

非故意掺杂吸收层 InP/InGaAs 异质结探测器研究

曹嘉晟^{1,2,3}, 李 淘^{1,2*}, 王红真^{1,2,3}, 于春蕾^{1,2}, 杨 波^{1,2}, 马英杰^{1,2}, 邵秀梅^{1,2}, 李 雪^{1,2}, 龚海梅^{1,2*}

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

摘 要: 为了获得低噪声铟镓砷 (InGaAs) 焦平面, 需要采用高质量的非故意掺杂 InGaAs(u-InGaAs) 吸收层进行探测器的制备。采用闭管扩散方式, 实现了 Zn 元素在 u-InGaAs 吸收层晶格匹配 InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As 异质结构材料中的 P 型掺杂, 利用扫描电容显微技术 (SCM) 对 Zn 在材料中的扩散过程进行了研究, 结果表明, 随着扩散温度和时间增加, p-n 结结深显著增加, u-InGaAs 吸收层材料的扩散界面相比较高吸收层浓度材料 ($5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) 趋于缓变。根据实验结果计算了 530 °C 下 Zn 在 InP 中的扩散系数为 $1.27 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。采用微波光电导衰退法 (μ -PCD) 提取了 InGaAs 吸收层的少子寿命为 5.2 μs 。采用激光诱导电流技术 (LBIC) 研究了室温下 u-InGaAs 吸收层器件的光响应分布, 结果表明: 有效光敏面积显著增大, 对实验数据的拟合求出了少子扩散长度 L_D 为 63 μm , 与理论计算基本一致。采用 u-InGaAs 吸收层研制的器件在室温 (296 K) 下暗电流密度为 7.9 nA/cm², 变温测试得到激活能 E_a 为 0.66 eV, 通过拟合器件的暗电流成分, 得到器件的吸收层少子寿命 τ_p 约为 5.11 μs , 与微波光电导衰退法测得的少子寿命基本一致。

关键词: Zn 扩散; 结深; 少子扩散长度; InGaAs

中图分类号: TN304 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210073

Study on InP/InGaAs hetero-structure detector with unintentionally doping absorption layer

Cao Jiasheng^{1,2,3}, Li Tao^{1,2*}, Wang Hongzhen^{1,2,3}, Yu Chunlei^{1,2}, Yang Bo^{1,2},
Ma Yingjie^{1,2}, Shao Xiumei^{1,2}, Li Xue^{1,2}, Gong Haimei^{1,2*}

- (1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to obtain low-noise InGaAs focal plane arrays, it is necessary to adopt high-quality InGaAs material with a low unintentionally doping concentration(u-InGaAs) to fabricate the detector. Zn diffusion with

收稿日期:2021-07-15; 修订日期:2021-08-20

基金项目:中国科学院重点部署项目 (ZDRW-CN-2019-3); 中国科学院联合基金 (6141A01170106); 上海市级科技重大专项 (2019SHZDZX01); 国家自然科学基金 (62075229)

作者简介:曹嘉晟,男,博士生,主要从事短波红外探测器方面的研究。

导师(通讯作者)简介:李淘,男,研究员,博士,主要从事新型短波红外 InGaAs 焦平面探测器方面的研究。

龚海梅,男,研究员,博士,主要从事航天遥感红外光电传感器的研制、红外、紫外焦平面等新型探测器组件及其抗辐射机理与可靠技术方面的研究。

sealed-ampoule method on the lattice-matched InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As hetero-structure with a u-InGaAs absorption layer was carried out. And the Scanning Capacitance Microscopy (SCM) technology were used to study Zn diffusion in these samples. The results show that the junction depth increases significantly with the increase of diffusion temperature and time. The diffusion interface of materials with a u-InGaAs absorption layer tends to change slowly compared with relatively high concentration materials ($5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$). According to the experimental results, the diffusion coefficient of Zn into InP under 530 °C is figured out, which is $1.27 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$. The Microwave Photo Conductivity Decay method (μ -PCD) is used to extract the minority carrier lifetime of the InGaAs absorption layer. The measured minority carrier lifetime is 5.2 μs . Response distribution of devices with a u-InGaAs absorption layer at room temperature were studied by Laser Beam Induced Current technique (LBIC). The results show that the effective optically sensitive area increases significantly. The minority carrier diffusion length L_D is 63 μm by fitting the experimental data, which is consistent with the theoretical calculation. The dark current density of the device with a u-InGaAs absorption layer is 7.9 nA/cm² at room temperature, and the activation energy E_a is 0.66 eV. By fitting the dark current composition of the device, the minority carrier lifetime τ_p of the absorption layer of the device is about 5.11 μs , and the fitted minority carrier lifetime is consistent with the measured minority carrier lifetime.

