

# 长波长 InGaAs/InP APD 光接收组件

胡春阳 王树堂 曾 靖  
夏彩虹 何 军 周 洲

(中国科学院半导体研究所, 北京, 100083)

**摘要:** 在理论分析与计算的基础上研制了一种用于 140Mb/s 长波光通信的新型高灵敏度光接收组件, 组件采用混合集成电路技术制成, 由 InGaAs/InP SAGM 雪崩光电二极管和硅双极晶体管互阻型前置放大器组成. 工作波长为  $1.3\ \mu\text{m}$  时, 理论计算的灵敏度为  $-48.6\ \text{dBm}$ , 实际测量值为  $-47\ \text{dBm}$ , 优于现有的 PIN/FET 光接收组件或 Ge 雪崩光电二极管.

**关键词:** 光纤通信, 光电探测器, 光接收组件, 雪崩光电二极管.

## 引言

近年发展起来的 InGaAs/InP 雪崩光电二极管 (APD) 因其倍增因子高, 响应速度快, 暗电流及雪崩倍增过剩噪声比 Ge APD 小, 被认为是目前长波光通信领域比较理想的光电探测器件, 有良好的应用前景. 国际上将 InGaAs/InP APD 用于高码速的光纤传输系统已获得迄今为止最高的接收灵敏度<sup>[1]</sup>. 因此, 发挥 InGaAs/InP APD 的潜在优势及研制性能优良的 InGaAs/InP APD 光接收组件, 提高其接收灵敏度是十分重要的课题. 目前国内外对 140Mb/s 高灵敏度 InGaAs/InP APD 光接收组件的报道还不多.

本文通过计算, 从理论上分析了 InGaAs/InP APD 的倍增因子、暗电流、过剩噪声及前置放大器噪声对 APD 光接收组件灵敏度的影响, 介绍了我们新研制的, 用于 140Mb/s 长波长光通信的 APD/BJT 光接收组件, 并研究和讨论了有关设计、制作和性能等问题.

## 1 灵敏度的分析与计算

根据 Personick 的理论分析计算接收灵敏度, 当 APD 的倍增因子  $M = 1$  时, APD 相当于 PIN 光电二极管. PIN 光接收组件的最小可探测平均光功率, 即灵敏度  $\bar{P}_p$  可表示为

$$\eta \bar{P}_p = Q \frac{h\nu}{q} \langle i^2 \rangle_c^{1/2}, \quad (1)$$

式中  $\eta$  为 PIN 探测器的量子效率,  $q$  为电子电荷,  $Q$  为与误码率 (BER) 有关的常数 (BER 为  $10^{-9}$  时,  $Q = 6$ ),  $h\nu$  是光子的能量,  $\langle i^2 \rangle_c^{1/2}$  是前置放大器的等效输入噪声.

当 APD 的倍增因子  $M > 1$  时, 接收灵敏度  $\bar{P}_A$  近似为

$$\eta\bar{P}_A = \left[ \left( \frac{\eta\bar{P}_P}{M} \right)^2 + 2q \left( \frac{h\nu}{q} \right)^2 Q^2 I_{DM} F(M) I_2 B \right]^{\frac{1}{2}} + (h\nu) Q^2 F(M) I_1 B, \quad (2)$$

其中  $I_1$  和  $I_2$  为与传输系统有关的常数,  $I_{DM}$  为 APD 参与倍增的暗电流,  $B$  为系统码速,  $F(M)$  为 APD 的过剩噪声因子, 并有

$$F(M) = M \left[ 1 - (1-k) \left( \frac{M-1}{M} \right)^2 \right], \quad (3)$$

式(3)中  $k$  为 APD 两种载流子的离化系数比.

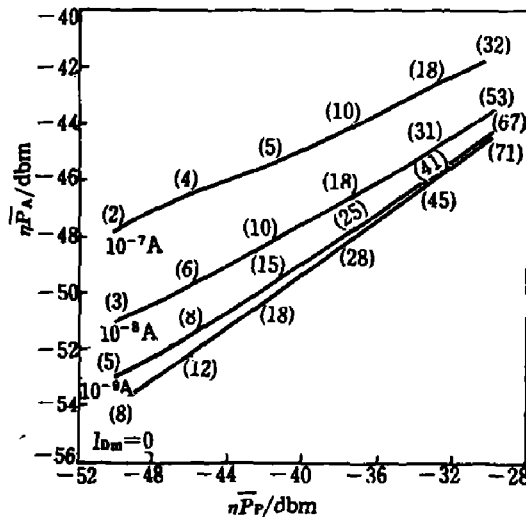


图1 不同  $I_{DM}$  下,  $\eta\bar{P}_A$  随  $\eta\bar{P}_P$  的变化曲线  
( $I_1 = 0.5$ ,  $I_2 = 0.55$ ,  $k = 0.5$ ,  $B = 140$   
Mb/s,  $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ ,  $\text{BER} = 10^{-9}$ )

