

InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD 器件设计考虑及 I_P-V 曲线 二级阶梯状扭折

丁 国 庆

(邮电部武汉电信器件公司, 武汉)

1989年8月22日收到, 1990年3月11日修改定稿

本文根据雪崩电场和限制隧道电流电场要求出发, 设计和估算了 InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD 器件参数, 测量并解释了 I_P-V 曲线的二级阶梯扭折行为, 指出了 V_{cb}/V_B 以 1/3 左右为宜和与实际测量的 M_P 比较吻合的经验公式。

主题词 雪崩光电二极管, 异质结, 二级阶梯扭折

一、引 言

在 1.3—1.6 μm 长波长光纤通信系统中, 光探测器可以用 Ge 单晶材料^[1]或 InGaAsP/InP、AlGaAsSb/GaSb 外延异质材料制作。Ge 探测器尽管价格便宜, 但暗电流大, 倍增散粒噪声较高, 热稳定性较差, 因而在高速、高灵敏、高可靠光检测方面受到限制; AlGaAsSb/GaSb 探测器暗电流较大, 且其材料及工艺制备上还存在不少问题; InGaAs/InP 及 InGaAs/InGaAsP/InP 探测器无论在材料、工艺制备, 还是在光电性能方面都更成熟和优越, 所以近年来国内外用 LPE 技术制作的 InGaAs/InP、InGaAs/InGaAsP/InP 探测器居于领先和主导地位^[2-4]。

二、InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD 设计考虑

1.3—1.6 μm 长波长光纤通信接收机, 其主要指标是光接收灵敏度和脉冲响应速率。为提高光接收灵敏度, 就要提高光探测器无倍增时的响应度 R_s 和有效倍增因子 M_P , 降低器件本身产生的热噪声、暗电流散粒噪声、雪崩倍增时的过量噪声及光子噪声。探测器脉冲响应速率与器件中光生载流子的扩散、电场下的漂移、界面电荷积累、雪崩倍增过程、结电容、负载阻抗有关。为提高光探测器性能, SAGM-APD 器件设计考虑的出发点是:

1) P-N 结置于宽带隙材料 InP 层中, 而光吸收层则置于窄带隙材料 InGaAs 和 InGaAsP 层中, 这样可以有效地防止带间隧道电流的产生;

2) InGaAs/InP 界面能隙差大,会引起光生空穴在同型异质结界面的积累,从而降低脉冲响应速率.为此,在 InP 和 InGaAs 中间增加一个薄的 $n\text{-In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}_{0.65}\text{P}_{0.35}$ 过渡层;

3) 众所周知,如果雪崩过程由离子系数较大的载流子来发动,则倍增过量噪声较小.在 InP 层中,空穴离子系数大于电子离子系数.在结构设计时,要设法实现“纯空穴边界注入”来发动雪崩过程,为此, InGaAs、InGaAsP 层应该是 n 型的;

4) 从 LPE 技术看,若低掺杂的 InP 层直接生长在 InGaAs 层上,则容易引起后者的回熔.因此在 LPE 生长时,先生长低掺杂的 InP 层,再在其上生长 InGaAsP 和 InGaAs 层.

根据上述几条,我们考虑选择的器件结构如图 1 所示.

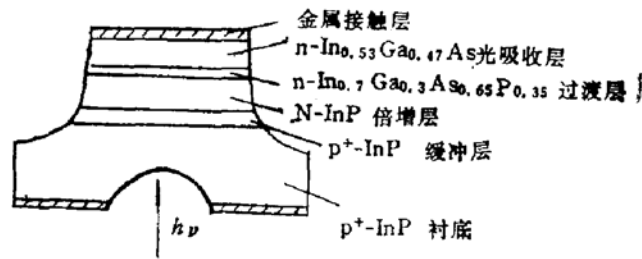


图 1 器件结构

为便于估算器件参数,我们把其结构、能带、接近击穿条件下电场分布示于图 2.

