

$\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}/\text{SiO}_2$ 与 $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的 界面性质

江若璠 郑有焯 傅 浩 邵建军

(南京大学物理系)

黄 善 祥

(南京电子器件研究所)

1988年8月19日收到

本文研究了 $\text{GaInAs}/\text{SiO}_2$ 与 $\text{GaInAs}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的界面性质。采用 PECVD 技术以 TEOS 为源以及采用 MOCVD 技术以 $\text{Al}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ 为源在 $n^+\text{-InP}$ 衬底的 $n\text{-Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ 外延层上淀积了 SiO_2 和 Al_2O_3 , 制备成 MIS 结构。结果表明这些 MIS 结构具有良好的 $C\text{-}V$ 特性, $\text{SiO}_2/\text{GaInAs}$ 界面态密度最低达 $2.4 \times 10^{11} \text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$, 氧化物陷阱电荷密度达 $10^9 \sim 10^{10} \text{cm}^{-2}$, 观察到 $\text{GaInAs}/\text{SiO}_2$ 结构中的深能级位置为 $E_C - E_T = 0.39 \text{eV}$, $\text{GaInAs}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 结构中的深能级位置为 $E_C - E_T = 0.41 \text{eV}$ 。

主题词: MIS 结构, 等离子增强化学汽相淀积, 金属有机化合物化学汽相淀积, $C\text{-}V$ 特性, 深能级瞬态谱, 界面态, 氧化物陷阱电荷, 深能级。

一、引 言

近年来, GaInAs 三元化合物半导体的研究受到国内外的重视, 因为这种材料具有比 GaAs 、 InP 更高的电子迁移率、大的饱和漂移速度以及具有合适的禁带宽度, 它是制作高速、微波、光电器件的有潜在前景的新型材料^[1-4]。由于 GaInAs 与绝缘层之间具有较低的界面态密度, 适于发展绝缘栅场效应器件, 而发展 GaInAs 场效应器件的关键在于 GaInAs 上绝缘层的生长方法以及 GaInAs 与栅绝缘层之间的良好的界面性质。

本文报道了 $\text{Al-SiO}_2\text{-GaInAs}$ 和 $\text{Al-Al}_2\text{O}_3\text{-GaInAs}$ 两种 MIS 结构的样品制备以及用高频 $C\text{-}V$ 、准静态与高频 $C\text{-}V$ 联合测量和深能级瞬态谱 (DLTS) 测量对其界面性质的分析研究。

二、样品制备

为了研究 $\text{GaInAs}/\text{SiO}_2$ 和 $\text{GaInAs}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 界面性质, 需要制成 GaInAs MIS (金属-绝缘层-半导体) 结构。

在 $\langle 100 \rangle$ 晶向掺 Sn 的 $n^+\text{-InP}$ 衬底上用氯化物汽相外延方法生长了 $n\text{-Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$

层^[6]。外延层厚度 4—7 μm ，载流子浓度为 9×10^{14} — $8 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 。

在 GaInAs (为简洁起见,以下 Ga, In 的脚标 0.47、0.53 就不再写上)外延层上用等

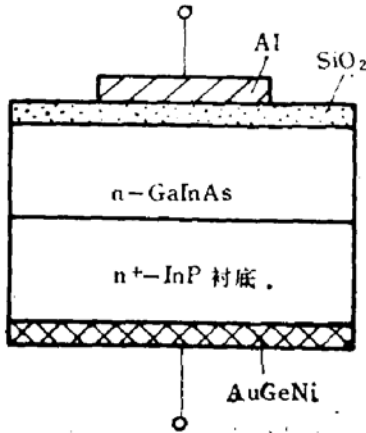


图 1 Al-SiO₂-GaInAs MIS 结构剖面示意图

离子增强化学汽相淀积 (PECVD) 技术以正硅酸乙酯 (TEOS: tetraethoxy-silane) 为源,在氧气氛的辉光放电等离子区中淀积 SiO₂ 膜^[6]。淀积条件为: 样品温度 250—300 $^{\circ}\text{C}$, 产生等离子体的射频功率 20W, TEOS 温度 20 $^{\circ}\text{C}$ 。GaInAs 外延片在淀积前用常规的有机溶剂甲苯、丙酮、乙醇等清洗后,进炉前在 HF:H₂O = 1:1 的溶液中漂 30 秒,以去除表面氧化物薄层。SiO₂ 膜的淀积厚度为 1000—2400 \AA 。淀积后紧接着在原炉温(250—300 $^{\circ}\text{C}$)下 N₂ 气氛保护中退火 20 分钟。

