

高速台型硅雪崩光电二极管的研制

代振华 解金山 夏应华 王俊卿

(武汉邮电科学研究院)

1982年10月2日收到

提 要

为满足大容量、长距离光纤通信和其它快速微弱光信号的探测，我们采用化学腐蚀和表面钝化技术，研制成功了具有近乎直台角的 N^+PP^+ 硅雪崩光电二极管 (MAPD)。该器件具有工艺简单，成本低，响应速度快等优点。并且有长期工作的稳定性。文中详细地讨论了器件结构的设计，并概述了制造方法和光电特性。

一、引言

长距离，大容量光纤通信，要求探测器具有快的响应速度和尽可能高的响应灵敏度。目前，在 $0.8-0.9\mu m$ 波段，用得最多的是硅雪崩光电二极管 (Si-APD)，它具有高效、快速和低噪声等优点。在 Si-APD 中，为实现光电流的均匀倍增，通常采用两种结构：保护环结构的雪崩光电二极管 (GAPD) 和台面结构雪崩光电二极管 (MAPD)。对 N^+PP^+ GAPD 来讲，为防止 PN 结边缘早期击穿，保护环必须有足够的结深，这需要长时间的高温扩散 (约 $1200^\circ C$) 才能完成。这种深结保护环的存在将使响应速度受到限制，一般下降时间 t ，大于 $5ns$ 。同时，由于高温扩散，往往使 P 型层反型而给制造带来困难。我们所研制的 N^+PP^+ MAPD，采用了简便的台面腐蚀工艺，在比较低的温度下 ($900^\circ C$ 以下) 制成器件，由于温度低，有效地克服了制造中因高温而造成的 P 型层的反型问题，从而提高了成品率。同时，也获得了小于 $1ns$ 的快速响应。

二、MAPD 快速响应的基本原理

台型硅雪崩光电二极管的结构如图 1(a) 所示。为了比较起见，保护环结构示于图 1(b)。器件在反偏压下工作，当光在硅中被吸收后，便产生电子-空穴对。器件体内电场分布如图 2 所示，在 $x > 0$ 的区域里所产生的电子-空穴对中的电子，在电场作用下向高场区运动，当这些电子获得足够的能量时，将和晶格原子发生碰撞电离，从而产生新的电子-空穴对。如此循环下去，便实现雪崩倍增。P 层被分为耗尽区 $W(V)$ 和零场区 L 。在耗尽区光生载流子运动速度随电场强度的增加而增大，当电场增大到某一值时(对电子是 $E = 2 \times 10^4 V/cm$ ；空穴为 $E = 1 \times 10^5 V/cm$) 载流子运动速度趋于饱和，即所谓的饱和漂移速度 V_s 。其通过耗尽区的漂移时间为

