

非量子限条件下 p 型 InSb MOS 结构 反型层中子能带实验研究

刘坤 褚君浩 欧海疆 汤定元

(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)

摘要 在 100K 条件下测量了 p 型 InSb MOS 器件的变频电容-电压 ($C-V$) 谱, 在反型区观察到第二子带填充电子的台阶效应, 还发现一个位于导带中的共振缺陷态. 采用非量子限多带 $C-V$ 拟合模型获得了子能带结构.

关键词 电容谱, 共振缺陷态, 子能带, 激发态.

引言

自从 Mosser^[1] 等发现窄禁带半导体 (如 MCT, InSb) 的 MIS 结构电容谱 ($C-V$) 必须用有关子带的量子理论解释以来, 我们对窄禁带半导体 MCT 的 MIS 器件 $C-V$ 特性进行了较广泛的研究. 在理论上提出了变分自洽模型^[2]和有效质量 $C-V$ 模型^[3], 两者分别成功地求解了反型层基态子能带及激发态子能带的结构, 实验上测得了分别有 1 或 2 个子带填充电子的电容谱^[2~9], 同时还提出了量子限单带^[4~6]及非量子限多带^[7] 电容实验模型. 结合实验数据给出了许多有关材料及器件的参数, 为制备 MIS 结构光电器件提供了有益的参考. 本文报道 p 型 InSb MOS 器件 $C-V$ 特性测量中首次观测到的共振缺陷态和电容台阶效应, 并采用非量子限多带 $C-V$ 实验模型^[7] 得到了子能带结构.

1 非量子限多带 $C-V$ 实验模型

图 1 为 p 型 InSb MOS 结构反型时有多个子带被电子占据时的能带弯曲情形. 图中 E_c 、 E_v 、 E_g 、 E_A 、 E_F 分别为导带底、价带顶、禁带宽度、受主能级和费密能级, $\langle z \rangle_i$ ($i=0, 1, 2, \dots$) 为第 i 子带中电子平均穿透深度, z_d 为耗尽层厚度, $\zeta_i(z)$ 为第 i 子带电子波函数, $\Phi(z)$ 代表距表面 z 处的势, $e\Phi_s$ 为表面能带总弯曲量.

在非量子限条件下, 我们可以把量子限条件下的子能带模型^[4]推广到多带情况, 认为各子能带能量 E_i 仍可表示成反型层电子浓度 N_s 的二次多项式, 即 $E_i = E_{i0} + E_{i1}N_s + E_{i2}N_s^2$, 其中 $i=0, 1, 2, \dots$ 分别对应于基态子能带、第一激发态、第二激发态, \dots , E_{i0} 、 E_{i1} 、

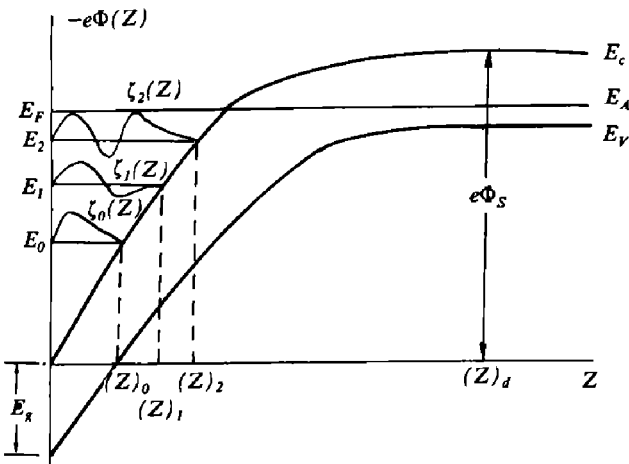


图 1 p-InSb MOS 结构反型时的能带弯曲示意图

Fig. 1 Scheme of band-bending in the inversion case for p-type InSb MOS structure

