材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023082801

GaN 基 p-i-n 型紫外探测器钝化工艺研究

杨富城[1,2]，杨　帆[2,3]，许金通[2*]

（1. 上海理工大学 理学院，上海 200093；2. 中国科学院上海技术物理研究所，上海 200083；
3. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要： 钝化层膜系的选择及其工艺的优化对降低 GaN 基紫外探测器的漏电流和提升其可靠性是至关重要的。文章采用多种钝化层：等离子体增强化学气相沉积生长的 Si_3N_4（PECVD-Si_3N_4）、电感耦合等离子体化学气相沉积生长的 Si_3N_4（ICPCVD-Si_3N_4）和 SiO_2（ICPCVD-SiO_2）以及等离子原子层沉积生长的 Al_2O_3（PEALD-Al_2O_3），分别制备了 GaN 基金属-绝缘体-半导体（MIS）器件，并对 MIS 器件的电流-电压（*I-V*）和电容-电压（*C-V*）特性进行了对比研究。采用 PECVD-Si_3N_4 作为钝化层的 GaN 基 MIS 器件具有较低的漏电流；在双层 PECVD-Si_3N_4 钝化层中插入 PEALD-Al_2O_3 薄膜可以进一步降低界面态密度：平均界面态密度从 3.94×10^{13} $eV^{-1}\cdot cm^{-2}$ 降低到 3.52×10^{11} $eV^{-1}\cdot cm^{-2}$。利用这种“三明治结构”钝化膜，制作 p-i-n 型 GaN 基紫外雪崩探测器，与单层膜系的探测器相比，在 113 V 反向偏压下的暗电流从 3.73×10^{-8} A 降至 3.34×10^{-8} A。

关键词： GaN；漏电流；钝化；等离子原子层沉积；界面态密度

中图分类号： TN23　**文章编号：** 1001－5868(2023)06－0895－06

GaN-based p-i-n Type UV Detector Passivation Process Study

YANG Fucheng[1,2], YANG Fan[2,3], XU Jintong[2]

(1. Shanghai University of Technology College of Science, Shanghai 200093, CHN;
2. Shanghai Institute of Technology Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: In order to reduce the leakage current and improve the reliability of GaN-based UV detectors, the selection of the passivation layer film system and the optimization of its process are crucial. In this paper, GaN-based metal-insulator-semiconductor (MIS) devices were prepared using the following passivation layers: Si_3N_4 grown by plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD), Si_3N_4 and SiO_2 grown by inductively coupled plasma chemical vapor deposition (ICPCVD), and Al_2O_3 grown by plasma atomic layer deposition (PEALD), respectively. The current-voltage (*I-V*) and capacitance-voltage (*C-V*) characteristics of the devices were studied comparatively. It is found that when the PECVD-grown Si_3N_4 was used as the passivation layer, it has a lower leakage current in GaN-based MIS devices; by introducing a layer of PEALD-grown Al_2O_3 into the double-layer PECVD-grown Si_3N_4 passivation layer, the interfacial state density is further reduced: the average interfacial state density decreases from 3.94×10^{13} $eV^{-1}\cdot cm^{-2}$ to 3.52×10^{11} $eV^{-1}\cdot cm^{-2}$. Using this passivation film with "sandwich structure", a p-i-n type GaN-based UV avalanche detector was fabricated. The dark current at

收稿日期：2023－08－28.
基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFA0715501).
* **通信作者：**许金通　**E-mail：** xujintong@mail.sitp.ac.cn

113 V reverse bias is reduced from 3.73×10^{-8} A to 3.34×10^{-8} A compared with the detector of the Si_3N_4 film system without PEALD-grown Al_2O_3.

