

AlGaIn 日盲紫外雪崩光电探测器暗电流研究

葛张峰¹, 余晨辉¹, 陈 鸣¹, 李 林¹, 许金通²

- (1. 南通大学 江苏省专用集成电路设计重点实验室, 江苏 南通 226019;
2. 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)

摘 要: 为了提高 AlGaIn 日盲紫外雪崩探测器的信噪比, 降低暗电流, 研制高性能日盲紫外探测器, 针对 AlGaIn 日盲紫外雪崩探测器暗电流机制进行了深入研究。首先对传统 p-i-n-i-n 结构雪崩探测器进行了初步研究, 分别设计了 GaN 和 AlGaIn 的两种雪崩探测器模型, 分析了其不同暗电流特性, 得到的模拟暗电流特性曲线与实验吻合。在此基础上, 针对日盲紫外波段高 Al 组分 AlGaIn 雪崩探测器, 重点分析了不同异质界面的负极化电荷、p 型有效掺杂以及温度等因素对暗电流的影响。在 AlGaIn 日盲紫外雪崩探测器研究中得到的近零偏工作暗电流为 2.5×10^{-13} A, 在反向 138 V 左右发生雪崩击穿, 雪崩开启电流为 18.3 nA 左右, 击穿电压温度系数约为 0.05 V/K, 与实验及文献测试结果吻合。

关键词: AlGaIn; 日盲紫外雪崩探测器; 暗电流; 负极化效应

中图分类号: TN23 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0920003

Research on dark current of AlGaIn solar-blind ultraviolet avalanche photodetectors

Ge Zhangfeng¹, Yu Chenhui¹, Chen Ming¹, Li Lin¹, Xu Jintong²

- (1. Jiangsu Key Laboratory of ASIC Design, Nantong University, Nantong 226019, China;
2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: In order to improve the S/N ratio, reduce the dark current and develop the solar-blind photodetectors with high performance, the dark currents of the AlGaIn solar-blind ultraviolet avalanche photodetectors were studied. Firstly, the conventional p-i-n-i-n avalanche photodetectors were examined using two newly designed models of avalanche photodetectors in GaN and AlGaIn. Different characteristics of dark current were analyzed and the simulation of the dark current matched the experimental data well. Based on this, the effects of the negative polarization charge at different heterogeneous interfaces, the p-type effective doping and temperature on the dark current in high Al content AlGaIn solar-blind avalanche photodetectors were investigated in detail. Results show that the dark current of the AlGaIn solar-blind ultraviolet avalanche photodetector is about 2.5×10^{-13} A near zero bias,

收稿日期: 2018-04-05; 修订日期: 2018-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(11574166); 国家留学基金(201708320105); 江苏省高校自然科学研究重大项目(14KJA510005)

作者简介: 葛张峰(1993-), 男, 硕士生, 主要从事氮化镓宽禁带半导体光电器件方面的研究。Email: 291193634@qq.com

导师简介: 余晨辉(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要从事半导体器件与光电系统集成方面的研究。Email: ychyu@ntu.edu.cn

许金通(1979-), 男, 研究员, 博士, 主要从事半导体器件及光电系统应用方面的研究。Email: xujintong@mail.sitp.ac.cn

the avalanche breakdown occurs at about 138 V in reverse and the open current is about 18.3 nA, temperature coefficient for the breakdown voltage is about 0.05 V/K, which are all consistent with the experiments and the literature results well.

Key words: AlGa_N; solar-blind ultraviolet avalanche photodetector; dark current; negative polarization

0 引言

GaN材料体系尤其是其三元合金 AlGa_N,通过调节材料 Al 组分实现禁带宽度在 3.4~6.2 eV 之间连续变化,对应吸收波长的范围为 200~365 nm,是制作紫外探测器的理想材料之一^[1-2]。在许多领域具有重要的应用,具体包括:喷气式飞机尾焰和导弹羽烟追踪、火灾预警、海洋环境监测以及非视距光通信等^[3]。

AlGa_N 雪崩探测器 (Avalanche Photodetector, APD) 是一种具有较高增益的光电导型探测器并能够对微弱的光信号进行探测。目前对 GaN/AlGa_N 光电器件主要集中在对可见盲和日盲探测器光响应特性的研究^[4-5],而对影响 SAM 结构日盲 APD 暗电流机制的研究相对较少。实际上暗电流是影响高增益 AlGa_N 日盲雪崩探测器性能的一个重要的因素,为了提高光电探测器性能,需要对其暗电流机制进行深入的研究^[6]。

