

文章编号:1001-5078(2007)增刊-0947-04

利用 LBIC 技术对 InGaAs 平面结器件结区特性的研究

张可锋^{1,2}, 吴小利^{1,2}, 唐恒敬^{1,2}, 乔辉¹, 贾嘉¹, 李雪¹, 龚海梅¹

(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. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 室温铟镓砷(InGaAs)焦平面技术在航天工业上的应用越来越广泛, 铟镓砷(InGaAs)焦平面列阵中探测器的尺寸正不断减小, 这使得常规工艺形成的光伏探测器, 其有效光敏元面积扩大的问题越来越突出。本文利用激光诱导电流检测(LBIC)系统测试了平面结 InGaAs(P-I-N)探测器芯片的光敏元, 证实了有效光敏面扩大的存在。从实验结果看, 掺杂离子的横向扩散和结区的侧向收集效应, 是平面工艺形成的光伏器件光敏元面积扩大的主要因素, 并利用得到的实验数据拟合求出了器件少子的扩散长度。

关键词: LBIC 技术; InGaAs; 探测器; 光敏感区

中图分类号: TN215

文献标识码: A

Study on Photoactive Area of Planar InGaAs Linear Detector by LBIC Technique

ZHANG Ke-feng^{1,2}, WU Xiao-li^{1,2}, TANG Heng-jing^{1,2}, QIAO Hui¹, JIA Jia¹

LI Xue¹, GONG Hai-mei¹

(1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Short wavelength Infrared (SWIR) focal plane arrays (FPAs) working at room temperature have many important military and cosmonautic applications. The dimensions of detectors in FPAs have gradually been reduced. The problem of the increase of the effective photoactive area in photovoltaic detectors by conventional technology become more obvious. Planar InGaAs (P-I-N) linear detector at 300K using laser beam induced current (LBIC) was measured. From the results, the increase of the effective optically sensitive area exists. The landscape orientation diffusion of the dopant and the side-collecting of minority carriers are the two main reasons for the increase of the effective photoactive area for the planar InGaAs linear detector. It is important to the research and design of linear and two-dimensional InGaAs focal plane arrays (FPAs).

Key words: LBIC technique; InGaAs; detector; photoactive area

1 引言

近年来, 晶格匹配的 InP/InGaAs/InP 双异质结体系广泛用于先进的光电子和电子技术。由于铟镓砷(In_xGa_{1-x}As)卓越的性能和高可靠性, 被大量用于 1~3 μm 近红外波段^[1-2], 例如在空间遥感、过程控制、雷达和夜间目标识别方面的应用, 都需要在近红外具备高灵敏度和反应速度。InGaAs 红外探测器在有效工作波长范围 0.5~2.5 μm, 具有高的量子

效率和灵敏度, 可把 60% 的近红外辐射光子转换成光电子, 其转换效率是 GaAs 第 3 代光电阴极的 20 多倍, R₀A 值比碲镉汞(HgCdTe)材料高 1~2 数量级, 信噪比可提高 3~10 倍, 可实现室温(1.7 μm)工

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 50632060)。

作者简介: 张可锋(1978-), 男, 博士生, 主要从事短波红外探测器的研究。E-mail: zhang78412@hotmail.com

收稿日期: 2007-06-21

作,成熟的 MBE 和 MOCVD 技术也为批量生产提供了可靠的技术^[3-4],所以大线列和二维 InGaAs 焦平面探测器逐渐被用于空间遥感领域。InGaAs 红外焦平面在空间遥感的应用国外起步较早,如法国的 SPOT4 和 SPOT5 卫星上采用了 3000 元 InGaAs 短波红外扫描焦平面^[5-6];欧洲空间局 (ESA) 新一代的环境卫星 (ENVISAT) 上采用了 1024 元 InGaAs 短波红外扫描焦平面^[7];印度的 Resourcesat-1 卫星上采用了 6000 元 InGaAs 短波红外扫描焦平面^[8]。目前国内研制的 InGaAs 探测器主要是单元探测器,多用于光纤通讯,随着国内空间遥感领域的发展,对红外探测器的性能要求越来越高,国内开始注意并发展 InGaAs 红外焦平面。

随着焦平面阵列的发展,其尺寸正在不断地减小,这使得常规工艺形成的光伏探测器,其有效光敏元面积扩大的问题越来越突出了。造成光伏型器件光敏元面积扩大的原因主要有三个:①光刻图形失真等工艺因素造成的图形尺寸偏差;②离子扩散和注入的过程中存在一定的横向扩展;③当器件的尺寸和扩散长度可比时,结区外围的载流子侧向扩散收集就不能被忽略了。如果在有效光敏元面积扩大的条件下,仍用光敏元面积的设计值计算就会得到探测器性能的虚假提高;另一方面,考虑阵列中探测器之间的串音时,有效光敏元的面积扩大会导致元件之间串音,使阵列成像模糊。因此,对用常规工艺形成的器件进行光敏元的侧向收集特性研究,对于提高材料品质并完善工艺制造出优良的焦平面阵列是很有必要的。本文利用 LBIC 测试平面结 InGaAs 线列探测器的光敏感区扩大问题,对 InGaAs 线列和面阵焦平面的研究和设计有着重要的意义。

