

Hg_{1-x}Cd_xTe MIS 器件的 C-V 特性*

黄 河 童斐明 汤定元

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——测量了阳极氧化和 ZnS 双层介质结构的 Hg_{1-x}Cd_xTe MIS 器件的 C-V 特性。基于 Kane 模型并考虑了碲镉汞导带非抛物性和载流子简并效应,进行了理论计算,高频情况下还考虑了少子在反型层中的再分布。对各种组份 ($x=0.2\sim 0.56$) 的 N 型和 P 型 Hg_{1-x}Cd_xTe MIS 器件进行了变频 ($f=20\sim 10$ MHz) 和变温 ($T=26\sim 200$ K) C-V 测量。对于 $x=0.3$ 的器件,测得其固定正电荷密度为 $8\sim 10\times 10^{11}\text{cm}^{-2}$, 80 K 下慢界面陷阱密度为 $4\sim 10\times 10^{10}\text{cm}^{-2}$, 最小界面态密度为 $1.7\sim 2\times 10^{11}\text{cm}^{-2}\cdot\text{eV}^{-1}$ 。

一、引 言

金属-绝缘体-半导体 (MIS) 器件是用于研究半导体表面和体特性的有力工具。对用 Hg_{1-x}Cd_xTe 材料作衬底制成的 MIS 器件进行特性测量,可以了解 Hg_{1-x}Cd_xTe 材料及其与介质之间的界面特性。同时, Hg_{1-x}Cd_xTe MIS 器件是一种性能很好的光电二极管,又是制作 Hg_{1-x}Cd_xTe 电荷耦合器件 (CCD) 或电荷注入器件 (CID) 的基础,具有很广阔的应用前景。

本文报道我们对阳极氧化和 ZnS 双层介质结构的 Hg_{1-x}Cd_xTe MIS 器件测得的电容-电压 (C-V) 特性结果,从理论上进行了分析,并将实验值与理论计算值进行了比较。

二、理 论

MIS 器件的一般理论是基于玻耳兹曼统计和泊松方程^[1,2]。Hg_{1-x}Cd_xTe 的导带为非抛物性且容易简并,应当考虑费密-狄拉克统计^[3,4]。我们基于 Kane 模型,考虑了 Hg_{1-x}Cd_xTe 导带非抛物性和载流子简并,计算了 HgCdTe MIS 器件的 C-V 特性。计算程序与一般的 MIS 器件理论相同^[3]。导带简并对 MIS 器件 C-V 特性的影响使得 N 型器件的积累区(或 P 型器件的强反型区)低频电容饱和较为缓慢,这是由于在费密能级进入导带后,随着表面势的增加,电荷上升比较缓慢的缘故。

本文 1987 年 8 月 15 日收到。修改稿 1987 年 11 月 14 日收到。

• 国家自然科学基金部分资助课题。

计算高频 $C-V$ 曲线时考虑到在高频信号情况下^[5], 少数载流子不能跟随交流信号, 因此对电容起主要作用的是多数载流子, 但是在反型情况下, 少子在反型层会随交流信号发生再分布^[6]。

三、实 验

用 $x=0.2\sim 0.56$ 的 N 型和 P 型 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 材料为衬底, 用阳极氧化膜和硫化锌组成双层结构作为介质层, 制作 MIS 器件。首先在经过适当处理的 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 表面生长一层厚度为 $70\sim 100\text{nm}$ 的阳极氧化膜, 然后在上面淀积厚度为 $200\sim 400\text{nm}$ 的 ZnS 介质层。再在介质膜表面淀积金属 Au 作为器件的栅极, 采用光刻技术限定金属栅面积, 一般为 $1\sim 2\times 10^{-3}\text{cm}^2$ 。

将样品装入变温杜瓦瓶或致冷机, 在 $26\sim 200\text{K}$ 温度范围内测量样品的 $C-V$ 和 $G-V$ 特性, 测量频率范围为 $20\sim 10\text{MHz}$, 信号幅度限制在 10mV 以下。测量工作是用 MODEL 410 电桥和自制的 MIS 器件自动测量系统完成的。

