

## InSb MIS 结构的磁电容谱研究\*

吴良津<sup>1)</sup> 刘坤<sup>2)</sup> 褚君浩<sup>2)</sup><sup>1)</sup>福州大学, 电子科学与应用物理系, 福建, 福州, 350002;<sup>2)</sup>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)

TN214.01

A

**摘要** 测量了 n 型 InSb 金属-绝缘体-半导体(MIS)器件的磁量子电容谱, 发现 p 型沟道中二维空穴子带对磁场有很大的依赖关系, 对这种依赖关系作出了定性的解释.

**关键词** MOS 器件, 二维空穴气, 磁电容谱.

MIS 器件 红外器件

## 引言

本世纪七十年代以来对二维系统广泛关注<sup>[1]</sup>. 与二维电子气系统相比, 二维空穴气(2DHG)系统由于其有效质量较大、空穴迁移率较低和价带比较复杂等原因, 因此研究较少. 考虑到经典电容-电压(C-V)测量技术已被成功地用于研究窄禁带半导体 MIS 结构中的二维电子气系统<sup>[2~6]</sup>, 借助于该技术可望对二维空穴气系统进行研究. 我们曾用 C-V 测量技术在电量子化条件下研究了 n 型 InSb MIS 器件中的 p 型沟道<sup>[7]</sup>, 包括沟道中空穴的能带结构、有效质量及其随沟道中空穴浓度的变化关系. 本文用一套自制的量子电容谱测试系统, 进一步研究磁场下的二维空穴气系统. 实验观察到: 随着磁场强度的增大, 二维空穴气系统中的沟道阈值能也增大, 并对实验结果作出了解释.

## 1 实验结果

在 n 型 InSb 样品上用光辅助 CVD 法沉积一层厚度大约 1700 Å 的 SiO<sub>2</sub>+SiO 绝缘层, 然后在绝缘层上镀一个面积为 7.85×10<sup>-3</sup>cm<sup>2</sup> 的 Au 栅极. 用 In 电极和 Ag 导电胶制备良好的欧姆接触. 在 1.2K 温度下, 样品中施主浓度  $N_{DA}$  大约为 3.5×10<sup>15</sup>cm<sup>-3</sup>.

实验中使用的自制磁电容测试系统灵敏度高达 0.002pF, 电容电压比高达 200V/pF. 利用该测试系统, 在 1.2K 测量了 MOS 器件的电容谱. 测量频率为 814Hz, 样品位形  $\theta=0^\circ$  (其中  $\theta$  是磁场和器件表面法线方向的夹角). 测得结果如图 1 所示. 小方框内结果为包括积累区、耗尽区和反型区的完整电容谱线.

## 2 实验结果分析

由图 1 可看出电容谱反型边对磁场强度有很大的依赖关系, 而耗尽边几乎与磁场没有关系. 随着磁场的加大, 电容谱反型边向更负电压方向移动, 而电容谱耗尽边几乎没有变动. 为了证实这种移动是否缘于 p 型沟道中的二维空穴气系统, 通过改变样品位形, 即改变角度  $\theta$ , 再做 C-V 测量, 结果发现电容谱耗尽边和反型边都几乎不随样品的位形改变. 这表明, 电

\* 国家自然科学基金和中国科学院红外物理国家重点实验室开放课题基金资助项目, 编号分别为 69276007 和 9511  
本文 1996 年 8 月 12 日收到, 修改稿 1996 年 10 月 4 日收到

容谱反型边的移动并非缘于沟道中的二维空穴气系统,同样也非缘于绝缘体中的固定电荷中心和绝缘层/半导体界面的界面态.因为绝缘层中的固定电荷中心一般使电容谱反型边和耗尽边同时产生移动<sup>[8]</sup>,即整条C-V曲线相对电压轴平移,而界面态通常在相应区域,特别是在耗尽区产生电容峰<sup>[9]</sup>.经认真分析和研究,可以得出结论:电容谱反型边随磁场加大而移动的行为主要是因为InSb体材料的禁带宽度随磁场加大而变大,部分是由于磁场下沟道中空穴朗道能级形成而引起.

