宽禁带半导体材料与器件专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022012402

薄吸收区 AlGaN 肖特基日盲探测器在不同金属接触下的表现及机理分析

胡乐枫[1,2]，张　燕[1*]

（1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室，上海 200083；
2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要： 针对具备 100～200 nm 薄吸收区的肖特基型探测器，研究了不同金属接触对其暗电流和光谱响应特性的影响。以 GaN 基材料为主体，在薄层 $Al_{0.42}Ga_{0.58}N$ 表面分别制备 Au 和 Ni/Au 形成肖特基接触，在 $Al_{0.55}Ga_{0.45}N$ 表面以 Ti/Al/Ti/Au 制备欧姆接触，从而制备薄吸收区的 AlGaN 肖特基日盲探测器。结果表明对 AlGaN 材料，Au 肖特基型探测器的光响应良好，达到 0.10 A/W，外量子效率峰值为 47%，但暗电流稍大，为 3.91×10^{-10} A/cm^2。而 Ni/Au 肖特基型探测器的暗电流稳定，普遍在 4.17×10^{-11} A/cm^2，而响应率一般，为 0.07 A/W，外量子效率为 33%。测试结果与仿真模型基本一致，对正照式，受势垒高度和界面损耗层等因素影响，相较 Ni/Au 肖特基型探测器，Au 肖特基型探测器的响应范围更大、响应率更高；对背照式，吸收层的厚度对响应范围有很大影响，薄吸收区有效展宽了响应区域。

关键词： AlGaN；肖特基；接触金属；薄吸收区

中图分类号： TN23　**文章编号：** 1001－5868(2022)03－0510－07

Performance and Mechanism Analysis of Thin Absorption Region AlGaN Schottky Solar-blind Detector with Different Metal Contact

HU Lefeng[1,2], ZHANG Yan[1]

(1. Key Lab. of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: For a Schottky detector with a thin absorption region of 100～200 nm, the influence of different metal contacts on the dark current and spectral response characteristics was studied. Taking GaN-based materials as the main body, Au and Ni/Au were prepared on the surface of thin $Al_{0.42}Ga_{0.58}N$ to form Schottky contacts, and Ti/Al/Ti/Au were prepared on the surface of $Al_{0.55}Ga_{0.45}N$ to form ohmic contacts. Thus, an AlGaN Schottky solar-blind detector with a thin absorption region is fabricated. The results show that for AlGaN material, the photoresponse of Au Schottky detector is good, reaching 0.10 A/W, the peak external quantum efficiency is 47%, but the dark current is slightly larger, which is 3.91×10^{-10} A/cm^2. The dark current of Ni/Au Schottky detector is stable at 4.17×10^{-11} A/cm^2, while the responsivity is generally 0.07 A/W, and the external quantum efficiency is 33%. The test results are consistent with the simulation model. For the front irradiation mode, Au Schottky detector has a larger response range and higher responsivity than Ni/Au Schottky detector due to factors such as barrier height and interface loss layer. For the back irradiation mode, the thickness of the absorption layer has a great effect on the response

收稿日期：2022－01－24.
基金项目：国家自然科学基金面上项目(61774162).
*通信作者：张　燕
E-mail： zhangyan@mail.sitp.ac.cn

range, and the thin absorption region effectively extends the response range.

