的器件: 改变倍增区内电场强度的斜率^[11], 多级异质结结构(如图 5.1, 其中实线表示各级增益相同时的结果, 虚线表示增益之比最佳化时的结果。过剩噪声系数 γ 与过剩噪声因子 F 的关系为 $F = 1 + \gamma[(M-1)/M]$)、采用超晶格结构、渐变带隙结构、多量子阱结构或周期性掺杂的多量子阱结构等。

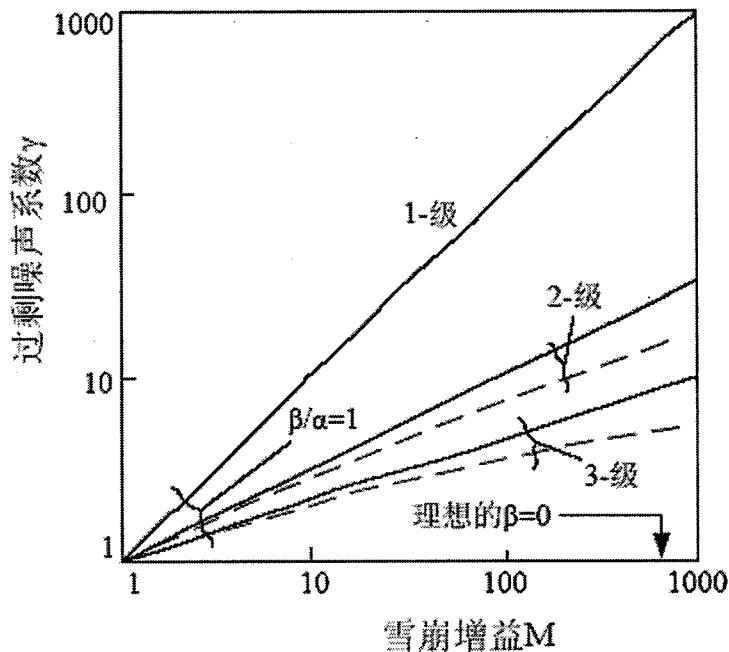


图 5.1 α/β 值以及 F 因子随异质结结构级数变化的情况(ref.5)

Fig 5.1 The effect of number of heterojunction on value of α/β and F factors (ref.5)

5.2.2 测试系统

5.2.2.1 电阻噪声测试

图 5.2 所示为测试电阻噪声最基本的测试电路图，电阻放置在双层屏蔽盒内，其中外层屏蔽盒接地，前置放大器为宽带电流放大器(DL 1211)，其动态带宽为 96dB。频谱分析仪为 SR 760，放大器输入端虚地，其输出端与频谱分析仪的输入端相连(屏蔽线的接地部分)。测试得到了阻值为 5 k Ω 、20 k Ω 以及 10 M Ω ，测试噪声谱如图 5.3 所示。电阻热噪声为 $4kT/R$ ，计算值在图中有标出。

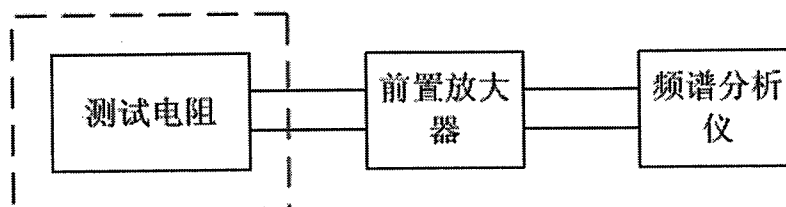


图 5.2 电阻噪声基本测试电路

Fig 5.2 The basic testing system for noise

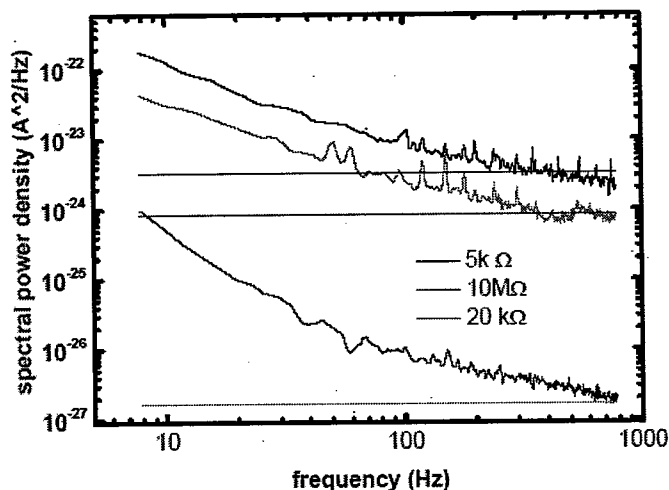


图 5.3 电阻(5 k Ω 、20 k Ω 以及 10 M Ω)的噪声电流功率密度
Fig 5.3 Noise power density of resistors(5 k Ω 、20 k Ω and 10 M Ω)

5.2.2.2 器件噪声测试

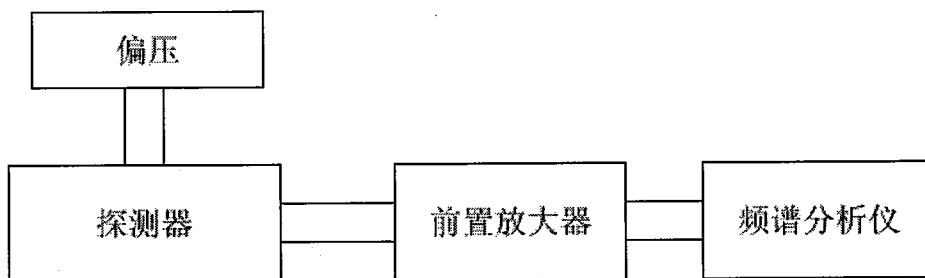


图 5.4 器件噪声测试系统
Fig 5.4 The diagram of testing system

在 5.2.2.1 电阻噪声测试系统的基础上，设计了可以加反偏电压后对器件噪声进行测试的系统，如图 5.4 所示，而前置放大器的增益为 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ A/V。光敏面半径为 $20 \mu\text{m}$ 的器件电流-电压特性曲线如图 5.4 所示。测试计算得到了它的噪声电流功率谱如图 5.5 所示。从图中可以看出，在低频下， $1/f$ 噪声为主，但是器件的噪声很大，在反偏电压为 12V 时， S_n 增至 10^{-21} A^2/Hz 。2007 年^[12]，M.Razeghi 小组在光敏面面积为 $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ 的器件上得到的噪声功率谱密度的量级在 10^{-23} $\text{A}^2/\text{Hz}(-91\text{V})$ 。而本实验所制备的器件表现出了较大的噪声电流。

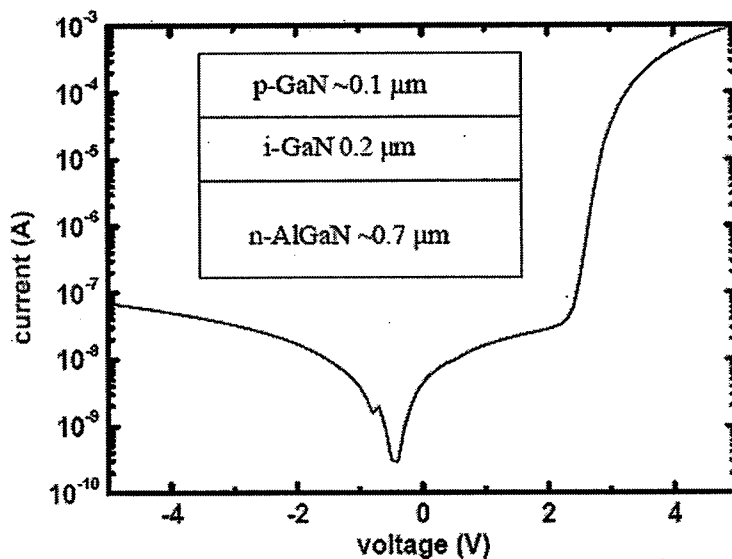


图 5.5 器件的电流-电压特性曲线
Fig 5.5 The current-voltage characteristics of devices with $r=20 \mu\text{m}$

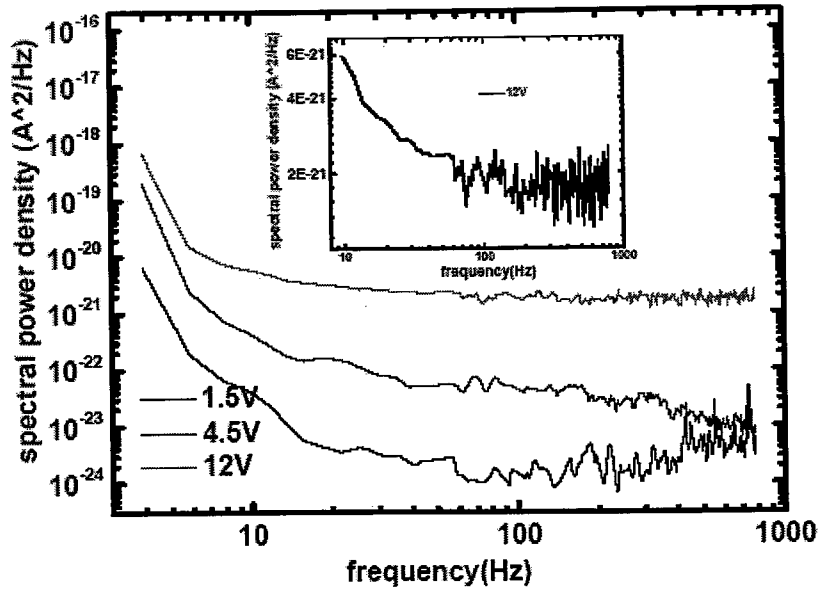


图 5.6 器件的电流噪声功率谱密度(光敏面半径为 $20\ \mu\text{m}$ 的器件)
 Fig 5.6 Spectral power density(S_n) of detector with $r=20\ \mu\text{m}$

图 5.7 所示分别为材料结构相同而器件半径不同的三个器件的噪声功率谱,从图中可以看出,半径相同的两个器件的噪声在所测试频率范围具有相同的量级,但是半径较小器件的 $1/f$ 噪声反而较大一些。

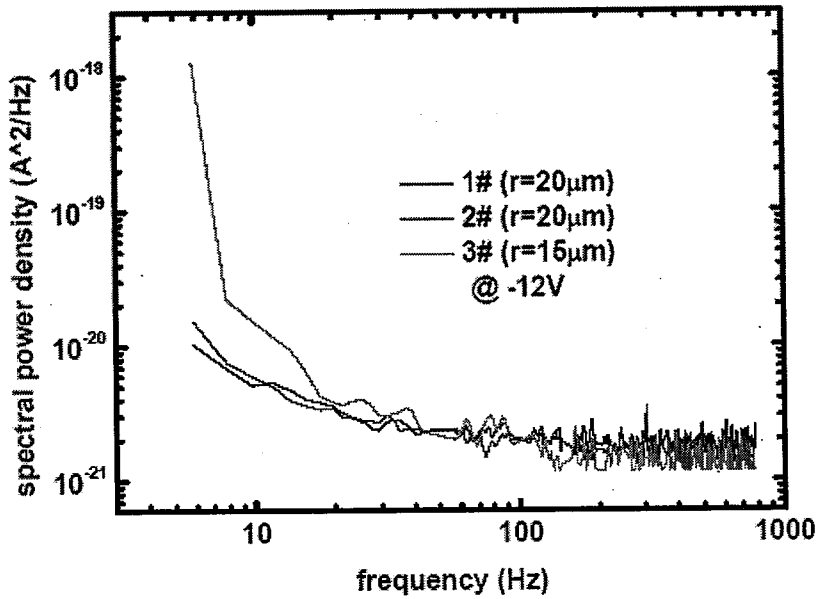


图 5.7 半径不同的三个器件的噪声功率谱(-12V)
 Fig 5.7 Spectral power density of devices with different radius at -12V

