

III-V 族化合物半导体的氧化膜及其界面性质研究的进展

陈克铭 仇兰华

(中国科学院半导体研究所)

III-V 族化合物半导体具有迁移率高、有效质量小等优点,因此它们的氧化膜及其界面性质的研究就成为当前研究的重要课题之一。它将为微波 MOS 场效应晶体管向毫米波段发展,为低功耗超高速逻辑集成电路研制开拓新的途径。现在制备的氧化膜大体上可分为本体氧化膜和复合氧化膜两大类。对 GaAs 的氧化膜及其界面性质已有大量的研究并取得了一定的进展。以 InP 为基础的化合物半导体的研究开始得晚一些,但是却有后来居上之势。本文介绍 GaAs 的氧化膜及其界面性质的研究; InP 的氧化膜及其界面性质的研究; GaAs 和 InP 与氧化膜界面性质的比较和几点看法。同时也简略地介绍目前 InGaAs 和 InGaAsP 氧化膜及其界面性质研究的状况。

一、GaAs 的氧化膜及其界面性质的研究

1. 本体氧化膜及其界面的性质

(1) 热氧化膜^[1-3]

III-V 族化合物半导体上所生长的热氧化膜的组分、键和结晶等状况均随生长温度而异,在热氧化膜与化合物的界面处,经常观察到 V 族元素的多余量。热氧化膜的主要成分是 III 族元素氧化物并带有一定量 V 族元素氧化物,原因是 V 族元素氧化物易挥发和它通过已生长的氧化膜的输运比较慢。最佳的氧化膜具有的物理性质见表 1。在 500℃ 以下生长的热氧化膜是无定形结构;高于 500℃ 生长的热氧化膜主要是多晶 β -Ga₂O₃。氧化膜的组分随环境和生长温度而异。最佳热氧化膜是在 As₂O₃/O₂ 气

氛中和在 500℃ 以下生长的。最佳热氧化膜栅 GaAsD¹-MISFET²⁾ 的 C-V 曲线有较小的滞后效应。对于栅宽/栅长为 10 的 FET,源漏电流 $I_{ds} = 3\text{mA}$,夹断电压 $V_p = -5\text{V}$,跨导 $g_m = 1\text{mQ}^{-1}$ 。

(2) 阳极氧化膜^[1,4]

阳极氧化膜的生长条件,特别是溶液的组分和 pH 值、生长温度和电流密度,对氧化膜及其界面性质都有影响。GaAs 的阳极氧化膜是无定形结构。经 X 射线光电子谱 (XPS) 分析表明,氧化膜的体成分由 As₂O₃ 和 Ga₂O₃ 组成,而界面成分是 Ga₂O₃ 和 As 元素,而且过渡区较宽。阳极氧化膜的 P 型 GaAsMIS 结构的 C-V 曲线指出,在 $1 \times 10^6\text{V/cm}$ 下,平带电压位移 ΔV_{fb} 约为 15V,积累区有较大的频率色散。这种 MIS 结构的界面态密度可达 $10^{12}-10^{13}\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ 。经 300—450℃ 退火后,界面处的 As 元素量下降,而膜的电阻率增加为 $10^{15}\Omega\cdot\text{cm}$,击穿电场强度也有所提高,同样的 GaAsMIS 结构的 C-V 曲线的 ΔV_{fb} 从 15V 下降到 1V,频率色散几乎消除,在禁带中间的界面态密度也可以降到约 $10^{11}\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ 。

(3) 等离子体阳极氧化膜^[5]

等离子体阳极氧化是低温生长本体氧化膜的方法。射频等离子体阳极氧化膜的结构是具有玻璃状的无定形结构。它的组分分布和厚度比较均匀。但是在界面处 As 的组分超过 Ga 的组分。等离子体阳极氧化膜的 P 型 GaAsMIS 结构在禁带中间的界面态密度为 $7-10 \times 10^{11}$

