

界面陷阱对 InSb 光伏型红外探测器稳态特性的影响

陈晓冬¹, 杨翠^{1*}, 刘鹏¹, 邵晓鹏¹, 张小雷², 吕衍秋¹

(1. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

2. 中国空空导弹研究院 红外探测器航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471009)

摘要: 基于 Silvaco 二维数值仿真研究了界面陷阱对背照式 p-on-n 台面型 InSb 光伏红外探测器串音和量子效率的影响, 通过分析探测器中复合率分布、空穴电流密度分布、电场分布等与界面陷阱的空间分布及浓度的相关性, 揭示了界面陷阱影响探测器的稳态性能的内在物理机制。研究结果表明, N-型 InSb 有源区与钝化层界面处的陷阱和像元台面间的界面陷阱都会提高串音性能的同时降低量子效率, 但由于两者作用区域不同, 所以对两种性能的影响程度不同。

关键词: 界面态; 陷阱; InSb 光伏型红外探测器; 量子效率; 串音

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

The influence of interface traps on the performance of a photovoltaic InSb infrared detector

CHEN Xiao-Dong¹, YANG Cui^{1*}, LIU Peng¹, SHAO Xiao-Peng¹, ZHANG Xiao-Lei², LYU Yan-Qiu²

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Infrared Detector, China Airborne Missile Aviation, Luoyang 471009, China)

Abstract: The effects of the interface traps on the quantum efficiency and the crosstalk of a back-illuminated p-on-n mesa InSb photovoltaic infrared detector were studied based on Silvaco 2D numerical simulation. The distributions of the recombination rate, the hole current density and the electric field change with the position and the density of the interface traps, and their relationships were analyzed. The results show that the interface traps has a profound effect on the inherent physical mechanisms of the steady-state performance of the InSb detector. The traps at the N-InSb/passivation interface both on the back and between the pixel mesas improve the crosstalk performance at the cost of the decrease in the quantum efficiency. Because the regions they affect are different, the influence extents of the traps at different positions on the two steady-state performance are different.

Key words: interface state, traps, a photovoltaic InSb infrared detector, quantum efficiency, crosstalk

PACS: 85.60.Gz

引言

InSb 红外探测器在 $1 \sim 5.5 \mu\text{m}$ 波段响应^[1], 具有灵敏度高、光吸收能力强、探测率高以及材料生长工艺成熟等优点, 是目前世界上应用极其广泛的红

外探测器之一^[2-3]。理想、清洁的半导体表面由于周期性晶格发生中断, 导致禁带中出现电子态(表面态)^[4]; 实际的 InSb 光伏探测器, 由于制作过程中刻蚀、离子注入、减薄等工艺流程的应用, 在 InSb 表面处存在由于晶体缺陷或吸附原子等引起的表面态。

收稿日期: 2015-12-22, 修回日期: 2017-11-30

Received date: 2015-12-22, revised date: 2017-11-30

基金项目: 航空科学基金项目(20122481002), 国家自然科学基金(61307121)

Foundation items: Supported by the Aeronautical Science Foundation of China (20122481002), and National Natural Science Foundation of China (61307121)

作者简介 (Biography): 陈晓冬(1979-), 男, 河南洛阳人, 工程师, 博士, 主要研究领域为光学工程, 红外材料研究, 质量管理与控制技术。E-mail: cxd_1979@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: cyang@xidian.edu.cn

表面态可以增加表面的复合率,形成陷阱,严重影响面阵探测器的性能^[5-6]. 二十世纪六十年代, Hollis 等人^[7]研究了 p 型和 n 型 InSb 材料的载流子寿命及霍尔系数与温度的关系,发现当温度低于 150 K 时, InSb 禁带中存在两个分立的类施主复合中心,距离价带顶 0.071 eV 和 0.11 eV. Yoon 等^[6]在 77 K 温度下通过电容-电压特性和 XPS (x-ray photoelectron spectroscopy) 测试,分析了钝化层和 InSb 表面的界面陷阱密度的主要组成部分,研究了化学气相淀积参数对界面结构和界面陷阱密度的影响. 国内很多学者为了降低 InSb 界面态密度,对工艺进行了摸索^[5,8]. 2011 年上海技术物理所胡伟达等人^[9-10]在 InSb 光伏型红外探测器仿真中,将界面陷阱统一归为固定电荷,发现界面固定正电荷的存在降低了探测器的响应.

为了深入地研究界面陷阱对背照式 p-on-n 台面型 InSb 光伏探测器稳态性能的影响,基于 Silvaco 二维数值仿真方法,研究了不同位置处、不同浓度的界面陷阱对 InSb 光伏探测器的串音和量子效率的影响. 通过剖析不同位置、不同浓度的界面陷阱对空穴电流密度分布、空穴浓度分布、复合率分布以及电场分布等的影响,揭示界面陷阱影响探测器的串音和量子效率的内在物理机制. 实验结果表明, N-型 InSb 有源区与钝化层界面处的陷阱和像元台面间的界面陷阱都会使附近区域载流子的复合率增大,并在一定区域内产生附加电场. 两位置处界面陷阱的存在都会同时降低器件的量子效率和串音,且陷阱密度越高,量子效率和串音降低越明显. 不同之处在于 N-型 InSb 有源区与钝化层界面处的陷阱主要靠增大中间像元有源区载流子的复合来降低串音,而像元台面间的界面陷阱主要靠增大像元间隔区域载流子的复合来降低串音,所以 N-型 InSb 有源区与钝化层界面处的陷阱在提高串音性能的同时大大降低了器件的量子效率,而像元台面间的界面陷阱在提高串音性能的同时稍稍降低了器件的量子效率.