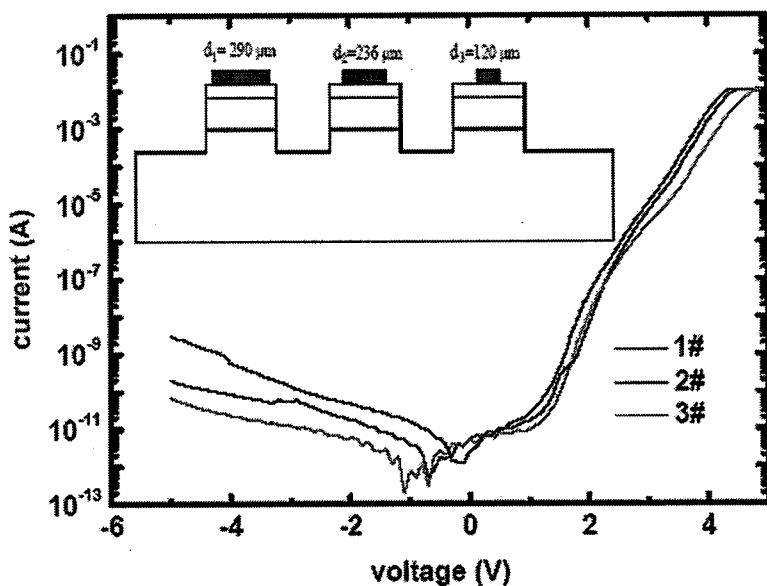


图 5.8 器件的电流-电压特性曲线

Fig 5.8 The current-voltage characteristics of devices with $r=20 \mu\text{m}$

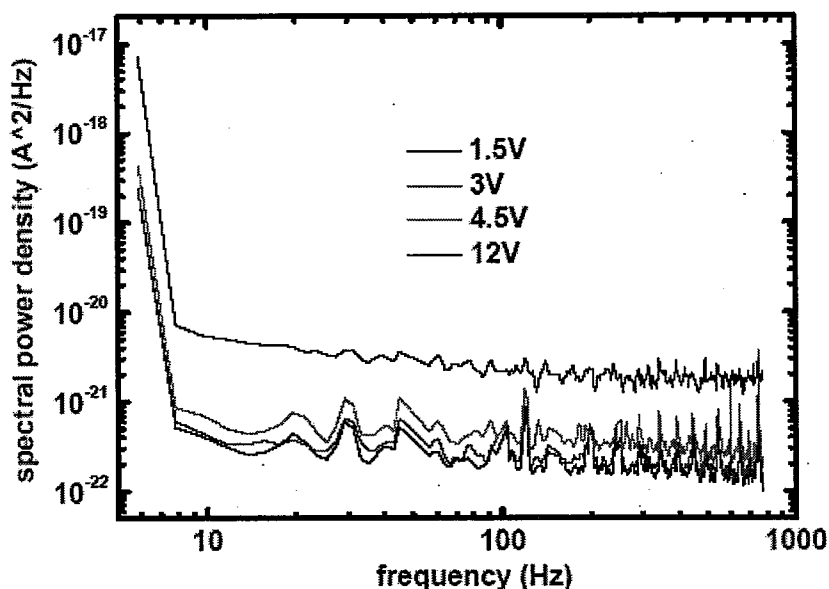


图 5.9 不同反偏电压下, 2#器件的噪声功率谱

Fig 5.9 The spectral power density of sample 2, at different reverse bias

半导体器件的噪声不仅仅与材料有关系, 还受到结构、结构参数以及制备工艺等因素的影响, 如具有 SAM 结构 APDs 器件的倍增噪声远低于普通 p-i-n APDs 器件的倍增噪声^[13], 电极接触不良、表面受气氛条件的影响、甚至晶体中的缺陷都可大大增加 $1/f$ 噪声^[14]等。制备了 p-GaN($0.1 \mu\text{m}$)/i-GaN($0.2 \mu\text{m}$)/n-GaN($3 \mu\text{m}$)结构, 光敏面半径为 $150 \mu\text{m}$, 而 p 电极不同的器件(图 5.8 插图所示), 它们电流-电压特性曲线如图 5.8, 暗电流随着 p 电极直径的增加而增

加, 如反偏-5V 时, 分别为 3.118×10^{-9} A、 2.0285×10^{-10} A 和 7.015×10^{-11} A。

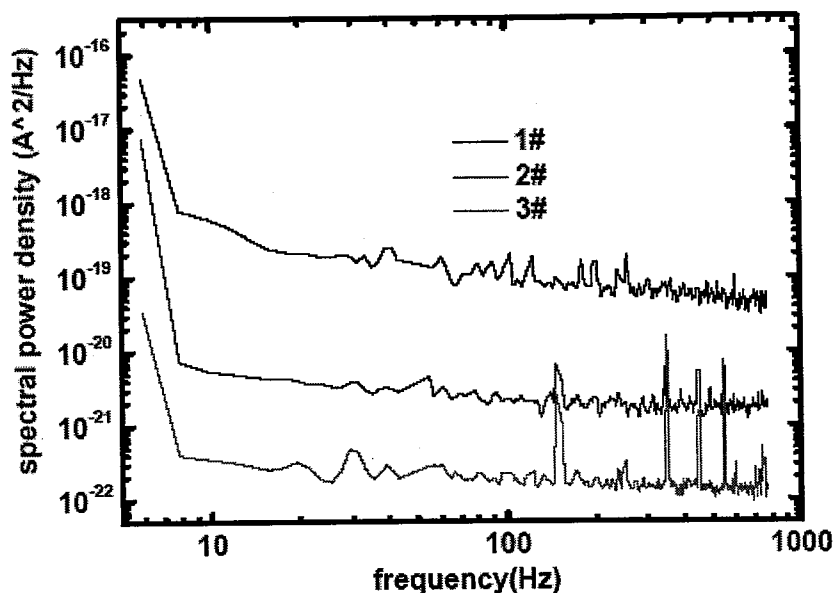


图 5.10 反偏电压 12V 时, 三个器件的噪声功率谱

Fig 5.10 At -12V, spectral power density of these three samples

图 5.9 给出了 2#器件的噪声功率谱(反偏电压不同), 低频下, 器件表现出了较大的 $1/f$ 噪声。低频下, $1/f$ 噪声满足经验公式:

$$S_n = S_0 \frac{I_d}{f^\gamma} \text{ (A}^2\text{/Hz)} \quad (5.8)$$

其中 I_d 为器件的暗电流, S_0 和 γ 为拟合参数, 最好的结果就是根据噪声功率谱密度实验数据拟合得到的 γ 值为 1, S_0 值不随反偏电压变化。反偏电压 12V 时, 三个器件的噪声功率谱如图 5.10 所示。

5.3 结论

本章以半导体光电器件的噪声基本理论为基础, 测试与分析器件噪声的影响因素。首先, 从设计和分析电阻的热噪声为基础, 得到了阻值为 $5 \text{ k}\Omega$ 、 $20 \text{ k}\Omega$ 以及 $10 \text{ M}\Omega$ 的电阻的噪声功率谱, 并与热噪声计算结果进行了对比。其次, 设计了器件噪声测试系统, 并利用直流电源为器件提供偏压, 得到了半径为 $20 \text{ }\mu\text{m}$ 器件的噪声功率谱随反偏电压变化关系, 并且把材料结构相同而尺寸不同器件的测试结果进行了对比。最后测试了光敏面半径为 $150 \text{ }\mu\text{m}$ 器件的噪声功率谱随反偏电压的变化关系; 并研究了相同的反偏电压下, S_n 随 p 接触电极接触面积增

加而增加。但是,对器件所加的反偏电压最高仅为 12V,远低于雪崩倍增时器件所需要的反偏电压:(1)在-12V 时,器件噪声增加明显,随着所加反偏电压增至雪崩击穿电压,噪声等效功率大于 $10^{-21} \text{ A}^2/\text{Hz}$,器件噪声太大。因而,改善器件工艺(如干法刻蚀和表面处理条件的优化、高质量的 p 接触电极等)仍然是下一步工作的重点与方向,尽可能地减小器件暗电流,降低噪声;(2)测试高反偏电压下器件噪声,需要考虑并设计复杂的测试电路。

参考文献

- [1] Feng Ma, Monte Carlo Simulation of Gain, Noise, and Speed of low-noise and high-speed avalanche photodiodes, 德州大学博士论文, 2003
- [2] R.J.McIntyre, Multiplication noise in uniform avalanche diodes, IEEE Trans.Electron. Devices, vol.ED-13, pp.164-168, 1966
- [3] J.L.Pau, C.Bayram, R.McClintock, M.Razeghi and D.Silversmith, Back-illuminated separate absorption and multiplication GaN avalanche photodiodes, Appl.Phys.Lett.92,101120, 2008
- [4] Ryan McClintock, UV Photodetectors, Focal Plane Arrays and Avalanche Photodiodes, 美国西北大学博士论文, 2007
- [5] W.T.Tsang 主编, 杜宝勋等译, 江剑平校, 半导体光检测器.
- [6] G.Xiangyi, L.B.Rowland, G.T.Dunne, J.A.Fronheiser, P.M.Sandvik, A.L.Beck, and J.C.Campbell, Demonstration of ultraviolet separate absorption and multiplication 4H-SiC avalanche photodiodes. IEEE Photonics Technology Letters, Vol.18, pp.136-138, 2006
- [7] Y.Okuto, C.R.Crowell, Phys.Rev.B, 10, 4284, 1974
- [8] P.Yuan, S.Wang, X.Sun, X.Zheng, A.L.Holmes, Jr. and J.C.Campbell, IEEE Photonics Technol.Lett.12,1370(2000)
- [9] S.Wang, F.Ma, R.Sidhu, X.G.Zheng, S.Sun, A.L.Holmes, Jr. and J.C.Campbell, (unpublished)
- [10] F.Ma, S.Wang, X.Li, K.A.Anselm, X.G.Zheng, A.L.Holmes, Jr. and J.C.Campbell, Monte Carlo simulation of low-noise avalanche Photodiodes with heterojunction, J.Appl.Phys. 92(8), pp.4791-4795, 2002
- [11] S.A.Plimmer, C.H.Tan, J.P.R.David, R.Grey, K.F.Li, and G.J.Rees, Appl.Pys.Lett., 75,2936,1999
- [12] R.McClintock, J.L.Pau, K.Minder, C.Bayram, P.Kung, and M.Razeghi, Hole-initial multiplication in back-illuminated GaN avalanche photodiodes, Appl.Phys.Lett.90,141112,2007
- [13] Ryan McClintock, Jose L.Pau, Can Bayram, Bruno Fain, Paul Giedraitis, Manijeh Razeghi, and Melville P. Ulmer, III-Nitride avalanche photodiodes, Proc. Of Spie Vol.7222 72220U
- [14] 汤定元, 糜正瑜等编著, 光电器件概论, 1989