四、结果和讨论

图 1 为 D8121-1-1 编号样品 ($x=0.3$) $Hg_{1-x}Cd_xTe$ MIS 器件的 $C-V$ 曲线。由图中清楚地看出, 当测量频率 f 从 20Hz 向 10MHz 变化时, $Hg_{1-x}Cd_xTe$ MIS 器件的 $C-V$ 特性从低频形式向高频形式变化, 测量时, 电压扫描方向是从右(正电压方向)向左(负电压方向)进行的。图 1 还表明了由于 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 样品的导带非抛物性和载流子简并、引起的积累区 $C-V$ 曲线的电容慢饱和效应, 给出了理论计算 $C-V$ 曲线和实验 $C-V$ 曲线的比较。计算分

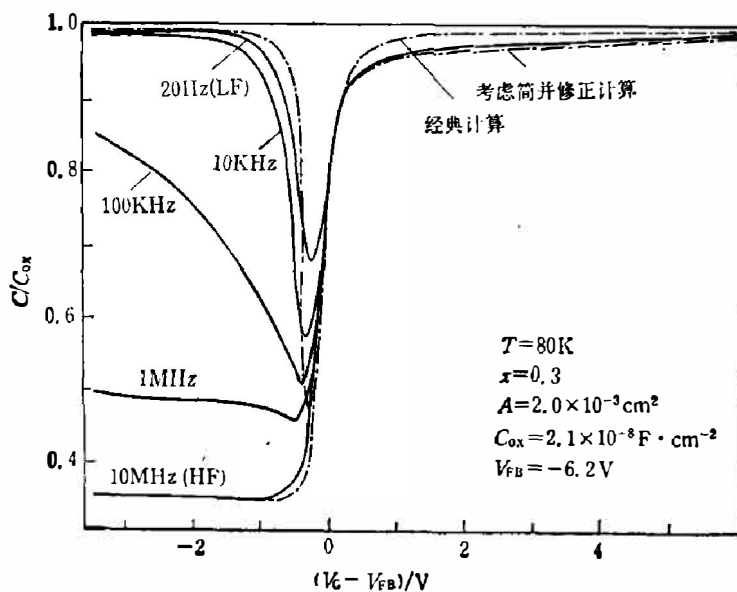


图 1 N 型 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ MIS 器件的归一化变频 $C-V$ 曲线(图中的虚线为理论计算曲线, 实线为实验数据)

Fig. 1 Normalized $C-V$ curves of N-type $Hg_{1-x}Cd_xTe$ MIS device, solid lines are the measured results and dashed lines are the calculated results.

为两种情况，即经典计算和考虑了 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 导带非抛物性及简并修正的计算。显然，考虑了非抛物性和简并修正之后的计算结果与实验符合得好一些。高频曲线的计算考虑了反型层少数载流子再分布效应的影响，平带电压 $V_{FB} = -6.2\text{V}$ 。若不考虑金属 Au 与半导体 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 之间的功函数差，或者将其影响折换成固定正电荷，则绝缘层中平均固定正电荷密度为 $8.2 \times 10^{11}\text{cm}^{-2}$ 。实验还发现，当栅压从正到负和从负到正两个方向扫描时，出现了由慢界面陷阱造成的 $C-V$ 曲线上的滞后效应，滞后平带电压的变化 $\Delta V_{FB} = 0.35\text{V}$ ，相应于慢空穴陷阱密度 $4.6 \times 10^{10}\text{cm}^{-2}$ 。对 D812-1-1 样品还用高频-低频电容组合方法计算了界面态密度在禁带中的分布(参见图 2)。算得最小界面态密度为 $1.7 \times 10^{11}\text{cm}^{-2}\cdot\text{eV}^{-1}$ ，反型层最大耗尽区宽度为 $1.3\mu\text{m}$ 。