1 器件结构及物理模型

1.1 器件结构

InSb 光伏型红外探测器采用台面型结构,如图 1 所示,器件共有五个像元. n 区由衬底和部分台面组成,衬底厚度为 hl ,台面高度为 hh . p 区采用离子注入方式实现,注入峰值浓度位于台面顶部,结深 $0.8 \mu\text{m}$, L 表示光敏元的横向宽度, d 表示相邻两个光敏元的间距. 表 1 给出了模拟中采用的一些主要

参数. 辐射源以背入射方式照射中间光敏元,入射光波长为 $5.5 \mu\text{m}$. 探测器工作温度为 77 K.

表 1 InSb 红外探测器主要参数

Table 1 Key parameters used in the simulation

电极材料	Al
相邻光敏元间的距离	$d = 20 \mu\text{m}$
衬底厚度	$hl = 10 \mu\text{m}$
台面高度	$hh = 2.4 \mu\text{m}$
光敏元横向宽度	$L = 40 \mu\text{m}$
电极厚度	$Et = 2 \mu\text{m}$
N 区掺杂浓度	$N_d = 4 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$
P 区掺杂浓度	$N_a = 1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$
电子迁移率 (77 K)	$477\,000 \text{cm}^2 \text{v}^{-1} \text{s}^{-1}$
空穴迁移率 (77 K)	$850 \text{cm}^2 \text{v}^{-1} \text{s}^{-1}$
InSb 介电常数	16.8
热导率	0.18Wcm^{-1}
辐射复合系数	$5 \times 10^{-11} \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
电子俘获截面	$1 \times 10^{-15} \text{cm}^2$
空穴俘获截面	$1 \times 10^{-15} \text{cm}^2$
电子寿命	$1 \times 10^{-10} \text{s}$
空穴寿命	$1 \times 10^{-6} \text{s}$
电子有效质量	$0.014 m_0$
空穴有效质量	$0.43 m_0$
陷阱能级 1 (距离价带顶)	0.071 eV
陷阱能级 2 (距离价带顶)	0.11 eV
钝化层材料	SiO_2

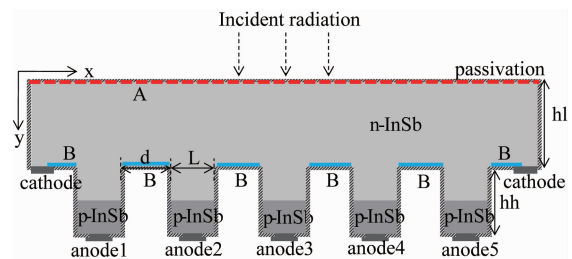


图 1 台面型 InSb 光伏探测器二维结构图

Fig. 1 Schematic diagram of InSb mesa-type infrared focal plane arrays

1.2 物理模型

探测器的稳态数值模拟仿真基于大型商用模拟平台 Silvaco-Atlas 展开,所涉及的基本方程均源自麦克斯韦定律,相关方程包括泊松方程以及载流子连续性方程和传输方程^[11-12].

1.2.1 泊松方程

式(1)给出了仿真中泊松方程的形式,它描述了器件中静电势和静电场与静电荷之间的关系.

$$\text{div}(\varepsilon \nabla \Psi) = \text{div}(-\varepsilon \vec{E}) = -\rho \quad (1)$$

式中, ε 是局部介电常数, Ψ 是静电势, \vec{E} 是静电场, ρ 是净电荷密度. 通常 ρ 在器件结构的各节点处是

空间和时间的函数,包括可动电荷、固定电荷和离化陷阱,其中由施主型界面陷阱引起的离化陷阱密度为

$$N_{id}^+ = N_t \times F_{id} \quad , \quad (2)$$

式中, N_t 为陷阱密度; $F_{id} = \frac{v_p \sigma_p p + e_{nd}}{v_n \sigma_n n + v_p \sigma_p p + e_{nd} + e_{pd}}$ 为施主型陷阱的电离率^[13]; n 和 p 分别为电子和空穴浓度; σ_n 和 σ_p 分别为电子和空穴的俘获截面; v_n 和 v_p 分别为电子和空穴的热速率. e_{np} 和 e_{pd} 分别为电子和空穴的发射率,由下式决定:

$$e_{nd} = \frac{1}{F_d} v_n \sigma_n n_i \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right) \quad , \quad (3)$$

$$e_{pd} = F_d v_p \sigma_p p_i \exp\left(\frac{E_i - E_t}{kT}\right) \quad , \quad (4)$$

其中, E_i 为本征费米能级, E_t 为陷阱中心能级, E_d 为陷阱中心的简并度, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度.

而对于多陷阱能级的情况,式(2)变为:

$$N_{id}^+ = \sum_{\alpha=1}^l N_{id\alpha}^+ \quad , \quad (5)$$

其中, l 为施主型陷阱能级数.

1.2.2 载流子连续性方程

载流子连续性方程描述了器件中某点载流子浓度的变化与该点通过的电流以及复合率和产生率的关系. 电子和空穴所满足的连续性方程分别为:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_n + G_n - R_n \quad , \quad (6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_p + G_p - R_p \quad , \quad (7)$$

式中, \vec{J}_n 和 \vec{J}_p 分别为电子和空穴电流密度, G_n 和 G_p 分别为电子和空穴的产生率, R_n 和 R_p 分别为电子和空穴的复合率, q 为单位电荷电量. 在数值模拟中,光产生率可表示为^[10,14]:

$$G^{\text{opt}}(z) = J(x, y, z_0) \alpha(\lambda, z) \exp\left[-\int_{z_0}^z \alpha(\lambda, z) dz\right] \quad , \quad (8)$$

其中 $J(x, y, z_0)$ 为入射光空间分布强度, z_0 为沿入射光传播方向吸收开始位置, $\alpha(\lambda, z)$ 为吸收系数, λ 为入射光波长.

