

# 用 EBIC 测量 InSb 多元探测器少子扩散长度

方晓明 汤定元 陈伯良

(中国科学院上海技术物理研究所)

**摘要**——用 DX-3A 型扫描电镜, 在 100 K 采用 EBIC 技术确定了 InSb 多元探测器 N 型基底的空穴扩散长度。实验结果与 Artz 的 EBIC 模型拟合很好。根据实验得出少子扩散长度值, 并讨论了少子扩散长度对光敏元间距的限制。

## 一、引 言

光敏元之间的串音对多元探测器的性能有很大影响。随着多元探测器集成度的提高, 光敏元间距不断缩小, 如果间距小到可与少数载流子扩散长度相比, 就必须考虑少子扩散引起的串音问题。此外, 少子扩散长度对探测器本身性能也有影响, 因此, 有必要从实验上确定多元探测器的少子扩散长度。

扫描电镜电子束感生电流(EBIC)技术是研究半导体材料和器件的有效手段, 具有空间分辨率高, 不会使样品受到结构性损伤等优点<sup>[1]</sup>。Holloway<sup>[2]</sup>在一定条件下采用 EBIC 技术求得少子扩散长度的数值解, 但由于计算量太大, 不便于直接确定少子扩散长度。Artz<sup>[3]</sup>在 Holloway 工作的基础上, 提出一种 EBIC 模型, 使少子扩散长度作为参量出现, 从而可以进行拟合计算。

我们用国产 DX-3A 型扫描电镜, 采用 Artz 的结构, 用 EBIC 技术确定了 InSb 多元探测器的少子扩散长度, 实验结果与 Artz 模型拟合得很好。

## 二、Artz 的 EBIC 模型

对于 PN 结型探测器, 其结构以及 EBIC 随电子束位置移动的变化见图 1。电子束从 P 区开始, 沿着垂直于 PN 结边缘的直线移动, 然后进入 N 区。电子束打在 P 区时, 大部分非平衡载流子被 PN 结收集, EBIC 是常数。电子束在结区 EBIC 呈峰状。电子束进入 N 区后,

EBIC 随距离的增大呈类指数衰减, 衰减程度取决于 N 区的少子扩散长度及表面复合速度。

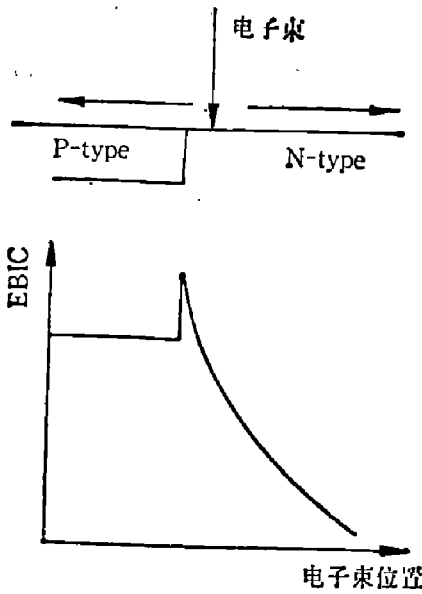


图 1 器件结构及 EBIC 信号  
Fig. 1 Configuration of PN junction and EBIC signal.

电子束在样品体内的激发区域近似为球形, 其半径随电子束能量的增大而增大。如果 PN 结比较浅, 激发区有一部分在结区, 对 EBIC 的贡献主要是由这一区域内产生的非平衡载流子提供的。在 P 区, 电子束打在各点的效果是等同的, 因而 EBIC 为一常数。电子束打在结区时, 由于有更多的激发区在结区内, 因而 EBIC 增大。电子束能量增大后, 对于 P 区, 由于激发区半径增大, 导致 EBIC 增大。对于结区, 虽然激发区部分也增大, 但其变化率小于 P 区, 因而 EBIC 峰相对减小。当电子束能量达到某一临界值时, EBIC 峰消失。