Key words: Zn diffusion; junction depth; minority carrier diffusion length; InGaAs

0 引言

短波红外探测广泛应用于航天遥感、微光夜视、医疗诊断、农业工业、安全监控等领域。基于 III-V 族 InP/InGaAs 材料体系短波红外铟镓砷 (InGaAs) 探测器, 具有高探测率、高均匀性、高稳定性等特点, 是发展小型化、低功耗和高可靠性短波红外光电系统的理想选择之一, 因而引起广大研究者的关注^[1-3]。InGaAs 探测器根据成结方式不同, 可以分为平面型和台面型。而平面型的 InGaAs 探测器具有很高的可靠性和较低的暗电流水平, 因此备受重视^[4]。

为了获得低噪声的 InGaAs 焦平面, 需要采用高质量的非故意掺杂 InGaAs (u-InGaAs) 材料进行探测器的制备^[5]。非故意掺杂 InGaAs 材料一般表现为 n 型导电特性, 其载流子浓度较低。制备平面型 InGaAs PIN 探测器常采用 Zn 扩散工艺在吸收层中形成 p 型掺杂, 合适的扩散工艺可以有效控制杂质扩散的深度和浓度, 这直接关系到器件性能的优劣, 因此扩散工艺在器件研制中至关重要。

闭管扩散时, 扩散深度受扩散温度、扩散时间等参数的影响。文中通过闭管扩散方式, 利用 Zn₃P₂ 作为扩散源, 实现了 Zn 元素在晶格匹配 InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP 异质结构中 u-InGaAs 吸收层中的掺杂, 采用扫描电容显微技术 (SCM) 对 Zn 在材料中的扩散机制

进行了研究, 并采用激光诱导电流技术 (LBIC) 研究了器件的光响应分布, 并从探测器的电流-电压特性中分析暗电流主要成分, 明确暗电流机理, 拟合少数子寿命。

1 实验

晶格匹配材料为 NIN InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As /InP 材料, 厚度为 350 μm 的 InP 衬底上是 0.5 μm 掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 n 型 Si 掺杂 InP 缓冲层, 2.5 μm 掺杂浓度为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的非故意掺杂 In_{0.53}Ga_{0.47}As 吸收层, 以及 1 μm 的掺杂浓度为 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 的 n 型 Si 掺杂 InP 帽层材料。选用的扩散条件为 530 °C, 9 min、530 °C, 10 min 和 520 °C, 9 min。将 Zn₃P₂ 粉末和实验样品一起封装在真空石英管中, 真空度优于 $3 \times 10^{-4} \text{ Pa}$, 扩散采用双温区扩散, 即先进行较低温度下的预扩散, 然后进行不同扩散条件下的恒温扩散。在扩散完成后, 所有样品进行热激活。样品经解理后由 SCM 进行测试以观察不同扩散条件对 p-n 结结深的影响。根据 SCM 结果, 最终采用 530 °C, 9 min 作为扩散条件, 先后经历扩散工艺、表面钝化、N 槽刻蚀、电极制备等多个标准工序, 制备了不同的测试结构。材料结构和探测器剖面结构如图 1 所示。样品制备完成后, 测试其室温、变温 I-V 特性, 并且采用 LBIC 技术测试器件的光响应分布。

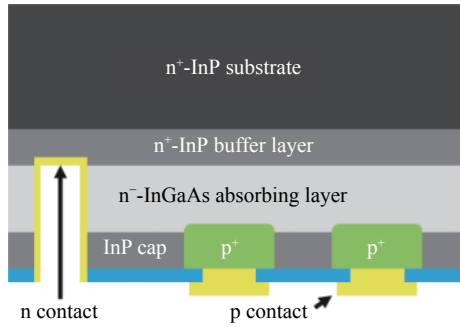


图 1 外延材料结构和光电探测器剖面图

Fig.1 Scheme illustration of the epitaxial material junction and the cross-section profile of the photodetector

2 实验结果及讨论

2.1 p-n 结结深判定

扫描电容显微技术 (SCM) 是获得 p-n 结电学分布的重要微观表征手段^[6-7]。扫描图像的获得主要依赖材料表面载流子的耗尽和积累, 非本征材料中的载流子主要来源于激活的掺杂元素。图 2 为 InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/

