

利用 FFT 图象检测和分析 砷化镓材料中的缺陷*

张福贵

(中国科学院电子学研究所, 北京)

摘要 砷化镓材料中缺陷的不均匀分布严重地限制了集成电路生产的重复性。本文首次提出一种利用傅里叶变换频谱图象检测和分析沿 $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 010 \rangle$ 方向上位错缺陷的统计分布的方法,称为 FTIT 检验法。文中定义的相参系数 α 和纹理复杂系数 β 是定量地检验制造集成电路材料中缺陷的重要指标。

关键词 红外图象;砷化镓; FTIT

1. 引言

制造半绝缘砷化镓材料基本上有两种方法,即:Brigeman (HB)法和 Czochralski (LEC)法。用前一种方法时,位错缺陷小于 100 cm^{-2} ,但化学杂质较多,因此,不得不引入一定比例的铬元素来保证电特性。用后一种方法时,位错比率稍大于 10^4 cm^{-2} ,但化学纯度较高。对于位错比率大,已有人用加入铟元素的办法来减低位错密度^[1]。

尽管近几年大大发展了晶体生长技术,但是砷化镓基片中的缺陷仍严重地限制着把它用于大批量制造集成电路。因此,估计缺陷的分布成为一个迫切需要解决的问题^[2],现已有几种方法来获得缺陷的图象^[3]。

在不掺杂情况下,利用 LEC 生长技术制造的半绝缘砷化镓材料中,沿 $\langle 001 \rangle$ 方向呈“网状”组织。但是,这些“网状”组织在无位错的材料中,如在掺铟的 LEC 晶体中是没有的。由于生长参数的不同,“网状”组织在尺寸和纹理上也完全不同。因而没有一种完整、统一的方法能描述全部缺陷的分布。材料的缺陷图象具有丰富的信息,根据某些准则是可以得到有价值的信息的。本文的目的就是根据红外图象显示的“网状”组织,利用我们提出的 FTIT (Fourier Transformation Image Testing) 方法估计组织形态的统计特性。

2. 缺陷图象的傅里叶变换算法:

设离散图象 $\{x(m, n)\}$, $0 \leq m, n \leq N-1$ 的傅里叶变换可表示为:

$$X(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} x(m, n) W_N^{(mu+nv)} \quad (1)$$

式中 $W_N = \exp(-2i\pi/N)$, 它的傅里叶反变换表示为:

* 1986年12月19日收到,1988年2月22日修改定稿。

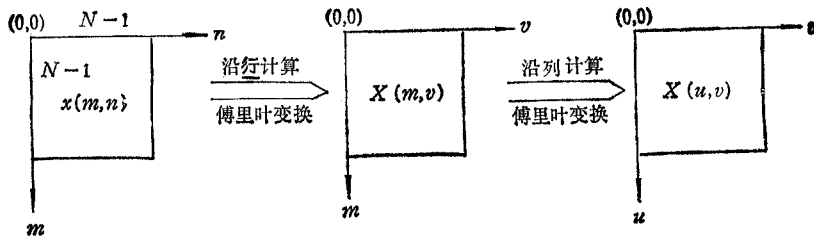


图 1 傅里叶变换过程图示

$$x(m, n) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} X(u, v) W_N^{-j(mu+nv)} \quad (2)$$

将(1)式改写为:

$$\begin{aligned} X(u, v) &= \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} x(m, n) W_N^{j(mu+nv)} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} W_N^{mu} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(m, n) W_N^{nv} \end{aligned}$$

设

$$X(m, v) = \frac{1}{N} \left[N \sum_{n=0}^{N-1} x(m, n) W_N^{nv} \right]$$

则有

$$X(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X(m, v) W_N^{mu} \quad (3)$$

由(3)式我们可得出如下结论:

计算二维傅里叶变换分两步: 首先沿图象阵列的行方向(或列方向)计算函数 $x(m, n)$ 的一维傅里叶变换 $X(m, v)$, 然后沿列(或行)方向再计算一遍得到 $X(u, v)$. 上述计算过程如图 1 所示.

实现傅里叶变换程序时,我们采用的是先调换计算象素点的次序,然后再利用 FFT 的“蝶”形图计算^[4]. 为了得到最终的自然计算次序,首先需要对输入数值序列进行重新定序. 顺序的交换是利用两个指数 i 和 j , i 表示自然计算次序, j 表示调换次序的数目. 当 $i = j$ 时,不需要交换次序;当 $i \neq j$ 时,应该交换 $x(i)$ 与 $x(j)$, 但是它们应该只交换一次. 因此,只要在 $j > i$ 时作交换,就可保证这一点. 关于详细算法程序见参考文献 [5].

