

Pt-GaAs 肖特基势垒雪崩光电探测器的研究

郭康瑾 胡维央 姚文兰 陈莲勇

(中国科学院上海冶金研究所, 上海 200233)

摘要 Pt-GaAs 肖特基势垒雪崩光电探测器已研制成功。器件制作在施主浓度为 $0.5 \sim 3 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 、厚度约为 $20 \mu\text{m}$ 的 GaAs 外延层上。为防止边缘击穿, 用能量为 500keV 、剂量为 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 的质子轰击, 在直径为 $150 \mu\text{m}$ 的光敏区外形成高阻保护区。半透明的 Pt 肖特基势垒膜用特殊的蒸发法形成。器件的峰值响应波长随偏压的改变可以从 8600\AA 移动到 8835\AA , 截止波长可延伸到 9700\AA , 观察到明显的 Franz-Keldysh 效应。器件倍增可达 100 以上; 暗电流仅几纳安; 过剩噪声系数为 7; 上升、下降时间短于 1ns 。这种器件可与 FET 实现平面集成。

关键词 雪崩光电探测器; GaAs; 肖特基势垒

一、引言

随着光纤通信、光信息处理以及光计算等学科的发展, 各种新颖的光电子器件引起了人们广泛的注意和兴趣, 光电子集成电路 (OEIC) 就是其中之一, 它具有下列优点: (1) 由于集成化减小了器件和外部电子器件接口的寄生阻抗, 使光电子器件的响应速度、噪声性能得到显著地改进; (2) 与电子器件结合, 使器件功能超出了光-电相互转换的范围; (3) 简化了元件和系统的组装, 使器件成本降低、尺寸减小、可靠性提高。因此, 近年来许多研究人员对多种 OEIC 器件进行了深入研究^[1-5]。但通常的光器件具有垂直结构型式而电子器件具有平面结构型式。因此要实现光电子器件的集成, 有两个基本要求, 即(1)结构的平面性; (2)工艺的相容性。为此, 研究发展了一些独特的制作技术, 如桥式互连^[2], 平面化的表面抛光^[3]以及梯度台阶工艺^[4]等以实现光电子器件的单片集成。Pt-GaAs 肖特基势垒雪崩光电探测器 (APD) 是一种本质上适合与场效应晶体管单片集成的器件, 不需任何附加的工艺步骤, 可望用它构成新型的单片集成接收器组件。本文报道 Pt-GaAs 肖特基势垒 APD 的制作、半透明 Pt 膜的特性以及 APD 器件的光谱响应、倍增、暗电流和响应速度等特性。

二、器件结构和制作工艺

器件结构如图 1 所示。Pt-GaAs APD 制作在以 n^+ -GaAs 为衬底的 n 型 GaAs 外

延层上,其净施主浓度 $N_D - N_A = 5 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$, 厚度为 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 。将外

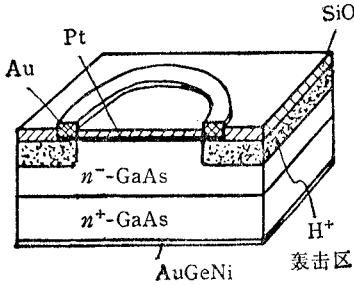


图1 器件结构示意图

外延层表面沉积 1500 \AA 的 SiO_2 。质子轰击的能量为 500keV , 剂量为 $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 。此外,也可以用扩散 P 型保护环,即在 700°C 下用 ZnAs_2 闭管扩散 15min , 结深 $\sim 1.2 \mu\text{m}$; 或用腐蚀台面的方法,将光敏区外的 GaAs 外延层用 $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 1:8:1$ 溶液腐蚀除去,直到衬底。但从工艺上和集成化角度考虑,质子轰击是较佳的技术方案。

在我们的研究中,使用的 GaAs 材料有气相和液相外延两种。

三、实验结果和讨论

1. 半透明 Pt 肖特基势垒膜的特性

半透明 Pt 膜是影响器件特性的重要因素。研究中,预先将 Pt 电镀在成型钨丝加热器上,在真空镀膜仪中用电阻加热法蒸发成膜,真空度优于 $2 \times 10^{-5} \text{mmHg}$, 衬底温度为 80°C 。用四探针测量薄膜电势的方法作为监控光透过率的判据。研究