2 LBIC 测试原理和实验设备

2.1 LBIC 测试原理

LBIC (laser beam induced current) 是一种高效、非破坏性的,用来研究材料空间结构和电活性区域以及缺陷的测试方法。该方法的原理是基于 1956 年 Wallmark 发现的水平光伏效应 (LPV), 即当 P-N 结受到不均匀光照时,会在平行于 P-N 结方向产生电场,其大小和方向与 P-N 结的类型、光照的波长、强度和位置有关。在样品的两边各做一个欧姆接触的电极,然后用一束低功率的激光束聚焦在样品的特定区域产生电子-空穴对。通过观察两侧电场的变化,可以确定电活性的杂质、缺陷簇和材料的不均匀性等。利用 LBIC 技术可以测试 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,还可以分析表面状况等因素对器件特性的影响,是一种很有用的无损测试分析工具, LBIC 信号产生的机理如图 1 所示。激光束在 P-N 结表面扫描时,若连接 A 和 B 电极,光生载流子扩散到空间电荷区边缘会立刻被电极收集,产生光伏响应信号 I_{AB} ;若连接 A 和 C 电极,光生载流子扩散到空间电荷区边缘后被分离,电子向 N 区移动,空穴留在 P 区,由于电子的迁移率比空穴高,考虑 N 区的导电性比 P 区好得多,可看成等势体,电子能不断地在 N 区内快速地趋于均匀分布,致使光入射点之外的各点电势偏离平衡状态, N 区中的电子重新注入 P 区,会产生水平电场,产生如图所示的激光束诱导电流 I_{AC} , 水平电场的方向与光斑位置有关,图中所示的方向为光斑在图中的位置时所产生。

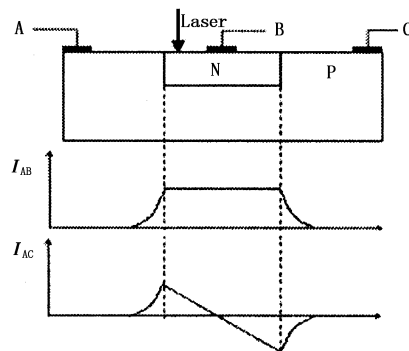


图 1 LBIC 信号原理图

Fig. 1 schematic illustration of signal and theory by LBIC

2.2 实验设备

实验利用了传感技术国家重点实验室的激光诱导电流检测 (LBIC) 系统,该系统为 SEMILAB 公司产的 Micro LBIC 仪器,脉冲激光波长为 980nm,频率为 1kHz,激光束斑直径为 $5\mu\text{m}$,扫描步进可选择。图 2 是它的系统结构框图。

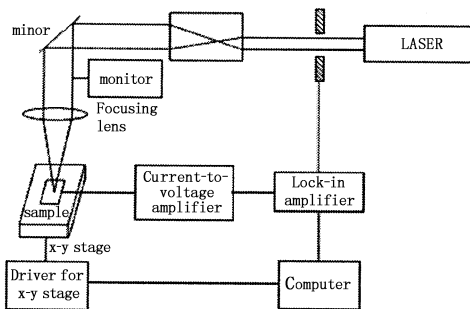


图 2 LBIC 检测系统结构框图

Fig. 2 block diagram for LBIC system

3 样品准备

InGaAs 平面探测器的结构如图 3 所示, NIN InP/InGaAs/InP 结构是用 MOCVD 在导电型 InP 缘

衬底上依次生长厚度为 $0.5\mu\text{m}$ 掺 Si 的 N-InP 缓冲层, $n \approx 3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$; 厚度为 $2.5\mu\text{m}$ 并且与 InP 晶格匹配掺 Si 的 $\text{N-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 吸收层, $n \approx 5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$; 厚度为 $1\mu\text{m}$ 掺 Si 的 N-InP 窗口层, $n \approx 5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 。 SiN_x 作为扩散阻挡层, 扩散源为磷化锌, P 型接触电极为 Au/Zn/Au 和 N 型接触电极为 Au。

