

文章编号:1001-9014(2005)01-0011-04

## 室温短波碲镉汞结区的LBIC方法研究

贾嘉, 陈贵宾, 龚海梅, 李向阳

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:**室温短波碲镉汞焦平面技术在军事与航天工业上的应用越来越广泛, 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, 其有效光敏面面积扩大的问题越来越突出. 我们利用激光诱导电流(LBIC)检测系统测试了室温短波碲镉汞 n-on-p 芯片的光响应分布, 证实了有效光敏面扩大的存在. 从实验结果看, 结区的侧向扩散收集效应是造成目前常规工艺形成的光伏器件光敏面面积扩大的主要因素.

**关键词:**短波红外碲镉汞光伏器件; n-on-p 结; LBIC 方法; 侧向收集

**中图分类号:** TN215 **文献标识码:** A

## STUDY ON THE JUNCTIONS OF SWIR HgCdTe PHOTO DIODES AT ROOM TEMPERATURE WITH LASER BEAM INDUCED CURRENT

JIA Jia, CHEN Gui-Bin, GONG Hai-Mei, LI Xiang-Yang

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, 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. Then the problem of the increase of effective optically sensitive area in photovoltaic detectors by conventional technology has been more thought of. The response of n-on-p HgCdTe photodiodes at 300K was measured by laser beam induced current (LBIC). From the results, we may see that the increase of effective optically sensitive area does exist, and the lateral diffusion of carriers to the junction periphery is the main reason.

**Key words:** SWIR HgCdTe photodiodes; n-on-p junction; LBIC; lateral collection

### 引言

由于碲镉汞(HgCdTe)短波光伏器件的阻抗较高, 不需制冷即可获得较高的探测率, 因此近年来被广泛地用于形成室温工作的红外焦平面列阵, 越来越多地应用于军事与航天工业<sup>[1]</sup>. 但近年来, 随着焦平面列阵中探测器的尺寸不断减小, 这使得用离子注入的常规工艺形成的 n-on-p 型光伏探测器, 其有效光敏面由于结区的侧向收集效应而发生面积扩大的问题越来越突出了.

在目前形成短波 n-on-p 型碲镉汞光伏芯片的常规工艺<sup>[2]</sup>中, 即在区熔掺杂生长的大组分 p 型材料上, 经生长 ZnS 阻挡层并注入 B<sup>+</sup> 后, 再在光敏区外的 n 型注入区域中和原 p 型衬底材料上蒸镀金属电极

的工艺过程中, 造成光伏型器件光敏面面积扩大的原因主要有 3 个: ① 光刻图形失真等工艺因素造成的图形尺寸偏差; ② 离子注入的过程中存在一定的横向扩展; ③ 当器件的尺寸和少数扩散长度可比时, 结区对外围载流子的侧向收集效应. 如果在有效光敏面面积扩大的条件下, 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, 有效光敏面的面积扩大会导致元件之间串音, 使列阵成像模糊. 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列阵是很有必要的.

### 1 实验

#### 1.1 实验设备与原理

收稿日期: 2004-01-10, 修回日期: 2004-09-13

基金项目: 上海光科技专项基金资助(022261024)

作者简介: 贾嘉(1976-), 男, 山东安丘人, 助理研究员, 硕士, 主要从事薄膜工艺和红外探测器的研究.

Received date: 2004-01-10, revised date: 2004-09-13

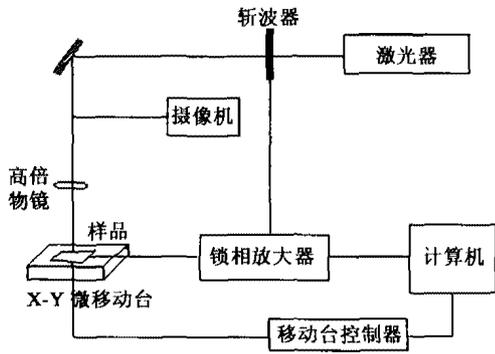


图1 LBIC 检测系统结构框图<sup>[4]</sup>  
Fig.1 Block diagram for LBIC system<sup>[4]</sup>

实验是在红外物理国家实验室的激光诱导电流 (LBIC) 检测系统上完成的. LBIC 检测是一种高效、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光学方法<sup>[3]</sup>. 图1是此次实验所用系统的结构框图<sup>[4]</sup>, 它利用了显微拉曼光谱仪中一部分高性能的硬件设备, 包括①激光光源, 6328Å 的 He-Ne 激光; ②激光显微系统: 高倍物镜使用的是 50 倍的长工作物镜, 这时的光斑尺寸约为 1.5μm; ③ X-Y 移动平台: 走步精度达 0.1μm. 通过观察两侧电场的变化, 可以确定电活性的杂质、缺陷簇、材料的不均匀性和 p-n 结构等.

