

Ge-APD及InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD的暗电流-温度特性 及其比较

武汉电信器件公司 丁国庆

1 前言

Ge-APD及InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD都可以用来探测1.1~1.6 μm 的红外光。在长波长光纤通信系统中，需要波长为1.3~1.55 μm 的红外光探测器。在该光通信系统中，通过光纤入射到探测器光敏面的平均光功率一般在0.1 μW ~10 μW 范围。要探测这样微弱的光信号，不仅要求光探测器本身的噪声信号要小，而且要求性能稳定。就是说，外界温度和湿度的变化对光探测器性能的影响应在允许范围之内。对工程应用来说，光电器件性能稳定可靠与否是比较关心的问题，尤其是暗电流 I_d 、光倍增因子M，以及过剩噪声系数F与温度的稳定性问题。

我们先后研制了Ge-APD及InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD^{[1][2]}，并对其 I_d -T特性进行了测试。现将有关情况介绍如下。

2 器件结构

2.1 Ge-APD

Ge-APD有台面和平面两种结构。其结构如图1。

所谓台面结构，我们把它制成沟槽结构。

平面型Ge-APD，主要制造工艺为衬底两面抛光、光刻、离子注入及热退火、SiO₂淀

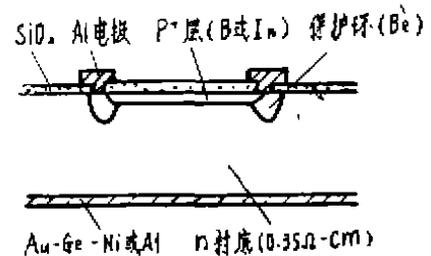


图1 平面型Ge-APD横截面结构

积。之所以采用离子注入，是因为它能形成一个平整的0.5 μm 左右深的pn结；如果采用热扩散法形成pn结，表面会产生热腐蚀（或热溶解），很难获得一个平整优良的浅pn结。我们注入B⁺以形成P⁺区，其注入能量为（40~50）keV，注入剂量为（1~3） $\times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ ，注入深度一般为0.4~0.5 μm 。为了防止结边缘提前击穿，注入Be⁺来形成保护环，注入能量为（90~100）keV，注入剂量为（1~4） $\times 10^{14}\text{cm}^{-2}$ ，注入深度为0.8~1.5 μm 。为了消除离子注入产生的辐射损伤，离子注入后需要在540~630 $^{\circ}\text{C}$ 下热退火20~45分钟。

台面型Ge-APD是用化学腐蚀形成的沟道来代替注入Be⁺所形成的保护环。它减少了一次离子注入及热退火工艺。从器件性能来看，台面型Ge-APD的暗电流 I_d 比相同光敏面的平

面型Ge-APD的暗电流要大2~5倍,且温、潮稳定性不如平面结构。实用化小面积的G-e APD都采用平面型结构。

2.2 InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD

InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD为5层3“结”结构。其三“结”为:一个同质pn结,两个异质同型结。光从衬底射入,为了减少红外光在掺杂的InP中的损耗,衬底挖一凹坑。其截面图如图2。

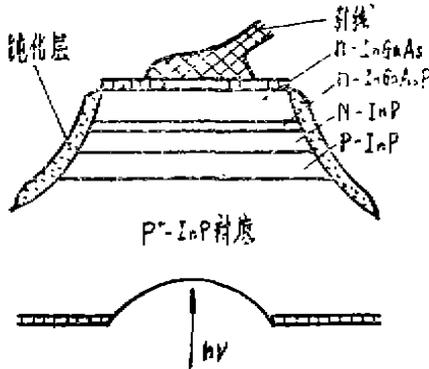


图2 InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD截面

InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD主要制造工艺为液相外延、光刻、表面钝化及电镀。首先,我们采取掺Zn的InP衬底,使用LPE技术,顺次生长p-InP缓冲层,n-InP倍增层,n-InGaAsP过渡层及n-InGaAs光吸收层。其浓度分别为 $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 、 $8 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 、 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 及 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$,其厚度分别为 $(1.5 \sim 2.5) \mu\text{m}$ 、 $(1.6 \sim 2.0) \mu\text{m}$ 、 $(0.3 \sim 0.5) \mu\text{m}$ 、 $(3.0 \sim 3.5) \mu\text{m}$ 。在生长不同异质层时,界面失配率应控制在 5×10^{-4} 以下。