Key words:　AlGaN; Schottky; contact metal; thin absorption region

0　引言

氮化镓(GaN)具有直接带隙、室温工作、耐高温耐腐蚀和抗辐照等特点[1]。在导弹预警、紫外通信、火灾监测、电力、冶金等领域，GaN 基紫外探测器有着广泛应用[2-3]。GaN 基探测器主要有 M-S-M 结构、肖特基结构(Schotky Barrier Diode，SBD)及 p-i-n 结构等，其中 SBD 具有较低的开关损耗和较快的恢复速度，暗电流较低，制备工艺简单，无需复杂的 p 型掺杂，因而受到广泛研究[4-5]。材料的类型、生长状况及肖特基接触的性能等，都是影响 SBD 性能的重要因素。对于 AlGaN 材料，目前广泛使用的肖特基接触金属有 Au 和 Ni/Au，多年来对两者的研究也获得了不少结果，如 Au 膜越厚，金属与半导体相互渗透越多，SBD 的整流效应越差[6]，Ni/Au 接触在 N_2 气氛下退火有利于减少表面 N 缺位，使 Ni 与表面残留 O 反应，减小暗电流[7]。为了更进一步研究不同接触对 SBD 的影响，本文分别以 Au 和 Ni/Au 为接触金属制备 AlGaN 肖特基接触，以 Ti/Al/Ti/Au 为 n 电极，制备了薄 $Al_{0.42}Ga_{0.58}N$ 吸收区的 SBD，进行 *I-V* 与光谱响应测试表征，提取势垒高度、理想因子、串联电阻和势垒宽度等参数，分析接触金属对电学性能的影响，研究不同照面下光响应的具体情况并进行机理分析。

1　模拟仿真

如图 1 所示为肖特基型 GaN 基紫外探测器的仿真结构，薄吸收区 i-$Al_{0.42}Ga_{0.58}N$ 层厚度为 140 nm，分别以 Au 和 Ni 为接触电极构成肖特基接触。表 1 为 TCAD 仿真参数。如图 2 所示为探测器的响应光谱，“front”表示正照，“back”表示背照。正照下 Au SBD 与 Ni SBD 的峰值响应分别为 0.12 与 0.11 A/W，Au SBD 与 Ni SBD 的响应范围分别为 244～276 nm 和 248～276 nm，Au SBD 在短波方向有一定的蓝移。背照下 Au SBD 与 Ni SBD 响应都在 240～276 nm，Au 的响应略高，两者的峰值响应都约为 0.07 A/W。

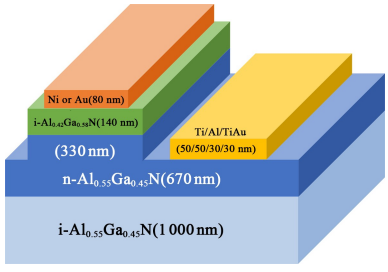

图 1　仿真结构图

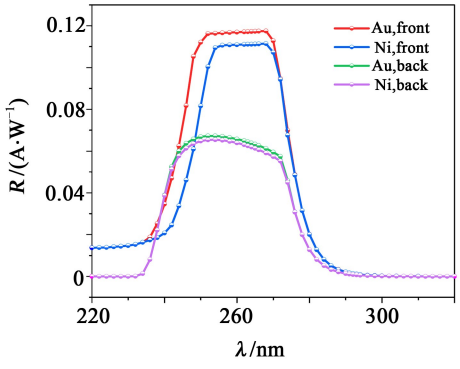

图 2　仿真响应光谱

表 1　模拟仿真器件参数

组分	$\tau_n(\tau_p)$/s	E_g/eV	μ_n/(cm^2·V^{-1}·s^{-1})	μ_p/(cm^2·V^{-1}·s^{-1})	N_c/cm^{-3}	N_v/cm^{-3}	ε_s	affinity/eV
i-$Al_{0.42}Ga_{0.58}N$	1×10^{-11}	4.59	1 028	146	3.98×10^{18}	2.28×10^{20}	8.73	2.63
n-$Al_{0.55}Ga_{0.45}N$	1×10^{-11}	4.95	580	22	4.50×10^{18}	2.85×10^{20}	8.68	2.18

2　器件制备

在蓝宝石双抛衬底上生长 AlN 缓冲层，然后依次生长掺杂浓度为 2×10^{16} cm^{-3} 的 i-$Al_{0.55}Ga_{0.45}N$ 层，掺杂浓度为 2×10^{18} cm^{-3} 的 n-$Al_{0.55}Ga_{0.45}N$ 层，掺杂浓度为 2×10^{16} cm^{-3} 的 i-$Al_{0.42}Ga_{0.58}N$ 层和掺杂浓度为 2×10^{18} cm^{-3} 的 n-$Al_{0.42}Ga_{0.58}N$ 层，获得 AlGaN 外延材料。