Fig.1 Diagram of  $\eta\bar{P}_A$  vs  $\eta\bar{P}_P$  at  
different  $I_{DM}$

图1为根据式(2)和(3)计算得到的  $I_{DM}$  为  $0\text{A}$ ,  $10^{-9}\text{A}$ ,  $10^{-8}\text{A}$  及  $10^{-7}\text{A}$  时, 最小的  $\eta\bar{P}_A$  随  $\eta\bar{P}_P$  变化曲线, 曲线上括号内的数字表示获得最小的  $\eta\bar{P}_A$  所需的最佳倍增因子. 由图得到以下结论: (1) 暗电流  $I_{DM}$  对接收灵敏度有严重的影响,  $I_{DM}$  值较大时, 部分抵消了 APD 内增益对灵敏度的改善. 在  $B = 140$  Mb/s 下, 仅当  $I_{DM} < 1\text{nA}$  时, 其噪声的影响才接近  $I_{DM} = 0$  的理想情况, 接收灵敏度得到较大改善. (2)  $I_{DM}$  值较小时, 使用 APD 探测器可大幅度改善接收灵敏度. 对于接收灵敏度  $\eta\bar{P}_P$  为  $-40\text{dBm}$  左右的 InGaAs PIN 光接收组件, 相应的 (采用同样的前置放大器) InGaAs/InP APD 接收组件的灵敏度可降低  $10\text{dB}$  左右. 即在  $10^{-9}$  误码率条件下, 能够接收光信号的功率降低了一个数量级, 改善效果仍是非常明显的. (3) 由于使用了 APD 探测器,

减小了对前置放大器噪声特性的要求, 给前放的设计提供了更大的灵活性.

根据分析结果, APD 光接收组件的灵敏度很大程度上取决于所使用的 APD 器件的性能. 为获得高的接收灵敏度, 要求 APD 的倍增因子足够大, 过剩噪声因子要小, 尤其是暗电流  $I_{DM}$  要小, 而且以较高倍增工作时不能有其它的噪声机理出现, 这些要求在早期的 InGaAs/InP APD 是较难达到的.

## 2 InGaAs/InP SAGM APD

图2为我们研制的、并用于光接收组件的 InGaAs/InP SAGM (Separated Absorption, Grading, Multiplication) APD 结构示意图<sup>[2]</sup>. 这是一种背面入射的台面型器件, 采用液相外延技术生长, 用标准光刻工艺形成台面, 然后采用钝化膜保护, 使之具有良好的稳定性. 表1列出这种器件的主要性能参数. 器件参与倍增的暗电流  $I_{DM}$  的典型值为  $1\text{nA}$ , 最小值为  $0.1\text{nA}$ ; 最大倍增因子大于 30;  $M = 10$  时过剩噪声因子  $F$  为  $5 \sim 6$ .

图3为典型的 InGaAs/InP SAGM APD 器件的  $I-V$  工作特性. 由图可见, APD 具有足够高的倍增因子. 当初始电流  $I_{P0}$  为几十 nA 时, 倍增因子超过 100. 此时的入射

表 1 InGaAs/InP SAGM APD 主要性能参数

Table 1 Main characteristics of InGaAs/InP SAGM APD

参 数	最小值	典型值	最大值
响应波长 $\lambda(\mu\text{m})$	1.0		1.65
击穿电压 $V_B$ (V)	55	80	130
击穿电压温度系数 $\beta$ (1/K)		0.14%	
暗电流 $I_D$ (nA)	1.0	20	50
倍增暗电流 $I_{DM}$ (nA)	0.1	1	5
总电容 $C_t$ (pF)		0.4	0.7
响应度 $R$ (mA/mW)	0.6	0.7	0.8
脉冲响应时间 $t$ (ps)		100	300
过剩噪声因子 $F$		5	
最大倍增因子 $M$	20	30	80
光敏面直径 $D(\mu\text{m})$		75	

光功率与计算的 APD 组件灵敏度相当, 所以 APD 的倍增因子完全能够满足设计要求.