光刻、钝化、电镀等为常规工艺。

3 暗电流与温度的关系

APD都是在加反向偏压至接近击穿电压 V_B 下运用。通常偏压一般为 $0.9 \sim 0.95 V_B$ 。这时暗电流较大,随着温度的升高,暗电流会越来越大。但从理论和实践上到底会达到什么程度,这是光电器件工程应用上比较关心的一个问题。

由半导体器件物理知道,光电器件暗电流

I_d 由五部分构成:耗尽区的产生电流 I_G ,耗尽区边界附近的扩散电流 I_D ,表面漏电流 I_S 以及与器件封装有关的附加电流 I_A 和隧道电流 I_T ,即:

$$I_d = I_G + I_D + I_S + I_A + I_T \quad (1)$$

3.1 I_G 与温度关系

$$I_G = qAX_m \cdot \frac{n_i}{2\tau} = qA \cdot \frac{X_m}{2\tau} \cdot 4.8 \times 10^{16} \cdot$$

$$\left(\frac{m_{d0} \cdot m_{dh}}{m_0^2} \right) T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (2)$$

$$\frac{d(\ln I_G)}{dT} = \frac{3}{2T} + \frac{E_g}{2kT^2} = \left(3 + \frac{E_g}{kT} \right) \cdot \frac{1}{2T} \quad (3)$$

这里, X_m 为耗尽区宽度, τ 为耗尽区内有效载流子寿命, A 为pn结面积, m_0 为自由电子质量, m_{d0} 为电子的态密度有效质量, m_{dh} 为真空态密度有效质量, T 为绝对温标, k 为玻尔兹曼常数, q 为电子电荷的绝对值, E_g 为材料禁带宽度。

对InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD pn结在InP材料中,如果外加偏压较低,耗尽层边界未到达InP/InGaAsP界面,则 I_G 只与InP中的pn结有关。

由半导体物理,对InP材料, $E_g = 1.35 \text{eV}$,

当 $T = 300\text{K}$ 时,可算得:

$$n_i = 1.7 \times 10^7 \text{cm}^{-3},$$

这里 n_i 为InP材料的本征浓度。

如果InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD的光敏面积为 $A = 42 \times 10^{-8} \text{cm}^2$, $D_p = 4 \text{cm}^2/\text{s}$, $\mu_p = 150 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, $L_p = 12 \mu\text{m}$,则 $\tau_p = 3.6 \times 10^{-7} \text{s}$ 。

若 x_m 取 $1.5 \mu\text{m}$,由(2)式可算得

$$I_G = 3.2 \times 10^{-14} \text{A}.$$

由(3)式,在 300°K 时,

$$\frac{d(\ln I_G)}{dT} \approx \frac{E_g}{2kT^2} = 0.043/\text{度}.$$

3.2 I_D 与温度关系

耗尽区边界附近的扩散电流 I_D 又称为反向

饱和电流。对p+n单边突变结近似，有

$$I_D = q \cdot A \cdot \frac{D_p \cdot P_{so}}{L_p} \quad (4)$$

$$\text{上式中, } P_{so} = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{1}{N_D} \left[4.8 \times 10^{16} \cdot T^{3/2} \cdot \exp(-E_g/2kT) \right]^2$$

所以,

$$I_D = qA \cdot \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \cdot \frac{1}{N_D} \cdot \left[4.8 \times 10^{16} \cdot T^{3/2} \cdot \exp(-E_g/2kT) \right]^2 = T^{(3+2)/2} \cdot \exp(-E_g/kT) \quad (5)$$