3. “网状”组织形态统计特性的估计

在缺陷图象中,某些区域的缺陷很多(如 C, SST, CST, D, SH 缺陷等),而其它一些区域几乎是均匀的(如 EDZ 缺陷). 借助于统计图象数据,我们利用傅里叶变换图象来描述不同区域的缺陷. 图 2 给出了一幅窗口为 512×512 象素, 8 bit 灰度的图象. 它是厚度为 4 mm、不掺杂的 LEC 生长技术制造的样品、沿 $\langle 001 \rangle$ 方向的红外传输图象. 水平和垂直两条线相交于样品中心点. “网状”组织是由中心为亮区, 边界为黑色的“围墙”(Wall)所组成. 直接估计它们的形状特性是不容易的,所以,我们利用上节中的傅里叶变

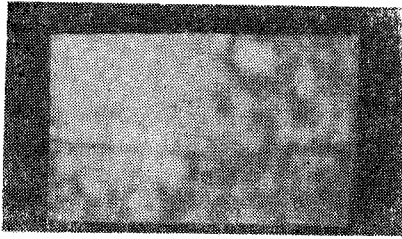
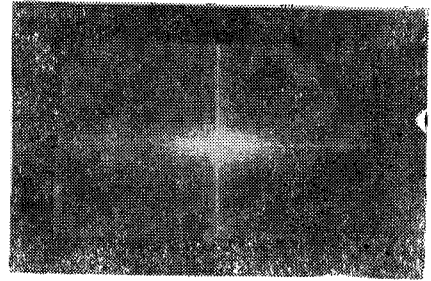


图2 砷化镓材料的红外传输图象

图3 快速傅里叶变换频谱图象
截止频率 $f_u = 37$ 像素, $f_v = 10$ 像素

换算法,对图2作二维FFT变换,得到图3的空间频率缺陷图象。

由图3知,傅里叶变换图象基本上是一个椭圆形状的图象,它的长轴和短轴分别为沿 u 和 v 轴的低频截止频率。在这个低频椭圆区域中,包含了大量结构细节的信息。图中的竖线条表示“网状”组织沿空间 x 方向比沿 y 方向更均匀。基波以及直到第五次谐波分量可以从图中观察到。

这意味着:在空间 x 方向上图象的纹理结构较为复杂,而在 y 方向上较均匀。在这种情况下,结构图象的相参指数可从椭圆的两个半径的比值算得,即:

$$\alpha = b/a \approx 0.25$$

由此可知,该图象为结构相参图象^[6]。相类似,椭圆面积也与图象中的信息有联系:面积越大,图象中纹理的高频分量就越大,因而图象就越分散(或越复杂);相反,椭圆的面积越小,低频分量就越大,因而空间图象就越均匀。这个频率区域的面积 S 与样品的面积 s 之比:

$$\beta = S/s$$

定义为图象的纹理复杂系数。这两个系数 α 和 β 反应了“网状”组织的结构形式。对于本样品,我们求得 $\beta = 0.075$ 。为了对其均匀程度进行量度,我们求得均匀图象的 $\beta = 0.001$ 。由此可知,此样品存在很多缺陷,正象我们从图2中所观察到的那样。

与位错计数法^[7], x 射线拓扑分析法^[8],光电测量法^[9]相比,本方法的优点是:对于制造 IC 用的 GaAs 材料进行检测时,不需要事先作任何破坏性的处理,如切片,抛光等等。因此它是一种快速的,非破坏性的集成电路材料缺陷的定量的检验方法,可广泛用于集成电路材料的批量检验和质量控制。

4. 结论

从满足集成电路制造控制的需要出发,本文提出了 FTIT 方法。利用文中定义的相参系数 α 和纹理复杂系数 β ,可定量地估计材料中的缺陷分布特性。同时,我们还证明了“网状”组织不是随机地分布,而是沿着晶格方向 $\langle 010 \rangle$ 和 $\langle 110 \rangle$ 统计相参,二维傅里叶变换的缺陷椭圆形状是结构相参图象。

参 考 文 献

- [1] J. P. Fillard, Comptes Rendus de la Conférence, Karinzawl, France, July, 1984.
- [2] V. Milutinovic, Computer 19, 10(1986), 235—240.
- [3] J. Bonnafé, et al., DRIP Symposium, ed. by J. P. Fillard, Materials Sciences Monographs, n°31, Else-

vier, 1985, pp. 35—39.

- [4] M. Kunt, *Traitement Numérique des Signaux*, Dunod, 1981, pp. 101—110.
- [5] Zhang Fugui, *Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc Montpellier, France*, 1986, pp. 98—110.
- [6] C. G. Lendaris, G. L. Stanley, *Proc. IEEE*, 2(1970), 50—58.
- [7] J. Logowski, et al., *Semi-insulating III-V Materials*, Conf. Kah. nee ta, 1984, U. S. A., pp. 200—205.
- [8] M. P. Scott, *DRIP Materials Science Monographs*, n°31 Elsevier, ed. by J. P. Fillard, 1985, pp. 155—157.
- [9] M. Bonnet, et al., *DRIP Materials Science Monographs*, n°31 Elsevier, ed by J. P. Fillard, 1985, pp. 44—49.

FFT IMAGE APPLICATION TO DETECTION AND ANALYSIS OF THE DEFECTS IN GaAs MATERIALS

Zhang Fugui

(Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing)

ABSTRACT The presence of inhomogeneous distribution of defects in GaAs wafers strongly limits the reproducibility of IC fabrication processes. In this paper, we report for the first time a Fourier transformation image testing approach, called FTIT, for the two dimensional evaluation of the disorder in a wafer, as it appears in infrared transmission images. The Fourier analysis of the cell structure reveals a dominant statistical rectangular organization of the dislocations along $\langle 110 \rangle$ and $\langle 010 \rangle$ directions. The α and β defined in the paper are typical organization of the cells to evaluate quantitatively the properties of IC materials.

KEY WORDS Infra-red image; GaAs material; FFT