光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260301002

正照射可见-近红外InGaAs单元型探测器响应灵敏度优化研究

龙劲强[1]，庄春泉[2]，杨　波[2]，于一榛[2*]，龚海梅[1,2*]

（1. 上海科技大学 信息科学与技术学院，上海 200000；2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外探测全国重点实验室，上海 200000）

摘　要： 可见-近红外响应的正照射单元型InGaAs光电探测器具有无需倒焊互连、封装结构简单、光谱响应范围宽等优势。针对InP帽层减薄工艺导致的表面态增加及表面复合引起的暗电流增大问题，文章分析了P型掺杂浓度与表面复合速率（SRV）对薄帽层器件灵敏度的影响机制。仿真结果表明：当帽层厚度由500 nm减薄至100 nm时，0.7 μm波长处的量子效率从6%提高至41%，但暗电流密度由0.2 nA/cm²增至16.7 nA/cm²。SRV对器件性能影响显著，当SRV从3×10^3 cm/s降至1×10^3 cm/s时，峰值探测率（D^*）由2.31×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}提升至3.78×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}。实验采用表面钝化工艺后，探测器暗电流得到有效抑制，峰值D^*从2.6×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}提高至4.1×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}。研究结果表明，改进表面钝化工艺以降低SRV对于提升正照射可见-近红外InGaAs探测器性能具有重要意义。

关键词： 铟镓砷；表面复合速率；可见-近红外；正照射

中图分类号： TN215　**文章编号：** 1001－5868(2026)02－0307－08

Optimization of Response Sensitivity for Front-Illuminated Visible-Near-Infrared InGaAs Single-Element Photodetectors

LONG Jinqiang[1], ZHUANG Chunquan[2], YANG Bo[2], YU Yizhen[2], GONG Haimei[1,2]

(1. School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 200000, CHN; 2. Key Laboratory of Infrared Detection, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200000, CHN)

Abstract: Front-illuminated visible-near-infrared (Vis-NIR) InGaAs single-element photodetectors offer advantages, such as no need for flip-chip bonding, simplified packaging structure, and broad spectral response. To address the increase in dark current caused by elevated surface states and surface recombination following the indium phosphide cap-layer thinning process, the effects of p-type doping concentration, surface states, and the corresponding surface recombination velocity (SRV) on the device sensitivity were analyzed. When the cap-layer thickness was reduced from 500 to 100 nm, the quantum efficiency at 0.7 μm increased from 6% to 41%, with the dark current density increasing from 0.2 to 16.7 nA/cm². The SRV significantly affected the device performance. As the SRV decreased from 3×10^3 to 1×10^3 cm/s, the peak specific detectivity (D^*) improved from 2.31×10^{12} to 3.78×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$/W. By applying a surface passivation

收稿日期：2026－03－01.

基金项目：国家自然科学基金(62274169).

*通信作者：于一榛，龚海梅

process, the dark current of the InGaAs photodetector was reduced, leading to an increase in the peak D^* from 2.6×10^{12} to 4.1×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$/W. The results demonstrate that improving the surface passivation to lower the SRV is crucial for enhancing the performance of front-illuminated Vis-NIR InGaAs detectors.

Key words: InGaAs; surface recombination velocity; Vis-NIR; front-illuminated

0 引言

铟镓砷(InGaAs)探测器是短波红外波段的核心探测器件。相较于截止波长为1.1 μm的硅基探测器,晶格常数与InP衬底匹配的$In_{0.53}Ga_{0.47}As$探测器响应波段覆盖0.9~1.7 μm,具有室温工作、高量子效率、低暗电流等优势,在光谱分析[1]、生物成像[2]、工业色选[3-4]等领域应用广泛。

为进一步缩减光学系统体积与功耗,亟需将InGaAs探测器的响应波长拓展至可见光波段,同时兼顾无需倒焊、封装简单、宽光谱响应等特点。现有可见-近红外InGaAs探测器研究主要集中于背照射焦平面结构,其通过去除数百微米厚的InP衬底抑制可见光的无效吸收[4]。然而,该结构依赖铟柱倒装焊技术将光敏芯片与读出电路互连,存在成本高、不耐高温、易损伤等不足[4]。因此,面向微光夜视、航天遥感、微型光谱仪、气体分析仪等应用,发展可见-近红外正照射器件结构仍具有重要价值[5]。

平面型InGaAs探测器通常采用Zn热扩散工艺形成p-n结,InP帽层中Zn浓度较高[6]。为实现可见光探测,需对InP帽层进行减薄。但减薄工艺会引入大量表面态,加剧表面复合速率(SRV),导致暗电流显著上升。同时,当p型掺杂浓度超过1×10^{17} cm^{-3}时,SRV随掺杂浓度线性增加,进一步恶化器件性能[7]。

近年来,微台面技术和离子注入等新方法逐步应用于InGaAs探测器研究[8-11]。Tillement等采用Be离子注入,在帽层掺杂浓度1×10^{16}~1×10^{19} cm^{-3}范围内制备平面型InGaAs器件,实现了掺杂浓度与深度的灵活调控,并将光敏元节距降至3 μm[9]。该团队还通过微台面结构优化,达到传统平面结器件的性能水平,同时抑制了结区横向扩展[11]。相比热扩散工艺,这些新技术在材料设计与结构调控方面提供了更大自由度,为高性能正照射InGaAs探测器的研制开辟了新途径。