依次用三氯乙烯、乙醚、丙酮、酒精清洗去除表面有机污染，用 HCl∶C_2H_6O=1∶1 的溶液清洗去除无机污染，通过氮气等离子体处理改善表面缺陷，而后采用 ICP 刻蚀构造台面结构，采用电子束蒸发技术分别蒸镀 Au(80 nm)和 Ni/Au(30/80 nm)，生长 500 nm 的 SiO_2 钝化层，在 n-$Al_{0.55}Ga_{0.45}N$ 层蒸镀 Ti/Al/Ti/Au(50/50/30/30 nm)，在 N_2 气氛和 750 ℃条件下退火 30 s 以形成良好的欧姆接触，最后蒸镀 Cr/Au/Cr(20/200/20 nm)加厚电极以便于测试。器件结构如图 3 所示。

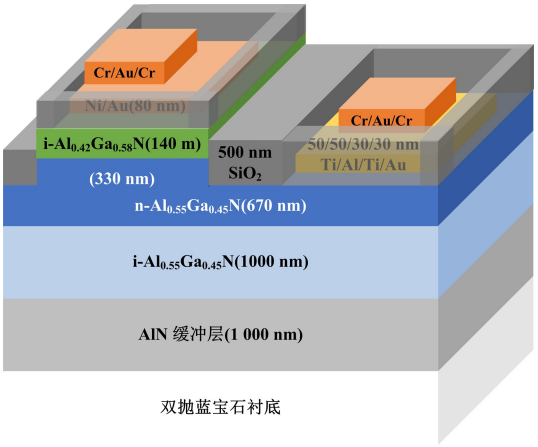

图 3 器件结构图

3 实验测试

选用 300 W 的氙灯作为紫外光源，氙灯发光进入光栅单色仪，然后照射到 SBD 上，pn 两电极与电流放大器(Stanford SR570)相连，SBD 光生电流经 SR570 放大后通过数字万用表(VC98)示数读出，用 Si 光电二极管标定，得到 AlGaN SBD 的响应光谱。采用 Agilent B1500A 半导体参数分析仪测试得到 SBD 的 *I-V* 曲线，通过紫外/可见分光光度计测试得到 AlGaN 材料的透射谱数据。

4 结果与讨论

4.1 透射谱表征

图 5 为图 4 所示材料的透射谱测试结果。样品主要透射区域在 280～750 nm，平均透射率达 78%。在 272 nm 前材料透射率极低，截止边 272 nm 较陡直，有助于提高紫外/可见光的吸收抑制比，抑制可见光所引起的背景噪声。在 250～270 nm 处有一段微小的上升曲线，这主要缘于厚度只有 180 nm 的薄层 $Al_{0.42}Ga_{0.58}N$ 只吸收部分 250～270 nm 的光，从而使得小部分光透射出去。在吸收边长波方向的干涉区，由于制备过程中对 n-$Al_{0.42}Ga_{0.58}N$ 层构建台面结构采用了刻蚀工艺，导致 i-$Al_{0.42}Ga_{0.58}N$ 层表面出现缺陷，对带隙下光子有微弱吸收，因而出