E_{i2} 为参数. 此时可用以下一组方程描述 MOS 结反型层中的 2DEG 系统:

$$\frac{d^2 \Phi(z)}{dz^2} = \frac{-[\rho_{\text{depl}}(z) - \rho_s]}{\epsilon_s \epsilon_0}, \quad (1)$$

$$N_s = \sum_{i=0}^n \int_{E_i}^{E_F} \frac{m_i^*(E)}{\pi \hbar^2} dE, \quad (2)$$

$$m_i^*(E) = m_0^* \left[1 + \frac{2(E - j_i E_i)}{E_g} \right], \quad (3)$$

$$e\Phi_s = (E_g - E_A) + E_F. \quad (4)$$

式中 ϵ_s 为材料相对介电常数, ϵ_0 为真空介电常数, m_0^* 为导带边电子有效质量, \hbar 为普朗克常数, $\rho_{\text{depl}}(z)$ 为耗尽层电荷面密度, ρ_s 为反型层总电荷面密度, n 为填充电子的子带数 (即位于费密能级下的子带数), $m_i^*(E)$ 和 j_i 分别为第 i 子能带电子有效质量和波函数分布参数, 可参看文献 [5].

偏压 V_g 处实测电容 C 是氧化层电容 C_{ox} 和半导体表面电容 C_s 的串联电容, 即

偏压 V_g 处实测电容 C 是氧化层电容 C_{ox} 和半导体表面电容 C_s 的串联电容, 即

$$C = \frac{C_{ox} \cdot C_s}{C_{ox} + C_s}, \quad (5)$$

其中半导体表面电容 C_s 在耗尽区和反型区分别为:

耗尽区,

$$C_s = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_s \cdot e \cdot N_{AD}}{C_{ox} \cdot (V_g - V_{fb})}; \quad (6)$$

反型区,

$$C_s = e \cdot \left(\frac{\partial N_s}{\partial \Phi_s} + N_{AD} \cdot \frac{\partial Z_d}{\partial \Phi_s} \right). \quad (7)$$

式中 V_{fb} 为器件平带电压, N_{AD} 为受主浓度. 反型层电子面密度 N_s 与偏压关系为

$$N_s = C_{ox}(V_g - V_0)/e. \quad (8)$$

V_0 为器件反型层内第一子带开始填充电子时的阈值电压. 于是, 通过以上模型拟合电容谱就可获得子能带结构参数, 如基态、激发态子能带能量, 反型层厚度、耗尽层厚度等. 具体拟合过程见参考文献 [7].

2 InSb MOS 结构实验结果

在 p-InSb 衬底上用光 CVD 方法溅射一层约 1700Å 的 $\text{SiO}_2 + \text{SiO}$ 绝缘层, 然后在绝缘层上蒸金并光刻电极, 用 In 作衬底电极形成欧姆接触, 用导电胶 (银浆) 作栅电极 (见

图 2). 电极面积为 0.0009 cm^2 . 由霍尔测量得到 N_{AD} 为 $2 \times 10^{-16} \text{ cm}^{-3}$. 变频电容测量是在引线电极 A、B 间进行的. 测试结果见图 3.