在p型窄禁带半导体MIS器件的C-V谱中,人们曾经发现电容在反型区急剧上升的现象,并认为这是由于随着沟道中二维重空穴子能带的形成而在MIS器件的半导体表面层打开了一个p型沟道的缘故<sup>[7]</sup>.正如图2(a)所示,当表面费密能级 $E_F$ 随着表面带弯曲 $e\varphi_s$ 到达空穴子能带底 $H_{00}$ 时,空穴开始填充表面层,并在表面开通一个p型导电反型通道.由于沟道中空穴的贡献,使测得的电容在 $V_{00}$ 电压处突然剧增,这里 $V_{00}$ 和 $H_{00}$ 在无磁场情况下也叫做2DHG系统反型阈值电压和能级.图2中的 $E_c$ 和 $E_v$ 分别是导带底和价带顶能级.

当在InSb MIS器件上加磁场时,InSb体材料的禁带宽度 $E_g$ 与磁场有关,应为 $E_g = E_g(B=0) + \hbar(\omega_{ce} + \omega_{cv})/2$ ,其中 $\omega_{ce}$ 和 $\omega_{cv}$ 分别是电子和空穴的回旋频率.在1.2K磁场从0扫描到8T时,InSb体材料的禁带宽度从0.267eV增大到0.30eV.施主浓度几乎不随磁场变化(从C-V曲线耗尽区斜率看出).计算表明费密能级相对导带边的位置几乎不随磁场改变.因此,随着磁场加大,费密能级位于MIS器件中沟道阈值能级 $H_{00}$ 之下,p型沟道关闭.

当在垂直于二维空穴气系统方向上加磁场时,沟道中也会形成朗道能级.但是由于重空穴有效质量很大,使得沟道中相邻的朗道能级分隔很小,以致于几乎是连续的.对于一般的二维空穴气系统,阈值能级等于基态朗道能级,由两部分组成,即电量化能级 $E_c$ 和磁量子化能级 $E_B$ .随着垂直于二维空穴气系统的磁场加大, $E_B$ 也随着沟道中空穴的回旋加速而增大.因此,二维空穴气的阈值能级也增大到 $H_{0B}$ 处(见图2(b)).考虑到磁场越大,费密能级 $E_F$ 越低,MIS器件中p型沟道在磁场中进一步关闭了.

为了打开已关闭的p型沟道,必须施加一个附加势 $\Delta e\varphi_s$ ,以使表面费密能级重新到达反型阈值 $H_{0B}$ .当我们通过提高栅压来获得附加势时,反型沟道中的电量子化能级 $E_c$ 也变大了.因此反型阈值能量又一次增大到 $H_{0B}$ (见图2(c)),这就导致了电容谱反型边向更负栅电压 $V_{0B}$ 方向移动. $H_{0B}$ 和 $V_{0B}$ 称为磁场下二维空穴气系统的阈值能级和阈值电压.

在实验磁场范围内,空穴磁量子化能级 $E_B$ 很小,与基态朗道能级温度展宽相当.因此,在固定磁场下改变样品位形所引起的电容谱反型边移动是很微小的,实验中很难清楚地观察到.

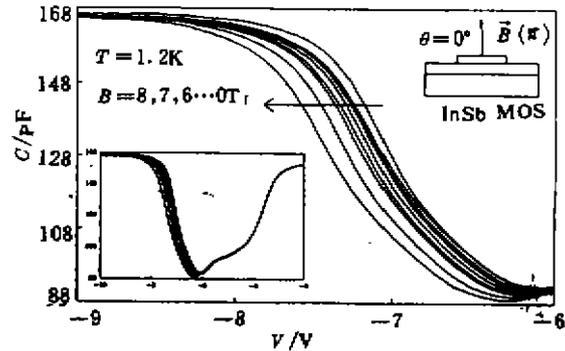


图1 在1.2K和样品位形 $\theta=0^\circ$ 时n型InSb MIS器件的磁量子电容谱

Fig. 1 Magnetocapacitance spectroscopy of the n-type InSb MIS sample at 1.2K and in the sample configuration of  $\theta=0^\circ$

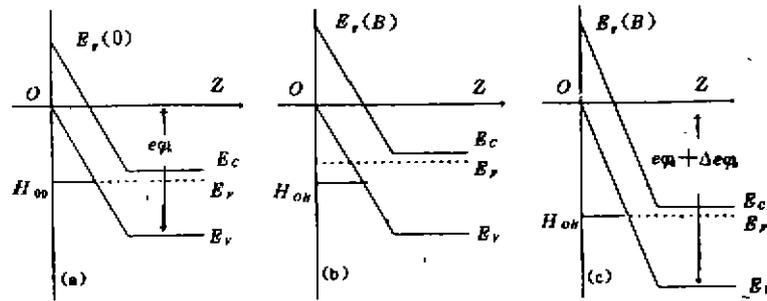


图2 n型 InSb MIS 器件电容谱反型边移动示意图  
Fig. 2 The band structure schematic for interpreting the movement of capacitance inversion edge of n-type InSb MIS sample

### 3 实验讨论

3.1 由于空穴基态朗道能级有相当大的态密度,所以在实验栅压范围内,InSb MIS 器件反型区  $C-V$  特性主要是由基态空穴朗道能级决定的,因此本文只讨论了 InSb MIS 器件中 p 型沟道的基态空穴朗道能级.