1.2.3 传输方程

仿真中采用的传输方程为漂移-扩散传输方程:

$$\vec{J}_n = qn\mu_n \vec{E}_n + qD_n \nabla n \quad , \quad (9)$$

$$\vec{J}_p = qn\mu_p \vec{E}_p - qD_p \nabla p \quad , \quad (10)$$

式中, μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴的迁移率, D_n 和

D_p 分别为电子和空穴的扩散系数.

为了确保数值仿真能较为准确地模拟实际 InSb 光伏型探测器的工作,揭示探测器的内在物理机制,在仿真中还引入了一些复合模型. 包括 Shockley-Read-Hall (SRH) 复合、Auger 复合、辐射复合^[11,15-17]等,可分别表示为:

$$R_{\text{SRH}} = \frac{np - n_{i,\text{eff}}^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \quad , \quad (11)$$

$$R_{\text{Auger}} = (C_n n + C_p p)(np - n_{i,\text{eff}}^2) \quad , \quad (12)$$

$$R_{\text{Rad}} = C_R(np - n_{i,\text{eff}}^2) \quad , \quad (13)$$

其中, $n_1 = n_{i,\text{eff}} \exp\left(\frac{E_{\text{trap}}}{kT}\right)$, $p_1 = n_{i,\text{eff}} \exp\left(\frac{-E_{\text{trap}}}{kT}\right)$, τ_n 和 τ_p

分别表示电子和空穴寿命, E_{trap} 为陷阱能级与本征费米能级之间的差值, $n_{i,\text{eff}}$ 为本征载流子浓度, C_n 和 C_p 分别表示电子和空穴的 Auger 系数, C_R 为辐射复合系数.

红外探测器稳态性能的两个重要指标是量子效率 (QE) 和串音 (crosstalk). 量子效率可表示为^[18]

$$QE = \frac{R}{\lambda} \cdot \frac{hc}{q} \quad , \quad (14)$$

式中, λ 为波长, h 为普朗克常量, c 为真空中的光速, R 为响应率,是探测的输出电流与输入光功率之比,单位为 A/W.

由于像元对相邻像元的串扰,在相邻像元引起的信号 V_{NB} 与本像元信号 V_{LC} 之比,称为该像元对相邻像元的串音 crosstalk (CT),表示为

$$\text{crosstalk} = \frac{V_{NB}}{V_{LC}} \times 100\% \quad . \quad (15)$$

本文利用阳极收集到的电流值来计算串音

$$\text{crosstalk} = \frac{I_{\text{anode1}} + I_{\text{anode2}} + I_{\text{anode4}} + I_{\text{anode5}}}{I_{\text{anode3}}} \times 100\% \quad , \quad (16)$$

式中, $I_{\text{anode1}}, \dots, I_{\text{anode5}}$ 分别为阳极 anode1, \dots , anode5 收集到的电流值.

2 结果与分析

表 2 陷阱位置和陷阱密度对串音和量子效率的影响

Table 2 The influence of the interface traps on the quantum efficiency and the crosstalk

	串音/(%)			量子效率/(%)		
	A 位置	B 位置	全	A 位置	B 位置	全
无陷阱	19	19	19	94.6	94.6	94.6
$1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	11.9	11.4	6.52	66.5	77.8	53.1
$1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	6.21	7.09	1.48	39.3	68.1	29

表 2 给出了不同陷阱位置和陷阱密度对串音和量子效率的影响,随着陷阱密度的增加,探测器的串音和量子效率均减小.由于台面侧面陷阱分布情况比较复杂,本文重点分析 N-型 InSb 有源区与钝化层界面处(图 1 中红色虚线所示 A 位置)陷阱和像元间界面(图 1 中蓝色实线所示 B 位置)陷阱对串音和量子效率的影响.

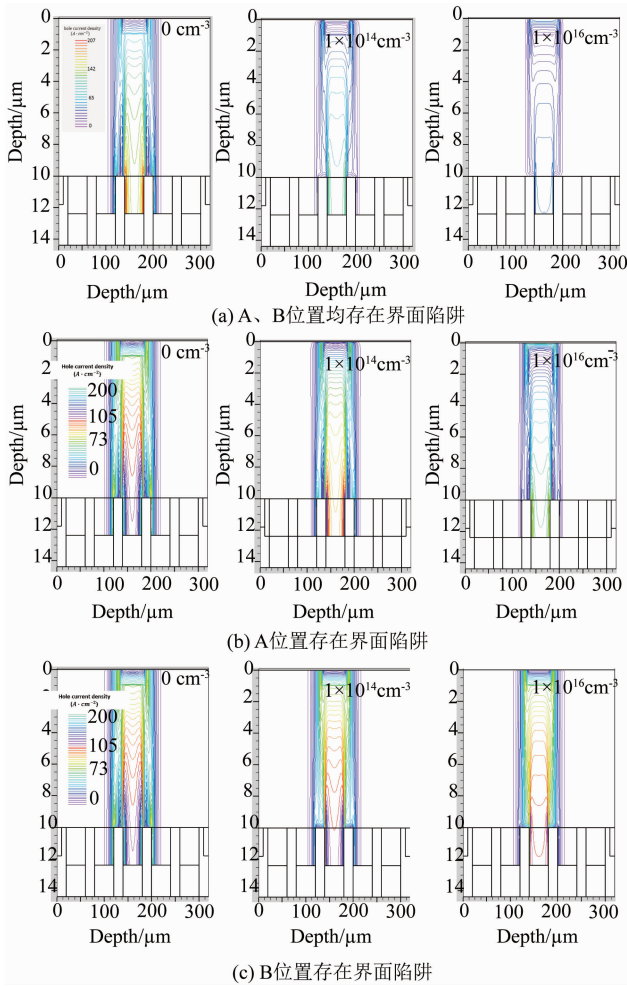


图 2 陷阱位置和密度对空穴电流密度的影响

Fig. 2 Distribution of the hole current density, (a) with interface traps at both position A and position B, (b) with interface traps at position A, (c) with interface traps at position B