文中从 AlGa_N 日盲紫外 APD 不同的暗电流机制出发,通过物理和数学模型模拟 APD 中相应的暗电流机制。模拟了不同异质界面处的极化效应、AlGa_N 的 P 型有效掺杂以及温度对 APD 能带结构、电场分布以及击穿电压特性的影响,分析并讨论了上述因素对 AlGa_N 日盲紫外 APD 暗电流的影响。

1 数值模型

1.1 器件结构

样品采用金属有机化学气相沉积(Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 方法生长在双面抛光的蓝宝石衬底上,在 AlN 成核层之上分别生长各层材料并用减小台面损伤的方法进行处理。器件光敏区域直径为 30 μm,其中 p 型层:Mg 掺杂,GaN 空穴浓度为~1×10¹⁸ cm⁻³,AlGa_N 空穴浓度为~2×10¹⁷ cm⁻³;非故意掺杂本征层:Si 掺杂,电子浓度为~2×10¹⁶ cm⁻³;n 型层:Si 掺杂,电子浓度为~2×

10¹⁸ cm⁻³。设计的日盲型 SAM 结构 APD,自下而上依次为 200 nm 厚 n 型 AlGa_N 层(窗口层),250 nm 厚非故意掺杂的 i 型 AlGa_N 层(吸收层),50 nm 厚 n 型 AlGa_N 层(分离层),150 nm 厚非故意掺杂的 i 型 AlGa_N 层(倍增区),25 nm 厚 p 型 AlGa_N 层和 160 nm 厚 p 型 GaN 层,此外在器件的表面添加了一层 300 nm 厚 Si₃N₄ 钝化层。

调整 Al_xGa_{1-x}N 材料的 Al 组分,其中窗口层采用 Al 组分 x=0.6,吸收层 Al 组分 x=0.4,能够对该日盲波段进行较好的探测,而在靠近电极的 p 型层为了形成良好的欧姆接触采用 GaN 材料。

1.2 材料参数和主要物理模型

根据氮化物材料的特性以及实验数据确定仿真的模拟参数,并调用相应的物理模型模拟探测器的工作过程。仿真采用的 GaN 和 AlGa_N 材料的主要参数^[7-8]如表 1 所示。

III-V 族氮化物材料在异质界面处具有很强的极化效应,总的极化 P_{Total} 主要来源于两部分:与材料自身生长有关的自发极化 P_{SP} 以及界面应力作用产生的压电极化 P_{PE} 。

$$P_{Total}=P_{SP}+P_{PE} \quad (1)$$

以 GaN/AlGa_N 异质结为例,界面处极化电荷密度(Polarization Charge Density, PCD)^[9]:

$$\sigma=|[P_{SP,AlGaN}+P_{PE,AlGaN}]-[P_{SP,GaN}-P_{PE,GaN}]|/q \quad (2)$$

Al_xGa_{1-x}N 自发极化:

$$P_{SP,Al_xGa_{1-x}N}=xP_{SP,AlN}+(1-x)P_{SP,GaN} \quad (3)$$

GaN/AlGa_N 异质结界面处由应力产生的压电极化:

$$P_{PE}=2\frac{a-a_0}{a_0}\left(e_{31}-e_{33}\frac{c_{13}}{c_{33}}\right) \quad (4)$$

式中: a_0 为材料无应力晶格常数; a 为材料应力晶格常数; c_{13} 、 c_{33} 为刚度常数; e_{31} 、 e_{33} 为压电系数。

1.3 暗电流机制模型

雪崩探测器的暗电流由体内暗电流和表面漏电流两部分组成。而雪崩探测器体内暗电流的机制主

要包括:扩散电流、产生复合电流、隧穿电流和雪崩倍增电流^[10-11]。各种暗电流作用条件各有不同,通过将各种暗电流机制引入连续性方程计算得到总的 APD 暗电流情况。仿真中采用的与暗电流相关的模型参数如表1 所示。