1) D——耗尽型模式。

2) MIS——金属-绝缘体-半导体; FET——场效应晶体管。

表1 各种氧化膜的电学性质

性质	膜的种类 半导体种类	阳极	等离子体	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	热氧化膜
		氧化膜	阳极 氧化膜	复合膜	复合膜	氧化膜	
氧化膜的折射率	GaAs	1.8	1.8-1.9	1.46	1.6	1.6	1.7
	InP	1.5-1.7		1.46	1.72	1.7	1.9
	InGaAs	1.82-1.73		1.4			
	InGaAsP	1.65-1.70					
氧化膜的介电常数	GaAs	3.6	6.9-8.5	4.9-5.6	7.7	8-9	3.6-8.3
	InP	4.4		4.4-4.6	7	7.7	
	InGaAs	7.5	7	3.5			
	InGaAsP						
氧化膜的电阻率 $\Omega \cdot \text{cm}$	GaAs	$10^{14}-10^{16}$	退火后 $\frac{10^{14}}{10^{13}}$	$10^{15}-10^{16}$			10^9-10^{11}
	InP	$10^{12}-10^{13}$		$\geq 10^{15}$	$5 \times 10^{10}-10^{12}$		10^8-10^9
	InGaAs		10^{12}				
	InGaAsP						$5-7 \times 10^9$
氧化膜的击穿电场强度 V/cm	GaAs	$4-6 \times 10^7$	$0.5-1 \times 10^8$	5×10^6	7×10^6	4×10^6	$4-6 \times 10^8$
	InP	$3-4 \times 10^7$		5×10^6	1.6×10^6	2×10^6	
	InGaAs	1×10^6	1×10^6	5×10^6			
	InGaAsP	$5-8 \times 10^{16}$					
氧化膜的漏电流密度 A/cm ²	GaAs	$10^{-11}-10^{-9}$	5×10^{-10}		$10^{-14}-10^{-12}$		10^{-8}
	InP		10^{-8}				
	InGaAs						
	InGaAsP						

$\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$, 固定电荷密度为 $1.0-1.5 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$, 积累区频漂小, 但是反型区仍有滞后。而 n 型 GaAs 的 MIS 结构的 C-V 曲线与 p 型 GaAs 不同, 它的积累区频漂大, 没有明显的反型区。经 $300-350^\circ\text{C}$ 氮气中退火, p 型 GaAs 的 MIS 结构在距价带顶 0.5eV 处界面态密度可降低近一个数量级, 有较小的积累区的频漂和反型区的滞后。但是, n 型 GaAs MIS 结构的 C-V 曲线的异常滞后, 即使经 350°C 退火, 也没得到改善, 禁带中间的界面态密度仍为 $10^{15}\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ 。

2. 复合氧化膜及其界面的性质

物理

复合氧化膜是由本体氧化物和另一类氧化物组成, 它可以改善氧化膜及其界面的特性。从广义来说, 在 III-V 族化合物半导体上淀积另一氧化物所形成的氧化膜都是复合氧化膜。

(1) SiO₂ 复合氧化膜^[6]

SiO₂ 复合氧化膜是在 GaAs 本体氧化膜上覆盖一层 SiO₂ 所构成的复合膜。因为经过室温水溶液处理的 GaAs 表面都有 Ga₂O₃ 和很薄的 As₂O₃ 的自然氧化膜, 而淀积 SiO₂ 是在高于室温的温度和在氧的气氛中进行的, 所以淀积 SiO₂ 的过程实质上是以淀积 SiO₂ 为主并伴随着 GaAs 本体氧化的过程, 其中 As-O 键的

As 挥发,氧转移到 Ga 上来而形成附加的 Ga_2O_3 。从 XPS 分析看出, SiO_2 复合氧化膜的过渡区包含 Ga_2O_3 , 而高温淀积的 SiO_2 复合膜的过渡区中 Ga_2O_3 却变成 $\beta-Ga_2O_3$ 或 $GaAsO_4$ 。 $GaAsO_4$ 的结构与 SiO_2 很相似。 SiO_2 复合膜的 P 型 GaAsMIS 结构的界面态密度一般可达到 $10^{11}cm^{-2}eV^{-1}$ 。经 $700^\circ C$ 高温退火的同样复合氧化膜的 P 型 GaAsMIS 结构的界面态密度可下降到 $10^{11}cm^{-2}eV^{-1}$, 同时 $C-V$ 曲线的滞后效应小, ΔV_{fb} 只有零点几伏。

(2) 等离子体阳极氧化铝复合膜^[7,8]