图 2 给出了陷阱位置和密度对空穴电流密度的影响.在图 2(a)中,没有陷阱时,电流横向分布较广,且临近像元台面侧面处可见较强的电流密度,说明光生载流子横向扩散较为显著;存在界面陷阱时,随着陷阱密度的增加,中间像元区域电流密度显著减小,电流横向分布逐渐变窄,且强度减小,尤其是临近像元台面侧面处电流密度有显著减小.图 2(b)和图 2(c)分别给出了仅考虑 A 位置界面陷阱和 B

位置界面陷阱时的空穴电流密度分布,由图可见,A 位置陷阱与 B 位置陷阱对电流密度的影响均较为明显.空穴电流密度在 $x = 160 \mu\text{m}$ 和 $y = 10.1 \mu\text{m}$ 处的 1-D 分布分别如图 3 和图 4 所示.综合分析图 2、图 3 和图 4 可知,存在界面陷阱时,不论是纵向电流密度还是横向电流密度均减小,导致量子效率减小;此外,陷阱浓度越高,空穴电流密度总体减小越明显,且 A 位置陷阱的影响较 B 位置陷阱明显,高浓度陷阱会引起量子效率明显减小;陷阱浓度越高,临近像元台面侧面处电流密度减小越明显,串音减小越明显,且 B 位置陷阱的影响更显著.

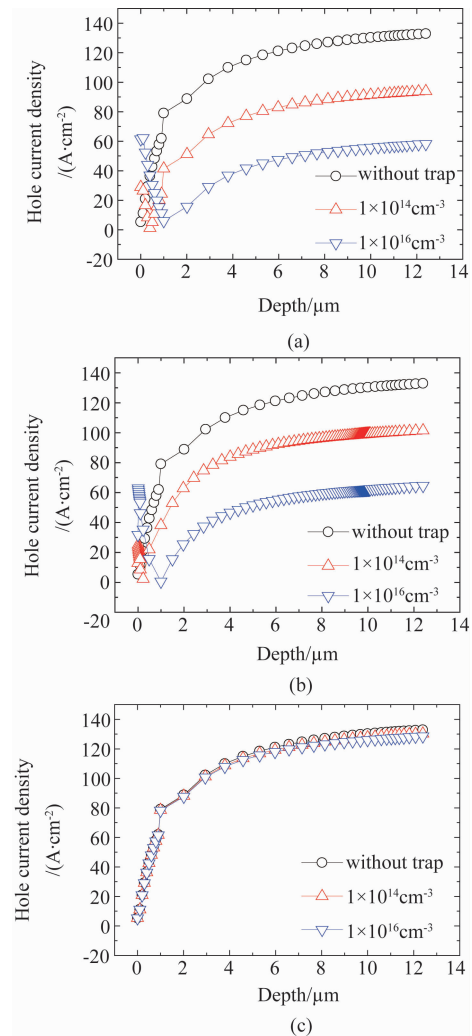


图 3 $x = 160 \mu\text{m}$ 处纵向电流密度分布 (a) A 和 B 位置均存在界面陷阱, (b) A 位置存在界面陷阱, (c) B 位置存在界面陷阱

Fig. 3 1-D distributions of the hole current density at $x = 160 \mu\text{m}$ (a) with interface traps at both position A and position B, (b) with interface traps at position A, (c) with interface traps at position B

2.1 界面陷阱对量子效率的影响

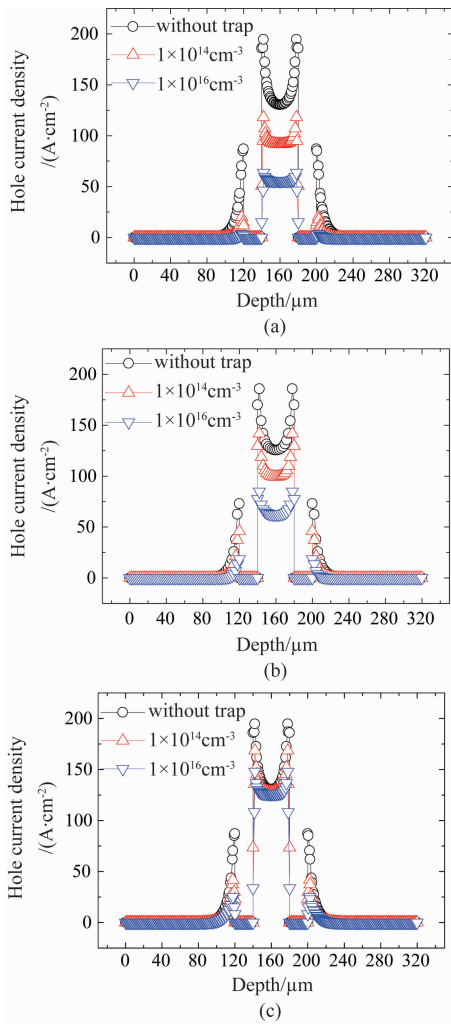


图4 $y = 10.1 \mu\text{m}$ 处横向电流密度分布 (a) A 和 B 位置均存在界面陷阱, (b) A 位置存在界面陷阱, (c) B 位置存在界面陷阱