对 D8121-1-1 样品的变温测量测得的 $C-V$ 曲线示于图 3。随着温度从 80K 升高到 175K，在 $f=1\text{MHz}$ 频率下的 $C-V$ 曲线由高频形式向低频形式过度。这是由于温度升高后，少子响应速度逐渐加快，已能够跟上交流信号响应的缘故。

图 4 为 SR8312-13 编号 ($x=0.56$) P 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 样品，在 80K 下频率为 10KHz 和 1MHz 时的 $C-V$ 关系，呈现出高频特性。但是在积累区的电容值低于绝缘层电容 C_{ox} ，这是

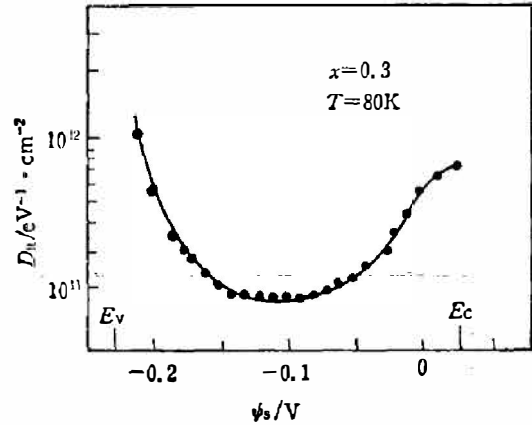


图 2 采用组合高频-低频电容方法算得的图 1 样品的快界面态密度 D_s 在禁带中随表面势 ψ_s 的分布

Fig. 2 Distribution of fast surface state density D_s vs surface potential ψ_s over the band-gap which is calculated by the method of combining high and low frequency capacitances.

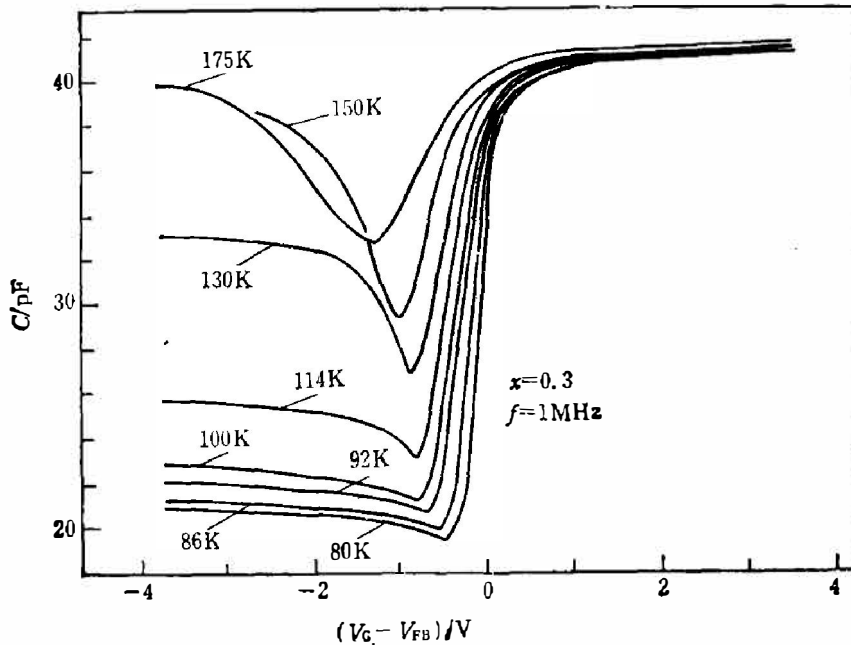


图 3 图 1 样品的一组变温 $C-V$ 曲线

Fig. 3 $C-V$ curves measured at different temperatures.