图 4 为波长  $\lambda=1.3\mu\text{m}$  时, InGaAs/InP APD 的过剩噪声因子  $F$  与倍增因子  $M$  的关系, 由图可见, 实测结果与理论分析基本一致, 离化系数比  $k$  为 0.4~0.5. 尤其难得的是, 当倍增因子  $M$  大至 50 时, 噪声仍为光电流倍增所产生的过剩噪声, 没有出现其它的噪声机理.

由灵敏度分析与器件的性能可以得出结论, 光接收组件所采用的 InGaAs/InP APD 器件的性能足以保证该器件获得高的接收灵敏度.

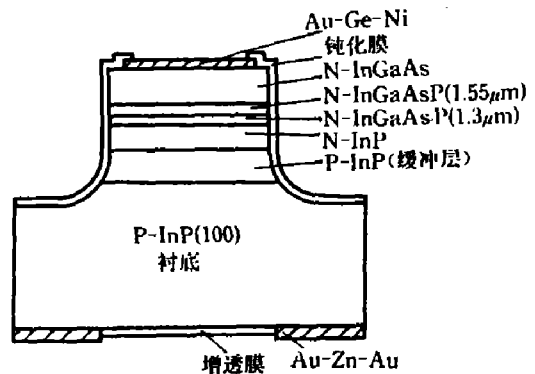


图 2 台面型 InGaAs/InP SAGM APD 结构示意图

Fig.2 Schematic structure diagram of mesa InGaAs/InP SAGM APD

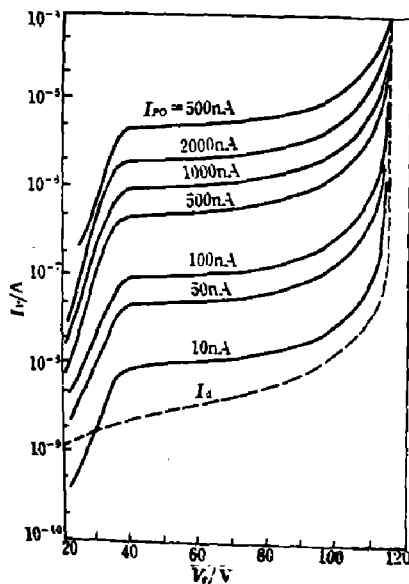


图 3 典型的 InGaAs/InP SAGM APD 工作特性

Fig.3 Typical working characteristics of InGaAs/InP SAGM APD

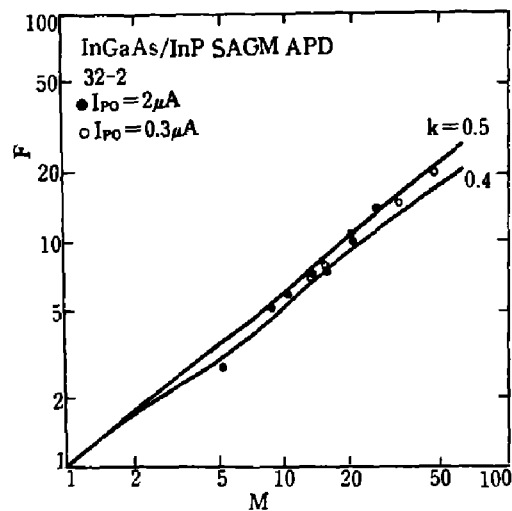


图 4 InGaAs/InP APD 的过剩噪声因子  $F$  随倍增因子  $M$  的变化

Fig.4 Diagram of excess noise factor  $F$  vs multiplication factor  $M$

### 3 APD/BJT 光接收组件

#### 3.1 设计与分析

图 5 为我们研制的 APD/BJT 光接收组件原理图, 由 InGaAs/InP SAGM APD 与 BJT 互阻型前置放大器组成. 前置放大器的输入级采用共集电极接法, 使其电压增益为 1, 消除了密勒效应的影响, 减小了等效输入电容, 从而降低了等效输入噪声. 采用计算机 Pspice 专用电路分析程序分析 APD/BJT 光接收组件的脉冲响应特性, 结果见图 6. 计算中主要的模型参数为: BJT 集电结电容  $C_c = 0.8 \text{ pF}$ , 发射结电容  $C_e = 0.3 \text{ pF}$ , 基区电阻  $R_b = 50 \Omega$ , 反馈电阻  $R_f = 10 \text{ k}\Omega$ , 反馈电阻的寄生电容  $C_f = 0.1 \text{ pF}$ , 光电探测器等效为一个电流源与一个小电容  $C_s$  ( $C_s = 0.4 \text{ pF}$ ) 的并联. 计算结果表明脉冲上升时间为  $2.5 \text{ ns}$ , 满足设计要求, 如图 6.