1.2 扫描方式

实验所用的短波 n-on-p 型碲镉汞光伏样品共 3 个, 设计光敏区尺寸为 400μm × 400μm, 从 n 型和 p 型区分别引出两个测试电极与 LBIC 系统的测试端相连. 并按图 2 所示建立直角坐标系, X 轴与 p 型电极方向和光敏区的一边平行, Y 轴则与光敏区的另一边平行, Z 轴竖直向上垂直于芯片表面. 用聚焦后 Φ1.5μm 与器件光敏元相比足够小的 He-Ne 激光光

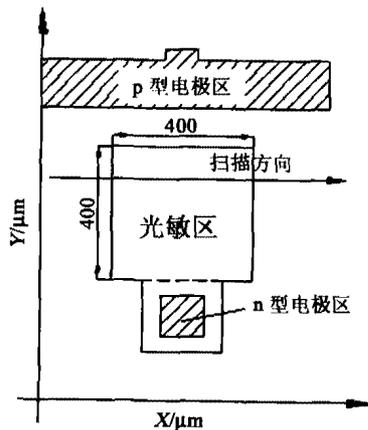


图2 样品设计及坐标建立  
Fig.2 Design of the sample and its coordinates system

表1 样品的材料参数及扫描方式  
Table 1 Sample data used in this study and their scan mode

组分	样品	1#	2#	3#
最大透射率	$T_{max}/(\%)$	57	56	56
室温电阻率	$\rho_{300K}/(\Omega \cdot \text{cm})$	96.6	29.3	17.8
室温空穴浓度	$P_{300K}/(\text{cm}^{-3})$	$5.53 \times 10^{13}$	$1.26 \times 10^{15}$	$8.50 \times 10^{15}$
室温迁移率	$\mu_{300K}/(\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1})$	1220	170	44
截止波长	$\lambda_{c,300K}/(\mu\text{m})$	1.68	1.73	1.74
N 型注入区域	$(\mu\text{m} \times \mu\text{m})$	400 × 400	400 × 400	400 × 400
X 方向扫描	$(\text{step} \times \mu\text{m}/\text{step})$	40 × 15	30 × 20	60 × 10
Y 方向扫描	$(\text{step} \times \mu\text{m}/\text{step})$	40 × 15	250 × 5	60 × 10

源照射样品, 然后移动样品台沿 X 方向进行扫描, 一行完成后沿 Y 轴平移一定距离后重复扫描, 直到扫描区域覆盖整个光敏区, 测量光点照射在样品结区周围不同位置时的响应情况. 每个芯片的材料参数及其扫描方式如表 1 所列:

2 实验结果

我们利用 LBIC 系统的光源和扫描机构, 在该系统上对 3 个样品进行了小光点的响应测试工作. 通过结区典型的光敏面 LBIC 线扫描曲线, 如图 3 所示. 显然, 光点照射在注入的结区内以及外围一个载流子扩散长度内的时候, 激发的载流子能被结区收集到, 从而形成可以被测量到的信号 S. 但信号强度存在很大差异<sup>[5]</sup>: ① 在注入区内部, 光源激发的载流子可以几乎均匀地被结区吸收, 所以响应的信号

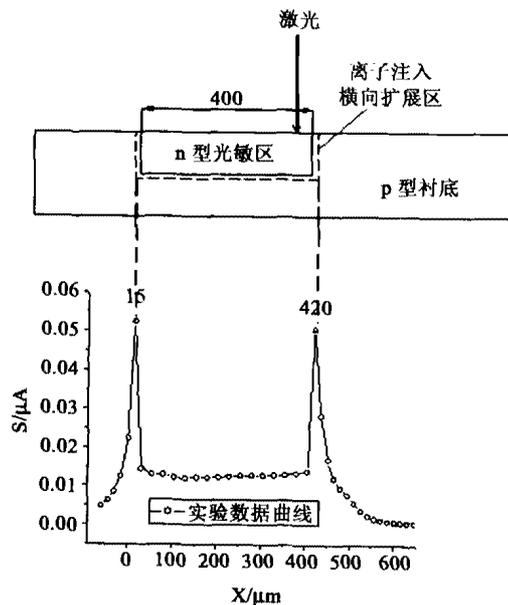


图3 典型的光敏面 LBIC 线扫描曲线  
Fig.3 Typical LBIC line-scan profile of optically sensitive area

