

极低暗电流 InGaAs MSM-PD 的 光电特性研究^{*}

朱红卫 史常忻 陈益新

(上海交通大学微电子技术研究所 上海 200030)

李同宁

(武汉电信器件公司 武汉 430074)

摘要 本文首次采用双重肖特基势垒增强层技术,制作了 InGaAs MSMS-PD 光电探测器。实验结构表明:具有 15nm 的 p-InP 和 100nm InP 双重势垒增强层的器件极大地减小了暗电流,器件的暗电流均小于 10nA,响应度为 0.83A/W,FWHM 为 70ps,证明这是一种减小 MSM-PD 暗电流的有效设计方法。

EEACC: 4250, 2560Z

1 引言

金属-半导体-金属光电探测器(MSM-PD)是八十年代中后期开始在世界上引起重视的一种新型光电探测器,它具有响应速度快、电容小、工艺简单、平面结构及容易与 FET-IC 集成等优点,它在光纤通讯中的光电信号转换部分具有广泛的应用。 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ (简称 In-GaAs)是在 1.3 至 $1.6\mu m$ 波长范围内最合适的光吸收层材料,但是,InGaAs 同金属材料接触,其肖特基势垒高度只有 $0.25eV^{[1]}$,这就导致了大的暗电流和过量噪声,所以肖特基势垒高度增强层的研究成为 InGaAs MSM-PD 的首先课题。我们提出了一种新型晶格匹配型的双重肖特基势垒增强层的结构,使得 InGaAs MSM-PD 的暗电流大为下降,最低已达 $4.7nA(10V)$,与其它晶格匹配型势垒增强层所得的暗电流测试结果比较表明,这种方法极为有效。

2 双重势垒增强层的设计

MSM 结构本质上是两个背靠背相连的肖特基结组成,当施加电压后,一个结正偏,

* 国家自然科学基金资助项目

朱红卫 男,1966 年生,讲师,在职博士生,目前从事超导电子学、微电机系统(MEMS)和光电子集成研究
史常忻 男,1938 年生,教授,IEEE 高级会员,目前从事化合物半导体高速器件、电路和光电子器件及集成研究
1995 年 10 月 30 日收到初稿,1996 年 6 月 26 日收到修改稿

个结反偏,对其输运过程的了解,可参阅文献[2].采用热离子发射模型,可得到电流密度为^[3]:

$$J = A_n^* T^2 \exp[-e(\Psi_n - \Delta\Psi_n)/kT] + A_p^* T^2 \exp[-e(\Psi_p^* - \Delta\Psi_p)/kT] \quad (1)$$

其中 A_n^* 、 A_p^* 分别是电子、空穴的有效里查德逊常数; Ψ_n 、 Ψ_p 是相应的势垒高度; $\Delta\Psi_n$ 、 $\Delta\Psi_p$ 是由于镜象力引起的势垒降低因子. 从(1)式可知, 电流的主要部分将由势垒较低的注入载流子决定, 所以为了减小暗电流, 提高势垒高度是主要的办法.

通过在半导体有源层和势垒金属间加入一层薄的宽禁带材料的界面层(半导体薄膜或绝缘介质薄膜)可以有效地增加势垒高度. 这种界面层可分为三类:

(1) 晶格不匹配型势垒增强层,如 GaAs 层.

(2) 晶格匹配型势垒增强层:如掺 Fe 的 InP 层和非掺杂 InP 层、InAlAs 层.

(3) 绝缘膜势垒增强层:如 SiO₂ 层和 Si₃N₄ 层.

其中绝缘介质薄膜势垒增强层的工艺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. 为此人们多采用生长一层晶格匹配、禁带宽度大的材料来提高势垒高度,如 InAlAs 或 InP 层. 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,还必须引一层缓变层^[4],另一种方法就是采用晶格匹配的 InP 势垒增强层,人们已经采用了非掺杂 InP 势垒增强层^[5]和掺 Fe 的 InP 势垒增强层^[6]. 我们在以前研究的基础上,在单层 InP 势垒增强层上,通过再生长一层极薄的反型层来进一步提高肖特基有效势垒高度.

我们知道,如在 n 型半导体上形成一很薄的 p 形层,可以增加其有效势垒高度^[7],形成的有效势垒高度 φ_b 将满足如下关系:

$$\varphi_b = \varphi_s + V_b \quad (2)$$

$$\varphi_s = \frac{kT}{z} \ln \frac{N_c}{n_1} \quad (3)$$

$$V_b = \frac{qa^2 p_2}{2\epsilon_0 \epsilon_s n_1} (p_2 + n_1) \quad (4)$$

$$W = \left[\frac{2\epsilon_0 \epsilon_s}{qn_1} (V_b - \frac{kT}{q}) \right]^{1/2} \quad (5)$$

