

平面型 InGaAs 探测结构中 p 型杂质的二维扩散行为研究

张帅君^{1,2}, 李天信², 王文静^{2,3}, 李菊柱^{2,3}, 邵秀梅⁴, 李雪⁴, 郑时有¹, 庞越鹏^{1*},
夏辉^{2*}

- (1. 上海理工大学 材料科学与工程学院, 上海 200093;
2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083;
3. 上海师范大学 数理学院, 上海 200234;
4. 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: 在平面型 InGaAs P-i-N 短波红外探测结构中, p 型杂质在材料中纵向和横向的扩散是决定 pn 结位置及其光电性能的主要因素, 本文采用扫描电容显微方法 (SCM) 获得了扩散成结 InGaAs/InAlAs 像元剖面的二维载流子分布, 从而实现对不同扩散条件下 pn 电场结的精确定位和分析。此外, 对于 InGaAs/InP 探测器, SCM 测量揭示了 Zn 杂质在各功能层中扩散行为的显著差异。在 InGaAs 吸收区中, Zn 的侧向扩散速度是深度方向的 3.3 倍, 远高于其在 n-InP 帽层中 0.67 的侧向与深度扩散比, 这将对光敏元的边缘电容以及暗电流特性产生影响。

关键词: 扫描电容显微 (SCM); InGaAs 平面型探测器; 扩散行为; 光电流响应
中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

SCM study on the 2D diffusion behavior of p-type impurities in planar InGaAs detectors

ZHANG Shuai-Jun^{1,2}, LI Tian-Xin², WANG Wen-Jing^{2,3}, LI Ju-Zhu^{2,3}, SHAO Xiu-Mei⁴, LI Xue⁴,
ZHENG Shi-You¹, PANG Yue-Peng^{1*}, XIA Hui^{2*}

- (1. School of Materials Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. Mathematics and Science College, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China;
4. State Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Scanning Capacitance Microscopy (SCM) was applied to obtain the 2-dimensional carrier distribution on the cross-section of planar type InGaAs/InAlAs pixels. The profile of pn junction in the device structure was able to be depicted with high space resolution. Besides, for InGaAs/InP detector, the SCM study helps to disclose the distinct diffusion behavior of p-type impurities in different functional layers. The lateral diffusion speed of zinc in InGaAs absorption layer was decided as 3.3 times than that in the depth direction, which is significantly higher than the lateral to depth ratio of 0.67 in the n-InP cap layer, this could affect both the capacitance and dark current properties of the diode pixels.

Key words: Scanning Capacitance Microscopy (SCM), planar InGaAs detector, diffusion behavior, photocurrent

收稿日期: 2021-03-11, 修回日期: 2021-10-27

Received date: 2021-03-11, Revised date: 2021-10-27

基金项目: 国家自然科学基金 (11574336, 11991063); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDB43010200); 上海市自然科学基金 (18JC1420401, 19ZR1465700, 14ZR1446200)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (11574336, 11991063), The Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XD43010200), STCSM (18JC1420401, 19ZR1465700, 14ZR1446200)

作者简介 (Biography): 张帅君 (1996—), 女, 江苏苏州人, 硕士研究生, 主要研究领域为红外光伏结构表征。E-mail: 182442509@st.usst.edu.com

* 通讯作者 (Corresponding authors): E-mail: pangyp@usst.edu.cn; HuiX@mail.sitp.ac.cn

response

引言

InGaAs 因其优异的材料特性被越来越多地应用于短波红外探测器的研制中^[1-3]。通过对 In 组分的改变,其禁带宽度可以在 0.35~1.43 eV 之间变化,光谱响应的截止波长可以在 0.87~3.5 μm 范围内变化。例如, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 探测器对应的光响应截止波长为 1.7 μm ,而 $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{As}/\text{In}_{0.81}\text{Al}_{0.19}\text{As}$ 探测器对应的光响应截止波长为 2~3 μm 。对于器件研发而言,这意味着采用同种器件结构就能实现对不同波段光响应的拓展,同时具有较高的量子效率。在器件测试方面,使用相似的表征方法就能完成对不同器件性能的表征。对于平面型 InGaAs 探测器,通常采用 p 型杂质的选区扩散形成 P-i-N 功能结构,适合红外焦平面高灵敏度、高均匀性的需求。扩散 pn 结的深度和电场分布既影响器件的暗电流特性也会关系到光生载流子的有效收集。同时, p 型杂质在材料中的横向扩散是决定像元侧向漏电及边缘电容特性的主要因素,这使得提取光敏元内部二维甚至三维载流子布居状态成为评价 InGaAs 平面器件工艺效果、评估性能的重要依据。