输入级 BJT 的集电极电流取为  $0.5 \text{ mA}$ , 可求得  $\eta \bar{P}_p$  为  $-39.2 \text{ dBm}$ . 由式 (2) 求得  $\eta \bar{P}_A$  随  $M$  变化曲线, 参见图 7, 最小的  $\eta \bar{P}_A$  为  $-49.6 \text{ dBm}$ ,  $M_{\text{opt}}$  为 21. 取  $\eta = 0.8$ , 则  $\eta \bar{P}_p = -38.2 \text{ dBm}$ ,  $\eta \bar{P}_A = -48.6 \text{ dBm}$ . APD 接收组件的灵敏度比相应的 PIN 组件提高约  $10 \text{ dBm}$ , 灵敏度得到明显改善.

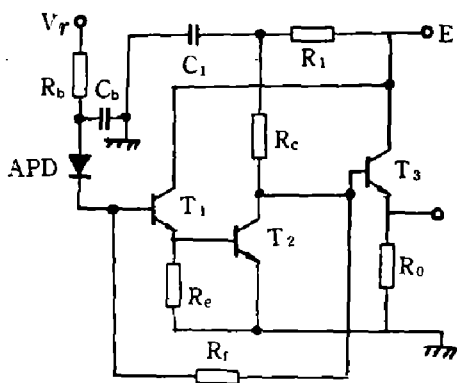


图 5 APD/BJT 光接收组件原理图  
Fig.5 Schematic diagram of  
APD/BJT optical receiver

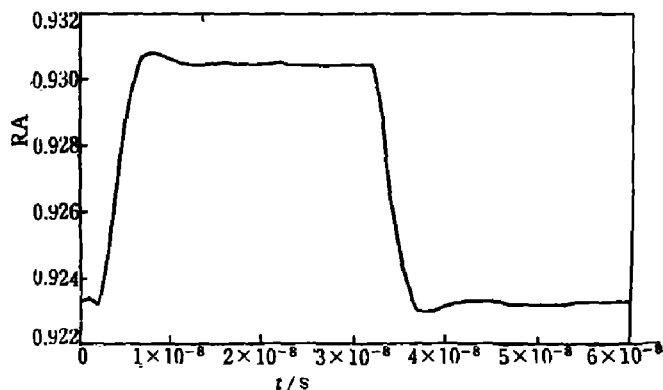


图 6 计算的 APD/BJT 光接收组件  
脉冲响应特性  
Fig.6 Computed pulse response of  
APD/BJT optical receiver

#### 3.2 制作

采用混合集成工艺将 BJT 管芯、片状电阻、电容, APD 管芯等元器件集成在基片上, 通过蒸发、电镀等工艺在基片上形成导带. 经合理设计和改进制作工艺, 可以最大限度地减小分布参数的影响. 整个制作工艺简单, 稳定, 重复性好, 成品率较高. 组件的封装采用标准的双列直插十四脚管壳, 便于使用.

#### 3.3 性能

图 8 为实测的光接收组件的阶跃响应, 其上升时间为  $2.5 \text{ ns}$ , 与计算结果一致. 在光通信系统中测试的结果表明, 当码速为  $140 \text{ Mb/s}$  时, 在  $10^{-9}$  误码率下, APD/BJT 光接

收组件的灵敏度达 $-47$  dBm, PIN 光接收组件的灵敏度为 $-37$  dBm, 与预期结果基本一致. 图 9 为  $140$  Mb/s 码速下光接收组件的眼图.

