

MSM 光电探测器

史常忻 朱红卫

(上海交通大学微电子技术研究所, 上海 200030)

[关键词] 光电探测器, 肖特基势垒, 铟镓砷

1 引言

平面型的金属-半导体-金属 (MSM) 结构器件最早由美国的 S. M. Sze 等人于 1971 年首先提出概念, 并研制成硅上的 MSM 结构器件。测试结果表明其特性不同于单个肖特基结器件。1985 年, 德国亚琛工业大学半导体电子学研究所的 W. Roth 等人率先将其应用于光电探测器 (PD), 研制成第一个 GaAs MSM-PD。该结构解决了以前垂直结构的光电器件与平面结构的电子器件集成工艺方面的困难, 具有制作工艺简单、同现有的场效应晶体管工艺兼容和高响应带宽性能, 是光电子集成电路 (OEIC) 中的重要光电器件。目前人们已对高性能的 GaAs MSM 进行了系统的研究, 发现其在 $0.8 \mu\text{m}$ 波长区域具有优异的性能。对于应用于光纤通讯 $1.3-1.5 \mu\text{m}$ 的低损耗窗口波段, 同 InP 晶格匹配的窄带隙材料 InGaAs, 人们也进行了详细的研究。但由于 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料上的肖特基势垒高度过低 ($\sim 0.2\text{V}$), 导致制作的光电探测器暗电流大, 放大器噪声过高的问题。

为了提高器件的总体性能, 关键是提高肖特基势垒高度, 减小器件暗电流。为此, 提出了几种方案和工艺来提高 InGaAs MSM 的有效势垒高度, 一般是通过在半导体有源层和金属间加入一层薄的势垒增强层 (半导体薄膜或绝缘介质薄膜) 的技术来有效地增加势垒高度。

这种势垒增强层可分为三类: (1) 晶格不匹配型势垒增强层。如 GaAs 层、GaAlAs 层等; (2) 晶格匹配型势垒增强层。如掺 Fe 的 InP 层、InAlAs 层和同质的 $\text{p}^+\text{-InGaAs}$ 层等^[1]; (3) 绝缘膜势垒增强层。如二氧化硅、氮化硅、L-B 膜等。另外, 最近有报道采用特殊的低温 (77 K) 淀积金属工艺可以有效地提高肖特基势垒高度。

对于上述三种常用方法, 其中的绝缘介质薄膜势垒增强层工艺的可控性和器件可靠性还有待进一步研究。对非晶格匹配的势垒增强层, 为了减小其晶格间由于不匹配而产生的应力, 必须在势垒增强和 InGaAs 光吸收层间生长过渡层, 工艺变得复杂。从材料体系的合理性和实用性等考虑, 显然晶格匹配的材料较佳。在晶格匹配材料中同质材料可避免异质界面问题, 但同质 InGaAs 的势垒增强效果有限, 击穿电压较低。异质材料的势垒增强效果较佳, 但异质界面特性不好所产生的陷阱效应容易使光电探测器产生内部增益, 而导致工艺的重复性差。通常, 人们还是多采用生长一层晶格匹配、禁带宽度大的 InAlAs 或 InP 材料来提高势垒高度。

本文于 1996 年 5 月 6 日收到。

对 InAlAs 和 InP 而言, InAlAs 适合用分子束外延 (MBE) 方法生长, 但由于其含铝量较高, 外延生长和工艺制作中易出现氧化问题。InP 适合采用金属有机物气相外延 (MOVPE) 方法生长, 无氧化问题, 且是 InGaAs (P) /InP 体系中最常用的材料, 易于达到较高的界面质量。另外, 由于在 InGaAs 光吸收层与 InAlAs 势垒增强层界面间导带偏移 ΔE_c 为 0.5 eV, 这将导致大的电荷积累效应, 使光响应时间变长, 也还必须引入一层缓变层。

我们在国家自然科学基金的资助下首次采用非掺杂的 InP 势垒增强层来提升肖特基势垒高度, 成功地研制了高性能的低暗电流、高速响应的 InGaAs MSM-PD。器件结构新颖, 工艺简单, 综合指标优于国际上同期发表的研究结果, 达到 90 年代初国际先进水平, 为单片光电集成研究和开发打下了良好的基础^[2]。

MSM 结构本质上是两个肖特基结背靠背串联着, 当外加偏压后, 一只结正偏 (结 1), 另一只结反偏 (结 2)。随着外加电压的增加, 两耗尽层宽度增加, 最终达到穿通电压 V_{RT} 时, 两个耗尽层相遇, 总和为 W ; 随着电压的进一步增加, 在结的一端电场变为 0, 能带在此处变平, 即为平带情况, 此时的电压称为平带电压 V_{FB} 。当电压超过 V_{FB} 时, 能带进一步向上翘, 加在 MSM 结构上的最大电压由结 2 的雪崩击穿决定。