第六章 提高器件性能——工艺条件优化

本章首先借助电流-电压特性曲线、俄歇电子能谱元素深度分布(AES)研究多层金属 Ti/Al/Ti/Au 与 $n\text{-Al}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{N}$ 之间形成欧姆接触的机理;其次分析 KOH 溶液表面处理降低日盲器件暗电流的原因,根据 AES 测试数据分析了表面元素的变化,同时在 KOH 溶液表面处理的材料上制备了传输线(TLM)测试电极,研究这种表面工艺对电极电学性能的影响;最后,研究快速热退火工艺对材料表面的影响,以及对 $\text{SiO}_2/\text{AlGaN}$ 接触界面的作用而制备了 MIS 器件,测试器件电容并对结果进行分析。

6.1 引言

经过几十年的发展, GaN 基光电子器件有了广泛的应用,因它在弱紫外探测、高温、高速和特殊光电子器件等方面具有潜在的发展前景而引人瞩目。其中,随着探测技术的发展,波长小于 300 nm 的紫外器件也就成了人们研究焦点,如深紫外探测器和 LED 等,这就需要增加 Al 组分。但是,随着 Al 组分的增加,无论是给材料生长还是器件制备等都带来许多急需解决的技术难题^[1-3]。

材料方面,随着 Al 组分的增加,存在的挑战及要解决的问题^[4]: 1) AlGaN 材料的特征厚度减小; 2) AlGaN 与宝石衬底之间存在 13%-16%的晶格失配,在外延材料中引入大量的缺陷; 3) 如何优化生长条件而降低异质结的存在对材料质量的影响,以及精确控制各层材料的厚度; 4) 提高材料的导电性,尤其是 p 型材料的空穴浓度; 器件制备工艺方面,从高铝组分 AlGaN 材料和器件的特点看, n/p 欧姆接触电极、刻蚀速率快但是表面损伤小的干法刻蚀技术、表面处理方法的探索以及快速热退火对 $\text{SiO}_2/\text{AlGaN}$ 界面的影响等都是研制高铝组分紫外探测器的关键工艺。

6.2 Ti/Al/Ti/Au/n-AlGaN 欧姆接触研究

电极是决定电子器件热稳定性、输出功率以及寿命的关键因素之一。一方面,高质量的接触电极能够促使器件发挥最高性能,如 Zhu Yanling 等^[5]通过对 Ti/Al/Ti/Au/n- $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ 电极进行快速退火而使得日盲探测器的响应率从 0.0696A/W 增加到 0.0764A/W。另一方面,较大的接触电阻给器件带来致命的危害,如雪崩器件的工作电流大,大电阻的电极功率耗散大,缩短器件寿命,图 6.1 是测试过程中被损害的器件(图中电极表面图标为显微镜聚焦标志),与 n 电极相比, p 层材料的导电性能差以及大接触电阻而出现了损害的痕迹。但是,在高铝组分

AlGaIn 材料上制备接触电阻率低, 性能稳定的欧姆接触电极已成为一个关键的科学和技术难题, 主要有以下两个方面的原因: (1) 随着 Al 组分的增加禁带宽度从 4.3eV 增至 6.2 eV, 而电子亲和能从 4.1 eV 减小到 2.05 eV, 难以选择具有合适功函数的金属, 目前常用的则是 Ti/Al 体系; (2) 掺入杂质的离化能高, 难以形成重掺杂的材料, Si, In-Si 等常作为形成 n 型 AlGaIn 材料杂质, 但是掺入杂质的离化率也较低, 而重掺杂的半导体材料是提高载流子隧穿几率而通过场发射形成欧姆接触的重要因素。

考虑与器件制备工艺的兼容性, 选择 $p(\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{N})/i(\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{N})/n\text{-Al}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{N}$ 多层材料, 清洗, Ar^+ 刻蚀至 n-type 层, 光刻后用电子束溅射生长 Ti/Al/Ti/Au 多层金属, 然后进行快速热退火, 氮气气氛中, 变化退火温度和时间(700 °C, 45 s、750 °C, 45 s 和 800 °C, 45 s); 最后测试伏安特性曲线, 并用俄歇电子能谱深度分布 (AES) 分析金-半接触界面的状况。图 6.2 所示为退火前后的 I-V 特性曲线。从图中可以看出, 退火前, 溅射生长的金属电极与半导体材料之间形成了肖特基接触。由 I-V 特性曲线可知, 在 750 °C, 45 s 时退火时电极的伏安特性最好。由此可知, 退火对金-半接触有很大的影响, 反应生成的合金有利于减小肖特基势垒的高度。

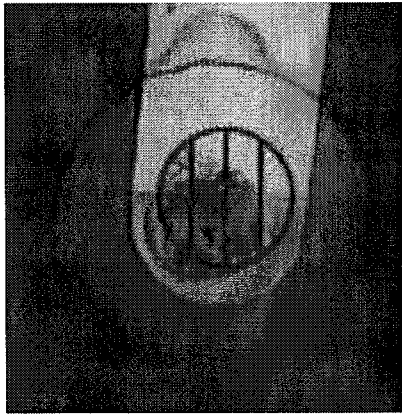


图 6.1 测试完成后的器件照片

Fig 6.1 Photograph of devices after being test

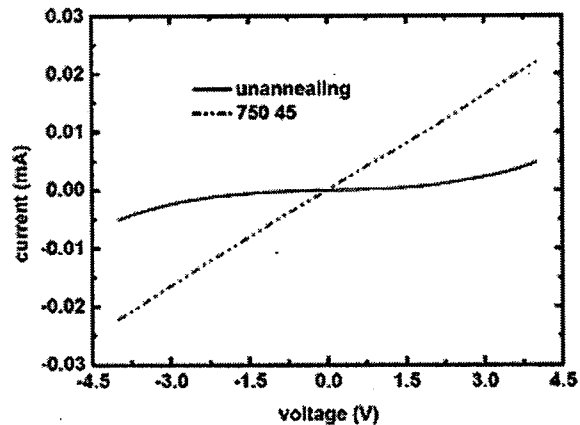


图-6.2 电极的电流-电压特性曲线

Fig 6.2 Current -voltage characteristics of electrodes

为了分析不同的退火条件对金-半接触电极的影响, 测试了退火后电极的元素深度分布图, 图 6.3(a)-(c)所示。从图中可以看到, 退火后各金属层相互扩散, 不再有明显的界面, 根据相图可知不同的温度下反应而生成不同的(Ti,Al)合金相, 如 TiAl , Ti_3Al 及 Ti_2Al (但是合金温度高于 650°C), 这些合金相的电阻率比金属 Ti 的电阻率低, 功函数小, 对 Ti/Al 基金属组合与 n-GaN 材料形成欧姆接触起着关键性的作用^[6]。另一方面, 各层金属之间反应而生成(Ti, Al)合金相有利于欧姆接触的形成, 同时还会在表面留下 N 空位(施主型杂质), 增加界面处的

电子浓度。

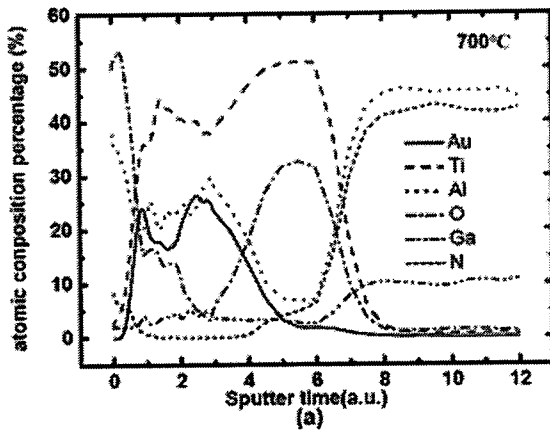


图 6.3(a) 700°C 退火时电极的 AES 元素分析
Fig 6.3(a) AES profiles for electrodes annealed at 700°C

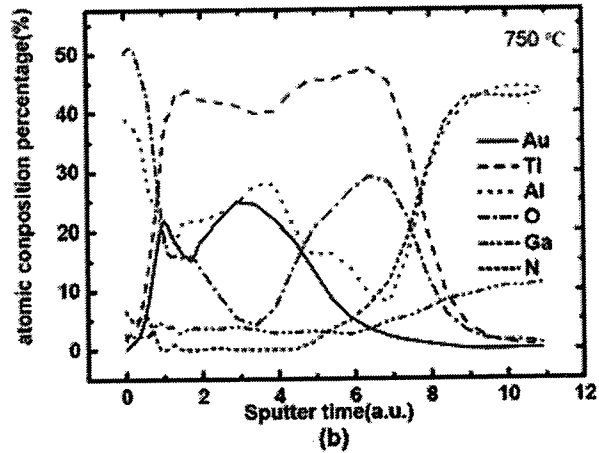


图 6.3(b) 750°C 退火时电极的 AES 元素分析
Fig 6.3(b) AES profiles for electrodes annealed at 750°C

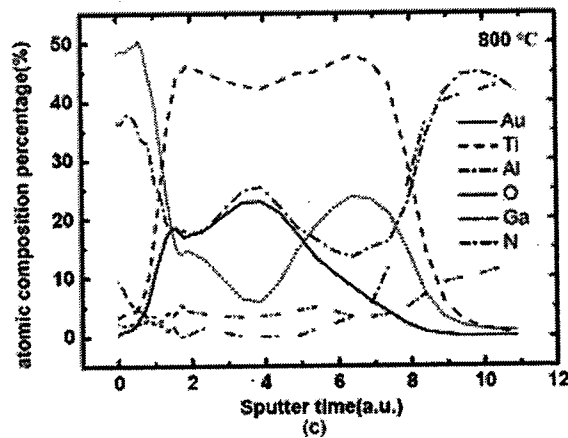


图 6.3(c) 800°C 退火时电极的 AES 元素分析
Fig 6.3(c) AES profiles for electrodes annealed at 800°C

快速热退火温度为 700°C，各层金属之间的互扩散还不够充分，金属 Al 与内层金属 Ti 之间存在着分层，没有形成(Ti, Al)合金相，而金属与材料之间仍存在界面，只有表面极薄的一层材料与 Ti 反应，并且在界面存在一氧元素峰，使得极易被氧化的金属 Ti 生成了其氧化物，降低了其导电性。这一层氧元素的含量很高，有可能是刻蚀时和在空气中放置时基体材料被氧化而引入的。退火温度 750°C 时，随着退火温度的增加，氧元素向金属层内的扩散深度越大，即高温退火时界面处的氧化层宽度大，而增加势垒高度，金属 Al 向内扩散，内层 Ti 与 N 元素反应的同时，部分与材料的 Al 元素发生了反应，使得界面处不仅出现了(Ti, Al)相，而又留下了大量的 N 空位；退火温度 850°C 时，氧元素继续向外扩散，分布了整个金属

电极, 而表层 Au 相金属电极内部扩散越多, 而元素 Au 会降低 Ti/Al-n-GaN 接触的性能, 这就使得 800 °C 退火电极的性能降低^[7]。

6.3 KOH 溶液表面处理对探测器暗电流的影响

如何降低反偏暗电流提高器件响应率、降低其噪声和获得速率、频率特性等是制备日盲紫外探测器所需要解决的又一个关键技术。器件制备工艺(如 ICP 干法刻蚀形成台面及钝化层的制备)会增加表面和侧面的界面态(刻蚀损伤(如 N 空位), 或副产物, 或氧化物), 可能引起的问题如下: 1) 增加界面氧化层的厚度, 使得金属-半导体间的接触是 MIS 结构而不是 M/S 结构; 2) 使得半导体材料表面费米能级出现“钉扎”(pinning)效应^[8]; 3) 在表面形成大量的陷阱中心, 使得肖特基二极管有大的漏电^[9]或者是 HEMTs 器件中出现电流崩塌现象^[10]; 4) 在禁带中引进大量的施主或受主能级, 对材料的光学性能产生很大的影响^[11]; 5) 给表面钝化技术带来一定的困难。

