

# 近红外全离子注入平面结构锗雪崩 光电探测器的研制

丁 国 庆

(武汉邮电科学研究院)

阙 希 文

(北京师范大学低能核物理研究所)

1986年4月11日收到

本文报告了采用全离子注入技术制作的  $p^{+}n$  平面型结构的 Ge-APD，保护环注  $Be^{+}$ ,  $P^{+}$  层注  $B^{+}$  (或  $In^{+}$ ) 形成。测量结果表明，击穿电压  $V_B$  在 37 至 50 伏，光敏面直径为  $90\mu m$ ，在  $0.9V_B$  下，带尾纤的探测器暗电流可小至  $0.15\mu A$ ，典型值为 0.2 至  $0.5\mu A$ ，光电流倍增因子  $M$  在 12 至 17， $M = 10$  时，过剩噪声因子  $F < 10$ ，光响应度大于  $0.5A/W$ 。

## 一、前 言

众所周知，光纤通信具有信息量大，抗电磁干扰能力强，保密性好，安全轻便等一系列优点，从而成为近年来举世瞩目的发展最快的科学技术领域之一。尤其在  $1.3$  和  $1.55\mu m$  光波段，石英光纤的传输损耗和色散趋于极小，因此，光纤通信正朝着长波长光通信发展。

构成光纤通信三大组成部分之一的长波长探测器，使用的半导体材料有  $InGaAs/InP$ 、 $GaAlSb/GaSb$ 、 $HgCdTe$  和  $Ge$  等。从工艺制作上看， $Ge$ -APD 不用液相外延，成品率较高，成本低。我们研制的  $p^{+}n$  平面型结构的  $Ge$ -APD，采用全离子注入技术，一次性热退火。经测量，该器件具有光谱响应范围宽、暗电流小，灵敏度较高，成本低等特点。它可用以  $1.3$ — $1.55\mu m$  光纤通信和其它光计量、光检测中。

## 二、器件设计考虑

波长小于  $1.7\mu m$  的光入射到  $Ge$  材料时，会被材料所吸收，从而产生电子-空穴对。具有浅的  $p-n$  结的  $Ge$  器件，加上反向偏压后，在耗尽区及离耗尽区两边界一个扩散长度内的光生载流子，由于扩散运动和电场下的漂移运动，会在外电路产生与光信号有关的光电流。如果反向偏压足够大，耗尽层中最高电场强度达  $2 \times 10^5 V/cm$  左右时，这些光生载流子在强场下会引起碰撞电离，从而引起光电流的倍增。因此，它对微弱光信号的检测尤为适用。

考虑到器件的噪声、量子效率<sup>[1]</sup>和暗电流，我们研制的  $Ge$ -APD 为具有保护环的平面型  $p^{+}n$  结构。为减少离子注入次数，我们不用沟道截止环。保护环用于防止边缘提前

击穿, 它用注入  $\text{Be}^+$  形成。光从  $p^+$  面射入,  $p^+$  层用注  $\text{B}^+$  (或  $\text{In}^+$ ) 形成, 厚度为  $0.2 \mu\text{m}$  左右。光敏面直径为  $90 \mu\text{m}$ 。为了表面钝化和抗反射, 低温淀积一层厚度为  $0.2 \mu\text{m}$  左右的  $\text{SiO}_2$ 。 $n$  面电极蒸  $\text{Au}-\text{Ge}-\text{Ni}$ ,  $p^+$  面电极蒸  $\text{Al}$  形成。其横截面结构如图 1。

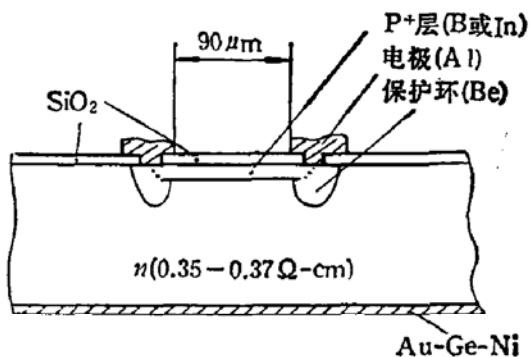


图 1 Ge-APD 横截面结构

对于一个微弱光信号探测器来说, 希望它的可探测光功率  $P_L$  小。据 T. Mikawa 等人报道<sup>[1]</sup>,  $P_L$  为:

$$P_L = \frac{BFh\nu}{\eta} \left( \frac{S}{N} \right) \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{\varphi}{F^2 B \left( \frac{S}{N} \right)}} \right),$$

$$\varphi = \frac{I_{DM} F}{q} + \frac{2k}{q^2 M^2 R_{eq}} \cdot \left( T F_{amp} + \frac{2q I_{Do} R_{eq}}{4k} \right).$$