3.2 在本文磁电容谱实验中,样品位形改变导致的电容谱反型边移动可以忽略,但如果所加的磁场大到足以提供与空穴朗道能级间距相当的能量时(假设这种能级间距比温度展宽能大得多),磁电容谱反型边会随样品的位形而改变.

3.3 根据图 2 的模型及 MIS 结构表面势计算方法,我们发现随磁场从 0 变化到 8T,二维空穴带基态能量从 1.025eV 变化到 1.169eV. 这个结果比用文献[1]中的理论估算结果大得多. 这可能是因为:(1) 文献[1]中的理论公式是从宽带半导体三角势阱中二维电子气系统导出的,由于 InSb 是窄带半导体,能带是非抛物带,文献[1]中公式可能不适用;(2) 在器件中存在的诸多影响,界面态、非抛物带<sup>[10]</sup>、共振缺陷态<sup>[5]</sup>、隧穿过程<sup>[5]</sup>等都会影响实验结果和定量分析. 以前的一项研究表明,共振缺陷态的存在会在二维子带基态能中引入一附加能量;(3) 一些尚未知的原因.

3.4 必须指出,磁电容谱也可用来研究磁场中二维电子气子能带特性,我们已在 n 型 InSb MIS 器件的积累区磁电容谱中发现了与电子朗道能级有关的很多有趣结果<sup>[9]</sup>.

### 4 结论

本文在磁场条件下研究了 n 型 InSb MIS 器件 p 型沟道中的二维空穴气系统. 用一套自制的磁电容谱仪,观察到电容谱反型边随着磁场强度变化而变化的行为,这主要是因为 InSb 体材料禁宽度随磁场变大的缘故. 由于空穴有效质量很大,在某一固定磁场下改变样品的位形,并不引起反型边的明显移动,因而在低磁场中可忽略这方面的影响.

## 参考文献

- 1 Ando T. *Review of Modern Physics*, 1982, **54**(2):437
- 2 Chu J H, Sizmann R, Nachev I, *et al. Solid-State Electronics*, 1994, **37**(4~6):1125
- 3 Sizmann R, Chu J H, Kosh F. *Semicond. Sci. and Technol.*, 1990, **5**:S111
- 4 Chu J H, Mi Z Y. *Phys. Rev. B*, 1990, **44**, (4):17:17
- 5 Liu K, Chu J H, Li B. *物理学报*, 1994, **43**, (2):267
- 6 Liu K, Chu J H, Tang D Y. *红外与毫米波学报*, 1994, **13**(3):199
- 7 Liu K, Chu J H, Ou H J. *J. Appl. Phys.*, 1994, **76**(12):7998
- 8 Nicollian E H, Brews J R, *et al. Physics MOS and Technology*, Printed in United States of American, 1982, 492
- 9 Liu K, Chu J H, Ou H J, *et al. In: 15 Int. Conf. on the Applications of the High Magnetic Fields in Semiconductors*, New Mexico, 1995
- 10 Zawadzki W. *J. Phys. C, Solid State Phys.*, 1983, **16**:229

## STUDIES OF MAGNETO-CAPACITANCE SPECTROSCOPY OF InSb MIS STRUCTURE \*

Wu Liangjin<sup>1)</sup> Liu Kun<sup>2)</sup> Chu Junhao<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Electronic and Applied Physics, Fuzhou University, Fujian 350002, China;

<sup>2)</sup>National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract** By measuring the magneto-capacitance spectroscopy of an n-type InSb metal-insulator-semiconductor (MIS) structure, the 2-dimensional hole subband in the p-type channel of the InSb MIS device was investigated under different magnetic fields at 1.2K. It was shown that the on set energy of the p-type channel has a strong dependence on the magnetic field. This behavior has been attributed mainly to the dependence of the InSb band gap energy on magnetic field.

**Key words** MOS device, 2-dimensional hole system, magnetocapacitance.

---

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China and Foundation of National Laboratory for Infrared Physics, Chinese Academy of Sciences