

文章编号:1001-5078(2007)增刊-0944-03

$(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 硫化处理后 InGaAs 表面特性的研究

韩冰^{1,2}, 王妮丽¹, 唐恒敬^{1,2}, 龚海梅¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所传感技术国家重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:通过 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 湿法硫化 InGaAs 表面, 利用微波反射光电导衰减法测量了经 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 硫化后的少数载流子寿命。结果显示, 经过硫化处理后的 InGaAs 表面复合速度接近于理想的 InP/InGaAs 双异质结材料的界面复合速度。为了更好地表征钝化效果, 在硫化后的 InGaAs 表面淀积 SiN_x 制备了 MIS 结构, 通过高低频 C-V 测试得出两者的界面态密度为 $8.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ 。

关键词: InGaAs; 硫化; 表面钝化; μ -PCD

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

The Surface Properties of InGaAs Passivated with $(\text{NH}_4)_2\text{S}$

HAN Bing^{1,2}, WANG Ni-li¹, TANG Heng-jing^{1,2}, GONG Hai-mei¹

(1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The minor carrier lifetime of InGaAs(100) after treatment with $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ solution was measured by the microwave photoconductivity decay (μ -PCD). The result shows that SRV of the InGaAs after treatment with $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ solution approach that of the nearly ideal InP/InGaAs interface. For better evaluating effect of sulfur, SiN_x is deposited on surface of the InGaAs for fabricating MIS. Through measuring the C-V properties, the statement of interface is confirmed.

Key words: InGaAs; sulfur; surface passivation; μ -PCD

1 引言

$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 由于和 InP 晶格完全匹配, 禁带宽度 0.73 eV, 所以在红外探测以及光纤通讯方面有着广泛的应用。由于 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 不能像 HgCdTe 自身氧化作为钝化层, 因为 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 表面氧化生成的 As_2O_3 在化学性质上是不稳定的, 在室温下可以和材料中的 GaAs 组分发生反应, 生成 Ga_2O_3 和单质 As。因此, 对于 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料, 不能使用自身氧化的钝化方法。另一方面, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料暴露于空气当中, 会在表面形成一层自然氧化层, 表面的自然氧化层和材料表面存在很高的界面

态密度, 它们对载流子起着散射中心和非辐射复合中心的作用, 并引起费米能级钉扎, 会严重影响器件的电学和光学性质^[1], 所以表面钝化仍旧是一个关键的步骤。自从 1987 年 Sandroff 等人采用 Na_2S 处理 AlGaAs/GaAs 异质结晶体管的基区周边, 小电流放大倍数得到了显著提高以来, 硫化便成为 III-V 族半导体常用的钝化方法。硫化能有效地去除表面的自然氧化层, 生成硫化物层, 并能抑制表面再次

作者简介: 韩冰(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事 InGaAs 短波探测器的研究工作。E-mail: hanbing83@126.com

收稿日期: 2007-06-26

氧化,降低表面态密度,表面复合速率下降^[2]。

本文报道了经过硫化处理后的 InGaAs 材料的表面性质得到改进。通过 μ -PCD 测试样品寿命的变化来拟合硫化后表面复合速度的变化。在硫化后的 InGaAs 表面淀积 SiN_x 制备了 MIS 结构,利用高低频 C-V 测试拟合出两者的界面态密度。

将完整的 InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP 双异质结材料的界面视为理想界面,其界面复合速度作为参考。利用完整的 PIN 结构 InP/InGaAs 材料的微波反射率衰减作为参考,体寿命对于两者是相同的,所以可以消掉体寿命部分,从而得出 InP/InGaAs 和处理后的表面复合速度之间的差别。

对 InP/InGaAs 材料:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{2S_h}{L} + \frac{1}{\tau_b} \quad (1)$$

去除表面窗口层后,材料的寿命:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{S + S_h}{L} + \frac{1}{\tau_b} \quad (2)$$

两者寿命之间满足:

$$\Delta \frac{1}{\tau} = \frac{S - S_h}{L} \quad (3)$$

式中, τ 为少子寿命; τ_b 为体复合寿命; S_h 为 InGaAs 下表面复合速度; S 为 InGaAs 上表面复合速度; L 为少子扩散长度。 S_h 对于完整的 InP/InGaAs 异质结是一个较小的值,对于 PIN 结构的 InP/InGaAs 材料,取 $S_h = 30\text{cm/s}$ ^[3], $L = 2.5\mu\text{m}$ 。

通过测量不同处理方式下的寿命,和完整的 PIN 结构 InP/InGaAs 材料进行比较,就能够得出不同情况下的表面复合速度。相应的也就可以确定出钝化对于降低表面复合的效果。在硫化后的 InGaAs 表面淀积 SiN_x 制备了 MIS 结构,通过高低频 C-V 测试得出 InGaAs 表面态密度。