表 1 暗电流仿真主要模拟参数

Tab.1 Main parameters of dark current in simulation

Parameters	GaN	Al _{0.4} Ga _{0.6} N	Al _{0.6} Ga _{0.4} N
Lattice constant/ \AA (1 \AA =0.1 nm)	$a=3.189$ $c=5.185$	$a=3.158$ $c=5.104$	$a=3.143$ $c=5.063$
Room-temperature bandgap E_g/eV	3.4	4.2	4.8
Dielectric constant ϵ_r	9.5	9.1	8.9
Electron affinity χ/eV	4.1	2.7	2
Effective conduction band density of states N_C/cm^{-3}	2.3×10^{18}	3.9×10^{18}	4.7×10^{18}
Effective valence band density of states N_V/cm^{-3}	4.6×10^{19}	2.2×10^{20}	3.1×10^{20}
Thermal conductivity κ $/\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$	1.3	1.94	2.26
Lattice heat capacity c_L $/\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$	3	2.57	2.34
Electron mobility μ_n $/\text{cm}^2 \cdot \text{Vs}^{-1}$	480	410	370
Hole mobility $\mu_p/\text{cm}^2 \cdot \text{Vs}^{-1}$	20	18	16
Electron saturation velocity $v_n/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	1.5×10^7	1.5×10^7	1.5×10^7
Hole saturation velocity $v_p/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	2.1×10^7	1.7×10^7	1.5×10^7
Spontaneous polarization $P_{sp}/\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$	-0.029	-0.049 8	-0.060 2
SRH lifetime τ_p/s	1×10^{-9}	6.4×10^{-10}	4.6×10^{-10}
Electron impact coefficient $b_n/\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$	6.8×10^7	1.8×10^8	2.3×10^8
Hole impact coefficient $b_p/\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$	1.5×10^7	8.9×10^7	1.26×10^8

1.3.1 产生复合电流

半导体中载流子复合过程主要有三种:SRH 复合,俄歇复合以及辐射复合。

仿真中采用与掺杂相关的模型模拟这三种复合过程,其复合速率 R^{SRH} 、 R^{Auger} 和 R^{Rad} 的表达式分别为:

$$R^{\text{SRH}}=A(np-n_i^2) \tag{5}$$

$$R^{\text{Auger}}=(C_n n+C_p p)(np-n_i^2) \tag{6}$$

$$R^{\text{Rad}}=B(np-n_i^2) \tag{7}$$

式中: A 、 B 、 C 分别为 SRH、Radiative 以及 Auger 复合的系数; n_i 为本征载流子浓度。其中 B 为 $2 \times 10^{-10} \text{cm}^3/\text{s}$; C_n, C_p 均为 $1 \times 10^{-30} \text{cm}^6/\text{s}$ 。

1.3.2 隧穿电流

势垒区的内建电场逐渐增强,由于隧道效应形成隧穿电流。隧穿过程主要发生在势垒区,强电场直接破坏共价键结构使电子获得能量从而激发产生自由的电子-空穴对。仿真采用与电场相关的载流子生成模型模拟直接隧穿过程^[10],其载流子生成速率 G^{tbt} 为:

$$G^{\text{tbt}}=A \cdot F^p \exp\left(-\frac{B}{F}\right) \tag{8}$$

式中: A 、 B 和 P 均为拟合参量; F 为局域电场强度,其中 P 为 2, A 为 $3 \times 10^{12} \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-2}$, B 为 $3.5 \times 10^7 \text{Vcm}^{-1}$ 。

1.3.3 雪崩倍增电流

达到雪崩的临界电场时,载流子在电场作用下产生高速运动并撞击晶格,使价电子从晶格中挣脱形成自由的电子-空穴对,耗尽区内载流子数量急剧增加形成雪崩倍增机制主导的暗电流。仿真模拟雪崩倍增过程采用的离化模型^[10]为:

$$G_{\text{ava}}=\alpha_n n v_n+\alpha_p p v_p \tag{9}$$

$$\alpha(F)=\gamma a \exp\left(-\frac{\gamma b}{F}\right) \tag{10}$$

$$\gamma=\frac{\tanh\left(\frac{\hbar\omega}{2kT_0}\right)}{\tanh\left(\frac{\hbar\omega}{2kT}\right)} \tag{11}$$

式中: α_n 、 α_p 分别为电子与空穴的离化系数; v_n 、 v_p 为电子与空穴的漂移速度; γ 为声子散射的温度系数; T 为温度; $\hbar\omega$ 为光学声子能量; a 和 b 均为拟合参量,其中 a_n, a_p 分别为 $2.9 \times 10^8 \text{cm}^{-1}$ 和 $1.34 \times 10^8 \text{cm}^{-1}$ 。

1.3.4 表面漏电流

半导体材料在生长过程中,表面具有较高密度缺陷形成许多表面态。这些表面态会成为电子和空穴的复合中心,从而产生表面的复合电流。仿真采用表面 SRH 复合模型模拟探测器表面的复合电流,其表面复合速率 $R_{\text{surf}}^{\text{SRH}}$ 为:

$$R_{\text{surf}}^{\text{SRH}}=\frac{np-n_i^2}{n/S_p+p/S_n} \tag{12}$$

式中： S_n, S_p 分别为电子与空穴的表面 SRH 复合系数，为 $1 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 。