测量 InGaAs 器件扩散结中杂质或载流子分布的传统方法主要有二次离子质谱 (Secondary Ion Mass Spectrometry, SIMS) 和电化学电容-偏压法 (Electrochemical Capacitive Voltage, ECV 或 ECCV)^[4-6]。其中 SIMS 方法测量 p 型杂质在材料深度方向的浓度分布,在扩散前沿杂质浓度一般渐进递变,因此不易精确判定 pn 结的结区位置。ECV 法能够感测载流子的深度分布,空间分辨可至纳米级,但易受腐蚀缺陷和测量条件的影响;并且 ECV 方法只适用于块体材料的载流子分布测量,无法应用于亚毫米甚至微米尺寸的指定扩散窗口或光敏元单元的检测。更重要的是,上述两种方法均不能提供横向尺度上杂质扩散或载流子分布的信息^[7-8]。扫描电容显微方法 (SCM) 能够在纳米级的空间分辨率上获得载流子极性和浓度的二维图像,能提供侧向扩散深度的信息,特别适合小像元的检测。Yin Hao 和 Xia Hui 等人将 SCM 表征技术引入到 InGaAs/InP 等红外探测器件结构中,在分析吸收区表面反型和漏电机制、pn 结区异常等方面取得独特效果^[9-12]。

在本文中,选取最具代表性的两种室温工作 In-

GaAs 短波红外探测器:晶格常数匹配的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 异质结构以及晶格常数失配的 $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{As}/\text{In}_{0.81}\text{Al}_{0.19}\text{As}$ 异质结构。SCM 首先被用于测量 InGaAs/InAlAs 平面 P-i-N 结在剖面上的二维载流子分布,获得了不同扩散条件下 pn 结的精确位置,将不同的扩散深度与器件扩散工艺、器件光响应进行了关联,分析了它对器件电学以及光电响应性能的影响。基于此,进一步研究 p 型杂质在像元内不同功能层的侧向扩散行为,在具有侧向扩散结构的 InGaAs/InP 材料上定量地估算出侧向与深度方向的扩散比,发现了 Zn 杂质在 n-InP 帽层和 InGaAs 吸收层中侧向扩散速率的显著差异,说明侧向扩散是器件扩散工艺中影响器件性能的又一重要因素。

1 实验

实验采用不同 InGaAs 组分的 InGaAs/InAlAs、InGaAs/InP 两种探测器结构进行二维扩散行为及载流子实空间分布的研究。其中 InGaAs/InAlAs 器件中 In 组分为 0.81, InGaAs/InP 器件中 In 组分为 0.53。下图给出了两种 InGaAs 器件的结构示意图。如图 1(a), InGaAs/InAlAs 探测结构包括 n-InP 衬底层、2.5 μm 的 InGaAs 吸收层 ($2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) 以及 1 μm 的 InAlAs 帽层 ($2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)。如图 1(b), $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 探测结构由 SI-InP 衬底、0.5 μm 的 InP 非故意掺杂层、2.5 μm 的 InGaAs 吸收层以及 1 μm 的 InP 帽层组成。吸收层与帽层对应的掺杂浓度分别为 $\sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 和 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

