

直接标繪外延层杂质分布的方法

物理系半导体物理实验室

半导体材料中的杂质浓度分布,是半导体器件制造中必须知道的一个重要参数。对外延材料的最佳选用来说,也是不可缺少的。

测量半导体杂质浓度,一般使用电容—电压法。但此法测量速度慢,分辨率和准确度较差。近年提出了一种新的方法——二次谐波法〔1,2,3〕。这种方法具有如下优点:简单、快速、分辨率高(只受德拜长度的限制)、且能直接得出结果。

本文除了简单介绍谐波法原理外,着重介绍坐标轴标度的确定,从而定量地给出浓度随深度的变化关系。实验举出了砷化镓外延和硅外延两种试样的杂质浓度分布的测量结果,并与用C—V方法测量的结果进行比较,两者是一致的。

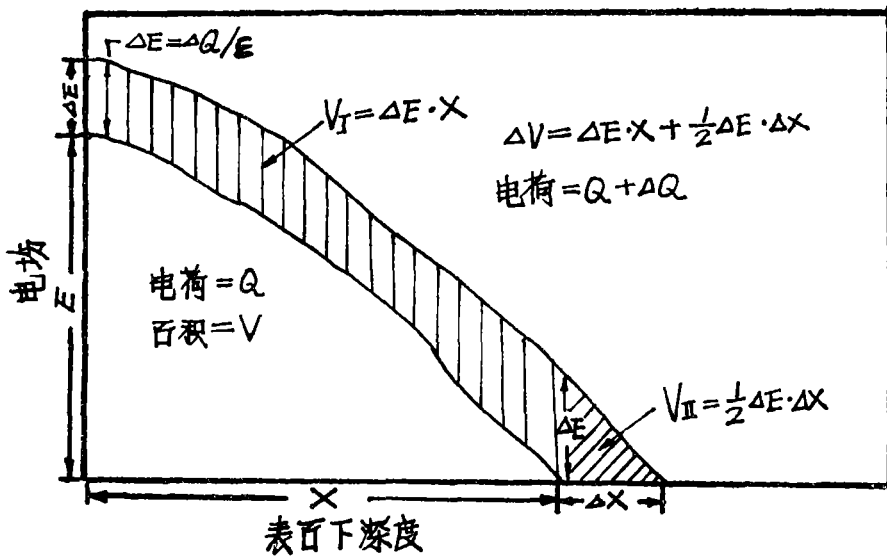
一、基本原理

在半导体薄片上,做一个面积为A的萧脱基二极管(金属—半导体接触),并假定薄片的杂质浓度在横向上的分布是均匀的。如果用一个恒定射频小电流($f = 5MC, I = 100\mu A$)讯号来驱动一个加上了直流偏压的上述萧脱基二极管,便产生一个交流电压降 ΔV ,这电压降包含了一次谐波和二次谐波电压。一次谐波电压 V_I 是由加上交变偏压后,二极管势垒电容本身产生的电压降,二次谐波电压 V_{II} 是由加上交变偏压后,势垒电容产生 ΔC 变化所引起的电压降。因此两种谐波电压均依赖于被测二极管的C—V关系曲线。下面我们利用图一很方便地推导出:一次谐波电压正比于耗尽区的宽度;二次谐波电压反比于杂质浓度。

(一)假定在一萧脱基二极管上,加上一直流偏压后,再迭加一交变驱动小信号,则在二极管耗尽区中,单位面积的电荷增加一个小的增量 ΔQ ,引起电压改变一个增量 ΔV

$$\Delta V = \Delta E \cdot x + \frac{1}{2} \Delta E \cdot \Delta x = \frac{\Delta Q \cdot x}{\epsilon} + \frac{1}{2} \frac{\Delta Q}{\epsilon} \cdot \Delta x \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中第一项是由加上交变偏压后,耗尽区中电荷的变化引起电场的变化,第二项是由电场的变化,引起耗尽区的变化,再一次引起电荷的变化。



图一 半导体薄片表面下的电场和深度的关系

(二)若 ΔQ 变化足够小(只要驱动信号足够小, ΔQ 就一定足够小),则在 $X(Q)$ 和 $X(Q + \Delta Q)$ 之间就可以认为 $N(x) = N(X)$, 于是

$$\Delta Q = q \int_{X(Q)}^{X(Q + \Delta Q)} N(x) dx = qN(X) [X(Q + \Delta Q) - X(Q)] = qN(x) \cdot \Delta x \dots (2)$$