Al₂O₃ 膜是用 MOCVD 技术以异丙醇铝 Al(OC₂H₅)₃ 为源在卧式、冷壁、正压的反应系统中淀积在 GaInAs 外延片上的^[7]。

在淀积过程中,取淀积温度为 300 $^{\circ}\text{C}$ 。GaInAs 外延片进入系统淀积前的清洗同前述淀积 SiO₂ 膜的一样。淀积 Al₂O₃ 膜后,紧接着在高纯 N₂ 气氛中 300 $^{\circ}\text{C}$ 下退火 20 分钟。Al₂O₃ 膜厚 1000—2000 \AA 。

GaInAs 外延层上绝缘膜淀积完毕后,在绝缘膜 SiO₂ 和 Al₂O₃ 表面真空蒸发 Al 为金属栅电极,样品衬底 (n⁺-InP) 的背面用电子束蒸发 AuGeNi 合金,并在 400 $^{\circ}\text{C}$ 、N₂ 气氛中合金化 2 分钟形成欧姆接触。这样就制成了 Al-SiO₂-GaInAs 和 Al-Al₂O₃-GaInAs 两种 MIS 样品。其结构剖面示意图见图 1。

三、GaInAs MIS 结构的 C-V 特性

采用高频 C-V 测量:准静态与高频 C-V 联合测量来表征实验制取的 GaInAs MIS 结构的界面电学特性。

1. Al-SiO₂-GaInAs MIS 结构的高频 C-V 特性

图 2 是 Al-SiO₂-GaInAs MIS 结构的典型高频(1MHz)C-V 曲线。可以看到,C-V 曲线光滑,呈现出典型的积累、耗尽、反型特征,没有通常因界面态密度过高引起的曲线畸变,为一较理想的 C-V 曲线。

C-V 曲线的最小电容 C_{min} 为 52pF,与理论计算结果 49pF 基本相符,表明该 MIS 结构没有出现界面态密度过高引起的对费米能级的钉扎现象。

理论计算出 Al-GaInAs 功函数差 ϕ_{MS} 为 -0.38V,而实验测得的平带电压 V_{FB} 为 -0.5V,由公式

$$V_{FB} = \phi_{MS} - \frac{Q_f}{C_i}$$

(式中 C_i 表示单位面积绝缘层电容)可知 SiO₂ 膜中(包括 SiO₂/GaInAs 界面)氧化物陷阱电荷 Q_f 为正电荷,估算出其密度为 $2 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$ 。对一系列的样品测试表明, SiO₂

膜中氧化物陷阱电荷绝大多数为正,且密度不很高,在 $10^9-10^{10}cm^{-2}$ 范围。

一般化合物半导体材料的 MIS 电容,其 $C-V$ 曲线通常都存在滞后现象。这种现象将导致制成的场效应器件电学性能的不稳定,这是目前发展化合物半导体 MIS 器件碰到的困难问题。滞后量的大小与绝缘层的生长方法,工艺处理有很大关系。用本实验的淀积和工艺处理方法,可将滞后量减到相当小,如图 2 所示,滞后量 $<0.1V$ 。 $C-V$ 曲线的滞后方向是顺时针的,反映了滞后是由界面慢陷阱态造成的。