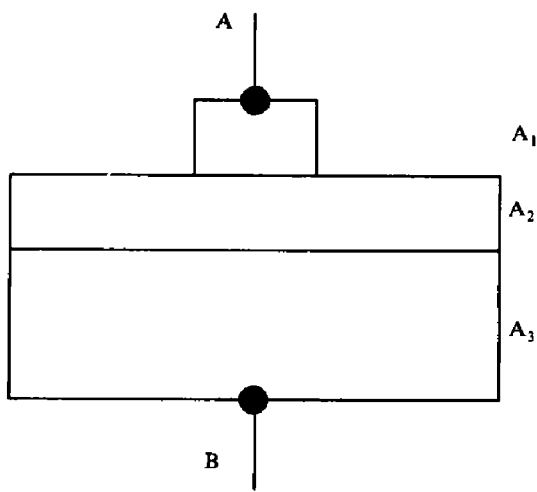


图 2 p-InSb MOS 器件示意图
Fig. 2 Structure for p-type InSb MOS device

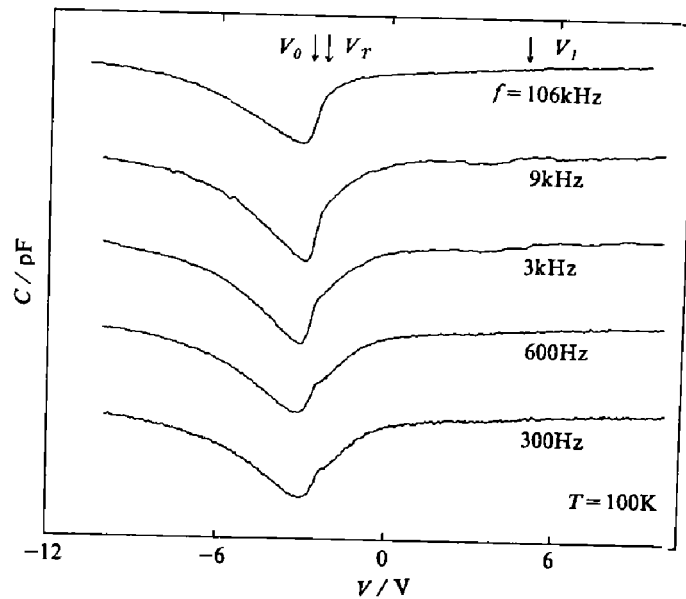


图 3 变频 $C-V$ 谱
Fig. 3 $C-V$ spectroscopy at different frequencies

2.1 共振缺陷态

从图 3 中可明显看到每条电容谱线在反型区均有 3 个上升结构, 分别对应于偏压 -2.4 、 -2.0 和 5.0 V , 在图中标为 V_0 、 V_T 和 V_1 . MOS 器件从耗尽状态转到反型时, 电子开始填充基态子带, 电容迅速增加, 即对应图中偏压 V_0 处的上升结构. 然而当偏压增至 V_T 时电容上升速度却开始减慢, 这种电容上升被抑制的行为不可能是由于第一激发态开始填充电子引起的. 因为此时沟道中的电子浓度只有 $5.3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 左右, 第一激发态子带不可能这么快就填充电子, 即使是第一激发态子带开始填充电子也只能加快电容上升, 而不是抑制电容上升. 所以 V_T 结构不是子带填充电子造成的. 更重要的特征是随测试频率增高, V_T 处的结构逐渐消失, 电容上升逐渐变快. 所以我们认为在导带中存在一受主型的共振缺陷态, 它俘获电子后使得参与电容贡献的电子数减小, 于是在测量中就观察到了电容上升变慢的行为. 随着测试频率的增大, 缺陷态俘获电子的几率降低, 电容上升速度逐渐恢复 (变快). 比较不同频率下的 $C-V$ 谱还发现这种缺陷态引起的结构只出现在一定偏压范围, 在该范围之外电容与测试频率无关. 通过拟合计算可以得到有关缺陷态的信息: 其分布在距界面 161.9 nm 范围内, 面密度 N_T 约为 $3.2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$, 能级 E_T 距导带底 55.3 meV 左右, 可见缺陷态分布在半导体表面附近. 详细计算将另文给出. 类似 V_0 处的电容台阶结构, V_1 处的电容台阶 (见图 4) 是由于第一激发态子能带填充电子引起的, 这在以前的 MCT MIS 器件 $C-V$ 特性测量中也曾发现过^[7]. V_0 和 V_1 分别称为基态和第一激发态子带的阈值电压.

2.2 子带结构

由上述非量子限 $C-V$ 模型拟合了低频 (300 Hz) 实验结果, 如图 4 中虚线所示, 实线为测量结果. 在 V_T 附近拟合得并不好, 这是因为拟合中未考虑陷阱效应. 拟合时取 $\epsilon_s = 18$, $E_g = 0.206 \text{ eV}$, $m_0^* = 0.014m_e$ (m_e 为自由电子质量), $C_{ox} = 18.59 \text{ pF}$, $V_{fb} = -7.8 \text{ V}$, $V_0 = -2.4 \text{ V}$, $V_1 = 5.0 \text{ V}$. 子带能量及波函数参数见表 1.

