

# 低漏电高增益 InGaAs/InP SAGM 雪崩光电二极管

王树堂 曾靖 李锋 胡春阳 夏彩虹 孙捷 樊爱香

(中国科学院半导体所,北京)

1990年1月15日收到

根据器件结构的优化设计,严格控制生长参数以及理想的器件制备工艺获得了低漏电高增益 InGaAs/InP SAGM 雪崩光电二极管。测量了百余支器件,  $0.9V_b$  下漏电流  $I_d < 20nA$ ; 响应度  $\sim (0.7-0.8)mA/mW$ , 最大倍增  $30-85$  (入射光波长  $1.3\mu m$ , 功率  $1.6\mu W$ ), 参与倍增的暗电流  $I_{dm}$  最小可达  $0.25nA$ 。

主题词 InGaAs, APD, 低漏电, 高增益

## 一、引言

InGaAs PIN 光电二极管以其暗电流低,量子效率高,在  $(1.0-1.65)\mu m$  波段具有近似相同的光响应度以及响应速度快等优点已普遍为人们所采用。随着大容量,长距离光通信的急速发展,具有内部光电流增益的低噪音雪崩光电二极管(APD)愈来愈受到应用者的青睐。Ge APD 的制备工艺成熟,已在一些系统中得到应用,但受到材料固有性质的限制,器件暗电流高,雪崩附加噪声大。人们已将注意力集中到近年发展起来的工艺难度较大的异质结构 InGaAs/InP APD。

$In_{0.53}Ga_{0.47}As$  是能在 InP 衬底上晶格匹配生长的直接带隙材料。室温禁带宽度  $E_g = 0.75eV$ , 在  $1.3\mu m, 1.55\mu m$  光纤通信领域内是理想的光电探测器材料。在通常使用的电压下 InGaAs pn 结隧道击穿先于雪崩击穿,难于制出性能令人满意的雪崩探测器件。一些研究工作者提出 SAGM 结构 InGaAs/InP APD<sup>[1]</sup>, pn 结雪崩区置于宽禁带 InP 层内 ( $E_g = 1.35eV$ ), 吸收区置于 InGaAs 层内,为了避免 InP 材料和 InGaAs 材料之间  $0.6eV$  的禁带宽度差异引起载流子在异质界面价带不连续处的陷落,在雪崩区和吸收区之间夹入 1 至 2 层  $0.75eV < E_g < 1.35eV$  的晶格匹配 InGaAsP 以形成带隙渐变过渡层提高器件的响应速度。本文报道用 LPE 方法生长的 SAGM 台面型 InGaAs/InP APD 的主要直流特性。

## 二、器件结构和制备

根据下列两方面要求对 InGaAs/InP APD 器件结构进行了优化设计:

(1) 器件应具有尽可能高的探测性能,其中包括光谱特性,量子效率,暗电流,倍增因子,过剩噪声,结电容,瞬态响应,工作电压和稳定性等。

(2) 由于工艺条件不可避免的偏差会引起各外延层载流子浓度,厚度等参数的变化,希望在所设计的区域内外延层参数有一定的容差以利于提高工艺的重复性和器件的成品率。器件结构如图 1 所示。