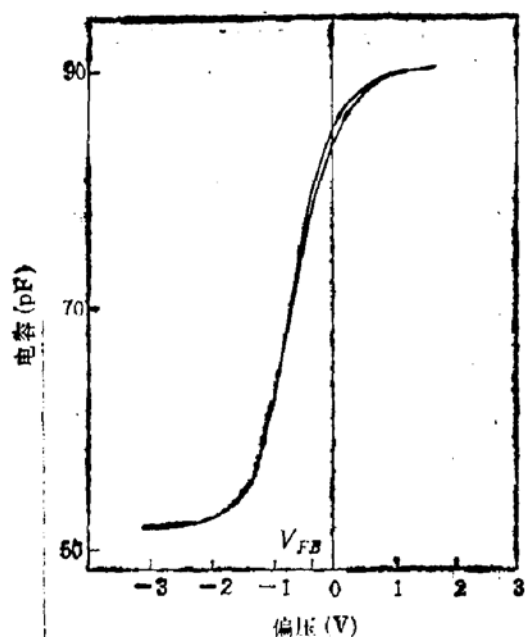


图 2 Al-SiO₂-GaInAs 样品的典型高频 C-V 曲线

$$x_0 = 2400 \text{ \AA} \quad A = 2.83 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \\ N_D = 7.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

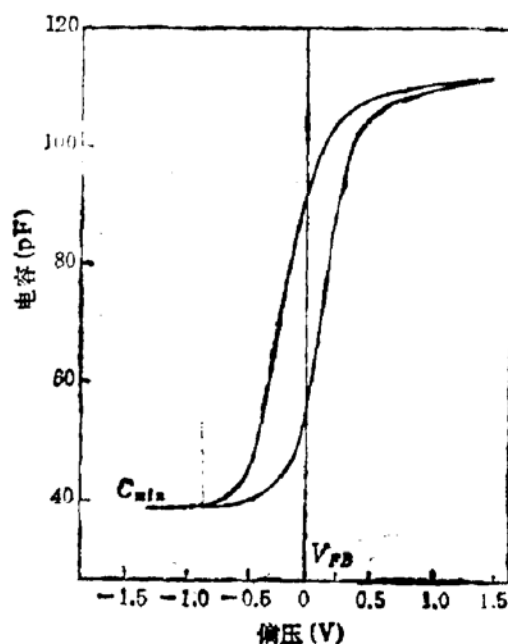


图 3 Al-Al₂O₃-GaInAs 样品的典型高频 C-V 曲线

$$x_0 = 1500 \text{ \AA} \quad A = 2.83 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \\ N_D = 3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

2. Al-Al₂O₃-GaInAs MIS 结构的高频 C-V 特性

图 3 是 Al-Al₂O₃-GaInAs MIS 电容的典型高频 $C-V$ 曲线。可以看到,也属较好的 $C-V$ 特性,但滞后量较上述 Al-SiO₂-GaInAs 样品稍大,这可能与 Al₂O₃ 膜的生长条件有关。理论计算其最小电容为 43pF,与实例的 39pF 基本相符,说明该 MIS 结构亦可受偏压调制到反型状态。

由曲线计算出 $C-V$ 曲线的平带电压为 +0.24V,而该样品的功函数差为 -0.41V,由此可求得 Al₂O₃ 膜的氧化物陷阱电荷为负值,且其密度约为 $2 \times 10^{11}cm^{-2}$,比 Al-SiO₂-GaInAs 样品大些。大量的测试表明,Al₂O₃ 膜中存在负电荷,前述 SiO₂ 膜中却存在正电荷,两者是不相同的,这与文献报道一致^[9]。可以利用这种性质,做成 SiO₂-Al₂O₃ 复合膜,改变 SiO₂ 或 Al₂O₃ 膜的厚度以自由调整平带电压的正、负数值,从而改变以这种复合膜为绝缘栅的 MIS 器件的阈值电压。

由图 3 看出, $C-V$ 曲线的滞后方向仍为顺时针,滞后量稍大,约有 0.3V,说明界面慢陷阱密度较 GaInAs/SiO₂ 的为大。

对上述两种 GaInAs MIS 结构的 $C-V$ 测量改变了偏压的扫描时间,发现当扫描时间加长, $C-V$ 滞后量减小,图 2、图 3 所示曲线偏压扫描半周期是 20 秒,当扫描半周期

加长到 100 秒以上, $C-V$ 滞后量减小一半以上, 但不能完全消除。这说明界面慢陷阱态的时间常数大小不等, 大部分在 100 秒以内。

3. Al-SiO₂-GaInAs MIS 结构的界面态

为了解 Al-SiO₂-GaInAs 界面的界面态密度及其随禁带中能量的分布, 进行了准静态 $C-V$ 与高频 $C-V$ 联合测量^[9]。一般化合物半导体 MIS 电容常因漏电大很难进行准静态 $C-V$ 测量, 本样品能够测量出准静态 $C-V$ 曲线表明本实验方法淀积的 SiO₂ 膜具有良好的绝缘性能。