6.3.1 试验过程

p ⁺ -GaN
p-Al _{0.45} Ga _{0.55} N
i-Al _{0.45} Ga _{0.55} N
n-Al _{0.65} Ga _{0.35} N
HT-AlN
LT-AlN
sapphire substrate

图 6.4 制备 p-i-n 结构的紫外探测器所采用的材料结构
Fig 6.4 The structure of material fabricating UV detectors

图 6.4 所示为制备 p-i-n 结构的紫外探测器所用的材料结构, 霍尔测试结果显示 p、i 及 n 层材料的掺杂类型及浓度分别为: $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (Si), $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (undoped) 和 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ (Mg)。最上层 10nm 厚的 GaN 帽层, 可以减小 AlGa_{0.55}N 材料的自然氧化, 也可以增加 p 型材料的电学性能。外延生长的材料经划片后分为两组, 一组用来制备 p-i-n 结构的紫外探测器(group A), 另一组为了分析研究 KOH 溶液表面处理工艺对材料界面状况的影响(group B)。三氯甲烷、乙醚、丙酮、无水乙醇等有机溶剂清洗材料表面去除表面的有机污染物, 其中每一步都浸泡大约 5 min 左右, 去离子水冲洗后用高纯氮气吹干。试验过程中, 两组样品放在一起进行 ICP 刻蚀, 刻蚀后的 group A 及 group B 的部分样品被 105 °C 的 KOH 溶液(10%质量比)浸泡 10s,

把生长 n 电极后的样品置于退火炉中在 N_2 气氛下快速热退火 (RTA), RTA 的温度和时间分别为 800°C , 90 s 。

6.3.2 测试结果与分析

图 6.5 为采用两种不同工艺制备得到的 128×1 紫外探测器的电流-电压特性曲线, 在 -8 V 时, 经表面处理制备得到的探测器暗电流为 $6.88\times 10^{-9}\text{ A}$, 比未表面处理器件的暗电流降低近 10^3 倍。3.4.1 节分析可知, 界面态密度、钝化层内的固定电荷及串联电阻(如 M/S 接触电阻)主要影响器件的表面漏电, 而某些制备工艺会引入大量的界面态, 如 ICP 干法刻蚀, 高能离子的作用会引入大量的界面态, 吸收气体中的 O 原子而形成氧化物(AlO_x 及 GaO_x)及 Al-Ga-N-O 多元化合物, 这些反应物就会堆积样品表面, 一些柱形“突起”分布其表面(比较两种氧化物的吉布斯形成能(AlO_x : -1582.3 kJ/mol ; GaO_x : -998.3 kJ/mol))及 Al、Ga 比例可知, 表面的氧化物更多的是 Al_2O_3 以及高能离子的作用造成缺陷(如 N 空位), 会导致材料表面的界面态密度很大而形成表面产生电流、表面耗尽层内产生电流或近表面的隧穿电流^[12, 13]等, 这对光伏探测器的性能有很大的影响。

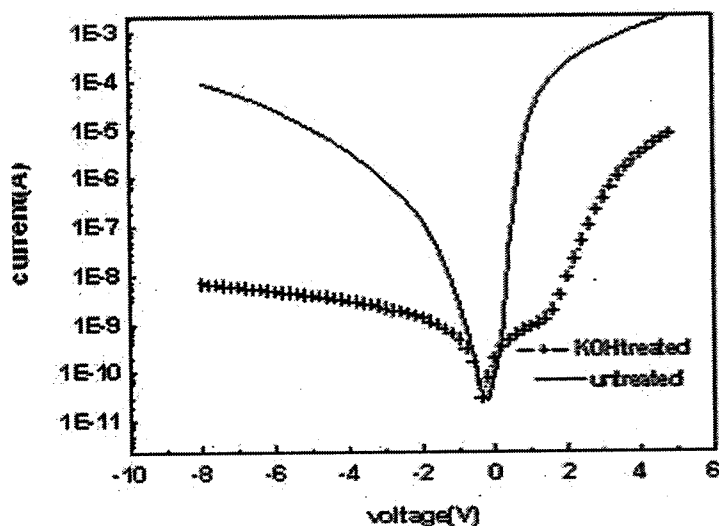


图 6.5 日盲器件的电流-电压特性曲线

Fig 6.5 The current-voltage characteristics of Solar-blind UV detectors

为了深入研究表面处理前后材料表面元素成分的变化, 对 B 组样品进行俄歇分析(如图 6.6 所示)。表 6.1 是根据 AES 数据计算出的材料表面各元素成分百分含量的比值。从表中可知, 处理后, Al/O 和 Ga/O 的比值增大, 刻蚀后表面的氧化物溶于 KOH 溶液使得表面 O 元素浓度下降所致, 相反, Al/Ga 比例从 4.24 下降到 3.04, 更加接近材料组分的正常比例, N/Al、N/Ga 和 N/O 比例增加明显, 处理后表面 N 空位的浓度减小而 Ga、Al 浓度恢复正常, 即刻蚀

过程中产生的刻蚀产物及自然氧化物溶于 KOH 溶液, 进而恢复材料表面的本征配比。

表 6.1. KOH 溶液处理前后材料表面各元素成分百分含量的比值:

Table 6.1 Atomic composition percentage ratio at n-Al_{0.65}Ga_{0.35}N pre- and post-treated using KOH solution

	Al/O	Ga/O	Al/Ga	N/Al	N/Ga	N/O
treated	1.02	0.24	4.24	0.38	1.59	0.38
untreated	3.34	1.10	3.04	0.94	2.87	3.15

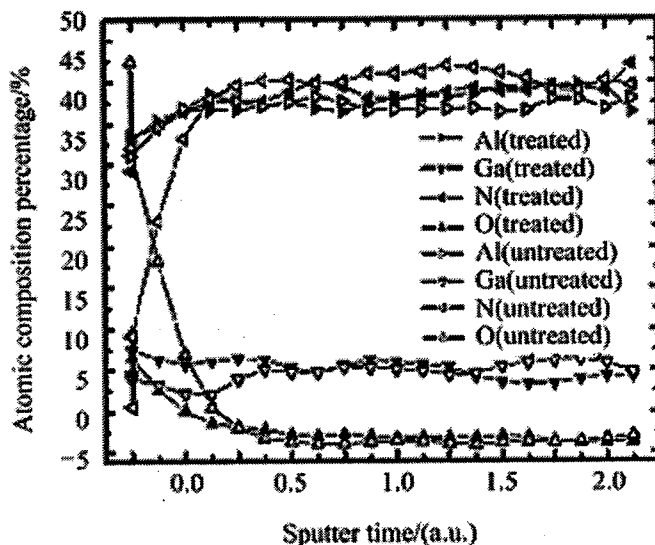


图 6.6 材料表面的元素 AES 图像

Fig 6.6 AES profiles of untreated and treated materials

另一方面, 利用 KOH 溶液对干法刻蚀后的材料表面进行处理, 有效地去除表面刻蚀损伤层、刻蚀产物及自然氧化物, 对恢复材料表面的本征特性具有促进作用, 但同时也减小了表面 N 空位的浓度。这种做法恰好与 Z.F.Fan 等^[14]的试验相反, 他们是通过利用干法刻蚀增加表面 N 空位浓度而提高 M/S 接触的电学性能。为了观察表面状况的变化对接触电极电学性能的影响, 测试了 TLM 模型的各电极之间的伏安特性, 图 6.7 所示是最小间距的两个电极间的 I-V 特性曲线。经 KOH 溶液处理的材料与金属之间形成了欧姆接触, 接触电阻为 86.51Ω, 计算得到比接触电阻 ρ_c 为 $8.35 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}^2$ 。而未处理的材料表面形成了肖特接触, 非线性 I-V 特性曲线, 其接触电阻为 97.42Ω。

由上面分析可知, KOH 溶液处理使表面氧化层厚度减小, 电子越过比较小的势垒就可以实现隧穿, 增加了隧穿现象发生的几率。然而, 处理后表面 N 空位的浓度减小, 仅仅从生长金属前的表面处理来讲, 这种现象可能会对 n-AlGa_{0.35}N 材料金半接触的电学性能产生不良的影响, 结果是与 Sun 等人^[15]的试验结果相同。但是, 对 Au/Ti/Al/Ti/n-AlGa_{0.35}N 组合在 N₂ 中进行

高温 RTA 后, 各层金属电极间以及金属与材料间反应生成降低势垒高度的合金, 界面处主要为 TiN($\Phi_m(\text{Ti})=3.09\text{eV}$, $\Phi(\text{TiN})=3.74\text{eV}$), 并留下 N 空位, 于是就弥补了之前表面处理时减少的 N 空位, 在表面形成高密度电子层^[6]。于是, 宏观上的结果就是表面处理刻蚀后的样品表面, 不但没有对电极带来不良的影响, 甚至可以在一定程度上提高其欧姆接触性能, 甚至是器件的性能。

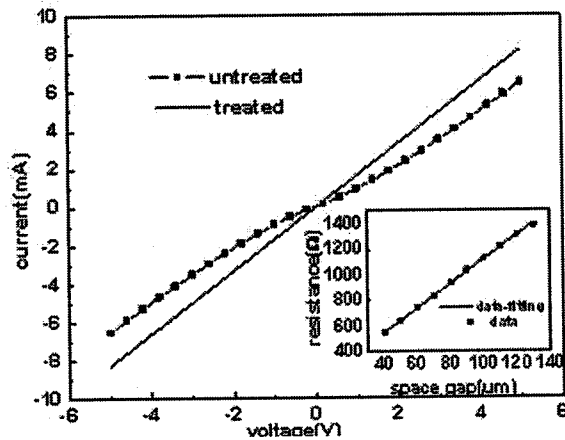


图 6.7 TLM 模型 I-V 特性曲线(间距 40 μm)

Fig 6.7 I-V characteristic of two pads with gap of 40 μm in TLM model without and with KOH

6.4 N₂ 等离子体表面处理

图 6.8 所示为 N₂ 等离子体处理 20 min 前后材料表面的显微镜照片($\times 1000$ 倍), 等离子体处理后表面残留的颗粒物数量显著减小, 台面轮廓变得更清晰一些。另外, 由表 5.1 可知, 即使用 KOH 溶液处理后, 材料表面不可避免的还会有大量 N 空穴存在, 而 N 空位是一种浅施主缺陷, 它能增加材料表面电子浓度。表面残留物以及 N 空位都会对器件性能带来很大的危害, 如降低肖特基势垒的高度。然后观察 N₂ 等离子体处理对器件的影响, 利用 PECVD 技术生长钝化层, 制备 GaN 基 APDs 器件, 测试得到了器件的暗电流(图 5.9), 器件光敏面半径为 15 μm 。利用 KOH 及 N₂ 等离子体工艺制备的器件表现出了相对较好的电流-电压特性, 但是在没有用 N₂ 等离子体工艺制备的器件电流-电压特性曲线上发现了“异”现象(3.3.3 节), 反偏电压为 50V 时, 比用 N₂ 等离子体处理工艺制备的器件的电流增加近 100 倍。Ji-Myon Lee et al^[16] 通过试验发现用 N₂ 等离子体处理 ICP 刻蚀后的材料, 处理后其表面 PL 谱的强度增加, 半峰宽(FWHM)减小, 接触电阻率增加, 这种方法可以有效的去除表面刻蚀损伤及 N 空位。由此可见, 表面电子层会在表明形成电流路径, 降低表面电阻 R₁ 值, 并且随着反偏电压的增加而在台面侧表面耗尽层内发生雪崩现象, 使得电流-电压特性出现图 6.9 所示的现象。