将(2)式代入(1)式得:

$$\Delta V = \frac{\Delta Q \cdot x}{\epsilon} + \frac{\Delta Q^2}{2q\epsilon N(x)} \dots (3)$$

(三)假定 ΔQ 是由一交变驱动小电流 $I \sin(\omega t)$ 所引起的电荷增量, 则有

$$\Delta Q = \frac{\int I \sin(\omega t) dt}{A} = \frac{-I \cos(\omega t)}{A\omega} \dots (4)$$

将(4)式代入(3)式得。

$$\Delta V = \frac{-I \cos(\omega t)}{\omega \epsilon A} \cdot x + \frac{I^2 \cos(2\omega t)}{4\omega^2 q \epsilon A^2} \cdot \frac{1}{N(x)} + \frac{I^2}{4\omega^2 q \epsilon A^2} \cdot \frac{1}{N(x)} \dots (5)$$

(5)式中第三项是直流项与直流偏压相比可以略掉, 所以(5)式又可以改写为

$$\Delta V = \frac{-I \cos(\omega t)}{A\omega \epsilon} \cdot x + \frac{I^2 \cos(2\omega t)}{4\omega^2 q \epsilon A^2} \cdot \frac{1}{N(x)} \dots (6)$$

式中第一项为一次谐波电压 V_I ，它正比于耗尽区宽度；第二项为二次谐波电压 V_{II} ，它反比于杂质浓度。其中 ϵ 为半导体介电常数； q 为电子电荷； A 为二极管面积， ω 为园频率。

若令

$$K_1 = \frac{-I \cos(\omega t)}{\omega \epsilon A}, \quad K_2 = \frac{I^2 \cos(2\omega t)}{4\omega^2 q \epsilon A^2}$$

则(6)式可简化为

$$4V = V_I + V_{II} = K_1 X + K_2 \frac{1}{N(x)} \dots\dots\dots(7)$$

用 X 轴表示 V_I ， Y 轴表示 V_{II} ，我们就可以用 $X - Y$ 记录仪绘出 $x \sim \frac{1}{N(x)}$ 的关系图。但要获得实际值，还需要知道在零偏压时，二极管的耗尽区宽度 x_0 和与之对应的杂质浓度 $N(x_0)$ 以及坐标轴的标度。

二、起始值和坐标轴标度的确定

我们要知道起始值，首先要知道零偏压下的 x_0 和 $N(x_0)$

(一)零偏压时， x_0 和 $N(x_0)$ 的确定

我们把“0”伏和“0.1”伏时的势垒电容取平均值作为在零偏时的势垒电容值，即 $c = \frac{c_0 + c_{0.1}}{2}$ 。 c_0 和 $c_{0.1}$ 是用电容——电压法测量。利用(8)式和(9)式可以得出在零偏压时的杂质浓度 $N(x_0)$ 和耗尽区深度 x_0

$$N(x_0) = \frac{c^3}{q \epsilon A^2} \left(\frac{dc}{dV} \right)^{-1} = \frac{1}{8q \epsilon A^2} \cdot \frac{(c_0 + c_{0.1})^3}{c_0 - c_{0.1}} \cdot |V_0 - V_{0.1}| \dots\dots (8)$$

和

$$x_0 = \frac{\epsilon A}{c} = \frac{2 \epsilon A}{c_0 + c_{0.1}} \dots\dots\dots(9)$$

(二)坐标轴标度的确定

1. X 轴标度的确定

由(7)式可知，一次谐波电压为 $V_I = K_1 x$ 。但在实际测量中，往往引入一些杂散电容和引线分布电容 C_s ，它与被测二极管电容相并联，如图二所示。它不随偏压变化，然而由于它的存在，对驱动信号起着分流作用，因此将会影响二极管的测量。但是，如果我们把二极管的面积作得比较大（例如对 $N = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ，直径为1.3mm；对 $N = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ，直径为1mm），而把测量线路的杂散电容和引线分布电容作得尽量小（如几个Pf），使 $c \gg c_s$ ，这样就可以尽量减小 c_s 的影响。

