

# 激光束诱导电流法提取 HgCdTe 光伏探测器的电子扩散长度\*

殷 菲<sup>†</sup> 胡伟达 全知觉 张 波 胡晓宁 李志锋 陈效双 陆 卫<sup>‡</sup>

(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)

(2008 年 5 月 5 日收到, 2009 年 3 月 13 日收到修改稿)

由于得到 HgCdTe 扩散长度  $L_p$  的标准测试结构会损伤 p-n 结单元, 实验中广泛采用激光束诱导电流(LBIC) 提取的等效扩散长度  $L$  来代替  $L_p$ . 本文通过二维数值模拟, 分析了等效扩散长度  $L$  和扩散长度  $L_p$  的关系. 二者的比例关系为  $L/L_p = 1.1$ , 该基本关系不受器件的关键参数如掺杂浓度、载流子寿命、载流子迁移率等的影响. 最后将激光束诱导电流实验所获得的等效扩散长度  $L$  进行除 1.1 因子的修正, 给出了实际 HgCdTe 光伏器件中的电子扩散长度.

关键词: 碲镉汞, 激光束诱导电流, 扩散长度

PACC: 7280E, 7340L, 2940P

## 1. 引言

HgCdTe 探测器由于其优良的性能已成为目前最重要的红外探测器之一<sup>[1]</sup>, 而少数载流子扩散长度是一个表征 HgCdTe 红外探测器性能的关键参数. 当碲镉汞光伏器件 p-n 结电阻受扩散限制时, 能通过载流子扩散长度直接计算出 p-n 结的电阻, 来表示 n-on-p 光伏器件的性能<sup>[2,3]</sup>. 扩散长度越大, 暗电流越小, 碲镉汞光伏器件 p-n 结阻抗越大<sup>[4]</sup>. 因此研究碲镉汞光伏器件的少子扩散特性具有很大的理论价值和现实意义, 目前用于研究碲镉汞光伏器件的少子扩散特性方法主要有激光束诱导电流、变磁场电流-电压特性谱<sup>[5]</sup>等方法. 激光束诱导电流(LBIC) 是一种十分适合 HgCdTe 光伏器件的质量无损检测技术<sup>[6]</sup>, 它使用激光束扫描, 通过样品两边电极收集诱导电流. LBIC 电流图像代表了样品中具有光电活性特征的空间分布, 从中可以提取扩散长度等重要参数<sup>[4,7-9]</sup>.

LBIC 提取扩散长度的方法根据采用不同的器件结构分两种情况. 一种是对 p-n 结单元进行电学

接触, 从 p 区和 n 区引出电极, 对得到的电流进行分析提取扩散长度  $L_p$ <sup>[8]</sup>, 这种方法可用于 GaN 等材料的研究<sup>[10]</sup>. 而对于 HgCdTe 而言, 由于直接电学接触会损伤 p-n 结单元, 因此采用的激光束诱导电流技术不对 p-n 结单元进行直接电学接触, 而采用两个远距离的电极接触来获取单元的信号, 从中得到等效扩散长度  $L$ . 这样的方法对于 HgCdTe 红外焦平面芯片的中测筛选特别有效, 因为采用该方法不会影响焦平面芯片中各个像元的进一步流片. 但是对于常规 HgCdTe 红外探测器件而言, 从探测器工作的基本光电过程角度看  $L$  和  $L_p$  两者之间是否相同, 在理论上还缺乏系统的研究. 本文通过自洽求解泊松方程和连续性方程进行二维数值模拟来分析了  $L$  与  $L_p$  的关系, 并考察了器件关键参数(如掺杂浓度、Shockley-Read-Hall(SRH)复合寿命和迁移率)对该关系的影响, 最后对实际器件分析, 得到了该器件的电子扩散长度  $L_p$ .