Key words: GaN; leakage current; passivation; plasma enhanced atomic layer deposition; interfacial density of states

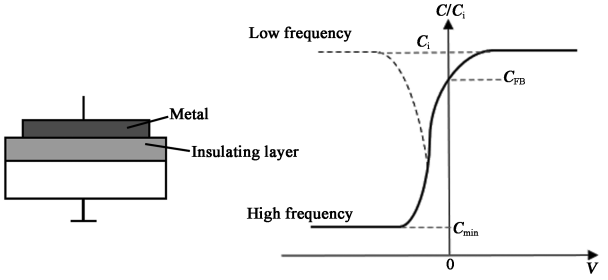
0 引言

近年来,GaN 基紫外探测器已在军事和民用领域得到了广泛应用[1-2],其中雪崩探测器也取得了显著进展[3-5]。在高反向偏压下,暗电流是雪崩探测器的关键性能指标之一。钝化层膜系的选择和工艺优化有助于降低器件的暗电流并提高其可靠性。钝化层生长方法主要包括物理气相沉积(Physical Vapor Deposition,PVD)和化学气相沉积(Chemical Vapor Deposition,CVD)两种。目前最常用的方法是化学气相沉积法。CVD 技术中使用较为广泛的是等离子体增强化学气相沉积(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition,PECVD)、电感耦合等离子体化学气相沉积(Inductively Coupled Plasma Chemical Vapor Deposition,ICPCVD)和原子层沉积(Atomic Layer Deposition,ALD)技术[6]。进入 21 世纪初,IBM 研究人员将等离子体引入原子层沉积工艺中[7-8],引发了对离子增强原子层沉积(Plasma Enhanced Atomic Layer Deposition,PEALD)的研究。等离子体的引入改善了传统 ALD 技术,具有降低沉积温度、拓宽前驱体选择和实现更薄层生长的优点。采用等离子辅助的 ALD 技术(PEALD)制备的绝缘层表现出高密度、低杂质含量和优异界面性质的特点,因此成为一种出色的钝化生长方法。2011 年,Liu 等[9]报道了在 GaN/AlGaN 高电子迁移率晶体管中采用 ALD 双层钝化,其漏电流比单层钝化降低了约三个数量级,界面态也有明显下降。2015 年,Zhang 等[10]报道了采用 ALD 方式沉积 Al_2O_3 作为钝化层对 GaN/AlGaN HEMT 性能的影响,与传统的 PECVD-Si_3N_4 钝化相比,使用 ALD 钝化后,器件的栅极漏电流特性得到改善,其电荷密度从 1.93×10^{11} cm^{-2} 降低到 2.1×10^{10} cm^{-2}。2016 年,Shouleh 等[11]对比了使用 ALD-Al_2O_3 和 PECVD-SiO_2 作为钝化膜对 GaN p-i-n APD 在反向偏压 60 V 下的漏电影响,发现 ALD-Al_2O_3 作为钝化膜可以显著地降低器件的漏电流。2021 年,Emanuela 等[12]对 ALD 和 PEALD 生长 Al_2O_3 薄膜介质层方式进行了比较,结果显示 PEALD 生长方式是更为合适的沉积 Al_2O_3 的方法。

本文采用多种钝化层制备技术来构建 Metal-Insulator-Semiconductor(MIS)器件,并通过电学特性表征对钝化层的绝缘性能和钝化效果进行详尽的评估与优化。这些优化后的钝化层被应用于 p-i-n 型 GaN 基紫外探测器的实际制造中。

1 原理

近年来,GaN 基雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode,APD)的相关研究日益增多,其禁带宽度大,击穿场强在 MV/cm 以上,工作电压较高。然而,在高偏压下,绝缘层的性能不佳会导致较大的隧穿电流。从微观角度来看,这种击穿现象可以通过渗透理论进行解释[13-14]。高能载流子运动路径上随机存在缺陷,当这些缺陷足够密集并形成连续链条时,会在栅极和半导体之间建立连接,从而产生导电通道并引发破坏性击穿。当薄膜内针孔密度较高时,可能会在较低偏压下发生击穿。利用 GaN 材料制作 MIS 器件,通过器件的电学特性来评估钝化膜的绝缘性能并对比绝缘层与半导体层界面电荷分布情况。理想情况下,金属与半导体的功函数差、绝缘层电荷及绝缘层与半导体界面处的界面态密度均为 0。MIS 器件的结构示意图以及其特性曲线如图 1 所示。



(a) MIS 器件结构图 (b) n 型半导体 C-V 特性曲线

图 1 MIS 器件的结构示意图以及其特性曲线

MIS 器件本质上是一个电容器,当在金属和半导体之间施加可变的偏压时,会在半导体表面产生充电和放电现象。因此,MIS 器件的电容特性可以

被理解为绝缘层电容与随偏压变化的半导体电容的串联效应。因此，MIS 器件的电容可以表示为：

$$1/C = 1/C_i + 1/C_s \tag{1}$$

其中，C_i 为不随外加偏压变化的绝缘层电容，C_s 是随外加偏压变化的半导体电容。

在实际的 MIS 器件中，金属与半导体的功函数差不为 0，绝缘层内部含有固定的电荷，并且在绝缘层和半导体的界面处存在界面态。上述因素都会对 MIS 器件的 C-V 特性产生显著影响。