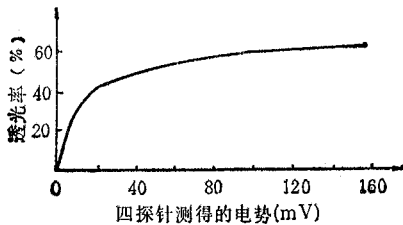


图2 透光率与四探针电势的关系

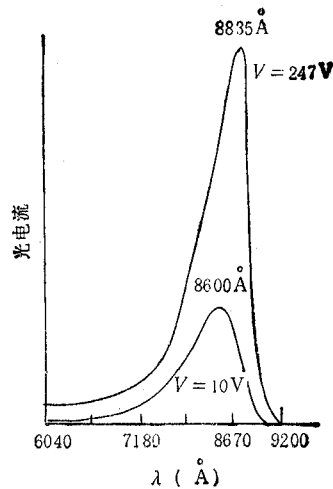


图3 光谱响应特性

表明,在 $0.7 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 波长范围内, Pt 膜的透光率与四探针测得的电势,有图2所示的关系。由图可见, Pt 膜的透光率大于 50% 后,即使电势增高很多,光透过率也增加很少。通常,为使较多的光透过 Pt 膜,其厚度应控制在 100 \AA 量级,这是器件制作的关键技术。膜厚监控,因用的衬底不同,四探针测得的电势也不同,试验结果列于表1。通常选用载玻片作为膜厚监控的衬底材料。它不仅便宜,又易于同时用电学和光学方法进行检测。空白载玻片在 $0.6 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 波长的光吸收率为 10% 。在我们的研究中, Pt 肖特基

表 1 不同衬底上同样厚度 Pt 膜的电势

样品号	衬底材料	四探针测得的电势 (mV)			
		1	2	3	4
1	载玻片 SI-GaAs*	8.018	8.552	8.758	8.083
		14.643	15.254	14.687	14.652
2	载玻片 SI-GaAs	21.972	21.615	23.373	22.064
		104.251	103.488	107.915	105.364

* SI-GaAs: 半绝缘 GaAs 抛光片

图形用剥离法形成。剥离液可以是丙酮,也可用 40℃ 的 H_2SO_4 。

2. Pt-GaAs APD 的特性

(1) 光谱响应特性 器件的光谱响应特性如图 3 所示。随反向偏压的增高,器件的响应度迅速增长。同时,峰值响应波长明显地从低偏压 (10V) 时的 8600 Å 增长到高偏压 (247V) 时的 8835 Å。通常, GaAs 的室温禁带宽度 $E_g = 1.42\text{eV}$, 对应的光吸收截止波长为 8800 Å。在没有任何扰动的条件下, GaAs 对长于 8800 Å 波长的光应该是透明的。然而,实际的能带结构是复杂的, Franz-Keldysh 效应就是描述对波长长于吸收限的光仍有吸收作用的物理现象的。这种对波长接近吸收限的辐射, Franz-Keldysh 吸收系数由下式描述:

$$\alpha(\lambda, E) = 1.0 \times 10^4 \frac{f}{n} \left(\frac{2\mu}{m} \right)^{4/3} E^{1/3} \int_{\beta}^{\infty} |A_i(Z)|^2 dZ \quad (1)$$

式中

$$\beta = 1.1 \times 10^3 (E_g - \hbar\omega) (2\mu/m)^{1/3} E^{-2/3} \quad (2)$$

E 为电场, μ 为电子、空穴的约化质量, m 为自由电子质量, n 为折射率, $f \approx 1 + m/m_e$ (对 GaAs, $m_e/m = 0.087$), \hbar 为普朗克常数, ω 为入射辐射的频率, E_g 为零场禁带宽度。

$$\int_{\beta}^{\infty} |A_i(Z)|^2 dZ = \left[\left| \left(\frac{dA_i(Z)}{dZ} \right)_{\beta} \right|^2 + \beta |A_i(\beta)|^2 \right] \quad (3)$$