## 2. 理论方法

LBIC 信号产生的机理如图 1 所示<sup>[6,11]</sup>, 用一束

\* 国家自然科学基金(批准号: 10734090, 10725418), 上海-应用材料研究与发展基金(批准号: 08520740600)和航空科学基金(批准号: 20080190001)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: yinfei@mail.sitp.ac.cn

<sup>‡</sup> 通讯联系人, E-mail: luwei@mail.sitp.ac.cn

聚焦的激光在样品上扫过,这时在光聚焦处产生电子-空穴对,电子-空穴对向结区扩散并在结区电场作用下分离,电子向 n<sup>+</sup> 区移动,空穴留在 p 区,由于电子的迁移率比空穴高,电子在 n<sup>+</sup> 区快速趋于均匀分布,致使光入射点之外的各点电势偏离平衡状态, n<sup>+</sup> 区中的电子重新注入到 p 区.这时,光照点的多子(空穴)和不同点上穿过结边界的再注入电子在 p 区建立了横向电场. LBIC 信号由横向电场产生.随着光激发点位置的不同,净横向电场的方向会发生改变.当光照射在结的中心时,两侧的横向电场方向相反,大小相等,净场为零.

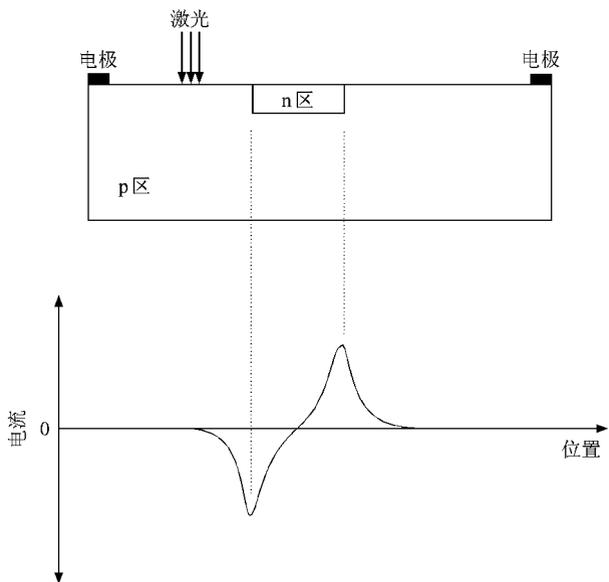


图 1 p-n 结截面图及对应的 LBIC 双峰曲线

基于图 1 的基本器件构型,我们从器件内部载流子的状态及运动出发,根据器件的几何结构及杂质分布情况,建立了基本漂移-扩散模型由泊松方程(1)电子与空穴的连续性方程(2)和电流运输方程(3)描述如下<sup>[12]</sup>:

$$\nabla \epsilon \cdot \nabla \psi = -q(p - n + N_{D^+} - N_{A^-}), \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_n = q(G - R) + q \frac{\partial n}{\partial t},$$

$$-\nabla \cdot \mathbf{J}_p = q(G - R) + q \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\mathbf{J}_n = -nq\mu_n \nabla \phi_n,$$

$$\mathbf{J}_p = -pq\mu_p \nabla \phi_p, \quad (3)$$

其中  $\epsilon$  为介电常数,  $\psi$  为静电势,  $q$  为电子电荷,  $n$  和  $p$  分别为电子浓度和空穴浓度,  $N_{D^+}$  是电离施主数,  $N_{A^-}$  是电离受主数,  $\mathbf{J}_n$ ,  $\mathbf{J}_p$  分别为电子和空穴电流密度,  $G$  为电子-空穴对的产生率,  $R$  为电子-空穴

对的复合率,  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  是电子和空穴的迁移率,  $\phi_n$ ,  $\phi_p$  是电子和空穴的准费米势.

假设激光束沿  $z$  方向,方程(2)中的电子-空穴产生率  $G$  可描述为

$$G(x, y, z, t) = \mathcal{J}(x, y, z_0) \alpha(\lambda, z) \times \exp\left(-\int_{z_0}^z \alpha(\lambda, z) dz\right), \quad (4)$$

其中  $\mathcal{J}(x, y, z_0)$  表示光束在器件表面的强度分布,  $z_0$  为在  $z$  方向光吸收的起始点,  $\alpha(\lambda, x, y, z)$  为吸收系数<sup>[12]</sup>. 根据边界条件与上述方程联立采用牛顿迭代法进行求解得到激光束诱导的电流在空间的分布.