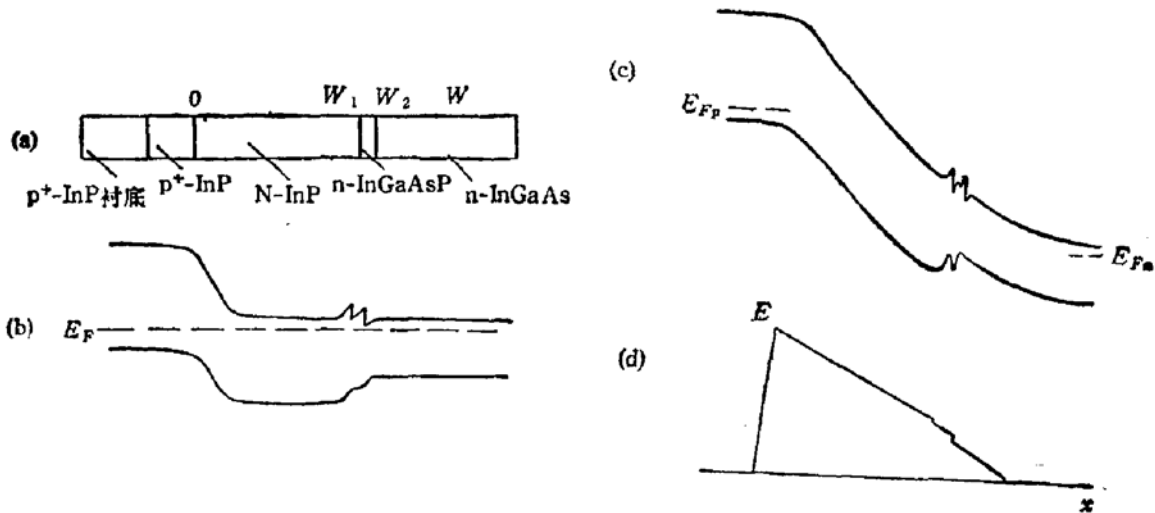


图 2 (a) 器件结构, (b)、(c) 能带, (d) 电场分布示意图

器件结构设计任务是确定各层浓度和厚度.原则上,它们可由一维泊松方程、电流密度方程、连续性方程及一些简化假设来估算.它们是:

1) 运动方程

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho_j}{\epsilon_0 \epsilon_i} \tag{1}$$

$$J_n = J_n + J_p = J_{ds} + J_{rs} + J_{il} + J_{ion} \tag{2}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = G_p - U_p - \frac{1}{q} \nabla \cdot J_p \quad (3)$$

其中 ϵ_0 为自由空间电容率, ρ_i, ϵ_i 分别为第 i 层空间电荷密度和相对介电常数, J_n, J_p 分别为电子电流密度和空穴电流密度, J_{di} 为 P-N 结耗尽层边界处附近的少子扩散电流密度, J_{re} 为耗尽层中产生-复合电流密度, J_{si} 为表面泄漏电流密度, J_{tun} 为隧道电流密度, G_p 为外部影响, 例如入射光学激发和大电场下碰撞电离, 所引起的空穴产生速率, U_p 为 n 型半导体中空穴的复合速率, P 为空穴浓度。

2) 简化假设

a) 无界面态和缺陷; InP 层带内隧道过程可以忽略, 为此, N-InP 层的浓度 N_b 应小于 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ [5];

b) P⁺-InP 和 N-InP 交界为单边突变结近似, 且各层掺杂均匀;

c) 在接近击穿条件下, N-InP 和 n-InGaAsP 层全部耗尽, n-InGaAs 部分或全部耗尽;

d) 为避免 InGaAs 层中带间隧道电流, 其界面最大电场应小于 $1.5 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 而大于 $5 \times 10^4 \text{ V/cm}$ [6], InGaAsP 层中隧道电流可以忽略;

e) 为产生倍增, InP 层雪崩区最大电场 E_m 应大于 $4.5 \times 10^5 \text{ V/cm}$, 在估算器件参数时, E_m 取 $5.0 \times 10^5 \text{ V/cm}$ [5];

f) 在 $1.3-1.6 \mu\text{m}$ 光波段, InGaAs 层光吸收系数约为 $1.0 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$, 空穴扩散长度 L_p 为 $2 \mu\text{m}$ 左右, 空穴迁移率取为 $100 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。