在常规正照射InGaAs探测器中,InP帽层厚度通常大于0.5 μm,此时SRV对器件性能的影响不显著[6],因此相关研究较少涉及SRV的作用[4]。然而,针对薄帽层结构的可见-近红外探测器,SRV的影响不可忽视。目前尚缺乏系统性的仿真与实验研究来阐明帽层减薄过程中SRV对探测器灵敏度的作用机制。

本工作围绕正照射可见-近红外InGaAs探测器开展仿真与实验研究,重点分析帽层厚度、结区深度、p型掺杂浓度及SRV对暗电流和响应光谱的影响。通过优化表面钝化工艺降低SRV,有效抑制了暗电流,实现了0.7~1.7 μm波段探测率的整体提升,为高性能正照射可见-近红外InGaAs探测器的设计提供了重要依据。

1 实验原理

1.1 耗尽区的形成机理与调控

正照射平面型InGaAs器件结构如图1所示。对于正照射光电器件,入射光首先要通过P型掺杂的帽层区域。InP材料的截止波长为0.9 μm,并在可见波段具有高的吸收系数,因此,限制了0.9 μm波长以下的光信号透过帽层进入耗尽区,而波长大于0.9 μm的光信号能够穿透帽层并被转化为光电流。

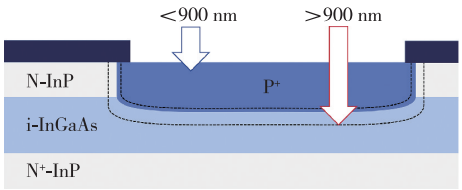
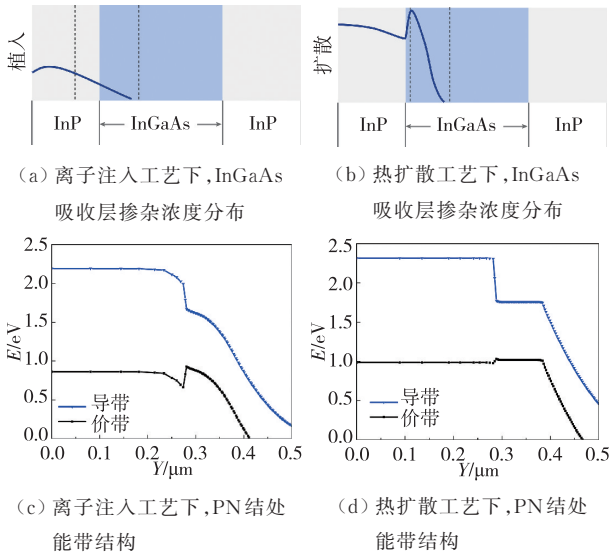


图1 正照射可见-近红外InGaAs器件结构

耗尽区位置由图1中的虚线标出。为了分析器件工艺对耗尽区器件响应的影响,图2(a)、(b)对比了离子注入和热扩散工艺的掺杂浓度分布,图2(c)、(d)分别对应了两种技术制备的PN结处能带结构。离子注入技术受益于较低的P型浓度(约为1×10^{17} cm^{-3}),耗尽区在帽层中拓展较多。而热扩散工艺由于高的掺杂浓度(1×10^{18}~1×10^{19} cm^{-3}),其耗尽区全部位于InGaAs的位置。因此,在相同扩散深度下,拓展耗尽区宽度有助于提升对可见光的响应能力。



（a）离子注入工艺下，InGaAs吸收层掺杂浓度分布　（b）热扩散工艺下，InGaAs吸收层掺杂浓度分布

（c）离子注入工艺下，PN结处能带结构　（d）热扩散工艺下，PN结处能带结构

图2　离子注入和热扩散工艺的掺杂浓度分布及对应的PN结处能带结构

1.2　表面复合速率

在半导体光电器件物理模型中，载流子的有效寿命τ_{eff}是一个关键参数，直接影响InGaAs器件的光电性能。该有效寿命受到材料体内特性与表面状态的双重制约，其关系可表示为[12]：

$$\frac{1}{\tau_{\mathrm{eff}}}=\frac{1}{\tau_{\mathrm{Bulk}}}+\frac{2SRV}{W} \tag{1}$$

式中，SRV为表面复合速率；W为帽层厚度；τ_{Bulk}为体寿命，主要由晶格内部SRH复合过程所决定。SRV既与表面钝化工艺相关，同时也与P型掺杂浓度有关。对于薄帽层结构的器件，当W足够小时，SRV对于τ_{eff}的影响尤为显著，特别是在高P型掺杂浓度的边界条件下[12]。

1.3　探测器灵敏度

对于红外探测器而言，一般通过归一化探测率（D^*）[6]来评价探测器的灵敏度，计算公式为：

$$D^*=\frac{I_{\mathrm{s}}}{I_{\mathrm{n}}}\times\frac{\sqrt{A_{\mathrm{d}}\Delta f}}{P_{\mathrm{s}}} \tag{2}$$