2 暗电流仿真

2.1 SAM 型雪崩探测器暗电流

采用 SAM 型结构分别创建了 GaN 和 AlGaIn 的 APD 结构模型，器件结构参数和实验数据来自参考文献[6,12]。图 1 分别对比了实验与模拟得到的 APD

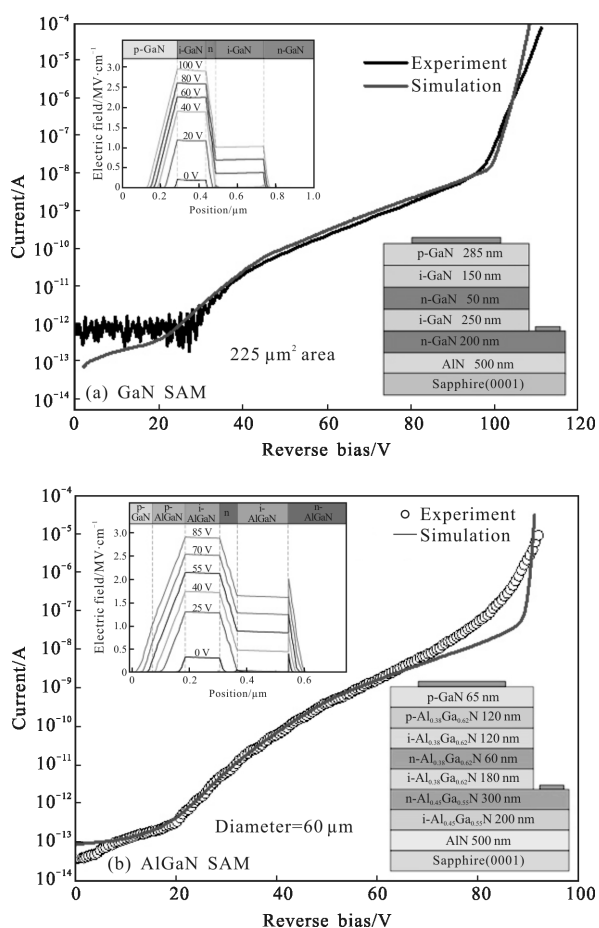


图 1 紫外 APD 暗电流特性曲线
Fig.1 Dark current characteristics of UV APD

暗电流特性，对比可知，模拟结果与实验数据基本符合。在 300 K 的工作温度下，APD 在零偏附近的暗电流为 10^{-13} A 量级。图 1(a)实验的结果在低偏压(反向 20 V 以下) 时由于测试系统极限因而产生了抖动误差。当偏压大于 20 V 时，探测器暗电流随偏压的增大逐渐提高，两种结构的 APD 分别在反向 100 V 和 85 V 左右发生雪崩击穿，雪崩开启电流在 10^{-8} A 量级。图 1(a)插图为偏压从 0 V 增加到 100 V 过程中

模拟得到的 GaN SAM 结构 APD 电场的纵向分布，图 1(b)插图为偏压从 0 V 增加到 85 V 过程中模拟得到 AlGaIn SAM 结构 APD 电场的纵向分布，电场强度在 3 MV/cm 附近时开始发生雪崩击穿。SAM 型 APD 中倍增区电场要明显大于吸收区，电场主要集中在倍增区而吸收区获得部分电场，确保了光生电子空穴在吸收区的有效分离以及在倍增区的碰撞离化。