本文模拟采用的二维结构如图 2 所示,计算中涉及的典型 HgCdTe 红外探测器的相关参数如下: Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 组分  $x = 0.52$ , n 区长度为 150  $\mu\text{m}$ ,结深为 2  $\mu\text{m}$ , p 区长度为 300  $\mu\text{m}$ , p 区总厚度为 10  $\mu\text{m}$ ,掺杂浓度、SRH 寿命、迁移率等参数如表 1—3 所示. 光斑直径为 1.5  $\mu\text{m}$ ,温度为 300 K. 由于 HgCdTe 材料导带有效态密度低, n 型材料容易处于简并状态,为此载流子浓度采用费米-狄拉克统计. 计算中考虑了 Shockley-Read-Hall(SRH)复合、俄歇复合、辐射复合的影响,载流子迁移率考虑了温度和高电场饱和效应的影响.

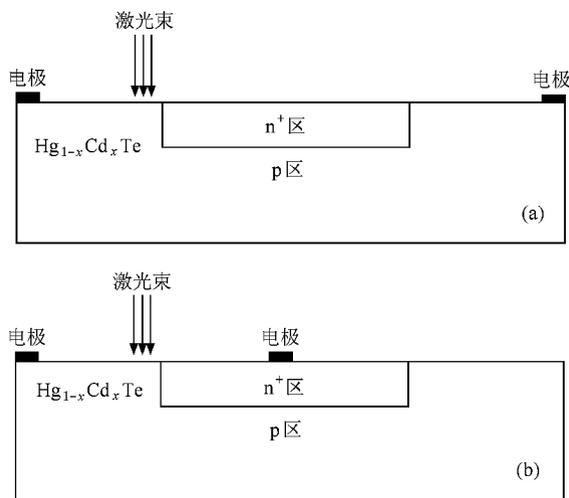


图 2 (a) HgCdTe 的 pn 结的 LBIC 示意图;(b) pn 结的扩散长度测量的标准图

为了从理论上直接考察二种提取扩散长度方法所获得的等效扩散长度  $L$  与扩散长度  $L_p$  之间的关系,我们对图 2 所示的(a),(b)两种结构进行了数值模拟,得到了不同条件下的扫描电流曲线,类似实

验上采用的典型数据处理方法,对  $p$  区内的衰减曲线作指数拟合<sup>[13]</sup>,即

$$|I_{LBIC}(d)| = ke^{-\frac{d}{L}}, \quad (5)$$

其中  $k$  为比例常数,  $d$  为光点离开结区边界的距离,两种结构中得到的  $L$  分别为等效扩散长度  $L$  和扩散长度  $L_p$ ,并对它们作了比较分析.

### 3. 计算结果及分析

#### 3.1. 载流子浓度的影响

由于器件的掺杂浓度对器件的内建电场以及器件性能会有很大影响<sup>[14]</sup>,定性地看不同的内建电场对光生载流子在空间的运动会形成明显影响,为此我们对掺杂浓度在一般工艺中能达到的范围内进行

变化,考察不同掺杂浓度对于等效扩散长度  $L$  与扩散长度  $L_p$  之间关系的影响.在本文研究中,我们重点关注掺杂浓度导致的内建电场对光生载流子的影响,所以没有进一步把载流子迁移率、复合中心浓度等随掺杂浓度变化因素考虑在内.根据我们的器件能达到的范围,电子和空穴 SRH 寿命分别设为 9 ns, 100 ns,电子和空穴的迁移率分别为 1120 cm<sup>2</sup>/Vs, 11.2 cm<sup>2</sup>/Vs.

具体计算结果如图 3 所示,  $p$  区掺杂越高,  $n$  区掺杂越低,光诱导的电流越大.这是因为:光生载流子在结区电场作用下通过 pn 结后,就成为多数载流子,  $n$  区掺杂浓度增高,增大了 pn 结区的内建势垒,阻止多数载流子的重新注入通过结区,从而使光伏信号和 LBIC 信号增强<sup>[9]</sup>.

