

InGaAs/InGaAsP/InP 长波长雪崩 光电二极管研究

李 锋 王树堂 曾 靖 樊爱香 夏彩虹
孙 捷 胡春阳 白金花 陈心敏

(中国科学院半导体研究所物理部, 北京 100083)

研制了高速、高效、低噪声的 InGaAs/InGaAsP/InP 长波长(1.0~1.7 μm) 台面型雪崩光电二极管($\phi=75\ \mu\text{m}$), 器件采用分离的吸收区、雪崩区和能隙过渡区的 SAGM 结构. 研究了器件最佳结构参数设置、在 InP 上匹配生长 InGaAs、InGaAsP 及其厚度和载流子浓度的控制问题. 器件最大倍增因子大于 50, 灵敏度大于 $0.70\ \mu\text{A}/\mu\text{W}$, 暗电流 I_D 的典型值约为 $20\ \text{nA}$ ($V_r = 0.9V_B$).

关键词: 雪崩倍增管, 耗尽层, 液相外延生长, 载流子浓度.

1 引 言

日益发展的长波长光纤通讯及其它光电测量要求性能比 Ge 探测器更优越的长波长光电探测器. $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y/\text{InP}$ 合金系是理想的长波长光电材料系, 可用于制备多种发光和探测器件. InGaAs(P)/InP 雪崩光电二极管(APD)是 1.0~1.7 μm 波段具有内增益的高速、高效、低噪声的光电探测器件, 与 Ge-APD 相比, 具有较低的暗电流和雪崩附加噪声. 自 1978 年 Hurwitiz 和 Hsieh 报道了第一个 InGaAs(P)/InP-APD^[1] 以来, 这方面的工作日益深入, 但国内还未见高品质实用器件的报道.

2 器 件 设 计

我们采用的器件结构如图 1. 为使光敏器件适用于尽可能宽的光谱范围, 应采用 InGaAsP 材料中 E_g 最小的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ (其 $E_g=0.75\ \text{eV}$) 作吸收区, 同时考虑到 InP 中的空穴离化系数比电子的离化系数大, 应采用空穴注入, 故吸收区采用 N 型 InGaAs 材料. 倍增区采用宽禁带的 N-InP ($E_g=1.35\ \text{eV}$) 材料, 可使器件的隧道电流较低. 在 InP 和 InGaAs 之间夹入 InGaAsP ($\lambda=1.3\ \mu\text{m}$, $1.55\ \mu\text{m}$) 四元层, 形成带隙渐变, 以避免 InP 和 InGaAs 间价带势垒造成的空穴载流子陷落. 这就是分离的吸收区、雪崩区和能隙过渡区的 SAGM.

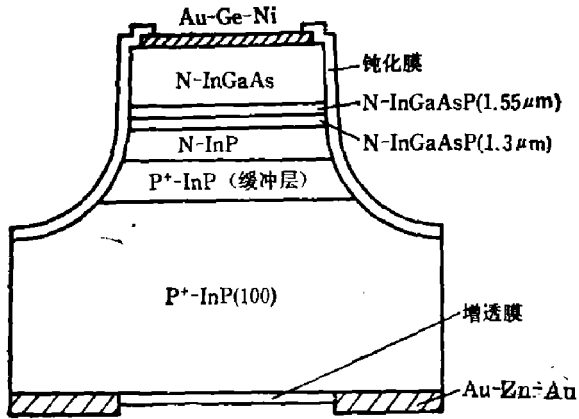


图1 InGaAs/InGaAsP/InP SAGM 雪崩光电二极管剖面图

Fig. 1 Cross-section of InGaAs/InGaAsP/InP SAGM APD

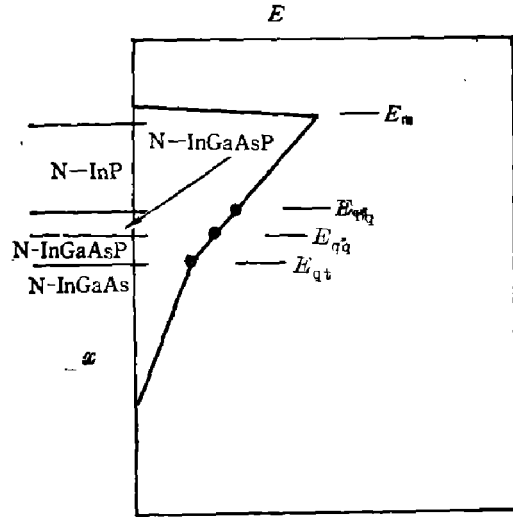


图2 InGaAs/InGaAsP/InP 耗尽区电场分布(击穿)