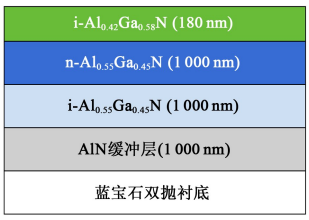

图 4 器件材料结构图

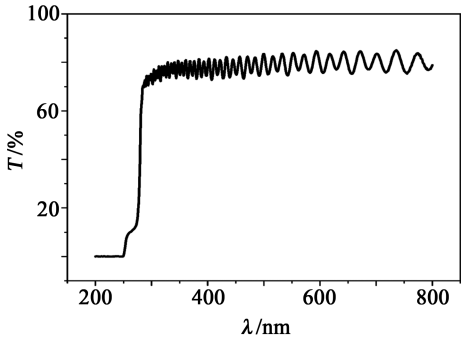

图 5 材料透射谱

现透射率较理论透射率稍小的现象，使器件对紫外、可见光的抑制能力变差[8]。

4.2 *I-V* 特性

图 6 为器件的暗电流曲线，肖特基结面积为 120 μm×160 μm。Ni/Au SBD 与 Au SBD 的动态零偏电阻($R = dV/dI$)分别为 9.97×10^{11} 和 3.44×10^{11} Ω，R_0A 分别为 1.91×10^{8} 和 6.60×10^{7} Ω·cm²。在 1 V 反偏下，Ni/Au 接触和 Au 接触的暗电流分别为 2.53×10^{-7} 和 4.18×10^{-7} A/cm²，在零偏下，Ni/Au 接触的暗电流只有 4.17×10^{-11} A/cm²，Au 接触的暗电流则达到 3.91×10^{-10} A/cm²，因此在电学特性上 Ni/Au SBD 更加优秀。此外 Ni/Au SBD 和 Au SBD 的开启电压分别为 1.34 和 1.11 V，Au 肖

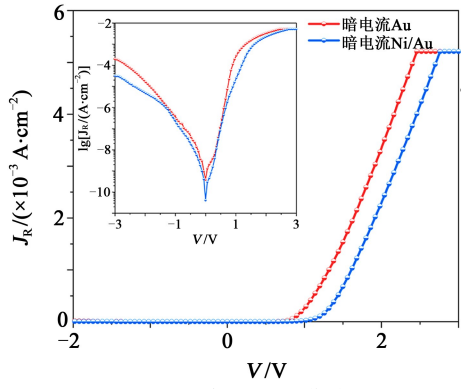

图 6 器件暗电流曲线

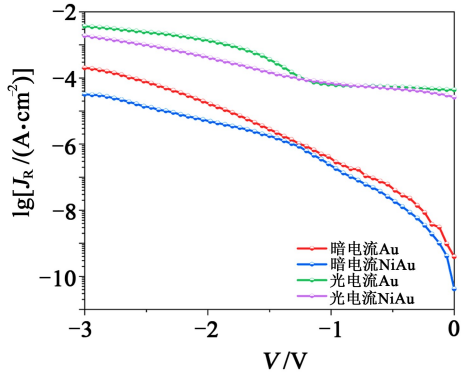

图 7 反偏光暗电流曲线

特基接触的开启电压更低，有利于器件更快进入工作导通状态，减小器件的开关损耗。图7为无光和 270 nm 光照下的反偏电流，对 Ni/Au SBD 和 Au SBD，在 1 V 反偏下，光电流达到 6.85×10^{-5} A/cm^2，光电流/暗电流之比约为 300，说明器件能够对 270 nm 的紫外光进行较好的探测。

本实验中 $Al_{0.42}Ga_{0.58}N$ 作为非重掺杂的宽禁带半导体，制备室温工作的肖特基接触，以热电子发射模型研究其电流输运机制。

热电子发射电流密度表示为[9]

$$J = J_{st} \times \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1\right] \tag{1}$$

$$J_{st} = A \times A^{R} \times T^{2} \times \exp\left(\frac{-q\Phi}{kT}\right) \tag{2}$$

$$A^{R} = 4\pi m_e k^2 / h^3 \tag{3}$$

其中，J_{st} 为饱和电流密度，q 为电子电荷量，V 为外加电压，n 即理想因子，T 为工作温度，Φ 为肖特基势垒高度，k 为玻尔兹曼常数，A 为肖特基结面积，A^R 是有效 Richaedson 常数，室温下 $Al_{0.42}Ga_{0.58}N$ 材料的 A^R 为 34.08 A·cm^{-2}·K^{-2}。

在一定正向偏压（$V > \frac{3nkT}{q}$）下，可将式(1)简化为

$$J = J_{st} \times \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right)\right] \tag{4}$$

结合式(2)简化得到：

$$\ln J = \ln(A \times A^{R} \times T^{2}) - \frac{q\Phi}{kT} + \frac{qV}{nkT} \tag{5}$$