表 1 拟合参数
Table 1 Fitting parameters

i	j_i	$E_{i0} \text{ (eV)}$	$E_{i1} \text{ (eV}\cdot\text{cm}^2)$	$E_{i2} \text{ (eV}\cdot\text{cm}^4)$
0	0.610	0.046	1.50×10^{-14}	-3.0×10^{-27}
1	0.720	0.100	3.00×10^{-14}	-2.0×10^{-26}

拟合到的基态子带能量 E_0 、第一激发态子带能量 E_1 以及费密能级 E_F 随反型层电子浓度的变化关系如图 5 所示, 可见在实验偏压范围内有 2 个子带填充电子. 反型开始时, 基态子带开始填充电子; 当反型层沟道中电子浓度增加到 $9.4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时, 第一激发态子带也开始填充电子. 它们对应的栅压分别为 -2.4 和 5.0 V , 与电容谱中的电容台阶电压 V_0 、 V_1 一致, 在图中用 P_1 、 P_2 标出. 另外还可看到当第一激发态子带开始填充电子时, 费密能级增长速度降低, 这是因为随着填充子带增多和能级增大, 反型层中总电子态密度增大, 从而使费密能级逐渐钉扎在某一激发态子带带底附近. 这同空穴子带的费密钉扎现象相似^[10]. 当反型层电子浓度从 0 增加到 $1.58 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 时, 基态子带和第一子带分别从 47.1 meV 和 100.7 meV 增加到 63.2 meV 和 176.6 meV , 而 E_F 则从 47.2 meV

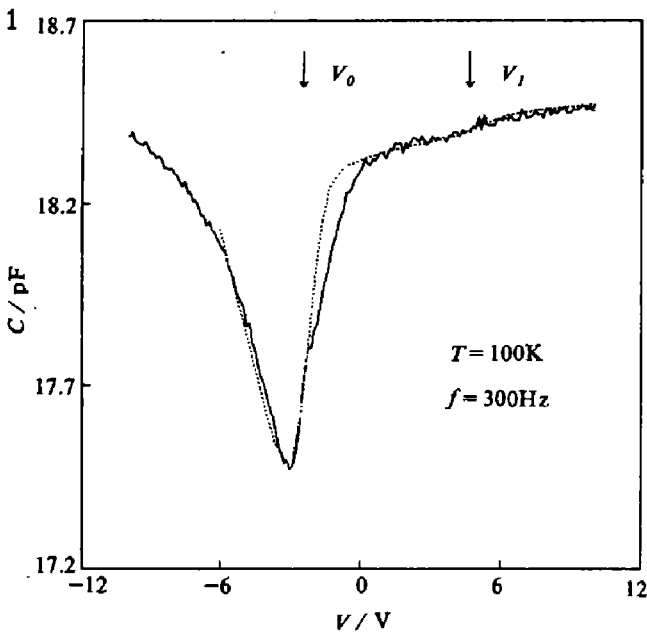


图 4 p-InSb MOS 器件的 $C-V$ 谱 (—为实验测量结果, ... 为非量子限 $C-V$ 模型拟合结果)
Fig. 4 $C-V$ spectroscopy for p-type InSb MOS diode (solid line: experimental data, dashed line: result calculated from non-quantum limit $C-V$ model)

