

InSb MOS 电容器高频 $C-V$ 特性的 测量及其界面态密度的推算

谢伯兴 林猷慎 唐家钊

(昆明物理研究所)

摘要——本实验首先测量了 N 型、(111) 面、掺 $Te 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ InSb 晶片的机械损伤层, 然后用阳极氧化等方法将其做成 MOS 结构, 测量和分析其高频 $C-V$ 特性, 并采用中心偏压加窄摆幅电压的来回慢扫测得无滞回效应的 $C-V$ 曲线。最后, 用 Nakagawa 式算出界面态密度为 $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 。

InSb 是窄带材料, 其表面机加工损伤层比硅大得多。我们用 X 射线衍射法检验了表面晶格完整性, 然后通过无滞回 $C-V$ 曲线估算出界面态密度。

一、晶片表面处理和机械损伤层检测

抛光后的 InSb 片表面应呈光滑镜面, 无麻点、划痕。由机加工引起的晶格损伤层可用 114 溶液 ($\text{HF}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:1:4$) 在室温下腐蚀。然后用日本理学 (Rigaku) 3015 型 X 射线衍射仪检验损伤层是否腐净。晶片表面残留的任何损伤层, 都会造成大量的电荷复合中心而建立不起空间电荷区, 使 MOS 结构无 $C-V$ 特性的变化规律。在作衍射分析前, 要对晶片取向进行严格的校正。

图 1 表明样品使用 114 溶液腐蚀前后衍射峰形和衍射角 2θ 位置所发生的变化。其测量条件: 靶极为 Cu, 滤波器为石墨, 电压为 20 kV, 电流为 5 mA。溶液在室温下的腐蚀速率为 1.1 mg/

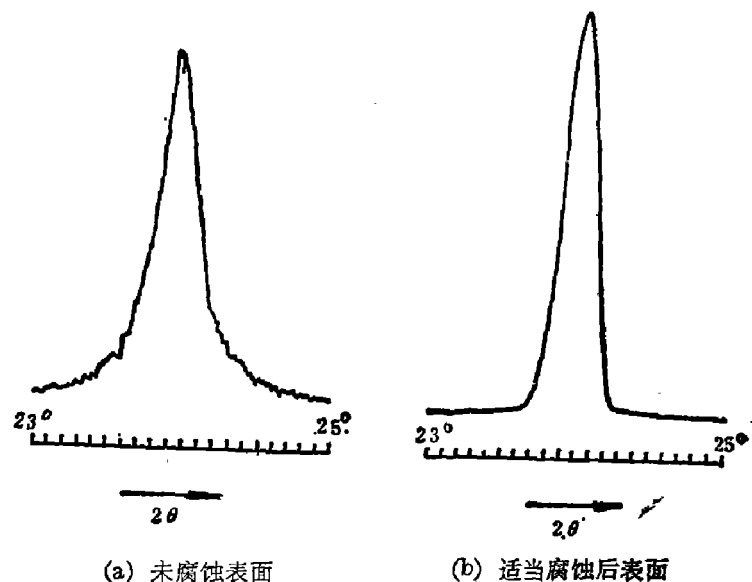


图 1 样品腐蚀前后 X 射线衍射分析对比(只取一级衍射)
Fig. 1 Contrast of X-ray diffraction 1st order analysis of the same sample before and after etching