$$t_s = W(V)/V_{tr} \quad (1)$$

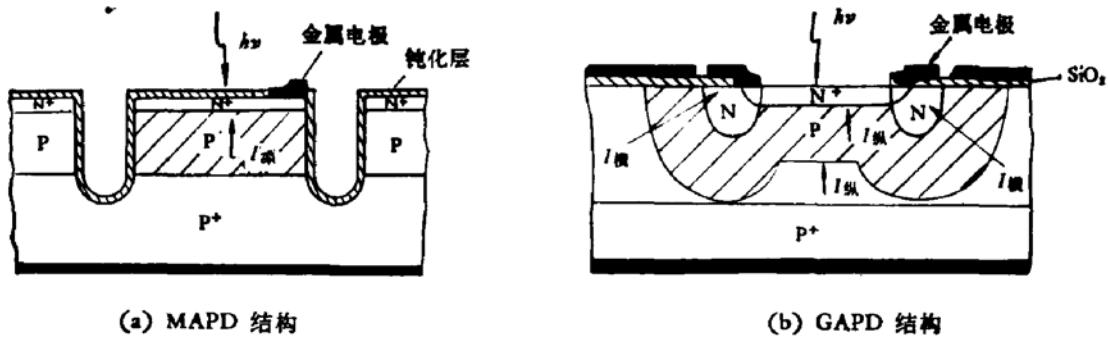


图 1 N⁺PP⁺ 雪崩光电二极管结构示意图

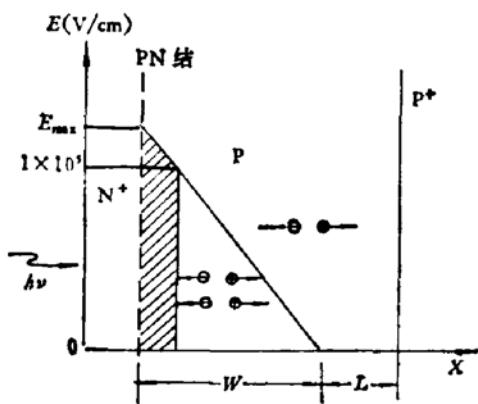


图 2 体内电场分布

在零场扩散区，少子以扩散速度运动，其扩散时间 t_d 取决于扩散系数 D_e ，有如下关系：

$$t_d = L_e^2/D_e, \quad (2)$$

其中 L_e 为电子的扩散长度。引用晶体管基区渡越时间理论进行近似计算，可以发现 t_d 要比 t_s 大得多。因此，为实现快速响应必须尽量减小或消除零场扩散区。在保护环结构中，零场区不可能完全消除，所以总存在着光电流的纵向扩散分量。同时也存在着横向扩散电流分量（见图 1(b)）。而在台型结构中，由于腐蚀成台角，横向扩散电流分量被完全消除。同时，当 P 层厚度等于或小于耗尽层厚度时，P 层可以完全耗尽。所以，恰当的选择外延层厚度和电阻率，可以消除纵向扩散电流分量，使载流子的整个渡越时间完全由漂移时间决定，所以可以实现极快的响应速度。

三、制造工艺的特点

在 (111) 晶面低阻 (0.03—0.001Ωcm) P 型硅单晶衬底上，采用自掺杂汽相外延工艺，生长 P 型外延层。再由磷扩散形成 N⁺P 突变结。N⁺ 层杂质浓度 $> 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ，结深 x_j 约为 $0.5 \mu\text{m}$ 。在 SiO₂ 掩蔽下腐蚀成台面，然后进行磷硅玻璃 (PSG) 多层钝化，最后作出上下铝电极。

1. 外延层厚度与杂质浓度的控制

外延层采用“自掺杂”效应的汽相外延生长，生长温度1100—1200℃，生长过程中采用“变温”生长方法。即在生长过程中慢慢提高生长温度，以利于改善外延层内的掺杂浓度，使外延层纵向浓度趋于均匀。同时，也利于改善表面质量。由上可知，为了获得快速响应，器件的P型层应全部耗尽。这时，外延层厚度 d_e 和杂质浓度 N_d 应满足下面关系：

$$d_e \leq W(V) + x_i, \quad (3)$$

$$W(V) = (2\epsilon_0\epsilon_{Si}|V_R|/qN_d)^{1/2}. \quad (4)$$

其中， ϵ_0 为真空介电常数； ϵ_{Si} 为硅的介电常数； q 为电子电荷； V_R 为反向偏压； x_i 为磷扩散深度。

2. 台角的腐蚀控制

(1) 台角角度 PN结的表面击穿强烈地依赖于电场。而电场强度与结表面的形状，表面掺杂等因素有关。为了使器件具有高的倍增因子，就必须使表面电场尽可能的降低，使击穿仅发生在体内而不出现在表面。但是，表面电场与台角的角度密切相关。Davies 和 Gentry^[1]比较详细地研究了结表面的台角与表面电场之间的关系，并且，把它分为两种类型，即所谓的正斜结和负斜结。正斜结为一个不对称的PN结，从结的重掺杂一边到轻掺杂一边，其面积直线性地减少；反之为负斜结。其电场强度与台角的关系如图3所示。

由图3可知，在-45°左右的地方，表面电场具有最大值，腐蚀时应避开这个角度。另外，正台角表面电场虽低，但直接由化学腐蚀形成正台角，在工艺上有困难，所以考虑到制造工艺和材料的利用率，我们选择了近乎直角的台角结构，采用HF-HNO₃系腐蚀液，在特定条件下直接腐蚀而成（见照片1）。

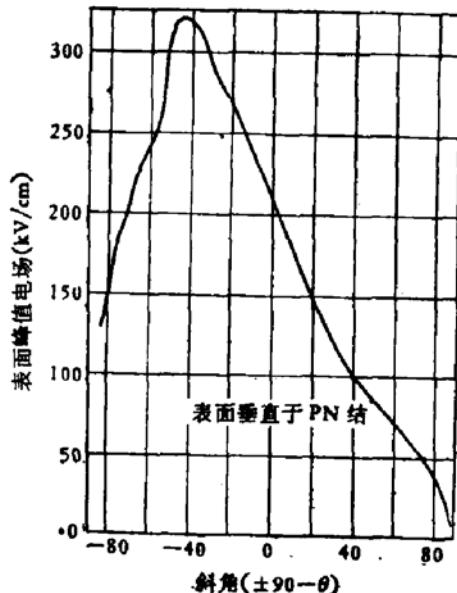
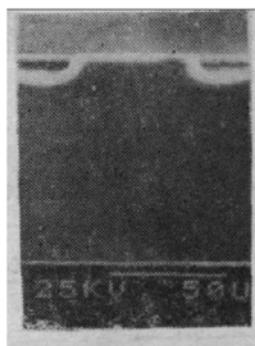