用等离子体阳极氧化技术氧化已淀积在 GaAs 上几百埃厚的铝, 这样形成的氧化膜称为等离子体阳极氧化铝复合膜。实验证明, 在低电流密度下 ($\sim 20\mu A/cm^2$) 产生 Al_2O_3 -本体氧化物的复合膜, 而在高电流密度下 (即 $> 2mA/cm^2$) 形成 GaAs 本体氧化物- Al_2O_3 的复合氧化膜的区别在于, 前者的 Al_2O_3 在表面层, 而后者在内层。上述两种 Al_2O_3 复合氧化膜是过氧化的结果。许多实验结果还表明, 正好将 Al 全部氧化了的膜是 Al_2O_3 氧化膜, 它的组分分布均匀, 过渡区是很陡的, Al_2O_3 也是无定形结构。 Al_2O_3 氧化膜的 P 型 GaAsMIS 结构的固定电荷密度可达到 $10^{10}cm^{-2}$, 界面态密度约 $10^{12}cm^{-2}eV^{-1}$ 。 $C-V$ 曲线的滞后效应很小, 同时频率色散效应也小。

这里给出的 MIS 结构的界面态密度值是从 1MHz 的 $C-V$ 曲线得到的, 对 GaAs 来说, 它们不能反映 GaAs 禁带中界面态的全面状况。

二、InP 的氧化膜及其界面性质的研究

1. 本体氧化膜及其界面的性质

(1) 热氧化膜^[1]

在 $340-400^\circ C$ 下生长的氧化膜组分与生长温度无关, 其成分是由 70—75% 的 In_2O_3 和 25—30% 的 P_2O_5 组成, 并均匀地分布在整个氧化膜中, 同时在膜中还观察到磷元素。整个热氧化膜是无定形结构。在 $450-500^\circ C$ 下生

长的热氧化膜的成分主要是 $InPO_4$, 并具有多晶结构。也有人认为主要是 In_2O_3 并带有磷的氧化物。在 $680-740^\circ C$ 下生长的热氧化膜成分由 In_2O_3 组成。也有人认为是由 95% 的 $InPO_4$ 组成的。热氧化膜的电阻率随生长温度增加而下降, 原因是热氧化膜中缺磷。在 $450-500^\circ C$ 下生长的热氧化膜的 n 型 InPMIS 结构的界面态密度是 $1.3 \times 10^{11}cm^{-2}eV^{-1}$, 而 $680-740^\circ C$ 下生长的热氧化膜的 n 型 InPMIS 结构的界面态密度是 $3.5-4.5 \times 10^{11}cm^{-2}eV^{-1}$, 其界面态密度增加的原因也是界面处缺磷所致。

(2) InP 的阳极氧化膜^[4,9-11]

俄歇电子谱 (AES) 和 XPS 深度分析表明, 虽然溶液的 pH 值对阳极氧化膜体内的 P_2O_5 的浓度和组分的分布均匀性起重要作用, 但是目前在所有的氧化条件 (包括不同的 pH 值溶液) 下生长的阳极氧化膜与 InP 界面的 P_2O_5/In_2O_3 值都恒定, 并与氧化膜的体组分无关。同时, In_2O_3 和 P_2O_5 两种氧化物在界面处会合一起, P_2O_5/In_2O_3 的比值接近 1。整个膜是无定形结构。阳极氧化膜的 n 型 InPMIS 结构的界面态密度 ($\leq 3.6 \times 10^{11}cm^{-2}eV^{-1}$) 的值在 InP 导带下从 0.13eV 到 0.9eV 范围内恒定。对于溶液的 pH 值为 5—7 和电流密度为 1—2 mA/cm² 的阳极氧化膜, 在氢气中经 $200^\circ C$ 退火的 n 型 InPMIS 结构在禁带中间的界面态密度 $\leq 10^{11}cm^{-2}eV^{-1}$, 积累型的有效电子迁移率为 $1500cm^2/V \cdot s$ 。

2. 复合氧化膜及其界面的性质

(1) SiO_2 复合氧化膜^[1,12]

众所周知, 由于 InP 表面的热不稳定性 (在较低温度下磷挥发) 和在 SiO_2 中 In 的扩散比较快, 所以在 InP 上淀积 SiO_2 的衬底温度要低。在 InP 上淀积 SiO_2 的过程是以淀积 SiO_2 为主, 并伴随慢速率的热氧化, 这两个物理过程是同时进行的。当衬底温度高于 $400^\circ C$ 时, 淀积的 SiO_2 与本体界面的过渡区较宽, 其中存在 In_2O_3 和 P_2O_5 , 而 In_2O_3/P_2O_5 比值为 3。衬底温度低于 $400^\circ C$ 淀积的 SiO_2 与 InP 界面过渡区较窄, 界面陡, 在过渡区内有较高浓度的 In_2O_3 。在