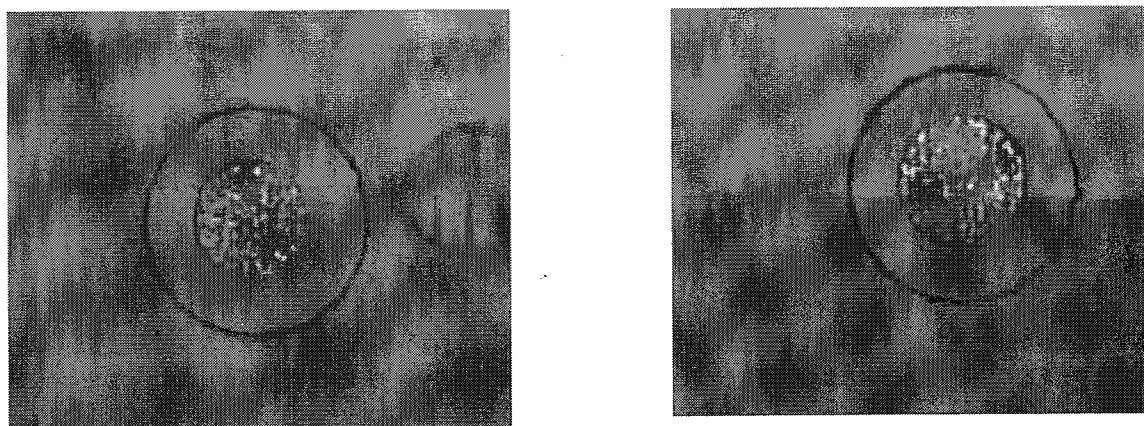


图 6.8 N_2 等离子体处理前后, 材料表面的形貌($\times 1000$)

Fig 6.8 The micrograph of material untreated or treated by N_2 plasma

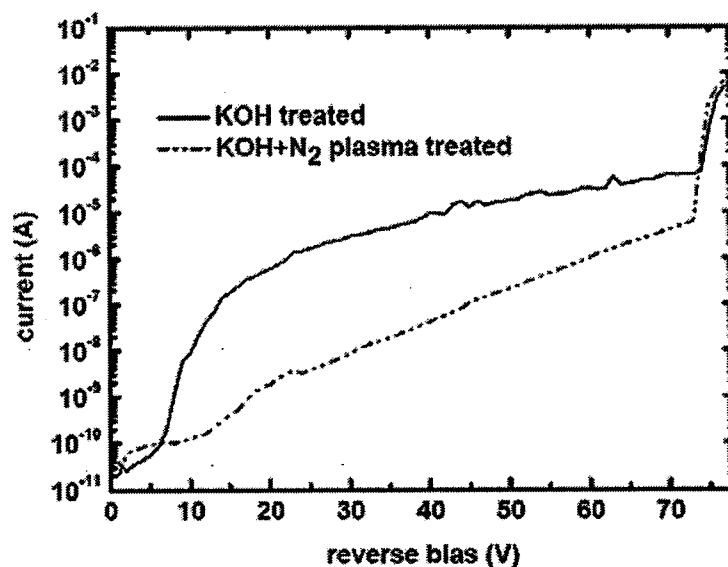


图 6.9 采用不同的表面处理工艺制备得到的 APDs 器件的暗电流

Fig 6.9 The dark current of GaN-based APDs with and without N_2 plasma treated

6.5 快速热退火工艺研究

GaN 基探测器的制备过程中存在相互矛盾的两个工艺过程: 光刻生长 n 电极与制备钝化层。如果从它们的先后顺序来讲有两种: 一是先利用光刻工艺生长 n 电极, 这样材料表面会受到光刻、空气等污染, 表面处理就起不到作用, 并且高温退火过程中的污染以及表面材料因高温分解而形成大量的表面态, 尤其是 N_2 很容易挥发而存在 N 空位和 Al、Ga 的悬挂键^[17]; 二是先制备钝化层, 这样钝化层就会在电极退火过程中经高温热处理。虽然, 有实验证明合适条件的快速退火是消除钝化层中电子或空穴捕获有效的方法, 但是, 条件不当也会降低钝

化层的绝缘效果以及增加界面态密度^[18, 19]。GaN 基 APDs 器件对电极、干法刻蚀后的材料表面及钝化层的要求都很高,尤其是在高铝组分 AlGaN 材料上制备电极,要形成欧姆接触往往都需要经过大于 750°C 温度下的快速热退火。本节利用 XRD、透射谱及反射谱来研究有无 Si₃N₄ 钝化层覆盖时,快速热退火后材料的变化;并用 MIS 器件的伏安特性曲线、以及电容等研究不同的退火温度和时间对 SiO₂/n-Al_{0.3}Ga_{0.7}N 界面以及钝化效果的影响。

6.5.1 对材料表面的影响

准备样品,清洗 p-GaN/i-GaN/n-GaN 样品表面;划片(两片,对比试验);Ar 离子刻蚀至 n 层材料,衬底表面只有一层约 2.5 μm GaN 薄膜材料;三氯甲烷、乙醚、丙酮、酒精等有机溶剂清洗后,用 KOH 溶液处理表面;一片样品表面利用 PECVD 生长 300 nm 的 Si₃N₄ 钝化层,同时用两个 Si 片为陪片;三片样品(一个 Si 片,两个样品)同时进行快速热退火,条件:氮气气氛,时间 10min,温度为 600°C;HF 缓冲液腐蚀去除样品表面的钝化层及对未生长钝化层的样品进行表面处理;进行透射谱、反射谱及双晶 X 衍射(XRD)测试;分析测试结果。

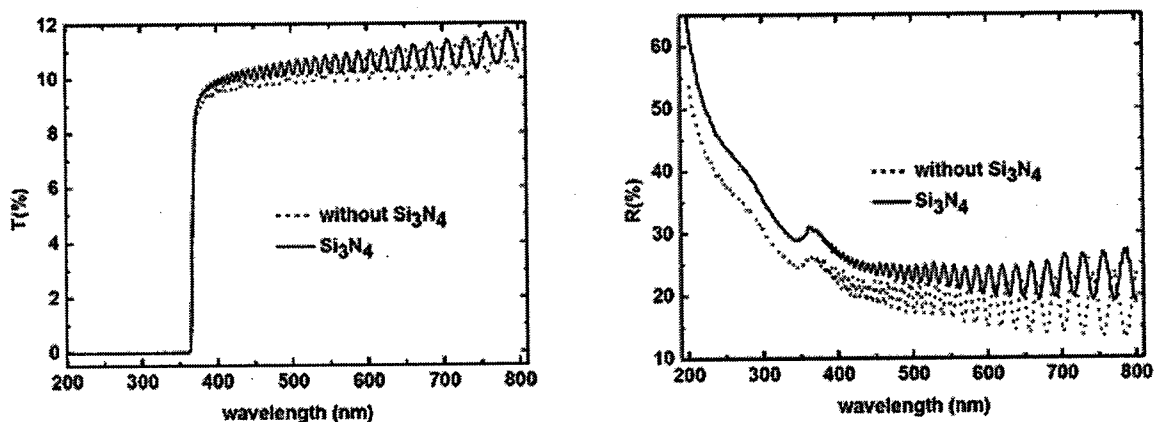


图 6.10 快速热退火后样品的透射谱(左图)及反射谱(右图)

Fig 6.10 Transmission(left) and reflection(right) of annealed samples

从图 6.10 可知,表面覆盖 Si₃N₄ 时样品的透射率比没有钝化层的样品的透过率稍大,而较陡峭的截止边在两种情况下没有变化;但是两种样品的反射谱发生了明显的变化,表面覆盖有钝化层样品的反射率大,并且其长波方向的震荡振幅减小,可能是退火后、去除钝化层时减小了表面缺陷及刻蚀产物,并且 Si₃N₄ 阻挡了薄膜材料表面 N 原子在退火过程中流失而形成 N 空位,这一工艺过程有效地改善了样品表面状况,对于减小表面态有利,降低了样品对光线的吸收及漫反射。样品表面的这种变化有利于降低光电探测器的暗电流,Xiangyi Guo^[20]在他的博士论文中就介绍了利用牺牲钝化层的方法而减小 SiC APDs 暗电流的方法,用这种方法制备的器件具有相对较好的电流-电压特性,暗电流较小(反偏电压 40 时(此器件的雪崩击穿电压 84V),暗电流密度小于 0.13nA/cm²)。为了进一步分析对材料结构等的影响,对两种样

品分别进行了双晶衍射测试, 试验结果如图 6.11 所示, 在表面覆盖有钝化层的样品上得到了相对较低的半高宽为 289.4 arcsec (高斯函数拟合)。

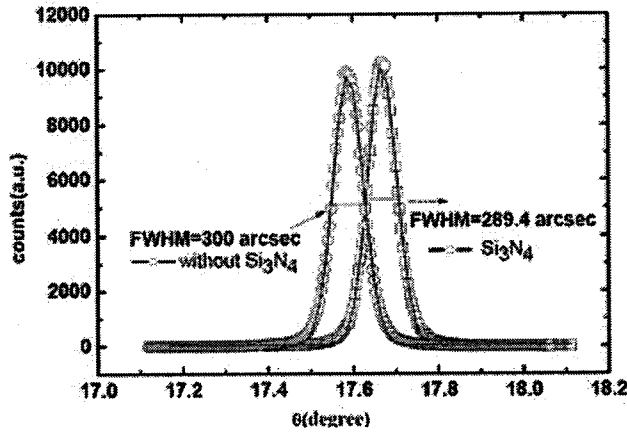


图 6.11 快速热退火后 GaN 薄膜材料的双晶衍射测试
Fig 6.11 Double-crystal diffraction of GaN film after RTA

6.5.2 对SiO₂钝化效果的影响

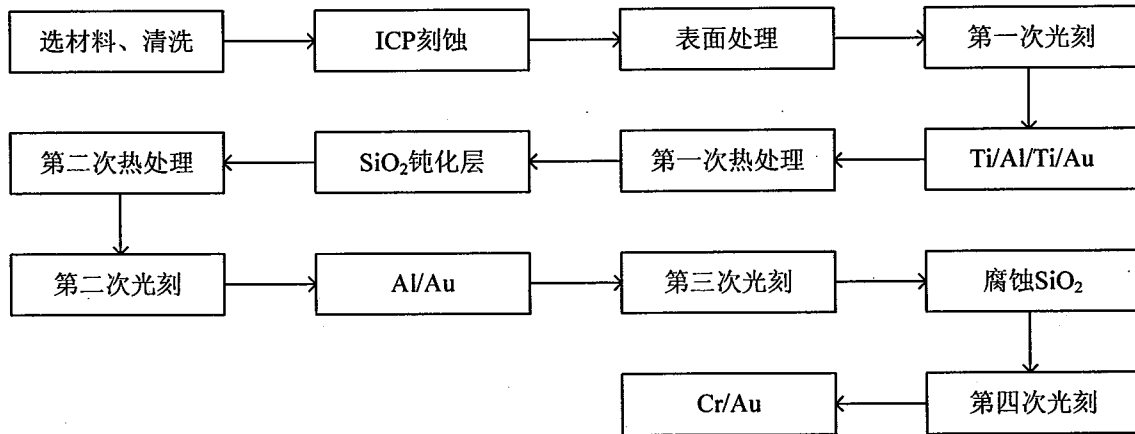


图 6.12 MIS 器件制备工艺
Fig 6.12 Procedure of fabricating MIS devices

MIS 器件的制备工艺如图 6.12 所示, 钝化层是用磁控溅射技术生长的 SiO₂, 厚度为 180 nm; 第一次热处理的条件为 750 °C, 45s, 氮气气氛, 对生长的 n 电极进行热处理以形成欧姆接触, 第二次热处理旨在对钝化层进行热处理, 温度低于 750 °C, 氮气气氛, 热处理时把样品分成四组, 样品编号及对应的退火条件在表 6.2 中列出。经测试, 退火后所有的样品的电极仍具有直线特性的电流-电压曲线, 电阻值变化不大。图 6.13 所示为 MIS 器件的结构图。

