



# 半导体量子器件物理讲座

## 第七讲 半导体异质结光电探测器\*

余金中<sup>†</sup> 王杏华

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

**摘要** 光电探测器是一类用于接收光波并转变为电信号的专门器件.文章描述了 PIN 光电二极管、雪崩光电二极管、MSM(金属-半导体-金属)光电二极管的器件结构和工作原理,并对它们的响应度、噪声、带宽等特性进行了讨论.这类器件已在光通信、光信息处理等许多系统中得到广泛的应用.

**关键词** 异质结 光电二极管 量子结构 半导体光电子学 光电集成

### SEMICONDUCTOR HETEROSTRUCTURE PHOTODETECTORS

YU Jin-Zhong<sup>†</sup> WANG Xing-Hua

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

**Abstract** Photodetectors are optoelectronic devices that detect light and turn it to electrical signals. The device structure and operation principle of PIN photodiodes, avalanche photodiode and semiconductor-metal-semiconductor MSM photodiodes are described. Their responsivity, noise and bandwidth are also discussed. These devices have been widely used in many optoelectronic systems in optical fiber communications, optical processing etc.

**Key words** Heterostructure, Photodetectors, Quantum structure, Semiconductor optoelectronics, Optoelectronic integration.

## 1 引言

任何光电系统中,都包含光波的产生、传输、放大、探测等功能.例如光通信,通常是把需要传输的语音、图像或数码等信息调制激励成激光信号,耦合进入石英光纤中,传输一段距离后,当信号变弱时,可采用半导体光放大器或掺铒光纤放大器进行放大之后继续传输,到达目的地之后,就由半导体光电探测器将已经变得非常弱的光信号探测出来,转变为电学信号,再通过电学放大、整形、处理,还原成我们能听、能见、能读的各种声音、图像或其他有用信息.因此,光电探测器就是这样一类接收光信号并进行光电转换的特种器件<sup>[1,2]</sup>.

早期的光电二极管采用 Si 体材料制成,工作波长在 0.6—0.9  $\mu\text{m}$  范围内,具有相当好的器件特性.但是 Si 光电二极管不适用于光通信的长波长(1.3—1.6  $\mu\text{m}$ )波段,于是开始采用 Ge,之后采用

$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  异质结构.后者在光通信用的长波长范围具有很强的电光响应,同时  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  同 InP 衬底的晶格非常匹配,可获得很好的材料性能和器件性能.至今制成光电二级管的异质材料包括  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y/\text{InP}$ ,  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{As}$ ,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ ,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  等异质结构,它们覆盖了可见光、近红外到红外的整个波段,为器件设计、性能改善提供了坚实的材料基础.

按器件结构划分,光电探测器有 PIN, APD(avalanche photodiodes, 雪崩光电二极管)和 MSM(semiconductor-metal-semiconductor, 金属-半导体-金属)光电二极管等多种,它们各具特色,性能各异.其主要性能参数为:响应度、噪声和带宽.探测器的响应

\* 国家自然科学基金(批准号:69896260,69990540)资助项目;国家重大基础科研项目(批准号:G2000036605).

2001-08-20 收到初稿,2002-02-08 修回

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: jzyu@red.semi.ac.cn

度表征将入射光转换为光电流信号的好坏程度,噪声为接受的信号中噪声的强弱程度,它会限制系统达到某一特定误码率时所能允许的最小的信号强度,带宽必须足以容纳应用系统传输信号的速率,通常光电探测器的带宽为系统的传输比特率的1.5倍以上.因此,对探测器的器件结构、工作原理和性能特性的深入了解不但有助于对它们的研制与开发,也对光电系统中的应用起到促进作用.