两种探测结构的各功能层均是采用分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 的方法生长,并通

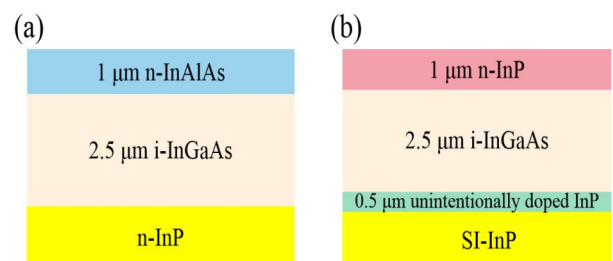


图 1 (a) $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{As}/\text{In}_{0.81}\text{Al}_{0.19}\text{As}$ 探测器结构示意图, (b) $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 探测器结构示意图

Fig. 1 (a) The schematic diagram of $\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.19}\text{As}/\text{In}_{0.81}\text{Al}_{0.19}\text{As}$ detector structure, (b) the schematic diagram of $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ detector structure

过 Zn 元素的杂质扩散对其进行 p 型掺杂。利用闭管扩散的方法将用作扩散源的药品与样品一起放到真空石英管中,其中将 Zn_3As_2 用作 InGaAs/InAlAs 样品的扩散源, Zn_3P_2 作为 InGaAs/InP 样品的扩散源,以便对两种不同材料的帽层元素进行补充。石英管真空度控制在 3×10^{-4} Pa 以上。将石英管置于扩散炉中,在不同的扩散温度和扩散时间下对 n-InAlAs 层和 n-InP 层进行扩散,最终形成 P-i-N 结构。如表 1 给出了不同样品的扩散时间及温度参数。选择 3 个 InGaAs/InAlAs 样品分别标为 1#、2#、3# 并对其进行扩散处理,扩散温度为 500 °C,扩散时间分别为 5 min、7 min 以及 9 min。InGaAs/InP 样品的扩散时间为 5 min,扩散温度为 500 °C。

表 1 不同 InGaAs 样品的扩散温度及扩散时间

Table 1 Diffusion temperature and diffusion time of InGaAs samples

材料	$In_{0.81}Ga_{0.19}As/In_{0.81}Al_{0.19}As$			$In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP$
	1#	2#	3#	As/InP
扩散温度 (°C)	500	500	500	500
扩散时间 (min)	5	7	9	5

在进行扫描电容显微镜 (SCM) 测量前,首先将样品沿扩散区域进行解理,用刀片在样品的表面沿着晶面划片,再施加压力使晶片断裂以获得纳米级平整度的样品截面,使 SCM 成像时不受样品形貌的干扰。测量时采用导电金刚石涂层的硅探针,悬臂的力常数为 21~98 N/m。由于针尖末端采用的是金刚石单晶,针尖半径在 10 nm 范围内,在形成良好的电学接触的同时,能够在纳米尺度上实现对微区载流子分布的表征。在测试时,导电针尖作为纳米的金属电极,与样品表面的氧化层、样品之间形成了 MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) 结构,在针尖与样品间施加 1 V 的交流偏置,测量针尖与样品间电容的变化。为了尽量减少内部杂散光对实验的干扰,AFM 激光 (670 nm) 光斑位于远离探针悬臂前端 90 μm 处。

此外,基于 $In_{0.81}Ga_{0.19}As/In_{0.81}Al_{0.19}As$ 结构制备了探测器并进行光电性能表征,进一步研究杂质原子不同扩散深度 (扩散深度未进入/进入 InGaAs 层) 对器件的光谱响应性能。在光电测试中,激光垂直入射样品表面。最终,在扩散深度较深 (扩散至 InGaAs 层) 的情况下,探测器在近红外 (1~2.5 μm) 均具有较好的光响应特性,而扩散深度未至 InGaAs 层