在不同的掺杂浓度下提取的等效扩散长度如

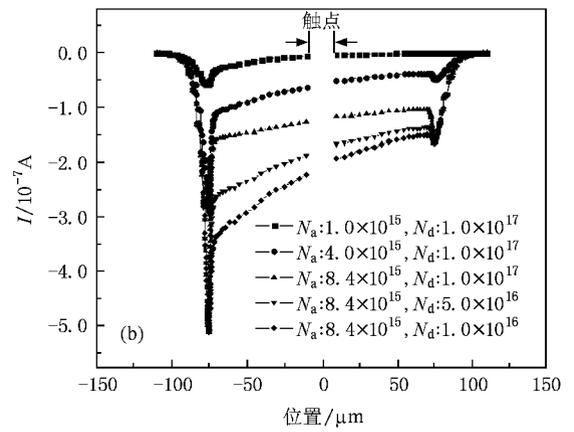
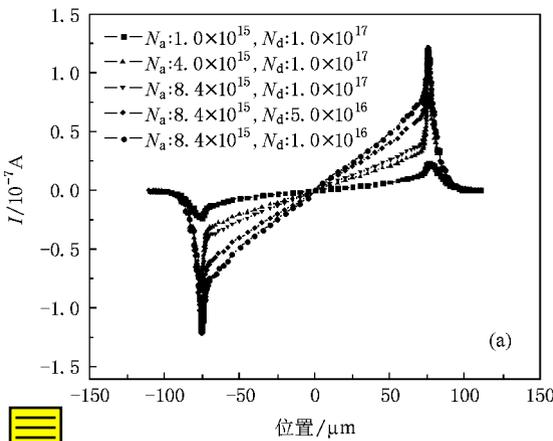


图 3 不同掺杂浓度下的光生电流图(图中掺杂浓度单位为 cm<sup>-3</sup>) (a) LBIC 测试结构 (b) 扩散长度测量的标准结构

表 1 所示,可以发现:  $N_a$  对此长度影响很明显,而  $N_d$  不明显影响此等效扩散长度.随着  $N_a$  的增大,等效扩散长度减小,扩散长度也减小,在本文研究的掺杂浓度范围内,掺杂浓度相对变化量可达 90%,然而等效扩散长度与扩散长度比值  $L/L_p$  接近于 1,且相对变化量小于 2%,所以可以认为等效扩散长

度与扩散长度之间基本相等,且该关系基本不随掺杂浓度的变化而变化.

#### 3.2. 载流子寿命的影响

由于复合寿命直接决定了载流子的扩散长度及其输运特性,并且对光响应有影响<sup>[15]</sup>,为此我们对载流子 SRH 复合寿命对于等效扩散长度和扩散长度间关系影响也作了类似掺杂浓度那样的研究.载流子寿命的取值参考了实验中能达到的范围,在此范围内取几个典型值进行研究.根据我们的器件能达到的范围,  $p$  区掺杂浓度设为  $8.4 \times 10^{15}$  cm<sup>-3</sup>,  $n$  区掺杂浓度设为  $1.0 \times 10^{17}$  cm<sup>-3</sup>,电子和空穴迁移率分别设为 1120 cm<sup>2</sup>/Vs, 11.2 cm<sup>2</sup>/Vs.

对于碲镉汞 n-on-p 光伏器件,光吸收主要发生

表 1 不同掺杂浓度下提取的电子等效扩散长度和扩散长度

$N_a/$	$N_d/$	电子等效扩散	电子扩散长度	$L/L_p$
$10^{15}$ cm <sup>-3</sup>	$10^{17}$ cm <sup>-3</sup>	长度 $L/\mu\text{m}$	$L_p/\mu\text{m}$	
1.0	1.0	8.34	7.81	1.07
4.0	1.0	6.09	5.73	1.06
8.4	1.0	5.34	4.97	1.07
8.4	5.0	5.41	5.02	1.08
8.4	1.0	5.40	5.06	1.07

在  $p$  区,  $p$  区少数载流子(电子)寿命的长短对器件非常重要,相比之下,多子(空穴)寿命对器件影响较小. HgCdTe 材料电子寿命由三种复合过程决定:辐射复合、俄歇复合和 SRH 复合,前两种复合过程属于材料的固有性质,与工艺过程无关;而 SRH 复合与工艺优劣密切相关,材料中的缺陷、位错、杂质等能级有可能形成复合中心,增大 SRH 复合,降低电子寿命.