InP 异质结构在不同条件下扩散后的横截面 SCM 扫描图像, 从中可以获得外延层的厚度和 p-n 结深度, 结深零点处定义为 InP 帽层外表面。

图中可以明显看出, 样品由三层材料组成, 重 n⁺掺杂的衬底 InP 层, 轻 n 掺杂的 InGaAs 层以及扩散形成的 n 转 p 型 InP 帽层。SCM 测量获得图像的衬比主要来自探针与样品之间电容的变化, 一般来说, 由交流偏压产生的电容变化幅度与载流子浓度大体上成反比关系。图 2 中所给出的颜色突变, 表明了该区域载流子浓度和类型的突变。这样可以比较直观看出三个扩散条件下, Zn 元素均扩散进入 InGaAs 吸收层, 而且 SCM 图像中得出帽层的厚度与材料生长设计的帽层厚度比较吻合。测得 u-InGaAs 吸收层材料在 530 °C 下, 闭管扩散 9、10 min 的 p-n 结深度分别为 1.3、1.45 μm; 在 520 °C 下, 闭管扩散 9 min, p-n 结深度为 1.15 μm。结果表明, 随着扩散温度和时间增加, p-n 结结深有所增加。与吸收层浓度较高的 5×10¹⁶ cm⁻³ 材料的扩散界面^[4]相比, 非故意掺杂吸收层的 p-n 结界面模糊, 趋于缓变。

520 °C, 9 min 扩散成结靠近 InP/InGaAs 异质界面, 容易受到界面处缺陷的影响。530 °C, 10 min 扩散成结较深, 且 p-n 结界面模糊, 这会影响器件最终的性能。故最终选择 530 °C, 9 min 作为扩散条件来制备测试结构器件。

Zn 的扩散过程可以描述为:

$$x^2 = 4D \left[\operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C(x,t)}{C_s} \right) \right]^2 t \quad (1)$$

$$D = D_0 e^{-\frac{E_a}{k_B T}} \quad (2)$$

式中: x 为结深; C_s 为杂质的表面浓度; $C(x, t)$ 为扩散时间 t 时结深 x 处的杂质浓度; D 为杂质扩散系数; D_0 为扩散率; E_a 为与扩散工艺有关的激活能^[8]; k_B 为 Boltzman 常数; T 为温度。

由公式 (1) 计算可得, 530 °C 时, Zn 在 InP 中的扩散系数 $D=1.27 \times 10^{-12}$ cm²/s, 与参考文献中报道的 530 °C 下 $D=1.06 \times 10^{-12}$ cm²/s 相差不大^[4]。

2.2 少子扩散长度测量

InGaAs/InP 探测器是少子型光电器件, 因此材料的少子特性对器件性能起着决定性的影响, 例如在暗电流、量子效率和探测率的公式中, 少子寿命都是重

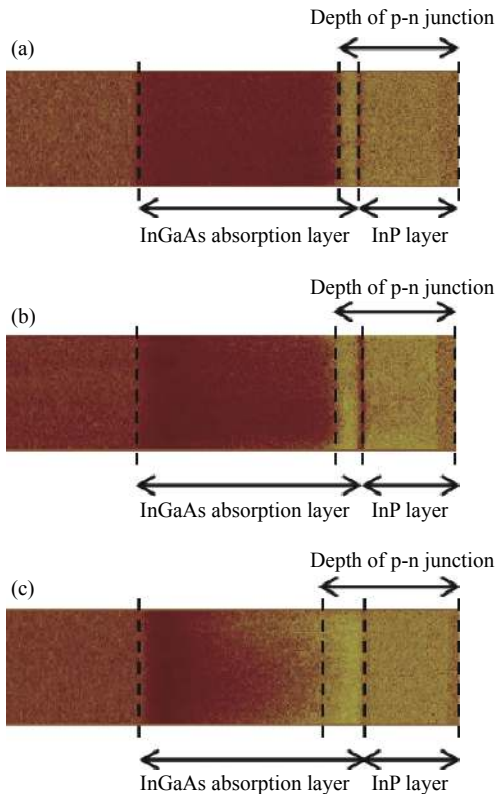


图 2 SCM 测得外延层的 p-n 结深。(a) 520 °C, 9 min ; (b) 530 °C, 9 min; (c) 530 °C, 10 min

Fig.2 p-n junction depth of epitaxial layer by SCM. (a) 520 °C, 9 min; (b) 530 °C, 9 min; (c) 530 °C, 10 min