式中，I_{s}为信号电流，I_{n}为噪声电流，A_{d}为光敏元面积，Δf为频率带宽，P_{s}为入射光功率。

在PIN型InGaAs光电探测器中，散粒噪声和热噪声是主导噪声。其中，散粒噪声[13]可表示为：

$$\overline{I_{\mathrm{shot}}^2}=2qI_{\mathrm{d}}\Delta f \tag{3}$$

式中，q为电子电荷；I_{d}为暗电流，降低暗电流I_{d}是抑制散粒噪声、提升探测器信噪比的核心途径之一。

热噪声受探测器的结电阻影响，可表示为：

$$\overline{I_{\mathrm{th}}^2}=\frac{4kT}{R_{\mathrm{d}}}\Delta f$$

式中，k为玻尔兹曼常数，T为绝对温度，R_{d}为探测器的微分结电阻。

综上所述，散粒噪声与热噪声共同构成了PIN型晶格匹配InGaAs探测器的主导噪声[13]。在优化探测器性能时，特别是针对弱信号探测应用时，必须通过抑制这两类噪声的影响，提升探测器的综合探测能力。

2　仿真及实验参数

2.1　器件结构和材料参数

采用TCAD软件对InGaAs探测器的电学特性进行仿真。仿真涉及模型包括俄歇复合模型、辐射复合模型以及SRH复合模型。半导体器件物理模型选择泊松方程、电子/空穴连续性方程和载流子输运方程。InGaAs探测器的材料为InP/InGaAs/InP结构，各层的典型掺杂浓度[6]分别设置为N型初始掺杂浓度为$1.25\times10^{16}\ \mathrm{cm^{-3}}$的InP帽层、$5\times10^{16}\ \mathrm{cm^{-3}}$的$In_{0.53}Ga_{0.47}As$吸收层、$3\times10^{18}\ \mathrm{cm^{-3}}$的InP接触层。仿真中InGaAs和InP的关键材料参数见表1[14]。

表1　器件仿真物理参数

参数	InGaAs	InP
带隙E_{g}/eV	0.735	1.34
导带有效态密度N_{c}/$\mathrm{cm^{-3}}$	2.1×10^{17}	5.7×10^{17}
价带有效态密度N_{v}/$\mathrm{cm^{-3}}$	7.7×10^{18}	1.1×10^{19}
电子迁移率μ_{e}/($\mathrm{cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}}$)	10 000	5 000
空穴迁移率μ_{h}/($\mathrm{cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}}$)	500	250
辐射复合系数B/($\mathrm{cm^3\cdot s^{-1}}$)	9.5×10^{-11}	1.2×10^{-10}
俄歇复合系数C/($\mathrm{cm^6\cdot s^{-1}}$)	8.1×10^{-29}	9×10^{-31}
SRH寿命τ_{srh}/s	1.07×10^{-4}	1×10^{-9}
相对介电常数ε_{s}	13.9	12.5

2.2　器件SRV参数

对于薄帽层InGaAs器件，SRV参数对仿真结果有显著影响，钝化工艺与掺杂浓度均影响了SRV数值[15-21]。表2给出了文献中的InGaAs和InP的SRV。由于InGaAs具有很高的SRV数值，台面InGaAs探测器通常性能较差。在平面型InGaAs器件中，采用InP帽层对InGaAs层进行钝化以改善性能。P型InP的SRV高于N型InP，特别是在高掺杂浓度的情况下。对于薄帽层的InGaAs探测器，通过优化钝化工艺及材料结构，SRV数值有望达到$1\times10^3\ \mathrm{cm\cdot s^{-1}}$[16]。P型的InP的SRV数值的范围在$3\times10^3\sim1.2\times10^4\ \mathrm{cm\cdot s^{-1}}$区间[21]。因此，采用

3×10^3 cm·s^{-1}的SRV数值以评价其对暗电流的影响[17]。

2.3 器件制备

实验所用的InGaAs外延材料结构与仿真初始材料结构相同。制备流程如图3所示，包括掩膜沉积、扩散孔制备、成结工艺、N电极槽制备、钝化膜沉积、帽层减薄、P电极孔制备、P电极生长、N电极孔制备、加厚电极生长[21]。所制备的直径为1 mm的InGaAs单元探测器光学照片如图4所示。

表2 参考文献的表面复合速率

类型	SRV/(cm·s^{-1})	文献
InGaAs	6.3×10^7	[15]
P-InP(3×10^{18})	1×10^5~1×10^7	[16]
n-InP(5.5×10^{16})	170	[17]
n-InP(5×10^{17})	1 000	[18]
P-InP(5×10^{16})	500	[19]
P-InP(4×10^{18})	4.7×10^5	[20]