计算结果如图 4 所示,可见载流子 SRH 复合寿命越大,激光诱导的电流越大,在 pn 结边界处更明显. 短的电子寿命表明材料中缺陷、位错、杂质等形成的复合中心密度大,复合率高,因而使激光束诱导电流降低. 高质量的 HgCdTe 材料,复合中心密度小,长的 SRH 复合寿命使光生载流子有足够的时间漂移至结区电场,进而被收集形成激光束诱导电流.

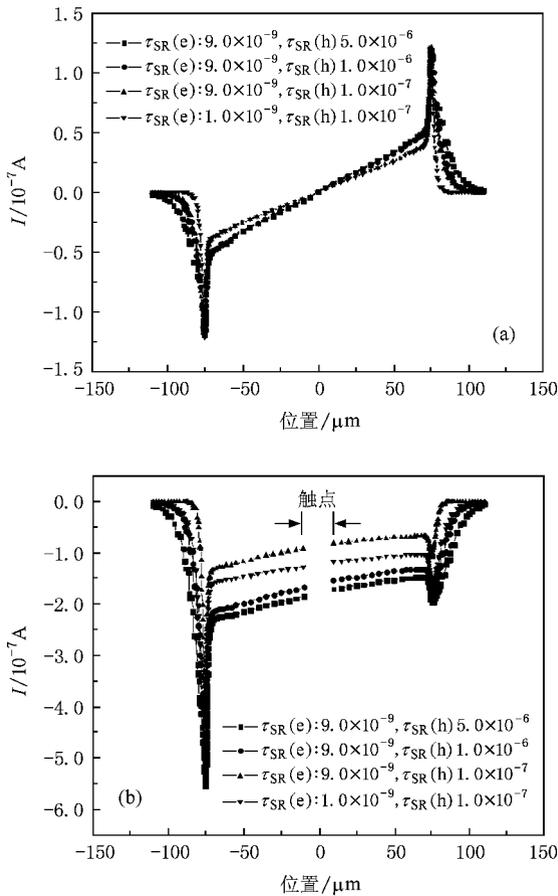


图 4 不同 SRH 复合寿命的光生电流图(图中 SRH 复合寿命单位为 s) (a) LIBC 测试结构 (b) 扩散长度测量的标准结构

在不同的载流子 SRH 复合寿命下提取的等效扩散长度如表 2 所示,可以发现:随着电子、空穴寿命的增大,等效扩散长度增大,扩散长度也增大,在

本文研究的载流子寿命变化范围内,载流子寿命相对变化量可达 98%,然而等效扩散长度与扩散长度比值  $L/L_p$  依然接近于 1,且相对变化量小于 7%,所以可以认为等效扩散长度与扩散长度之间基本相等的关系基本不随载流子寿命的变化而变化.

表 2 不同 SRH 复合寿命下提取的电子等效扩散长度和扩散长度

$\zeta_{SR}(e)/ns$	$\zeta_{SR}(h)/ns$	电子等效扩散长度 $L/\mu m$	电子扩散长度 $L_p/\mu m$	$L/L_p$
1	100	2.25	2.19	1.03
9	100	5.34	4.97	1.07
9	1000	6.17	5.82	1.06
9	5000	8.84	8.02	1.10

### 3.3. 载流子迁移率的影响

类似载流子寿命,载流子的迁移率也对载流子的扩散长度有明显影响,为了考察载流子迁移率对等效扩散长度和扩散长度间关系的影响,我们对载流子迁移率作了在实验中能达到的范围内的变化,在此范围内取了几个典型值进行研究. 根据相关文献<sup>[16]</sup>,设定电子的迁移率与空穴迁移率之比为 100. 根据我们的器件能达到的范围,  $p$  区掺杂浓度设为  $8.4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $n$  区掺杂浓度设为  $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 电子和空穴 SRH 寿命分别设为 9 ns, 100 ns.

计算结果如图 5 所示,随着迁移率增大,光诱导电流增大. 当掺杂浓度等条件相同,则是同等结区电场下,迁移率越大,漂移速度越大,则漂移引起的电流密度越大,得到的光诱导电流越强.