其中,

$\eta$ : 量子效率,  $F$ : APD 的过剩噪声因子,  $M$ : 光电流倍增因子,  $I_{DM}$ : 倍增的暗电流,  $I_{Do}$ : 非倍增的暗电流,  $B$ : 系统带宽,  $\frac{S}{N}$ : 信噪比,  $F_{amp}$ : 前级放大器的噪声因子,  $T$  和  $k$ : 分别为绝对温度和玻尔兹曼常数。

上式表明, 为使探测器灵敏度提高, 即使  $P_L$  小, 必须尽可能提高量子效率  $\eta$  和光电流倍增因子  $M$ , 减少暗电流  $I_{Do}$ 、 $I_{DM}$  和过剩噪声因子  $F$ 。

非倍增暗电流  $I_{Do}$  由三部分构成: 表面漏电流  $I_{Ds}$ 、反向扩散电流  $I_{Dd}$  以及耗尽层中的产生复合电流  $I_{Dg}$ 。计算表明,

$$I_{Ds} \gg I_{Dd} \gg I_{Dg}.$$

因此, 减少暗电流  $I_{Do}$  的主要努力方向是减少表面漏电流。

光电流倍增因子  $M$  除与离化率  $\alpha$ 、 $\beta$  有关外, 还与雪崩区宽度有关。当击穿电压  $V_b$  较高、耗尽区宽度较大, 从而雪崩区宽也较大时, 可得到较大的光电流倍增。

计算表明, 量子效率  $\eta$  与结深  $x_j$  有关。对  $p^+n$  结构,  $x_j$  为  $0.2 \mu\text{m}$  左右是比较适宜的。

### 三、器 件 制 作

#### 1) 村底制备

结型光敏器件所用的衬底材料,对位错密度、少子寿命和电阻率的均匀性都有很高的要求。我们选用  $\rho = 0.35\text{--}0.37\Omega\cdot\text{cm}$ , 位错密度小于  $500 \text{ 个}/\text{cm}^2$ , 少子寿命  $1\text{ms}$  以上的掺 Sb 的 n 型 Ge 单晶作衬底,按〈111〉方向切片,然后采用双面抛光 Ge 薄片。

### 2) 离子注入和热退火

在研制浅结光电器件时,采用离子注入技术有比热扩散法更明显的特点:**a**, 离子注入可以自由独立地选择注入能量和剂量,从而可以精确地控制掺杂深度和杂质分布。这对一个需要浅结的光电器件来说是十分重要的。**b**, 离子注入过程可以是低温过程,可以避免热扩散法引入的热缺陷和表面热离解。**c**, 结前沿平整,且杂质分布横向均匀性好。

我们注入  $\text{In}^+$  或  $\text{B}^+$  来形成  $p^+$  区。如注  $\text{In}^+$ ,  $E = (90\text{--}110)\text{keV}$ ,  $D = (1\text{--}3) \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ , 如注  $\text{B}^+$ ,  $E = (40\text{--}50)\text{keV}$ ,  $D = (1\text{--}3) \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ 。这里  $D$  为剂量,  $E$  为注入能量。

为了防止结边缘提前击穿,我们注入  $\text{Be}^+$  来形成保护环,注入条件为  $E = 90\text{keV}$ ,  $D = (1\text{--}4) \times 10^{14}\text{cm}^{-2}$ 。

选择性注入时,我们采用的掩蔽膜是  $\text{SiO}_2$  和金属 Al,其厚度分别为  $3000\text{\AA}$  和  $5000\text{\AA}$ 。

离子注入晶体后,会在注入区产生辐射损伤,它将引起大量复合中心,并使非平衡少子寿命减少,从而使反向电流增大。辐射损伤严重时,甚至形成非晶层。为消除这些损伤,我们在两次离子注入后,进行一次恒温热退火。退火温度在  $540\text{--}630^\circ\text{C}$ , 退火时间在 20—45 分钟。退火效果用退火前后方块电阻  $\Omega/\square$  的变化或反向暗电流变化来衡量。我们用  $E = 96\text{keV}$ ,  $D = 2 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ , 注入  $\text{In}^+$  作退火试验,测得方块电阻变化如下:

样品		1#	2#	3#	4#
退火情况					
退火前 ( $\Omega/\square$ )		14.85	20.46	26.40	25.42
在 $623^\circ\text{C}$ 下恒温 退火后 ( $\Omega/\square$ )	0.5 小时	10.6	9.0	14.5	11.2
	1 小时	10.8	9.1	14.0	11.4
	1.5 小时	10.6	9.2	13.9	11.4
	2.0 小时	11.0	9.5	14.5	11.8

### 3) 低温热分解淀积 $\text{SiO}_2$

为了尽量避免高温热处理工艺,我们采用低温热分解淀积  $\text{SiO}_2$  作掩蔽膜和钝化膜。当  $\text{SiH}_4$  和  $\text{O}_2$  在  $400\text{--}450^\circ\text{C}$  时便发生化学反应生成  $\text{SiO}_2$ , 并淀积在  $420^\circ\text{C}$  的 Ge 片上。按不同要求,  $\text{SiO}_2$  厚度在  $1200\text{--}4000\text{\AA}$  范围。对氧化层的要求是: 尽量避免种种形式的离子沾污,同时氧化层应均匀、无斑点、针孔、发花等现象。当然,低温淀积的  $\text{SiO}_2$  薄膜呈无定形玻璃状结构,这是一种近程有序的网状结构。外来杂质容易以替位式或间隙式位于薄膜中,使网络结构变形,并使  $\text{SiO}_2$  呈多孔性,从而导致杂质原子易于在其中迁移或扩散。这就需要增密处理。

## 四、器件特性

### 1) 暗电流

暗电流尽管包括耗尽层中的产生复合电流  $I_{Dg}$ 、扩散电流  $I_{Ds}$ 、表面漏电流  $I_{Ds}$  三部分，但其中表面漏电流  $I_{Ds}$  最大。它在很小的电压下就上升到一个饱和值，约  $0.1\text{--}0.2\mu\text{A}$ 。当电压再增加时，它基本不变，最后雪崩击穿。减少表面漏电的途径是设法减少各种形式的沾污和温度。我们测得的  $I_s-V$  曲线如图 2。

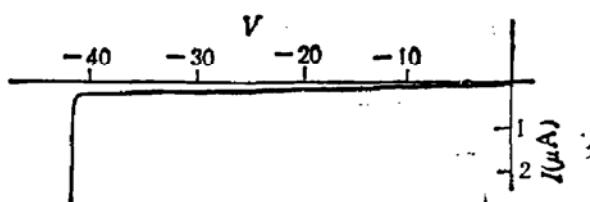


图 2  $I_s-V$  曲线

### 2) 光电流倍增因子

我们研制的 Ge-APD， $V_B$  在 20 伏以下时，最大倍增仅 1.5 左右，当  $V_B$  在 25—28 伏时，最大倍增可达 2—5，而  $V_B$  在 38—45 伏时，光电流倍增因子  $M$  可大于 12。这时，不少器件  $I_p-V$  曲线出现两次转折，第一次小转折在 (15—20) 伏左右，第二次在 35 伏左右。其测量曲线如图 3。

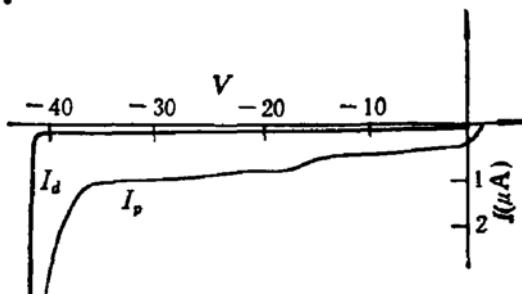


图 3  $I_p-V$ ,  $I_s-V$  对照曲线

### 3) 响应度

当偏压为 -5 伏时，入射光功率保持  $1\mu\text{W}$ ，测得光电流  $I_p$  在  $0.50\text{--}0.54\mu\text{A}$ ，则响应度为  $(0.5\text{--}0.54)\text{A/W}$ 。另外，该器件在二次群数字通信机上试用，在误码率小于  $10^{-9}$  时，接收灵敏度优于  $-47\text{dBm}$ 。