本文 1984 年 12 月 1 日收到。修改稿 1985 年 4 月 15 日收到。

cm²/min。根据 InSb 是立方晶体、(111)面和发生一级衍射峰时的 2θ 值,由晶格常数 a 和面间距 d 的关系式 $a = \sqrt{h^2+k^2+l^2} \cdot d$ 可计算出经适当腐蚀后的表面晶格常数值。图 1(b) 是经腐蚀后的表面,其 $2\theta = 23.85^\circ$ 。已知 $(hkl) = (111)$,由“晶体 X 射线衍射角与面间距换算表”查得 $d = 3.7318 \text{ \AA}$,因此 $a = 6.4635 \text{ \AA}$ 。该值基本接近完整 InSb 晶体的晶格常数值 6.4782 \AA ,可以认为机械损伤层已去净。最近的俄歇谱仪测定表明:化学腐蚀后的 InSb 表面会留下很薄的氧化层,表面组分的化学计量比也略有改变。对 114 溶液而言,留下厚度约为 $10 \sim 20 \text{ \AA}$ 的氧化层,In 与 Sb 原子比值约为 $1.0 \sim 1.7$ 。实验结果表明:去掉机械损伤层的样品大多具有较好的 $C-V$ 特性,而 $10 \sim 20 \text{ \AA}$ 的氧化层影响不明显。图 1(a)是未经腐蚀的样品,其 X 射线衍射峰谱线呈锯齿状,峰形弥散。

二、氧化层的生长

1. SiON 膜的生长

将腐蚀好的片子放入钟罩内能转动的沉积台上,通入氮气、氧气和 2.5% 浓度的充氮硅烷,流量比控制在 1:3:20。用纯氮作载流气体,流速在每分钟一升以上。沉积台温度为

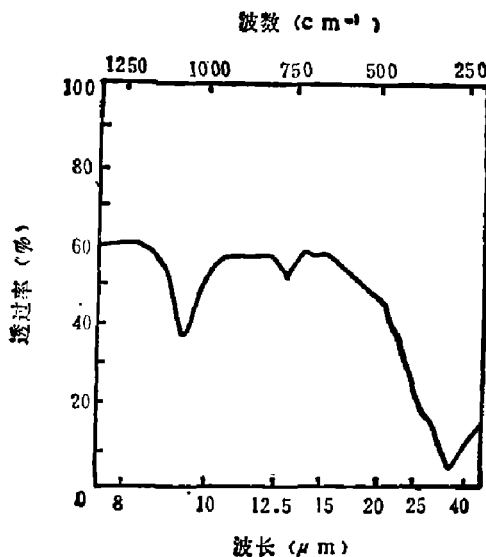


图 2 SiON 膜的红外吸收光谱

Fig. 2 IR absorption spectrum of SiON film

250°C, 根据沉积时间和膜的颜色判断厚度,通常控制在小于 2000 \AA 。图 2 是用本方法制得的 SiON 膜的红外吸收光谱。其中 $9.3 \mu\text{m}$ 和 $12 \mu\text{m}$ 处的吸收峰是 SiON 的特征峰。

2. 阳极氧化膜的生长

以 InSb 片为阳极,金片为阴极,放入 0.1N 的 KOH 乙二醇溶液中,用恒流法阳极氧化,氧化膜的厚度取决于施加的最高电压,40V 时膜厚约 1400 \AA 。有较好 $C-V$ 特性的膜厚不大于 2000 \AA ,颜色均匀,加栅偏压时不漏电 ($\ll 10^{-6} \text{ A/mm}^2$)。

三、 $C-V$ 特性的测量

干涉法测得 SiON 膜厚为 $d_{\text{IN}} = 1800 \text{ \AA}$,蒸上直径 $\phi = 0.6 \text{ mm}$ 的金电极形成 MOS 结构,在 77K 时用 CTG-1 高频(1MC) $C-V$ 测量仪测得如图 3 曲线。我们根据该曲线估算 InSb 与 SiON 膜界面的固定正电荷密度。先计算归一化平带电容:

$$\frac{C_{\text{FB}}}{C_{\text{IN}}} = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_{\text{IN}} \cdot L_D}{\epsilon_s \cdot d_{\text{IN}}}}, \quad (1)$$