图 4 是 Al-SiO₂-GaInAs MIS 样品的准静态与高频 $C-V$ 联合测量结果。其中准静态 $C-V$ 扫描速率为 250mV/S。经计算求得平带到本征能量范围的界面态密度, 图 5 给出界面态密度 N_{ss} 随能量 $E_c - E_v$ 的分布曲线。图 5 指出, 靠近带边处界面态密度 N_{ss} 较高, 随着指向带隙中央, 界面态密度降低, 经过一个最低点 (N_{ss} 为 $2.4 \times 10^{11} \text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$) 后, N_{ss} 又有些回升。这种分布与一般的界面态分布一致。

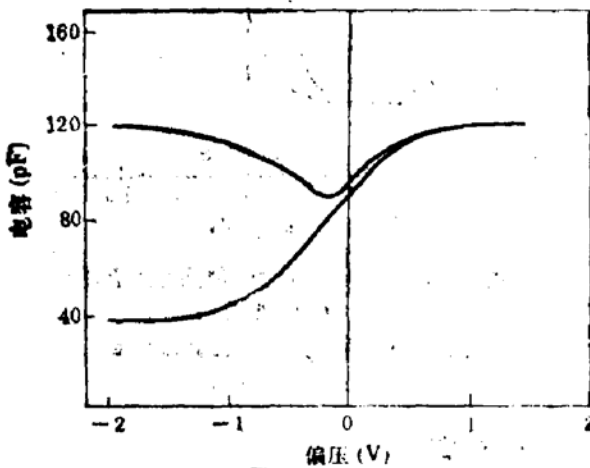


图 4 Al-SiO₂-GaInAs 样品的准静态与高频 $C-V$ 联合测量曲线

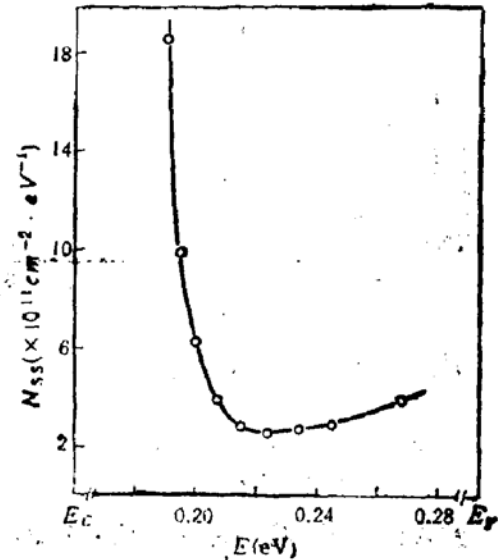


图 5 GaInAs/SiO₂ 界面态密度随能量的分布曲线

对以上两种 GaInAs MIS 样品的 $C-V$ 测量结果看出, SiO₂/GaInAs 和 Al₂O₃/GaInAs 界面, 特别是前者, 其界面态密度较低, 平带电压较低, 滞后较小, 说明 GaInAs 材料与绝缘膜 SiO₂、Al₂O₃ 的界面性质比 InP 的相应的绝缘膜界面性质更为优良^[6,7], 这给研制具有更高质量的 GaInAs MIS 场效器件带来希望。GaInAs 材料比 InP 优越, 可能是 GaInAs 与 SiO₂、Al₂O₃ 之间的晶格失配小, 汽相外延层 GaInAs 表面晶体缺陷少等原因, 这方面的工作有待于进一步分析研究。

四、GaInAs MIS 结构的 DLTS 测量与分析

为了进一步研究 GaInAs MIS 结构界面的电学性质, 用深能级瞬态谱 (DLTS) 测量分析样品的深能级、界面态情况。实验采用 NJ·M·DLTS 谱仪对两种 GaInAs MIS 结构进行了测量, 测量的温度范围为 77—310K。