Fig. 2 Electric field distribution in the depletion region of InGaAs/InGaAsP/InP (breakdown)

结构^[2,21]。另外,为了避免在InGaAs、InGaAsP上液相外延InP出现回熔问题,器件采用背入射结构。

对于InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD具体结构参数的设置,我们考虑到以下几点:(1)为了避免大隧道电流,N-InP载流子浓度要低;(2)吸收层N-InGaAs要足够厚,以保证高的量子效率,同时其流子浓度要小,使器件在工作状态下有效吸收区全部耗尽,从而保证器件的高速度;(3)由图2可知耗尽区场强从N-InGaAs至N-InP逐渐增强,空穴漂移速度上升,故选择四元层组份时应使价带阶跃 $\Delta E_v(qt) < \Delta E_v(qq) < \Delta E_v(bq)$,我们选择的InGaAsP($\lambda = 1.3 \mu\text{m}, 1.55 \mu\text{m}$)价带阶跃分别为 $0.06 \text{ eV} < 0.15 \text{ eV} < 0.4 \text{ eV}$;根据实验测量并参考有关报道^[2],我们选取各界面场强设计范围为 $0.95 E_B < E_m < E_B, 1 \times 10^5 \text{ V/cm} < E_{bq} < 3.5 \times 10^5$

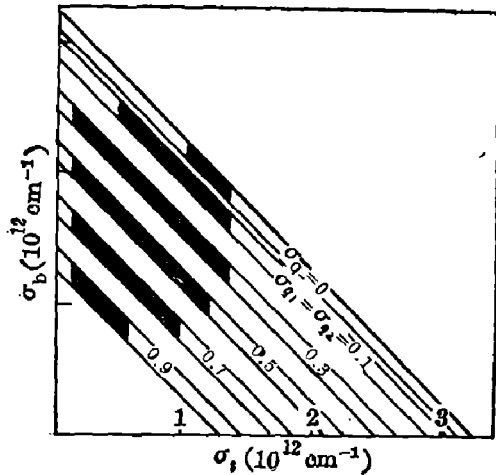


图3 InGaAs/InGaAsP/InP 面电荷密度的相互关系

Fig 3 The relation between charge densities of three layers in the InGaAs/InGaAsP/InP structure

$\text{V/cm}, 0.4 \times 10^5 \text{ V/cm} < E_{qq} < 2.5 \times 10^5 \text{ V/cm}, 0.15 \times 10^5 \text{ V/cm} < E_{qt} < 2 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 。

由介质高斯公式可得到

$$\begin{cases} \frac{0.95 E_B}{1.5 \times 10^{-7}} \text{ cm}^{-2} < \sigma_b + \sigma_{q1} + \sigma_{q2} + \sigma_t < \frac{E_B}{1.5 \times 10^{-7}} \text{ cm}^{-2}, \\ 0.67 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} < \sigma_{q1} + \sigma_{q2} + \sigma_t < 2.33 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}, \\ 0.27 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} < \sigma_{q1} + \sigma_t < 1.67 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}, \\ 0.1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} < \sigma_t < 1.33 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}. \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中各 σ_i 为各层面电荷密度,图3为根据式(1)得到的 σ_t 与 σ_b 的关系(取 $E_B = 4.9 \times 10^5$