缺陷能级是位于禁带中或分立或连续的电子能态，可以在短时间内和半导体进行电荷交换的被称为快界面态。外加电压使费米能级相对于界面陷阱能级向上或向下移动，改变界面陷阱电荷，进而影响 MIS 器件的电容，使理想 MIS 器件的 C-V 曲线形状发生改变。

计算快界面态密度通常有以下三种方法：电导法、高频电容（Terman）法和高低频电容（Castagné-Vapaill）法，接下来主要介绍一下高低频电容法测试方法。

MIS 器件在低频极限 C_{LF} 和高频极限 C_{HF} 下的总电容表达式分别为[15-16]：

$$1/C_{LF} = 1/(C_s + C_{it}) + 1/C_i \tag{2}$$

$$1/C_{HF} = 1/C_s + 1/C_i \tag{3}$$

式中，C_{it} 为界面陷阱相关的电容[13]，在低频极限下，界面陷阱电阻 R_{it} 为 0，C_s 和 C_{it} 并联；在高频极限下，界面陷阱相关的电容和电阻对 MIS 器件的影响可以忽略，因为界面陷阱充放电速度跟不上高频信号的变化，根据高频极限和低频极限下的 MIS 器件的电容公式，可以计算得到界面陷阱电荷的密度，表达式为：

$$D_{it} = C_{it}/q^2 = C_i/q(C_{LF}/C_i - C_{LF} - C_{HF}/C_i - C_{HF}) \tag{4}$$

其中，D_{it} 代表界面态密度，q 代表电荷。可以通过测试不同频率下的 C-V 曲线计算钝化膜与外延材料的界面态密度。

2　实验

使用蓝宝石（0001）衬底上外延生长的 2 μm 厚的 n 型 GaN（n：$1\times10^{19}/cm^3$）制备 MIS 器件。通过 ICPCVD/PECVD/PEALD 等不同沉积方式生长绝缘层，然后进行开孔和电极生长。器件结构如图 2 所示。

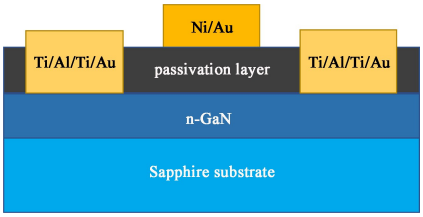


图 2　n 型 GaN MIS 器件结构图

制备不同钝化膜系的 MIS 器件，其中具体参数如表 1 所示。

表 1　钝化层膜系的参数表

编号（样品）	钝化层材料种类	生长方式	厚度/nm
1	SiO_2	ICPCVD	200
2	Si_3N_4	ICPCVD	200
3	Si_3N_4	PECVD	200
4	$Al_2O_3+Si_3N_4$	PEALD+PECVD	10+200
5	$Si_3N_4+Si_3N_4$	PECVD+PECVD	200+200
6	$Si_3N_4+Al_2O_3+Si_3N_4$	PECVD+PEALD+PECVD	200+10+200
7	$SiO_2+Al_2O_3+SiO_2$	ICPCVD+PEALD+ICPCVD	200+10+200

器件样品 1 使用 ICPCVD-SiO_2，样品 2 使用 ICPCVD-Si_3N_4，而样品 3 使用 PECVD-Si_3N_4。这三种 MIS 器件的单层钝化膜厚度均为 200 nm。在此基础上，制备了采用二次生长钝化层方法的 MIS 器件。器件样品 4 先后生长 10 nm 厚的 PEALD-Al_2O_3 薄膜和 200 nm 的 PECVD-Si_3N_4 作为钝化层。样品 5 在样品 3 的基础上增加 200 nm 厚的 PECVD-Si_3N_4。样品 6 采用 PECVD-Si_3N_4/PEALD-Al_2O_3（10 nm）/PECVD-Si_3N_4 三层膜系结构。样品 7 与样品 6 的钝化层结构相同，但使用 ICPCVD 生长的 SiO_2 代替了 Si_3N_4。

