

优质 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ($x \leq 0.6$) SAM-APD 超晶格结构的 MBE 生长

林 耀 望

国家光电子工艺中心,集成光电子学国家重点实验室,中国科学院半导体研究所,北京 100083

(1993年2月24日收到;1993年5月25日修改定稿)

本文描述了采用 Varian Gen I MBE 系统,和 VA-175 型砷裂解炉,以及 5 个“9”的铍作 p 型掺杂剂,严格仔细地控制外延生长过程,成功地制备了优质的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ($x \leq 0.6$) SAM-APD 超晶格结构外延材料。倍增层 p-Al_{0.6}Ga_{0.4}As 的载流子浓度低达 $2.3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$;电子与空穴离化率的比值为 25.0。此材料用于制作超晶格雪崩光电探测器,器件性能有显著的提高。在初始光电流 $I_{p_0} = 100 \text{nA}$ 下,反向偏压为 80 伏得到的内部雪崩增益为 1900,计算分析最大雪崩倍增因子高达 6050。

PACC: 8115

1. 引言

由于 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 超晶格雪崩光电探测器具有高速、高增益、低噪声、抗辐照性能强等优点,已引起人们的关注。雪崩光电探测器的内部增益,和过剩噪声因子与外延材料中的电子离化率(α)与空穴离化率(β)的比值紧密相关,意即 α/β 值越大,器件的性能越好。但是,大多数 II-V 族化合物半导体材料中,电子与空穴离化率的比值大约为 1. F. Capasso 等人^[1-3]提出了过滤有效质量的超晶格结构,有效地提高了 α/β 的比值,从而改善了器件的性能。暗电流是高灵敏度雪崩光电探测器的另一个重要参数。低的暗电流要求材料结构中的倍增区的材料禁带宽度大,杂质浓度低和晶体完整性高^[5]。但是,用 MBE 方法生长 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 中,高 Al 组份的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 生长与晶体结构完整性存在矛盾。为了获得器件质量的材料, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中的 x 值不能选择过高。此外,有些学者研究表明^[2-4],采用分离吸收区和倍增区(Separate-Absorption-Multiplication)的 SAM 结构,是提高器件质量卓有成效的方法。我们曾报道过^[4]采用 SAM-APD 超晶格结构外延材料,获得了性能十分优异的雪崩光电探测器的结果。本文报道,采用 Varian Gen I MBE 系统和 VA-175 型砷裂解炉(EPI 公司制作),通过严格仔细控制 MBE 生长过程,成功地制备了优质 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ($x \leq 0.6$) SAM-APD 超晶格结构外延材料。

2. 分子束外延生长

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 超晶格结构的外延生长是采用 Varian Gen I MBE 系统。此系统由三个真空室组成,即进样/取样室,缓冲室和生长室。样品进入生长系统后,首先在进样/取样室烘烤,烘烤温度为 200°C;接着,由磁耦合传动装置,将可装 12 个样品的样品小车传送到缓冲室准备外延生长。在外延生长前,将每个样品作 450°C 烘烤后再转入生长室。

砷源装置是 VA-175 型砷裂解炉. 对于生长 x 值较高的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 外延材料, 采用裂解砷(As_2)比采用固态砷(As_4)具有明显的优越性. 砷的纯度为 7 个“9”(Furukawa 公司出品); 镍的纯度为 8 个“9”(Alcan Electronic Materials 公司出品); p 型掺杂剂为纯度 5 个“9”的铍(Atomergic Chemetals Corp. 出品); n 型掺杂剂是硅. 衬底是半绝缘未掺杂直拉的 GaAs 单晶(Sumitomo Electric USA Inc. 出品), 取向为(100)向(110)偏 2° , 双面抛光. 衬底不作任何化学清洁处理, 以免引入外来沾污. 在进入系统前, 只在紫外线臭氧清洁装置中稍作处理. 为了保持在高纯条件下, 外延生长优质低载流子浓度的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料, 精细地把握每个生长实验环节, 防止引入不必要的外来沾污是十分必要的.