根据器件的掺杂分布和偏置条件,在无雪崩增益时,器件的内量子效率为

$$\eta_0(\lambda, V) = \frac{\int_0^w G(\lambda, x) dx}{\phi(\lambda)(1-R)} = \int_0^w \alpha(\lambda, x) \exp \left[-\int_0^x \alpha(\lambda, x') dx' \right] dx \quad (4)$$

而有增益时的内量子效率为

$$\eta_1(\lambda, V) = \frac{\int_0^w g(\lambda, x) \exp \left[-\int_0^x (\alpha_n - \beta_p) dx' \right] dx}{\left\{ 1 - \int_0^w \alpha_n \exp \left[-\int_0^x (\alpha_n - \beta_p) dx' \right] dx \right\}} \quad (5)$$

w 是与偏置电压 V 对应的耗尽区宽度; $\phi(x)$ 是波长为 λ 的入射光子流; R 是反射率。根据上述关系对 Pt-GaAs APD 进行了数值分析,结果示于图 4。器件采用了净施主浓度 $N_D - N_A$ 分别为 $5 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$ 和 $2 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 的两种材料,偏置电压分别为 $0.05V_B$ 和 $0.90V_B$ 。对于用 $2 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 材料制成的器件,其长波截止是渐变的。这是由于在这种

材料里电场较强,吸收限的 Franz-Keldysh 位移较大, 然而其量子效率仍然较低. 因为对这种掺杂水平,即使在雪崩击穿时,耗尽区的宽度仍窄于 $2\mu\text{m}$. 而对 $N_D - N_A = 5 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$ 的高纯材料制成的器件,在较短波长上有较高的量子效率,并有较突然的长波截止. 这是由于这种器件的耗尽区较宽,在高反偏下, Franz-Keldysh 效应变得很明显,致使器件的长波截止显著延伸. 我们研制的 Pt-GaAs APD 的截止波长可延伸到 9700\AA , 大大超过了室温 GaAs 禁带宽度所决定的长波吸收限.

(2) 光电流和倍增特性 图 5 描述了用气相和液相外延材料制作的 Pt-GaAs APD 的光电流与偏置电压的关系. 随偏置电压的增

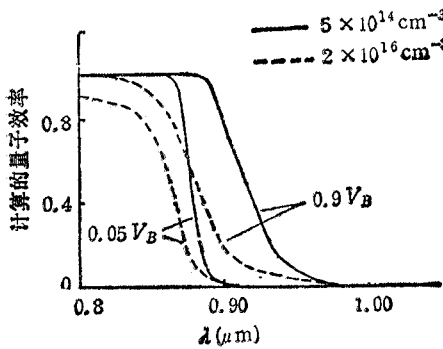


图 4 计算的量子效率与入射波长的关系

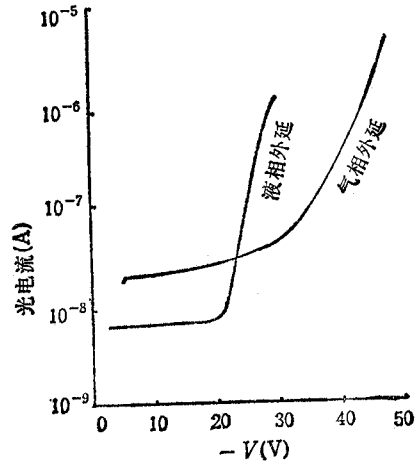


图 5 器件的光电流特性

高,光电流逐渐增大,达到一定值时产生明显的倍增现象. 器件倍增因子的测量装置示于图 6. 其中,光源是 GaAlAs/GaAs LED. 光波内调制在 1kHz/s 并用测量显微镜聚焦后照射到被测 APD 的光敏面上. 器件的倍增因子通过负载电阻 R_L 用低噪声、高增益选频放大器来测量. 放大器中心频率为 1kHz/s , 带宽为 32Hz . 为避免增益饱和,我们采用低照射功率进行测量. 测得的倍增因子 (M) 随偏压 ($-V$) 的变化示于图 7. 由图可见,一般在 $0.8V_B$ 下,器件的倍增因子可达 $100\sim 500$;在 $0.5V_B$ 以下,倍增因子通常小于 10.