## 2 PIN 光电二极管

PIN 光电二极管由一个 pn 结构成,具有台面和平面两种器件结构.它们的主要特点为:相对后面谈到的 APD 光电二极管而言, PIN 光电二极管的结构简单,制作容易,外加  $-20\text{ V}$  的反向电压就能稳定地工作,并具有相当好的光电响应、低噪声、宽频带等特性.它在工作时没有增益,因而没有放大的作用.即使如此,它至今依然是光纤通信等应用系统中占主要地位的器件,常常同 FET(场效应晶体管)或 HBT(异质结双极晶体管)一起组合构成混合式的光电集成电路——光波接收模块.

### 2.1 PIN 光电二极管结构

图 1 为一个台面 InGaAs 光电二极管的各层结构和剖面图.可以看出,它的核心部分为 n-InP、吸收层 i-InGaAs 和 p-InP.最下面的半绝缘 Si-InP 为衬底,支撑整个器件,最上面的 p-InGaAs 为电极层,便于制作 p 型的欧姆接触电极.

当光波从背面(即衬底)入射到 PIN 光电二极管上时,如果入射光子能量小于 InP 衬底的带隙  $E_g$ ,它们就会透过 InP 衬底面进入高纯未掺杂的 i-In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 层,该层的组分  $x = 0.53$  是经过精心设计和实验验证的,其带隙  $E_g$  小于入射光(1.0—1.6  $\mu\text{m}$  波段)的光子能量,因而价带电子吸收光子能量跃迁至导带,产生电子-空穴对.该器件工作时加有反向电压,因而在 i 区产生很强的电场强度.在该电场的作用下,高纯未掺杂的 i-In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 层中吸收光子所产生的电子和空穴就分别扫向 n 极和 p 极.若外接回路上接有负载电阻  $R_L$ ,则光生电子在外回路上流动形成光电流  $i_p$ ,流经  $R_L$  的电压降构成电信号  $V_p$ ,从而完成光波到电波的转换.

### 2.2 PIN 光电二极管工作原理

当入射光子的能量  $h\nu$  大于或等于半导体材料的带隙  $E_g$  时,该材料价带中的电子会吸收光子的能

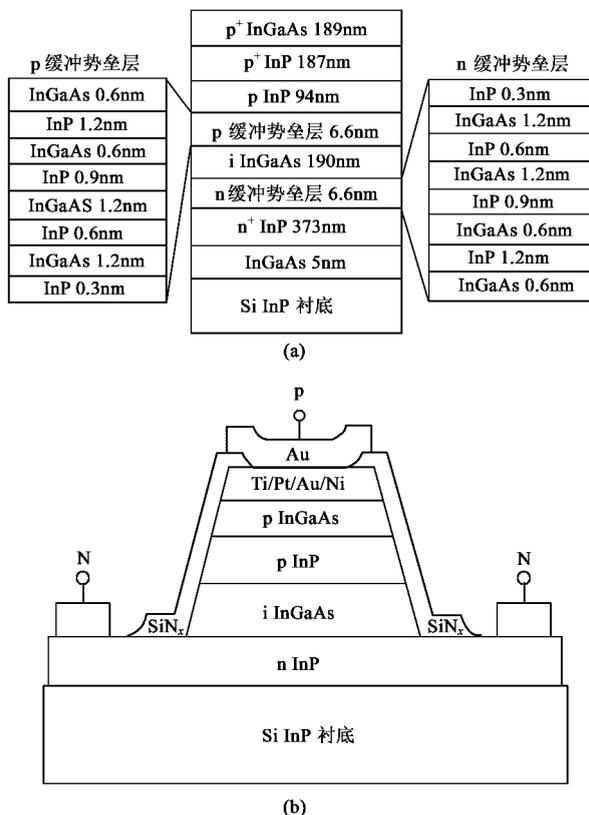


图 1 台面渐变双异质结 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/InP 光电二极管示意图  
(a) 层结构 (b) 横截面

量并跃迁到导带,同时在价带中留下空穴,从而产生光生电子-空穴对.入射光到达材料内部历经一段距离  $x$  之后的强度  $I(x)$  变为

$$I(x) = I_0(1 - e^{-\alpha x}), \quad (1)$$

式中  $I_0$  为入射光的光强,  $\alpha = \alpha(\lambda)$  为半导体材料的吸收系数,它是波长的函数.