SiO₂体内和界面处都没有观察到元素P和P₂O₃。SiO₂复合膜的P型InPMIS结构的最小界面态密度约为 $2 \times 10^{11} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ ，其C-V曲线具有中等滞后。又可实现n沟道反型模式，其反型层迁移率高达 $1000-1850 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，超过Si的20—40%。

(2) 等离子体阳极氧化铝膜及界面的性质^[13]

等离子体阳极氧化铝膜的AES分析表明，它的主要组成是Al₂O₃，而InP的In元素延伸到Al₂O₃膜中去的深度比P的延伸深度要少得多。等离子体阳极氧化铝膜的n型InPMIS结构的界面态密度（在禁带中间）为 $1-4 \times 10^{11} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ 。同时其界面费米能级可在n型InP的几乎整个禁带区内移动，但是存在一些频率色散效应。而增强型的n型InP MISFET的阈值电压 V_t 为0.95—1.2V，而有效迁移率为 $1250-3000 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。

(3) 淀积Al₂O₃所构成的复合氧化膜^[14]

这种复合氧化膜基本上是无定形的Al₂O₃，其过渡区的组分状况尚待研究。淀积Al₂O₃复合膜的n沟InPMISFET的最大直流跨导为63—87ms/mm，而反型层有效电子迁移率为 $2100-2500 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，界面态密度为 $10^{11}-10^{12} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ 。

三、InGaAs的氧化膜及其界面性质的研究

1. InGaAs的本体氧化膜及其界面的性质

(1) InGaAs的阳极氧化膜^[15]

AES和XPS深度分析表明，未经退火的InGaAs阳极氧化膜的体组分是由Ga₂O₃，As₂O₃和In₂O₃组成的，但是氧化膜的组分和各种氧化物的分布都是不均匀的。因此氧化膜的表面缺少As的氧化物，而界面处只有Ga₂O₃存在。即使是经过合适温度退火后的阳极氧化表面，也仍然缺As₂O₃，但是在交界面处上述三种氧化物都能会合一起。同样这种阳极氧化膜也是无定形结构。这种阳极氧化膜的n型

InGaAsMIS结构的界面态密度约为 $2.2 \times 10^{12} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ ，C-V曲线的滞后效应为0.5V。

(2) 等离子阳极氧化膜^[16]

等离子阳极氧化膜的组分分布基本上是均匀的，但是As的浓度是从膜的表面往交界面方向缓慢地增加，而氧的浓度在膜的表面处最大。这类氧化膜也属于无定形结构。经过200°C退火的等离子阳极氧化膜的n型InGaAsMISFET的界面态密度为 $3 \times 10^{12} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ ，阈值电压为1.4V，跨导为4ms/mm，P沟道的空穴迁移率为 $145-160 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，而P型InGaAsMIS结构的界面态密度为 $5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ 。另外经200°C退火可减少C-V的滞后效应。

2. InGaAs复合氧化膜及其界面性质的研究^[15,17]

低温淀积SiO₂的复合氧化膜的大部份区域是纯SiO₂的，其过渡区的宽度小于400Å，并且在过渡区内有Ga₂O₃和In₂O₃及As元素存在。SiO₂复合氧化膜的n型InGaAs的Eⁿ-MISFET的界面态密度在禁带中分布情况是：在2V时，为 $2.5 \times 10^{12} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ ，连续下降（在5V时，为 $2 \times 10^{10} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ ）；跨导为15ms/mm；阈值电压 V_t 为3V左右；有效电子迁移率为 $5200 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ；C-V的滞后效应约为0.3V。SiO₂栅InGaAs的I^p-MISFET的跨导为0.1ms/mm，其空穴有效迁移率为 $150 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。

阳极氧化铝复合氧化膜是阳极氧化形成的Al₂O₃和InGaAs本体氧化膜，这种复合氧化膜也是无定形结构，其内层的本体氧化膜的组分和各种氧化物分布状况尚待研究。阳极氧化铝复合膜的InGaAsMISFET结构的界面态密度在 E_c 为0.057eV处为 $2 \times 10^{13} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ ，而在禁带中间的界面态密度的最小值为 $8 \times 10^{11} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ 。这种绝缘栅的n型InGaAsMISFET的饱和区直流跨导为17ms/mm，而沟道有效迁移率为 $1400 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。