1. Al-SiO₂-GaInAs MIS 样品的 DLTS 谱

图 6 示出 Al-SiO₂-GaInAs MIS 样品的典型 DLTS 谱图。可以看到, 在 77—310K 温度范围内出现一个明显的电子陷阱谱峰。为了判别该峰是由深能级还是界面态产生的, 做了下列测量: 改变偏压 V_r (V_p 不变, 取为零伏); 改变 V_p (V_r 不变, 取为刚反型时电压 -1.8V), 都发现谱峰的温度位置几乎不变, 仅峰的高度发生了变化(见图 7(a), (b)), 表明所观察到的谱峰是由 SiO₂/GaInAs 结构中的深能级引起的。这是因为改变 V_p 或 V_r , 就改变了空间电荷区宽度或能带的弯曲程度, 由于界面态在禁带中是连续分布的, 因而 V_p 或 V_r 的改变不仅使谱峰的高度会变化, 而且谱峰位置会发生移动。而对于深能级, 如果是单一能级, 在某一温度下的发射率是相同的, 与偏压无关, 改变 V_r 或 V_p 只会引起峰值高度变化而不会引起峰值温度位置的变化。

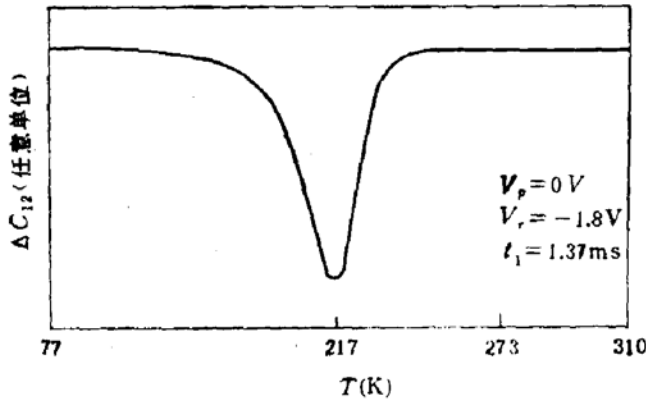


图 6 Al-SiO₂-GaInAs 样品的典型 DLTS 谱图

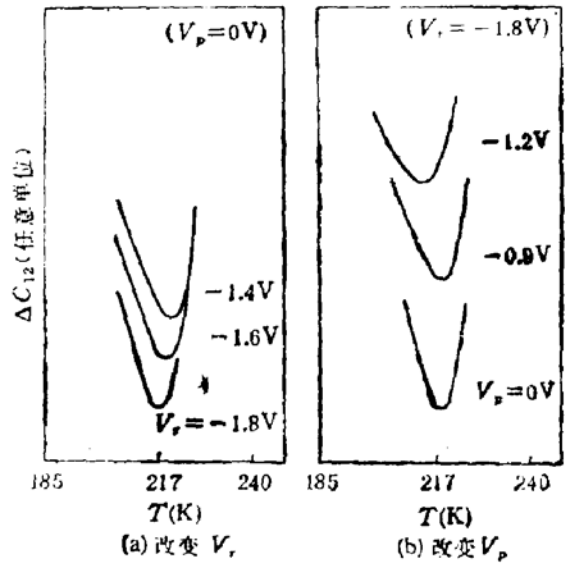


图 7 Al-SiO₂-GaInAs 样品, 分别改变 V_p 和 V_r , DLTS 谱峰的变化图

通过改变率窗进行测量, 并根据下列关系式计算出深能级参量^[10]:

深能级位置
$$E_C - E_T = k \cdot \frac{T_p' \cdot T_p''}{\Delta T_p} \cdot \ln \left[\frac{t_1}{t_1''} \right]$$

俘获截面
$$\sigma_n(E_T, T_p'') = \frac{\ln \frac{t_2}{t_1}}{(v_{th} \cdot N_c) \tau_p'' \cdot (t_2' - t_1')} \cdot \left[\frac{t_1}{t_1''} \right]^{\frac{T_p'}{\Delta T}}$$

深能级密度
$$N_T = \frac{8 \Delta C_p^0}{C} (N_D - N_A)$$

式中 k 为波兹曼常数; t_1 、 t_2 为对瞬态发射电容 $\Delta C(t)$ 取样的时刻, 在该仪器中给定 $t_2 = 2t_1$; DLTS 谱讯号 $\Delta C_{12} = \Delta C(t_1) - \Delta C(t_2)$; ΔC_p^0 为谱峰的高度; T_p' 、 T_p'' 为两次取样时间(即两个率窗) t_1 、 t_1'' 所对应的两个深能级谱峰的温度位置; ΔT_p 为这两峰的温度差即 $\Delta T_p = T_p(t_1'') - T_p(t_1')$; v_{th} 为电子的平均热运动速度; N_c 为导带有效态密度。