事实上,入射光到达入射面上时,由于该面的反射而使入射光的能量损耗一部分.若半导体材料的反射系数为  $R_s$ ,则表面处实际进入的光强为  $(1 - R_s)I_0$ ,它所具有的光子数为  $(1 - R_s)I_0/h\nu$ .如果每一个进入材料的光子都能产生一电子-空穴对,并且吸收区的总厚度为  $d$ ,则入射光产生的光电流为

$$i_p = \frac{eI_0}{h\nu}(1 - R_s)(1 - e^{-\alpha d}), \quad (2)$$

式中  $e$  为电子的电荷,  $h$  为普朗克常数,  $\nu$  为入射光的频率.

半导体材料中的光吸收包括带间吸收、能带同杂质能级之间的吸收和自由载流子吸收.只有那些吸收光子产生光生载流子的过程才会对光电流有贡献.在 PIN 光电二极管中,  $i$  层为一本征材料层,在反向偏压下完全耗尽.光子在耗尽层中被吸收,电场很物理

快将其产生的电子和空穴分隔开来.而空间电荷区之外产生的载流子在被收集之前会复合掉,从而导致光生载流子浓度的降低.在吸收层的两边采用宽带隙材料,加以足够的反偏压,使吸收层完全耗尽,就可以排除这种复合效应.

采用量子效率来描述每一个入射光子产生电子-空穴对的几率,其定义为

$$\eta = \frac{\text{生成的电子-空穴对数量}}{\text{入射光子数量}} = \frac{i_p/e}{I_0/h\nu} = \frac{i_p h\nu}{eI_0} \quad (3)$$

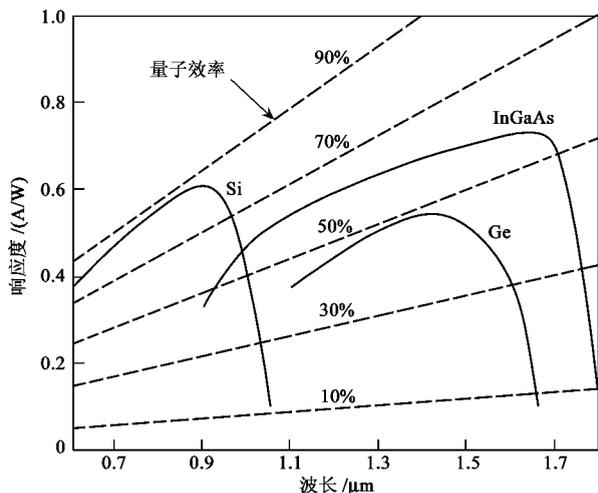


图2 不同材料制成的光电二极管的响应度及量子效率同波长的关系

在实际的光电二极管中,常常用响应度  $R$  来表征单位入射光强所产生的光电流:

$$R = \frac{i_p}{I_0} = \frac{e\eta}{h\nu} \quad (4)$$

图2为不同材料制成的PIN光电二极管的响应度同波长的关系.响应度(即量子效率)是波长的函数,表明它们同材料的能带结构和禁带宽度有关.当波长增长时,其光子能量变小.为了获得足够大的光吸收,光子能量应当大于  $E_g$ ,以便将电子由价带激发至导带.若  $h\nu$  接近或小于  $E_g$ ,相应地波长接近或超过材料吸收光波的截止波长,吸收系数急剧变小,响应度也便急剧变小.值得指出的是:对于每一波长(即一定的能量  $h\nu$ )来说,响应度  $R$  为一固定值,它表明量子效率不受入射光功率的影响,为一固定的常数,因而光电流的大小与入射光功率  $P_0$  成正比.