式中 ϵ_{IN} 和 ϵ_s 分别为 SiON 膜和 InSb 的介电常数, $\epsilon_{\text{IN}} = 4.77$, $\epsilon_s = 16$; L_D 为德拜长度, $L_D = \left(\frac{KT\epsilon_0\epsilon_s}{N_D \cdot q^2} \right)^{1/2}$,其中 ϵ_0 、 N_D 和 q 分别为真空介电常数、掺 Te 浓度和电子电荷。将各值代入,由式 (1) 得 $\frac{C_{\text{FB}}}{C_{\text{IN}}} = 0.92$,从图 3 得平带电压 $V_{\text{FB}} \doteq -5 \text{ V}$ 。由文献[2]可知,金与该

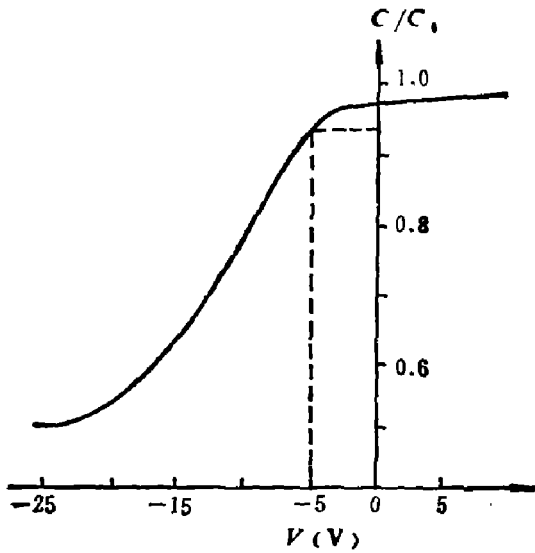


图3 用SiON膜制成的MOS电容器的归一化C-V曲线

Fig. 3 Normalized C-V curve of MOS capacitor made of SiON film

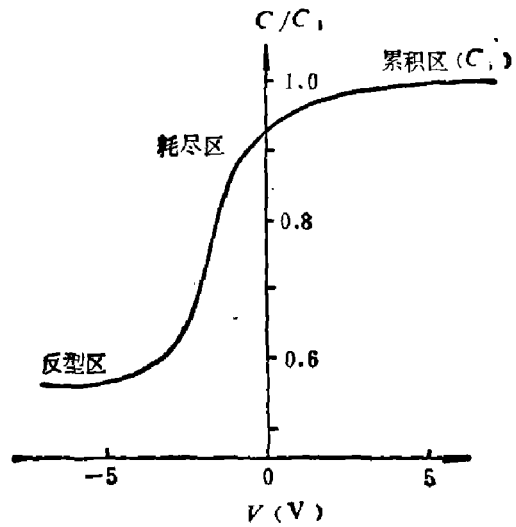


图4 阳极氧化膜的高频C-V曲线

Fig. 4 The high frequency C-V curve of anodic oxidation film

施主浓度 InSb 的接触电位差 $V_{ms} \approx 0.5 \text{ V}$, 将 V_{FB} 与 V_{ms} 代入正电荷面密度 Q_{f0} 的关系式:

$$\frac{Q_{f0}}{C_{IN}} = V_{ms} - V_{FB},$$

其中 $C_{IN} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{IN}}{d_{IN}} \approx 2.4 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2$, 所以 $Q_{f0} = 1.3 \times 10^{-7} \text{ C/cm}^2$ 。通常正离子为一价离子, 故单位面积的正离子数为 $\frac{Q_{f0}}{q} \approx 8 \times 10^{11} / \text{cm}^2$ 。这一结果说明界面上固定正电荷面密度较高, SiON 膜制备工艺有待改进。为消除正电荷对半导体的影响, 需要较高的平带电压 (-5 V)。对厚度 $d_i = 1400 \text{ \AA}$ 的阳极氧化膜, 77 K 时测得 C-V 曲线如图 4 所示。若曲线陡直, 则反映了空间电荷区的电荷变化量大、界面特性好。设 MOS 系统的总电容为 $C(V)$, 耗尽区单位面积电容为 C_s , 氧化层电容(即累积区最大电容)为 C_i , 当系统处于耗尽区时, $C(V)$ 可以视为 C_s 和 C_i 的串联, 即:

$$C_s = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_s}{d_s}, \quad (2)$$

$$C_i = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_i}{d_i}. \quad (3)$$