1) E——增强型模式。

2) I——反型模式。

四、InGaAsP 氧化膜及其界面性质的研究

1. InGaAsP 的本体氧化膜及其界面的性质^[18]

采用合适的化学腐蚀方法,在一定的氧化条件下可得到 InGaAsP 的较好的阳极氧化膜。虽然它的表面层仍是由 In_2O_3 和 Ga_2O_3 组成,但是其余很厚的一层全是由 In_2O_3 , Ga_2O_3 , As_2O_3 和 P_2O_5 四种氧化物组成的,并在界面处聚合在一起。这样的界面是很陡的。阳极氧化膜的 n 型 InGaAsPMIS 结构的界面态密度约为 $1.7 \times 10^{12} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ 。

2. InGaAsP 的复合氧化膜及其界面的性质

(1) 低温淀积 SiO_2 复合氧化膜^[19]

对 SiO_2 复合氧化膜的 AES 和 XPS 的组分和各种氧化物作用的深度分析表明,这种复合氧化膜的大部分区域还是纯 SiO_2 ,其过渡区的宽度为 300—400 Å。在过渡区内存在 Ga_2O_3 , In_2O_3 和 P_2O_5 三种氧化物,未观察到 As_2O_3 或 As_2O_5 。 SiO_2 复合氧化膜的 P 型 InGaAsP 的 I-MISFET 的跨导比同类型的 InP 小 25%,即约为 7.5ms/mm。

(2) 淀积 Al_2O_3 复合氧化膜^[19]

淀积 Al_2O_3 复合氧化膜是由 InGaAsP 的本体氧化膜和 Al_2O_3 组成,它们都是无定形结构。关于过渡区的组分和各种氧化物的分布的详细情况尚待研究。淀积 Al_2O_3 复合膜的 n 沟道 InGaAsPMIS 结构的界面态密度为 $1 \times 10^{12} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$,最大 n 沟道有效迁移率为 2300—2600 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。

五、GaAs 的氧化膜和 InP 的氧化膜及其界面性质的比较

综上所述可知,由于在化合物半导体上淀积另一类氧化膜时总伴随着本体氧化膜的生长,并构成复合氧化膜,所以研究化合物半导体本体氧化膜的性质是最基本的研究。同时从表 1 看出,InP 的本体氧化膜的绝缘性能比 GaAs

的本体氧化膜要差。漏电大是 InP 本体氧化膜的一个缺点,但是这个缺点是可以克服的。关于其界面性质,我们将重复性比较好的 GaAs, InP, InGaAs 和 InGaAsP 的 MIS 结构所测量的界面态密度及其分布结果示于图 1。从图 1 可以看出,各类氧化膜的 GaAs MIS 结构界面态密度一般都比 InP 的高达近一个数量级,而且 GaAs 禁带中保持着比较低的界面态密度分布的区域窄,而 InP 的分布区域比较宽,亦即 GaAs 中表面势的总变化量仅限在禁带下半部的 0.4eV 范围内,而 InP 的表面势的总变化量至少在禁带中有 1eV 左右的范围内。所以从总体来看,特别是 n 型 GaAs 界面态密度高和表面势在禁带中运动范围窄构成了 GaAs 的缺点,而这个缺点还不容易克服。这说明界面性质与半导体材料的关系非常密切。为了弄清这种关系,首先必须了解界面态是怎样引起的。

按 Spicer 统一缺陷物理模型,界面态是由界面晶体缺陷引起的。对我们研究的对象来说,界面晶体缺陷有三种:界面处组分的偏离、界面处晶体断键和晶格失配。晶体断键和晶格失配是所有氧化膜与所有化合物半导体界面都有的,它不能说明上面实验的结果(InP 的界面态密度比 GaAs 的小近一个数量级)。关于界面化学组分偏离所引起的界面晶体缺陷,近年来的 AES 和 XPS 分析表明,各种方法生长的 InP 本体氧化膜中的 In_2O_3 和 P_2O_5 都以恒定比值 ($\text{In}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$ 比值) 在界面处会合一起,比值接近于 1,这有利于减少界面晶体缺陷。而且在膜的体内, In_2O_3 和 P_2O_5 的分布也是比较均匀的。而 GaAs 本体氧化膜的界面处只有 Ga_2O_3 , 这使界面处 Ga/As 值偏离 1,并导致较多的界面晶体缺陷。因本体氧化膜与 InP 界面基本上不存在组分偏离的问题,所以导致 InP MIS 结构界面态密度比 GaAs MIS 结构的界面态密度低。从固有特性来看,它们之间也有很多差别。组成 InP 的 In 和 P 两种元素的质量差别大,而组成 GaAs 的两种元素质量差别小; InP 和 GaAs 的表面重构不同,它们的离子性也不同。此外,在 GaAs 和 InP 的复合氧化膜