### 2.3 端面耦合光电二极管和谐振腔光电二极管

欲提高响应度,必需改善器件结构,以便提高光电流  $i_p$ .由(2)式可以看出,人为可变的参量为反射

系数  $R_s$ 、吸收系数  $\alpha$  和吸收区厚度  $d$ .半导体同空气之间的界面的反射率通常为30%左右,采用  $\text{SiN}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Pb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnS}$  或  $\text{MgF}_2$  等介质,可以在半导体表面制作多层介质抗反射膜,使  $R_s$  降至1%以下,因此反射所引起的光损耗大为减少.

吸收系数  $\alpha$  是由材料的性质决定的.提高  $\alpha$  的首选方法就是针对所用光波波长(如  $1.3 \mu\text{m}$ ,  $1.55 \mu\text{m}$ )选择合适的材料,例如  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  在长波段具有高的吸收系数 ( $10^4 \text{ cm}^{-1}$  以上),因而广为应用.吸收区还应该是高纯度和具有完整的晶体结构,以便减少杂质或缺陷的光吸收和散射引起的损耗.

第三个人为可变的量便是吸收区厚度  $d$ .图1为结构吸收层  $i$ - $\text{InGaAs}$ ,其厚度仅为  $190 \text{ nm}$ ,其两边的缓变带隙层(graded bandgap layer, GBL)也仅为  $6.6 \text{ nm}$ ,是很薄的.这不利于提高响应度  $R$ .于是人们研制出了端面耦合型光电二极管和谐振腔型光电二极管.

下面给出一个端面耦合  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  型PIN光电二极管的例子.它由  $3 \mu\text{m}$  厚的  $n$ - $\text{InGaAsP}$  层 ( $\lambda_g = 1.3 \mu\text{m}$ )、 $0.13 \mu\text{m}$  厚的  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  吸收层、非有意掺杂的  $0.1 \mu\text{m}$  的  $n$ - $\text{InGaAsP}$  层和  $p$ - $\text{InP}$  顶层组成.临近顶层的薄薄的  $n$ - $\text{InGaAsP}$  层降低了空穴在异质界面处的堆集,  $3 \mu\text{m}$  厚的  $n$ - $\text{InGaAsP}$  层便于提高该器件同光腔的耦合效率.由于这种器件的入射光是由端面进入的,而不是由正面或背面入射的光进入吸收层中,在波导结构内传输并被吸收,  $d$  增至  $10 \mu\text{m}$  甚至几十  $\mu\text{m}$ ,从而使得  $\alpha d$  项变得很大,大大增加了光子的有效吸收.同时  $10 \mu\text{m}$  的长度比正面或背面入射的光电二极管的  $\phi 50\text{--}70 \mu\text{m}$  小得多,可大大降低电容,使其带宽达  $50 \text{ GHz}$ <sup>[3]</sup>.

虽然上述波导型端面光电二极管具有宽带等特性,然而其耦合效率仍有一些限制.一种类似垂直腔面发射激光器(Vertical cavity surface emitting laser,

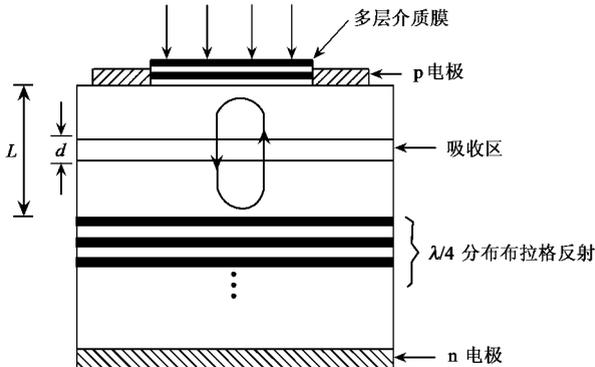


图3 谐振腔型光电探测器结构图

VCSEL)的谐振腔光电二极管被研制出来<sup>[4]</sup>,其结构如图3所示.可以看出,该器件的吸收区上下两边各加一个 $\lambda/4$ 分布布拉格反射器(Distributed Bragg Reflector, DBR),入射到体内的光会在这两个反射器之间来回反射,增加了穿越吸收层的次数.