式 (2) 中 d_s 为耗尽层厚度, 与外加偏压有关:

$$d_s = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{C_i} \left(\sqrt{1 - \frac{2V}{V_0}} - 1 \right), \quad (4)$$

式中 $V_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s N_D q}{C_i^2} = \frac{\left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_i} \right) d_i N_D q}{C_i}$, 可以理解成当耗尽层厚度为 $\left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_i} \right) d_i$ 时, 在氧化层上产生的电压值。由式 (2)、(4) 得:

$$C(V) = \frac{C_i}{\sqrt{1 - \frac{2V}{V_0}}}. \quad (5)$$

由式 (5) 可知: 当有耗尽层电容时, 系统的总电容将随负电压的绝对值增大而减小, 故图 4 曲线有一陡直下降部分。

四、 $C-V$ 曲线的位移现象

1. 滞回效应与偏压的关系

滞回效应是指偏压向降低和增高两个方向来回扫动时 $C-V$ 曲线的不重合现象。这说明偏压在两个方向往返时, 界面态(快态)的状态是不一样的。靠界面厚度约为 10 \AA 的氧化层内, 陷阱数及其分布对滞回效应起着决定性作用。由于陷阱电荷在界面处与半导体表面发生了类似“隧道”贯穿效应的电荷注入, 因此使 $C-V$ 曲线位移而不重合。闭合滞回曲线包含的面积反映了电荷注入量的多少(参见图 5), 偏压幅值愈大, 闭合回线的平均宽度愈宽。据最近报道^[2], 阳极氧化膜愈薄($< 5000 \text{ \AA}$), 滞回效应愈小。

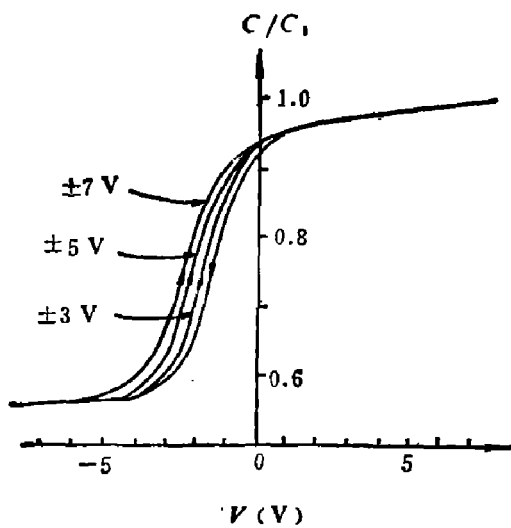


图 5 闭合滞回曲线的平均宽度与偏压幅值的关系
Fig. 5 The relationship between average width of closed hysteresis loop and bias amplitude