(与温度无关的量)

这里,

$D_p/\tau_p \propto T^r$, r 为常数。

$$\frac{d(\ln I_D)}{dT} = \frac{1}{I_D} \cdot \frac{dI_D}{dT} = \frac{3+r}{2} \cdot \frac{1}{T} + \frac{E_g}{kT^2} \approx \frac{E_g}{kT^2} \quad (6)$$

对于上述给定的InP材料的各项参数，在室温下计算得 $I_D = 2.1 \cdot 10^{-21} \text{ A}$ 。

$$\frac{d(\ln I_D)}{dT} \approx \frac{E_g}{kT^2} = 0.17/\text{度}$$

对于相同光敏面的Ge-APD，在室温下有：

$$I_G = 5 \times 10^{-12} \text{ A}, \quad \frac{d(\ln I_G)}{dT} = 0.05/\text{度}$$

$$I_D = 7.9 \times 10^{-10} \text{ A}, \quad \frac{d(\ln I_D)}{dT} = 0.10/\text{度}$$

3.3 I_s 与T的关系

对于台面型InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD，面积为 $4.2 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$ 的器件暗电流 I_d 实际值在 $0.5 \sim 50 \text{ nA}$ 范围。而具有相同面积的Ge-APD实际值在 $0.05 \mu\text{A} \sim 0.5 \mu\text{A}$ 范围。究其原因，对Ge-APD，表面漏电流 I_s 和压焊封装产生的附加电流 I_A 在暗电流中占据相当大的比重；而对 InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD，除了 I_s 和 I_A 外，还可能有隧道电流 I_T 。

在前面讨论 I_G 时，忽略了耗尽区中表面复

合中心净产生的影响；同样在讨论 I_D 时，也忽略了扩散区中表面复合中心净产生的影响。这些表面复合中心的存在，势必产生复合电流。表面复合中心的数目和性质，与材料状况和工艺处理过程密切相关。这部分电流可表示为：

$$I_s = \frac{1}{2} q \cdot A \cdot n_i s_p \quad (7)$$

这里 s_p 为表面复合速度，我们取

$$s_p = 6 \times 10^4 \text{ cm/s}^{[3]},$$

则 $I_s = 3.4 \times 10^{-12} \text{ A}$ ，

$$\frac{d(\ln I_s)}{dT} \approx \frac{E_g}{2kT^2} = 0.043/\text{度} \quad (8)$$

对于 Ge-APD，若 $A = 4.2 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$ ， $n_i = 2.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ， $s_p = 1 \times 10^4 \text{ cm/s}$ 则

$$I_s = 8.0 \times 10^{-7} \text{ A}, \quad \frac{d(\ln I_s)}{dT} = 0.05/\text{度}$$

3.4 隧道电流 I_T 与温度的关系

对于较窄能带隙的Ge-APD来说，与其它暗电流成分相比，隧道电流 I_T 可以忽略。所以在这里我们只讨论 InGaAs/InGaAsP/InP SAGM 的隧道电流。

InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD 是由三种异质材料构成的。一个同质 p-n 结在 InP 中，两个同型异质结在 InGaAs/InGaAsP 和 InGaAsP/InP 界面。当器件施加较高反向偏压，使耗尽层边界接近异质界面时，那么由异质界面产生的隧道电流便流过整个器件，从而对暗电流有贡献。当然，同型异质结电流输运有多种模型，除了隧道模型外，还有扩散模型、热发射模型和隧道复合模型。目前虽没有一种统一的异质结电流输运理论，但国外文献中对异质结构材料使用得最多的还是隧道模型。隧道电流可以表示成：

$$I_T = I_{T0} \cdot \exp\left(\frac{T}{T_0} + \frac{V}{V_0}\right) \quad (9)$$

这里 I_{T0} 、 T_0 、 V_0 均为常数。这是一个经验公式^[4]。它表明 I_T 随电压 V 、温度 T 的升高而升高。由于 T_0 较大， $\exp(T/T_0)$ 只是一个随温稍微上升的函数。与其它暗电流成分相比，可以认为它不受温度影响。