由于样品中存在一定大小的串联电阻 R_s 。为了消除体串联电阻的影响,得到正确的 MIS 器件高频 $C-V$ 曲线,必须对测得的高频曲线进行修正^[7]。修正后的 $C-V$ 曲线在图 4 中用虚线表示。用最小电容的精密近似方法拟合高频 $C-V$ 曲线,得到该样品的空穴浓度为 $P=1.1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 。这一实验结果表明 $C-V$ 特性可用来测定材料的掺杂浓度,特别是对于低浓度 P 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料更显得有用,因为这时由于混合导电的影响会使通常的霍尔测量方法难以分析。

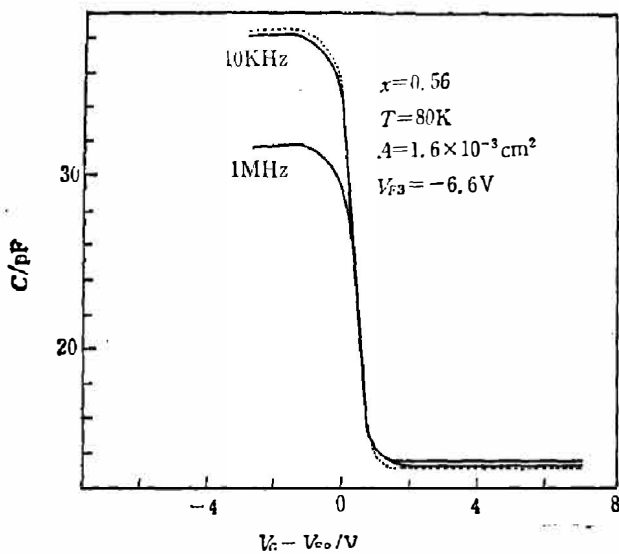


图 4 实测的 P 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ MIS 器件的 $C-V$ 曲线(实线)和考虑串联电阻修正后的计算曲线(虚线)

Fig. 4 Measured (solid lines) and calculated after series resistance correction (dashed line) $C-V$ curves of P-type $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ MIS device.

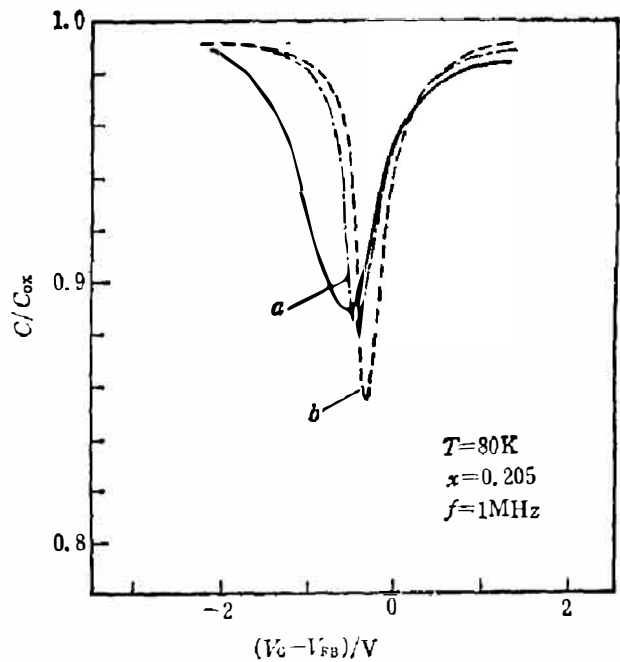


图 5 a 实线为 N 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ MIS 器件的归一化 $C-V$ 曲线, a 为考虑快表面态在禁带中均匀分布 ($D_{it}=2 \times 10^{11} \text{eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) 的理论计算曲线, b 为不存在快表面态的理论计算曲线

Fig. 5 Normalized $C-V$ curves (solid line) and theoretically calculated curves with fast surface state density $D_{it}=2 \times 10^{11} \text{eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ a and $D_{it}=0$ (b) for N-type $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ MIS device.