图3 表面峰值电场与斜角的关系



照片1 平行于PN结方向拍照的台型结构

(2) 台角的深度 由于MAPD是P型层全耗尽器件，因而在腐蚀台面时必须深入

到 P^+ 层中一定深度。当腐蚀到 P^+ 层一定深度时, 这带来了两个好处: 其一, 是 P^+ 层成了自然的切断环, 有效地避免了由于钝化层中存在一定数量的 Na^+ 离子所造成的沟道漏电; 其二是 P^+P 结是一个正斜结, 使得表面电场处于较低的状态。

(3) 台角表面光滑度的控制 表面光滑程度影响表面电场, 粗糙的表面即使有合适的台角也往往造成提前击穿。同时, 也影响表面漏电流和器件的稳定性。因而, MAPD 在台角腐蚀好以后, 再用 $HF-HNO_3-H_3PO_4-CH_3COOH$ 系腐蚀液进行化学抛光处理, 以便得到光滑的台角表面。

3. 表面钝化

钝化对 MAPD 是关键工艺之一, 如果不把表面钝化好, 其它的许多问题都会被表面问题所淹没, 尤其对台型器件来说, 若表面钝化不好, 器件的长期稳定性更是一个突出的问题。过去对锗器件表面击穿特性的研究结果表明^[2], 表面击穿像体击穿一样是一个雪崩过程, 并且在一个特殊点上首先开始。若在低压下表面首先发生击穿, 则器件的体内击穿就不可能实现。因此表面钝化质量是非常重要的。MAPD 采用了 $SiO_2-PSG-SiO_2$ 多层钝化膜, 得到了良好的效果。PSG 具有吸收和阻挡 Na^+ 的作用, 并可减少 SiO_2 的针孔以提高致密性。同时为了避免形成正电中心, 将 P_2O_5 与 SiO_2 的百分比控制在 4% 左右为宜, 这样钝化的器件, 在长期存储和加热老化试验中, 表现了良好的可靠性和稳定性。

四、MAPD 光电特性

1. 光谱响应和量子效率

N^+PP^+ 的 MAPD 光谱响应范围在 $0.68-1.0\mu m$ 之间, 峰值波长 $\lambda_p=0.88\mu m$, 如图 4 所示。适于 GaAs 双异质结激光器和发光管的光信号探测。

量子效率 η 表征光电转换效率的大小。即无倍增时流经 PN 结的光生载流子数与入射光子数之比。 $\eta = hcI_0/P_0e\lambda$ 。 I_0 为无倍增时的光电流, P_0 为入射的光功率, 在 $\lambda = 0.8\mu m$ 时, 测得的 $\eta = 30\%-40\%$ 。

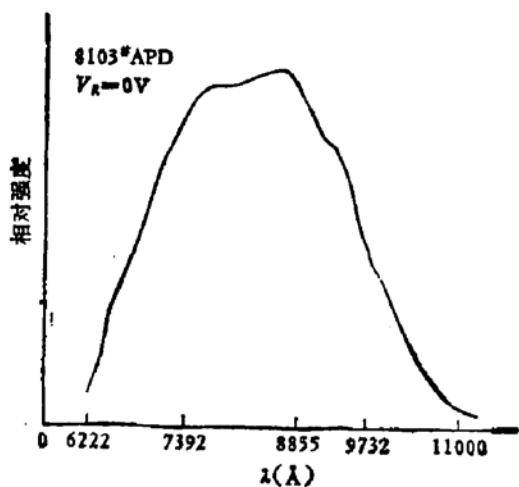


图 4 光谱响应

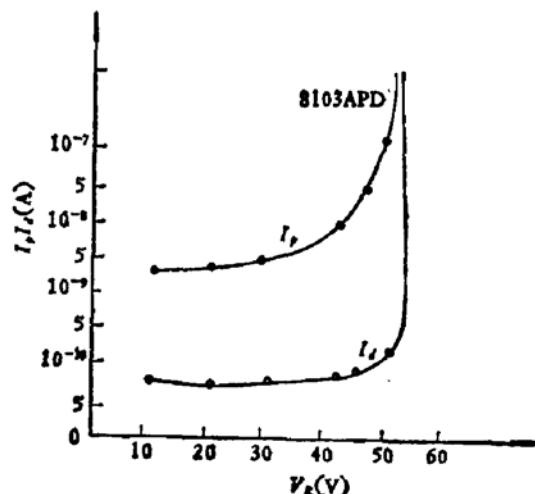


图 5 I_p, I_d 与 V_R 的关系

2. 暗电流特性

经钝化的器件表现了低暗电流特性，图5为光电流 I_p 、暗电流 I_d 与反向偏压的关系。由此可以看出暗电流曲线是属于硬击穿，在 $0.9V_B$ 时测得的 $I_d \leq 1\text{nA}$ 。