Fig. 4 1-D distributions of the hole current density at $y = 10.1 \mu\text{m}$ (a) with interface traps at both position A and position B, (b) with interface traps at position A, (c) with interface traps at position B

图 5(a) 给出了无陷阱、A 位置陷阱密度为 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 以及 B 位置陷阱密度为 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 时沿 $x = 160 \mu\text{m}$ 切线 (中间单元中心线) 处复合率的 1-D 分布曲线. 由于 A 位置界面陷阱的存在, 在 N-型 InSb 有源区与钝化层界面处的复合率较另外两种情况高出四个量级. 所以, 在 N-型 InSb 有源区与钝化层界面附近区域, A 位置陷阱对载流子的复合起着主要作用, A 位置陷阱会增加载流子复合率. 图 5 (b) 给出了无陷阱、A 位置陷阱密度为 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 以及 B 位置陷阱密度为 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 时沿 $y = 10 \mu\text{m}$ 切线处复合率的 1-D 分布曲线. 由于 B 位置界面陷阱的存在, 在台面间隔区域的复合率比 A 界面处存在陷阱的情况高出三个量级, 比没有陷阱的情况高

出四个量级. 所以, 在台面间隔区域, B 位置陷阱所引起的复合占据主导地位, B 位置陷阱会增加载流子复合率. 图 6(a) 为仅在 A 位置有界面陷阱时陷阱密度对 $x = 160 \mu\text{m}$ 切线处复合率的 1-D 分布的影响, 图 6(b) 为仅在 B 位置有界面陷阱时陷阱密度对 $y = 10 \mu\text{m}$ 切线处复合率的 1-D 分布的影响. 可以看出, 陷阱浓度越高, 相应的陷阱区域附近的复合率越大.

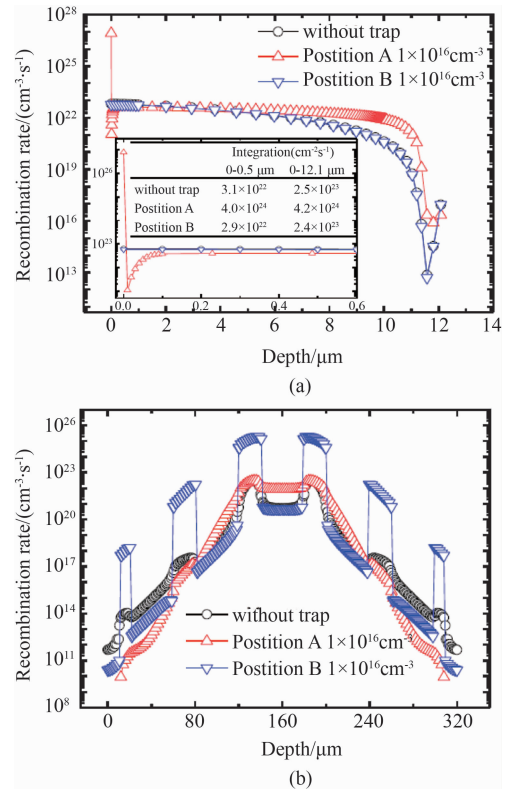


图 5 界面陷阱位置对复合率 1-D 分布的影响 (a) $x = 160 \mu\text{m}$ 处, (b) $y = 10 \mu\text{m}$ 处

Fig. 5 1-D distributions of the recombination rate (a) at $x = 160 \mu\text{m}$, (b) $y = 10 \mu\text{m}$

图 7 给出了空穴浓度随陷阱位置和陷阱密度变化的 2-D 分布, 图 8 给出了 $x = 160 \mu\text{m}$ 切线处空穴浓度的 1-D 分布随陷阱位置和陷阱密度变化的情况. 由图 7 可见, 无陷阱情况下, 相邻像元间隔区域上方的空穴浓度较高, 各像元上方区域中的空穴浓度较小, 且越接近 pn 结, 空穴浓度越低, 这是由于 pn 结对空穴的抽取作用所致^[19]. 在图 7(a) 中, 随着各位置处陷阱密度的增加, 由于陷阱的复合作用, 各像元上方区域中空穴浓度均减小, 尤其是像元间隔上方区域中空穴浓度显著减小. 比较图 7(b)、图 7 (c) 和图 8 可见, A 位置陷阱影响更大. 结合图 5-图 8 分析可知, N-型 InSb 有源区与钝化层界面附近空

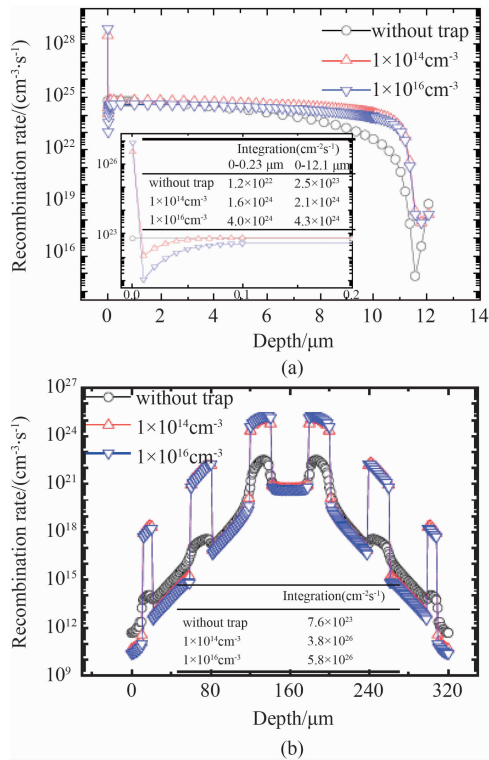


图6 界面陷阱密度对复合率的1-D分布的影响 (a) A位置存在界面陷阱 $x = 160 \mu\text{m}$ 处, (b) B位置存在界面陷阱 $y = 10 \mu\text{m}$ 处