若将 C_s 的影响归结为一常数项的影响，则(7)式的一次谐波电压可以改写为

$$V_I = (K_1' - K_s)x \quad \dots\dots\dots (10)$$

设 X 轴放大器的放大系数为 G_1 ，则一次谐波的输出电压应为

$$V_1 = G_1 V_I = G(K_1' - K_s)x \quad \dots\dots\dots (11)$$

现在的关键是求出常数项 $G_1(K_1' - K_s)$ 。这可以利用 (一) 的方法，求出 X_0 ，再利用 X - Y 记录仪测出在零伏时，迭加一驱动信号所产生的一次谐波电压 V_{10} (经放大后)，则

$$G_1(K_1' - K_s) = \frac{V_{10}}{x_0} \quad \dots\dots\dots (12)$$

将上式代入(11)式得

$$X = V_1 \frac{x_0}{V_{10}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

利用(13)式就很容易地定出 X 轴上的标度。

例如，我们用 C-V 方法测得二极管在“0”和“0.1”伏的电容，通过(9)式计得 $x_0 = 1$ 微米。用 X - Y 记录仪测得零伏时的一次谐波电压 $V_{10} = 10mV$ 。则在 X 轴上，每输出 $1mV$ 就表示 0.1 微米。如果加上 $20V$ 的直流偏压后，X 轴上的输出为 $50mV$ ，就表示深度 $x = 5$ 微米。

2. Y 轴标度的确定

由(7)式知，二次谐波电压为 $V_2 = K_2 \frac{1}{N(x)}$ 。

设 Y 轴放大器 (二次谐波放大器) 的放大倍数为 G_2 ，则二次谐波放大器的输出电压为

$$V_2 = G_2 K_2 \frac{1}{N(x)} \quad \dots\dots\dots (14)$$

利用 C-V 方法，通过(8)式计出零伏时的杂质浓度 $N(x_0)$ ，再利用 X - Y 记录仪测出“0”伏时，迭加一驱动讯号所产生的二次谐波电压 (经放大后) V_{20} ，则

$$G_2 K_2 = V_{20} N(x_0) \quad \dots\dots\dots (15)$$

将上式代入(14)式，则得

$$\frac{1}{N(x)} = V_2 \frac{1}{V_{20} N(x_0)} \quad \dots\dots\dots (16)$$

利用(16)式就能很方便地定出 Y 轴上的标度。

例如，在零偏下，通过(8)式计得 $N(x_0) = 10^{15}/cm^3$ ，通过 X - Y 记录仪测得二次谐波电压 (经放大后) 为 $V_{20} = 10mV$ ，则在 Y 轴上每输出 $1mV$ ，就表示杂质浓度的倒数为 $10^{-16}cm^3$ 。若加上 $20V$ 直流偏压后二次谐波的输出电压为 $20mV$ ，则 $\frac{1}{N(x)}$

$$= \frac{1}{5 \times 10^{14}} \text{cm}^3, \text{即杂质浓度为 } N(x) = 5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}.$$

三、测量电路

为了使绘制出的 $x \sim \frac{1}{N(x)}$ 的关系曲线能满足(6)式, 测量电路必须满足以下要求:

1. 为了保证在测量过程中, 驱动信号的电流恒定不变, 被测二极管两端所接的输入阻抗必须要远大于二极管本身的最大阻抗, 而且二极管的最小电容要远大于线路的杂散电容和引线分布电容。
2. 为了保证在测量过程中, 输出的谐波电压不会有明显的压降, 输出电流必须很小, 也就是说, 输出阻抗必须远大于二极管本身的阻抗。
3. 为了避免伪二次谐波的出现, 电路中不能有非线性元件。并且电路要很好地屏蔽。
4. 施加的可调直流偏压, 必须能使耗尽区扩展到晶片里面, 其大小由雪崩击穿所限制, 表 I 示出了不同掺杂浓度的硅的近似最大深度和最大直流偏压。