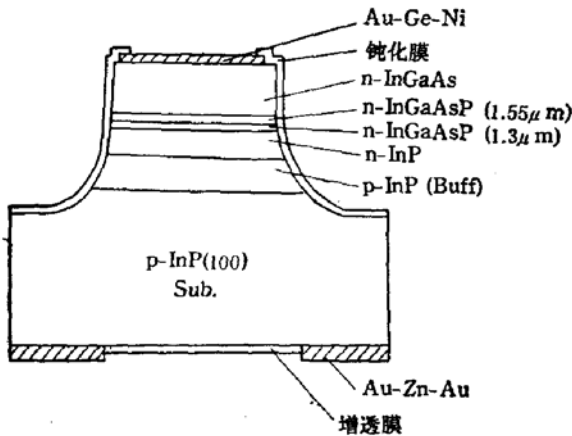


图 1 背面进光台面型 InGaAs/InP SAGM APD 结构示意图

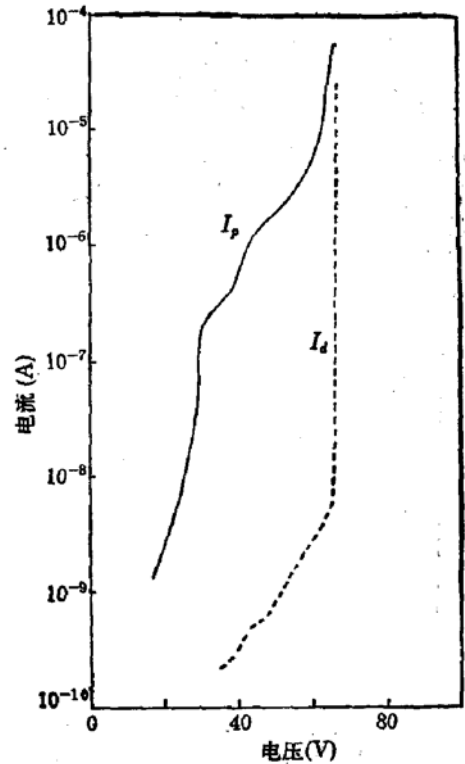


图 2 典型 InGaAs/InP SAGM APD 光电流,暗电流随偏压的变化

InP 材料空穴离化系数大于电子离化系数。从提高倍增因子,降低雪崩倍增噪声和雪崩倍增弛豫时间的要求出发,注入到 InP 雪崩区的光生载流子应为空穴,因而 InGaAs 吸收区为 n 型材料。

本工作全部 InGaAs/InP SAGM 结构是由液相外延生长的。在高气密性的生长系统中,高纯氢保护下,采用多孔石墨滑动舟在 p<sup>+</sup>-InP 衬底上依次生长 p<sup>+</sup>-InP 缓冲层, n-InP 倍增层, n-InGaAsP (1.3 μm) 和 n-InGaAsP (1.55 μm) 过渡层及 n-InGaAs 吸收层。全部结构总晶格失配  $|\Delta a/a| \leq 5 \times 10^{-4}$ 。为了控制 SAGM 结构中各异质界面电场,使电场足够低以避免产生大的隧道电流,同时电场又足够高以克服异质界面势垒对载流子运输的影响,并在 InGaAs 层内有较宽的耗尽区,以及选择并控制 InGaAsP 过渡层的参数适当降低对于外延层参数容差的苛刻要求。我们细致研究了影响外延层纯度,厚度控制等诸生长参数。在 n-InP 外延层生长中厚度控制的平均偏差小于 10%,浓度为  $(1-1.5) \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 。

器件利用标准光刻工艺、化学腐蚀形成台面,研究了台面腐蚀对器件漏电流的影响。台面边缘采用钝化膜保护提高器件的稳定性。N面, P面电极分别为 Au-Ge-Ni 和 Au-

Zn-Au, 进光面生长氮化硅或氮化铝, 台面直径  $75\mu\text{m}$  或  $50\mu\text{m}$ .

### 三、器件的暗电流和倍增特性

图 2 为一个典型 n-InGaAs/n-InGaAsP ( $1.55\mu\text{m}$ )/n-InGaAsP ( $1.3\mu\text{m}$ )/n-InP/p-InP/p<sup>+</sup>-InP APD 的光电流(实线)和暗电流(虚线)随偏压变化曲线。入射光的波长为  $1.3\mu\text{m}$ , 光强约  $1.6\mu\text{W}$ 。光电流曲线具有二次扭折, 相应电压称为拐点电压  $V_{x1}$ ,  $V_{x2}$ 。这是二层 InGaAsP ( $1.3\mu\text{m}$ ,  $1.5\mu\text{m}$ ) 所致。  $V_{x1}$ ,  $V_{x2}$  值依生长参数而定。跟踪测量与图 2 所示器件用同一外延片 (42-2) 制备的 87 支器件, 其中  $V_{x1}$ ,  $V_{x2}$  近似相同。图 3, 图 4 为 87 支器件  $0.9V_b$  下暗电流  $I_d$ , 直流最大倍增  $M$  统计分布的直方图。  $V_b$  为击穿电压。  $I_d < 10\text{nA}$  的器件为 80 支, 占总数 92%,  $M > 30$  的器件为 67 支, 占总数 76.8%, 其中最小暗电流  $1\text{nA}$ , 最大倍增 85。