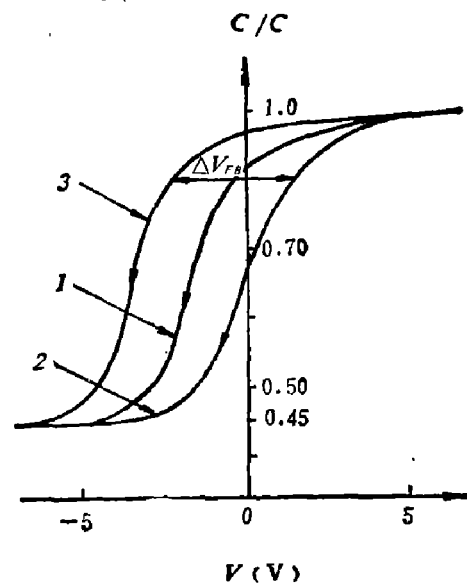


图 6 $B-T$ 处理后 $C-V$ 曲线的平移
Fig. 6 The shift of $C-V$ curve after $B-T$ treatment

2. 偏压-温度($B-T$)关系

将装有 InSb MOS 电容器的杜瓦瓶注入液氮, 先测得 77 K 时 $C-V$ 特性如图 6 曲线 1。然后倒掉液氮使温度回升到 300 K , 加正偏压 5 V (正 $B-T$ 处理), 并保持 20 分钟, 在加偏压的情况下冷却到 77 K , 然后撤去偏压再测 $C-V$ 特性如曲线 2。最后又重复上述步骤, 但加负偏压 -5 V (负 $B-T$ 处理), 测得曲线 3。可以看出: 正 $B-T$ 处理使 $C-V$ 曲线向右平移; 反之则向左平移。正负 $B-T$ 处理实际上就是靠近界面的氧化层陷阱中电子的低温俘获与热释放, 并在电场作用下发生从氧化层到 InSb 表面或从 InSb 到氧化层的电子注入, 从而使 $C-V$ 曲线左右平移。与硅的 $B-T$ 处理不同, 本实验的室温和低电场 ($\pm 10^5 \text{ V/cm}$) 条件尚不足以使氧化层中的钠离子移动。据报道^[3], 对厚度大于 2000 \AA 的阳极氧化膜, 上述条件可以使 Sb^+ 移动。

根据式 (1) 算出阳极氧化膜 MOS 结构的归一化平带电容 $\frac{C_{FB}}{C_1} = 0.79$ (使用参数: $C_1 =$

$7 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2$, $\epsilon_i = 11$, $d_i = 1400 \text{ \AA}$)。图 6 中 $B-T$ 处理曲线 2 和 3 与纵座标值为 0.79 时相交的对应值即为平带电压差 $\Delta V_{FB} = 3 \text{ V}$ 。由此可估算氧化层中单位面积电子陷阱(浅陷阱和深陷阱)的总数:

$$N_{DS} = \frac{\Delta V_{FB} \cdot C_i}{q} \approx 10^{12} / \text{cm}^2。$$

$B-T$ 处理时要避免可见光和红外辐射的影响, 因为光生载流子和 $B-T$ 处理的热释电子合在一起将使 $C-V$ 曲线的位移产生误差。

五、无滞回效应 $C-V$ 曲线的测量及界面态密度的计算

1. 无滞回效应 $C-V$ 曲线的测量

偏压的扫描速度对 $C-V$ 曲线滞回效应的影响不大, 即使慢扫速度为 0.05 V/min , 测得的曲线仍与快扫相同。但偏压扫描的摆幅却对滞回效应有明显影响, 因此可用窄摆幅偏压来测滞回很小的 $C-V$ 曲线。我们采用每个中心偏压加一个增量为 $\pm 0.25 \text{ V}$ 的窄摆幅电压, 得到一小段近似无滞回的 $C-V$ 曲线。如此一小段一小段地从正偏到负偏方向来回慢扫, 逐段连结就得到近似于无滞回效应的 $C-V$ 曲线, 如图 7。

2. 界面态密度计算

由前面测得的无滞回效应 $C-V$ 曲线和理论计算值相比较, 就可以推算出阳极氧化膜 MOS 结构界面态密度 N_{ss} 的值。若无滞回条件下实际测得的微分电容 $\left(\frac{dC}{dV}\right)_{\text{实际}}$ 与理论计算 $\left(\frac{dC}{dV}\right)_{\text{理想}}$ 愈接近, 即 $C-V$ 曲线中耗尽区段的斜率愈陡, 那么 N_{ss} 愈低。Nakagawa 将 N_{ss} 表示为^[8]:

$$N_{ss} = \frac{C_i}{q} \left(\frac{dC}{dV_s}\right)_{\text{理想}} \left[\left(\frac{dC}{dV_s}\right)_{\text{实际}}^{-1} - \left(\frac{dC}{dV_s}\right)_{\text{理想}}^{-1} \right], \quad (6)$$