要参量^[9]。在小注入的情况下,少子寿命 τ_p 由辐射复合、俄歇复合和 SRH 复合共同决定。

$$(\tau_p)^{-1} = B(T)N_d + C(T)N_d^2 + (\tau_{SRH})^{-1} \quad (3)$$

其中, τ_{SRH} 为 SRH 寿命,主要由半导体材料内的缺陷能级决定; $B(T)$ 是辐射复合系数,与温度的关系为:

$$B(T) = B(300 \text{ K}) \left(\frac{T}{300} \right)^{-1.68} \quad (4)$$

$B(300 \text{ K})$ 为室温的辐射复合系数,文献报道的范围在 $4 \times 10^{-11} \sim 1.43 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ 之间^[10-12],笔者取中间值 $1 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ 。公式 (3) 中的 $C(T)$ 是俄歇复合系数,室温下取 $8.1 \times 10^{-29} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$ ^[10]。

少子的扩散长度 L_p , 定义为:

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (5)$$

式中: τ_p 为少子寿命; D_p 为少子扩散系数,这里取 $6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ^[13]。

按照选取的参数,计算在不同的 SRH 寿命下,少子寿命、少子扩散长度和掺杂浓度的关系,如图 3 所示,随着 SRH 寿命降低,在低浓度区域,少子寿命和少子扩散长度明显变小;高浓度区域,SRH 寿命对少子寿命和少子扩散长度的影响不大。而且随着掺杂浓度减小,少子寿命和少子扩散长度均增大。

微波光电导衰退法 (μ -PCD) 利用微波对样品光电导的检测,实现了少子寿命的非接触式测量,它的非破坏性以及方便的面扫描等特点使其在材料表征中具有很大的优势,被广泛地应用于各种半导体材料,如 HgCdTe、Ge/GaAs 和 Si 材料的研究中^[14-16]。此次实验采用的是 SEMILAB 公司 WT-2000 μ -PCD 寿命扫描仪作为测试仪器,设备的激发波长为 904 nm。如图 4 所示,通过 μ -PCD 提取吸收层浓度为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的非故意掺杂 InGaAs 的有效少子寿命为 5.2 μs ,故由公式 (5) 计算,少子扩散长度的计算值约为 56 μm 。

激光诱导电流技术 (LBIC) 是一种高效的、非破坏性的用来表征半导体材料的内部空间结构、电活性区域以及缺陷的光学方法。这项技术已经广泛应用在光伏焦平面器件的均匀性和盲元检测方面,包括 p-n 结结深、载流子的扩散长度、探测器的品质因子 (R_0A) 及均匀性等^[17]。

本次实验采用 SEMILAB 公司的 Micro LBIC 系

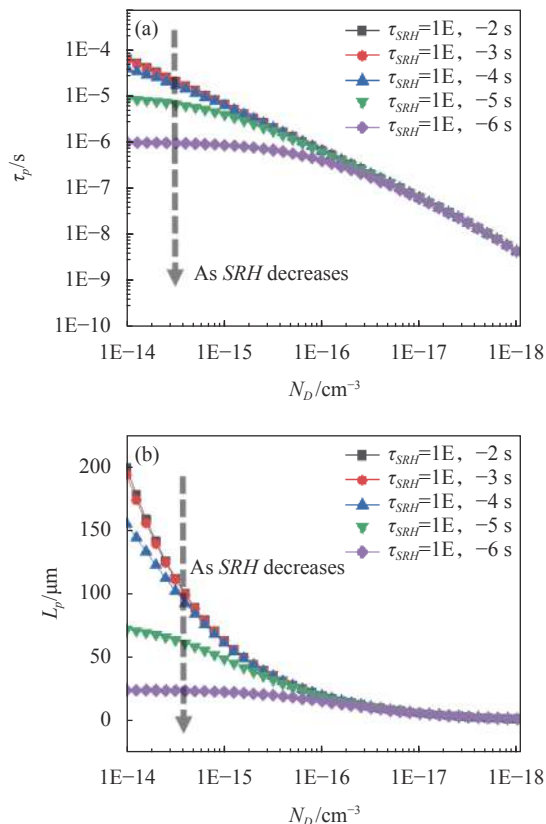


图 3 不同 SRH 寿命下, (a) 少子寿命与吸收层掺杂浓度的关系, (b) 少子扩散长度与吸收层掺杂浓度的关系

Fig.3 Under different SRH lifetimes, (a) relationship between minority carrier lifetime and doping concentration of absorption layer, (b) relationship between minority carrier diffusion length and doping concentration of absorption layer