表 I 均匀掺杂的硅的近似极限值

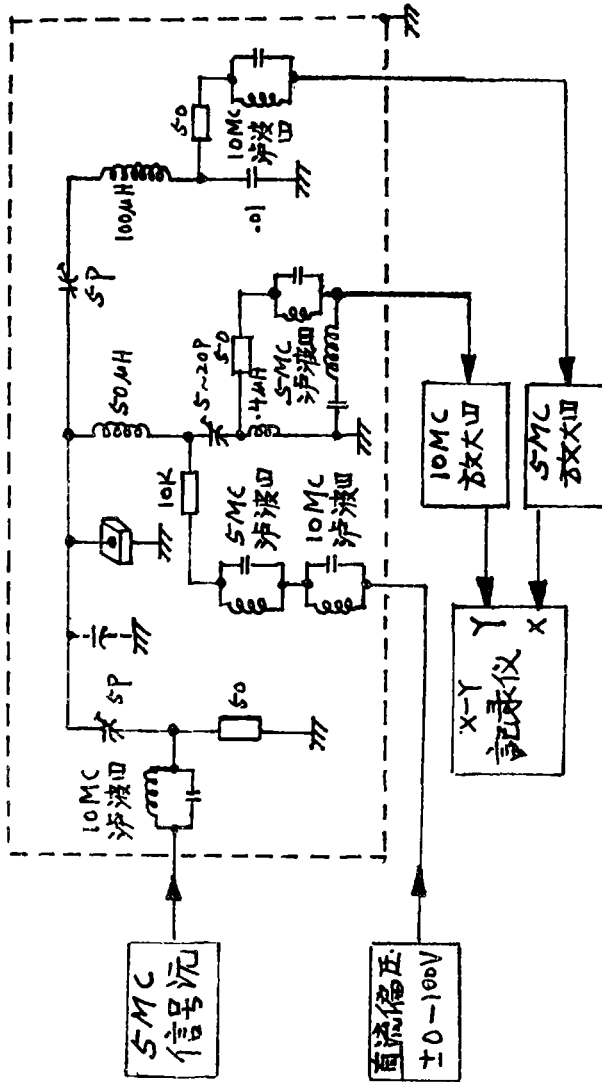
掺杂浓度 (cm^{-3})	最大深度 (微米)	最大直流电压 (伏)	深度分辨率 (德拜长度) (微米)	在最大深度处保持 $C > 2Pf$ 的最小二 极管直径(微米)
10^{14}	80	500	0.50	1400
10^{15}	12	100	0.15	510
10^{16}	2	20	0.05	250
10^{17}	0.3	4	0.015	80

5. 驱动信号电流和频率的大小必须满足:

$$\frac{KT}{q}c > \frac{I}{W} > (4qEA^2N|V_{\text{limit}}|)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (17)$$

式中 $\frac{KT}{q}$ 为热电压。

为了避免由于二极管本身热激发产生二次谐波信号, 因此驱动信号必须小于 $\frac{KT}{q}$, 即 $\frac{I}{\omega} < \frac{KT}{q}c$



图二 谐波法测量原理图

另一方面，为了便于放大二次谐波电压讯号，二次谐波电压的最小值应大于仪器灵敏度，即 $V_{Emin} > V_i$ (V_i 为仪器灵敏度)。

频率则主要由驱动信号电流的大小及电路的Q值决定。

例如，对一硅片浓度 $N = 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ，做成一肖脱基二极管，其势垒电容为 $c = 50 \text{pf}$ ，面积 $A = 0.0127 \text{cm}^2$ ，仪器的灵敏度为5微伏，则为了便于放大二次谐波最小电压必须大于5微伏，设 $V_{Emin} = 10$ 微伏则由(17)式算出 $\frac{I}{\omega}$ 在 $9 \times 10^{-13} \text{A/Hz}$ 和 $1.3 \times 10^{-12} \text{A/Hz}$ 之间。