在 APD 中,光生载流子的倍增可以用一个经验公式来描述:

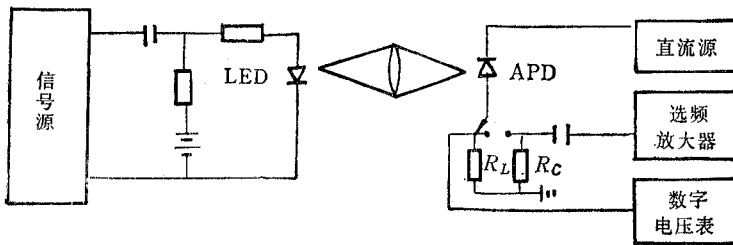


图 6 倍增因子测量装置

$$M_{ph} = 1 / \left[1 - \left(\frac{V_R - IR}{V_B} \right)^n \right] \tag{6}$$

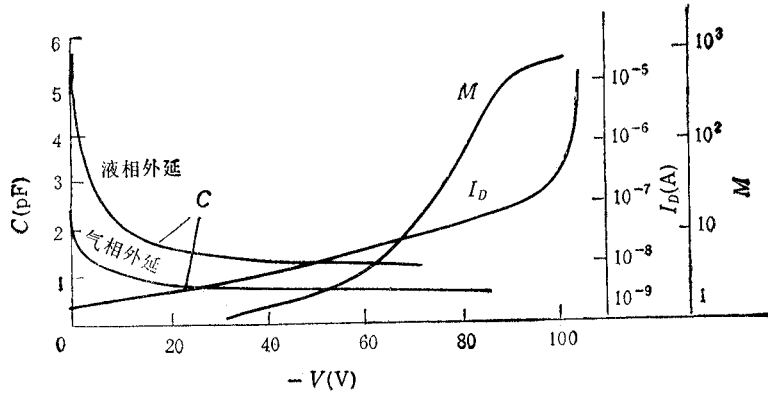


图7 倍增因子、暗电流、电容与偏压的关系

式中 I 为总的倍增电流; V_R 和 V_B 分别为反向偏压和击穿电压; n 为一个与半导体材料、掺杂分布以及辐照光波长有关的常数; R 为有效串联电阻。最大光电倍增因子为

$$(M_{ph})_{max} \approx \sqrt{V_B / (nI_p R)} \quad (7)$$

式中 I_p 为无倍增时的起始光电流。可见, 最大光电倍增因子与器件击穿电压的平方根成正比。

(3) 暗电流 暗电流, 即无光照时器件的反向漏电流, 是影响 APD 使用的重要参数之一。暗电流的测量装置也如图 6 所示。通过负载电阻 R_L 所产生的压降, 用数字电压表读取暗电流值。测量灵敏度可达 $5 \times 10^{-11} A$ 。测得器件的暗电流 (I_D) 与偏压 ($-V$) 的关系示于图 7。在低偏压下, 暗电流为 $10^{-9} A$ 量级, 但随偏压的增高而逐步增大。对肖特基势垒二极管, 它的反向电流为

$$\left. \begin{aligned} J_R &= A^{**} T^2 \exp[-q\phi_{B0}/(kT)] \exp[q\sqrt{q\epsilon/4\pi\epsilon_0}/(kT)] \\ \epsilon &= \sqrt{(2qN_D/\epsilon_0)[V + V_{bi} - (kT/q)]} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 A^{**} 是有效里查逊常数; ϕ_{B0} 是零场肖特基势垒高度; ϵ_0 是半导体材料的介电常数; V_{bi} 是内建电势。反向电流将随反向偏压的增高而增大。为消除或减少边缘击穿和反向漏电流, 必须采用边缘保护结构。我们采用质子轰击高阻区构成的保护环, 使器件的暗电流在 $0.9V_B$ 时小于 $2 \times 10^{-8} A$ 。与相应的硅器件比较, 暗电流稍大一些。