图 5 为编号 SR8311-17 ($x=0.205$) N 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 样品的 $C-V$ 特性曲线。和前面的样品相比,这是一个禁带更窄 (80K 、 $E_g \sim 0.1 \text{eV}$) 的长波器件。图中的实线为实验曲线,虚线 (a) 为理论计算曲线 (计算中载流子浓度取 $n_{n0}=2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$)。实验发现,即使在 1MHz 的频率下, $C-V$ 曲线仍呈现低频特性,而且 $C-V$ 曲线的变化区域明显展宽,即从积累变为反型,实验曲线比理论曲线经历的电压范围更大。我们认为,与 $x=0.3$ 的短波器件相比,长波器件禁带较窄,载流子寿命更短,因而少子的频率响应特性也加快, $C-V$ 特性变为低频形式,而较高密度的界面态 (载流子更容易与界面态发生电荷交换) 则可能是造成 $C-V$ 特性展宽的原因。图 5 中虚线 b 是考虑了界面态影响后的理论计算结果,计算中假设界面态为在禁带中均匀分布的施主能级,界面态密度取 $2 \times 10^{11} \text{eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。从图 5 中还可看出,考虑界面态影响后的理论计算结果与实验曲线符合得好一些,但实际上 MIS 器件中的界面态密度可能比我们计算时所取的值更大一些,而且存在受主能级,其影响是不一样的。

图 6 示出了滞后平带电压的漂移量 ΔV_{FB} 与温度的关系。实验表明, 温度越高, 滞后平带电压的漂移量 ΔV_{FB} 越大, 也就是绝缘层中被激活的慢界面陷阱密度越大, 而在低温区域 ΔV_{FB} 值则趋于饱和。对于编号 SR8312-13 样品, 在整个温度范围内 ΔV_{FB} 均为正值, 表明慢界面陷阱俘获的是空穴, 而对于编号 D8121-1 样品, 在低温区域 $\Delta V_{FB} < 0$, 可能是在低温区该样品的离子漂移或极化效应相对地显得重要的原因。另外, 实验中还发现 $C-V$ 曲线平带电压的漂移量与偏压的极限值有关系。例如对于编号 SR8313-25 的样品, 当偏压从正向负方向扫描时, 平带电压 $V_{FB} = 2.4\text{V}$, 几乎与偏压的极值没有关系, 而当偏压从负向正方向扫描时, 平带电压的大小却与偏压极值密切相关, 当偏压极值 $V_{\max} = \pm 8\text{V}$, 时, 平带电压的漂移量 $\Delta V_{FB} = 1.6\text{V}$ (80K); $V_{\max} = \pm 10\text{V}$ 时, $\Delta V_{FB} = 2.4\text{V}$ 。这显然是慢界面陷阱在起作用, 而且, 随着偏压的增大, 被激活的慢界面陷阱增多, 即被陷阱俘获的空穴数量增多。由于这种慢界面陷阱对外界偏压极为灵敏, 显然对 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 器件的稳定性产生不良影响。

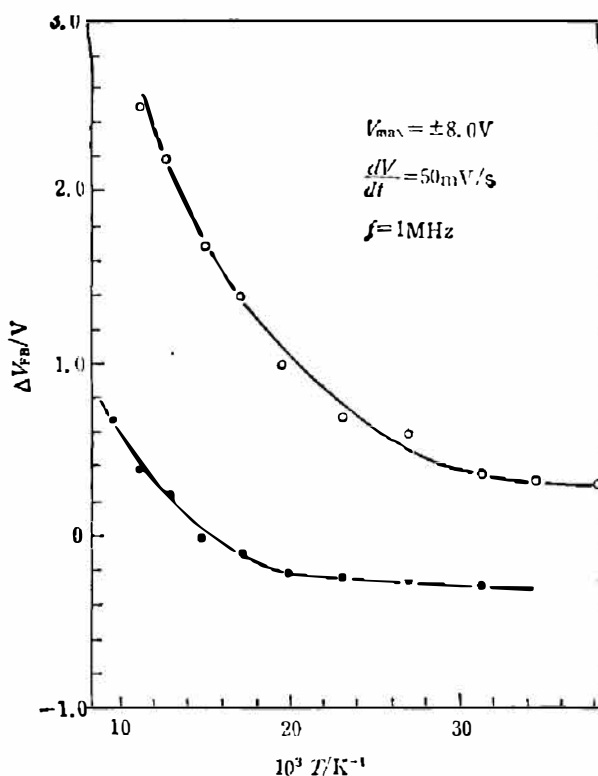


图 6 滞后平带电压 ΔV_{FB} 与温度 T 的关系

- : $x=0.56$ 的 P 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 样品 (SR8312-13);
- : $x=0.27$ 的 N 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 样品 (D8121-1)

Fig. 6 ΔV_{FB} versus T .