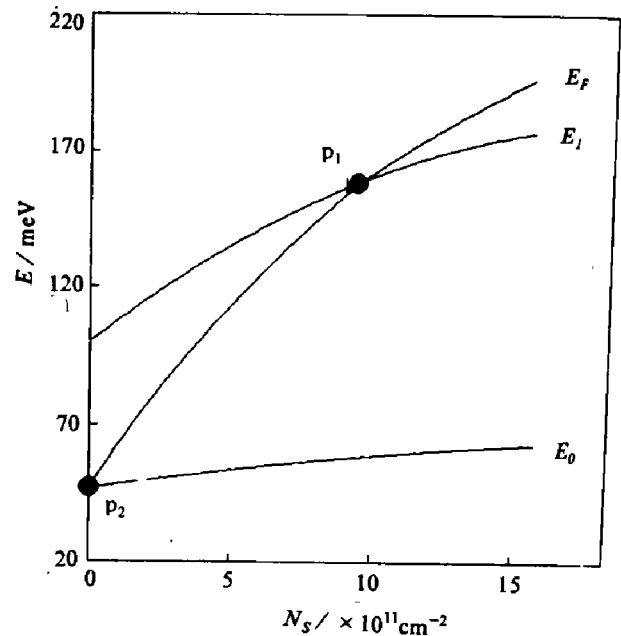


图 5 反型层子带能量 E_1 、费密能级 E_F 随反型层电子浓度的变化关系
Fig. 5 The subband energy E_1 , Fermi energy E_F vs. the electron concentration N_s in the inversion layer

增加到 196.0 meV.

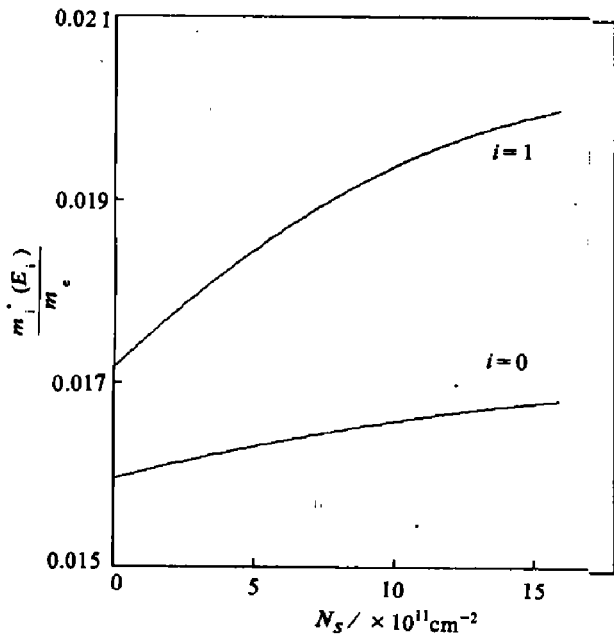


图 6 子带带底有效质量随反型层电子浓度的变化关系

Fig. 6 The effective mass at the subband bottom vs. the electron concentration in the inversion layer

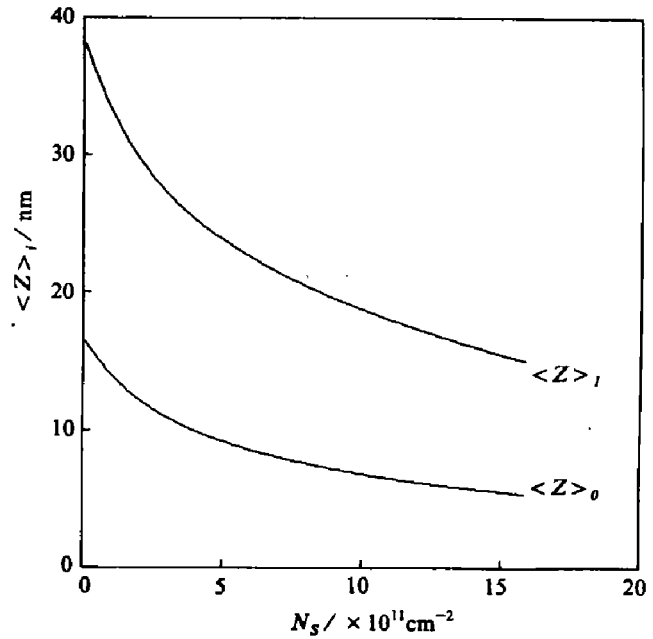


图 7 子带电子平均穿透深度随反型层电子浓度的变化关系

Fig. 7 The average penetration depth of subband electrons vs. the electron concentration in the inversion layer