生长 ICPCVD-SiO_2 的温度约为 80 ℃，射频功率为 350 W，使用的气源为 N_2O，SiH_4。生长 PECVD-Si_3N_4 时，温度约为 75 ℃，射频功率为 2 000 W，使用的气源为 N_2，SiH_4。生长 ICPCVD-Si_3N_4 的温度约为 80 ℃，射频功率为 350 W，气源使用 SiH_4 和 NH_3。

钝化层生长完成后，进行开孔和电极生长。源漏电极金属 Ti/Al/Ti/Au 的厚度分别为 50/50/30/60 nm，采用离子束溅射方法生长。栅电极金属 Ni/Au 的厚度为 30/150 nm，器件面积约为 4 μm×5 μm。

3　实验结果

使用 Agilent Technologies B1500A 设备对 MIS 器件进行了 I-V 测试。单层钝化膜 MIS 器件

的漏电流测试结果如图 3 所示，结果表明 Si_3N_4 比 SiO_2 更适合用作 GaN 基紫外探测器的钝化层。反向偏压下样品 4 的漏电流减少，使用 ICPCVD-SiO_2 钝化层的器件发生了击穿。这表明 PEALD 生长的钝化层最为致密，而 SiO_2 生长的致密性较差。在此先行试验基础上，制备了多层钝化膜 MIS 器件进行对比。

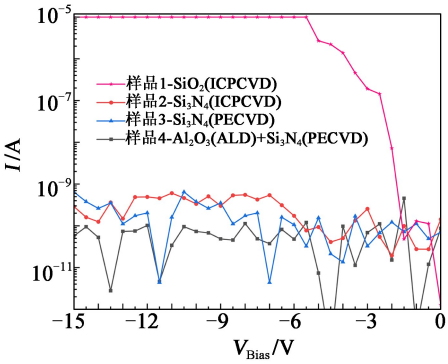


图 3 单层钝化膜 GaN MIS 器件的 *I-V* 曲线对比

图 4 展示了多层钝化膜 MIS 器件的 *I-V* 特性曲线。在反偏电压下，样品 7 的漏电流最大，而样品 6 的漏电流最小，这表明 PECVD-Si_3N_4 质量较好，在中间插入了一层 PEALD-Al_2O_3 后，器件的漏电流降低了大约一个数量级。

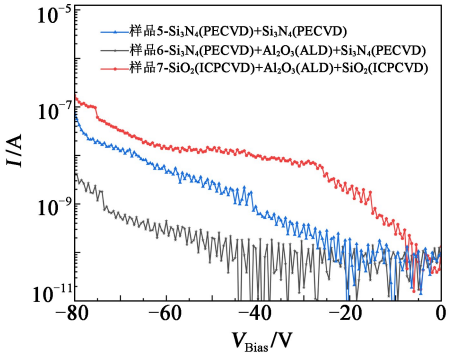


图 4 多层钝化膜 GaN MIS 器件的 *I-V* 曲线对比

器件重复性测试时发现，反偏电流超过 1×10^{-5} A 的器件容易发生损坏，而加入 PEALD-Al_2O_3 后的器件很难损坏。二次钝化提高了界面质量，这可能是因为第一层钝化层存在孔洞和缺陷，而二次钝化过程可以修复这些缺陷，降低界面态密度，进而降低漏电流。采用 Si_3N_4/Al_2O_3 复合膜作为钝化膜，通过增加介电常数和钝化层厚度减小钝化作用贡献的寄生电容，两个介质膜的相互作用也将减少厚钝化通常会承受的应力[17]。

图 5 显示了使用 Agilent Technologies B1500A 设备测量的器件样品 6 的电容-频率（*C-F*）曲线。在高频段，随着频率的增加电容没有明显变化，即没有出现大幅的频率色散现象。这表明在 GaN 界面及钝化层内部，可移动电荷的数量相对较少，令电容在高频段维持稳定[18]。