表 6.2 处理四组样品所用到的退火温度及时间

Table 6.2 Annealing temperature and time for different samples

样品	R1	R2	R3	R4
处理条件	550 °C 3min	400°C 5min	未进行热处理	550 °C 5min

制备好的器件通过键压装入屏蔽性较好的杜瓦中，用 Keythley 236 分析仪测试它们的电流-电压特性，图 6.14 给出。样品 R4 具有最差的电流-电压曲线，正、反向电流都比其他器件的电流大近一个量级；-5V 时，R2 比 R1 和 R3 的电流大，钝化层的绝缘性受到了快速热退火的影响；而正向，R1 比 R2 和 R3 的电流大；四组样品中，只有未经退火的样品 R3 表现出了相对较好的伏安特性。对 MIS 器件的电容进行了双扫描，电压范围为 -20V+20V，电压扫描速率为 0.01V/s。图 6.15(a)-(d)给出了四组样品的双扫 C-V 曲线，未退火样品(R3)及低温 400°C 5min(R2)退火样品双扫 C-V 特性曲线都发生了比较大的滞后现象。在 $\text{SiO}_2/\text{n-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 界面层附近有一层界面陷阱，它和 $\text{n-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 表面交换电子的时间常数比界面态长的多。当 MIS 结构的栅压从零偏压向负电压方向扫描时，慢界面态中的正电荷还比较少，随着偏压向负电压方向移动，GaN 表面电势越负，能带向上弯曲的越厉害，费米能级相对于态能级(界面附近的)向下移动，则慢界面态中的正电荷密度就会增大。当扫描电压又向正电压移动时，态能级中的正电荷来不及减小，仍对应于正电荷较多的情况，固 C-V 特性比原来向左发生偏移，这就形成了滞后现象^[21]。

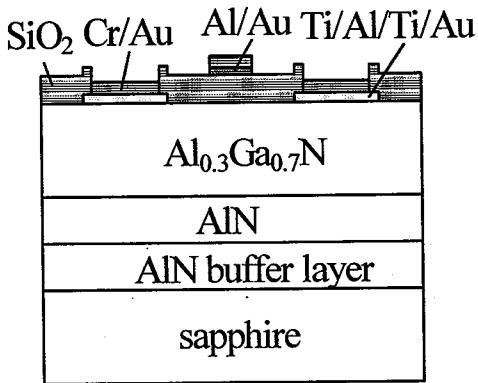


图 6.13 MIS 器件结构

Fig 6.13 Simple cross graph of MIS devices

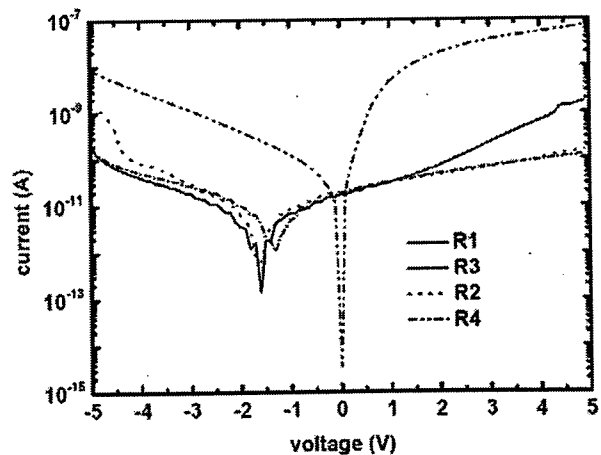


图 6.14 MIS 器件的电流-电压特性曲线

Fig 6.14 Current-voltage characteristics of MIS devices

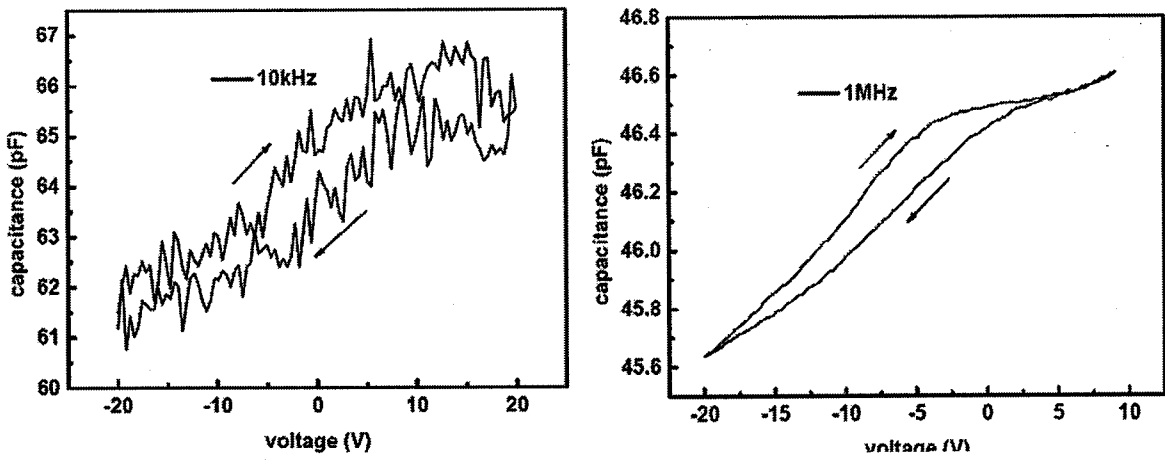


图 5.15(a) 样品 R3(未进行热处理)的双扫 C-V 曲线
Fig 5.15(a) Double scanning C-V curves of sample R3

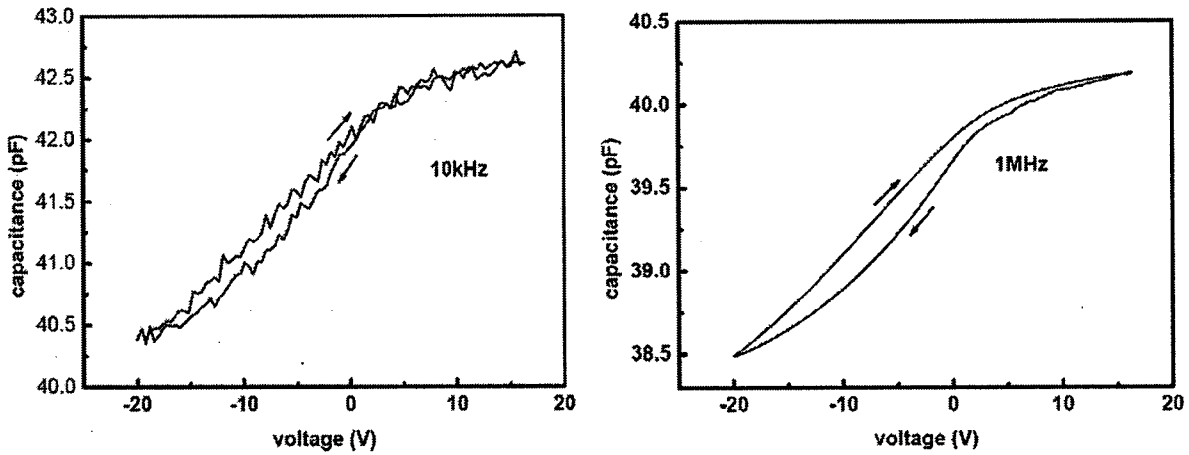


图 5.15(b) 样品 R2(400°C 5min)的双扫 C-V 曲线
Fig 5.15(b) Double scanning C-V curves of sample R2

根据 1MHz 频率下的 C-V 曲线, 计算出了 R3 和 R2 器件的平带电压分别为 2.12V 和 1.01V。取 Al 的功函数为 4.1eV, $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 的电子亲和能为 3.49eV(根据 GaN: 4.1eV 和 AlN: 2.05eV^[22, 23]插值求得)。把参数代入式 6.1 计算得到的样品 R3 和 R2 的介质层中积累的固定电荷均为负, 固定电荷面密度分别为 $2.54 \times 10^{11} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ 和 $1.21 \times 10^{11} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ 。为了得到表面态密度而测试了 MIS 器件的高低频电容, 利用高低频法计算 R3 和 R2 的最小表面态密度分别为 $1.15 \times 10^{11} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ 和 $6.39 \times 10^{10} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ 。虽然, 计算方法较为简单和粗略, 而仅得到了低频 10kHz 时的电容曲线, 得到的固定电荷面密度的值与实际情况会有些许差距, 但是从中可知, 钝化层中存在固定的负电荷, 且在 400°C 5min 的条件下退火一定程度上降低钝化层中的固定电荷以及界面态密度。

$$N_{fc} = \frac{Q_{fc}}{q} = \frac{C_i}{q}(V_{ms} - V_{FB}) \quad (6.1)$$

400°C 5min 退火可以降低氧化层中的固定电荷及界面态,但是随着退火温度的升高,样品的电容-电压特性曲线却有很大的变化,如图 6.15(c) 和(d) 所示。在低频下,正向电压时,电容出现一最大值和最小值后随着电压的增加而增加,较高的电压下本该是电子积累区而出现了载流子的注入效应。采用同样的方法计算得到的样品 R1 和 R4 的平带电压分别为 3.83V 和 5.45V。积累的固定电荷也均为负,面密度分别为 $4.59 \times 10^{11} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ 和 $6.53 \times 10^{11} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ 。高低频法计算得到它们的最小表面态密度分别为 $7.86 \times 10^{10} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ 和 $8.05 \times 10^{10} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ 。