2 实验

实验所用样品为 MBE 方法生长的 PIN 结构的 InP/InGaAs 双异质结材料。衬底为半绝缘的 InP,缓冲层为 $1\mu\text{m}$ 的 N⁺ 型 InP, $n \approx 2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$;本征吸收层为 $2.5\mu\text{m}$ 的 N 型轻掺杂的 In_{0.53}Ga_{0.47}As, $n \approx 4 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$,晶格和缓冲层完全匹配;窗口层为 $0.5\mu\text{m}$ 重掺杂的 P 型 InP, $n \approx 2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 。硫化所需的 (NH₄)₂S 溶液是常规的含 S 量为 8% 的黄色硫化物,所需温度为 60°C 恒温,时间为 30min。

寿命测试所用仪器为 SEMILAB 公司生产的型号为 WT-2000 的 μ -PCD 寿命测试仪。仪器由光

激发系统和微波测试系统两部分组成。图 1 表示的是微波反射法测少子寿命的框图。当一脉冲光与一高频电磁波(微波)同时照射到样品上时,由于光脉冲产生的光电导瞬态变化会引起的微波反射率的变化:

$$\Delta R = R(\sigma + \Delta\sigma) - R(\sigma) \quad (4)$$

式中, σ 为电导率; $\Delta\sigma$ 为光注入后电导率的增加。在小注入时,上式可写成:

$$\Delta R = \frac{\partial R(\sigma)}{\partial \sigma} \cdot \Delta\sigma \quad (5)$$

由于在微波波段反射率非常敏感于电导率,因此,测量 ΔR 随时间的变化,从而可获得非平衡载流子的寿命^[4]。

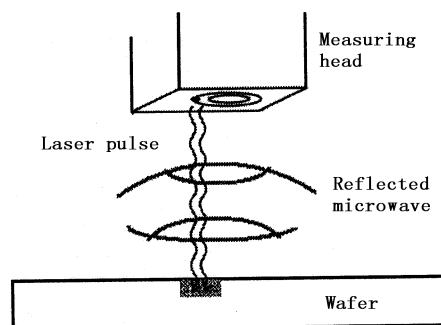


图1 微波反射光电导衰减测寿命原理图

光激发系统发出的激发光为波长 904nm 的红外脉冲激光,脉冲宽度为 200ns ,激光束在样品表面的直径为 1mm 。InGaAs 的截至波长为 $1.7\mu\text{m}$,因此能发出光生载流子。微波探测器的频率为 10.2GHz 。

完整 InP/InGaAs 双异质结材料样品经过常规的化学清洗后,放入 μ -PCD 寿命测试仪进行测试,测试得出没有经过处理的完整 PIN 结构的材料的寿命衰减曲线,然后通过 Ar⁺ 刻蚀和湿法腐蚀去掉样品最上面的 InP 窗口层,使 InGaAs 本征吸收层完全暴露,测出此时样品的寿命衰减曲线。然后利用 60°C 恒温的 (NH₄)₂S 溶液硫化样品测量此时的寿命曲线。通过相应曲线之间的差别,得出化学处理后表面与理想 InP/InGaAs 界面之间的复合速度差值:

$$\frac{S - S_h}{L}, L = 2.5\mu\text{m}。$$

3 结果和讨论

图 2 是化学处理后与理想 InP/InGaAs 电学界面的衰减曲线。d 线所示的样品具有最差的表面电学性质,该样品是利用 Ar⁺ 和选择腐蚀去掉 InP/InGaAs 的 InP 窗口层,去离子水冲洗后直接用氮气吹干,InGaAs 层完全暴露于空气当中。此时测得的寿命为 78.2ns ,相应的表面复合速度为 $S = 2426\text{cm/s}$ 。

c 线是刻蚀掉表层的 InP 后,利用 HF 对表面经过化学处理后的时间曲线。测得寿命为 105.3ns,相应的表面复合速度为 $S = 659.8 \text{ cm/s}$ 。b 线是利用 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 硫化表面后的时间衰减曲线。测得寿命为 246.5ns,和完整的材料的寿命差别不是很大,相应的表面复合速度 $S = 115.8 \text{ cm/s}$ 。如果此时假设最简单的情况: $S = S_0 = \delta \nu_{\text{th}} N_{\text{SS}}$, ν_{th} 为载流子的热运动速度,约为 10^7 cm/s ; δ 为载流子的有效复合界面,约为 10^{-15} cm^2 ,则根据计算^[5],经过硫化处理后的 InGaAs 表面态密度为 $N_{\text{SS}} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 。