其中 n_1 和 W 分别为 n 型衬底的掺杂浓度和其中的耗尽层宽度; p_2 和 a 分别为 p 型薄层的掺杂浓度和厚度; q 为电子电荷; k 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度; ϵ_0 为真空电容率; ϵ_s 为半导体相对介电常数; N_c 为导带有效态密度,上述关系式满足的条件为 $ap_2 \leq Wn_1$. 我们设计成在热平衡条件下,p-InP 层是完全耗尽的器件结构,这种设计从器件的应用角度来看有很大的灵活性,因为我们可以控制势垒的增加量,势垒高度最大的增加量,只是在当表面层不再耗尽,而由所形成的 p-n 结所限制,实验上可以采用生长高质量的外延层,还有人曾采用低能离子注入来制作一反型的肖特基势垒增强层^[8]. 由于 InP 和 InGaAs 的界带偏移要比导带的大($\Delta E_v > \Delta E_c$),所以应主要提高电子势垒的有效高度. 图 1 给出了无势垒增强层、有单层 InP 势垒增强层及 p-InP、InP 双重势垒增强层的能带示意图. 从图中可见,p-InP 在原有单层势垒增强层的基础上,又出现了一个势垒极大值,从而使势垒高度得到进一步提高,这就是我们提出的双重势垒增强的优点.

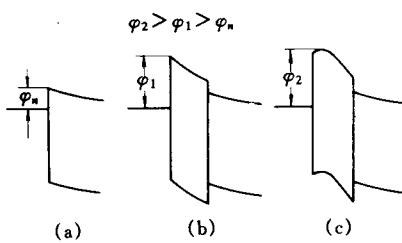


图 1 无势垒增强层、有单层 InP 势垒增强层及 p-InP/InP 双重势垒增强层的能带示意图

增强层的能带示意图
形成双重肖特基势垒增强层.由于聚酰亚胺(PI)具有良好的势稳定性,耐化学腐蚀及特有的流平性,所以我们在上述的外延层上均匀涂上 $1\mu\text{m}$ 聚酰亚胺,将其作为隔离层,减小器件的漏电流.采用 1450 正胶光刻有源区,烘胶温度为 80°C ,15 分钟,用四甲基氢氧化胺湿法腐蚀,再光刻交叉指状电极图形,接着用电子束蒸发 500nm 金和 100nm 钛以制作金属-半导体接触.最后采用剥离工艺,剥离开 MSM-PD 图形.电极宽度和间隔均为 $3\mu\text{m}$,光照有源区面积为 $100 \times 100\mu\text{m}^2$,没有涂抗反射涂层.

对以上 MSM-PD 测量其暗电流,测试方法见文献[9].

图 3 给出了由 Kuhl 等人^[6]制作的掺 Fe 的 InP 单层势垒增强层(曲线 A),由史常忻等制作的非掺杂的 InP 单层势垒增强层(曲线 B)和我们采用双重势垒增强层(曲线 C)的暗电流实验比较曲线.从图中可见,双重势垒增强层的效果是显著的,暗电流从 Kuhl 等人的 250nA (5V),史常忻等人的 55nA (5V)降至目前的 10nA (10V).图 4 还给出了一个我们测得的最低暗电流为 4.7nA 的器件结果.所研究的器件击穿电压均大于 30V .图 5 给出了 InGaAs MSM-PD 在不同光功率下的光电流曲线,由图可见当电压由 $0 \sim 3\text{V}$ 时,光电流增加较快,表明随着电压的增加,光生载流子收集效率增加,这由有限载流子寿命来决定,相当于 InGaAs 光吸收层完全耗尽,转折电压约 3V 左右.当电压为 3V 入射光功率 $30\mu\text{W}$ 时的输出

3 InGaAs MSM-PD 制作工艺和暗电流测试结果

器件结构见图 2.采用 MOCVD 技术,在掺 Fe 的 InP 衬底上依次生长 $0.3\mu\text{m}$ 的不掺杂 InP 缓冲层和掺杂浓度为 $2 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$,厚度为 $1.2\mu\text{m}$ 的 n 型 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}$ As 本征光吸收层.再分别生长 100nm 的 InP 和 15nm 的 p 型 InP,后者形成