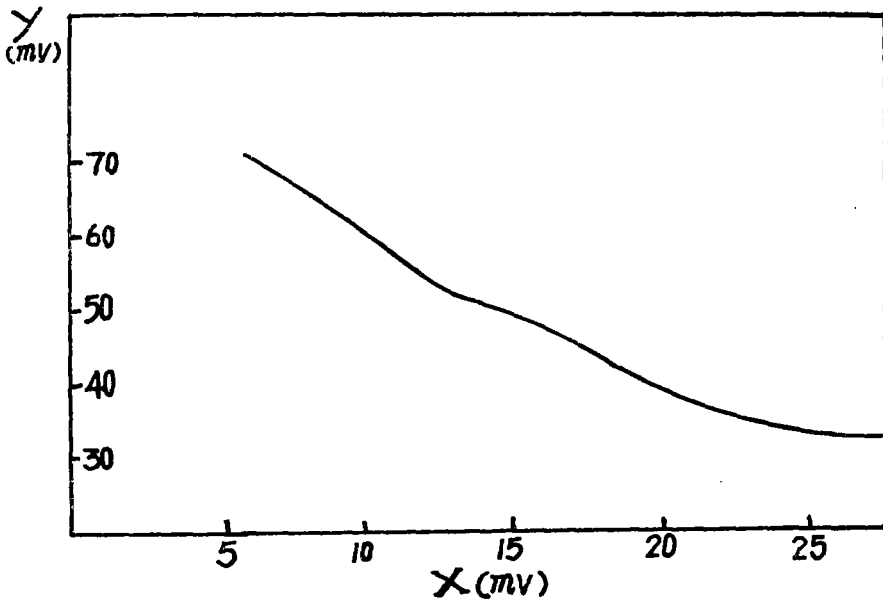
若选用驱动信号频率 $f = 5Mc$ ，则驱动电流在 $28 \sim 40 \mu A$ 之间（有效值）或 $78 \sim 112 \mu A$ 之间（峰—峰值）。

基于上述的考虑，本文实验采用图二所示的测量线路，驱动信号的频率选用 $f = 5Mc$ ，驱动讯号的电流选用 $I = 100 \mu A$ （峰—峰值），能相当满意地满足（6）式的要求。

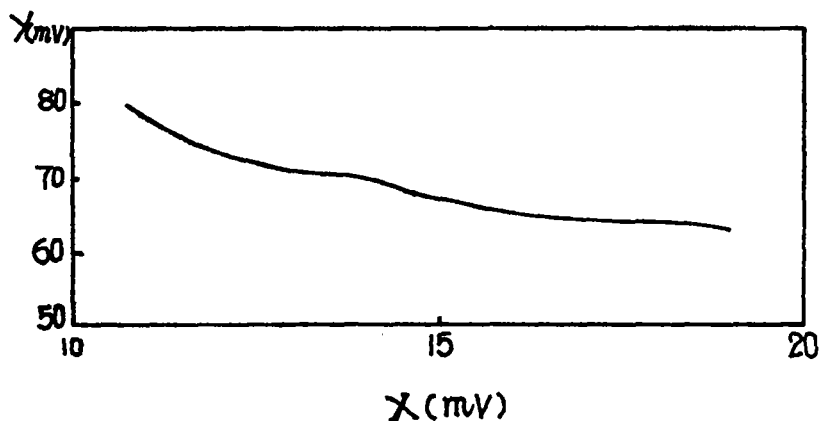
四、实验结果

本文实验采用 $\Gamma cc-6$ 型高频信号发生器和自制的 $5Mc$ 高频放大器（输出功率为 $0.8W$ ）作为射频驱动信号源；一次谐波和二次谐波的电压放大均采用 $WFG-1A$ 型高频微伏表（灵敏度为5微伏）进行放大；X—Y记录仪采用 $LZ3-103$ 型函数记录仪；直流偏压源采用自制的从 $\pm 0 \sim 100V$ 自动连续可调的直流偏压源。

我们对汽相系统生长的 $GaAs n/n^+$ 外延层的新135样品和 $SiCl_4$ 汽相系统生长的 $Si n/n^+$ 外延层的 102 样品用谐波法进行测量，用 X—Y 记录仪直接绘出 $x \sim \frac{1}{N(x)}$ 的关系曲线，结果如图三和图四所示。