在不同的载流子迁移率下提取的等效扩散长度如表 3 所示,可以发现:随着电子、空穴迁移率的增大,等效扩散长度增大,扩散长度也增大,在本文研究的载流子迁移率变化范围内,载流子迁移率相对变化量可达 89%,然而等效扩散长度与扩散长度比值  $L/L_p$  依然接近于 1,且相对变化量小于 2%,所以可以认为等效扩散长度与扩散长度之间基本相等的关系基本不随载流子迁移率的变化而变化.

表 3 不同迁移率下提取的电子等效扩散长度与扩散长度

$\mu_e/\text{cm}^2/\text{Vs}$	$\mu_h/\text{cm}^2/\text{Vs}$	电子等效扩散长度 $L/\mu m$	电子扩散长度 $L_p/\mu m$	$L/L_p$
1120	11.2	5.34	4.97	1.07
5000	50	8.53	8.05	1.06
10000	100	11.11	10.59	1.05

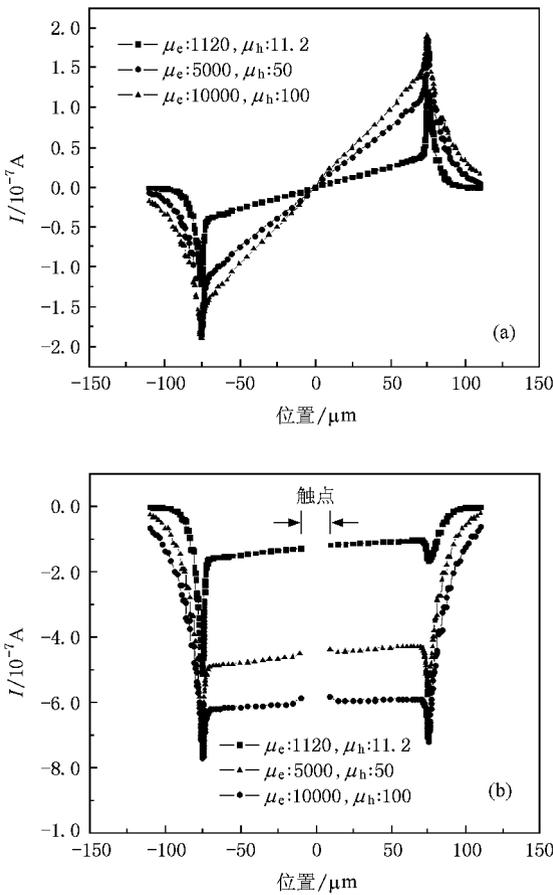


图 5 不同载流子迁移率的光生电流图 (图中迁移率单位为  $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ) (a) LBIC 测试结构 (b) 扩散长度测量的标准结构

### 4. 实际器件分析

实验所用的 LBIC 测试样品是由液相外延技术 (LPE) 生长的 p 型  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x = 0.2242$ ) 材料, 经过  $\text{B}^+$  注入, 然后在样品边缘未注入的 p 型材料的上表面, 引出两个远端的 LBIC 测试电极得到的. 在两电极之间, 是周期排列的、间距为  $150 \mu\text{m}$ 、边长为  $50 \mu\text{m}$  的正方形注入孔. 在室温下, 用聚焦后光斑直径为  $1.5 \mu\text{m}$  的 He-Ne 激光光源照射样品, 然后移动样品台使激光对注入区作直线扫描, 实时采集经过锁相放大器 (SR830 DSP lock-in amplifier) 输出的激光束诱导电流信号.

测试结果如图 6 (a) 所示, 类似于正弦曲线, 周期为  $200 \mu\text{m}$ , 正好等于样品的注入孔边长和间距之和. 波峰和波谷对应着  $\text{B}^+$  注入形成的 n 区的两个侧面 p-n 结界面, 这是因为结区边界处电场最强, 产生的信号也最强. 而在注入区中心, 两侧的横向电场方向相反, 大小相等, 净场为零, 信号为零. 在结区外一