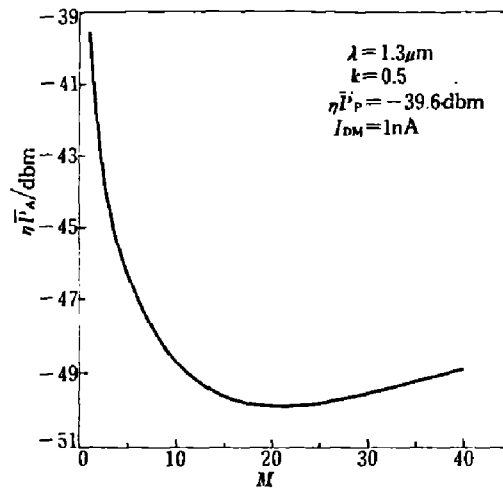


图 7  $\eta \bar{P}_A$  随  $M$  变化曲线

( $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ ,  $B = 140 \text{ Mb/s}$ ,  $I_{DM} = 1 \text{ nA}$ ,  $\text{BER} = 10^{-9}$ ,  
 $\eta \bar{P}_P = -39.2 \text{ dBm}$ ,  $I_1 = 0.5$ ,  $I_2 = 0.55$ ,  $I_3 = 0.085$ ,  $k = 0.5$ )

Fig.7 Diagram of  $\eta \bar{P}_A$  vs  $M$

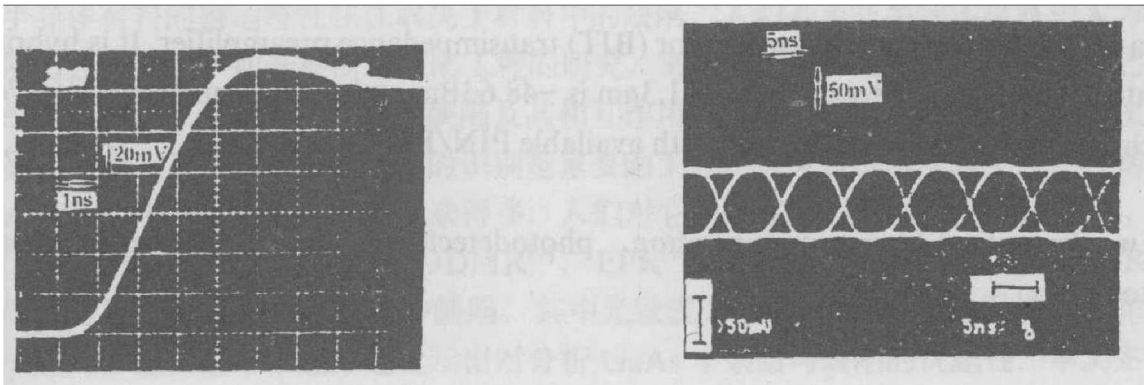


图 8 APD/BJT 光接收组件的阶跃响应

Fig.8 Step response of APD/BJT  
optical receiver

图 9  $140$  Mb/s 时 APD/BJT 光接收  
组件的眼图

Fig.9 Eye diagram of APD/BJT  
optical receiver at  $140$  Mb/s

## 4 结论

理论分析表明, 使用高质量的 InGaAs/InP APD 可以改善接收灵敏度. 在理论分析的基础上, 研制了 APD/BJT 光接收组件. 理论计算的灵敏度达 $-48.6$  dBm, 实际测量值为 $-47$  dBm, 两者基本相符, 优于 PIN/FET 或 Ge APD. 由于 APD 组件降低了对前置放大器噪声特性的要求, 因此使用 BJT 前置放大器具有制作简便、稳定可靠、不易损坏、成本低等优点, 使得该组件具有优良的性能价格比.

**致谢:** 桂林光通信研究所高家藩和张文斌同志、北京邮电学院李国瑞和顾婉仪同志帮助进行了系统测试, 在此表示衷心的感谢.

### 参 考 文 献

- 1 Kasper B L, Campbell J C et al. *Electron. Lett.*, 1985, 21 : 982
- 2 王树堂, 曾靖. *半导体学报*, 1990, 11 : 958
- 3 胡春阳. *研究生论文*, 北京邮电学院, 1988

## LONG-WAVELENGTH InGaAs/InP APD OPTICAL RECEIVER MODULE

Hu Chunyang, Wan Shutang, Zeng Jing,  
Xia Caihong, He Jun, Zhou Zhou

(*Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** Based on theoretical analysis and computation, a new type of high sensitivity optical receiver module for 140Mb/s long-wavelength optical fiber communication is developed. The optical receiver consists of an InGaAs/InP SAGM avalanche photodiode (APD) and a silicon bipolar junction transistor (BJT) transimpedance preamplifier. It is hybrid-integrated. The calculated sensitivity at  $1.3\mu\text{m}$  is  $-48.6\text{dBm}$  and the measured one is  $-47\text{dBm}$ , which is superior to those obtained with available PIN/FET, or Ge APD.

**Key words:** optical fiber communication, photodetectors, optical receivers, avalanche photodiodes,