- : for $x=0.56$ P-type $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (sample SR8312-13)
- : for $x=0.27$ N-type $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (sample D8121-1).

图 7 是根据 MIS 器件 (D8121-1-1) 样品的高频和低频 $C-V$ 曲线计算的样品掺杂浓度 N_D 从表面到体内随深度 W 的分布, 计算时考虑了近表面处多子及界面态密度的影响^[8]。对于曲线 a, 采用了 P. K. Ziegler 等人^[8] 的公式

$$-\frac{KT}{q} \cdot \frac{C_{HF}^2}{\left(1 - \frac{C_{HF}}{C_{0\epsilon}}\right)\left(1 - \frac{C_{LF}}{C_{0\epsilon}}\right)} \cdot \frac{d}{dV} \left(\frac{1}{C_{HF}^2} \right) = q_1 \left(\frac{W}{\lambda} \right),$$

$$N_D(W) = -\frac{2}{\epsilon_0 \epsilon_s q} \cdot \frac{1 - \frac{C_{LF}}{C_{0\epsilon}}}{1 - \frac{C_{HF}}{C_{0\epsilon}}} \cdot \left[\frac{d}{dV} \left(\frac{1}{C_{HF}^2} \right) \right]^{-1} \cdot q_2 \left(\frac{W}{\lambda} \right),$$

式中 C_{HF} 、 C_{LF} 为测得的高频和低频电容值, V 为偏压, $q_1\left(\frac{W}{\lambda}\right)$ 、 $q_2\left(\frac{W}{\lambda}\right)$ 是关于 W/λ 的函数, λ 为体内非本征德拜长度。通过作 $\frac{1}{C_{HF}^2} - V$ 图, 从其斜率可求出 V 与 $\frac{W}{\lambda}$ 关系, 进而求出 $N_D(W)$ 与 W/λ 关系。计算结果表明, 从表面向体内延伸, 没有发现掺杂浓度的分布有重大变化, 这说明我们的工艺过程没有引起表面处明显的组份偏离和掺杂浓度变化。图 7 中曲线 b 是按一般的高频 $C-V$ 特性耗尽区斜率^[9] 计算的结果, 可以看出, 在近表面处, 多子和界面态的影响是不应忽略的。

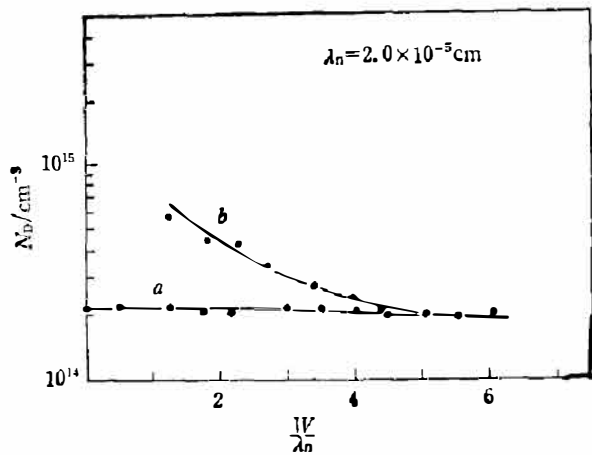


图7 利用测得的 $C-V$ 曲线计算的掺杂施主浓度 N_D 随深度 W/λ_n 的分布
 Fig. 7 Donor density versus depth from the interface calculated with $C-V$ curves.