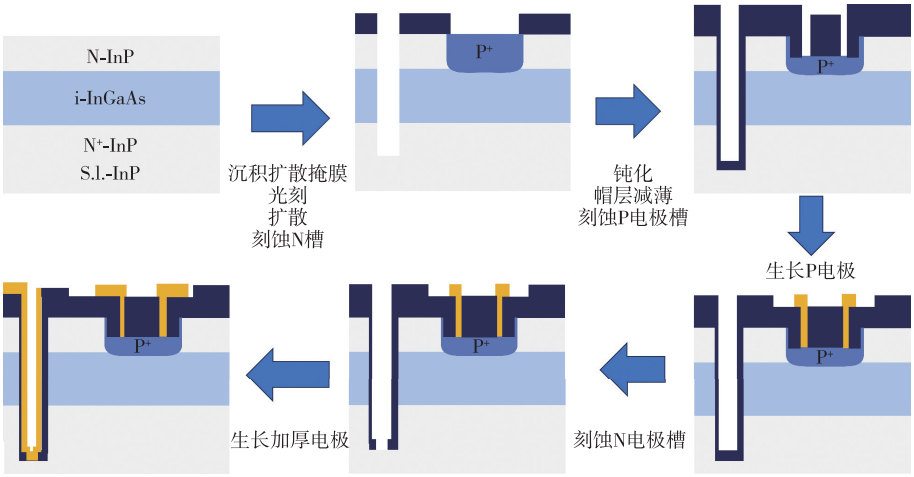


图3 可见-近红外InGaAs探测器常规制备及帽层减薄工艺流程

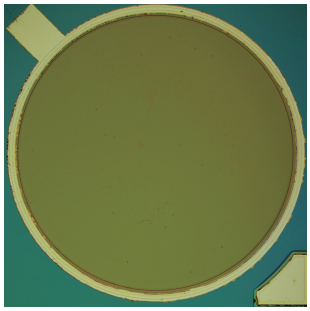


图4 直径为1 mm的InGaAs单元探测器

其中，利用基于$Cl_2/CH_4/H_2$的电感耦合等离子体(ICP)蚀刻工艺对P型的InP帽层进行减薄，将InP帽层厚度降低至200 nm和100 nm[22]。针对钝化工艺优化的InGaAs器件，为了抑制表面态及其SRV对器件的影响，在减薄后，进一步采用湿法化学表面处理工艺及低应力钝化膜，提升探测器性能[23-24]。

采用Agilent B1500 A半导体分析仪对InGaAs器件的I-V特性进行测试，并提取不同的暗电流分量进行分析。利用光栅光谱仪对探测器的响应光谱进行测量，结合黑体响应测试和噪声测试，从而获得探测器的D^*[25]。

3 实验结果与讨论

首先，如图5所示为InP帽层厚度对探测器量子效率(EQE)影响的仿真结果。采用2.1节的器件结构，P型浓度为2×10^{18} cm^{-3}，结区深度为0.1 μm。在1.55 μm波长下，帽层厚度为100~500 nm对应的量子效率处在同一水平，均有良好的响应能力。而在0.7 μm可见光波长下，帽层InP具有较高的吸收系数，因此量子效率会下降。这也是降低帽层厚度可显著提升量子效率的原因。当帽层厚度为100和500 nm时，量子效率分别为41%和6%。

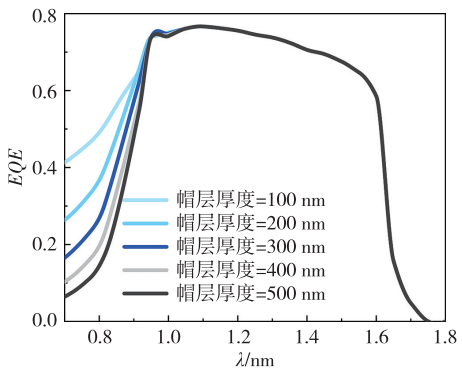


图5 不同帽层厚度下的量子效率

在此基础上，进一步分析结区深度对探测器0.7 μm波长处量子效率的影响。仿真结果如图6所示，在各InP帽层厚度下，随着结区深度的增加，量子效率下降。因此，为了保证量子效率，在实际制备过程中需要准确控制结区深度。当帽层厚度为200 nm，结区深度为0.1 μm和1.0 μm时，量子效率分别为26%和18%。

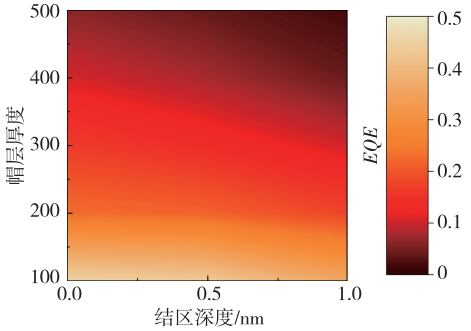


图6　结区深度对探测器0.7 μm量子效率的影响

由于P型掺杂浓度与耗尽区宽度存在关系，其对量子效率也存在一定的影响。对0.7 μm波长下量子效率开展分析，探测器帽层厚度设定为200 nm。如图7所示，随着P型掺杂浓度的降低，探测器量子效率获得了一定的提升。值得注意的是，当P型掺杂浓度接近1×10^{19} cm^{-3}时，结区深度对量子效率有显著影响，使得量子效率逐步降低至15%的水平。当利用热扩散制备InGaAs器件时，由于InGaAs具有比InP更高的Zn溶解度，InGaAs内部的Zn浓度往往更接近于1×10^{19} cm^{-3}，使得工艺因素对量子效率产生一定的影响[26]。当P型浓度降至1×10^{17} cm^{-3}时，0.7 μm处的量子效率能够达到24%。对于薄帽层InGaAs器件而言，低掺杂浓度有助于拓宽耗尽区，同时也能抑制载流子复合，实现探测器灵敏度的改善。