N 区部分的 EBIC 函数形式可由连续性方程及相应的边界条件解出, Holloway 得到的是数值解, Artz 用一解析表达式去拟合 Holloway 的数值解。如果把电子束激发源看作是点源, 图 1 中 EBIC 随电子束位置的变化可由下式表示<sup>[3]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} J &= J_0 + J_j F (X < X_j), \\ J &= J_0 + J_j \exp[\sqrt{a_0(S)} - \sqrt{a_0(S) + a_1(S)(X - X_j) + a_2(S)(X - X_j)^2}], (X > X_j) \end{aligned} \right\} (1)$$

其中  $a_0(S) = 0.0215 + 0.036S$ ,  $a_1(S) = 2.75 + 3.29S$ ,  $a_2(S) = 1.245 + 0.325S$ 。式(1)中同距离有关的量都以扩散长度为单位,  $J$  是 EBIC,  $X$  是电子束到结的距离,  $X_j$  是结的相对位置,  $J_j$  是电子束打在结处的 EBIC,  $F$  是 P 区的 EBIC 与  $J_j$  之比,  $J_0$  是背景 EBIC,  $S = sL/D$  是约化表面复合速度。

实际上, 电子束在样品表面的束斑有一定的大小, 并且束斑内的电子有一强度分布。因此, 式(1)应乘上一表示强度分布的权重因子, 然后对束斑范围积分。假定束斑内的强度分布是高斯分布, 表示束斑大小的特征宽度是  $W$ , 考虑强度分布后的 EBIC 为<sup>[3]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} J &= J_j F + J_0 \quad (X \leq X_j - W), \\ J &= \frac{J_j F}{N} \int_{x-\Delta}^{x_j} \exp\left[-\left(\frac{Y-X}{W}\right)^2\right] dY + \frac{J_j}{N} \int_{x_j}^{x+\Delta} \exp\left[-\left(\frac{Y-X}{W}\right)^2\right] H(Y) dY + J_0 \\ &\quad (x_j - W < X < X_j + W), \\ J &= \frac{J_j}{N} \int_{x-\Delta}^{x+\Delta} \exp\left[-\left(\frac{Y-X}{W}\right)^2\right] H(Y) dY + J_0 \quad (X \geq X_j + W), \\ H(Y) &= \exp[\sqrt{a_0(S)} - \sqrt{a_0(S) + a_1(S)(Y - X_j) + a_2(S)(Y - X_j)^2}], \\ N &= \int_{-\Delta}^{\Delta} \exp\left[-\left(\frac{X}{W}\right)^2\right] dX. \end{aligned} \right\} (2)$$

其中  $\Delta$  表征束斑强度分布延展的程度, 在实际计算中取  $\Delta = 5W$ 。  $J_0$  和  $J_j F$  可由实验确定。在 N 区内, 当电子束到结边缘的距离为几个扩散长度时, 测得的 EBIC 取为  $J_0$ , 在 P 区内测得的 EBIC 为  $J_j F$ 。  $L$ 、 $F$ 、 $W$  和  $x_j$  是拟合参量, 由式(2)与实验结果的拟合定出。

### 三、实验技术

我们的实验装置如图 2 所示。当电镜以二次电子模式工作时，可方便地观察探测器的形貌，确定 EBIC 线扫的位置。电子束感生电压 (EBIV) 模式是以样品两端开路时的电子束感生电压调制 SEM/CRT 的亮度，形成一幅 EBIV 像，可直观地显示样品中存在的势垒区，对于红外探测器，则可显示光敏面。低温样品台附加在 DX-3A 型电镜上，用液氮制冷，工作温度为 100 K，恒温时间能满足实验要求。电动势放大器带宽为 100 kHz，放大倍数为 100、300、1000 三挡，每挡连续可调，输入阻抗约 1 MΩ。实验所用加速电压为 15~30 kV，样品电流为 10~30 nA。样品为 10 元线阵 InSb 探测器。