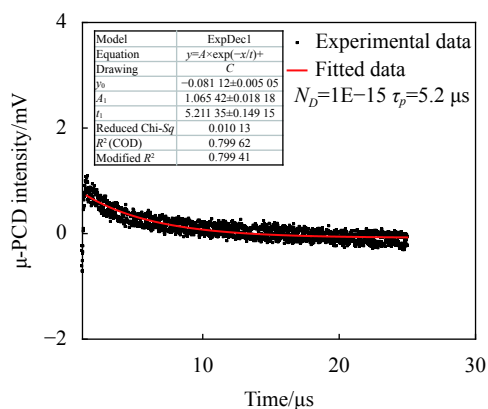


图 4 样品的 μ -PCD 信号衰减曲线

Fig.4 Decay curve of μ -PCD signal for the sample

统测试来表征器件光敏元的光响应均匀性,系统所用的脉冲激光波长 980 nm、频率 1 kHz、激光束斑直径 5 μm 、激光总功率 2 μW ,扫描步进和激光强度可调。

LBIC 测试在室温 (296 K) 下进行, 可以认为 InP 帽层不吸收 980 nm 的激光辐射, 因此激光辐射可以被 InGaAs 吸收层吸收。

实验采用 n-i-n⁺型 InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP 的材料, 采用 530 °C, 9 min 的闭管扩散工艺研制了中心距分别为 30 μm 和 15 μm 的 3×3 平面型 InGaAs 阵列探测器 1#、2#。器件采用背面入射结构和正面 n 电极, 器件的 p 电极和 n 电极均通过硅铝丝键压与宝石片上的焊盘电极相连后引出。

图 5 和图 6 分别为 LBIC 仪器扫描得到的 InGaAs 探测器的 LBIC 扫描信号照片和响应曲线, 扫描步进为 1 μm。扫描信号照片中信号值由红到黑依次减小, 最外面的蓝黑色代表的信号值为本底噪声。图 5 中可以明显直观的看到探测器的响应信号和有效光敏元面积的扩大现象。而且相邻探测器几乎没

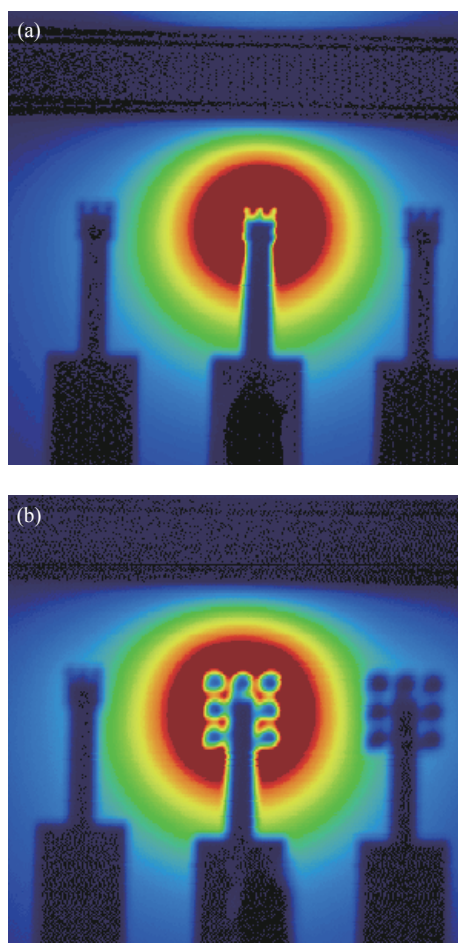


图 5 LBIC 扫描信号照片。(a) 15 μm 中心距; (b) 30 μm 中心距
Fig.5 Photograph of scan signal by LBIC. (a) 15 μm pitch; (b) 30 μm pitch

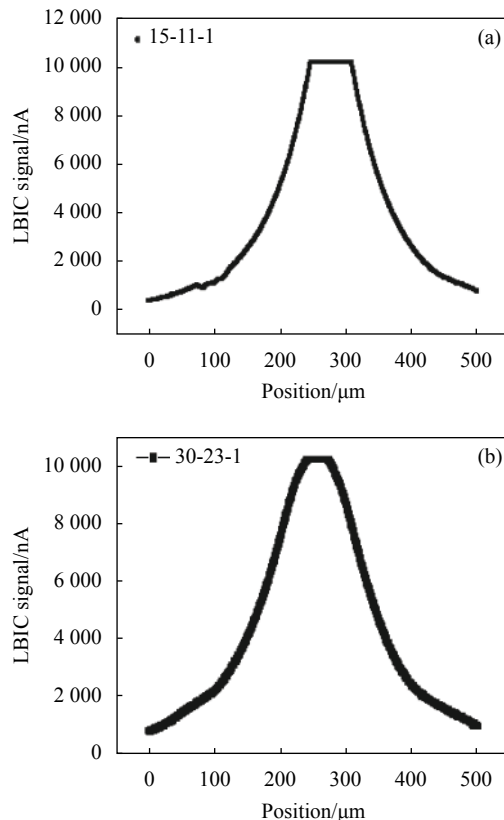


图 6 LBIC 扫描信号响应曲线。(a) 15 μm 中心距; (b) 30 μm 中心距
Fig.6 Response profile of scan signal by LBIC. (a) 15 μm pitch; (b) 30 μm pitch