串联电阻 R_s 也是表征肖特基接触特性的重要参数之一，根据 Cheung 模型[9]，热电子发射电流可展开为

$$I = I_s \times \exp\left(\frac{q(V - I \times R_s)}{nkT}\right) \tag{6}$$

$$I = J \times A \tag{7}$$

$$I_s = J_{st} \times A \tag{8}$$

由此可得：

$$R_s = \frac{1}{I} \times \left(\frac{d}{d(\ln I)}V - \frac{nkT}{q}\right) \tag{9}$$

通过式(5)，(6)，对 $\ln J$ 与 V 的关系曲线进行线性拟合，得到势垒高度 Φ，理想因子 n 以及串联电阻 R_s 等参数，如表 2 所示。

Ni/Au 肖特基接触的势垒高度为 0.79 eV，而 Au 肖特基接触的势垒高度为 0.74 eV。由于 Au 肖特基接触的势垒高度更低，存在热电子发射的物理机制，半导体内自由电子越过势垒渡越到金属内部形成暗电流更容易，其暗电流相较 Ni/Au 肖特基接触会更大。

表 2　肖特基接触特性参数

接触金属	功函数/eV	$q\Phi$/eV	n	R_s/Ω
Ni/Au	5.1	0.79	2.25	147
Au	5.15	0.74	2.43	128

计算得到 Ni/Au 和 Au 的理想因子分别为 2.25 和 2.43，两者都不是理想热电子发射，此时正向电流输运机制以隧穿电流为主，同时包含热电子发射机制。理想因子偏大表明还有其他输运机制存在，如由深能级引起的复合电流[10]。在更高正向偏压下，电流曲线向下弯曲且 Ni/Au SBD 与 Au SBD 表现逐渐一致，这表明器件的体电阻效应开始显著，并逐渐占主导地位。此外考虑到肖特基接触表面经过刻蚀工艺，会导致界面处存在较大的缺陷密度，致使势垒高度降低，理想因子增大[11-12]。

本实验采用 Cheung 的 $\frac{dV}{d(\ln I)} - I$ 曲线方法[9]提取串联电阻，在室温下 Ni/Au 肖特基接触与 Au 肖特基接触的串联电阻分别为 147 与 128 Ω，与势垒高度正相关，侧面印证了 Ni/Au 与 Au 肖特基接触在势垒高度上的差异。

4.3　响应光谱

图 8 为探测器的响应光谱，“front”表示正照，“back”表示背照。Ni/Au SBD 正照式在 262 nm 附近光响应达到了最高值，Au SBD 正照式的光响应波段主要在 234～278 nm，从当波长 270 nm 增大到 300 nm 时，响应度下降了几个数量级，与材料 $Al_{0.42}Ga_{0.58}N$ 的设计参数一致。图 9 为探测器的 LBIC 测试图，蓝色及浅蓝色区域即光敏面有效面积。

对于正照式器件，光电流主要来自于几个方面：大部分来自于通过金属电极的光在光吸收层内被吸

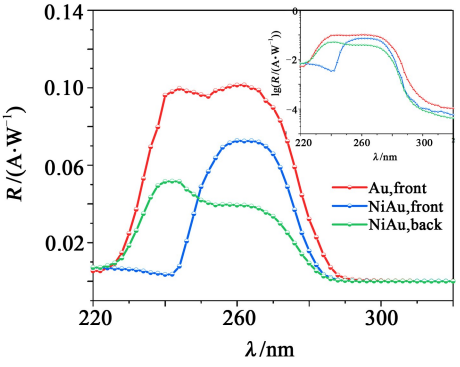

图 8　器件响应光谱曲线

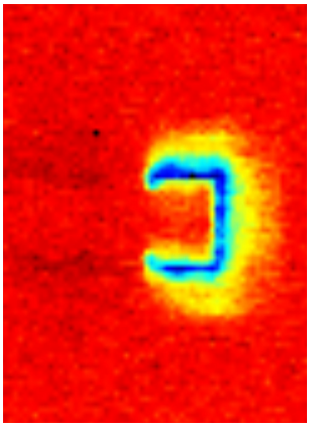

图 9 器件响应区域

收产生光生电子-空穴对，由于空间电荷区的电场作用，分离并产生光电流；另一部分来自于非肖特基接触区域的光生电子-空穴对，当到空间电荷区的距离在其扩散长度以内时，也会经过扩散到达空间电荷区，产生光电流；还有一部分来自于金属能级到半导体导带的内部光电子发射[13-14]。