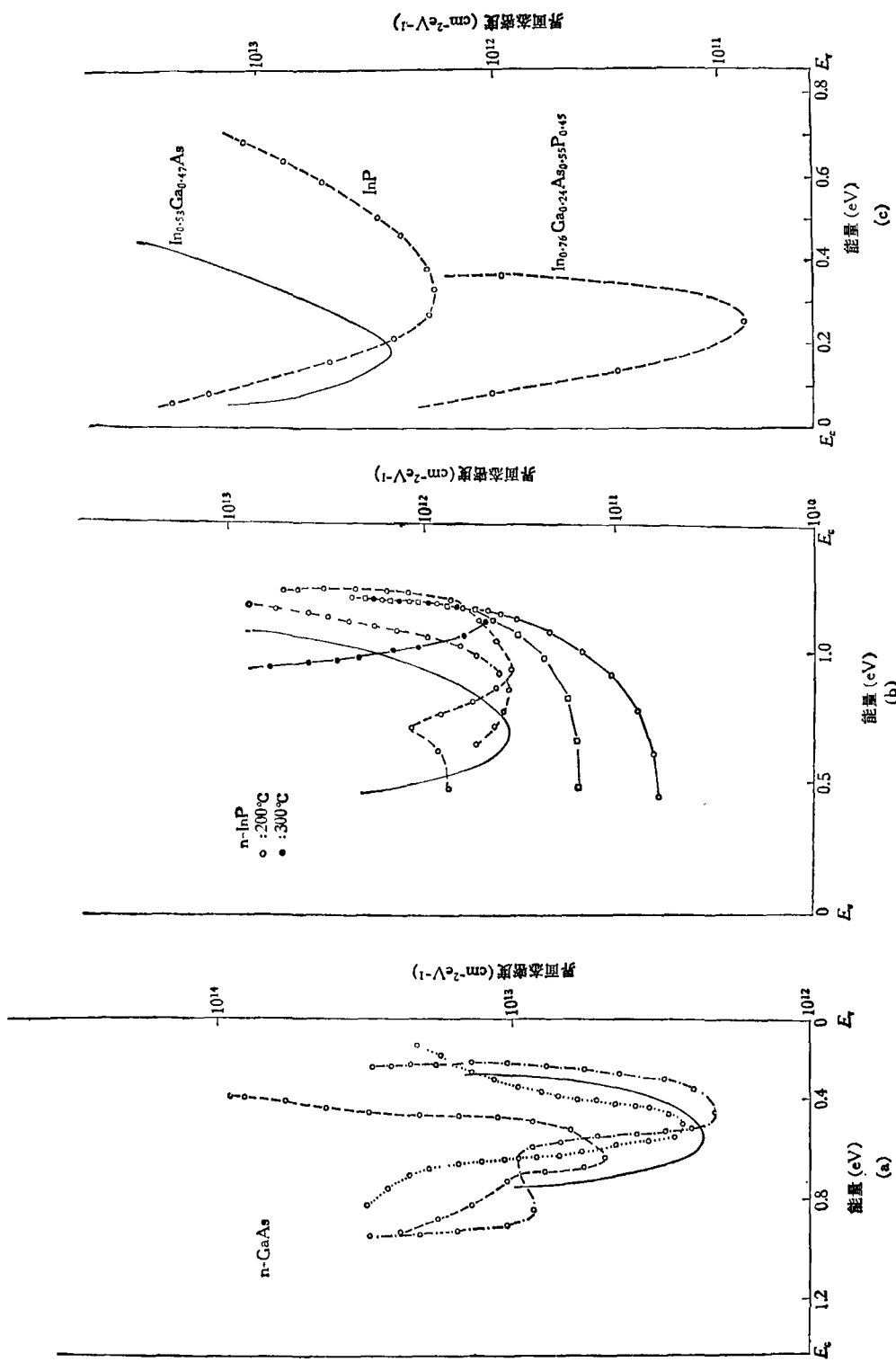


图1 氧化膜与 GaAs, InP, InGaAs 和 InGaAsP 的界面态密度分布
 ——为溶液阳极氧化;为直流等离子阳极氧化; —●—●为淀积 SiO_2 ; ---为淀积 Al_2O_3 ;
 □为未退火; ○●为退火