事实上,该器件的吸收层很薄,以便降低光生载流子在其中的渡越时间.与此同时,由于光波在两个谐振腔面之间来回反射,增加了光程长度.对于高反射率和低损耗的高 $Q$ 腔体来说,量子效率可以大为

$$\eta = \left[ \frac{1 + R_2 e^{-\alpha d}}{1 - 2\sqrt{R_1 R_2} e^{-\alpha d} \cos[(4\pi nL/\lambda) + \phi_1 + \phi_2]} + R_1 R_2 e^{-2\alpha d} \right] (1 - R_1)(1 - e^{-\alpha d}). \quad (5)$$

(5)式表明,量子效率十分依赖于上下两反射面的反射率 $R_1$ 与 $R_2$ ,同时依赖于吸收层的光吸收系数与吸收层厚度的乘积 $\alpha d$ ,还十分依赖于光波传输的相位差.

由(5)式可以看出,光波来回反射一次所引起的相移为 $[(4\pi nL/\lambda) + \phi_1 + \phi_2]$ ,如果这一相移等于 $2\pi$ 的 $m$ 数倍时( $m$ 为正整数),也即波长为如下特定值

$$\lambda = \frac{4\pi nL}{2m\pi - \phi_1 - \phi_2} \quad (6)$$

时,光波在腔内发生谐振,这时光波会来回振荡,使其吸收大为增加,导致量子效率为最大值:

$$\eta_{\max} = \left[ \frac{(1 - R_2 e^{-\alpha d})}{(1 - \sqrt{R_1 R_2} e^{-\alpha d})} \right] (1 - R_1)(1 - e^{-\alpha d}). \quad (7)$$

图4是以 $R_2 = 0.9$ 和 $\alpha d = 0.1$ 为参数,给出了 $R_1 = 0.9, 0.3$ 和 $0.05$ 三种情况下的量子效率同波长的关系. $R_2 = 0$ 时, $\eta = (1 - R_1)(1 - e^{-\alpha d})$ ,即无谐振腔的常规PIN光电二极管的情形,如图4中的水平直线所示.

偏离谐振波长时,如果相移为 $\pi$ 的奇数倍,则前向和后向的行波引起相互抵消的干涉作用,使得吸收功率小于 $(1 - e^{-\alpha d})$ .如果 $\alpha d$ 足够大,或者说吸收区厚度足够厚时,即使 $R_2$ 不为0,大多数入射光在一次传输过程中被吸收,因而其光电转换效率等同于常规的PIN光电二极管.而吸收区厚度 $d$ 较薄时,对应于不同值的 $R_1, R_2$ ,总会在(6)式所决定的波长下获得最大的量子效率,特别是高 $Q$ 值谐振腔更是如此.由此可见,采用谐振腔式的PIN光电二极管,即使在 $\alpha d$ 很小的情况下,也可以使得量子效率大为改进.当 $\alpha d$ 增大时,在 $\alpha d = 0-0.1$ 范围内,量子效率随 $\alpha d$ 的增大而增大, $\alpha d$ 进一步增大会使量子效率逐步下降,反射率越大则下降得越快.这种下

提高,而渡越时间却短得多,预期比先前的高速光电二极管小20倍.通过优化器件的结构和尺寸大小,包括优化吸收层厚度和吸收面的直径,可以降低器件的寄生电容,依此可以使器件的带宽超过50 GHz,同时还具有高的量子效率.