的器件响应波段在 ~1.6 μm 截止。

2 实验结果与讨论

2.1 深度方向上的扩散行为及对器件光谱响应的影响

杂质扩散成结是平面型 InGaAs 探测器的最关键工艺,它的表征和调控精度决定了器件的性能水平^[13]。本节着重关注材料生长方向上的杂质扩散行为,探究它对器件结深乃至量子效率、响应光谱的影响。图 2 所示为扩散时间递进下的 InGaAs/InAlAs 样品截面载流子分布特征。图中 SCM 信号的极性通常表示针尖以下主要载流子的极性,正信号代表测试区域是空穴响应为主,而负信号则表示测试区域为电子富集状态。同时,SCM 信号的幅度可直观反映测试区域的载流子浓度 (信号幅值与载流子浓度成反比关系)。从中我们可以清晰地分辨样品的各层结构,包括 1 μm 厚的 InAlAs 帽层,2.5 μm 厚的 i-InGaAs 吸收层以及 n-InP 衬底层。由于 InAlAs 帽层是一个弱 n 型区域,因此未掺杂部分的微分电容通常呈现显著的负信号。而经过扩散后,如图 1(a) 中 1 号样品,InAlAs 帽层的 SCM 信号转变为典型的正值。这意味着此时 p 型杂质 (Zn) 已经扩散进入了该部分,并激活产生了大量的空穴。同时,在图中可以明显地看到 InGaAs/InAlAs 在界面位置处信号减弱,说明 InGaAs/InAlAs 界面处的载流子浓度较低,使得针尖以下的 dC/dV 信号出现了突变。通过测量,此时 Zn 杂质扩散已经进入了 InGaAs 层的 0.125 μm 位置处。随着扩散深度继续增加,2 号样品的结深达到了 1.5 μm ,此时在 InGaAs/InAlAs 界面几乎看不到载流子浓度的变化。扩散深度的进一步增加使得剩余的 i-InGaAs 宽度继续变窄,对于图中的 3 号样品,大部分 InGaAs 层的信号相比于 (a) 和 (b) 时发生了反转,表明此时 Zn 已经扩散进入了大部分 InGaAs 层,且结深达到了 2.23 μm 。基于上述结果,我们验证了探针方法的电子学高空间分辨能力,它可以准确地提取 InGaAs 探测器的载流子实空间分布特征,进而精细地评估杂质扩散成结等工艺的实施效果。

进一步地,我们尝试探究结深对器件量子效率、响应光谱等的影响^[14]。图 2(b)、(c) 分别给出了杂质扩散在未扩散进 InGaAs 层以及扩散进入 InGaAs 层两种情况下器件的光谱响应曲线。当杂质扩散未进入 InGaAs 吸收层时,由于 InGaAs/InAlAs 界面处势垒的存在,吸收层中的光生空穴无法越过

势垒形成光生电流,因此器件仅在 InAlAs 截止波长范围内对光有较强的响应,而在 InGaAs 波段光响应信号较弱。当杂质扩散刚进入吸收层形成 pn 结时,入射光子被 i-InGaAs 层吸收,受内建电场的作用电子和空穴发生分离,分别向 n 型区和 p 型区漂移,从而产生光电流^[15],此时在 InGaAs 波段光响应信号增强。这与文献中报道的当 pn 结位于 InGaAs 层时,暗电流较低且量子效率较高的结果是一致的^[16-17]。因此,对于 InGaAs 探测器,用二维尺度高分辨的 SCM 方法对 pn 结的位置的精确标定有助于器件结构设计以及性能失效诊断等。

2.2 侧向扩散行为及其对器件占空比的影响

SCM 测量不仅能够微纳尺度上高分辨地展示深度方向上的杂质扩散,也能应用在对器件结构侧向扩散的表征中。下面展示了由 SCM 测量得到的平面型 InGaAs P-i-N 探测器的 p 型扩散特征,以此来分析扩散效果。图 3(a) 为 InGaAs/InP 短波红外探测器的截面 SCM 图像,能够清晰地分辨出 $1\ \mu\text{m}$ 的 p^+ -InP 帽层, $2.5\ \mu\text{m}$ 的 i-InGaAs 吸收层以及 n^+ -InP 衬底层。图中 S1 和 S2 分别为器件扩散窗口边缘位置及扩散形成的 pn 结的位置。在 InP 帽层的上表面,扩散窗口内通过 Zn 扩散形成了深度方向上的 p 型扩散。图中较亮的区域为 p 型扩散区域,可以看到整个 InP 层以及部分 InGaAs 层已经显示了正信号。靠近扩散窗口中部沿深度方向的扩散更为明显,在扩散窗口的边缘存在着侧向扩散且扩散前沿展现出弧形特征。相比于 Zn 在 p^+ -InP 层的扩散,在