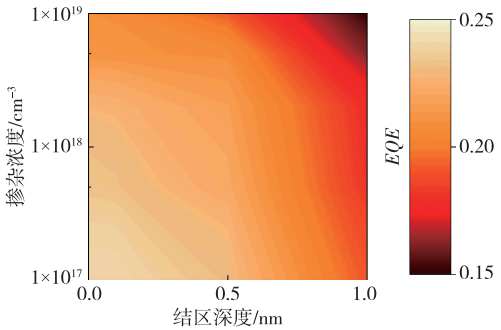


图7　P型掺杂浓度对量子效率的影响

为了确保InGaAs探测器的灵敏度，在提升量子效率的同时，还需要有效降低暗电流。对于薄帽层探测器，需要进一步引入SRV以反映降低帽层厚度对暗电流抑制带来的不利因素。如图8所示为当SRV为3×10^{3} cm/s时的暗电流曲线。当帽层厚度为500 nm时，反偏电压下的暗电流为0.2 nA/cm^2，具有理想的暗电流水平。当帽层厚度降低到100 nm时，暗电流为16.7 nA/cm^2，其暗电流数值显著劣于目前主流平面型正照射InGaAs探测器[4,22]。由此可见，如果采用薄帽层结构提升可见光探测性能，将增大表面复合速率对暗电流的贡献，导致探测器灵敏度严重恶化。

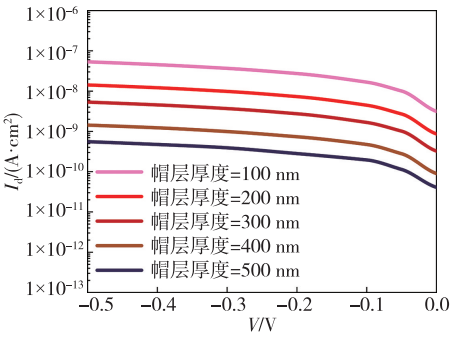


图8　帽层厚度对暗电流的影响

图9进一步分析了SRV参数和结区深度对暗电流的共同作用。在帽层厚度为200 nm的条件下，随着结区深度的增加，暗电流水平未明显变化。而当SRV值从1×10^{3}增加至1×10^{7} $cm\cdot s^{-1}$，暗电流密度从1.95×10^{-9}剧增至1.66×10^{-5} $A\cdot cm^{-2}$。对于InGaAs探测器而言，化合物半导体材料表面往往存在高密度的界面态，优化InP/InGaAs异质结外延质量与界面钝化工艺有助于抑制暗电流，实现高性能、低噪声的探测器制备。

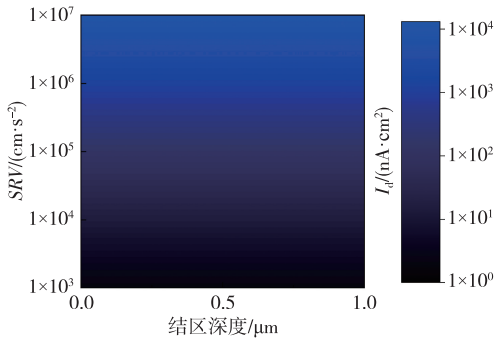


图9　表面复合速率对暗电流的影响

基于探测器对响应特性和暗电流的仿真结果，进一步通过D^*评价探测器的灵敏度。图10对比优化结构和典型结构的正照射InGaAs探测器，两者的帽层厚度均为200 nm。优化结构采用

1×10^{17} cm^{-3}的P型浓度，并将SRV设定为1×10^{3} cm•s^{-1}。典型结构采用2×10^{18} cm^{-3}的P型浓度，SRV设定为3×10^{3} cm•s^{-1}。通过*I-V*曲线能够获得暗电流和结电阻，从而获得散粒噪声和热噪声。仿真结果表明，优化后的结构的结电阻为3.40×10^{12} Ω，暗电流密度为1.67 nA•cm^{-2}，而典型结构的结电阻为1.27×10^{12} Ω，暗电流密度为4.45 nA•cm^{-2}。通过探测器P型浓度和SRV的优化，InGaAs探测器峰值D^*从典型结构的2.31×10^{12}进一步提升到3.78×10^{12} cm•Hz$^{1/2}$•W^{-1}。在700 nm波长处，从典型结构到优化结构，D^*从8.1×10^{11}能够提升到1.4×10^{12} cm•Hz$^{1/2}$•W^{-1}。通过P型掺杂浓度的降低能够一定程度改善探测器的量子效率，同时较低的SRV值改善了薄帽层器件的噪声行为，从而实现可见波段灵敏度的提升。