式中 V_s 为表面势, $\left(\frac{dC}{dV_s}\right)_{\text{理想}}$ 和 $\left(\frac{dC}{dV_s}\right)_{\text{实际}}$ 可以由理论计算出。用式 (5) 对偏压 V 进行微分, 得:

$$\left(\frac{dC}{dV}\right)_{\text{理想}} = \frac{C_i}{V_0} \left(1 - \frac{2V}{V_0}\right)^{-3/2}。 \quad (7)$$

电容与表面势的关系式为

$$C = C_i \left(1 + \sqrt{\frac{-2V_s}{V_0}}\right)^{-1}。 \quad (8)$$

对式 (8) 中的 V_s 微分, 得

$$\left(\frac{dC}{dV_s}\right)_{\text{理想}} = C_i \left(1 + \sqrt{\frac{-2V_s}{V_0}}\right)^{-2} \cdot (-2V_0 \cdot V_s)^{1/2}。 \quad (9)$$

实验测得 $\left(\frac{dC}{dV}\right)_{\text{实际}} = 2.5 \times 10^{-8}$, 理论算得 V_s 为 0.05 V , 由式 (9) 算得 $\left(\frac{dC}{dV_s}\right)_{\text{理想}} \approx 8.9$

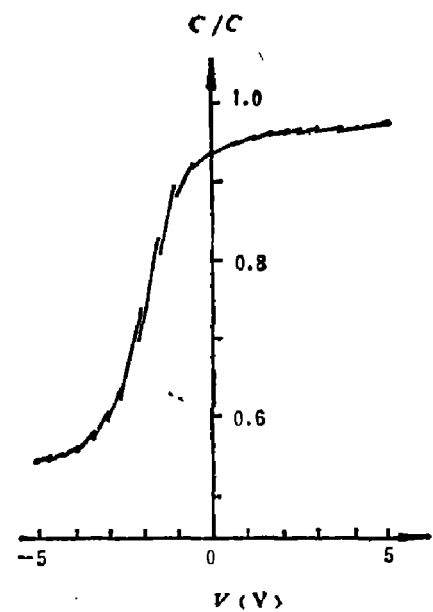


图 7 实际测得的无滞回效应 $C-V$ 曲线

Fig. 7 The practical measurement of $C-V$ curve without hysteresis effect

$\times 10^{-8}$ 。将上述值全部代入式(6),即得到单位面积中单位能量间隔(或对应于某个 V_s 值)的界面态数,即界面态密度 $N_{ss} = 2.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 。

该结果表明,用阳极氧化法制得的InSb MOS器件界面态密度仍然偏高。但据最近报道^[1],厚度仅为330 Å的阳极氧化膜,绝缘性好而且界面态密度可以低一个数量级($10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$)。我们在计算过程中没有考虑电极和半导体的接触电位差以及氧化层中电荷的影响,对实际情况作了简化,因此上述结果只是近似值。

参 考 文 献

- [1] Fujisada H. et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **23** (1984), L 46.
- [2] Etchells A. and Fischer C. W., *J. Appl. Phys.*, **47** (1976), 4605.
- [3] Nakagawa T. and Fujisada H., *Appl. Phys. Lett.*, **31** (1977), 348.

MEASUREMENT OF HIGH FREQUENCY C-V CHARACTERISTICS OF InSb MOS CAPACITOR AND ESTIMATION OF ITS DENSITY OF SURFACE STATE

XIE BAIXING, LIN QOUSHEN, TANG JIATIAN
(*Kunming Institute of Physics*)

ABSTRACT

The mechanical damage layer of N-type, (111) oriented, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ Te-doped monocrystalline InSb slices is measured. By anodic oxidation method the MOS structure InSb slices are made to analyse its high frequency $C-V$ characteristics. A narrow bias-voltage swing is applied around a certain center bias voltage, which sweeps slowly back and forth to obtain a $C-V$ curve without hysteresis. Finally, the $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ density of surface state is estimated from the curve by using T. Nakagawa's formula.