2.2 AlGaIn 日盲雪崩探测器暗电流

针对 260~280 nm 日盲波段进行探测，在图 1(b)结构的基础上调整了各层材料的 Al 组分，设计的 AlGaIn 日盲雪崩探测器结构如图 2 所示。

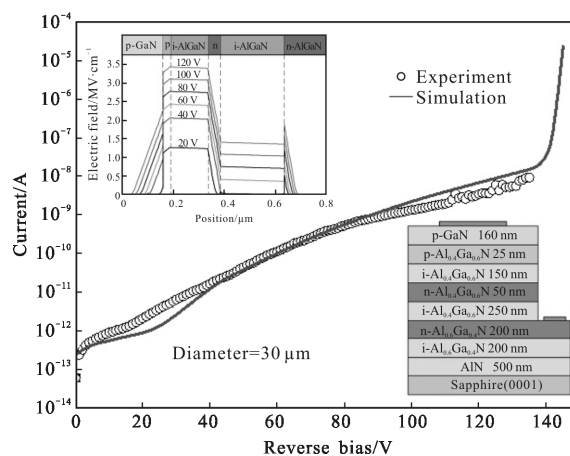


图 2 AlGaIn 日盲紫外 APD 暗电流特性曲线

Fig.2 Dark current characteristics of AlGaIn solar-blind UV APD

对制备得到的 AlGaIn 日盲雪崩探测器样品器件进行了测试。器件的实际雪崩开启电压在反向 135 V 附近，为了保护器件不被击穿烧毁，在雪崩击穿拐点开启后没有做更高偏压测试。图 2 对比了实验和模拟得到的 AlGaIn 日盲雪崩探测器暗电流特性，两者基本符合。模拟得到 APD 在零偏附近时的暗电流为 $2.5 \times 10^{-13} \text{ A}$ ，在反向 138 V 左右发生雪崩击穿，雪崩开启电流为 18.3 nA。为了进一步研究影响 AlGaIn 日盲 APD 暗电流特性的因素，对图 2 中设计的日盲 APD 在不同条件下的暗电流特性进行了模拟仿真。

由于极化效应在异质界面诱发极化电荷产生极化电场，AlGaIn 日盲 APD 主要考虑了两个异质界面处的极化效应，即吸收层与窗口层($\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}/\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$)以及 p 型层异质界面($\text{GaN}/\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$)。根据 Ambacher 的公式(2)可以计算出 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}/\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ 界面处极

化电荷密度为 $6.9 \times 10^{-12} \text{ cm}^{-2}$, GaN/Al_{0.4}Ga_{0.6}N 界面处极化电荷密度为 $1.46 \times 10^{-13} \text{ cm}^{-2}$ 。实际上由于在异质界面处存在与极化电荷相反电性的缺陷对极化效应产生屏蔽作用, 因而最终异质界面处的极化电荷密度要小于理论值^[8]。

由于材料为 Ga 面生长, 在 GaN/Al_{0.4}Ga_{0.6}N 和 Al_{0.4}Ga_{0.6}N/Al_{0.6}Ga_{0.4}N 异质界面均诱发产生负极化电荷^[9]。图 3 模拟了 Al_{0.4}Ga_{0.6}N/Al_{0.6}Ga_{0.4}N 界面不同负极化电荷密度下暗电流特性, 发现随着界面处极化电荷密度的增加, 高偏压下的暗电流单调减小而 APD 击穿电压提高。如图 3 插图所示, 极化电荷密度的增加使得 Al_{0.4}Ga_{0.6}N/Al_{0.6}Ga_{0.4}N 界面处产生更大的极化电场, 在反向偏置电压不变的情况下导致了倍增区电场强度的降低。APD 需要达到雪崩临界电场才会发生击穿^[10], 倍增区电场强度降低使得载流子的电离系数减小, 雪崩过程受到抑制, 击穿电压提高。Al_{0.4}Ga_{0.6}N/Al_{0.6}Ga_{0.4}N 异质面为吸收层与窗口层的交界面, 由于需要针对日盲波段进行探测, 这两个区域层的 Al 组分相对固定。Al_{0.4}Ga_{0.6}N 和 Al_{0.6}Ga_{0.4}N 均为高 Al 组分材料相对缺陷密度较大, 其中相反电性缺陷对该异质界面的极化效应的屏蔽作用也相对较大。由模拟结果可知此异质界面处的极化效应需要抑制才能降低 APD 雪崩击穿电压, 因而缺陷对极化效应的屏蔽作用一定程度上降低了击穿电压。

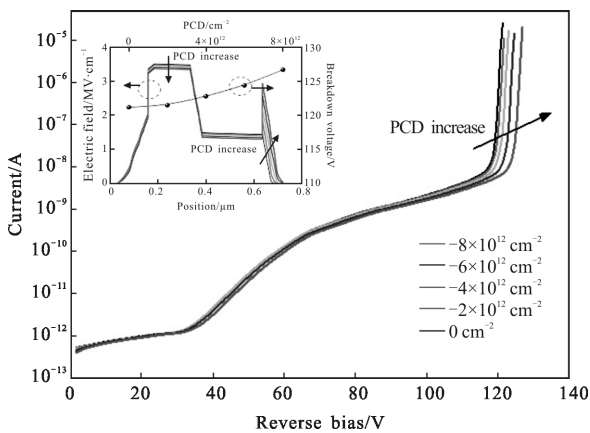


图 3 Al_{0.4}Ga_{0.6}N/Al_{0.6}Ga_{0.4}N 界面不同极化电荷密度(PCD)下暗电流特性模拟曲线

Fig.3 Simulated dark current of APD with different PCDs in Al_{0.4}Ga_{0.6}N/Al_{0.6}Ga_{0.4}N interface