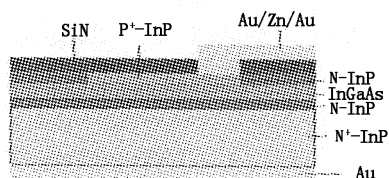


图3 InGaAs 平面探测器的结构

Fig. 3 the planar InGaAs detector structure

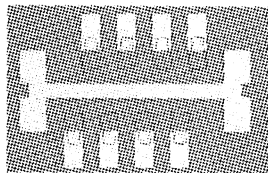


图4 8元 InGaAs 探测器照片

Fig. 4 photograph of 8 element linear InGaAs detector array

外延片经过三氯乙烯、乙醚、丙酮、乙醇依次清洗, 用等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 沉积 200nm 的 SiN_x 层作为扩散阻挡层。在 SiN_x 层上利用标准光刻工艺和湿法腐蚀开扩散孔, 然后以磷化锌为扩散源, 利用闭管扩散工艺进行 Zn 扩散, 形成 P-InP 窗口层。在扩散窗口层再沉积 200nm 的 SiN_x 层作为抗反射钝化层, 开 P 电极孔并生长 Au/Zn/Au 作为 P 型电极, 厚度分别为 $20\text{nm}/70\text{nm}/300\text{nm}$, 然后 480°C 退火 15s 。图4为8元 InGaAs 平面线列探测器的照片, 其光敏面面积为 $105\mu\text{m} \times 105\mu\text{m}$ 。

4 实验结果

4.1 光敏元的扩大

图5和图6分别为 LBIC 仪器扫描得到的8元 InGaAs 平面结线列探测器的 LBIC 扫描信号照片和响应曲线, 扫描步进为 $2\mu\text{m}$ 。电极 A 与 P-InP 相连, 电极 B 与背面的导电型 InP 相连。此扫描方式即为图1中连接 AB 电极扫描相同, 产生光伏响应信号 I_{AB} 。扫描信号照片中信号值由黑到红依次减小, 最外面的暗红色代表的信号值为本底噪声。图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。在光敏元的激光扫描响应曲线中, 信号有两个明显的峰值。由于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, 因此这两个信号峰值的位置对应扫描过程中 P 型区的两个边界, 它们的差值即实际 P 型结区的宽度

反映了离子扩散过程中 Zn 的横向扩散特性和侧向收集效应。如果把图5中的面响应分布图转换成信号等值图并归一化, 如图7所示, 可以更清楚地看到在 P 区边界外有清晰的等幅信号环。设计的光敏面面积为 $105\mu\text{m} \times 105\mu\text{m}$, 测试出有效光敏感区面积为 $125\mu\text{m} \times 125\mu\text{m}$, 除去因光斑直径引起的误差 $2\mu\text{m}$, 实际有效光敏感区面积为 $123\mu\text{m} \times 123\mu\text{m}$, 即探测器两侧分别扩大了 $9\mu\text{m}$ 。

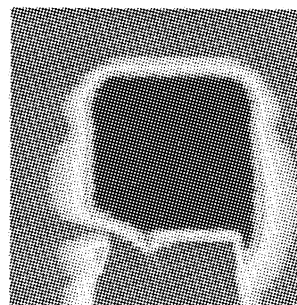


图5 芯片电极 AB 间收集的 LBIC 扫描信号照片 (扫描步进为 $2\mu\text{m}$)

Fig. 5 photograph of scan signal between electrode A and B by LBIC (Scanning rate: $2\mu\text{m}$)

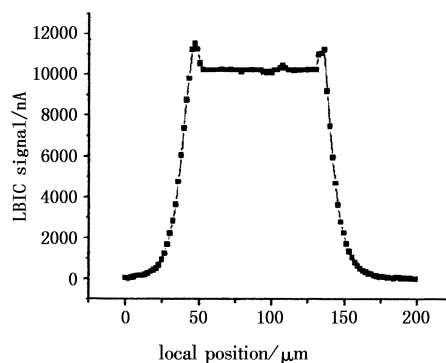


图6 芯片电极 AB 间收集的 LBIC 扫描信号响应曲线 (扫描步进为 $2\mu\text{m}$)

Fig. 6 photograph of scan signal between electrode A and B by LBIC (Scanning rate: $2\mu\text{m}$)

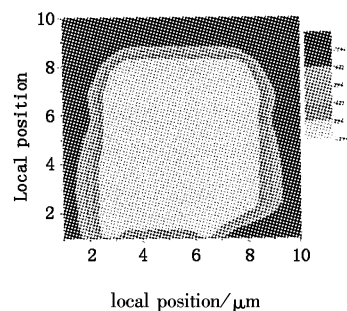


图7 芯片的响应等值线 (归一化)

Fig. 7 signal contour of the chip

4.2 扩散长度

用 LBIC 技术测试光伏器件的少数扩散长度, 可以不用划片而直接在晶片上进行测量。另外,

它还能给出器件在成型后少子扩散长度的真实值,而不用对掺杂浓度和杂质分布情况做任何理想的假设。测试过程中用与器件光敏元相比足够小的光源照射样品,然后移动样品台使光点垂直地通过 P-N 结结区边界,考察光点照射在样品不同位置时的 LBIC 信号就可以获得关于器件少子扩散的信息。