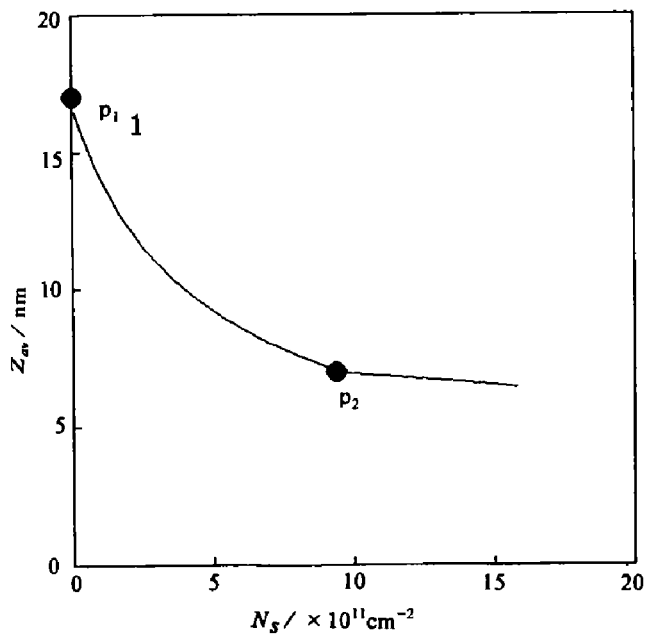


图 8 反型层平均厚度 z_{av} 随反型层电子浓度的变化关系

Fig. 8 The average inversion layer width z_{av} vs. the electron concentration in the inversion layer

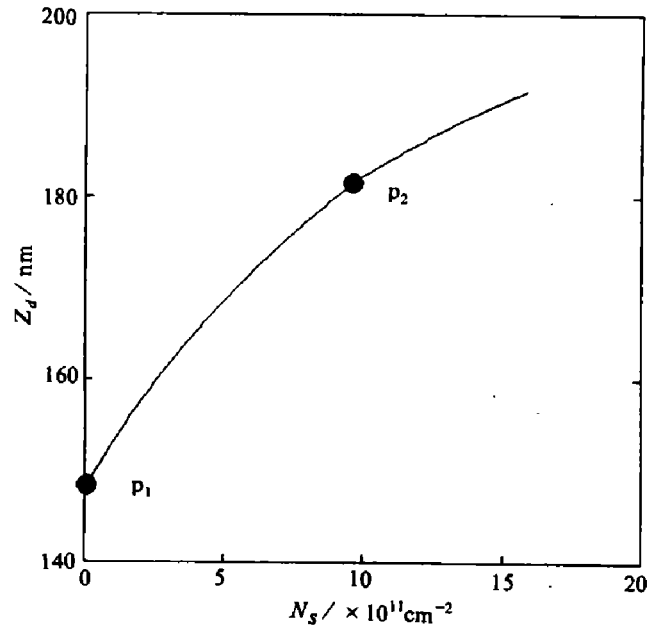


图 9 耗尽层厚度 z_d 随反型层电子浓度的变化关系

Fig. 9 The depletion layer width z_d vs. the electron concentration in the inversion layer

子带带底有效质量 $m_i^*(E_i)/m_e$ 以及子带电子平均穿透深度 $\langle z \rangle_i$ 随反型层电子浓度的变化关系分别在图 6 和 7 中给出. 反型层平均厚度 z_{av} 、及耗尽层厚度 z_d 的变化规律在图 8 和 9 中给出, P_1 、 P_2 分别对应于基态及第一激发态子带开始填充电子. 仔细观察发现类似于费密能级的变化规律, 当第一激发态子带开始填充电子时, z_{av} 和 z_d 的

变化速度都放慢, 这同样是由于较高能级子带开始填充电子的缘故. 随反型层电子浓度从 0 增加到 $1.58 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 反型层平均厚度从 16.1 nm 减小到 6.4 nm, 而耗尽层厚度却从 148.9 nm 增大到 191.6 nm.

作为比较, 图 10 中实线给出了 $E_{10} (= E_1 - E_0)$ 以及 $E_{FO} (= E_F - E_0)$ 随反型层电子浓度的变化关系, 虚线为 F. Malcher^[11] 等的理论结果. 可见 E_{FO} 符合较好, E_{10} 相差较大, 理论预计反型层电子浓度为 $7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时第二子带开始填充电子, 本文实验测得的这个阈值浓度约为 $9.4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. 其中的差别可能是因为采用的参数不同所致. Malcher 在计算中采用的参数为 $T=0 \text{ K}$, $E_g = 0.235 \text{ eV}$, $m_0^* = 0.0135m_e$, $N_{AD} = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 等.