Fig. 6 1-D distributions of the recombination rate (a) at $x = 160 \mu\text{m}$ with interface traps at position A, (b) at $y = 10 \mu\text{m}$ with interface traps at position B

穴会受到 A 位置陷阱的复合作用而大大减少,其浓度随陷阱密度增加而减小,这同时会造成远离该界面区域中空穴浓度的降低;而由于 B 位置陷阱会增加像元间隔区附近的载流子复合,且 B 位置陷阱密度越高,复合越明显,所以可在很大程度上消减扩散至像元间隔区继而扩散至临近像元的载流子.因此, A 位置陷阱和 B 位置陷阱复合了大量光生载流子,导致器件的量子效率减小;陷阱密度增大,使得 N-型 InSb 有源区与钝化层界面附近、中心像元台面两侧间隔区域附近的光生载流子复合增加,导致量子效率随陷阱密度增大而减小;由于入射面附近为光生载流子的主要产生区域,当 InSb 吸收层 A 位置存在界面陷阱时,大量的光生空穴还未扩散到 PN 结区就已经被复合,而在 B 位置存在的界面陷阱只增大了像元台面间隔区域的复合率,所以与 B 位置界面陷阱相比, A 位置界面陷阱对背照式 InSb 红外焦平面探测器量子效率的影响更为显著.

此外,深入分析图 3 和图 8 可以看到,在图 8 (a)和(b)中,有陷阱情况下,沿界面到 pn 结方向的

空穴浓度主体遵循先增加而后逐渐减小的规律,相应地在图 3 (a)和(b)中,空穴电流密度沿界面到 pn 结方向主体遵循先减小而后逐渐增加的规律,这些现象之间的内在联系和机理可以通过界面陷阱与光生载流子之间的相互作用进行分析.当光照时,由于界面存在施主型陷阱,导致大量光生载流子空穴被复合,空穴浓度较低,而在陷阱区域外,光生载流子的浓度较高,因此必然导致在陷阱区域外存在一个空穴浓度峰值.在空穴浓度峰值位置处,存在两种主要的空穴扩散运动,即由峰值位置指向界面的扩散运动和由峰值位置指向 pn 结的扩散运动,且后者的作用远小于前者.在界面附近,电离陷阱会产生高电场,因此界面附近的光生空穴主要以漂移运动为主.界面附近未被复合的空穴会在高场下向着 pn 结方向漂移,因此在界面附近的空穴电流密度较大.随着远离界面,电场逐渐减弱,漂移运动减弱,而与此同时,从峰值位置指向界面的扩散运动也会阻碍从界面处向着 pn 结方向漂移的空穴的运动,因此电流密度逐渐减小.而扩散运动的阻碍作用与从界面指向 pn 结方向的漂移作用在空穴峰值位置处达到相当强度,因此空穴浓度峰值位置处的空穴电流密度达到最小值.

2.2 界面陷阱对串音的影响

在研究了界面陷阱对量子效率影响的基础上,为了清楚地分析陷阱对串音的影响,图 9 和图 10 分别给出了无陷阱以及陷阱密度分别为 $1 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 和 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ (A、B 位置均有界面陷阱)时沿中间像元中心 ($x = 160 \mu\text{m}$) 和沿 $y = 10 \mu\text{m}$ 切线上纵向电场和横向电场分布.

由图 9 (a)可见, A 位置存在界面陷阱时, N-型 InSb 有源区与钝化层界面附近纵向电场较强,且陷阱密度越大,电场越强,由于该电场方向与光入射方向相同,因此有助于加速该界面附近光生载流子向阳极的漂移运动,且陷阱密度越大,该区域载流子漂移运动越显著.相比之下,图 9 (b)中横向电场很小,其对载流子的影响可以忽略.结合图 2-图 9 可知,在光照射焦平面探测器时, A 位置处的界面陷阱会复合一定数量的光生空穴,使得电流密度和空穴浓度整体减弱;未被复合的光生空穴会在 N-型 InSb 有源区与钝化层界面附近强纵向电场的作用下,主要以漂移运动的方式向着阳极方向运动,这在一定程度上再一次减小了界面附近光生载流子的横向(向两侧临近像元的)扩散运动,且高浓度陷阱有助于减小载流子的横向扩散作用.