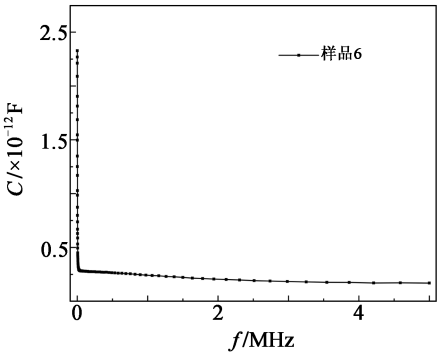
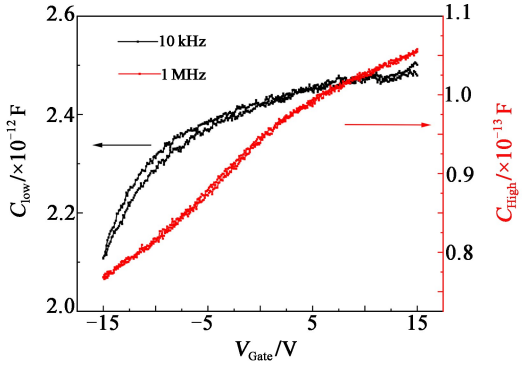
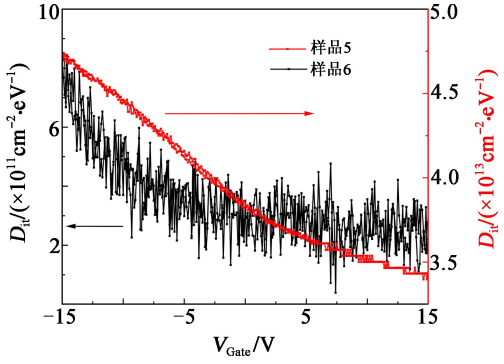


图 5 样品 6 的 *C-F* 曲线

图 6(a)展示了器件样品 6 在 10 kHz 和 1 MHz 扫描频率下的正反向双扫 *C-V* 曲线。在高频曲线中，曲线形状和电容的变化反应了深耗尽行为的出现，但并未达到反型状态。这是因为 GaN 的禁带宽度较大，需要较高的电压才能达到反型状态[19]。图 6(b)使用公式(4)计算了每个偏置点下的界面态密度。样品5的平均界面态密度为 3.94×10^{13} $eV^{-1}\cdot$



(a) 测试频率分别为 10 kHz 和 1 MHz 时样品 6 的双扫 *C-V* 曲线



(b) 高-低频法计算得到的样品 5/样品 6 的界面态密度随偏压的变化

图 6 正反向双扫 *C-V* 曲线和每个偏置点下的界面态密度

cm^{-2}，而样品 6 的平均界面态密度为 3.52×10^{11} $eV^{-1}\cdot cm^{-2}$。在引入 PEALD-Al_2O_3 后，界面态密度降低了两个数量级。文献[20]报道中，生长 ALD-Al_2O_3 作为钝化膜后，其界面态密度为 3.114×10^{12} $eV^{-1}\cdot cm^{-2}$，高于样品 6，这表明多层钝化膜可能更容易形成稳定紧密的钝化层。

在制备 p-i-n 型 GaN 基 APD 紫外探测器中采用不同的膜结构，材料结构如图 7 所示。其中 x 代表 AlGaN 中 Al 组分的占比，其中 Al 组分从 0.42 到 0.6 渐变。实验验证了在双层钝化层中间插入 PEALD-Al_2O_3 的必要性。图 8 显示了 APD 器件的 I-V 特性曲线。定义电流为 1 μA 时的反偏电压为雪崩击穿电压(U_B)，即 U_B 为 −126 V。90%U_B (−113 V)时加入 PEALD-Al_2O_3 的器件的暗电流从 3.73×10^{-8} A 降至 3.34×10^{-8} A。图 9(a)、(b)分别展示了器件的耐高压特性：对同一个器件多次重复测试。图 9(a)中没有生长 PEALD 钝化层的器件在第五次测试时出现破坏性击穿，这在我们的样品中是一个普遍现象。而使用 PEALD 钝化层的器件在多次测试中展示了优秀的可靠性，这充分证明 PEALD 生长的钝化层在器件耐压性和可靠性的提升中发挥了难以替代的作用。