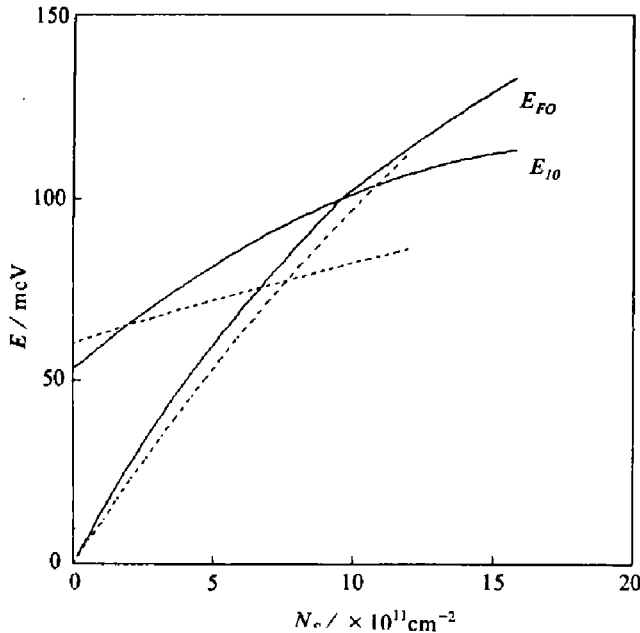


图 10 E_{10} , E_{FO} 的比较

Fig. 10 Comparison of E_{10} and E_{FO}

3 结语

在 100 K 测量了 p-InSb MOS 器件的变频 $C-V$ 特性, 首次在 p-型 InSb MOS 结构 $C-V$ 测量中获得了有 2 个子带填充电子的实验结果, 发现了电容台阶现象和陷阱效应并用非量子 $C-V$ 模型拟合出了反型层沟道子带结构.

参考文献

- 1 Mosser V *et al.* *Semicon. Technol.*, 1988,3:808
- 2 刘坤, 褚君浩, 等. *物理学报*, 1994,43(2):267~273
- 3 Liu Kun, Chu Junhao, Ou Haijiang, *et al.* Submitted to J.A.P.
- 4 Chu Junhao, Mi Zhengyu, *et al.* *Phys. Rev.*, 1991,44(4):1717
- 5 褚君浩, Sizmann R, Koch F. *中国科学*, 1990,5:515
- 6 刘坤, 褚君浩, 程思远, 等. *红外与毫米波学报*, 1994,13(3):
- 7 刘坤, 褚君浩, 汤定元. *半导体学报*, 待发表
- 8 褚君浩. *红外研究*, 1985,4(6):439
- 9 Sizmann R, Chu JH, *et al.* *Semicond. Sci. Technol.*, 1990,5:S111
- 10 Liu Kun, Chu Junhao, Ou Haijiang, *et al.* JAP (Accepted)
- 11 Malcher G, Nachev I, Ziegler A, *et al.* *Phys. B; Condensed Matter*, 1987,68:437

EXPERIMENTAL STUDY OF SUBBAND STRUCTURE IN THE INVERSION LAYER OF p-TYPE InSb MOS DEVICE IN THE NON-QUANTUM LIMIT CONDITION

Liu Kun Chu Junhao Ou Haijiang Tang Dingyuan

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

Abstract The capacitance-voltage ($C-V$) characteristic of InSb metal-oxide-semiconductor (MOS) device was measured at 100 K. In the inversion region, the second capacitance plateau was observed for the first time, which can be attributed to the electron filling in the second subband. At the same time, a resonant defect state was found for the first time. By using the previously presented $C-V$ model in the non-quantum limit condition, the subband structure in the inversion layer has been obtained.

Key words capacitance spectroscopy, resonant defect state, subband, excited state.