2 材料生长和器件制作

外延层生长在半绝缘的 (100) InP 衬底上, 采用低压金属有机汽相外延 (LP-MOVPE) 技术。InP 衬底上依次生长 0.3 μm 的不掺杂 InP 缓冲层和掺杂浓度为 $1 \times 10^{15} \sim 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 厚度为 1 μm 的 n 型 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 本征光吸收层; 再生长 100 nm 的非掺杂 InP 势垒增强层, 用以提高肖特基势垒高度。在 InGaAs 和 InP 层之间没有过渡层。采用卤灯加热, 所有的生长层温度为 640 $^{\circ}\text{C}$, 总压力为 20 mbar。三甲基镓和三甲基铟分别作为镓源和铟源, 砷烷和磷烷分别作为砷源和磷源。InGaAs 和 InP 的生长速率分别为 330 $\text{\AA}/\text{min}$ 和 150 $\text{\AA}/\text{min}$ 。而后, 用电子束蒸发 500 nm 金和 100 nm 钛, 用以制作双层金属的交叉指状电极。蒸发之前没有对表面进行过特殊处理。最后采用剥离工艺, 剥离出 MSM-PD 电极图形。电极宽度和间隔均为 3 μm , 光照有源区面积为 $(100 \times 100) \mu\text{m}^2$, 没有涂抗反射涂层。在电极底下淀积了 300 nm 的 SiO_2 以减小漏电流和寄生电容, 同时也增加了金属与衬底的粘附力。

3 实验结果和讨论

对光电探测器的暗电流和电压特性进行了测试, 得到了很低的暗电流, 典型的数值是在 1.5 V 时暗电流为 56 nA, 相应于 5.6 $\text{pA}/\mu\text{m}^2$ 。器件中最小的暗电流为 34.08 nA。这样小的暗电流就是由于 InP 势垒增强层具有大的带隙和适当的势垒高度, 导致了电子和空穴的很小电流。器件同时显示了对称的 $I-V$ 特性, 击穿电压大于 10 V, 这也意味着器件具有很好的肖特基结。测量了在 0.86 和 1.3 μm 波长、不同光功率照射下的光电流与偏压的关系^[2]。采用发光二极管 (0.86 μm 用 GaAs LED, 1.3 μm 用 InGaAs LED) 通过光纤将光聚焦到光电探测器芯片上, 光源采用光功率计 (66XLA, Photodyne 公司) 进行标定。光电流与光功率间的关系, 具有很好的线性度^[2]。响应度和量子效率分别为 0.42 A/W 和 0.40。

光电探测器的响应速度采用脉冲响应方法进行测试。测试的光电探测器被安装在微带线上, 采用波长为 1.27 μm 的半导体激光器, 其 FWHM 小于 20 ps, 直接被聚焦到光电探测器

上, 由采样示波器进行触发, 光电流响应信号经微波偏置 T 接头 (HP3315A) 和采样探头 (HP 1430C, $t \leq 20$ ps), 输入到采样示波器 (HP 182C) 上显示, 同时也可以在绘图仪上描出曲线。

测量了在不同偏压下的光电流响应, 上升时间、下降时间和 FWHM ($V=6$ V) 分别为 33 ps, 28 ps 和 47 ps, 扣除采样头的时间常数 (取 15 ps), 则分别小于 30 ps, 24 ps 和 44 ps, 响应时间与偏置电压的关系, 与理论计算的平带电压 $V_{FB}=5.7$ V 相一致。

4 结论

采用 LP-MOVPE 在 InGaAs 外延层上生长了一层非掺杂的 InP 势垒增强层的方法, 制作了暗电流低、速度快、响应度高的长波长、高性能的金属-半导体-金属光电探测器。器件在 1.5 V 时的暗电流为 $5.6 \text{ pA}/\mu\text{m}^2$, 6 V 时的响应速度为 30 ps, $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ 时的响应度为 0.42 A/W 。该器件不需要过渡层和掺杂, 因而结构简单, 易于制作。表 1 给出了我们的器件与其它研究机构发表的器件基本参数比较表, 从中可知, 我们器件要优于其它器件。

表 1 本器件与其他器件基本参数比照表

基本参数	AT&T Yang 等	Bell Lab Hong 等	Bellcore Soole 等	柏林工大 Khul 等	本器件
势垒增强层	InP: Fe	AlGaAs	AlInAs	InP: Fe	i-InP
过渡层	无	有	有	无	无
暗电流 (mA/cm ²)	4.2	1	2.5	—	0.56
灵敏度 (A/W)	0.43	0.4	0.4	—	0.42
响应速度 (ps) 1.3 μm	40	80	60	33	33

参 考 文 献

- [1] 史常忻, Mesquida A, Kohl A et al. p-InGaAs/n-InGaAs MSM 光电探测器研究. 半导体学报, **14** (3): 194—197.
 [2] Shi C X, Grutzmacher D, Stollenwerk M. High-performance undoped InP/n-In_{0.53}Ga_{0.47}As MSM photodetectors grown by LP-MOVPE. IEEE Trans. Electron Devices, **39** (5): 1028—1031.

MSM PHOTODETECTOR

Shi Changxin Zhu Hongwei

(Institute of Microelectronic Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

Key words photodetector, Schottky barrier, InGaAs