有响应。图 6 中信号有明显的饱和峰值。由于杂质离子扩散的结区有杂质分布近似突变的特点, 在结区边界上的电场最强, 因此这信号峰值的位置对应扫描过程中 p 型区的两个边界。

在结区外一个扩散长度 L_D 内, 激光激发的载流子仍可以通过扩散到达结区边界而产生信号, 但能收集到的载流子数目随着距离的增大而迅速减少。在理想情况下, 收集到的信号 I_{LBIC} 根据光点离开结区边界的距离 d 呈指数规律衰减^[18], 即:

$$I_{LBIC}(d) = ke^{-\frac{d}{L_D}} \quad (6)$$

式中: k 为比例常数。

对图 6 中两个峰值外侧的衰减信号进行指数拟合, 可以获得一个特征长度 L , 如图 7 所示。在考虑了电极的位置和形状、表面复合及测量误差等因素以后, 得到的特征参数 L 和实际器件的少数扩散长度 L_D 必然存在一定的差异。通过多次测量求平均的方法, 可以提高计算的准确性, 15 μm 中心距的器件的 L_D 约为 63 μm, 30 μm 中心距的器件的 L_D 约为 67 μm,

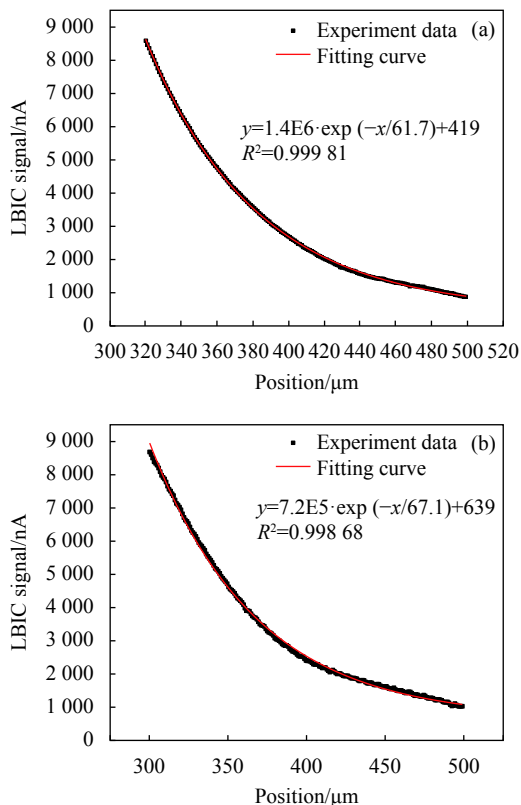


图 7 结区外的信号衰减及其指数拟合。(a) 15 μm 中心距; (b) 30 μm 中心距

Fig.7 Induced signal decay from the edge of the junction and its exponential fit. (a) 15 μm pitch; (b) 30 μm pitch

与前面少子扩散长度的理论计算基本一致。

2.3 探测器暗电流特性

在较小反向偏压下,平面型探测器的暗电流的主要成分主要有:扩散电流 (J_{diff})、产生复合电流 (J_{gr}) 和欧姆电流 (J_{ohm})。每个暗电流成分的具体表达式如下^[19-20]:

$$J_{diff} = \frac{qn_i^2}{N_d} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (7)$$

$$J_{gr} = \frac{qn_i W_d}{\tau_{SRH}} \left(\exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) - 1 \right) \quad (8)$$

$$J_{ohm} = \frac{V}{R_{sh}} \propto VT^{\frac{3}{2}} \left(\exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \right) \quad (9)$$

式中: D_p 为空穴扩散系数; τ_p 为少子寿命; τ_{SRH} 为 SRH 寿命; W_d 为耗尽区的宽度。

实验采用 n-i-n⁺型 InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP 的材料,吸收层有效掺杂浓度为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,采用 530 °C, 9 min 的闭管扩散工艺制备了 $\Phi 1 \text{ mm}$ 的单元器件。

利用 Laker Shore 控温仪进行温度控制,测试了 260~300 K 范围内的 I-V 特性曲线,图 8 为单元器件在不同温度下的暗电流密度特性曲线。在 300 K、-0.1 V 偏压下,器件暗电流密度为 7.9 nA/cm²,优值因子 R_0A 为 $1.97 \times 10^7 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。通过不同温度下得到的 $\ln J$ 与 $1/T$ 的关系可以提取热激活能 E_a 的大小,可以通过 E_a 来分析器件的电流成份。当 $E_a = E_g$ 时,扩散电流占主导;当 $E_a = E_g/2$ 时,产生复合电流和欧姆电流占主导;当 $E_a = E_g/4$ 时,表面复合电流占主导。