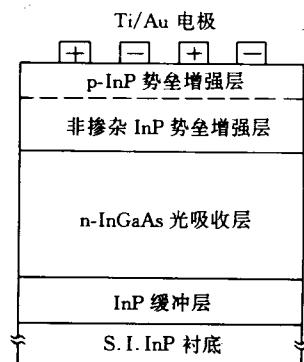


图 2 器件结构

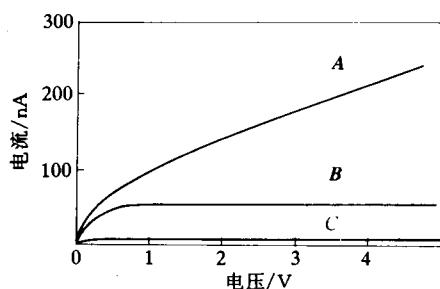


图 3 三种势垒增强层制作器件暗电流比较曲线

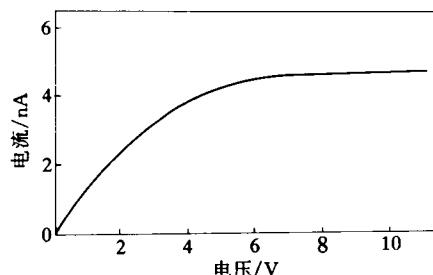


图 4 InGaAs MSM-PD 最低暗电流实验曲线

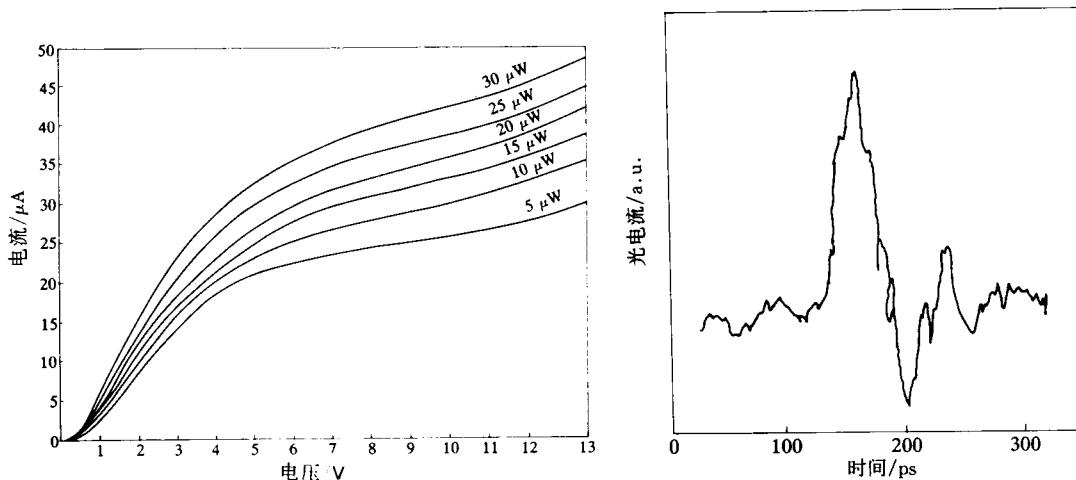


图 5 InGaAs MSM-PD 在不同光功率下的光电流曲线
图 6 InGaAs MSM-PD 瞬态特性曲线
光电流为 $25\mu\text{A}$, 此时的响应度为 0.83A/W . InGaAs MSM-PD 的瞬态特性测试系统和方法见文献[9], 图 6 给出了测得的瞬态特性曲线, 由图可见 $\text{FWHM} = 70\text{ps}$.

4 总结

我们给出双重势垒增强层技术的设计方法, 并以此制作了具有 p-InP 和 InP 双重势垒增强层结构的 InGaAs MSM-PD 光电探测器, 测得了暗电流、光电流、响应度、击穿电压和瞬态特性。从总体上考虑, InGaAs MSM-PD 已经可以和 PIN-PD 相比拟, 结合 MSM-PD 易于单片集成的优点, MSM-PD 具有极大的应用价值。

感谢中国科学院上海冶金所杨易老师在测试方面给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] K. Kajiyama and Y. Mizushima, Appl. Phys. Lett., 1973, **23**(8):458.
- [2] S. M. Sze, D. J. Coleman, JR. and A. Loya, Solid-State Electron., 1971, **14**(12):1209~1218.
- [3] J. B. D. Soole and H. Schumacher, IEEE J. Quantum Electron., 1991, **27**(3):737.
- [4] J. H. Burroughes and M. Hargis, IEEE Photon. Technol. Lett., 1991, **3**(6):532.
- [5] C. X. Shi, D. Grutzmacher, M. Stollenwerk *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 1992, **39**(5):1028.
- [6] D. Kuhl, F. Hieronymi and E. H. Bottcher, Electron. Lett., 1990, **26**(25):2107.
- [7] J. M. Shannom, Solid-State Electron., 1976, **19**(6):537.
- [8] D. V. Morgan and J. Frey, Electron. Lett., 1978, **14**(23):737.
- [9] 史常忻, K. Heime, 半导体学报, 1991, **12**(12):767.

Investigation on Characteristics of Very Low Dark Current InGaAs MSM-PD

Zhu Hongwei, Shi Changxin and Cheng Yixin

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

Li Tongning

(Wuhan Telecommunication Device Company, Wuhan 430074)

Received 30 October 1995, revised manuscript received 26 June 1996

Abstract The InGaAs MSM Photodetector with double Schottky barrier enhancement layers is investigated for the first time. The results show that dark current is greatly reduced with 15nm p-InP and 100nm InP double Schottky enhancement layers. The lowest dark current was 4.7nA (10V). It proves that it is an effective method in the design of MSM-PD.

EEACC: 4250, 2560Z