3.5 附加电流 I_A 与温度的关系

与压焊、封装有关的附加电流 I_A ，它与表面气体、水份吸附及晶格畸变有关。目前还没有找到一个理论表达式。根据我们的实验，它在室温至50℃范围内对温度比较敏感。

现在我们把几种暗电流成份列于表1。

表 1

器 件	InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD	Ge-APD
项 目		
光敏面积(cm^2)	4.2×10^{-5}	4.2×10^{-5}
I_G (A)	3.2×10^{-14}	5×10^{-12}
$\frac{1}{I_G} \cdot \frac{dI_G}{dT}$ (/度)	0.043	0.05
I_D (A)	2.1×10^{-21}	7.9×10^{-19}
$\frac{1}{I_D} \cdot \frac{dI_D}{dT}$ (/度)	0.17	0.10
I_S (A)	3.4×10^{-12}	8×10^{-7}
$\frac{1}{I_S} \cdot \frac{dI_S}{dT}$ (/度)	0.043	0.05
I_r (A)	视外延片质量而定，可能占很大比重	无
I_r 与温度关系	几乎无关	—
I_A 与温度关系	在室温至50℃范围，因吸潮， I_A 可能对温度敏感	同 左
暗电流成分大小比较	$I_r > I_S > I_G > I_D$	$I_S > I_D > I_G$

4 I_d -T 实验

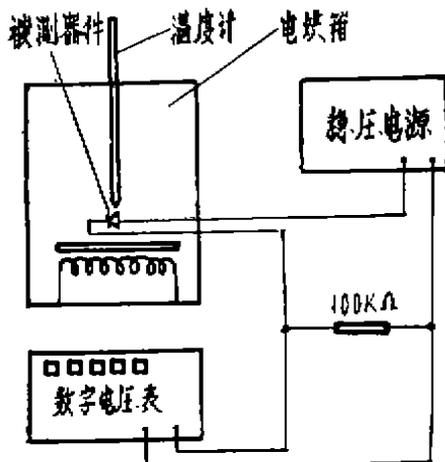


图 3 实验装置

我们采用的实验装置如图3。

4.1 实验条件的选择

对 InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD, V_B 一般在50至110伏范围内。当外加偏压至0.8 V_B 以上时，便有明显的暗电流倍增。暗电流倍增因子 M_e 也会随温度变化而变化。因此，我们把外加偏压限制在0.8 V_B 以下。对 InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD，我们选取两只典型的器件，然后在不同的温度下测量其暗电流值。

同样，Ge-APD的外加偏压也放在0.8 V_B 以下，我们选择外加偏压为10伏来测量其 I_d -T关系。

4.2 测试结果

a. Ge-APD, 38°, 偏压: -10V.

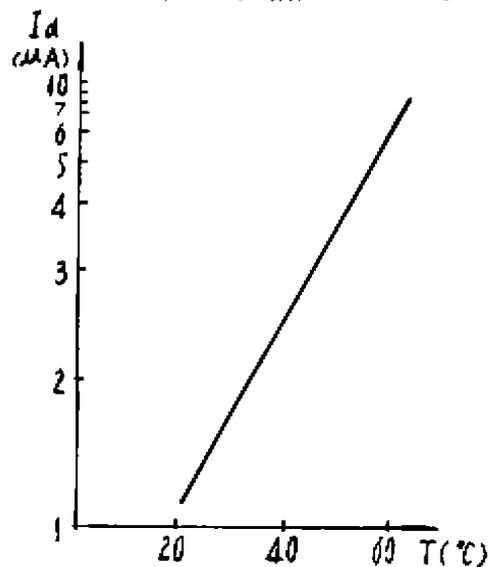


图 4 Ge-APD之 I_d -T曲线

b. InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD

5 讨论与结论

a. 把理论分析和实验结果对照来看，无论是Ge-APD还是InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD，暗电流的主要成分不是产生电流和扩散电流，而是表面复合电流（或称漏电流）和隧道电流。压焊产生的晶格畸变，也可能导致附加电流 I_A 很大。对InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD，无论是理论还是测量结果，其暗电流要比相同面积的Ge-APD小2至3