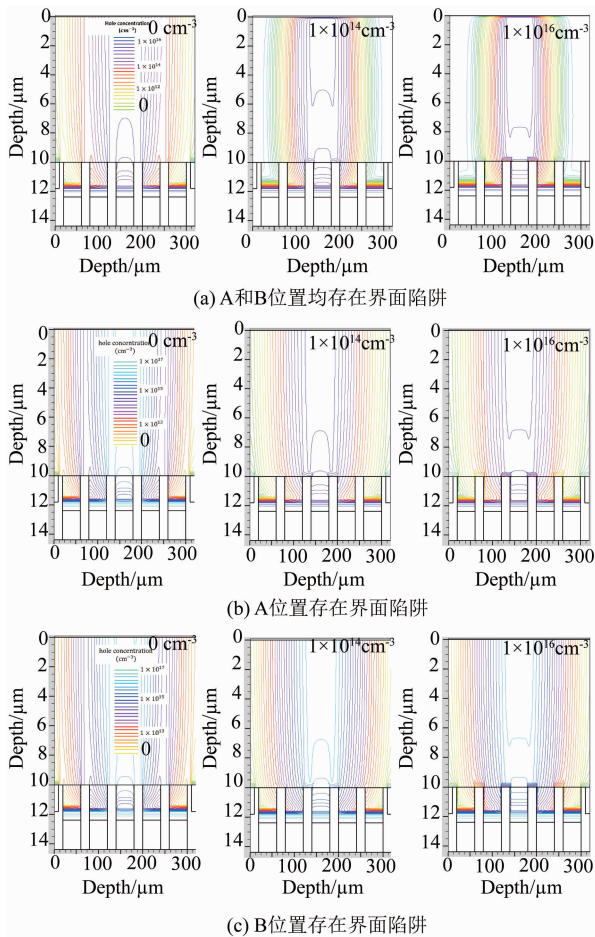


图7 陷阱位置和密度对空穴浓度的影响
Fig. 7 Distribution of the hole concentration (a) with interface traps at both position A and position B, (b) with interface traps at position A, (c) with interface traps at position B

结合图5、图6、图7、图8、图9和图10可知,中心像元两侧间隔区的纵向电场较强而横向电场很弱,纵向电场方向与光入射方向相反,会阻碍光生空穴向下运动,这会使得该区域形成载流子堆积,由于B位置存在界面陷阱,会增加此处载流子复合,从而在一定程度上减小了此处载流子向临近像元的运动,且陷阱密度越高,载流子复合越显著,因此B位置存在的界面陷阱有利于减小探测器的串音,但同时也会降低探测器的量子效率.结合图2-图4可以看到,B位置界面陷阱对探测器中间像元电流密度、空穴浓度、复合率的影响都不明显,其主要影响区域是像元间隔区和临近像元区.因此,在实际探测器设计中可以因势利导,折衷考虑B位置界面陷阱的利弊.

3 结论

采用器件数值仿真方法,研究了类施主型界面

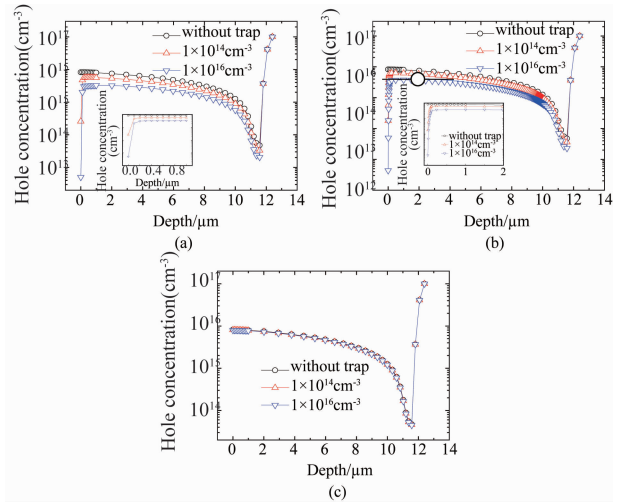


图8 $x = 160 \mu\text{m}$ 处空穴浓度的1-D分布 (a) A和B位置均存在界面陷阱, (b) A位置存在界面陷阱, (c) B位置存在界面陷阱

Fig. 8 1-D distributions of the hole concentration at $x = 160 \mu\text{m}$, (a) with interface traps at both position A and position B, (b) with interface traps at position A, (c) with interface traps at position B

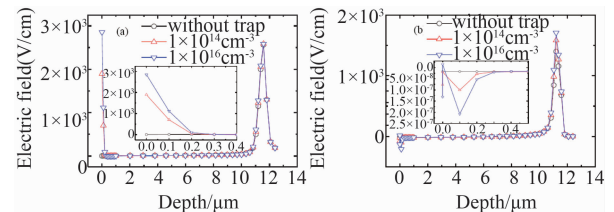


图9 中间单元中心($x = 160 \mu\text{m}$)切线上纵向电场和横向电场分布 (a)纵向电场分布, (b)横向电场分布
Fig. 9 1-D distributions of the electric field at $x = 160 \mu\text{m}$, (a) the longitudinal component, (b) the transverse component

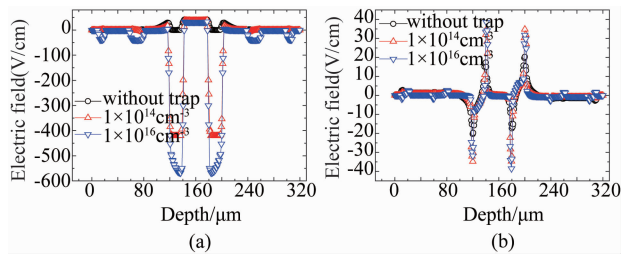


图10 沿 $y = 10 \mu\text{m}$ 切线上纵向电场和横向电场分布 (a)纵向电场分布, (b)横向电场分布
Fig. 10 1-D distributions of the electric field at $y = 10 \mu\text{m}$, (a) the longitudinal component, (b) the transverse component

陷阱对背照式 p-on-n 台面型 InSb 光伏型探测器的稳态性能:串音和量子效率的影响.有源区与钝化层界面处陷阱和像元间界面陷阱都是以降低量子效率为代价来提高串音的,但由于有源区与钝化层界面处陷阱的主要影响区域是中间像元区(光生载流子

的主要产生区),而像元间界面陷阱对探测器中间像元的影响不明显,其主要影响区域是像元间隔区和临近像元区,所以有源区与钝化层界面处陷阱的存在对探测器量子效率的影响明显大于其对串音的影响,而像元间界面陷阱的存在对探测器串音的影响明显大于其对量子效率的影响.两位置处界面陷阱对探测器串音和量子效率的影响都会随陷阱密度的增大而增大.在探测器优化设计中,应该客观地对待像元台面间类施主型界面陷阱的存在.