个扩散长度  $L$  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, 响应信号呈指数规律衰减. 按照典型数据处理方法, 对 p 区内的衰减曲线作指数拟合<sup>[13]</sup>, 如图 6 (b) 所示, 得到等效扩散长度  $L = 16.8 \mu\text{m}$ . 根据表 1—3 的结果, 等效扩散长度  $L$  和扩散长度  $L_p$  的比例关系为  $L/L_p = 1.1$ , 因此该 p 型材料的电子扩散长度为  $L_p = L/1.1 = 15.3 \mu\text{m}$ . 将该结果与 Redfern 等<sup>[4]</sup>对组分为  $x = 0.22$  的样品给出的扩散长度比较, 他们的样品在温度为  $200 \text{K}$  时扩散长度约为  $20 \mu\text{m}$ , 而温度继续上升时, 扩散长度下降, 可以得知我们给出的室温下的电子扩散长度  $L_p = 15.3 \mu\text{m}$  是合理的.

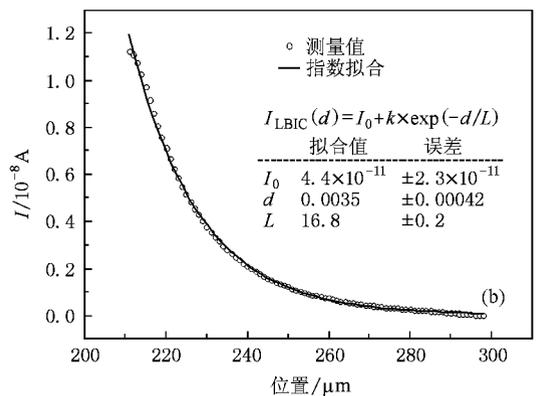
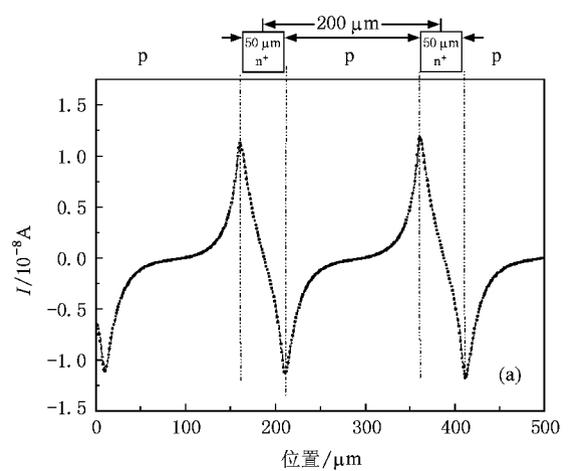


图 6 (a) 器件结构及对应的 LBIC 测试结果 (b) 结区外的信号衰减及其指数拟合

### 5. 结 论

本文通过自洽求解泊松方程和连续性方程, 对  $\text{HgCdTe}$  光伏探测器的电子扩散特性作了研究, 分析

了两种提取等效扩散长度  $L$  和扩散长度  $L_p$  的典型器件结构所形成的光生电流特性,根据指数衰减拟合,获得了电子等效扩散长度  $L$  和扩散长度  $L_p$  值,二者的比例关系为  $L/L_p = 1.1$ . 且在不同的掺杂浓度、载流子 SRH 寿命、载流子迁移率下,比例关系保持不变. 并且根据该关系给出了合理的实际 HgCdTe 光伏器件的电子扩散长度. 结果表明 LBIC 方法测试载流子扩散长度的方法确实是可行的,但需要对所

获得的等效扩散长度  $L$  进行除 1.1 因子的修正便可得到合理的 HgCdTe 光伏器件中电子扩散长度的数值. 这将使 LBIC 测试方法更合理地应用于测量 HgCdTe 红外焦平面芯片中各像元器件中光生载流子扩散长度,并进而考察器件工艺形成的扩散长度特性非均匀性等关键工艺问题.

感谢 David Yuan 博士在 Dessis 器件模拟中给予的技术支持.