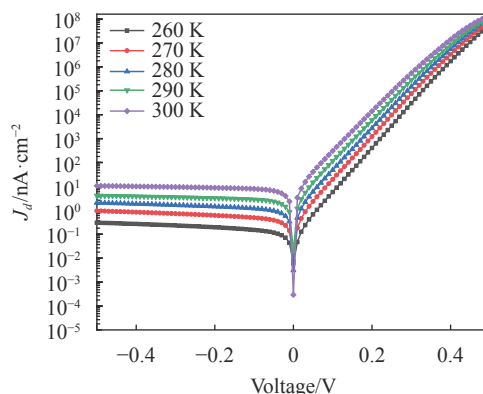


图 8 260 ~300 K 器件暗电流密度特性曲线

Fig.8 Dark current density curves ranging from 260 K to 300 K for the detector

在 -0.1 V 偏压下,器件的暗电流密度随 $1000/T$ 的变化关系如图 9 所示。通过拟合 $J = C \exp(-E_a/kT)$ 关系,可得到器件的热激活能 E_a 为 0.66 eV,晶格匹配 InGaAs 材料的禁带宽度 E_g 为 0.75 eV, E_a 远大于 $E_g/2$,接近 E_g ,说明器件的暗电流主要以扩散电流为主。

对器件室温下反偏暗电流密度进行了拟合,器件

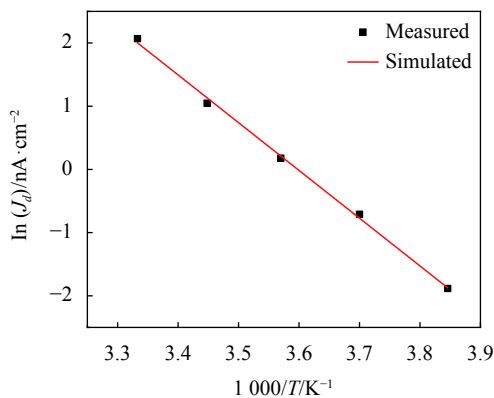


图 9 -0.1 V 偏压下的暗电流密度随 $1000/T$ 的变化关系

Fig.9 Relationship between $1000/T$ and $\ln(J_d)$ of the detector at -0.1 V

暗电流的拟合结果如图 10 所示。通过拟合的暗电流成分,可以估算 InGaAs 层的少子寿命和 SRH 复合寿命,拟合得到器件的吸收层少子寿命 τ_p 约为 5.11 μs , SRH 复合寿命 τ_{SRH} 约为 5×10^{-3} s,拟合的少子寿命与先前 μ -PCD 提取的少子寿命基本一致。

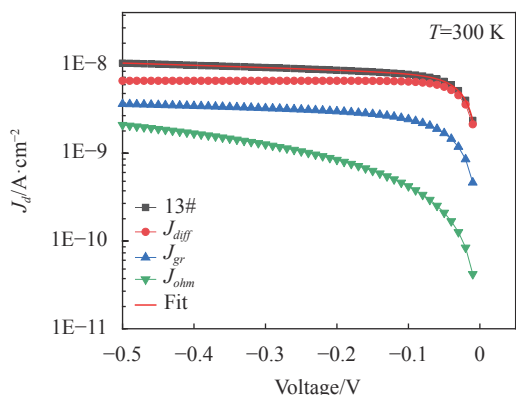


图 10 300 K 下器件的暗电流密度特性曲线与各暗电流成分的拟合结果

Fig.10 Dark current density curves measured and component of dark current fitted at 300 K for the detector

3 结 论

文中通过扫描电容显微技术研究了 Zn 在晶格匹配 InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP 异质结构非故意掺杂吸收层中的扩散行为。结果表明,随着扩散温度和时间增加,p-n 结深显著增加,非故意掺杂吸收层中的扩散界面相比较高浓度材料趋于缓变。计算了 530 $^{\circ}\text{C}$ 下,Zn 在 InP 中的扩散系数 D 为 1.27×10^{-12} cm^2/s 。采用微波光电导衰退法提取了掺杂浓度为 1×10^{15} cm^{-3} 的 InGaAs 吸收层的少子寿命为 5.2 μs 。采用激光诱导电流技术发现器件有效光敏面积显著增大,对实验数据的拟合求出了少子扩散长度 L_D 为 63 μm ,与理论计算相一致。采用 530 $^{\circ}\text{C}$, 9 min 扩散条件制备的 $\Phi 1$ mm 单元器件室温下暗电流密度为 7.9 nA/cm^2 ,激活能 E_a 为 0.66 eV,明确了器件的暗电流以扩散电流为主。通过拟合器件的暗电流成分,得到吸收层少子寿命 τ_p 约为 5.11 μs , SRH 复合寿命 τ_{SRH} 约为 5×10^{-3} s,与先前 μ -PCD 提取的少子寿命基本一致。