InGaAs 与 InP 层的边界处具有更强的侧向扩散,在 S2 方向上出现了一个小尖峰。

通过 SCM 曲线对扩散 pn 结特征的清晰表征,可以定量地得出 Zn 分别在 InP 层和 InGaAs 层的深度方向以及侧向扩散两个方向上的扩散信息。如图 3(b)、(c) 分别给出了沿 S1 深度方向以及 S2 方向获得的 SCM 曲线,图中的 D_{depth1} 和 D_{L1} 分别为器件的横向扩散深度及 Zn 在 InGaAs 层的侧向扩散深度。通过测量在扩散窗口边缘处的扩散深度 D_{depth1} 为 $1.15\ \mu\text{m}$,而在扩散窗口中部位置扩散深度 D_{depth2} 为 $1.24\ \mu\text{m}$,表明扩散在深度方向上并不均匀,并且最深处的扩散已经进入了 InGaAs 层的 $0.24\ \mu\text{m}$ 处。

此外,可以通过计算得出 Zn 在侧向和深度方向扩散的比率来考察在 InP 层和 InGaAs 层中两个方向扩散的关系:

$$n = \frac{D_{lateral}}{D_{depth}}, \quad (1)$$

其中 $D_{lateral}$ 为侧向扩散深度, D_{depth} 为扩散深度, n 为扩散比率。对于 Zn 在 InP 层的扩散,深度方向的扩散源于 InP 层的上表面,扩散边界为 InGaAs/InP 界面处, D_{depth} 为 $1\ \mu\text{m}$;而扩散窗口的边缘则为侧向扩散的起始处,侧向扩散的边界位于侧向扩散形成的 p 区最前沿,此时 $D_{lateral}$ 为 $0.67\ \mu\text{m}$,通过计算得出 p^+ -InP 层中 Zn 的侧向与深度方向的扩散比 n_1 为 0.67 ,该值与文献中硼在硅中的扩散特性相近^[18]。当进入 InGaAs 层时,以 pn 结的位置 P1 处为参考点, Zn 在 InGaAs 层深度方向上的扩散距离为 InGaAs/InP

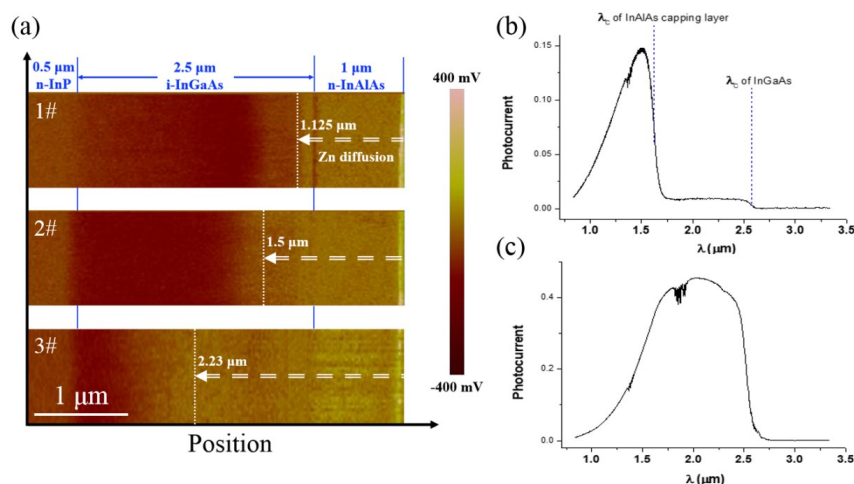


图2 (a) 三种不同扩散深度的 InGaAs/InAlAs 探测器 SCM 图, (b) 杂质扩散在 InAlAs 帽层以及进入 InGaAs 吸收层两种情况下的器件光电流响应

Fig. 2 (a) The SCM images of InGaAs/InAlAs detectors with three different diffusion depths, (b) the photocurrent response of the device with impurity diffusion in the InAlAs capping layer or into the InGaAs absorption layer