在计算中取样品的参数为: $N_D = 7.8 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$, $v_{th} = 1.17 \times 10^7 \text{cm/s}$, $N_c = 4.7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, $t_2 = 2t_1$, 求得 GaInAs/SiO₂ 结构的深能级参数为:

$$E_C - E_T = 0.39\text{eV}$$

$$\sigma_n = 2.7 \times 10^{-17}\text{cm}^2$$

$$N_T = 0.3N_D = 2.3 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$$

2. Al-Al₂O₃-GaInAs MIS 样品的 DLTS 谱

对 Al-Al₂O₃-GaInAs MIS 样品进行了 DLTS 测量, 得出如图 8 的典型谱图。在

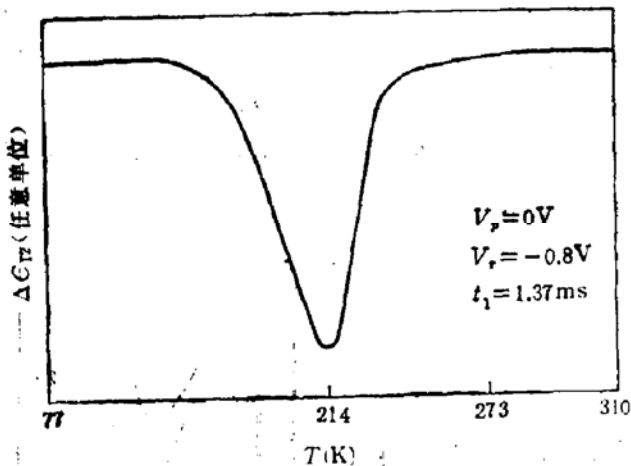


图8 Al-Al₂O₃-GaInAs 样品的典型 DLTS 谱图

77—310K 范围也只出现一个电子陷阱峰。用与上述同样的方法改变 V_g 及 V_r 大小, 谱峰位置不变, 从而判断该峰是深能级的贡献。

经测量和计算, 求得 GaInAs/Al₂O₃ 结构中的深能级参数如下:

$$E_C - E_T = 0.41\text{eV}$$

$$\sigma_n = 5 \times 10^{-17}\text{cm}^2$$

$$N_T = 0.1N_D = 3 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$$

由于 Al-SiO₂-GaInAs 和 Al-Al₂O₃-GaInAs 两种 MIS 结构中的深能级还未见有报道, 所以本文测得的结果还不能作比较, 但值得指出的是, 测得两种样品的深能级位置和俘获截面都很相近, 只是能级密度有些差异, 这表明深能级的产生与绝缘膜的类型关系不大, 只是影响其深能级密度。因此, 可以认为所测到的深能级可能是 GaInAs 表面本征缺陷所致, 详细机制有待进一步研究。

在 DLTS 测量中, 两种样品的界面态峰未能出现, 我们认为可能是在这个温度范围里界面态密度比深能级密度低得多, 界面态讯号相对地很弱, 因此, 在谱图中未能反映出来。

五、结 论

1. Al-SiO₂-GaInAs, Al-Al₂O₃-GaInAs 两种 MIS 结构的样品具有良好的 $C-V$ 特性: $C-V$ 曲线光滑, 无明显畸变, 界面态密度不高 ($2.4 \times 10^{11}\text{cm}^{-2}\cdot\text{eV}^{-1}$), 平带电压低 ($\pm 0.5\text{V}$ 以内), 曲线滞后量小 (0.4V 以内, SiO₂ 样品更小), SiO₂ 膜中氧化物陷阱电荷为正, 其密度 $10^9-10^{10}\text{cm}^{-2}$; 而 Al₂O₃ 膜中氧化物陷阱电荷为负, 密度为 $10^{11}-10^{12}\text{cm}^{-2}$ 。以上结果表明本实验制得的 GaInAs/SiO₂, GaInAs/Al₂O₃ 界面电学性能良好, 为制备 GaInAs MIS 场效应器件打下了基础。