中,组成 InP 和 GaAs 的各元素在氧化膜中相互扩散,溶解度也不一样。从文献[1]可知,In 可比较自由地通过 SiO₂ 进行扩散,P 在 SiO₂ 中扩散得很慢,而 Ga 在 SiO₂ 和 As 在 Ga₂O₃ 中的扩散率都比较高。InP 和 GaAs 的界面化学反应也很不相同,如 As₂O₃ 与 GaAs 本体就发生化学反应。这些固有特性都将导致 GaAs 和 InP 的氧化膜中和界面处组分及各氧化物分布的不同。因此,不难理解上面所说的 InP/氧化膜界面态密度为何比 GaAs 的小,并且从而出现 InP 后来居上的局面。

六、GaAs, InP, InGaAs 和 InGaAsP 的 MISFET 现状的分析和讨论

1. III-V 族化合物半导体的 MISFET 的基本要求

(1) 氧化膜的化学性质连续均匀,致密,具有无定形结构,晶粒边界少,稳定性好,界面处两种元素的原子浓度比接近于 1。

(2) 氧化膜的绝缘性: 击穿电场强度为 10⁶V/cm, 电阻率为 10¹⁵Ω·cm 左右,漏电流密度小于 10⁻⁹A/cm²,针孔密度约每平方厘米几十个。

(3) 界面特性: 界面区陡,界面态密度为 10¹⁰—10¹¹cm⁻²eV⁻¹,同时表面势在禁带中的可动范围要大些。

(4) 氧化膜中俘获中心和可动离子的密度小于 10¹⁰cm⁻²。

(5) 频率特性: 频率色散和频率漂移都尽可能小。

(6) C-V 曲线的滞后应尽可能小,积累层和反型层之间的平均电容差所对应的电压差 ΔV 要小于 1V。

2. 影响达到上述基本要求因素及其分析

基本要求中的(1),(2)两点是对氧化膜本身的要求。从表 1 可以看出, GaAs 的氧化膜除热氧化膜外,其他几种氧化膜基本上都能满足要求。而 InP 的本体氧化膜的电阻率不够高和漏电流大是个缺点。但是应当指出,它不是

根本性的缺点,因为它们是可以调整阳极氧化溶液的 pH 值和退火等方法克服和解决的。

影响实现基本要求中的(5),(6)两点的因素是界面态密度、氧化膜中俘获中心和可动离子密度(或两者的联合作用)。因此界面态密度和氧化膜中电荷密度[即(3),(4)点]是个比较关键的问题。从图 1(a)和(b)还可以知道, GaAs 和 InP 本体氧化膜的界面态密度在禁带中分布都具有 V 或 U 形的形式,其中 GaAs 的界面态密度分布在禁带的下半部,而 InP 的界面态分布在禁带的上半部。这些分布的最小值位置与 GaAs 和 InP 的费米能级钉住位置有关。这表明,如果界面态密度太高,对 GaAsMIS 结构既不能实现电子积累,又不能实现电子反型;同样对 InPMIS 结构,既不能实现空穴积累,又不能实现空穴反型。

从上面的实验结果可以看出,由于本体氧化膜与 InP 界面组分比接近于 1,界面晶体缺陷少,所以 InP 的本体氧化膜的界面态密度比 GaAs 约小一个数量级。这就导致 InP 的 n 沟道 MISFET 和 p 沟道 MISFET 的实现。同样,由于 GaAs 与氧化膜界面的组分偏离所引起的较高的界面态密度,使 GaAs 的 n 沟道 MISFET 不仅无法实现,而且还有异常的频率色散效应。因此界面态是阻止反型和导致异常频率特性的主要原因。另一方面,为了进一步提高沟道载流子的有效迁移率,还必须考虑到由于界面断键和晶格失配所引起界面晶体缺陷散射的影响。所以在 GaAs 或 InP 和 Al₂O₃ 之间加入组分比合适的很薄一层本体氧化膜也是有益的。文献[20]中列举的实验结果证实了这个论点。虽然目前 InP MISFET 的沟道有效电子迁移率高,但是它的体迁移率不如 GaAs 的高。如果把固有特性不相同和界面性质也不相同的 InP 和 GaAs 组合为四元化合物 InGaAsP,它的 MISFET 的性能又怎样呢? 实验结果表明, InGaAsP MISFET 结构的有效迁移率随着 Ga 和 As 组分 (0 ≤ y ≤ 0.55) 的增加而单调地增大,并且高于同类型 InPMISFET 的有效迁移率。从图 1(c)可知, InGaAsPMIS 结构的界面