在 i-$Al_{0.42}Ga_{0.58}N$ 材料中，考虑禁带宽度 E_g 为 4.59 eV，光波长为 270 nm 情况下，计算其吸收系数[8]：

$$\alpha(x)=\alpha_0\times\left[\left(\frac{\alpha_g}{\alpha_0}\right)^2+\frac{E(\lambda)-E_g}{E_g}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{10}$$

$$\begin{bmatrix}\alpha_0(x)\\ \alpha_g(x)\\ E_{Urbach}(x)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}16.7815 & 23.4908 & -20.4411\\ 8.4408 & -6.6203 & 9.4444\\ 0.046 & 0.0092 & 0.0876\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}1\\ x\\ x^2\end{bmatrix} \tag{11}$$

经拟合计算得到吸收系数 α 为 7.3467×10^4 cm^{-1}，光穿透深度约在 136 nm，而实际光吸收层 i 型 $Al_{0.42}Ga_{0.58}N$ 厚度为 140 nm。因此可以认为，光电流主要来自于产生在空间电荷区的光生载流子，以及距空间电荷区在扩散长度以内的光生载流子。

正照下，Au SBD 的光响应普遍高于 Ni/Au SBD 的光响应，Au SBD 的峰值响应达到 0.10 A/W，而 Ni/Au SBD 的峰值响应只有 0.07 A/W，外量子效率分别为 47%和 33%，与仿真结果基本一致。根据表 2 可以判断，由于 Au 肖特基势垒高度更低，在光照下产生的光生电子更容易越过势垒，即有更多的电子越过势垒形成光电流，从而导致 Au SBD 的光响应表现更好。同时 Ni/Au 与 Au 对入射光的透射率特性不同，在 250～300 nm 范围内，Ni/Au 接触比 Au 接触的透射率更低[7]，这也是 Ni/Au SBD 光响应更低的原因之一。

Ni/Au SBD 的响应范围为 248～276 nm，而 Au SBD 的响应范围为 234～278 nm，两者峰值响应都在 262 nm 附近。在长波方向，Au SBD 有一定的红移，这是由于 Au 接触势垒更低，在长波吸收限允许更低能级的缺陷产生光生电子越过势垒，形成光响应。在短波方向，Au SBD 响应更宽，与仿真模型一致，这是由于 Au 与 Ni/Au 金半接触界面的界面损耗层不同[15]。势垒宽度可表示为

$$W_D=\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0}{qN_D}\times\left(\varphi_{bi}-V-\frac{kT}{q}\right) \tag{12}$$

其中，W_D 即势垒宽度，N_D 为掺杂浓度，φ_{bi} 为肖特基势垒高度，V 为外加电压，ε_r 为相对介电常数，ε_0 为真空介电常数。

考虑镜像力与隧道效应的影响，应用比实际略高的势垒高度来计算势垒宽度，得到 Au SBD 与 Ni/Au SBD 的实际势垒宽度约为 192 和 200 nm。因此 Au 与 Ni/Au 金半接触的界面损耗层宽度初步定义为 95 和 99 nm，穿透深度小于其宽度的入射光基本无响应[15]，即 Au SBD 与 Ni/Au SBD 的短波截止边应为 243 与 249 nm，而实际则是 234 与 248 nm。可见 Ni/Au SBD 的短波截止边基本上符合理论，也与常规器件的短波截止边一致，而 Au SBD 由于金半接触界面较 Ni/Au 更好，实际界面损耗层宽度为 89 nm，界面复合作用弱，因此短波吸收边在 234 nm。