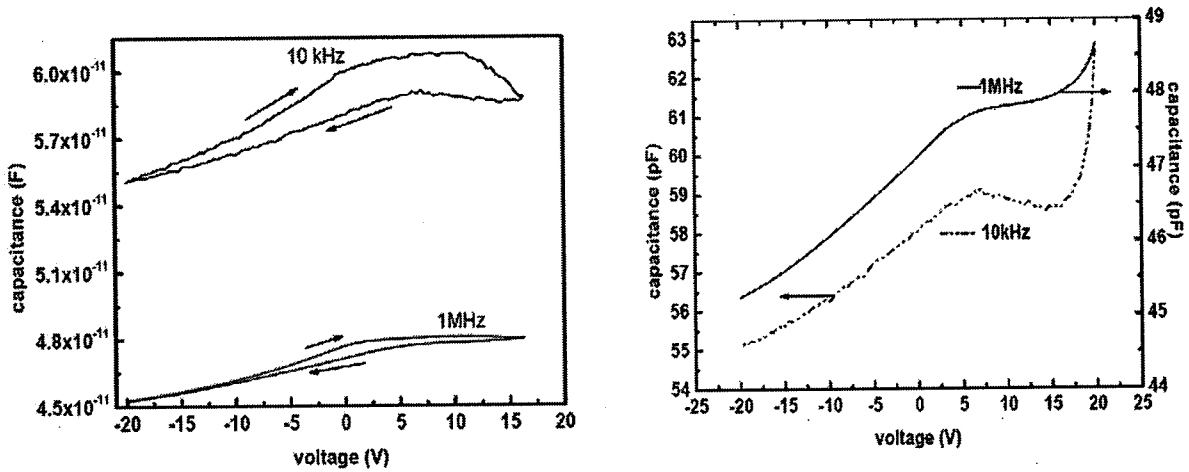


图 6.15 (c) 样品 R1(550°C 5min)的 C-V 曲线
Fig 6.15 (c) Double scanning C-V curves of sample R1

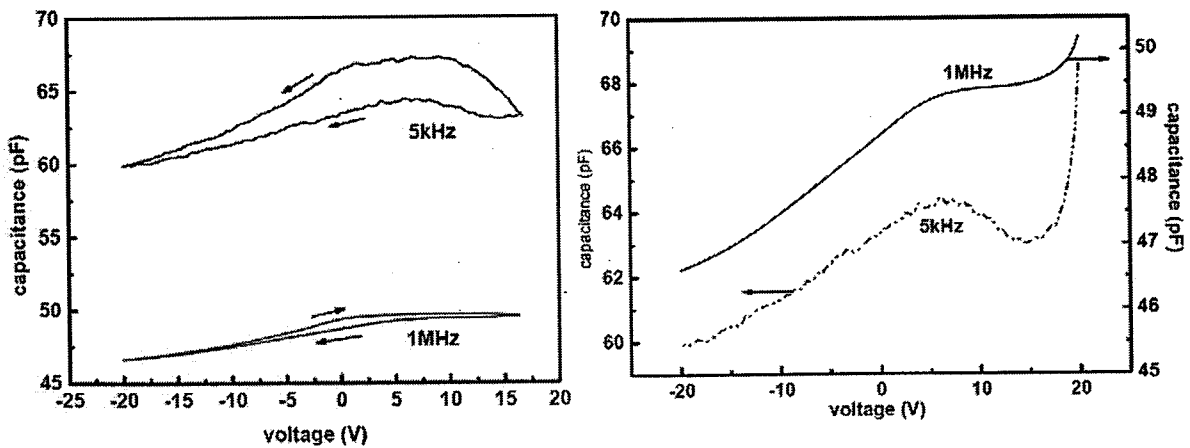


图 6.15 (d) 样品 R4(550°C 3min)的 C-V 曲线
Fig 6.15 (d) Double scanning C-V curves of sample R4

由上面的分析可以看到,一方面,退火可以降低界面态密度,界面处 SiO_2 和 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 材料在高温下发生反应,或是在界面处的 N 空位因在 N_2 气氛中退火而得以弥补,但是具体是哪一方面的原因还有待更详细的试验;另一方面,550 °C 退火时增加了钝化层中的固定电荷,而且随着退火时间的变长而固定电荷增加的越多。磁控溅射生长的钝化层中存在电子陷阱,并且在高温下电子能被释放到钝化层中成为钝化层的固定电荷,而且随着退火时间的延长,这一过程具有积累效果,因而也就会在钝化层中留下了大量的电子陷阱。低频下,电压比较低时,这些固定电荷对 MIS 器件电容的贡献并不明显,随着电压增加而电容一直是增加,但是电压增加到某值时,电场足够大,半导体界面处的电子被注入到氧化层中,被在退火过程中形成的电子陷阱所捕获,降低 MIS 的电容,但是随着电压继续增加,电子注入效应增强,以及绝缘层的绝缘效果在退火过程中已经受到了不同程度的降低,而出现了电容在高电压下迅速增加的现象。

6.6 小结

为了提高 GaN 基 APDs 器件性能,尤其是制备低暗电流、低雪崩过剩噪声及高倍增因子的日盲 APDs 器件,往往从两个方面入手:一是提高材料质量,设计合适的器件结构及结构参数,二是优化制备器件的工艺。本章中,主要讨论高铝组分 n 型材料的电极、KOH 表面处理降低日盲器件暗电流的机理及快速热退火后磁控溅射生长的 SiO_2 发生的变化,对器件钝化性能产生的影响。

研究 Ti/Al/Ti/Au 多层金属与高铝组分 n-AlGaIn 材料的金半接触,优化形成欧姆接触的电极比例及快速热退火的条件。选取 Ti/Al 比例为 50/50/30/30 nm 的金属组合,并且对电极在 700 °C、750 °C 及 800 °C 时退火,通过比较伏安特性而得到的最佳条件为 750 °C, 45s。对各种退火条件下的电极做了 AES 测试,结果发现 800 °C 退火界面处氧化层的厚度比其他两种条件退火电极的氧化层厚度大,而 700 °C 退火时还不足以使各电极互扩散而生成对有利于形成欧姆接触的反应物。KOH 溶液处理后可以使得器件的暗电流降低近 10^3 倍,表面 AES 分析可知表面氧化物溶于 KOH 溶液,同时可以有效的降低干法刻蚀损伤,更有利于恢复材料生长时的状况。从 TLM 测试及计算结果来看,KOH 溶液处理不会降低 n 型材料的接触电极性能,在表面处理过程中减小的 N 空位又在退火过程中由于生成高功函数的 TiN 而得以弥补。

KOH 溶液处理可以有效的去除表面氧化物及刻蚀损伤,但是从 AES 数据分析来看,处理后在表面仍有一定数量的 N 空位存在,利用 N_2 等离子体处理可以降低 N 空位,同时高能离子的作用使得材料表面的粗糙度降低。因此,采用 N_2 等离子体处理工艺制备的 APDs 的暗

电流减小，如反偏电压-50V时，暗电流降低近100倍。另外，采用四组研究了在N₂气氛中，不同温度和时间快速热退火对钝化层的影响。400°C及550°C退火都可以有效的降低界面态密度，但是550°C退火后钝化层中的固定电荷反而增加，并且这些MIS器件的低频C-V曲线在正向电压时出现最大值和最小值，较高的栅电压时电容随电压增加迅速，文中对这一现象进行了解释。

参考文献

- [1] M. L. Nakarmi, H.K.Kim, J. Li, J. Y. Lin, and H. X. Jiang, Enhanced p-type conduction in GaN and AlGa_N by Mg-d-doping. *Appl.Phys.Lett.* 82(18), pp.3041-3043, 2003.
- [2] K. Zhu, M.Lin.N., K. H. Kim, J. Y. Lin, and H. X. Jiang, Silicon doping dependence of highly conductive n-type Al_{0.7}Ga_{0.3}N. *Appl. Phys. Lett.* 85(20), pp.4669-4671, 2001.
- [3] S. Ruffenach-Clur, O.Briot, J.L. Rouvière, B. Gil, R.L. Aulombard, MOVPE growth and characterization of Al_xGa_{1-x}N. *Materials Science and Engineering*, B50, pp.219-222, 1997.
- [4] Jing Li, AlGa_N alloys and heterostructures-growth, characterization and application, doctor dissertation of Kansas State university, 2003
- [5] Zhu Yanling, Du Jiangfeng, Luo Muchang, Zhao Hong, Zhao Wenbo, Huang Lieyun, Ji Hong, Yu Qi, and Yang Mohua, Ohmic Contacts to n-Type Al_{0.6}Ga_{0.4}N for Solar-Blind Detectors. *半导体学报*, vol.29, No.9, pp.1661-1665(2008).
- [6] Abhishek Motayed, Ravi Bathe, Mark C.Wood et al., Electrical, thermal, and microstructural characteristics of Ti/Al/Ti/Au multilayer ohmic contacts to n-type GaN. *J.Appl.Phys.* 93(2): 1087-1049.
- [7] Z. Fan, S.N.Mohammad, W. Kim, Ö. Aktas, A. E. Botchkarev, and H. Morkoç, Very low resistance multilayer ohmic contact on n-GaN, *Appl. Phys. Lett.* 68, 1672, 1996.
- [8] T Hashizume and H Hasegawa, Effects of nitrogen deficiency on electronic properties of AlGa_N surfaces subjected to thermal and plasma processes. *Applied Surfaces Science*, 234, pp.387-397, 2004.
- [9] Tamotsu H., Junji K. and Hideki H., Leakage mechanism in GaN and AlGa_N Schottky interfaces. *Appl.Phys. Lett.*, 84(24) pp. 4884-4886, 2004.
- [10] Zhao Zi-qi, Du Jiang-feng, Luo Qian et al., Research of the impact of the surface states on the current collapse of the GaN HEMTs. *Nanoelectronic Device & Technology(微纳电子)*, 3 pp. 121-124, 2006.
- [11] Qian Fan, S.Chevtchenko, Xiangfeng Ni et.al, Reactive ion etch damage on GaN and its recovery. *J.Vac.Sci.Technol.*, B24(3), pp.1197-1201, 2006.
- [12] Jörg Neugebauer and Chris G.Van de Walle, Atomic geometry and electronic structure of native defects in GaN. *Phys.Rev.B*, 50(11), pp. 8067-8070, 1994.
- [13] D.C.Look, G.C.Farlow, P.J.Drevinsky, et al, On the nitrogen vacancy in GaN. *Appl.Phys.Lett.* 83(17), pp.3525-3527, 2003.
- [14] ZhiFang Fan, S.N.Mohammad, Wook Kim et al., Very low resistance multilayer Ohmic contact to n-GaN. *Appl.Phys.Lett.* 68(12), pp. 1672-1674, 1996.
- [15] J.Sun, K.A.Rickert, J.M.Redwing et al, p-GaN surface treatments for metal contacts. *Appl.Phys.Lett.*, 76(4) pp. 415-417, 2000.
- [16] Ji-Myon Lee, Ki-Myung Chang, Sang-Woo Kim, Chul Huh, In-Hwan Lee, and Seong-Ju Park, Dry etch damage in n-type GaN and its recovery by treatment with an N₂ plasma. *J.Appl.Phys.* 87(11), pp.7667-7670, 2000.
- [17] C.D.Thurmond and R.A.Logan, *J.Electrochem,Soc*, 119, pp.622, 1969.
- [18] I. Ma'rtel, A. del Prado, E. San Andre's, G. Gonza'lez Di'az and F. L. Marti'nez, Rapid thermally annealed plasma deposited SiN_x:H thin films: Application to metal-insulator-semiconductor structures with Si, In_{0.53}Ga_{0.47}As, and InP. *J.Appl.Phys.* 94(4), pp.2642-2653, 2003.
- [19] G.Xiangyi, Larry B.Rowland, G.T.Dunne, J.A.Fronheiser, P.M.Sandvik, A.L.Beck, and

- J.C.Campbell, Demonstration of ultraviolet separate absorption and multiplication 4H-SiC avalanche photodiodes. IEEE Photonics Technology Letters, Vol.18,pp.136-138,2006.
- [20] Guo, Xiangyi, High Performance Ultraviolet 4H-SiC Avalanche Photodiodes. 美国德州大学博士论文, 2005.
- [21] A.O.Konstantinov, Q.Wahab, N.Nordell and U.Lindefelt, Ionization rates and critical fields in 4H silicon carbide. Appl.Phys.Lett. Vol.71,No.1,pp.90-92,1997.
- [22] M. W. Wang, J. O. McCaldin , J. F. Swenberg, T. C. McGill, and R. J.Hauenstein, Schottky-based band lineups for refractory semiconductors, Appl. Phys. Lett. 66, pp.1974,1995,.
- [23] D. Qiao, L.S.Yu, S. S. Lau, J. M. Redwing, J. Y. Lin, and H. X. Jiang, Dependence of Ni/AlGa_N Schottky barrier height on Al mole fraction, J. Appl. Phys. 87, pp.801,2000.