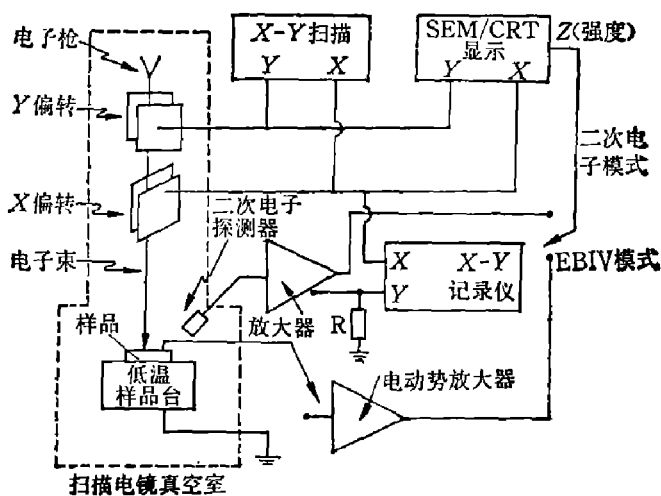


图 2 实验装置简图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental arrangement.

实验时一般是测量样品的短路电流作为 EBIC 信号，在样品两端并接一小阻值电阻  $R$ ， $R$  甚小于样品的结阻抗。实际是测量  $R$  两端的电压，并输入到 X-Y 记录仪的 Y 轴，记录仪的 X 轴接扫描电镜的 X-Y 扫描发生器的 X 端。测量时探测器的位置不动，电子束在偏转系统作用下沿 X 轴方向移动。

### 四、结果和讨论

图 3 和图 4 分别是 5# 和 7# 光敏元的 EBIC 实验曲线，其变化形式与 Artz 的理论曲线一致。由图 3 和图 4 可知，随着入射电子束能量的增大，P 区的 EBIC 也相应增大，结区

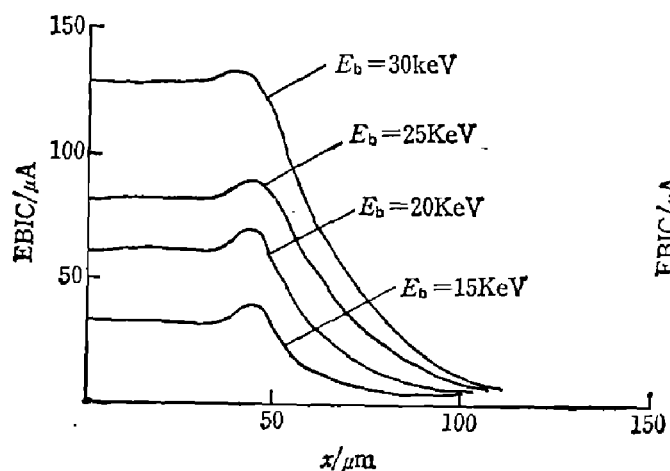


图 3 5# 光敏元的 EBIC 实验曲线  
Fig. 3 Experimental curves of EBIC for 5# detector.

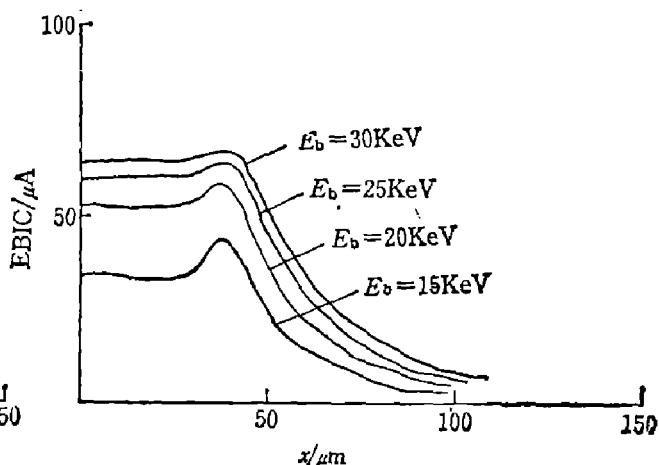


图 4 7# 光敏元的 EBIC 实验曲线  
Fig. 4 Experimental curves of EBIC for 7# detector.