2. GaInAs 材料与 SiO₂、Al₂O₃ 的界面性能比 InP 材料的要优越, 而且 GaInAs 的电子迁移率比 InP 要高, 可以期望, GaInAs MIS 场效应器件在沟道有效电子迁移率、跨导及阈值电压等方面的性能将更优于 InP MISFET^[1]。

3. 对 GaInAs/SiO₂ MIS 结构和 GaInAs/Al₂O₃ MIS 结构的 DLTS 测量, 首次观察到分别存在 $E_C - E_T = 0.39\text{eV}$ 和 $E_C - E_T = 0.41\text{eV}$ 的深能级。

4. 良好的 GaInAs MIS 结构的 $C-V$ 特性表明, 文中所用的正硅酸乙酯-PECVD 技

术淀积 SiO_2 膜和异丙醇铝-MOCVD 技术淀积 Al_2O_3 膜对发展 GaInAs MIS 器件是可行的。

本工作得到南京电子器件研究所四室, 南京大学孙勤生副教授、高维忠同志以及原南京大学学生韩平、王仁康的帮助, 在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] P. D. Gardner, S. Y. Narayan and Y. H. Yun, *Thin Solid Films*, **117**, 173(1984).
- [2] C. L. Cheng, A. S. H. Liao, T. Y. Chang, R. F. Leheng, L. A. Coldren and Lalevic, *IEEE Electron Device Lett.*, **EDL-5**, 169(1984).
- [3] J. Selders and Heinz Beneking, *IEEE Electron Device Lett.*, **EDL-7**, 434(1986).
- [4] R. N. Nottenburg, H. Temkin, M. B. Panish and R. A. Hamm, *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 1112(1986).
- [5] 黄善祥, 固体电子学研究进展, **7**, 65 (1987).
- [6] 江若璜, 徐俊明, 刘青淮, 王凯, 郑有料, 半导体学报, **6**, 429 (1985).
- [7] Han Ping(韩平), Zheng Youdou (郑有料) and Jian Ruolian (江若璜), *Asia Pacific Symposium on Surface Physics*, 336, Editor, Xie Xide, World Scientific (1987).
- [8] 梁鹿亭编译, 半导体器件表面纯化技术, 第四部分, 科学出版社, 1979.
- [9] M. Kuhu, *Solid State Electronic*, **13**, 873(1970).
- [10] N. M. Johnson, *J. Vac. Sci Technol.* **21**, 303(1982).
- [11] 江若璜, 郑有料, 王仁康, 半导体学报, **9**, 451 (1988).

Interface Properties of $Ga_{0.47}In_{0.53}As/SiO_2$ and $Ga_{0.47}In_{0.53}As/Al_2O_3$

Jian Ruolian, Zheng Youdou, Fu Huao and Shao Jianjun

(Department of Physics, Nanjing University)

Huang Shanxiang

(Nanjing Electronic Devices Institute)

Abstract

The interface properties of GaInAs/ SiO_2 and GaInAs/ Al_2O_3 are studied. The Al- SiO_2 -GaInAs and Al- Al_2O_3 -GaInAs MIS structures were fabricated by PECVD SiO_2 using TEOS and MOCVD Al_2O_3 using $Al(OC_2H_5)_3$ on n-type $Ga_xIn_{1-x}As$ ($x=0.47$) and on n^+ -InP substrate, respectively. The results show that these MIS structures exhibit ideal $C-V$ characteristics. The interface state density of $2.4 \times 10^{11} \text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ and oxide trapped charge of $10^9 \sim 10^{10} \text{cm}^{-2}$ were obtained for these MIS structures. The deep levels at $E_c - E_T = 0.39 \text{eV}$ and at $E_c - E_T = 0.41 \text{eV}$ were observed in GaInAs/ SiO_2 and in GaInAs/ Al_2O_3 , respectively.

KEY WORDS: MIS Structures, Plasma-enhanced chemical vapor deposition, Metal organic chemical vapor deposition, $C-V$ characteristics, Deep level transient spectroscopy, Interface state, Oxide trapped charge, Deep level