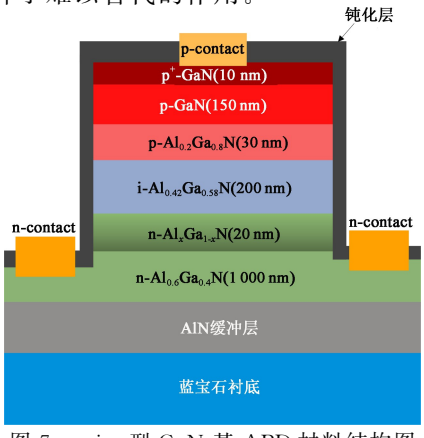


图 7　p-i-n 型 GaN 基 APD 材料结构图

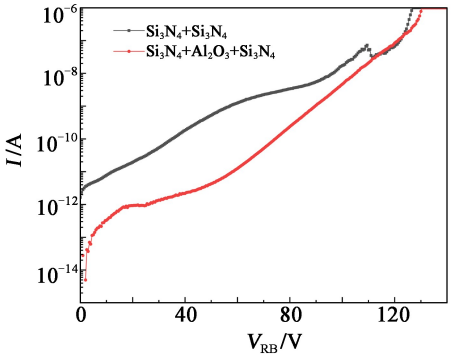
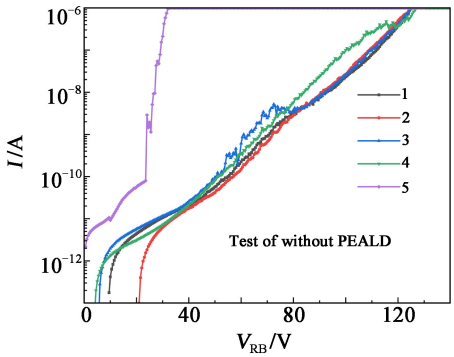
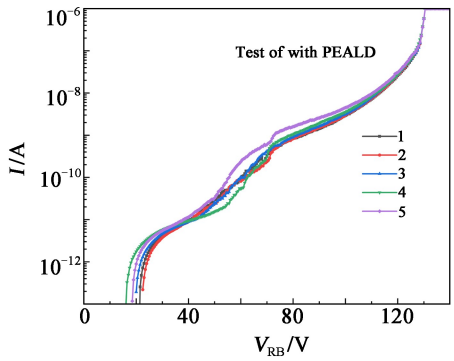


图 8　PIN 型 GaN 基 APD 器件的 I-V 曲线(有无 PEALD 生长 Al_2O_3 钝化层)对比



(a) 无 PEALD 生长



(b) PEALD 生长

图 9　有、无 PEALD 生长的 GaN p-i-n 器件 I-V 五次测试

4　结论

本研究通过优化 GaN 紫外探测器的钝化结构，降低器件的漏电流并提高其可靠性。通过制备 GaN 基 MIS 器件，比较了 PECVD-Si_3N_4，ICPCVD-Si_3N_4，ICPCVD-SiO_2 和 PEALD-Al_2O_3 等不同钝化层的钝化效果。MIS 器件的电流-电压(I-V)和电容-电压(C-V)特性的测试结果表明，采用 PECVD-Si_3N_4 作为钝化层具有较小的漏电流。此外在两层 Si_3N_4 钝化层之间插入 PEALD-Al_2O_3 可以进一步降低漏电流和界面态密度，平均界面态密度从 3.94×10^{13} $eV^{-1}\cdot cm^{-2}$ 降低到 3.52×10^{11} $eV^{-1}\cdot cm^{-2}$。采用不同的钝化方法制备 p-i-n 型 GaN 基雪崩探测器并测试其性能，测试结果表明加入了 PEALD-Al_2O_3 钝化层的器件的暗电流得到明显的下降，且器件的可靠性被显著提升。钝化层膜系结构的选择和工艺的优化对于 GaN 基紫外雪崩探测器的实际应用是至关重要的。

参考文献：

[1]　吴龙生. 光电子技术及其应用[J]. 现代通信，2001(12)：3-5.
Wu Longsheng. Optoelectronic technology and its application [J]. Modern Communications，2001(12)：3-5.

[2] 郝 跃，张金风，张进成. 氮化物宽禁带半导体材料与电子器件[M]. 北京：科学出版社，2013：288-295.
Hao Yue, Zhang Jinfeng, Zhang Jincheng. Nitride Wide BandGap Semiconductor Materials and Electronic Devices[M]. Beijing: Science Press, 2013: 288-295.