图 4 模拟了 GaN/Al_{0.4}Ga_{0.6}N 界面处不同负极化电荷密度下暗电流特性, 随着界面处极化电荷密度

的增加, 高偏压下的暗电流单调增加, APD 击穿电压降低。如图 4 插图所示, 极化电荷密度增加使得 GaN/Al_{0.4}Ga_{0.6}N 界面处极化电场提高, 倍增区的电场也随之增强, APD 在施加的偏压下更容易达到雪崩临界电场发生击穿, 击穿电压降低。GaN/Al_{0.4}Ga_{0.6}N 界面为电极附近的 p 型层与倍增区的交界区域, 由于目前的工艺, GaN 材料相较于 AlGaN 生长质量更好、缺陷密度更小、更加适合于在其上制作欧姆电极, 因而电极附近的 p 型层多采用 GaN 材料。从吸收层至 p 型 GaN 层, 一般存在较大的 Al 组分差, 在这之间通常会存在一个或多个异质界面随之对应不同的 APD 结构。由模拟结果可知此 p 型层异质界面处极化效应的增强能够降低 APD 击穿电压, 在不考虑 Al 组分变化的情况下, 需要尽可能减弱缺陷对极化效应的屏蔽作用从而降低击穿电压。

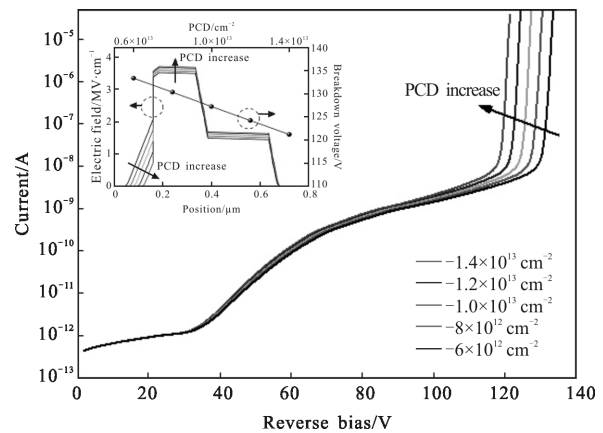


图 4 GaN/Al_{0.4}Ga_{0.6}N 界面不同极化电荷密度(PCD)下暗电流特性模拟曲线

Fig.4 Simulated dark current of APD with different PCDs in GaN/Al_{0.4}Ga_{0.6}N interface

进一步研究负极化效应对 APD 暗电流影响的物理机理, 分析不同异质界面处负极化电荷密度下的能带图。如图 5 所示, 分别为 Al_{0.4}Ga_{0.6}N/Al_{0.6}Ga_{0.4}N 界面和 GaN/Al_{0.4}Ga_{0.6}N 界面不同负极化电荷密度下 APD 导带的纵向分布图, 增加的负极化电荷使得相应的异质界面的导带向上弯曲形成了电子势垒。由于受到负极化电荷的作用, 大量的空穴在异质界面处被吸引, 形成了一个诱导的 pn 结。在 Al_{0.4}Ga_{0.6}N/Al_{0.6}Ga_{0.4}N 异质界面, 负极化电荷吸引空穴诱发形成的 pn 结与原始 pn 结的方向相反, 耗尽区的势垒降低, 倍增区的电场削弱。而在 GaN/Al_{0.4}Ga_{0.6}N 界面,

负极化电荷诱发形成的 pn 结与原始 pn 结的方向一致,耗尽区的势垒提高,倍增区的电场增强。

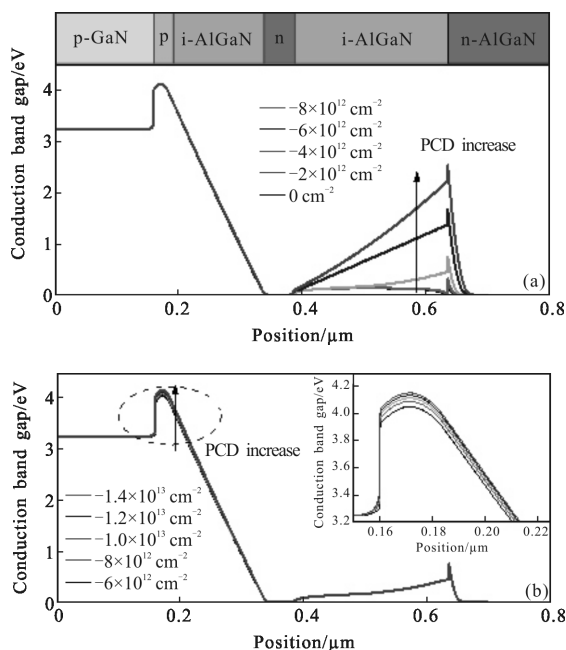


图 5 不同异质界面处负极化电荷密度(PCD)下 APD 导带的纵向电场分布(a) $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}/\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ 界面 (b) $\text{GaN}/\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ 界面