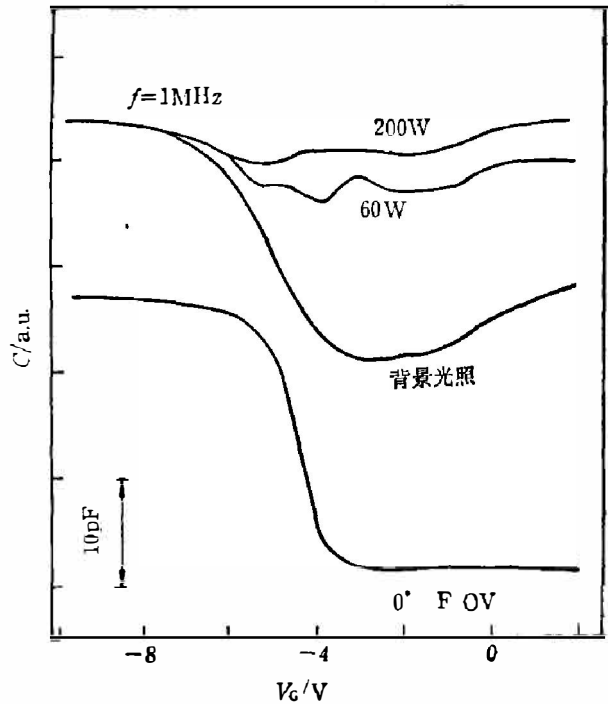


图8 存在光照条件下的P型 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ MIS 器件的 $C-V$ 曲线
 Fig. 8 $C-V$ curves of P-type $Hg_{1-x}Cd_xTe$ MIS device measured at light exposure.

前面所有的测量都是在暗背景的条件下进行的。而图8则是编号SR8312-13P型样品在背景辐射或有光照条件下的 $C-V$ 特性曲线。很明显,光照的结果使得 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 器件的 $C-V$ 特性由高频形式向低频形式转化,而且随着光照的加强,这种影响更加强烈。表明了光照是一种十分有效的少子暗电流来源。

参 考 文 献

- [1] Sze S. M., *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd Edition, Wiley, New York, 1981, P. 362.
- [2] 郭维廉, 硅-二氧化硅界面物理, 国防工业出版社, 1982, P.36.
- [3] Michael M., Leonard W. F., *Solid States Electronics*, 17(1974), 71.
- [4] Kinch M. A., in *Semiconductors and Semimetals*, Academic, New York, 1981, P. 313.
- [5] Bazovkin V. M., Kurushev G. L., Polovinkin V. G., *Pyhs. Stat. sol.*, (a)74(1982), 297.
- [6] Nicollian E. H., Brews J. R., *Mos Physics and Technology*, Wiley, New York, 1982, P. 156.
- [7] *ibid.*, P. 222.
- [8] Ziegler P. K., Klausmann E., Kar S., *Solid State Electronics*, 18(1975), 189.
- [9] Nicollian E. H., Brews J. R., *Mos Physics and Technology*, Wiley, New York, 1982 P. 383.

CAPACITANCE-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ MIS DEVICES

HUANG HE, TONG FEIMING, TANG DINGYUAN
(*Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

The C-V characteristics of N- and P- type $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.2\sim 0.56$) MIS devices fabricated with double dielectric layers consisting of anodic oxide and ZnS are studied. The nonparabolicity and degeneracy of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ conduction band are taken into account in the theoretical treatment based on Kane model. In calculating high frequency capacitance, the redistribution of minority carriers in the inversion layer is also considered. The C-V measurements are carried out within the frequency range of 20Hz \sim 10MHz and the temperature range of 26 \sim 200K. For $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ MIS device, the results at 80K show that the fixed positive charge density is $8\sim 10\times 10^{11}\text{cm}^{-2}$, slow interface trap density $4\sim 10\times 10^{10}\text{cm}^{-2}$, and minimum fast surface state density $1.72\times 10^{11}\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$.

* Project partly supported by the Science Fund of the Chinese Academy of Sciences.