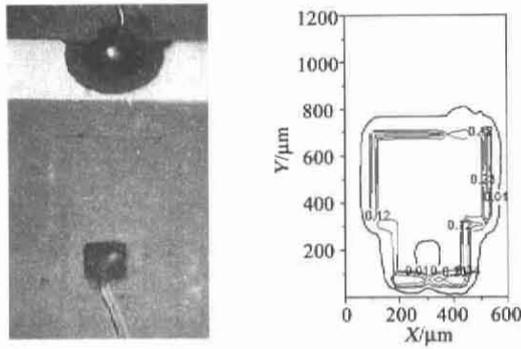


图4 2#短波芯片照片及其面响应归一化等值图  
Fig.4 Photograph of sample 2# and its signal contour

也近似相等;②在结区的边界上电场最强,所以产生的信号也最强,会产生2个明显的峰值.由于离子注入的结区有杂质分布近似突变的特点,因此扫描过程中的这两个信号峰值位置对应于n型注入区的两条边界,它们的差值即实际n型结区的宽度反映了离子注入过程中B<sup>+</sup>的横向扩展特性;③在两个峰值的外侧,即在结区外一个扩散长度的范围内,能通过扩散到达结区的载流子数目随着距离的增大而迅速减少,在理想情况下,响应信号呈指数规律衰减.通过比较实际注入的光敏元尺寸和结区外仍有响应的区域宽度可以了解造成目前光伏型器件光敏面积扩大的主要原因.

如果把所有响应曲线按照扫描位置排列起来并归一化,就可以得到芯片的面响应等值图,如图4所示.图中给出了2#样品的光敏面照片及其面响应等值线.在响应等值图中我们可以清楚地看到:①整个光敏区的边界与芯片形貌符合地很好;②光敏区内的响应也比较均匀,没有响应的n型电极位置在注入区内很明显;③在光敏区外的大部分区域都没有响应,宽大的p型电极区也湮没在其中;④在注入区边界外还有个清晰的等幅信号环.如果我们对

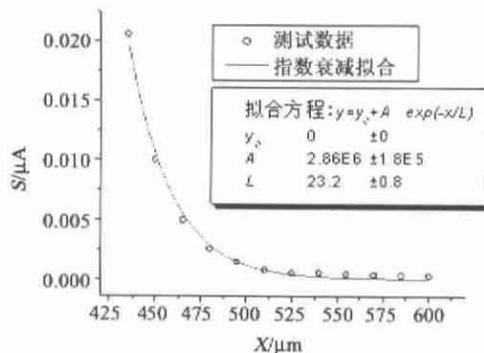


图5 结区外的信号衰减及其指数拟合  
Fig.5 Induced current decay from the edge of the junction and its exponential fit

图3中两个峰值外侧的衰减信号进行指数拟合,可以获得一个衰减特征长度 $L$ ,如图5所示.考虑到电极位置、表面复合及测量误差等因素后,可以知道特征长度 $L$ 和实际的室温短波p型碲镉汞材料的少数扩散长度还存在一定的差异,但特征长度 $L$ 仍是和载流子扩散特性直接相关,并可作为衡量由侧向收集引起光敏面扩大程度的参数<sup>[6]</sup>.

### 3 光敏面扩大的主要因素

表2是从1#样品光敏面的线扫描响应曲线中得到的数据表.需要指出的是,在LBIC测量中,为了消除结区边缘电场的影响,得到较为准确的结果,要求电极位置离测量点足够远<sup>[3]</sup>.所以为了尽量减小光敏元边角侧向电场的影响,我们去除了离结区边缘较近的数据点.例如对于1#样品,在总共40条扫描曲线中我们去除了两边靠近测量电极的各10条曲线,只把靠近光敏元中心的20条扫描曲线的所得到的数据列入表2中进行计算拟合.从图2中可知,这时光敏区Y方向的尺度远大于少子的扩散长度,光敏区中心部分的扫描曲线可以认为不受电极位置的影响.另两个样品我们用同样的方法也得到了类似的表格,只是不在文中一一列出.表2中列出了扫描曲线中如图3所示的两个峰值( $P_1$ 和 $P_2$ )的位置坐标及其差值( $\Delta P$ )和如图5指数拟合得到的特征值 $L$ .