通常情况下,在结区边界上的电场最强,因此扫描曲线中的信号峰值位置即对应结区的边界。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^[9],即:

$$I_{LBIC}(d) = ke^{-\frac{d}{L_D}} \quad (1)$$

其中, k 为比例常数。

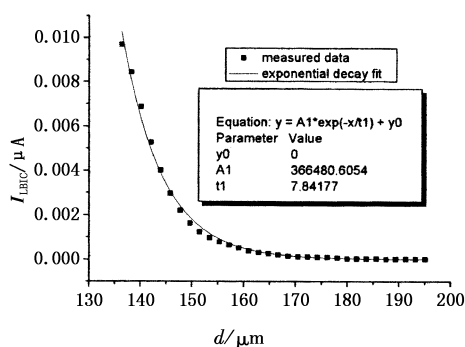


图8 结区外的信号衰减及其指数拟合

Fig. 8 Induced current decay from the edge of the junction and its exponential fit

因此,如果我们对图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8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,我们得到的特征参数 L 和实际器件的少子扩散长度 L_D 必然存在一定的差异^[10]。但如果去除离结区边缘较近的数据点,以消除结区边缘效应的影响,并用多次测量求平均的方法,可以提高计算的准确性,从图8中我们可以得到其 L_D 为 $7.8\mu\text{m}$,符合对前面光敏元面积扩大的实验分析,由此我们也可以推算出在 Zn 扩散过程中,其横向扩散了 $1.2\mu\text{m}$ 。

5 结论

本文介绍了 LBIC 技术的测试原理,并用该技术研究了平面结 InGaAs 探测器光敏感区。通过实验可以看到,器件的有效光敏面扩大为 $9\mu\text{m}$,是离

子扩散过程中 Zn 的横向扩散特性和侧向收集效应引起的,通过对实验数据的拟合求出了少子的扩散长度 L_D 为 $7.8\mu\text{m}$,Zn 的横向扩散为 $1.2\mu\text{m}$ 。在设计光敏元尺寸时预先把光敏面扩大的因素考虑在内和增加保护环结构可以降低结区的侧向收集效应,目前保护环结构作用的真正机理还不十分清楚,也没有定量的计算,需要做进一步的研究。LBIC 技术可以直观、方便、无损伤地研究 InGaAs 探测器阵列的光敏感区的有效面积,对 InGaAs 线阵和面阵焦平面的研究和设计有着重要的意义。

参考文献:

- [1] G H Olsen, A M Joshi, V S Ban. Current status of InGaAs detector arrays for $1 - 3\mu\text{m}$ [C]//SPIE, 1991, 1540: 596 - 605.
- [2] A M Joshi, V S Ban, S Mason, et al. 512 and 1024 element linear InGaAs detector arrays for near infrared ($1 - 3\mu\text{m}$) environmental sensing [C]//SPIE, 1992, 1735: 287 - 295.
- [3] Olsen G H, Joshi A M, Ban V S, et al. Multiplexed 256 element InGaAs detector arrays for $0.8 - 1.7\mu\text{m}$ room-temperature operation [C]//SPIE, 1988, 972: 279 - 285.
- [4] Kozlowski L J, Tennant W E, Zandian M, et al. SWIR staring FPA performance at room temperature [C]//SPIE, 1996, 2746: 93 - 100.
- [5] J P Moy, J J Chabbal, S Chaussat, et al. Buttable arrays of 300 multiplexed InGaAs photodiodes for SWIR imaging [C]//SPIE, 1986, 686: 93 - 95.
- [6] J P Moy, X Hugon, J Chabbal, et al. 3000 InGaAs photodiode multiplexed linear array for SPOT4 SWIR channel [C]//SPIE, 1989, 1107: 137 - 151.
- [7] Ruud W M Hoogeveen, Ronald J van der A, Albert P H Goede. Extended wavelength InGaAs infrared ($1.0 - 2.4\mu\text{m}$) detector arrays on Sciamachy for space-based spectrometry of the Earth atmosphere [J]. Infrared Physics & Technology, 2001, 42: 1 - 16.
- [8] Himanshu Dave, Chirag Dewan, Sandip Paul, et al. AW-iFS C for Resourcesat [C]//SPIE, 2006, 6405.
- [9] Ong V K S, Wu Dethau. Determination of diffusion length from within a confined region with the use of EBIC [J]. IEEE transactions on electron devices, 2001, 48 (2): 332 - 337.
- [10] Redfern D A, Thomal J A, Dell J M, et al. Diffusion length measurements using laser beam induced current [J]. Conf on Optoelectron and Microelectron Mat and Dev IEEE Proc. ,2000: 463 - 466.