为了估算器件结构参数, 只须考虑接近击穿条件下的情况。引用简化假设 b)、c), 得到 P⁺N 结界面电场 E_m 为:

$$E_m = \int_0^{W_1} \frac{qN_b}{\epsilon_0 \epsilon_b} dx + \int_{W_1}^{W_2} \frac{qN_q}{\epsilon_0 \epsilon_q} dx + \int_{W_2}^W \frac{qN_i}{\epsilon_0 \epsilon_i} dx$$

$$\approx \frac{qN_b \cdot W_1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_b} + \frac{qN_q \cdot (W_2 - W_1)}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_q} + \frac{qN_i \cdot (W - W_2)}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_i} \quad (4)$$

由 d)、e), 可得

$$5 \times 10^4 \text{ V/cm} < \frac{qN_i \cdot (W - W_2)}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_i} < 1.5 \times 10^5 \text{ V/cm} \quad (5)$$

$$\frac{qN_b \cdot W_1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_b} + \frac{qN_q \cdot (W_2 - W_1)}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_q} + \frac{qN_i \cdot (W - W_2)}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_i} > 4.5 \times 10^5 \text{ V/cm} \quad (6)$$

$$\text{其中 } \frac{q}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_b} \approx \frac{q}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_q} \approx \frac{q}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_i} \approx 1.53 \times 10^{-7} \text{ cm} \cdot q/F,$$

那末有:

$$3.25 \times 10^{11} < N_i \cdot (W - W_2) < 1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \quad (7)$$

$$N_b \cdot W_1 + N_q \cdot (W_2 - W_1) + N_i \cdot (W - W_2) > 3.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \quad (8)$$

根据(7)、(8)式, 我们可以画出以 $N_b \cdot W_1, N_q \cdot (W_2 - W_1), N_i \cdot (W - W_2)$ 为坐标轴的参数选择空间, 如图 3 所示。

从结构设计考虑来说, 原则上满足(7)、(8)两式的参数选择空间中的点都是可行的。

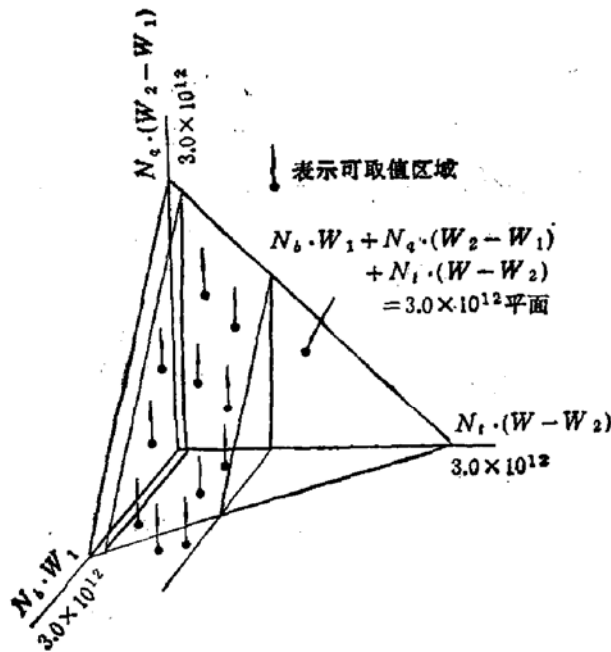


图3 参数选择空间

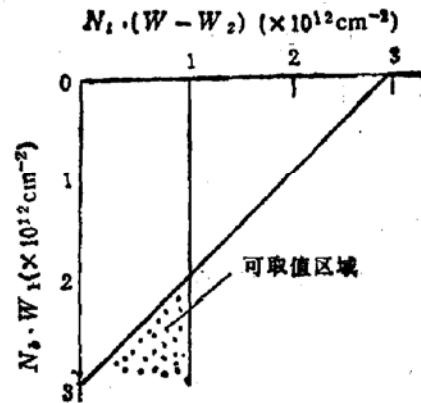


图4 InGaAs/InP SAM-APD 参数选择平面

如果没有InGaAsP层,则SAGM-APD成为SAM-APD,令 $W_2 = W_1$ 根据(7)、(8)式可画出其参数选择平面图,如图4所示。

图4与图3相比,可供选择的点少多了。这表明,增加了InGaAsP层后,不仅可以减少空穴在InP/InGaAs界面堆积的时间,而且参数可选择的范围增大了。

在考虑器件设计时,除了其参数可行性之外,还要考虑器件制作的重复性。InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD如果用LPE制备外延片,则每次每层生长的浓度和厚度都会有微小变化。那么总的变化 $N \cdot \Delta W + W \cdot \Delta N$ 会不会导致其结构参数超出允许值之外?这可以用参数选择空间作图来确定。如我们选定:

$$N_b = 8 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}, W_1 = 2.2 \times 10^{-4} \text{cm};$$

$$N_q = 1.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}, (W_2 - W_1) = 0.3 \times 10^{-4} \text{cm};$$

$$N_i = 1.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}, (W - W_2) = 1.0 \times 10^{-4} \text{cm};$$

它们满足(7)、(8)式。若采用LPE技术,设每层浓度偏差 $\Delta N = 4.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$,每层厚度偏差 ΔW 为 $2.0 \times 10^{-5} \text{cm}$,则最大总的 $N \cdot \Delta W + W \cdot \Delta N$ 偏差可达 $1.9 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$,这显然超出了参数选择空间中的允许范围。因此,器件结构参数选择以其空间中较中部的地点为宜,不宜选在边线附近。有了四元层InGaAsP,可调节的余地就增大了。

利用参数选择空间还可以考虑或计算器件极限光电特性,如 V_B, I_s, R_s 等。

当然,在选择器件结构参数时,还必须考虑到工艺水平及其它约束条件,如光吸收系数、载流子扩散长度等。

根据设计考虑、工艺水平等因素,我们选定N-InP层浓度 $N_b = (7-8) \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$,其厚度 W_1 为 $(1.6-2.0) \mu\text{m}$; n-InGaAsP层之浓度 $N_q = 1.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$,其厚度为 $(0.3-0.6) \mu\text{m}$; n-InGaAs层之浓度 N_i 为 $1.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$,其厚度为 $(3.0-3.5) \mu\text{m}$ 。在接近击穿条件下, n-InGaAs层中的耗尽区厚约 $1 \mu\text{m}$ 。

三、 I_p-V , I_d-V 测量及讨论

1) I_p-V , I_d-V 测量

根据上述各层选定的参数,采用 LPE 技术,逐层生长 P^+ -InP 缓冲层, N-InP 倍增层, n-InGaAsP 过渡层, n-InGaAs 光吸收层。然后进行光刻、腐蚀、氧化、蒸发或电镀、合金、减薄、解理、中测、装管等工艺,则 InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD 就制作好了。我们在不同偏压、不同光功率下进行测量,并用 X-Y 记录仪绘制 I_p-V , I_d-V 特性如图 5 所示。这里 I_d 为暗电流, I_p 为有光入射时的总电流。

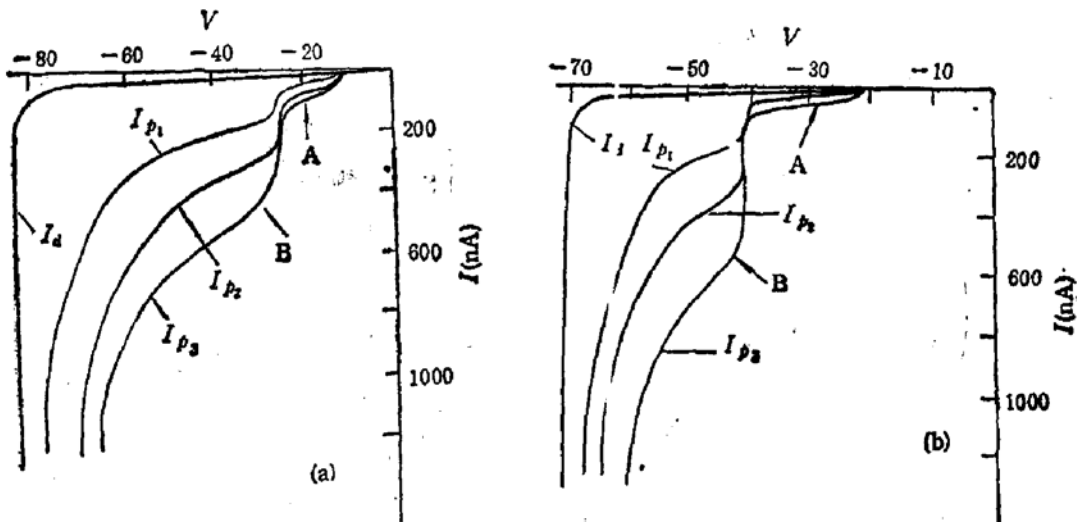


图 5 (a) I_p-V 曲线; (b) I_d-V 曲线

从上述测量曲线可知:

a) I_p-V 曲线呈现二级阶梯扭折。第一级阶梯扭折很小,第二级阶梯扭折较大。如果四元层 InGaAsP 没有生长上,则没有第一级阶梯扭折;

b) 在低偏压下,所有器件都存在一光“死区”。所谓光“死区”,指的是有光入射无光电流输出的外加偏压范围。这一偏压范围对应着器件内部耗尽层边界没有达到 InP/InGaAsP 界面。当耗尽层界面正好到达 InGaAsP/InGaAs 界面的电压叫穿通电压 V'_{th} ,一般 V'_{th} 在 30—45 伏。

2) 二级阶梯扭折曲线讨论

我们可以把 InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD 的 I_p-V 曲线大致分为三个区域:光死区;光弱吸收区,它对应着图 5a)、b) 曲线的 A 段;光响应及倍增区,它对应着 I_p-V 曲线的 B 段。A 段是 SAGM-APD 所特有的。

现在我们来解释 SAGM-APD 的 I_p-V 曲线两级阶梯扭折:

从衬底射入,经过 N-InP 透入 InGaAsP 和 InGaAs 的红外光,其波长 $\lambda < 1.15 \mu\text{m}$ 部分,一小部分被 InGaAsP 层吸收,其余部分进入 InGaAs 层被吸收。晶格吸收红外光后,产生带间跃迁,从而形成电子-空穴对。在 N-n 型材料中,空穴向倍增区方向扩散或在电场下漂移,但在两个同型异质结界面受到势垒阻挡作用。在外加偏压较低时, N-

InP 电场未穿通到 InP/InGaAsP 界面,这时空穴的能量不足以克服界面势垒,所以在外电路中不会形成光电流。当外加电压增加并发生穿通到该界面时,使该处能带发生弯曲,这就降低了界面势垒对空穴的阻挡作用。我们测量采用的光源是峰值波长为 $1.29\mu\text{m}$ 的 LED,其半宽度在 850\AA , InGaAsP 层吸收 $\lambda < 1.15\mu\text{m}$ 的光产生的空穴可以越过界面势垒并在电场下漂移到 $\text{P}^+\text{-InP}$,在外电路形成相应于 $I_p\text{-}V$ 曲线中第一个小阶梯电流;当外加偏压再增加,耗尽层电场边界达到 InGaAsP/InGaAs 界面时,同样使该处能带发生弯曲,这就降低了 InGaAsP/InGaAs 界面势垒的阻挡作用,这时 InGaAs 层吸收光而产生的空穴可以越过界面势垒并在电场下漂移到 $\text{P}^+\text{-InP}$,在外电路形成相应于 $I_p\text{-}V$ 曲线第二个大阶梯扭折的光电流。当外加偏压进一步增加时,从 InGaAs、InGaAsP 层运输过来的空穴在电场下获得足够的能量,和 N-InP 晶格发生碰撞电离,并一而再再而三迅速猛烈地进行下去,于是发生雪崩现象。

$I_p\text{-}V$ 曲线二级扭折是 InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD 所特有的。Si-APD、Ge-APD、InGaAs/InP SAM-APD 的 $I_p\text{-}V$ 曲线都不会出现两级扭折。因此利用 $I_p\text{-}V$ 曲线可以区别探测器是否是 InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD 结构。而且根据 $I_p\text{-}V$ 曲线所提供的信息可以给外延工艺参数改进指明方向。因为第一级扭折的弱响应区的长短、高低反映了 InGaAsP 的厚度和组分的信息。