3. 倍增因子 M 和倍增噪声与偏压的关系

图6为倍增因子随偏压的变化曲线。在低偏压时，载流子倍增很小，达到雪崩倍增时增加很快，并达到最大值。当反向偏压继续增加时，因耗尽层空间电荷效应，耗尽层内电场下降，导致载流子倍增因子的减小，倍增出现饱和现象。饱和效应使MAPD具有自保护作用，不因光电流过大而使器件损坏。

图7是信号电压 V_s 、噪声电压 V_N 与偏压的关系。其中噪声电压 V_N 包括了光子的统计性起伏引起的量子噪声，暗电流引起的暗电流噪声，倍增过程中的过剩噪声以及负载电阻和前置放大器所引起的热噪声。从曲线看出，信号电压 V_s 随 V_R 增大而增大，在接近 V_B 时，由于过剩噪声增加，噪声电压迅速增大， V_s/V_N 急剧下降。 V_s/V_N 存在一个最大值。此时所得到的倍增因子为最佳倍增因子 M_{opt} 。我们测得的 M_{opt} ，一般在 50—150 之间，少数也能达到 200 左右。在 M_{opt} 附近测得过剩噪声因子在 0.3—0.6 之间。

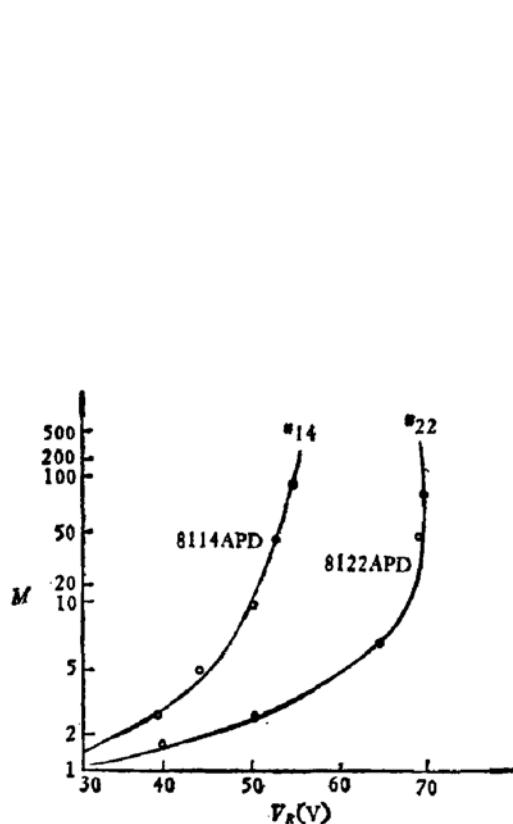


图6 倍增因子 M 与偏压的关系

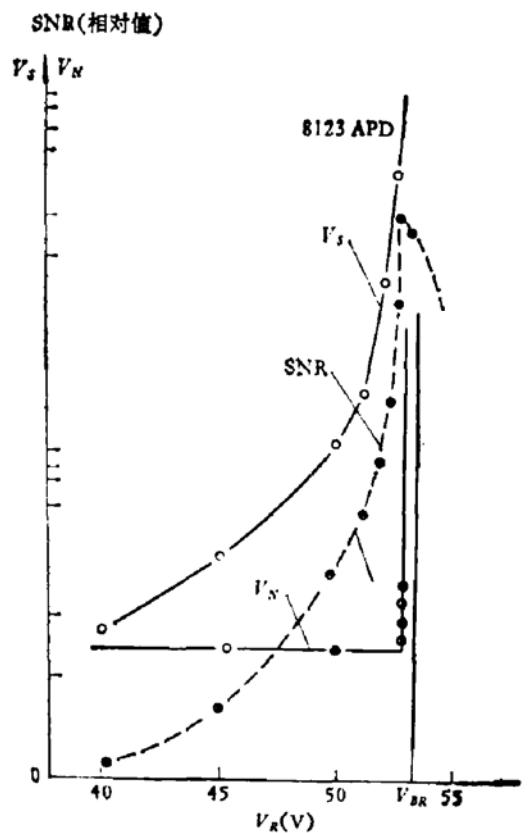
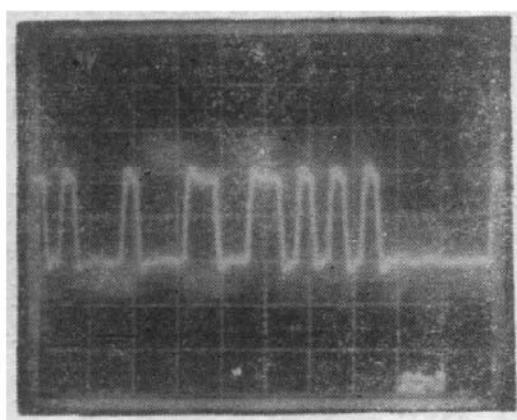