References

- [1] MENG Qing-Duan, LV Yan-Qiu, LU Zheng-Xiong, *et al.* Stress in InSb infrared focal plane array detector analyzed with ANSYS [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孟庆端, 吕衍秋, 鲁正雄, 等. InSb 红外焦平面探测器结构应力的 ANSYS 分析. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(6): 431 - 434.
- [2] Zhang X L, Zhang H F, Sun W G, *et al.* Numerical analysis of InSb parameters and InSb 2-D infrared focal plane arrays[J]. *Proc. of SPIE*, 2012, 8419: 84192U.
- [3] CHEN Bo-Liang, LU Wei, WANG Zhen-Guan, *et al.* Characterization for 64×64 InSb photovoltaic infrared detector array [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈伯良, 陆蔚, 王正官, 等. 64×64 元 InSb 光伏红外探测器阵列性能表征. *红外与毫米波学报*), 2000, **19**(2): 89 - 92.
- [4] Rogalski A. *Infrared detectors* [M]. 2nd ed. New York: CRC Press, 2010: 210.
- [5] FU Yue-Qiu, WANG Hai-Zhen, ZHENG Ke-Lin. Study of backside passivation in InSb focal plane detector[J]. *Aero weaponry* (傅月秋, 王海珍, 郑克霖. InSb 焦平面探测器背面钝化的研究. *航空兵器*), 2009, **4**: 42 - 44.
- [6] Yoon E, Park S. Study of structural change at the interface between Si_3N_4 and InSb and its relationship with the interface trap density [C.]//16th International Conference on Thin Films, 2014.
- [7] Hollis J E L, Choo S C, Heasell E L. Recombination centers in InSb [J]. *Journal of Applied Physics*, 1967, **38**(4): 1626 - 1636.
- [8] XIAO Yu, SHI Meng-Ran, NING Wei, *et al.* Effect of pre-treatment on interface between the passivation layer and InSb substrate[J]. *Laser & Infrared* (肖钰, 史梦然, 宁玮, 等. 表面预处理对 InSb 钝化层界面的影响. *激光与红外*), 2014, **44**(8): 902 - 905.
- [9] Guo N, Hu W D, Chen X S, *et al.* Optimization of micro-lenses for InSb infrared focal-plane arrays [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2011, **40**(8): 1647 - 1650.
- [10] Hu W D, Chen X S, Ye Z H, *et al.* Effects of absorption layer characteristic on spectral photoresponse of mid-wavelength InSb photodiodes [J]. *Optical and quantum electronics*, 2011, **42**(11-13): 801 - 808.
- [11] Selberherr S. *Analysis and simulation of semiconductor devices* [M]. New York: Springer-Verlag Wien, 1984, 8 - 41.
- [12] Qiu W C, Hu W D, Lin C, *et al.* Surface leakage current in $12.5 \mu\text{m}$ long-wavelength HgCdTe infrared photodiode arrays [J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(4): 828 - 831.
- [13] Simmons J G, Taylor G W. Nonequilibrium steady-state statistics and associated effects for insulators and semiconductors containing an arbitrary distribution of traps [J]. *Phys. Rev. B*, 1971, **4**(3): 502 - 511.
- [14] Hu W. D, Chen X S, Ye Z H, *et al.* Dependence of ion-implant-induced LBIC novel characteristic on excitation intensity for Long-wavelength HgCdTe-based photovoltaic infrared detector pixel arrays[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, **19**(5): 4100107.
- [15] Hall R N. Electron-hole recombination in germanium[J]. *Physical Review*, 1952, **87**(2): 387.
- [16] Shockley W, Read W. Statistics of the recombinations of holes and electrons [J]. *Physical Review*, 1952, **87**(5): 835 - 842.
- [17] Dziejwior J, Schmid W. Auger coefficient for highly doped and highly excited silicon [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **31**(5): 346 - 348.
- [18] Bai J, Hu W D, Guo N, *et al.* Performance optimization of InSb infrared focal-plane arrays with diffractive micro-lenses [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, **43**(8): 2795 - 2801.
- [19] HU W D, YE Z H, LIAO L, *et al.* 128×128 long-wavelength/mid-wavelength two-color HgCdTe infrared focal plane array detector with ultra-low spectral cross talk [J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(17), 5130 - 5133.
- (上接第 191 页)
- [20] Selberherr S. *Analysis and simulation of semiconductor devices* [M]. Wien, New York: Springer-Verlag, 1984.
- [21] Majeed M. Hayat, Bahaa E. A. Saleh and Malvin C. Teich. Effect of dead space on gain and noise of double-carrier-multi-lication avalanche photodiodes [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2013, **39**(3): 546 - 552.
- [22] Karar A, Musienko Y, Vanel J C. Characterization of avalanche photodiodes for calorimetry applications[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1999, **A428**: 413 - 431.
- [23] McIntyre J R. Multiplication noise in uniform avalanche diodes [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1966, **ED-13**: 164.
- [24] Wegrzecka I, Wegrzecki M, grynglas M, *et al.* Design and properties of silicon avalanche photodiodes [J]. *OPTO-Electronics Review*, 2004, **12**(1): 95 - 104.
- [25] Technical information SD-28, Characteristic and use of Si APD (Avalanche Photodiode) [S], *Hamamatsu Photonics K. K., Solid Division*, NO. KAPD9001E03, May 2004 DN.