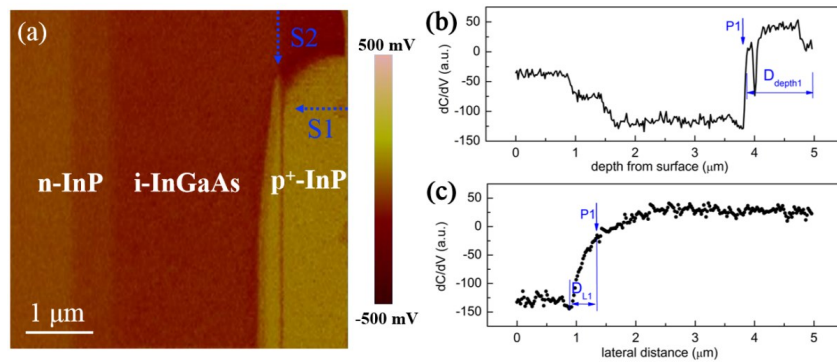


图3 (a) InGaAs/InP P-i-N探测器器件结构的SCM图, (b) 沿S1方向的SCM曲线, (c) 沿S2方向的SCM曲线

Fig. 3 (a) The SCM image of InGaAs/InP P-i-N detector structure, (b) the SCM curve across S1, (c) the SCM curve across S2

界面至P1的距离,为 $0.15 \mu\text{m}$,而侧向扩散深度 D_{L1} 为 $0.49 \mu\text{m}$ 。此时杂质扩散的侧向扩散速率明显高于深度方向,扩散比 n_2 增加到了3.3。

影响Zn杂质在不同材料中扩散速率差异的因素有很多,材料本身的影响如晶胞尺寸、原子面密度、晶格常数等通常会影影响杂质扩散的速度^[19-20]。其次,材料的本底掺杂浓度不同也可能导致扩散差异。材料吸收层和帽层间掺杂浓度本身会存在差异,而本底掺杂在一定程度上会阻挡后续杂质原子Zn的进一步扩散甚至会起一定的补偿作用^[21]。此外,InGaAs/InP异质界面的影响也不容忽视。相较于InGaAs层,Zn元素在InP层中具有较大的扩散速率^[22],两种材料边界处产生扩散势垒,阻碍了Zn的进一步扩散,杂质原子在InGaAs/InP界面处形成了积累^[10]。随着扩散时间的增加杂质开始释放进入InGaAs层,而此时不同于在InP材料中通过扩散窗口实现的杂质扩散,界面处杂质原子的二次扩散类似于波的传输特征,在InGaAs层表现出一种典型的弧状扩散,有明显的侧向展宽现象。这很大程度上导致了Zn在InGaAs层的侧向扩散远大于深度方向的扩散。在器件工艺中,侧向扩散关系到两个光敏元之间的实际间距,并且可能引起“串音”问题。因此,侧向扩散的评估对于优化器件工艺是有必要的^[23]。为了获得良好的扩散效果,必须对侧向扩散进行有效控制。这不仅有利于获得光敏元间的最小间距,还能减小器件的边缘电容和侧向漏电,最终获得低暗电流、低电容、高性能的器件结构。

图4展示了一个典型的由侧向扩散引起的InGaAs/InP像元侧向互联的SCM图像。在扩散深度方向上,该器件Zn扩散刚刚进入InGaAs吸收层约 $0.125 \mu\text{m}$ 处,能明显地看到InGaAs/InP的界面位置。然而,在横向尺度上相邻光敏元间出现了相连

现象,如图蓝色虚线位置处,这主要是由于在器件设计时没有考虑到侧向扩散引起的实际光敏元间距的减小。因此,器件的像元间距设计必须考虑到扩散工艺中的侧向扩散因素。当器件设计中没有对光敏元间距充分预留时,即使没有p型区光敏元相连缺陷的产生,也可能导致信号串扰^[24-26]。而合理的工艺把握有赖于在二维尺度上高分辨的SCM表征方法对扩散情况的反馈,从而有助于获得高密度小光敏元、高占空比和低暗电流的长线列及大面阵焦平面探测器。