表 1 5\* 光敏元的拟合结果

Table 1 The fitting results of the 5\* detector.

$E_b(\text{keV})$	$L(\mu\text{m})$	$W(\mu\text{m})$	$F$	$x_j(\mu\text{m})$	$S$
15	31.8	2.2	0.68	15.2	0.0
20	35.0	2.2	0.72	13.7	0.0
25	37.0	2.2	0.77	18.4	0.0
30	38.1	2.9	0.91	21.1	0.0
15	38.1	2.2	0.68	15.2	0.286
20	38.1	2.2	0.72	15.2	0.130

表 2 7\* 光敏元的拟合结果

Table 2 The fitting results of the 7\* detector.

$E_b(\text{keV})$	$L(\mu\text{m})$	$W(\mu\text{m})$	$F$	$x_j(\mu\text{m})$	$S$
15	18.6	2.5	0.49	21.8	0.0
20	20.9	4.7	0.58	9.3	0.0
25	25.2	3.7	0.68	9.4	0.0
30	30.4	5.8	0.80	7.1	0.0
15	30.4	2.5	0.49	21.8	0.935
20	30.4	4.7	0.58	9.3	0.684
25	30.4	3.7	0.68	9.4	0.297

EBIC 峰的幅度相对减小, 随着电子束能量的进一步增大, EBIC 峰有消失的趋势。图 5 是 EBIC 理论曲线与实验曲线的拟合结果, 电子束能量为 20 keV。表 1 和表 2 分别是 5\* 和 7\* 光敏元的拟合计算结果。 $x_j$  是结的位置, 表 1 和表 2 中各组  $x_j$  值不一致是由于每次线扫的起始点不同所致, 对结果无影响。

一般地说, EBIC 模型应含有扩散长度  $L$ 、表面复合速度  $S$  和表征激发源深度分布的特征量  $H$ 。 $L$  和  $S$  取决于材料的特性和表面状态, 与电子束能量无关, 加大电子束能量仅使  $H$  增大。在 Artz 的 EBIC 模型中没有包括  $H$ , 因此  $H$  随电子束能量的变化表现为  $L$  和  $S$  的变化,  $L$  和  $S$  成为有效扩散长度和有效表面复合速度。随着电子束能量的增大, 激发源中心离开表面的距离增大, 表面复合的影响减小, 有效扩散长度增大或者有效表面复合速度减小。因此, 电子束能量越大, 实验得出的有效扩散长度越接近实际扩散长度, 而有效表面复合速度趋于零。

由于增大  $S$  与减小  $L$  导致 EBIC 相同的变化, 因此  $S$  不能作为独立的拟合参量。表 1 和表 2 的第一批结果是取  $S=0$  拟合得到的。由于实验设备的限制, 电子束能量只能达到 30 keV。取对应 30 keV 的  $L$  值为实际扩散长度的近似值, 然后调节参数  $S$ , 拟合各组曲线, 以给出相同的  $L$ , 这就是表 1 和表 2 下半部给出的第二批结果。 $S$  随电子束能量的变化实际上反映了激发源深度的变化, 有效表面复合速度小于实际的表面复合速度, 并且随电子束能量的减小而增大, 直至与实际表面复合速度相等。

由于存在少子扩散, 光敏元的间隔至少应大于少子扩散长度。如果光敏元的间距大于两倍扩散长度, 那么, 从 EBIV 图像可看出隔离区的衬度较小; 如果间距小于两倍扩散长度, 衬度就较大, 容易引起串音。