### 4) 噪声

我们测得 Ge-APD 在  $M = 10$  时，过剩噪声因子  $F$  在 8.9—10 范围。

## 五、讨 论

### 1) $\text{SiO}_2$ 龟裂问题

我们在实验中发现，作为掩膜和钝化用的  $\text{SiO}_2$ ，厚度在  $5000\text{\AA}$  以上时，在热退火中

会发生大量龟裂现象。不仅  $\text{SiO}_2$  龟裂，去掉  $\text{SiO}_2$  后在 Ge 片表面仍观察到形状相同的龟裂条纹。我们认为这是 Ge 和  $\text{SiO}_2$  热胀系数不同且 Ge 片很薄所致。当把  $\text{SiO}_2$  厚度减少到  $2000\text{\AA}$  以下时，龟裂现象便基本上消除了。

### 2) $\text{B}^+$ 注入后逆退火行为

注入  $\text{B}^+$  以形成  $\text{p}^+$  层时，我们在  $600-650^\circ\text{C}$  下热退火，发现有逆退火行为。即在相同恒温时间、不同温度下作退火试验， $600-650^\circ\text{C}$  下热退火后管芯的暗电流反而比  $550^\circ\text{C}$  下热退火要大。逆退火现象在 Si 中也存在<sup>[3]</sup>。为此，我们在  $545^\circ\text{C}$  下进行热退火，效果良好。

### 3) Ge 薄片抛光后的微弯曲

Ge 薄片 ( $240-300\mu\text{m}$  厚) 单面抛光后，从抛光盘上取下时，存在 Ge 片微弯曲。在  $1\text{cm}$  线度内，最大弯曲量有时大于  $0.5\mu\text{m}$ 。这种范性形变会产生很多位错。发生薄片微弯曲是由于 Ge 片两面光洁程度不一样，表面能不同，片子又很薄所致。解决办法是采用两面逐步抛光技术。

### 4) 关于 $I_s-V$ 特性曲线扭折

我们在测量中观察到， $I_s-V$  特性曲线在  $-20$  伏左右无扭折，而有些灵敏度高的 Ge-APD， $I_s-V$  曲线 ( $I_s$ 、 $I_d$  分别为光电流和暗电流) 在  $-20$  伏左右有一个小扭折。初步认为，这与耗尽区电场变化和载流子输运过程有关。

## 六、结 论

采用无位错、 $0.35-0.37\Omega\text{-cm}$  少子寿命长的 n 型 Ge 单晶，用全离子注入和一次性热退火工艺制作的平面型  $\text{p}^+\text{n}$  结构的 Ge-APD， $V_B$  一般为  $-38--45$  伏，在  $0.9V_s$  下， $I_s$  可小至  $0.2\mu\text{A}$ ； $M$  大于 12，过剩噪声因子小于 10。它是高速 PCM 光通信中实用化的长波长探测器。经二次群光通信系统试用，在误码率小于  $10^{-9}$  时，接收灵敏度优于  $-47\text{dBm}$ ，性能稳定。

参与 Ge-APD 研制工作的有赵俊英、张明杰、肖福芳、宋发新、邓肇松和北京师范大学低能核物理所的陈如意同志。由于他们的合作，使我们完成了科研任务，在此特表感谢。

## 参 考 文 献

- [1] Shuzo Kagawa, FUJITSU Scientific & Technical Journal, 18, 397(1982).
- [2] T. Mikawa, FUJITSU Sci. Tech. J., 16, 95(1980).
- [3] 北京市辐射中心、北京师范大学低能核物理研究所离子注入研究室，“离子注入原理与技术”，p124，北京出版社，1982 年 10 月。

## Fully Ion-Implanted Germanium Avalanche Photodetectors with a Planar Structure for the Optical Fiber Communication in the Infrared Region

Ding Guoqing

(*Wuhan Post-telecommunications Research Institute*)

Kan Xiwen

(*Beijing Teacher-training University*)

### Abstract

The germanium avalanche photodetector with a p<sup>+</sup>n planar structure using a fully ion-implanted technology is reported. The guard-ring is performed by implanting Be<sup>+</sup>, but p<sup>+</sup> layer by In<sup>+</sup>(or B<sup>+</sup>). The measurement results show that the breakdown voltage of Ge-APD is in the range of 37—50 volts. The dark current of Ge-APD with a coupled optical fiber is as low as 0.15 μA at a bias voltage of 0.9 V<sub>B</sub>. Typically, the dark current is in the range of 0.2—0.5 μA. The multiplication factor is 12—17, and an excess noise factor less than 10 is obtained at a multiplication factor of 10. The responsibility is more than 0.5 A/W.