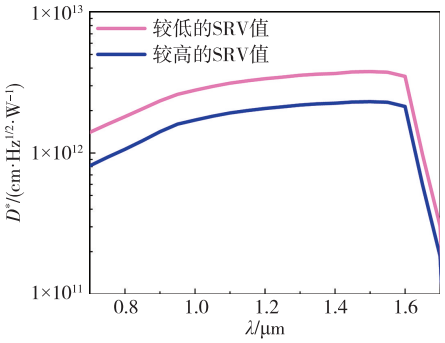


图10 铟镓砷光电探测器的室温光谱探测率

为了进一步研究帽层厚度与InGaAs探测器实际性能的影响，采用半导体测试仪B1500对制备的器件进行暗电流测试。图11为未减薄的器件，以及帽层厚度为200 nm和100 nm的器件的测试*I-V*曲线。可以看出，对于帽层未减薄的InGaAs单元探测器，*I-V*曲线在反偏区域较为平坦，表明其暗电流机制以扩散电流为主导因素。随着帽层厚度的降低，*I-V*曲线随反向偏压的增加呈现为斜坡增长，说明在薄帽层器件中，受制于SRV的影响，扩散电流已不是暗电流机制的主导因素。未减薄的InGaAs单元探测器在−10 mV偏压下实测暗电流为1.4 nA/cm^2。当帽层厚度为200和100 nm时，−10 mV偏压下实测暗电流分别为4.4和14 nA/cm^2。

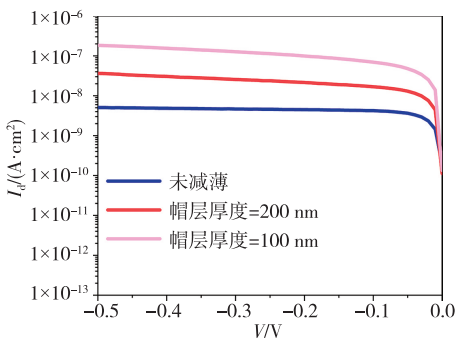
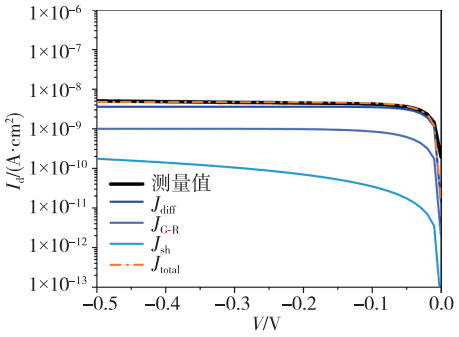
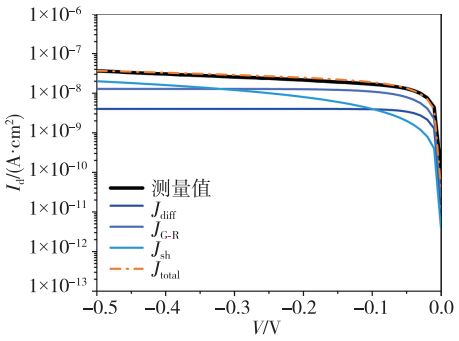


图11 器件实测*I-V*曲线对比

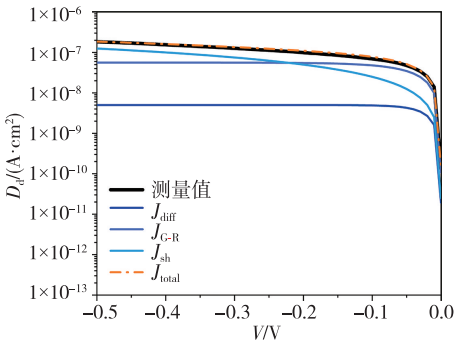
图12则进一步通过*I-V*曲线拟合分析了各暗电流机制对实测器件性能的影响。对于未减薄的InGaAs单元探测器，在−10 mV偏压下的扩散电流为1.15 nA/cm^2，产生复合电流为0.18 nA/cm^2，分路电流为0.04 nA/cm^2。当帽层厚度降低至200 nm，−10 mV偏压下的扩散电流为1.15 nA/cm^2，产生复合电流为2.4 nA/cm^2，分路电流为0.8 nA/cm^2。当降低至100 nm时，−10 mV偏压下



（a）未进行帽层减薄处理的器件



（b）帽层厚度为200 nm



（c）帽层厚度为100 nm

图12 器件实测*I-V*及暗电流拟合结果

的扩散电流为1.6 nA/cm^2，产生复合电流为9.8 nA/cm^2，分路电流为2.5 nA/cm^2。在帽层减薄的过程中，扩散电流密度均处于相当低的水平，说明帽层减薄工艺并未显著影响探测器体材料的质量。未减薄、200 nm帽层厚度、100 nm帽层厚度对应的产生复合电流占比分别为15%、55%、70%，表明SRV贡献的暗电流分量随着帽层厚度降低显著增加，致使探测器性能恶化。对比图8的仿真结果进一步分析，随着帽层厚度减薄至300 nm以下，表面复合电流的作用将变得尤为明显。因此，针对薄帽层的正照射器件，为了实现探测器灵敏度的提升，需要降低表面产生复合电流在总暗电流里的占比。