3) 穿通电压 V_{th} 与光倍增因子 M_p 的讨论

外加偏压低于穿通电压 V_{th} 时, $I_p = 0$; 解刚好穿通时单边突变结条件下的泊松方程,可得

$$V_{th} \approx 8 \cdot 10^{-8} \cdot N_b \cdot W_1^2 \quad (9)$$

这里 V_{th} 为耗尽区边界达 InP/InGaAsP 时的偏压。若 $N_b = 8 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$, $W_1 = 2.0\mu\text{m}$, 则 $V_{th} = 25.6$ 伏。

设 N-InP 层最大电场为 $5.0 \times 10^5\text{V/cm}$, InGaAsP/InGaAs 界面电场为 $1.5 \times 10^5\text{V/cm}$, InGaAs 层浓度 $N_i \approx 1.0 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$, 则击穿电压 V_B 为:

$$V_B = 96 \text{ 伏,}$$

$$V_{th}/V_B \approx 2/7.$$

我们的测量结果为 $V_{th}/V_B = \frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}$;

对于有光死区的 APD, 在边界空穴小注入条件下, M_p 有如下经验公式^[7]:

$$M_p = U(V - V'_{th}) \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{V}{V_B}\right)^n} \quad (10)$$

其中 $U(V - V'_{th})$ 为阶跃函数, V'_{th} 为 $I_p\text{-}V$ 曲线中与第二级大阶梯扭折相对应的电压,它与 V_{th} 不同。 n 为与材料、光波长、功率、尤其与掺杂断面有关的常数。对于 InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD, 取 $n \approx 2$ 与实际测量结果比较吻合。

四、结 论

根据雪崩电场 E_a 和限制隧道电流电场 E_l 要求出发,估算并选择了器件各外延层

参数。我们把参数估算、工艺限制、实测 I_p - V 曲线联系起来,得出:

- 1) I_p - V 曲线二级阶梯扭折是 InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD 所特有的;
- 2) N-InP 层浓度及厚度、n-InGaAs 层浓度是三个关键参数,也比较苛刻,工艺制作上必须精确控制。若 N-InP 层浓度在 $(6-8) \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$, 厚度在 $1.6-2.2 \mu\text{m}$, n-InGaAs 层浓度 $N_i \leq 1.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, 则 V_B 在 $(5-110)$ 伏, $M_p > 10$;
- 3) V_{th} 与 V_B 之比以 $\frac{1}{3}$ 左右为宜;
- 4) M_p 可用经验公式(10)进行估算,其中 n 主要与 N-InP 层的厚度和离化率有关。当 $n = 2$ 时, M_p 的实测数据和经验公式计算值比较吻合。

InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD 是器件公司探测器组同志们制备的,李平同志并对器件光电性能测试给予了大力支持,在此均表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 丁国庆、阙希文,半导体学报,8,437(1987).
- [2] T. P. Lee, C. A. Burrus and A. G. Dentai, *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-17**, 232(1981).
- [3] O. K. Kim, S. R. Forrest, W. A. Bonner, and R. G. Smith, *Appl. Phys. Lett.*, **39**, 402(1981).
- [4] J. C. Campbell, A. G. Dentai, W. S. Holden and B. L. Kasper, *Tech. Digest, International Electron Device Meeting*, 464-467(1984).
- [5] R. Forrest, R. G. Smith and Ockkykim, *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-18**, 2040(1982).
- [6] Yuichi Matsushima and Yukio Noda, *Fourth International Conference on Integrated Optics and Fiber Communication*, 226-227, 1983.
- [7] S. M. Sze, *半导体器件物理*, 395, 辽河实验工厂情报资料室译,(1972).

Design of Long-Wavelength InGaAs/InGaAsP/InP Avalanche Photodiodes with Separate Absorption, Grading and Multiplication Regions and Step-Like Kinks of I_p - V Curve

Ding Guoqing

(Wuhan Telecommunications Devices Co.)

Abstract

The device parameters of a InGaAs/InGaAsP/InP SAGM-APD are designed and estimated according to the requirements of the avalanche field and the field limiting tunneling current in the device. Two kinks of the I_p - V curve were observed and explained. We have shown that the suitable ratio of V_{th}/V_B is about $\frac{1}{3}$, and an experience formula is found, which is in agreement with the measured results of M_p .

Key words Avalanche Photodiodes. Heterojunction. Two Step-like kinks