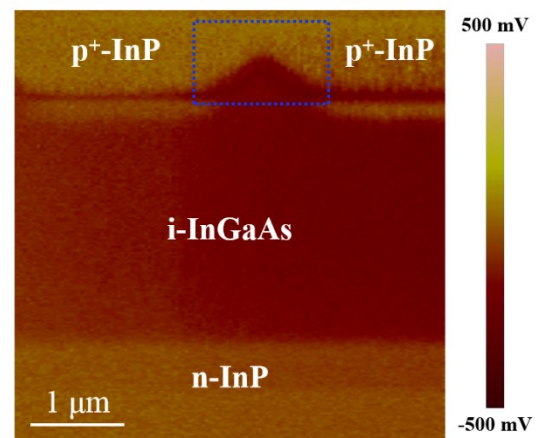


图4 InGaAs/InP P-i-N探测器中因侧向扩散引起相连缺陷元的SCM图

Fig. 4 The SCM image of photosensitive elements with connected defects due to the lateral diffusion in InGaAs/InP P-i-N detector

3 结论

扫描电容显微镜(SCM)方法在器件深度、侧向扩散信息的直观获取以及对结区高空间分辨具有独特优势。针对InGaAs/InAlAs探测器扩散工艺对

器件性能的影响,用 SCM 方法精确定位了 pn 结位置,并分析了不同扩散深度对器件光谱响应的影响。此外,对 InGaAs/InP 平面型红外探测器的成结工艺进行分析,分别给出了 Zn 在 InP 帽层及 InGaAs 吸收层中的侧向与深度方向扩散比率,展现了 Zn 在两种材料中扩散速率上的显著差异。最后利用 SCM 表征方法例举了一个典型的由侧向扩散引起的器件结构缺陷问题,从器件设计和优化的角度为进一步获得性能可靠和稳定的器件提供重要判据。