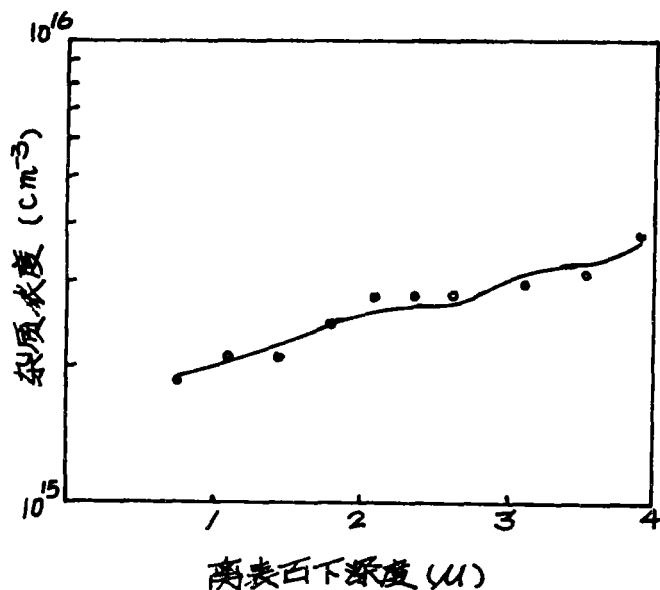
图三 对 n/n^+GaAs 外延新135样品，用 X—Y 记录仪直接繪出的 $x \sim \frac{1}{N(x)}$ 关系曲线。样品直径为 $1mm$ 。



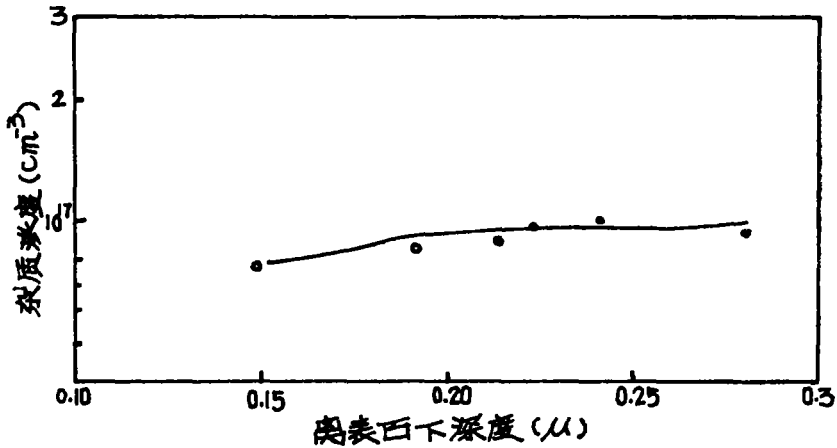
图四 对 n/n_+Si 外延102样品直接用 X—Y 记录仪输出的

$x - \frac{1}{N(x)}$ 关系曲线。样品直径为0.77mm。

图五和图六是用上述的定标法将图三和图四翻译成 $x \sim N(x)$ 的关系图。实践是用谐波法直接测量的结果。分立点是用 $C-V$ 方法对同一样品在同一偏压下所测得的结果。从图五和图六可以看出，用谐波法测得的结果和用 $C-V$ 方法测得的结果是一致的。



图五 对 n/n_+GaAs 外延层的杂质分布图。实践是用谐波法直接测量所得的结果。分立点是用 $C-V$ 方法在同一偏压下测得的结果。



图六 对 n/n+Si 外延层的杂质分布图。实线是用谐波法直接测量所得的结果。分立点是用 C—V 方法在同一偏压测得的结果。

五、讨 论

由上面的实验可见，用谐波法测量片子的杂质分布和用 C—V 方法测量的结果是一致的。但是，用 C—V 方法测量，则要从 C—V 曲线中估计斜率 $\frac{dc}{dv}$ ，这就带来很大的误差和烦杂的计算，而谐波法则简便、准确，因此具有实用价值。

谐波法需要考虑的是系统的杂散电容和引线的分布电容的影响，我们认为，这可以通过增大二极管的面积，保证 $C \gg C_s$ ，同时也可以采用补偿电容的方法来减少杂散电容的影响以达到精确的测量。

我们的实验，目前只适用于两个数量级的浓度测量，而且只能得出 $x \sim \frac{1}{N(x)}$ 的关系曲线。我们正在准备在二次谐波放大器中，加一级对数放大器，使 $x \sim \frac{1}{N(x)}$ 变成 $x \sim \log N(x)$ 的关系。这样就可以用半对数纸直接绘出 $x \sim \frac{1}{N(x)}$ 的关系曲线，并能将浓度测量的范围提高到四个数量级。

参 考 文 献

(1) J.A. Copeland, IEEE Trans. ED, ED16—5(1969)445.
 (2) Dinesh C. Gupta and Joseph Y. Cham, J. Appl. phys. 43—2(1972)515.
 (3) 罗夷倫, 《1972年砷化镓学术报告文集》358。