Fig.5 Vertical electric field distribution of APD conduction band at different PCD with heterogeneous interfaces (a) $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}/\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ (b) $\text{GaN}/\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$

此外,氮化物材料生长过程中的 P 型有效掺杂也是目前一个重要的难题。由于 GaN 和 AlGaIn 材料禁带宽度很大,导致 Mg 的激活能很高,尤其是高 Al 组分的 AlGaIn 材料其 p 型有效掺杂很低。图 6 模拟了 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ 材料中 p 型掺杂浓度与电场的关系,随着掺杂浓度的提高倍增区的电场也随之增强,p 型层的耗尽区范围在减小。由模拟可知 p 型层有效掺杂能够提高倍增区的电场强度,从而 APD 更容易达到雪崩击穿临界电场,击穿电压降低。图 6 插图模拟了 p 型 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ 层不同掺杂浓度下 APD 导带纵向分布,p 型掺杂对能带产生了与 $\text{GaN}/\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ 界面处负极化电荷相似的作用。p 型有效掺杂浓度提高,耗尽区的势垒也随之提高,倍增区的电场增强。在 GaN 材料同样也存在有效掺杂较低的问题,很难获得高空穴浓度的 p-GaN。由于 p 型有效掺杂降低会导致耗尽区扩大,为了防止 p 型区耗尽而产生器件贯通需要合理设置 p 型区厚度。

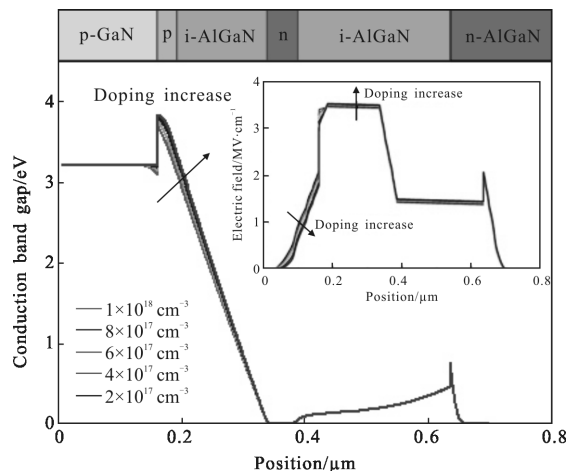


图 6 p 型 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ 层不同掺杂浓度下 APD 导带纵向分布 Fig.6 Vertical conduction band diagrams in APD with different doping concentrations in p type $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ layer

图 7 模拟了 273~373 K 时 APD 暗电流特性曲线,随着温度的升高,探测器的暗电流单调下降,雪崩击穿电压提高。APD 表现出正击穿电压温度特性,表明器件是由雪崩倍增主导的击穿,而非其他机制的击穿。根据探测器不同温度对应下的雪崩击穿

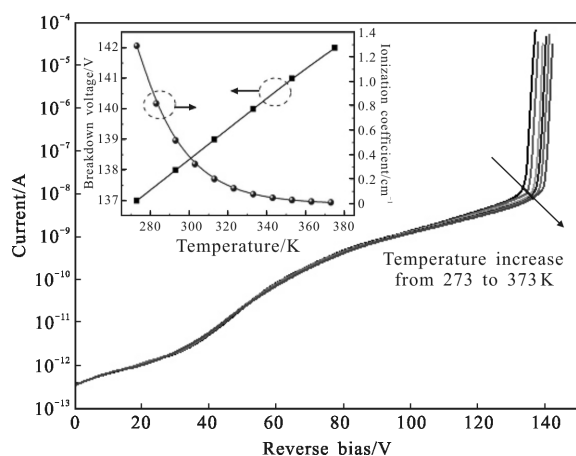


图 7 273~373 K(每次增加 20 K)时 APD 的暗电流特性 Fig.7 Dark current characteristics of APD with temperature varying from 273 K to 373 K in 20 K steps