对比正照式和背照式，发现正照式有更优异的光响应。正照下金属电极对入射光的吸收和反射导致光子透过率减小，光响应下降。背照下虽然在光子入射过程中没有电极阻碍，但由于材料衬底较厚，一方面在缓冲层/半导体层处，大量缺陷对入射光有吸收与反射，另一方面材料内的异质结等结构也会造成光子吸收，结合透射谱可以判断必然只有一部分光子在光吸收区被吸收，对光电流有贡献。因此器件的光响应受接触金属类型、衬底材料厚度及材料生长状况等多方面因素共同调控。背照射下，在 232～276 nm 范围，Ni/Au SBD 的峰值响应为 0.05 A/W，比仿真得到的 240～276 nm 波段的峰值响应 0.07 A/W 略低，这是由于实际器件的 AlN 衬底内存在缺陷吸收的缘故。背照时，部分光子在 $Al_{0.42}Ga_{0.58}N$ 下方的 $Al_{0.55}Ga_{0.45}N$ 层产生光吸收，形成光生电子空穴对，又由于 $Al_{0.42}Ga_{0.58}N$ 层较窄，前文计算的势垒宽度

覆盖 $Al_{0.42}Ga_{0.58}N$ 层并展宽到 $Al_{0.55}Ga_{0.45}N$ 层，因而导致在电场作用下产生光电流，在 232～274 nm 波段发生响应。因此对背照式器件，吸收区厚度在一定程度上调控响应范围。

4.4　反偏下响应光谱

图 10 为 0.3 V 反偏下 Ni/Au SBD 与 Au SBD 的光谱响应。Ni/Au SBD 和 Au SBD 都在 262 nm 附近达到峰值响应，分别为 0.09 和 0.14 A/W，波长继续增加时，光响应下降。当施加 0.3 V 反向偏压时，由于肖特基势垒高度增大，高势垒使得半导体与接触金属间的势垒更宽，同时势垒电场增强，有利于促进光生电子空穴对的产生，抑制其复合作用，使响应率增大。从结果来看，在 0.3 V 反偏下，Au SBD 的性能远高于 Ni/Au SBD。

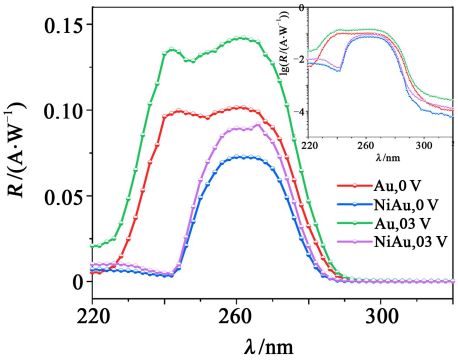

图 10　偏压下器件响应光谱

5　结论

本文以 GaN 基材料为主体，以 140 nm 的薄层 $Al_{0.42}Ga_{0.58}N$ 作为吸收区，分别制备 Ni/Au SBD 与 Au SBD。结果表明，Ni/Au 肖特基接触具有更低的暗电流，为 6.67×10^{-11} A/cm^2，工作噪声更小，而 Au 肖特基接触的开启电压更低，为 1.11 V，有利于器件更快进入工作导通状态，降低器件的开关损耗。在正照射情况下，Au SBD 具有 234～278 nm 的宽响应范围，Ni/Au SBD 的响应范围则覆盖 248～276 nm，而 Au SBD 的峰值响应更高，响应范围更大，这是因为一方面 Au 接触的势垒高度更低而具有更大的长波吸收限，另一方面在短波方向上 Au 和 Ni/Au 的接触界面的表面态情况不同、势垒宽度不同，导致短波截止边也不同。实际测试结果与仿真模型基本一致，验证了仿真模型的正确性，不同的金属接触确实对 SBD 的响应起到了一定的调控作用。背照射情况下，当 $Al_{0.42}Ga_{0.58}N$ 吸收区的厚度偏小时，会导致光响应范围在短波方向展宽，因此吸收区厚度应在 250 nm 左右，以使内建电场覆盖整个吸收区，从而有效提高光响应，不至于因吸收区过厚导致光响应变小。

参考文献：

[1] Averine S, Chan Y C, Lam Y L. Evaluation of Schottky contact parameters in metal-semiconductor-metal photodiode structures[J]. Appl. Phys. Lett., 2000, 77(2): 274-276.