References

- [1] Shao Xiu-Mei, Gong Hai-Mei, Li Xue, *et al.* Developments of high performance short-wave infrared InGaAs focal plane detectors [J]. *Infrared Technology*, (邵秀梅, 龚海梅, 李雪, 等. 高性能短波红外 InGaAs 焦平面探测器研究进展. *红外技术*) 2016, **38**(8): 629-635.
- [2] Li X, Gong H M, Fang J X, *et al.* The development of InGaAs short wavelength infrared focal plane arrays with high performance [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **80**: 112-119.
- [3] Arslan Y, Oguz F, Besikci C. 640×512 Extended short wavelength infrared $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ focal plane array [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2014, **50**(12): 957-964.
- [4] Kappers M J, Zhu T, Sahonta S L, *et al.* SCM and SIMS investigations of unintentional doping in III-nitrides [J]. *Physica Status Solidi (c)*, 2015, **12**(4-5): 403-407.
- [5] Peiner E. Doping profile analysis in Si by electrochemical capacitance-voltage measurements [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1995, **142**(2): 576-580.
- [6] Kechang S, Baribeau J M, Houghton D C, *et al.* Determination of the depth distribution of carriers in silicon molecular beam epitaxially grown material by electrochemical capacitance-voltage measurements [J]. *Thin Solid Films*, 1990, **184**(1-2): 47-54.
- [7] Huang Y, Williams C C, Smith H. Direct comparison of cross-sectional scanning capacitance microscope dopant profile and vertical secondary ion-mass spectroscopy profile [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics & Nanometer Structures*, 1996, **14**(1): 433-436.
- [8] Eyben P, Duhayon N, Stuer C, *et al.* SSRM and SCM observation of modified lateral diffusion of As, BF₂ and Sb induced by nitride spacers [J]. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 2001, **669**(3): 781-791.
- [9] Yin H, Li T X, Wang W, *et al.* Scanning capacitance microscopy investigation on InGaAs/InP avalanche photodiode structures: Light-induced polarity reversal [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **95**(9): 093506.
- [10] Yin H, Li Y, Wang W, *et al.* Scanning capacitance microscopy characterization on diffused p-n junctions of InGaAs/InP infrared detectors [J]. *Proc. of SPIE*, 2010, **7658**(12): 237-238.
- [11] Walker A W, Denhoff M W, Minority carrier diffusion lengths and mobilities in low-doped n-InGaAs for focal plane array applications [J]. *Proc. of SPIE*, 2017, **10177**: 101772D.
- [12] Xia H, Li T X, Tang H J, *et al.* Nanoscale imaging of the photoresponse in PN junctions of InGaAs infrared detector [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 21544.
- [13] He S, Zhao Y. An experimental investigation of Zn diffusion into InP and InGaAs [J]. *Semiconductor Science & Technology*, 2005, **56**(2): 149-151.
- [14] Djedidi A, Rouvie A, Reverchon J L, *et al.* Investigation of the influence of Zn-diffusion profile on the electrical properties of InGaAs/InP photodiodes [C]// International Conference on Indium Phosphide & Related Materials, 2012.
- [15] Hao Guo-Qiang. Study on physics and devices of InGaAs infrared detectors [D]. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology (郝国强. InGaAs 红外探测器器件与物理研究, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所), 2006.
- [16] Wichman A R, Dewames R E, Bellotti E. Three-dimensional numerical simulation of planar P⁺n heterojunction $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ photodiodes in dense arrays part I: dark current dependence on device geometry [C]// Infrared Technology & Applications XL. International Society for Optics and Photonics, 2014, **9070**: 907003.
- [17] Dewames R, Littleton R, Witte K, *et al.* Electro-Optical characteristics of P⁺n $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ hetero-junction photodiodes in large format dense focal plane arrays [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, **44**(8): 1-10.
- [18] Yorinobu K, Naoharu N, Noriyuki K, *et al.* Lateral diffusion distance measurement of 40-80 nm junctions by etching/TEM-Electron energy loss spectroscopy method [J]. *Japanese journal of applied physics*, 1999, **38**(Part 1, No. 4B): 2314-2318.
- [19] Tilley R J D. Chapter 7. Diffusion [M]. John Wiley & Sons, Ltd, 2005: 203-223.
- [20] Kim J S, Lee S W, Kim H M, *et al.* The contraction of lattice constant and the reduction of growth rate in p-InGaAs grown by organometallic vapor phase epitaxy [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1995, **24**(11): 1697-1701.
- [21] Liu Ying-Bin, Chen Hong-Tai, Lin Lin, *et al.* Zn diffusion of InGaAs/InP materials [J]. *Semiconductor Technology*, (刘英斌, 陈宏泰, 林琳, 等. InGaAs/InP 材料的 Zn 扩散技术. *半导体技术*) 2008, **33**(7): 63-65.
- [22] Deng Hong-Hai, Wei Peng, Zhu Yao-Ming, *et al.* Annealing process on Zn diffusion and its application in fabrication of InGaAs detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, (邓洪海, 魏鹏, 朱耀明, 等. 退火对 Zn 扩散的影响及其在 InGaAs 探测器中的应用. *红外与激光工程*) 2012, **41**(2): 279-283.
- [23] Redinbo G F, Craighead H G. Lateral diffusion limitations of InGaAs/GaAs for nanostructure fabrication [J]. *Mrs Proceedings*, 1995, **380**: 67-72.
- [24] Li X, Tang H, Fan G, *et al.* 256×1 Element linear InGaAs short wavelength near-infrared detector arrays [J]. *Proc. of SPIE*, 2007, **6835**: 683505.
- [25] Li Tao, Wang Yang, Li Ke-Fu, *et al.* Investigation on dark current and low frequency noise of mesa type InGaAs infrared detector [J]. *Journal of Optoelectronics·laser*, (李涛, 汪洋, 李永富, 等. 台面型 InGaAs 探测器暗电流及

- 低频噪声研究. *光电子·激光* 2010, **21**(4): 500-503.
- [26] Tang Heng-Jing, Wu Xiao-Li, Zhang Ke-Feng, *et al.* Current-voltage characteristics of InGaAs linear detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, (唐恒敬, 吴小利, 张可锋, 等. InGaAs 线列探测器的 I-V 特性研究. *红外与激光工程*) 2008, **37**(4): 598-601.