表2 1#样品的信号峰值位置及其差值(n型区宽)和特征长度 $L$ 值

Table 2 Positions of the two peak value and their difference (the width of n-region), and the characteristic length  $L$  of sample 1#

1#	$P_1$ ( $\mu\text{m}$ )	$P_2$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta P$ ( $\mu\text{m}$ )	$L$ $y_0 + A \exp(-x/L)$
1	15	420	405	23.3
2	15	420	405	23.6
3	15	420	405	23.2
4	15	420	405	23.3
5	15	420	405	23.7
6	15	420	405	24.6
7	0	420	420	23.3
8	0	420	420	23.3
9	0	420	420	23.9
10	0	420	420	24.1
11	0	420	420	24.6
12	0	420	420	24.9
13	0	420	420	24.8
14	0	420	420	24.8
15	0	420	420	24.8
16	0	405	405	26.1
17	0	405	405	24.4
18	0	405	405	26.5
19	0	405	405	26.0
20	0	405	405	26.1
平均值			412	24.5
标准偏差			7	1.1

如前所述,造成光伏型器件光敏面面积扩大的主要原因有3个,即光刻图形失真等工艺因素造成的偏差以及离子注入过程中的横向扩展和结区外围载流子的侧向收集效应.定义由离子注入和侧向扩散引起的光敏面扩大尺度分别为 $\Delta L_{\text{注入}}$ 和 $\Delta L_{\text{扩散}}$ ,而光刻设计值为 $L_{\text{设计}}$ ,则由离子注入和侧向扩散导致的光敏面边长偏差分别为 $\Delta_{\text{注入}}$ 和 $\Delta_{\text{扩散}}$ :

$$\Delta_{\text{注入}} = \Delta L_{\text{注入}} / L_{\text{设计}} = (\Delta P - L_{\text{设计}}) / L_{\text{设计}}, \quad (1)$$

$$\Delta_{\text{扩散}} = \Delta L_{\text{扩散}} / L_{\text{设计}} = 2L / L_{\text{设计}}, \quad (2)$$

实验中,1#~3#样品由这两种因素引起的光敏面尺寸偏差分别如表3所列:

由表可知, $B^+$ 注入引起的横向扩展仅为光刻线度的2.5%左右,而由载流子侧向扩散收集引起的光敏面扩大尺寸要比离子注入的横向扩展大得多,约为注入扩展线度的3倍.所以,在目前的器件尺寸下,离子注入仍能精密控制杂质的分布,满足工艺设计要求,而结区对外围载流子的收集效应是造成器件光敏元面积扩大的主要因素.可见,对结区载流子侧向扩散特性的研究是十分迫切的.

#### 4 结语

① 由于平面光伏器件在结构和工艺上的原因,离子注入的侧向扩展和结区对外围载流子扩散的侧向收集使它不可避免地存在光敏面扩大的问题.

② 在目前约 $100\mu\text{m}$ 量级的碲镉汞器件线宽条件下,离子注入的侧向扩展可以忽略不计,结区的侧向收集效应是造成常规工艺中光伏器件光敏元面积扩大的主要因素,且随着列阵中探测器尺寸的不断减小而在光敏面扩大中占得比重越大.

表3 离子注入和侧向扩散引起的光敏面扩大  
Table 3 Increase of effective optically area caused by ion implantation and lateral collection

单位: $\mu\text{m}$	$L_{\text{设计}}$	$\Delta L_{\text{注入}}$	$\Delta L_{\text{扩散}}$	$\Delta_{\text{注入}}$	$\Delta_{\text{扩散}}$
1#	400	12	49	3.0%	12.3%
2#	400	7	31	1.8%	7.8%
3#	400	8	24	2.0%	6.1%

③ 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 $L$ 和实际的室温短波 $p$ 型碲镉汞材料的少子扩散长度 $L_D$ 必然存在一定的差异,但我们认为两者可能相差很小,对于碲镉汞光伏器件的光敏面扩大特性还有待于做更多更深入的研究.

#### REFERENCES

- [1] Rogalski A. Infrared detectors; Status and Trends [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2003, 27: 59—210.
- [2] TANG Ding-Yuan, TONG Fei-Ming. *Infrared detectors of narrow-gap semiconductors. The Research and Evolvement of Semiconductor Devices II* [C]. Beijing: Science Press, (汤定元,童斐明.窄禁带半导体红外探测器,半导体器件研究与进展 II.北京:科学出版社), 1991: 1—107.
- [3] Musca C A, Redfern D A, Dell J M, et al. Laser beam induced current as a tool for HgCdTe photodiode characterization [J]. *Microelectronics Journal*, 2000, 31: 537—544.
- [4] CAI Wei-Ying. *The characteristics of imaging spectrum for infrared devices* [D]. Shanghai: Doctor's dissertation of Shanghai Institute of Technical Physics, 2003: 53—100.
- [5] Jacques I Pankove. *Optical Processes in Semiconductors* [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1971: 303—335.
- [6] Redfern D A, Thomas J A, Musca C A, et al. Diffusion length measurements in p-HgCdTe using laser beam induced current [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2001, 30(6): 696—703.