V/cm 为 InP 在浓度为 $1 \times 10^{16}/\text{cm}^{-3}$ 时的雪崩击穿场强)。由图 3 可知,对应于 $\sigma_{q1} = \sigma_{q2} = 0.3 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$, σ_t 和 σ_b 有最大的选择范围,这就是本文采用的设计区域。设计基点选在区域中部,具体为:(1)对于 N-InGaAsP(1.3 μm , 1.55 μm)层,根据已有报道^[5],很薄的过渡层就足以抑制空穴在异质界面的陷落。考虑到 InGaAsP 层厚度和纯度的控制,选择过渡层厚度为 $d_{q1} = d_{q2} = 0.13 \sim 0.15 \mu\text{m}$, $n_{q1} = n_{q2} = 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 。(2)对于 N-InGaAs 层,由 $\eta = 1 - e^{-\alpha w}$,对于 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 的入射光其吸收系数 $\alpha_{1.3} = 1.24 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$,要使量子效率 $\eta > 0.8$,必须使其厚度 $d_t > 1.30 \mu\text{m}$ 。如前所述 N-InGaAs 的载流子浓度 n_t 应尽量降低,我们的工艺水平可以稳定地得到 $n_t = 7 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 。事实上,为便于后工艺,该层的实际厚度一般为 2~3 μm ,这并不影响我们的设计。(3)对 N-InP 层,由 $\sigma_t = (1.3 \times 10^{-4}) \times (7 \times 10^{15}) \text{cm}^{-2} = 0.9 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$,和图 3 中对应的 $\sigma_b = 1.7 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$,我们可以稳定地生长浓度为 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 的 N-InP,故取 $d_b = 1.7 \mu\text{m}$ 。制作器件采用的具体参数值见表 1。

表 1 InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD 设计参数

Table 1 The design parameters of the InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD

	载流子浓度 $n(\text{cm}^{-3})$	厚度 $d(\mu\text{m})$	禁度带宽 $E_g(\text{eV})$	晶格失配 $\Delta a/a$
P ⁺ -InP(Sub)	1×10^{18}		1.25	
P ⁺ -InP(Buff)	1×10^{18}	2	1.35	
N-InP	1×10^{16}	1.7	1.35	
N-InGaAsP(1.3 μm)	1×10^{16}	0.14	0.95	4×10^{-4}
N-InGaAsP(1.55 μm)	1×10^{16}	0.14	0.80	4×10^{-4}
N-InGaAs	7×10^{15}	1.25	0.74	4×10^{-4}

3 器件制备

本工作采用液相外延法生长 SAGM 结构,各层生长一次完成。

3.1 生长 InP

我们采用两相法生长 N-InP 和 P⁺-InP,避免了母液中磷挥发给准确称量造成的困难,而且生长速度较慢,重复性好。图 4 为 $T_g \approx 653^\circ\text{C}$ 附近时的实验结果。

3.2 在 InP 上匹配生长 InGaAs^[4]和 InGaAsP

采用过冷法生长 N-InGaAs 层。我们系统地研究了不同生长温度下的母液组分、过冷度、降温速度等对 InGaAs 层质量的影响,得到了高质量的外延层,失配率 $\Delta a/a < 3 \times 10^{-4}$ 。采用两相法生长 N-InGaAsP 层。在参照其他作者数据的基础上^[5],我们进行了饱和温度 $T_s = 680^\circ\text{C}$ 和生长温度 $T_g = 650^\circ\text{C}$ 的外延试验,结果见图 5。最终可使失配率稳定在 $\Delta a/a < 4 \times 10^{-4}$ 范围,且表面光洁、厚度均匀。

3.3 降低 N-InP、N-InGaAsP 和 N-InGaAs 的载流子浓度

降低和稳定载流子浓度是本器件外延工艺的关键,我们使 $n_{\text{N-InP}}$ 降低至 $(6 \sim 11) \times 10^{15}/\text{cm}^3$ 、 $n_{\text{N-InGaAs}}$ 降低至 $(5 \sim 8) \times 10^{15}/\text{cm}^3$,且迁移率很高。主要应注意:(1)提高衬底、源材料的纯度和清洁水平,避免操作中任何玷污。(2)在 690°C 对母液进行 15 h 烘烤,可获

得低且稳定的载流子浓度,同时对石墨舟进行 1300~1400°C 的烘烤也很重要。(3)排除湿度

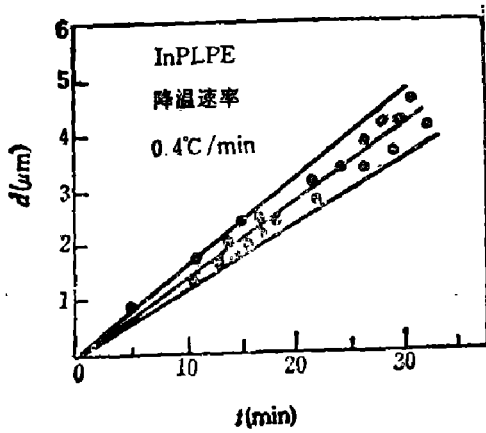


图 4 降温速率为 0.4°C/min 时 InP 生长厚度与时间的关系

Fig. 4 Thickness of InP as a function of growth time at a decreasing rate of 0.4°C/min