态密度值也低于同类型的 InPMIS 结构。

另一方面,在构成三元化合物的 InGaAs 中,In 的组分增加到什么程度才能获得较低的界面态密度,才能使 n 型 InGaAs 的 MISFET 的反型模式实现呢?实验结果表明,对于 35% 的 In,反型和积累模式是能够获得的。目前 n 型和 P 型 $\text{In}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$ 的体氧化膜,复合氧化膜的反型和积累型 MISFET 都得到实现。因此,具有高迁移率的 III-V 族化合物半导体及其固溶体如 InGaAs 和 InGaAsP 等,将引起人们的广泛注意。

参 考 文 献

- [1] C. W. Wilmsen, *J. Vac. Sci. Techn.*, **19** (1981), 279; **17** (1980), 954.
[2] D. N. Butcher and D. J. Sealy, *Electron Lett.*, **13** (1977), 558.
[3] H. Takagi et al., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, **ED-25** (1978), 551.
[4] H. Hasegawa et al., *Appl. Phys. Lett.*, **26** (1976), 567.
[5] C. A. Chesler and G. Y. Robison, *Appl. Phys. Lett.*, **32** (1978), 60.
[6] W. Kern and T. P. White, *RCA Rev.* **31** (1970), 771; 陈克铭等, *半导体学报*, **4**(1983), 334.
[7] H. Hayachi et al., *Appl. Phys. Lett.*, **37** (1980), 404.
[8] N. F. Pu and G. Y. Robison, *J. Appl. Phys.*, **53** (1982), 416.
[9] D. H. Langhlin and C. W. Wilmsen, *Appl. Phys. Lett.*, **37** (1980), 915.
[10] A. Yamamoto and C. Uemura, *Electron Lett.*, **18** (1982), 63.
[11] 陈克铭等, *半导体学报*, **3**(1982), 233.
[12] D. L. Lile et al., *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **56** (1981), 493.
[13] D. Y. Hirayama et al., *Appl. Phys. Lett.*, **40** (1982), 712.
[14] D. C. Cameron et al., *Springer Series in Electrophysics*, **7** (1981), 282.
[15] J. Shirafuji et al., *Electron Lett.*, **18** (1982), 653.
[16] B. Tell et al., *Appl. Phys. Lett.*, **39** (1981), 744.
[17] P. D. Gardner et al., *RCA Rev.*, **42** (1981), 542; K. I. Shir, et al., *Electron Lett.*, **18** (1982), 1034.
[18] H. H. Wieder, *Inst. Phys. Conf. Ser.* **50** (1980), 284.
[19] Y. Shinoda et al., *J. Appl. Phys.*, **52** (1981), 6386.
[20] T. Sawada et al., *Electron Lett.*, **18** (1982), 741.

1984 年第5期《物理》内容预告

重整化群和临界现象(Kenneth G. Wilson); 引力透镜效应研究的历史与现状(须重明等); 中高能电子散射(毛振麟); 放射性同位素电池及其应用(梁代骅等); 医学超声用吸声与透声硅橡胶(牛凤岐等); 动态高压技术及其应用(铁志杰); 激光层析法简介(聂崇礼

等); 确定 X 射线衍射线重心时的一个新的误差项(陶琨); 电阻率和霍尔系数的半自动测量系统(马金泉等); 近代物理讲座第六讲 加速器(I)(张英侠); 新实验技术在材料研究中的应用讲座第十四讲 电子束感生电流(EBIC)及其在半导体研究中应用

办理《物理》零售邮购启事

为适应读者需要,特办理零售邮购业务。现备有《物理》1982 年第 7, 8, 11, 12 各期; 1983 年(第 5 期除外)及本年度各期。

价格(每册): 门市 3 角 8 分; 平邮 4 角; 挂号 5 角。

出售地点: 北京大学物理系示教室(北京大学东南门内)。

联系人: 张可法。