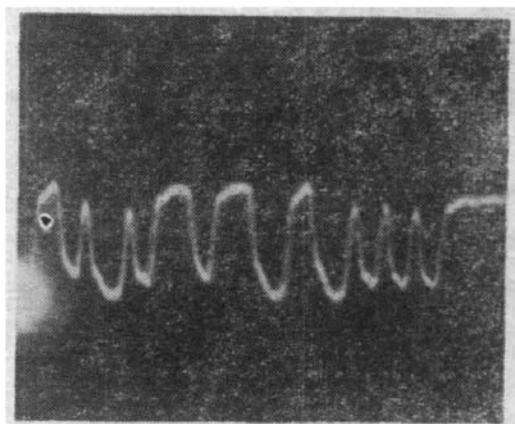
图7 信号电压、噪声电压、信噪比与反向偏压的关系

4. 快速响应特性

在脉冲宽为 10ns 负载电阻为 50Ω 的条件下, 测得上升和下降时间小于 1ns。该器件在 140 兆毕特/秒的光端机试验系统中, 显示出良好的响应特性。照片 2 是调制的电信号的发送波型, 使用的码型为 NRZ/RZ。在传输距离为 3 公里的情况下, 其接收放大以后的波型如照片 3 所示。



照片 2 发送波型



照片 3 接收放大后的波型

N^+PP^+ 台型 APD 的性能参数见表 1。

表 1

性 能 参 数	单 位	测 试 条 件	参 数 指 标
光敏面直径 ϕ	μm		100, 150
击穿电压 V_B	V		50—150
暗电流 I_D	nA	10V $0.9V_B$	0.1 1
量子效率 η	%	$0.85\mu m$	30—40
过剩噪声因子 x		$M = 100$	0.3—0.6
响应时间 τ	ns	t_r t_f	≤ 1 ≤ 1
结电容 C_j	PF	$0.9V_B$	≤ 2
峰值波长 λ_p	μm		0.88
光谱响应 λ_R	μm		0.68—1.0
倍增因子 M		$i_s = 10^{-12} A/Hz^{1/2}$	50—150

五、结 束 语

在(111)晶面P型低阻硅衬底上，采用自掺杂汽相外延生长P型层，经磷扩散后腐蚀成近乎直角的台面。实验结果表明，这样的角度能够得到高增益器件。台角及其深度的控制是十分重要的。制作中采取了PSG钝化工艺，获得了低的暗电流，在90% V_B 时，暗电流 $I_D < 1nA$ 。由于N⁺PP⁺MAPD具有工艺简单，成品率高，成本低和响应速度快等特点，所以适于生产和推广应用。许多器件，在光纤通信系统中经过几年的实际应用，证明性能是良好的，因此，MAPD是光纤通信、激光测距以及其它微弱光信号探测中十分有用的器件之一。

参 考 文 献

- [1] R. L. Davies and F. E. Gentry, *IEEE Trans. ED-11*, 313 (1964).
- [2] C. G. B. Garrett and W. H. Brattain, *J. Appl. Phys.*, 27, 229 (1956).

Study of High Speed Mesa Silicon Avalanche Photodiodes

Dai Zhenhua, Xie Jinshan, Xia Yinghua and Wang Junqing
(Wuhan Research Institute of Post and Telecommunication Science)

Abstract

In order to satisfy the necessity of remote opticfiber communication with large capacity and the detection of some slim optical signals, mesa silicon avalanche photodiodes with near to square mesa have been successfully fabricated with the technique of chemical etching and surface passivation. The device has some advantages such as easy manufacturing, low cost, fast response etc.. It also shows perfect stability in its performance under long period operation. The structure design of the device is discussed in detail, and the fabrication and the photoelectric performance of the device are described briefly.