- [ 1 ] Cui H Y , Li Z F , Li Y J , Liu Z L , Chen X S , Lu W , Ye Z H , Hu X N , Wang C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 238 ( in Chinese ) [ 崔昊杨、李志锋、李亚军、刘昭麟、陈效双、陆卫、叶振华、胡晓宁、王 堯 2008 物理学报 **57** 238 ]
- [ 2 ] Rogalski A 1988 *Infrared Phys.* **28** 139
- [ 3 ] Qiao H , Liao Y , Hu W D , Deng Y , Yuan Y G , Zhang Q Y , Li X Y , Gong H M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7088 ( in Chinese ) [ 乔辉、廖 毅、胡伟达、邓 屹、袁永刚、张勤耀、李向阳、龚海梅 2008 物理学报 **57** 7088 ]
- [ 4 ] Redfern D A , Thomas J A , Musca C A , Dell J M , Faraone L 2001 *J. Electron. Mater.* **30** 696
- [ 5 ] Jia J , Chen X Y , Li X Y , Gong H M 2005 *J. Infrared Millim. Waves* **24** 140 ( in Chinese ) [ 贾 嘉、陈新禹、李向阳、龚海梅 2005 红外与毫米波学报 **24** 140 ]
- [ 6 ] Musca C A , Redfern D A , Dell J M , Faraone L 2000 *Microelectron. J.* **31** 537
- [ 7 ] Musca C A , Redfern D A , Smith E P G , Dell J M , Faraone L , Bajaj J 1999 *J. Electron. Mater.* **28** 603
- [ 8 ] Ong V K S , Phang J C H , Chan D S H 1994 *Solid-State Electron.* **37** 1
- [ 9 ] Siliquini J F , Dell J M , Musca C A , Smith E P G , Faraone L , Piotrowski J 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 52
- [ 10 ] Chernyak L , Osinsky A , Temkin H , Yang J W , Chen Q , Khan M A 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 2531
- [ 11 ] Cai W Y 2003 *Doctor's dissertation* ( Shanghai Institute of Technical Physics ) 37 ( in Chinese ) [ 蔡炜颖 2003 博士论文( 上海技术物理研究所 ) 37 ]
- [ 12 ] ISE Integrated Systems Engineering 1995-2004 Dessis manual 15. 128
- [ 13 ] Ong V K S , Wu D 2001 *IEEE Trans. Electron Devices* **48** 332
- [ 14 ] Chen G B , Lu W , Cai W Y , Li Z F , Chen X Sh , Hu X N , He L , Shen X Ch 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 911 ( in Chinese ) [ 陈贵宾、陆卫、蔡炜颖、李志锋、陈效双、胡晓宁、何 力、沈学础 2004 物理学报 **53** 911 ]
- [ 15 ] Xu X Y , Ye Z H , Li Z F , Lu W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2882 ( in Chinese ) [ 徐向晏、叶振华、李志锋、陆 卫 2007 物理学报 **56** 2882 ]
- [ 16 ] Wenus J , Rutkowski J , Rogalski A 2001 *IEEE Trans. Electron Devices* **48** 1326

# Determination of electron diffusion length in HgCdTe photodiodes using laser beam induced current<sup>\*</sup>

Yin Fei<sup>†</sup> Hu Wei-Da Quan Zhi-Jue Zhang Bo Hu Xiao-Ning Li Zhi-Feng Chen Xiao-Shuang Lu Wei<sup>‡</sup>

(*National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*)

(Received 19 May 2008; revised manuscript received 13 March 2009)

## Abstract

The standard diffusion length ( $L_p$ ) test procedure is apt to damage the p-n junction, so we often use characteristic decay length ( $L$ ) obtained by laser beam induced current (LBIC) instead of  $L_p$ . Two dimensional modeling is used to get the relations of  $L$  and  $L_p$ . Calculated  $L/L_p$  ratio is about 1.1, and it is not affected by doping concentration, Shockley-Read-Hall (SRH) lifetime and mobility. For HgCdTe photodiodes, we get characteristic decay length from the LBIC experiment, and get the true diffusion length by division by the ratio 1.1.

**Keywords:** HgCdTe, laser beam induced current (LBIC), diffusion length

**PACC:** 7280E, 7340L, 2940P

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10734090, 10725418), the Applied Materials Shanghai Research & Development Fund (Grant No. 08520740600), and the Aviation Science Fund (Grant No. 20080190001).

<sup>†</sup> E-mail: yinfei@mail.sitp.ac.cn

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: luwei@mail.sitp.ac.cn