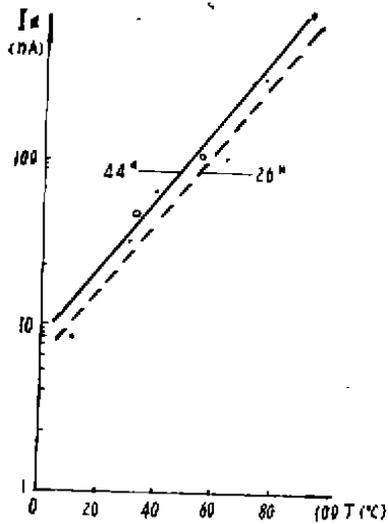


图 5 26°、44°SGAM-APD之 I_d -T曲线
(44°管 V_B 为54V, 测试时偏压为35V; 26°
管 V_B 为110V, 测试时偏压为90V)

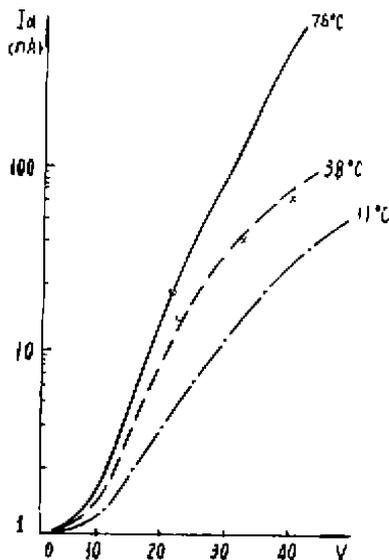


图 6 44°SAGM-APD分别在110°C、38°C
78°C时 I_d -V曲线

个数量级。这是因为InP禁带宽度较大，其本征浓度要比Ge小几个数量级的缘故。减少器件暗电流，主要应在工艺处理上做工作，即应

尽量减少晶格失配、缺陷、复合中心等。

b. 暗电流随温度上升基本上遵从指数关系。因为占暗电流主要成分的表面复合电流 I_s 随温度变化呈指数关系。这里之所以要说“基本上”，是因为暗电流成分有好几种，其综合结果并不遵从某一简单指数关系，况且表面复合速度 S_p 实际上并不是如前面所述的一个常数。这些都导致测量数据点对某一确定指数律的一定偏离。从实际测量曲线来看，当外加偏压较低时，大概温度每升高10~15°C，暗电流在原来基础上便增加一倍，温度增加30~40°C，暗电流便增加一个数量级。

c. 对InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD，当外加偏压较高，耗尽层边界接近或达到同型异质结界面时，这时可能产生较大的隧道电流。我们在测量该器件 I_d -V特性时，经常发现在某一偏压时，暗电流有一个突变性的增长台阶。我们认为，这是隧道电流起作用的结果。由于隧道电流与温度无关，所以含有隧道电流的暗电流 I_d 随温度升高又升高的速率会减慢。

d. Ge-APD时间稳定性较差。我们测量结果表明，温度不变时，暗电流随测量时间增长而缓慢增加。我们认为，这可能是其暗电流较大，结温不断变化，加之热退火没有很好消除离子注入导致的辐射损伤所产生的结果。所以在光纤通信系统中，Ge-APD的应用受到了限制。

参 考 文 献

- (1) 丁国庆、陶希文，半导体学报，1987，8(4)：437~442
- (2) 丁国庆，半导体学报，1990，11(10)：773~779
- (3) Osaka F, et al., IEEE, J. Quant. Electron., 1985, QE-21, 1326~1338
- (4) 尹长松，半导体器件原理，武汉大学物理系，1984，58