SAM-APD 超晶格材料的结构图如图 1 所示. 从图 1 可以看出, 外延生长次序如下: (1) $0.5\mu\text{m}$ 的未掺杂的 GaAs 作缓冲层; (2) $2.0\mu\text{m}$, $p \approx 5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 的 GaAs 作接触层;

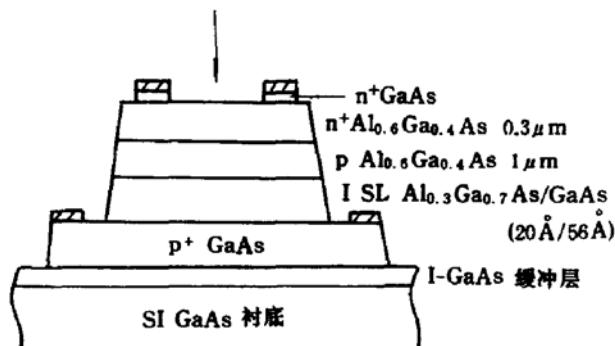


图 1 AlGaAs/GaAs SAM-APD 超晶格结构图

(3) 未掺杂超晶格 165 周期 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (20\AA)/GaAs (56\AA) 吸收层; (4) $1.0\mu\text{m}$, $p \approx 2.3 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$ 的 $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ 倍增层; (5) $0.3\mu\text{m}$, $n = 1.0 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 的 $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ 的顶层; (6) $0.1\mu\text{m}$, $n = 2.0 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 的 GaAs 接触层. 为获得器件质量高 Al 组份的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 外延材料, 在 $0.5 \leq x \leq 0.85$ 范围, 我们生长了各种组份的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料. 当 $x >$

0.60 时, 我们发现外延片的表面形貌十分粗糙, 不宜于制作器件. 在生长此结构材料中, 掺杂技术的难度是很高的. 从图 1 中可见, 在生长 $p \approx 5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 的 GaAs 接触层后, 中间虽然生长了 AlGaAs/GaAs 超晶格结构, 但接着生长 $p \approx 2.3 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$ 的 $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$. 前后两者掺杂浓度变化高达四个数量级, 这是十分难于控制的. 我们经多次实验, 终于获得成功.

3. 器件结果

上述结构的材料用于制作 SAM-APD 器件, 获得了极为优良的雪崩击穿特性, 击穿电压 $V_B = 82$ 伏; 在 90% 击穿电压时, 暗电流为 $2.3 \times 10^{-4}\text{A/cm}^2$; 在 $0.6V_B$ 时, 为 $4.6 \times 10^{-5}\text{A/cm}^2$, 暗电流与反向偏压的关系, 以及电子与空穴倍增因子随反向偏压的变化如图 2 所示. 当初始光电流 $I_{P_0} = 100\text{nA}$, 在反向偏压为 80 伏时, 得到的内部增益为 1900, 计算分析表明最大的雪崩增益为 6050. 从图 2 可见, 电子注入的倍增因子比空穴高得多. 分析计算表明, 在电场为 $1.25 \times 10^6\text{V/cm}$ 时, 电子与空穴离化率的比值约为 25. 上述结果是至今 AlGaAs SAM-APD 器件的报道中最好的数据. 在反向偏压为 20 伏下测量 SAM-APD 的光谱响应度如图 3 所示. 从图中可见器件工作的波长范围为 400—850nm. 在波长为 800nm 时, 峰值响应度为 0.45A/W , 量子效率大于 70%.

本项研究工作是在美国佛罗里达大学 III-V 化合物半导体 MBE 实验室完成的, 研究经费是美国 DARPA 计划支持的. 李省三教授给予此项研究工作的指导, 王彦华、朱素珍、喻寿山等完成了器件制作及测试, 在此谨表谢忱.