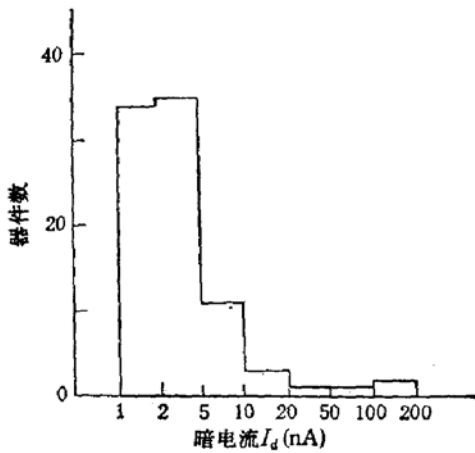


图 3 42-2 外延片制备的 87 支 InGaAs/InP SAGM APD  $0.9V_b$  下暗电流  $I_d$  的统计分布

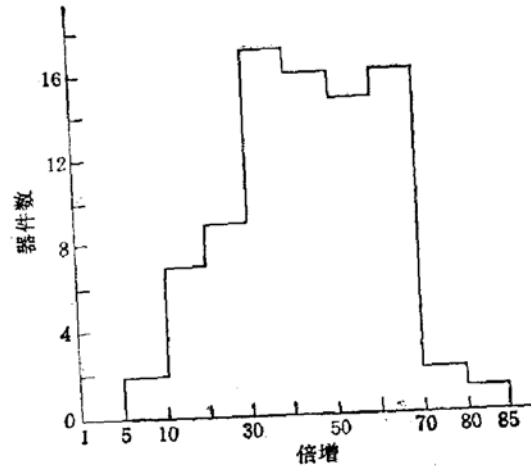


图 4 42-2 外延片制备的 87 支 InGaAs/InP SAGM APD 最大倍增的统计分布

也对百余支不同外延片制备的 InGaAs/InP SAGM 雪崩光电二极管进行测量。表 1 给出各外延片典型器件的直流参数。

表 1 几个典型器件的直流参数

样品 No.	击穿电压 $V_b$ (V)	拐点电压 $V_x$ (V)	响应度 $R$ (mA/mW)	最大倍增 $M_{max}$	暗电流 $I_d$ (nA, $0.9V_b$ )	$I_{dm}$ (nA)
41-1	78	44	0.72	30	3.8	0.7
42-1	77	34	0.72	34	4.7	0.7
42-2	66	46	0.70	55	1.8	0.25
13-1	123	60	0.70	34	15	1.6
32-2	86	32	0.80	31	18	1.7

表 1 中(1)测量响应度和最大倍增系采用  $1.3\mu\text{m}$  直流工作的 InGaAsP 双异质结激光器, 光能量为  $1.6\mu\text{W}$ .

(2)  $I_{d,m}$  为倍增 20 时漏电流除以 20, 相应于参与倍增的暗电流的上限.

(3) SAGM 结构中如有二层 InGaAsP 过渡层,  $V_s$  相应于  $V_{s2}$ . 表中 13-1, 32-2 器件 SAGM 结构中只有一层  $1.3\mu\text{m}$  InGaAsP 过渡层. 器件  $0.9V_b$  下  $I_d < 20\text{nA}$ , 最小值为  $1\text{nA}$ ; 参与倍增暗电流  $0.25\text{—}2\text{nA}$ , 最小值  $0.25\text{nA}$ ; 响应度  $0.7\text{—}0.8\text{mA/mW}$ ; 最大倍增可达 85.

有关器件结构设计, 制备工艺及性能研究将在另文报道.

通过实验发现, 合理的结构参数设计, 严格的空制与稳定液相外延生长参数, 完善而细致的器件制备工艺, 获得了低暗电流, 高响应度, 高倍增的 InGaAs/InP SAGM 雪崩光电二极管. 器件性能大大超过 Ge APD. 在大容量, 长距离光纤通讯中将会展现广阔的应用前景.

### 参 考 文 献

- [1] Matsushima, Y., Sakai, K. Noda, *IEEE Electron Device Lett.*, EDL-2, 179 (1981).

## Low Dark Current High Gain InGaAs/InP SAGM APD

Wang Shutang, Zeng Jing, Li Feng, Hu Chinyang, Xia Caihong, Sun Jie and  
Fan Aixiang

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing)

### Abstract

Optimum designing the device structure, strictly controlling the parameters of LPE growth and perfect fabricating processing of devices, the InGaAs/InP SAGM APDs with low dark current and high multiplication factor have been obtained. More than one hundred devices have been measured. The responsivity and the multiplication factor of these devices are about  $0.7\text{—}0.8\text{ mA/mW}$  and  $30\text{—}85$ , respectively (incident light wavelength  $1.3\mu\text{m}$ , light power  $1.6\mu\text{W}$ ). The dark currents participated in the avalanche multiplication process and at  $0.9V_b$  are less than  $2\text{ nA}$  and  $20\text{ nA}$ , respectively.

**Key words** InGaAs, APD, Low dark current, High gain