第七章 全文总结与展望

7.1 全文总结

宽禁带的直接带隙 GaN 基半导体材料具有带隙可调节特性, 它们不仅具有稳定的物理化学性质还具有优异的的电学、光学和热学特性, 是制备高温、高功率、高频电子器件以及光电子器件的重要材料。因此, 具有内增益的 GaN 基雪崩光电二极管(APDs)从它问世之日起, 在紫外探测领域就表现出了巨大的应用潜力, 自身的特点则使它成为了 PMT、CCD 以及增强 UV-Si APDs 器件的最具有潜力的一个“候选人”。然而, 目前, 为了能使器件的性能达到实用性的要求, 无论是在材料制备、器件结构设计以及制备工艺等方面都有许多要解决的关键问题, 本文针对这些问题展开了研究, 得到了下面几个初步的结果:

1. 宽禁带 GaN 材料中的雪崩倍增效应研究, 研究基础为材料的能带结构及电子/空穴的碰撞电离系数, 计算了具有不同倍增区宽度器件的电子与空穴倍增因子, 倍增区宽度为 $0.2 \mu\text{m}$ 时较为合理, 为设计具有合适结构的 GaN 基 APDs 器件提供了理论依据。
2. 研究正照式 p-i-n 结构器件, 主要从材料结构设计、器件结构设计以及优化制备工艺等方面展开:
 - (1) 在理论计算结合试验数据设计了材料结构(p-GaN(100 nm)/i-GaN(200 nm)/n⁺-GaN(3 μm)/GaN buffer layer/sapphire), 优化制备工艺得到了光敏面半径不同的器件(15 μm 和 20 μm), 通过正向电流-电压计算得到了器件的串联电阻分别为 42Ω 和 24Ω , 在光敏面半径较小的器件的反偏电流-电压特性曲线上发现了“异常”, 由表面漏电引起。
 - (2) 搭建测试系统, 得到了加光照下的电流-电压特性曲线, 通过计算得到了器件的倍增因子, 反偏电压 65.5V 时, 半径为 15 μm 的器件的最大倍增因子为 1.42×10^4 。由变温电流-电压关系计算得到的器件的雪崩击穿电压温度系数为 0.0283K/V 。
 - (3) 为了研究不同的反偏电压下, 引起暗电流机制, 制备了光敏面直径从 40 μm 到 90 μm 变化(变化步长为 10 μm)的器件, 通过分析电流与光敏面尺寸的关系, 研究引起暗电流的主要电流机制: 反偏电压小于雪崩击穿电压时, 表面漏电机理为主; 临近雪崩击穿时, 体内漏电为主, 尤其是带间隧穿电流。计算了具有不同 i 层厚度的器件的带间隧穿电流, 结果发现 i 层厚度越大, 则有利于抑制带间隧穿电流对器件的影响, 但是却使其击穿电压增加。制备并测试 i 层厚度不同的器件, i 层厚度越大其暗电流越小,

但是雪崩击穿电压越大,而其最大倍增因子变化也很大: 52(i-0.1 μm , -43V), 1112 (i-0.2 μm , -77V)和 1656 (i-0.4 μm , -99V)。

(4) GaN 基器件的制备过程中,干法刻蚀、钝化等是不可避免的工艺,都会给台面侧表面及材料表面引入大量的表面态,增加表面漏电。设计了一种具有双台面结构的器件——利用较薄 p 型材料形成台面侧面的表面耗尽层,仿真结果发现它有效的降低了靠近台面侧面的电场(最大~10 倍)。优化制备工艺而得到了具有双台面结构的器件,暗电流减小:光敏面半径 15 μm 的器件,电压为-71V 时,暗电流减小了 3.2 倍,而光敏面半径 20 μm 的器件,电压为-67V 时,暗电流减小了 3.8 倍。

(5) 制备了光敏面直径为 200 μm 的器件,测试发现反偏电压从 0V 增加到 20V 时, $\log(I)$ -V 不是线性关系,而是呈现一定的指数关系。通过缺陷辅助隧穿模型与试验数据拟合计算可知,材料内存在一个能级约为 $E_c-0.63\text{ eV}$ 的深能级缺陷,它的存在严重影响大光敏面直径 APDs 器件的性能。

3. 在正照式 p-GaN/i-GaN/n-GaN 结构器件的研制基础上,制备了背照式 p-GaN/i-GaN/n-AlGaN APDs 器件,测试并分析其性能:

(1) 利用异质结基本理论研究[000-1]方向极化 GaN/AlGaN 异质界面处的极化电荷,计算结果发现界面处存在一层负的极化电荷,面密度为 $2.2\times 10^{12}/\text{cm}^2$ 。考虑极化电荷、带间隧穿机制以及雪崩倍增效应后,TCAD 计算得到的器件的暗电流与试验结果在某一电压范围内能够重合,极化电荷密度越大而雪崩击穿电压增加。

(2) 优化器件制备工艺,搭建测试系统,测试计算得到了反偏电压 60V 时直流倍增因子为 6900。此反偏电压下,信号的放大倍数为 133。变温电流-电压特性曲线结果为击穿电压随温度的升高而增加。

(3) 在响应光谱测试的系统的基础上设计了可以测试计算电子、空穴倍增因子的测试系统,由试验数据计算了 p-GaN/i-GaN/n-AlGaN 结构器件中电子与空穴碰撞电离系数(反偏电压范围为 20V-40V)。

(4) 最后,制备了 p-Al_{0.45}Ga_{0.55}N/i-Al_{0.45}Ga_{0.55}N/n-Al_{0.65}Ga_{0.35}N 结构的小光敏面日盲器件,但是其暗电流较大:反偏电压为 83.5V,暗电流为 0.58 mA,然后,反偏电压增加,而暗电流反而有所下降。

4. 设计了器件噪声测试系统,并利用直流电源为器件提供偏压,得到了半径为 20 μm 器件的

噪声功率谱(不同的反偏电压), 并且把材料结构相同而尺寸不同的器件的测试结果进行了对比; 并测试了光敏面半径为 $150\ \mu\text{m}$ 的器件的噪声功率谱随反偏电压的变化关系, 研究了相同的反偏电压下, 不同的 p 接触电极对 S_n 的影响。

5. 高 Al 组分 $n\text{-Al}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{N}$ 欧姆接触研究, 通过选择合适的金属组合及优化退火工艺, 在高 Al 组分的材料上得到了欧姆接触电极。通过比较电极的伏安特性曲线可知, 45s, 750°C (氮气气氛)为最佳的退火条件(45s, 700°C , 45s, 750°C 和 45s, 800°C)。并利用俄歇电子能谱分析了不同退火条件下元素深度分布, 金属之间、金属与材料之间的反应以及氧元素的分布等对电极有很大影响。
6. KOH 溶液表面处理有效的降低了 128×1 器件的暗电流, 反偏电压 5V 时, 减小近 $\sim 10^3$ 。AES 结果表明表面处理可以有效的去除干法刻蚀损伤、氧化物和 N 空位, 有利于恢复材料表面正常的化学配比。快速热退火时, Ti/Al/Ti/Au 与 $n\text{-AlGaN}$ 材料之间发生反应而增加界面处的 N 空位, 表面处理不会降低电极的电学性能。
7. 研究了快速热退火工艺对材料表面的影响, 在表面覆盖 Si_3N_4 钝化层时, 退火后, 材料的反射率、透射率及双晶射强度增加, 双晶衍射半高宽减小, 这种快速热退火可以提高材料的表面状况。
8. 研究了快速热退火度钝化层及 $\text{SiO}_2/\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}$ 的影响, N_2 气氛中, 各种处理条件都可以减小界面态密度, 但是氧化层中的最小固定电荷密度变化趋势不同: $2.54\times 10^{11}/\text{cm}^2$ (未处理), $1.21\times 10^{11}/\text{cm}^2$ (400°C , 5min)和 $4.59\times 10^{11}/\text{cm}^2$ (550°C , 3min), $8.05\times 10^{11}/\text{cm}^2$ (550°C , 5min)。后面两种处理退火条件下, MIS 器件的 C-V 曲线出现了“异常”现象。

7.2 展望

虽然本论文就宽禁带 GaN 基光电器件中雪崩倍增效应及应用展开了一些工作, 其中有理论计算、材料结构与器件结构设计、优化制备工艺等, 尽管取得到了一些结果, 但有些问题还没有得到充分的解决, 距离实用化水平还有很大的距离, 仍有很多方面值得深入研究:

1. 背照式器件结构优化

近来, 以降低 n 层材料对量子效率的影响, 背照式器件(尤其是日盲器件)多采用异质结构, 由于各层材料间的晶格失配会引入大量的缺陷, 不利于降低器件暗电流, 因此需要设计合适的器件结构以解决降低暗电流与提高量子效率之间的矛盾。

2. 优化材料生长与原位掺杂技术, 一方面, 提高 p-i-n 结构材料的质量与均匀性, 提高单元

器件的稳定性,满足器件实用性的要求,探索制备光敏面面积较大及焦平面器件;另一方面,尽可能的使 δ 掺杂的SAM结构材料成为制备GaN基APDs器件的常用结构,并且可以引入复杂的材料结构,如超晶格、渐变带隙等,降低器件暗电流、减小雪崩倍增噪声,提高倍增因子。提高p层材料的空穴浓度,抑制电场扩展效应。

3. 台面成型技术及钝化技术的深入探索,尽可能降低器件的暗电流,目前,暗电流大,器件性能不稳定是GaN基APDs尚不能实用化的最大障碍。台面成型是制备台面器件的关键工艺之一,最大的问题是如何在物理、化学性质稳定的GaN材料上得到图形好、高均匀性、台面侧面及表面损伤小和清洁的台面结构;钝化技术在减小器件暗电流、提高性能方面也是至关重要的,研究目标则是采用热氧化层/ $\text{Si}_3\text{N}_4(\text{SiO}_2)$ 、牺牲热氧化层氧化层/ $\text{Si}_3\text{N}_4(\text{SiO}_2)$ 或是 $\text{Si}_3\text{N}_4(\text{SiO}_2)$ 等双层钝化技术,并且很好的解决钝化层制备与电极制备间存在的矛盾。

4. 欧姆接触的优化

本论文中器件的p电极是退火后的Ni/Au/Ni/Au,大多数情况下,二者之间并没有形成接触电阻较小的欧姆接触,因此仍需要进一步研究p型材料的电极,以制备低接触电阻、表面形貌好、热学性能稳定的欧姆接触电极。

5. 进一步研究设计测试系统,得到一套固定的、精确度高的测试系统:首先,精确测试加光照时电流-电压特性曲线,避免外界电、磁噪声的影响;其次,设计雪崩过剩噪声测试系统,计算得到不同结构GaN基APDs器件的过剩噪声因子;最后,进一步详细研究异质结的存在对碰撞电离系数的影响。