实验样品的光敏元间距为 75~80  $\mu\text{m}$ , 5\* 光敏元的少子扩散长度为 38.1  $\mu\text{m}$ 。5\* 光敏

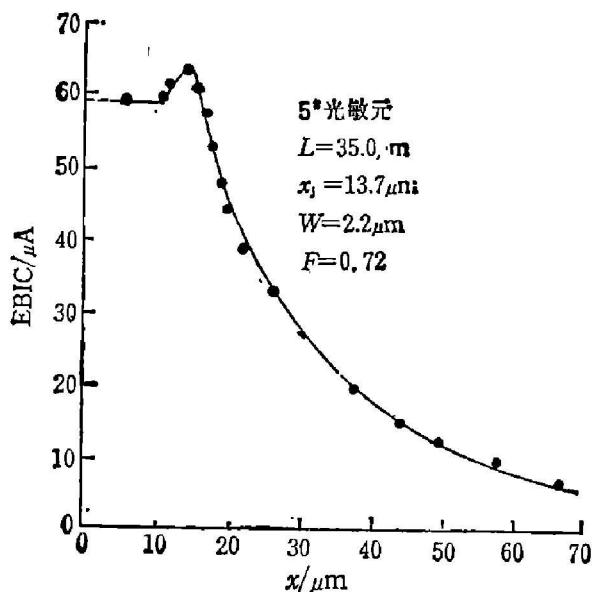


图5 理论曲线和实验点的拟合  
Fig. 5 Fit of calculated curve to observed data.

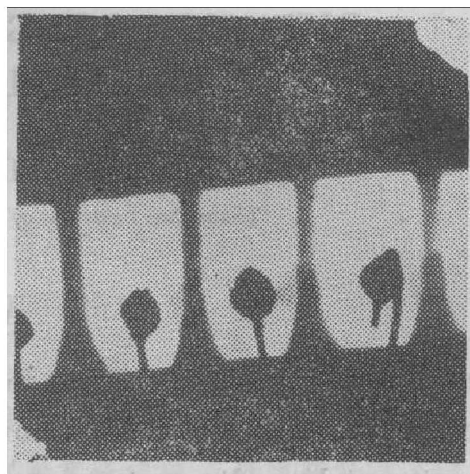


图6 InSb多元探测器的EBIV图像  
Fig. 6 EBIV image of InSb multi-element arrays.

元同相邻光敏元的间距已小于两倍扩散长度，因而隔离是不完善的，与实验观察结果相符<sup>[5]</sup>，参见图6。图6是探测器的EBIV图象，右边第一个探测器是5\*光敏元。在理想情况下，只在光敏面上有EBIV信号，隔离区基本上不应存在EBIV衬度。对于图5中的5\*光敏元，由于少子扩散长度比较大，电子束打在隔离区中部也有EBIV信号产生。

## 五、结 论

从实验上用EBIC技术确定了InSb多元探测器的少数载流子扩散长度，为研究由少子扩散引起的串音问题及研制多元探测器提供了定量依据。实验结果可以用Artz模型很好地拟合，这表明对于确定多元探测器的少子扩散长度，可用Artz模型比较好地作拟合计算。为改进Artz的模型，使之包括表征激光源深度的特征量，尚需进一步工作。该方法具有非破坏性，同样适合于确定其它种类材料的多元探测器的少子扩散长度，例如HgCdTe多元探测器。

## 参 考 文 献

- [1] Leamy H. J., *J. Appl. Phys.*, **53**(6)(1982), R51.
- [2] Holloway H., *J. Appl. Phys.*, **55**(1984), 3669.
- [3] Artz B. E., *J. Appl. Phys.*, **57**(8)(1985), 2886.
- [4] Gatos C., *IEEE Trans on Electron Devices*, **ED-24**(1977), 1367.
- [5] 陈伯良等, *应用科学学报*, **2**(1984), 260.

# DETERMINATION OF MINORITY CARRIER DIFFUSION LENGTH BY EBIC FOR InSb MULTI-ELEMENT ARRAYS

FANG XIAOMING, TANG DINYUAN, CHEN BOLIANG

*(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)*

## ABSTRACT

Electron beam induced current technique is used to determine the hole diffusion length of N-type substrate at 100K for InSb multi-element arrays with DX-3A SEM. The experimental results are in good agreement with Artz's EBIC model. The relationship between the minority carrier diffusion length and the distance of neighboring sensor elements is discussed based on the experimental results.