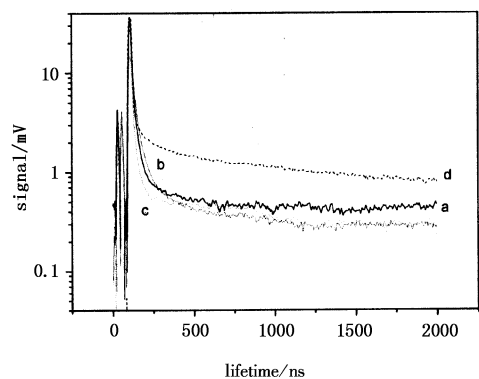


图2 微波反射信号随时间的变化曲线

a - InP/InGaAs; b - $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ /InGaAs;

c - HF 处理; d - 去掉窗口层后和空气接触的 InGaAs

完整的双异质结材料经刻蚀去除掉表面的 InP 窗口层,不可避免地会对材料表面造成损伤,形成表面缺陷态。同时,样品会接触空气,使表面被氧化形成自然氧化层,从而使表面复合增加,表面复合速度增加,相应的样品寿命减小。由曲线 d 可以看出,去除表面窗口层后,样品的寿命急剧减小,此时材料的表面复合最大。研究表明, $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 溶液较之 HF 溶液能更好的去除表面的自然氧化物,同时会在表面形成一层硫化物,使表面的悬挂键得到配对,阻止表面被再次氧化,所以其对应的样品具有更大的寿命。由以上实验结果可以看出,硫化能够较好地降低 InGaAs 表面态密度,减小表面复合速度。

在经硫化处理的 InGaAs 表面利用 PECVD 方法淀积 200nm 的 SiN_x 制备出 MIS 结构,采用 HP4195 Multiple-frequency LCR Meter,对 MIS 结构进行 C-V 测试,准静态测试中的扫描速度为 0.1 mV/s ,在其他测试频率下扫描速均为 0.2 mV/s 。图 3 是 6kHz 和 1MHz 的频率下的双扫描的 C-V 测试结果。

由图 3 中高频下的双扫描结果可以看出, C-V 特性存在滞后效应,说明 SiN_x 与 InGaAs 界面附近存在慢界面陷阱。平带电压约为 0.8V,所以相应的固定电荷密度为 $1.82 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 。利用图中的高低频扫描曲线计算得出硫化处理后的 $\text{SiN}_x/\text{InGaAs}$ 界面态的最小密度为 $8.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$,优于所报道的未硫化的 $\text{SiN}_x/\text{InGaAs}$ 界面态密度^[6]。

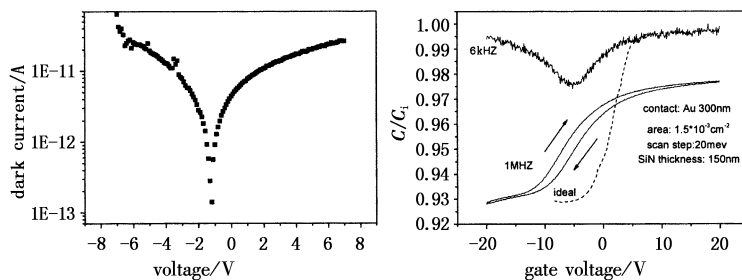


图3 MIS 结构的 $I-V$ 及 $C-V$ 特性

4 结论

本文利用 μ -PCD 方法测试出硫化后表面复合速度,同未处理和经 HF 处理的比较发现,硫化能较好地降低表面复合速度,对应的表面复合速度为 $S = 115.8 \text{ cm/s}$ 。在硫化后的 InGaAs 表面淀积 SiN_x 制备了 MIS 结构,通过高低频 C-V 测试得出 InGaAs 表面态密度为 $8.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 。

参考文献:

- [1] 袁哲亮,侯晓远,王迅. 硫钝化 III-V 族半导体生长高质量薄膜[J]. 固体电子学与进展, 1998, 18(2): 170-175.
- [2] Sandroff C J, Notenber B N, Bischoff J, C et al. Dramatic enhancement in the gain of a GaAs/AlGaAs heterostructure bipolar transistor by surface chemical passivation[J]. Appl. Phys. Lett., 1987, 51(1): 33-35.
- [3] E Yablonovitch, C J Sandroff, R Bhat, et al. Nearly ideal electronic properties of sulfide coated GaAs surfaces[J]. Appl. Phys. Lett., 1987, 51(6): 439-441.
- [4] 褚君浩. 窄禁带半导体物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 605.
- [5] C G Scott, C E Reed. Surface physics of phosphors and semiconductors[M]. London: Academic Press, 1975.
- [6] Chih-Cheng Lu, Chong-Long Ho, Meng-Chyi Wu, et al. Electrical characterization of SiO_x and SiN_x prepared by PECVD technique on $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(6): 1011-1015.