采用湿法化学表面处理工艺及低应力钝化膜能够在一定程度上降低产生复合电流占比。对帽层厚度为200 nm的器件，将复合电流的占比降低至55%以下能够显著改善器件性能。图13为帽层厚度为200 nm的器件在采用表面钝化工艺后的*I-V*实测曲线和各暗电流分量。探测器总暗电流降低至2.7 nA/cm^2。在暗电流分量方面，扩散电流为1.15 nA/cm^2，产生复合电流为1.14 nA/cm^2，分路电流为0.4 nA/cm^2。进一步可知复合电流的占比从55%降至42%，复合电流值和扩散电流值相当。

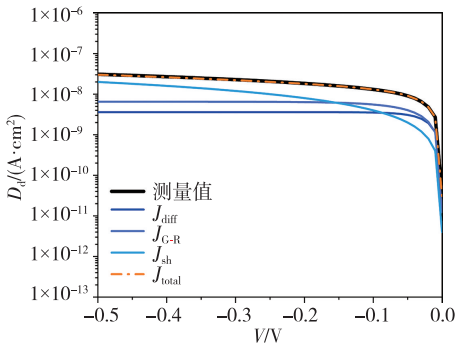


图13　优化后的器件实测*I-V*及暗电流拟合结果

如图14所示，针对200 nm帽层厚度的可见-近红外InGaAs单元探测器，进一步评价表面钝化对探测器实测探测率的影响。InGaAs单元探测器在经过钝化工艺优化后，峰值D^*获得了显著改善，从2.6×10^{12}增至4.1×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}。优化后的探测器在0.7～1.7 μm的范围里探测率均高于1×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}，具有良好的性能。对于未优化的探测器，受制于表面复合电流的影响，探测率在0.7 μm处为7.3×10^{11} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}，低于优化后的1.2×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}。可见，在正照射可见-近红外InGaAs探测器中，抑制表面复合相关的暗电流影响是提升探测器宽谱段灵敏度的关键方法。

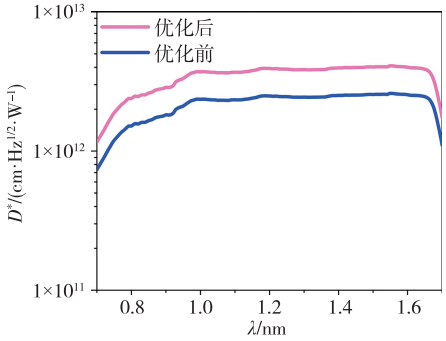


图14　器件实测的D^*曲线

4　结论

本工作针对正照射可见-近红外InGaAs探测器的灵敏度优化开展研究。对于薄帽层结构的InGaAs探测器，分析了帽层厚度、结区深度、SRV值、P型掺杂浓度等参数对InGaAs探测器的暗电流和量子效率的影响。结果表明，当SRV从3×10^{3}降低至1×10^3 cm·s^{-1}时，可见-近红外InGaAs探测器的峰值D^*从2.31×10^{12}提升至3.78×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}。InGaAs探测器实测结果表明，通过表面钝化工艺的优化，器件D^*从2.6×10^{12}提升至4.1×10^{12} cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}。因此对于高性能正照射可见-近红外InGaAs探测器而言，仍需要发展表面钝化技术和器件新结构，通过进一步降低SRV数值提升可见-近红外谱段的D^*，为航天遥感等高灵敏度下的探测技术提供关键技术支撑。

参考文献：

[1] Hakkel K D, Petruzzella M, Ou F, et al. Integrated near-infrared spectral sensing[J]. Nature Communications, 2022, 13: 103.

[2] Zhu J, Freitas H R, Maezawa I, et al. 1700 nm optical coherence microscopy enables minimally invasive, label-free, *in vivo* optical biopsy deep in the mouse brain[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10: 145.

[3] 马　旭，李云雪，黄润宇，等. 短波红外探测器的发展与应用(特邀)[J]. 红外与激光工程，2022，51(1)：135-146.
Ma Xu, Li Yunxue, Huang Runyu, et al. Development and application of short wavelength infrared detectors (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(1): 135-146.

[4] 李　雪，邵秀梅，李　淘，等. 短波红外InGaAs焦平面探测器研究进展[J]. 红外与激光工程，2020，49(1)：56-63.
Li Xue, Shao Xiumei, Li Tao, et al. Developments of short-wave infrared InGaAs focal plane detectors[J]. Infrared and

Laser Engineering, 2020, 49(1): 56-63.

[5] Fan X, Li Y, Feng Z, et al. Nanoprobes-assisted multichannel NIR-II fluorescence imaging-guided resection and photothermal ablation of lymph nodes[J]. Advanced Science, 2021, 8(9): 2003972.

[6] Cao J, Yu Y, Li T, et al. Lightly doped $In_{0.53}Ga_{0.47}As$/InP SWIR photodetectors with diffusion barrier structure [J]. Infrared Physics & Technology, 2024, 137: 105112.