[2] 黄烈云，吴琼瑶，赵文伯，等. 日盲型 AlGaN PIN 紫外探测器的研制[J]. 半导体光电，2007，28(3)：342-344.
Huang L Y, Wu Q Y, Zhao W B, et al. Development of solar-blind AlGaN PIN ultraviolet detector [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2007, 28(3): 342-344.

[3] 徐立国，谢雪松，吕长志，等. GaN 基紫外光探测器研究进展[J]. 半导体光电，2004，25(6)：411-416.
Xu L G, Xie X S, Lv C Z, et al. Research progress of GaN-based ultraviolet photodetectors [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2004, 25(6): 411-416.

[4] Chang S J, Jhou Y D, Lin Y C, et al. GaN-based MSM photodetectors prepared on patterned sapphire substrates[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2008, 20(22): 1866-1868.

[5] 李静杰，程新红，王　谦，等. 退火温度对 Au/Ti/4H-SiC 肖特基接触特性的影响[J]. 半导体技术，2017，42(8)：598-602，630.
Li J J, Cheng X H, Wang Q, et al. Effect of annealing temperature on Au/Ti/4H-SiC Schottky contact properties[J]. Semiconductor Technology, 2017, 42(8): 598-602, 630.

[6] Wang K, Wang R X, Fung S, et al. Film thickness degradation of Au/GaN Schottky contact characteristics[J]. Materials Science and Engineering: B, 2005, 117(1): 21-25.

[7] 储开慧. 氮化镓基肖特基光电器件的研究[D]. 上海：中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所)，2010.
Chu K H. Research on GaN-based Schottky optoelectronic devices[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2010.

[8] 李浩杰，张　燕. 蓝宝石衬底多层 AlGaN 薄膜透射谱研究[J]. 光学学报，2020，40(19)：219-228.
Li H J, Zhang Y. Study on transmission spectrum of multilayer AlGaN thin films on sapphire substrate[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(19): 219-228.

[9] Cheung S K, Cheung N W. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics[J]. Appl. Phys. Lett., 1986, 49(2): 85-87.

[10] 刘　芳，张海峰，陈燕宁，等. 320 nm AlGaN 肖特基型紫外探测器的研制[J]. 电力电子技术，2020，54(2)：117-119.
Liu F, Zhang H F, Chen Y N, et al. Development of 320 nm AlGaN Schottky UV detector[J]. Power Electronics, 2020, 54(2): 117-119.

[11] 徐　峰，于国浩，邓旭光，等. Pt/Au/n-InGaN 肖特基接触

的电流输运机理[J]. 物理学报，2018，67(21)：390-395.
Xu F，Yu G H，Deng X G，et al. Current transport mechanism of Pt/Au/n-InGaN Schottky contacts[J]. Acta Physica Sinica，2018，67(21)：390-395.

[12] Kim H，Choi S，Choi B J. Forward current transport properties of AlGaN/GaN Schottky diodes prepared by atomic layer deposition[J]. Coatings，2020，10(2)：194.

[13] Monroy E，Calle F，Pau J L，et al. Analysis and modeling of $Al_xGa_{1-x}N$-based Schottky barrier photodiodes[J]. J. of Appl. Phys.，2000，88(4)：2081-2091.

[14] Helman J S，Sánchez-Sinencio F. Theory of internal photoemission[J]. Phys. Rev. B，1973，7(8)：3702-3706.

[15] Zheng H，Yong K，Ying-Wen T，et al. Study on the spectral response of the Schottky photodetector of GaN[J]. Chinese Physics，2006，15(6)：1325-1329.

作者简介：

胡乐枫(1997—)，男，浙江省温州市人，硕士研究生，主要从事氮化镓基紫外光电探测器的仿真、制备和性能研究；

张　燕(1975—)，女，山东省济南市人，博士，研究员，博士生导师，主要从事红外探测器和宽禁带紫外探测器等方面研究。