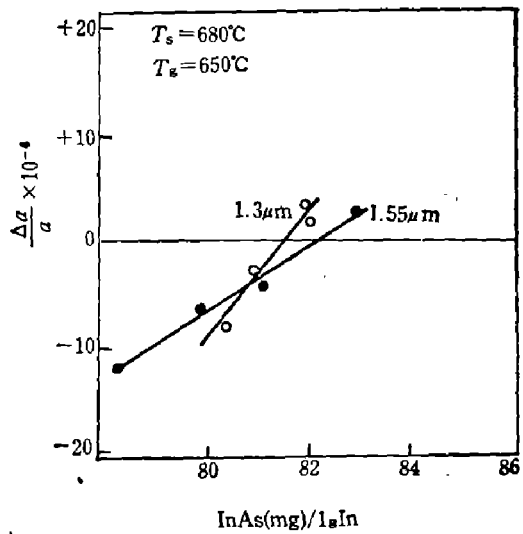


图 5 InGaAsP 外延层与 InP 衬底晶格失配随母液中 InAs 含量的变化

Fig. 5 Lattice mismatch between InGaAsP epilayer and InP substrate for various InAs content in the solution

的影响,环境湿度强烈影响外延层载流子浓度,在高温、高湿条件下很难降低载流子浓度,这可能是经过烘烤的石墨舟和源很干燥,在装衬底时暴露大气吸水,从而造成载流子浓度上升.图 6 反映了环境湿度对 N-InP 的影响,可以看出,当绝对湿度 $J > 30 \text{ mmHg}$ 时(相当于 $T = 35^\circ\text{C}$,相对湿度 = 70%),生长合格的 N-InP 是困难的.我们用空调器降温去湿并将操作箱通高纯氮,避免了水汽玷污母液,有效地降低了外延层载流子浓度.

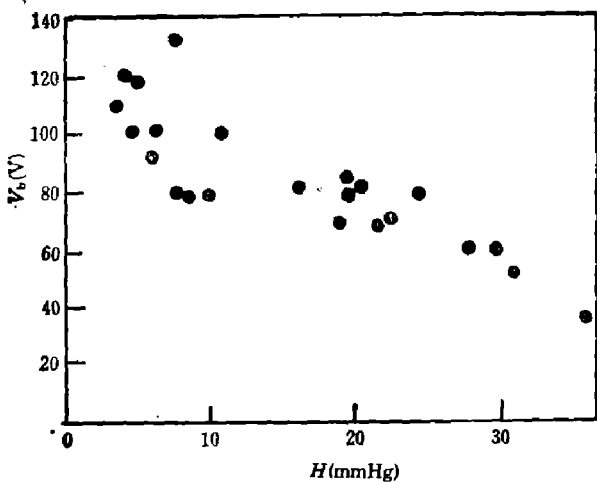


图 6 环境湿度对 N-InP 击穿电压的影响

Fig. 6 The influence of environmental humidity on the breakdown voltage of N-InP

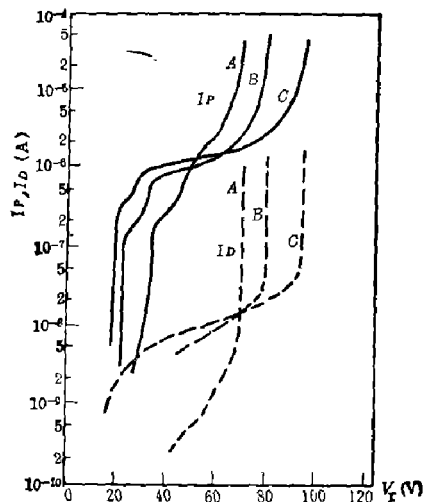


图 7 InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD 光电流 I_p 和暗电流随 I_D 反偏电压的变化

Fig. 7 Dependence of photocurrent and dark-current on reverse bias in a InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD

4 器件特性

在对外延 SAGM 结构进行制管工艺时, 应注意台面漏电、增透膜等方面的问题, 以最大限度地保护外延结构的优良性能。

我们对制备的器件进行了大量的测试工作, 认为按照表 1 制备器件是可行的, 制得的器件具有优良的性能, 参见表 2。

表 2 器件主要性能参数

Table 2 The main characteristic parameters of the device

参 数	最小值	典型值	最大值	备 注
光谱范围 $\lambda(\mu\text{m})$	1.0		1.65	
击穿电压 $V_B(\text{V})$	60	80	120	
暗电流 $I_D(\text{nA})$		20	50	$V_r=0.9V_B$ 时
响应度 $R(\mu\text{A}/\mu\text{W})$	0.6	0.7	0.8	$\lambda=1.3\mu\text{m}$ 时
脉冲响应时间 $t(\text{ps})$		100	300	$\lambda=1.3\mu\text{m}, M=10$ 时
过剩噪声因子 F		5		$M=10$ 时
最大倍增因子 M_{max}	20	30	50	
光敏面直径 $D(\mu\text{m})$		75		

图 7 为我们研制的 InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD 的倍增光电流 I_P 和暗电流 I_D 的特性曲线(采用 $\lambda=1.3\mu\text{m}$ 的入射光)。曲线 B 是满足设计参数的器件, 当反偏电压 V_r 较小时, 耗尽区处于 N-InP 层内, 对 $1.3\mu\text{m}$ 光无响应。随着 V_r 增加, 耗尽区延至 N-InP/N-InGaAsP 界面层($V_r=25\text{V}$)时, I_P 上升。随后的二次扭曲是由于存在两个 InGaAsP 四元层、而其载流子浓度及光吸收系数有差别造成的。当电压继续升高时, I_P 进入 $M=1$ 的平坦区域, V_r 再增大, 则雪崩倍增发生, 直至最大倍增点。曲线 A 为 σ_b 值较大的器件, 它工作时 N-InGaAs 中耗尽区宽度较小, 这就降低了器件的高频量子效率和响应速度。曲线 C 为 σ_b 较小的器件, 虽然这种器件的倍增因子与满足设计 σ_b 的器件相差无几, 但其耗尽区过早进入 N-InGaAs 层, N-InGaAsP/N-InGaAs 界面场强较大, 从而使器件暗电流 I_D 和噪声较大。

参 考 文 献

- 1 Hurwitz C E, Hisieh J J. *Appl. Phys. Lett.*, 1978; **32**(8): 487
- 2 Osaka F, Mikawa T. *IEEE J. Quantum Electron*, 1986; **GE22**(3): 471
- 3 Matsushima Y, Sakai K. *IEEE Electron Device Lett.*, 1981; **EDL2**(7): 179
- 4 Nakajima K, Yamazaki S. *J. Crystal Growth*, 1982; **59**(3): 573
- 5 Nakajima K, Kusunoki T. *Fujitsu Sci. Tech. J.*, 1980; **16**(4): 59

STUDY ON InGaAs/InGaAsP/InP SAGM AVALANCHE PHOTODIODE

LI FENG, WANG SHUTANG, ZHENG JING, FAN AIXIANG, XIA CAIHONG,
SUN JIE, HU CHUNYANG, BAI JINHUA, CHEN XINMIN

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing 100083, China)

Mesa InGaAs/InGaAsP/InP avalanche photodiodes ($\phi=75\mu\text{m}$) have been studied and developed with high response speed, high efficiency and low noise in the long wavelength range from $1.0\mu\text{m}$ to $1.7\mu\text{m}$. The structure with separated absorption, energy gap-graded and multiplication regions (SAGM) has been used. The optimum conditions for the structure parameters, the lattice-matched liquid-phase epitaxial growth of InGaAsP, InGaAs layer on InP substrate, the controlling of layer thickness and carrier concentration of the various epitaxial layers have been investigated. The maximum multiplication factor of the device is higher than 50. The sensitivity is higher than $0.70\mu\text{A}/\mu\text{W}$. The typical dark current is about 20nA ($V_r=0.9V_B$).

Key words: avalanche multipliers, depletion layer, liquid phase epitaxial (LPE) growth, carrier concentration.