[7] Collett K A, Bonilla R S, Hamer P, et al. An enhanced alneal process to produce $SRV<1$ cm/s in 1 Ω cm n-type Si[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017, 173: 50-58.

[8] Chen J, Wang J, Li X, et al. Recent progress in improving the performance of infrared photodetectors *via* optical field manipulations[J]. Sensors, 2022, 22(2): 677.

[9] Tillement J. Développement de photodiodes InGaAs petit pas pixel pour la détection du SWIR [D]. Grenoble: Université Grenoble Alpes, 2024.

[10] Tillement J, Cervera C, Baylet J, et al. Fabrication of 3 μm Pixel Pitch InGaAs Photodiodes Using Be Implantation Doping for SWIR Sensing [C]//Proceedings of Solid State Devices and Materials (SSDM), 2022: 59-60.

[11] Tillement J, Cervera C, Baylet J, et al. Design and characterization of 5 μm pitch InGaAs photodiodes using *in situ* doping and shallow mesa architecture for SWIR sensing [J]. Sensors, 2023, 23(22): 9219.

[12] Nguyen C T, Koyama K, Higashimine K, et al. Novel chemical cleaning of textured crystalline silicon for realizing surface recombination velocity 0.2 cm/s using passivation catalytic CVD SiN_x/amorphous silicon stacked layers [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2017, 56(5): 056502.

[13] Liu Y, Ma Y, Li X, et al. Noise behaviors of SWIR $InxGa_{1-x}As$/InP focal plane arrays as a function of lattice-mismatch degree[J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 123: 104136.

[14] DeWames R, Littleton R, Witte K, et al. Electro-optical characteristics of P+n $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ hetero-junction photodiodes in large format dense focal plane arrays [J]. Journal of Electronic Materials, 2015, 44(8): 2813-2822.

[15] Martins J R D, Braga O M, Vieira G S. Analysis of edge current extraction method applied to P-I-N photodetectors[C]// 2025 39th Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro), 2025: 1-4.

[16] Hoffman R W, Fatemi N S, Jenkins P P, et al. Development of high efficiency p^+/ n InP solar cells for hetero-epitaxial applications [C]//Conference Record of the Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1996, 2002: 171-174.

[17] Joyce H J, Wong-Leung J, Yong C K, et al. Ultralow surface recombination velocity in InP nanowires probed by terahertz spectroscopy [J]. Nano Letters, 2012, 12(10): 5325-5330.

[18] Casey H C Jr, Buehler E. Evidence for low surface recombination velocity on *n*-type InP [J]. Applied Physics Letters, 1977, 30(5): 247-249.

[19] Rosenwaks Y, Shapira Y, Huppert D. Evidence for low intrinsic surface-recombination velocity on p-type InP [J]. Physical Review B, Condensed Matter, 1991, 44(23): 13097-13100.

[20] Mansoor M, Abubakar, Zaman S, et al. Design of three-layer antireflection coating for high reflection index lead chalcogenide [J]. Materials Research, 2019, 22(5): e20180534.

[21] 冯斌耀, 乔 辉, 于一榛, 等. 基于等离子体氢化的PIN型InGaAs探测器性能研究[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(8): 20250135.
Feng Binyao, Qiao Hui, Yu Yizhen, et al. Research on the performance of PIN-type InGaAs detectors based on plasma hydrogenation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2025, 54(8): 20250135.

[22] Yu Y, Ma Y, Gu Y, et al. Mie-type surface texture-integrated visible and short-wave infrared InGaAs/InP focal plane arrays [J]. ACS Applied Electronic Materials, 2020, 2(8): 2558-2564.

[23] Wan L, Cao G, Shao X, et al. High performance $In_{0.83}Ga_{0.17}As$ SWIR photodiode passivated by Al_2O_3/SiN_x stacks with low-stress SiN_x films[J]. Journal of Applied Physics, 2019, 126(3): 033101.

[24] Ma Y, Deng S, Cheng J, et al. Towards surface leakage free high fill-factor extended wavelength InGaAs focal-plane arrays [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2019, 55(6): 4200208.

[25] Yin X, Yu Y, Ma Y, et al. Rapid zinc diffusion behaviors in lightly doped extended wavelength $In_{0.83}Ga_{0.17}As$ focal plane arrays [J]. Journal of Applied Physics, 2025, 137(12): 123103.

[26] 曹嘉晟,李 淘,于一榛,等. 基于锌扩散的InGaAs/InP平面型红外探测器快速热退火研究(英文)[J]. 红外与毫米波学报,2023,42(05):634-642.
Cao Jiasheng, Li Tao, Yu Yizhen, et al. Study of zinc-diffused InGaAs/InP planar infrared detector processed with rapid thermal annealing[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2023, 42(5): 634-642.

作者简介:

龙劲强(2001—),男,安徽省人,硕士研究生,主要从事红外探测器方面的研究;

于一榛(1990—),男,山东省人,副研究员,主要从事红外探测器方面的研究;

龚海梅(1965—),男,江苏省人,研究员,主要从事红外探测器方面的研究。