参考文献:

[1] Deng Honghai, Yang Bo, Shao Haibao, et al. Positive irradiation

extended wavelength In_{0.8}Ga_{0.2}As infrared focal plane detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(5): 0504004.

[2] Li Yongfu, Tang Hengjing, Li Tao, et al. Zn diffusion mechanism in InP/In_xGa_{1-x}As heterostructures [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 951-956.

[3] Li Xue, Shao Xiumei, Li Tao, et al. Research progress of shortwave infrared InGaAs focal plane detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0103006. (in Chinese)

[4] Deng Honghai, Wei Peng, Zhu Yaoming, et al. Effect of annealing on Zn diffusion and its application in InGaAs detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 279-283. (in Chinese)

[5] Yu Chunlei, Li Xue, Shao Xiumei, et al. Noise characteristics of shortwave infrared InGaAs focal plane [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Wave*, 2019, 38(4): 528-534. (in Chinese)

[6] Bun G H, Chung H J, Yi J H, et al. Electrical characterization of an operating Si pn-junction diode with scanning capacitance microscopy and Kelvin probe force microscopy [J]. *J Appl Phys*, 2001, 90(1): 443-448.

[7] Park S E, Nauven V, Kopanski J J, et al. Comparison of scanning capacitance microscopy and scanning Kelvin probe microscopy in determining two-dimensional doping profiles of Si homostructures [J]. *J Vac Sci Technol B*, 2006, 24(1): 404-407.

[8] Olsen G H, Ettenberg M. Universal stain/etchant for interfaces in III-V compounds [J]. *Journal of Applied Physics*, 1974, 45(11): 5112-5114.

[9] Lv Y, Wang N, Zhuang C, et al. The uniformity of InGaAs in InP/InGaAs/InP by microwave photoconductivity decay (μ -PCD) carrier lifetime measurement [J]. *Semiconductor Science & Technology*, 2006, 21(6): 771-774.

[10] Ahrenkiel R K, Ellingson R, Johnston S, et al. Recombination lifetime of In_{0.53}Ga_{0.47}As as a function of doping density [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 72(26): 3470-3472.

[11] Zielinski E, Schweizer H, Streubel K, et al. Excitonic transitions and exciton damping processes in InGaAs/InP [J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 59(6): 2196-2204.

[12] Wintner E, Ippen E P. Nonlinear carrier dynamics in Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y} compounds [J]. *Applied Physics Letters*, 1984, 44(10): 999-1001.

[13] Wichman A R, Dewames R E, Bellotti E. Three-dimensional numerical simulation of planar P⁺n heterojunction In_{0.53}Ga_{0.47}As photodiodes in dense arrays part I: dark current dependence on device geometry[C]//Infrared Technology & Applications XL, 2014.

- [14] Chen M C. Photoconductivity lifetime measurements on HgCdTe using a contactless microwave technique [J]. *J Appl Phys*, 1988, 62(2): 946-947.
- [15] Ichimura M, Hirano M, Tada A, et al. Characterization of Si wafers by μ -PCD with surface electric field [J]. *Materials Science & Engineering B*, 2000, 73(1): 230-234.
- [16] Sontag D, Hahn G, Geiger P, et al. Two-dimensional resolution of minority carrier diffusion constants in different silicon materials [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2002, 72 (1-4): 533-539.
- [17] LV Yanqiu, Qiao Hui, Han Bing, et al. LBIC technology to study the crosstalk and light sensitive region of InGaAs line detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 708-710. (in Chinese)
- [18] Ong V K S, Wu D. Determination of diffusion length from within a confined region with the use of EBIC [J]. *Electron Devices IEEE Transactions on*, 2001, 48(2): 332-337.
- [19] Shi Ming, Shao Xiumei, Tang Hengjing, et al. Inductively coupled plasma chemical vapor deposition silicon nitride for passivation of $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ photodiodes [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 67: 197-201.
- [20] Vishnu Gopal, Gopal V, Gupta S, et al. Temperature dependence of ohmic shunt resistance in mercury cadmium telluride junction diode [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2004, 45: 265-271.