(4) 噪声特性 APD 中一次电子-空穴对倍增后产生的二次电子-空穴对的数目是一个随机变量, 因而产生倍增噪声。这种噪声与器件所用的材料, 结构类型, 电子、空穴的电离率等因素有关, 是一个相当复杂的函数关系。通常, 用过剩噪声系数来描述这一特性。我们实验测量了 $M = 100$ 时器件的过剩噪声系数为 7.0, 比相应硅器件略大。

(5) 响应速度和电容 用 AlGaAs/GaAs 激光二极管作光源, 测得器件的上升、下降时间均小于 1ns。

器件的电容 (C) 随偏压 ($-V$) 的变化示于图 7。随反向偏压的增高, 器件电容逐渐减小, 可降到 1pF 以下。用气相外延材料制成的器件, 其电容值要比用液相外延材料制成的器件明显减小; 并且, 随偏压增高, 电容减小得更快。

四、结 论

Pt-GaAs 肖特基势垒 APD 已研制成功。器件制作在施主浓度为 $5 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 、厚度为 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 的 GaAs 外延层上;为防止边缘击穿,用能量为 500 keV、剂量为 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 的质子轰击,在直径为 $150 \mu\text{m}$ 的光敏区外形成高阻 GaAs 保护环。用特制的蒸发源蒸镀半透明 Pt 肖特基膜。制得器件的峰值响应波长随偏压的不同,可以从 8600 \AA 变化到 8835 \AA ;截止波长可延伸到 $\sim 9700 \text{ \AA}$,明显超过了由 GaAs 禁带宽度所决定的长波吸收限,清楚地观察到了 Franz-Keldysh 效应。器件倍增可达 100 以上;暗电流为几个纳安;在 $M = 100$ 时,过剩噪声系数 $F = 7.0$;上升、下降时间短于 1ns;电容小于 1pF。这种器件可与 FET 实现平面集成。与 GaAs 金属-半导体-金属 (MSM) 光电探测器^[6]相比,它们的暗电流相当,而 Pt-GaAs APD 的灵敏度和倍增因子要高得多。因此,这是一种新的适于集成的光电探测器件,可望在光信息处理,光计算以及光纤通信等方面获得应用。

器件研究用的材料系我所材料室提供的;响应速度是由中国科学院硅酸盐研究所光纤测试组施庆麟等协助测试的;质子轰击是由复旦大学物理二系协助的,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] R. F. Leheny et al., *Electron. Lett.*, 16(1980)5, 353—356.
- [2] S. Miura et al., *IEEE Electron Device Lett.*, EPL-4(1983)10, 375—379.
- [3] R. M. Kolbas et al., *Appl. Phys. Lett.*, 43(1983)11, 821—825.
- [4] S. Miura et al., *Appl. Phys. Lett.*, 46(1985), 2, 389—393.
- [5] O. Wada, *Optical and Quantum Electronics*, 20(1988)5, 441—453.
- [6] M. Ito et al., *IEEE J. of QE*, QE-22(1986)7, 1073—1080.

STUDY ON Pt-GaAs SCHOTTKY BARRIER APD

Guo Kangjin Hu Weiyang Yao Wenlan Chen Lianyong

(Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica, Shanghai 200233)

Abstract Pt-GaAs Schottky barrier APDs have been investigated. The devices were fabricated on GaAs epitaxial layer with carrier concentration of $0.5 \sim 3 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ and thickness of about $20 \mu\text{m}$. Guard ring along with sensitive area was formed by H^+ bombardment with energy of 500 keV and dosage of $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ to prevent edge breakdown. Semi-transparent Pt film was evaporated using a special evaporation source. The peak response wavelength of the device is $8600 \sim 8835 \text{ \AA}$ at different bias voltages. Optical absorption edge could be extended to 9700 \AA . Franz-Keldysh effect has been observed. The multiplication of above 100 could be reached. Dark current is about several nA. Excess noise coefficient is 7 and both rise and fall time were less than 1 ns. The device could be integrated monolithically and planarly with GaAs FET.

Key words Avalanche photo-detector; GaAs; Schottky barrier