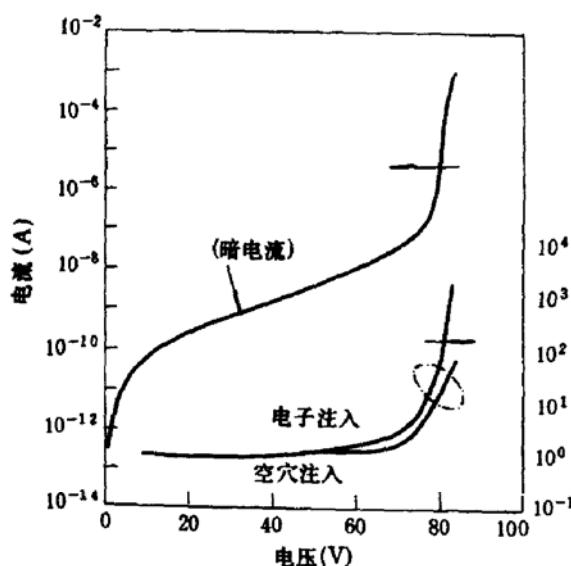


图 2 $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ SAM-APD 器件中暗电流及电子与空穴的倍增因子随电压的变化

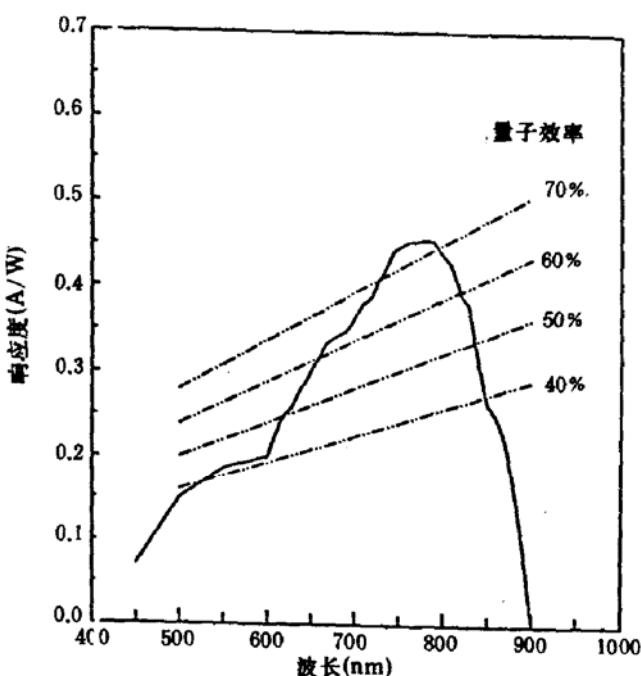


图 3 $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ SAM-APD 器件的光谱响应度与量子效率随波长的变化

参 考 文 献

- [1] F. Capasso, in Semiconductors and Semimetals, 24, 319(1987).
- [2] F. Capasso, W. T. Tsang, A. L. Hutchinson, and G. F. Williams, *Appl. Phys. Lett.*, 40, 38(1982).
- [3] F. Saka, T. Mikawa and O. Wada, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-22, 1986(1986).
- [4] S. S. Li, Y. H. Wang, S. S. Yu, S. Zhu, R. M. Park and Y. W. Lin, International Electron Devices and Materials Symposium. (1990).
- [5] 王家骅, 李长健, 牛文成, 半导体器件物理, 科学出版社(1985).

MBE Growth of High Quality $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ($x \leq 0.6$) Superlattice Structure for SAM-APD Device

Lin Yaowang

National Research Center for Opto-Electronic Technology, National Integrated Optoelectronics Laboratory,

Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing 100083

(Received 24 February 1993; revised manuscript received 25 May 1993)

Abstract

High quality and high Al composition $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ($x \leq 0.6$) SAM-APD Superlattice structure materials were prepared with carefully controlled MBE growth process by using Varian Gen I MBE system, type VA-175 cracking source (As_2) and beryllium dopant (5 N purity). The carrier concentration of p- $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ multiplication layer reached as low as $2.3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. The ionization rate ratio of electrons and holes (α/β) equal to 25. The performance characteristics of the SAM-APD devices with the structure materials were improved greatly. An internal multiplication gain of 1900 was obtained at -80V , when the initial photocurrent I_{p} was 100 nA. The maximum avalanche multiplication gain was 6050.

PACC: 8115