电压,得到日盲紫外 APD 击穿电压的温度系数为 0.05 V/K,与参考文献[12-13]报道的 AlGaIn APD 击穿电压温度系数的实验结果 0.05 V/K 和 0.06 V/K 相符合。考虑到相对高偏压下尤其是当内电场大于雪崩临界电场时 APD 以雪崩倍增电流为主导,图 7 中雪崩击穿电压的变化趋势可以通过 VanOverstraeten

的公式(9)~(11)进行解释。随着 APD 工作温度的升高,声子散射的温度系数也随之提高,进而导致电子和空穴的离化系数下降。由于 APD 中空穴的离化系数要远高于电子因而空穴离化在雪崩倍增过程中占主导^[14],由图 7 插图可知在 273~373 K 温度范围内空穴离化系数随着温度升高而下降。离化系数下降使雪崩倍增主导的暗电流随温度的升高而降低,雪崩击穿电压提高。

3 结论

文中在 SAM 型 APD 结构的基础上,建立了 AlGaIn 日盲紫外 APD 的器件模型,模拟得到其零偏附近时的暗电流为 2.5×10^{-13} A,在反向 138 V 左右发生雪崩击穿,雪崩开启电流为 18.3 nA,与实验结果符合。分别对不同异质界面处负极化效应和 p 型有效掺杂对暗电流的影响进行了分析研究。结果表明:p 型层异质界面处的负极化电荷使 APD 雪崩击穿电压降低,而吸收层和窗口层异质界面处的负极化电荷使击穿电压提高,这是由于在不同位置诱发的负极化电荷形成的极化电场对内建电场产生了不同的作用。提高 p 型有效掺杂产生了与增强 p 型层异质界面处负极化相似的作用,提高了倍增区电场并降低了 APD 击穿电压。最后对工作在 273~373 K 温度范围内的 AlGaIn 日盲紫外雪崩探测器击穿电压温度特性进行了研究,发现其击穿电压具有正温度特性,模拟得到的温度系数为 0.05 V/K,因而温度在 273~373 K 的范围内,探测器暗电流受温度的影响较小。

参考文献:

- [1] Wang X Y, Zhong M, Zhao D G, et al. Back-illuminated 283 nm AlGaIn solar-blind ultraviolet p-i-n photodetector [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2013, 42(4): 1011-1014. (in Chinese)
- [2] Cicek E, Mcclintock R, Vashaei Z, et al. Crack-free AlGaIn for solar-blind focal plane arrays through reduced area epitaxy[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(5): 051102.
- [3] Liu F H, Xu J T, Wang L, et al. GaN-based avalanche photodiodes and its recent development [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1215-1221. (in Chinese)
- [4] Yao C, Ye X, Sun R, et al. High-performance AlGaIn-based solar-blind avalanche photodiodes with dual-periodic III-nitride distributed Bragg reflectors [J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(3): 034302.
- [5] Wu H, Wu W, Zhang H, et al. All AlGaIn epitaxial structure solar-blind avalanche photodiodes with high efficiency and high gain[J]. *Applied Physics Express*, 2016, 9(5): 052103.
- [6] Pau J L, Bayram C, Mcclintock R, et al. Back-illuminated separate absorption and multiplication GaN avalanche photodiodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(10): 101120.
- [7] Levinshtein M E, Rumyantsev S L, Shur M. Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe[M]. New York: John Wiley, 2008: 1-30.
- [8] Piprek J. Nitride Semiconductor Devices: Principles and Simulation[M]. Berlin: Wiley-VCH, 2007: 30-67.
- [9] Molnár M, Donoval D, Kuzmík J, et al. Simulation study of interface traps and bulk traps in n⁺⁺ GaN/InAlN/AlN/GaN high electron mobility transistors [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 312(5): 157-161.
- [10] Wang X D, Hu W D, Chen X S, et al. Dependence of dark current and photoresponse characteristics on polarization charge density for GaN-based avalanche photodiodes [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, 44(40): 405102.
- [11] Yu C H, Ge Z F, Chen X Y, et al. Polarization and p-type doping effects on photoresponse of separate absorption and multiplication AlGaIn solar-blind avalanche photodiodes [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2018, 50(2): 113.
- [12] Huang Y, Chen D J, Lu H, et al. Back-illuminated separate absorption and multiplication AlGaIn solar-blind avalanche photodiodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(25): 253516.
- [13] Shao Z G, Chen D J, Lu H, et al. High-gain AlGaIn solar-blind avalanche photodiodes [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2014, 35(3): 372-374.
- [14] Mcclintock R, Pau J L, Minder K, et al. Hole-initiated multiplication in back-illuminated GaN avalanche photodiodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(14): 141112.