[3] Schreiber P, Dang T, Pickenpaugh T, et al. Solar blind UV region and UV detector development objectives[J]. Proc. of SPIE, 1999, 3629: 230-248.

[4] Cho M, Xu Z, Bakhtiary-Noodeh M, et al. Effective leakage current reduction in GaN ultraviolet avalanche photodiodes with an ion-implantation isolation method[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2021, 99: 1-5.

[5] Cai Q, Dong K X, Xie Z L, et al. Enhanced front-illuminated p-i-p-i-n GaN/AlGaN ultraviolet avalanche photodiodes[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2019, 96(15): 24-29.

[6] Suntola T, Antson J. Method for producing compound thin films: US, US4058430 A[P]. 1977-5-26.

[7] Huang S, Jiang Q, Shu Y, et al. Mechanism of PEALD-grown AlN passivation for AlGaN/GaN HEMTs: Compensation of interface traps by polarization charges[J]. IEEE Electron Device Lett., 2013, 34(2): 193-195.

[8] Hemmen J, Heil S, Klootwijk J H, et al. Plasma and thermal ALD of Al_2O_3 in a commercial 200 mm ALD reactor[J]. J. of The Electrochemical Society, 2007, 154(7): G165-G169.

[9] Liu Z H, Ng G I, Zhou H, et al. Reduced surface leakage current and trapping effects in AlGaN/GaN high electron mobility transistors on silicon with SiN/Al_2O_3 passivation[J]. Appl. Phys. Lett., 2011, 98(11): 287.

[10] Zhang S, Wei K, Yu L, et al. AlGaN/GaN high electron mobility transistor with Al_2O_3 + BCB passivation [J]. Chinese Physics B, 2015, 24(11): 472-476.

[11] Shouleh N, Michael H, Jewell A D, et al. Single photon counting UV solar-blind detectors using silicon and Ⅲ-nitride materials[J]. Sensors, 2016, 16(6): 927.

[12] Schilirò E, Fiorenza P, Greco G, et al. Early growth stages of aluminum oxide (Al_2O_3) insulating layers by thermal- and plasma-enhanced atomic layer deposition on AlGaN/GaN heterostructures[J]. ACS Appl. Electron. Mater., 2022, 4(1): 406-415.

[13] 施 敏，伍国珏，耿 莉，等. 半导体器件物理(第3版)(引进版权)[M]. 西安：西安交通大学出版社，2008：79-87，174-179.
Shi Min, Wu Guojue, Geng Li, et al. Physics of Semiconductor Devices (3rd Edition) (introduced copyright)[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2008: 79-87, 174-179.

[14] Lundstrom M. Fundamentals of carrier transport (2nd edition)[J]. Measurement Science & Technol., 2000, 13(2): 464.

[15] Engel-Herbert R, Hwang Y, Stemmer S. Comparison of methods to quantify interface trap densities at dielectric/Ⅲ-Ⅴ semiconductor interfaces[J]. J. Appl. Phys., 2010, 108(12): 153.

[16] Castagné R, Vapaille A. Description of the SiO_2-Si interface properties by means of very low frequency MOS capacitance measurements[J]. Surface Science, 1971, 28(1): 157-193.

[17] Zhang W, Evans M J, John L, et al. Low capacitance SWIR photodetectors for high speed sensing applications[J]. Proc. of SPIE, 11407: 114070C.

[18] Hashizume T, Ootomo S, Oyama S, et al. Chemistry and electrical properties of surfaces of GaN and GaN/AlGaN heterostructures[J]. J. Vacuum Science & Technol. B: Microelectronics & Nanometer Structures, 2001, 19(4): 1675-1681.

[19] Hadis M. Handbook of Nitride Semiconductors and Devices: Electronic and Optical Processes in Nitrides[M]. Wiley Online Library, 2009.

[20] Eiji M, Yuji G, Shigeru K, et al. Comparative study of AlGaN/GaN metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistors with Al_2O_3 and HfO_2 gate oxide[J]. Solid State Electron., 2011, 62(1): 152-155.

作者简介：

杨富城(1998—)，男，辽宁省营口市人，硕士生，主要从事GaN/AlGaN基紫外探测器方面的研究；

许金通(1979—)，男，福建省莆田市人，博士，研究员，从事GAN基异质结雪崩光电二极管以及碲镉汞长波红外探测器相关研究。