如果谐振腔的入射面和下面的反射面的反射率分别为 $R_1$ 和 $R_2$ ,吸收区的厚度和谐振区的长度分别为 $d$ 和 $L$ , $\phi_1$ 和 $\phi_2$ 分别为在这两个反射面上引起的相移,则该器件的外量子效率可以表达为<sup>[5]</sup>

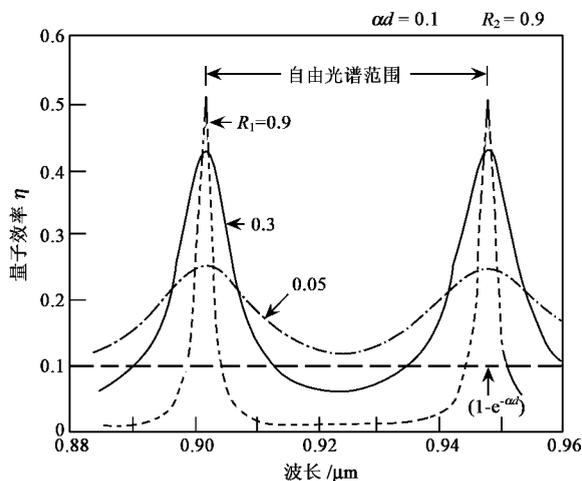


图4 谐振腔型光电探测器的量子效率同波长的关系

降是两种效应竞争的结果.当腔面的损耗小时,到达腔内的功率可以最大,而吸收项 $(1 - e^{-\alpha d})$ 随着腔面损耗的减小而增大.因此,可以对器件参数 $R_1, R_2, \alpha, d$ 和 $L$ 进行优化设计,在所需探测波长 $\lambda$ 下获得尽可能大的量子效率,即尽可能大的响应度.与此同时,由于这种结构的吸收层厚度 $d$ 很薄,光生载流子所需渡越时间很短,整个器件的寄生电容等参数可以很小,因而可以作成高速器件,调制速率高达40 GHz以上.

### 3 雪崩光电二极管

雪崩光电二极管(avalanche photodiode)简称APD,是一种具有内部增益、能将探测到的光电流进行放大的有源器件,这种放大作用可以增加接收机的灵敏度.

APD同PIN光电二极管不同的是:在PIN的吸收区*i*层和 $n^+$ 层之间,插入了薄薄的p型层,变为 $n^+pip$ 的结构.这一新加入的p型层是一雪崩区.图

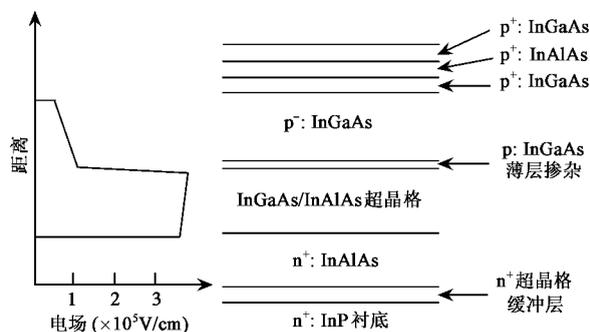


图5 多量子阱雪崩光电二极管的结构和电场分布图

5为  $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  多量子阱雪崩光电二极管的结构和电场分布图。可以看出,图中的  $p$ - $\text{InGaAs}$ 和  $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$  超晶格 (super lattice SL) 中存在一高电场区。当入射光进入器件内产生光生载流子之后,光生电子或空穴在高电场区中会被电场加速,从而获得足够高的能量,并同价带中的束缚电子相互碰撞,使它们电离,产生新的载流子。这些新的载流子同样受高电场的作用而获得高的能量,并进一步参与新的电离。载流子时这种倍增机理称为碰撞电离,由此引起的载流子的倍增现象称为雪崩效应。

APD 的倍增因子等于有光电倍增与无光电倍增两种情况下的光电流之比:

$$M = \frac{i_M}{i_p} \quad (8)$$

式中  $i_M$  为倍增后总输出电流的平均值,而  $i_p$  为(2)式定义的没有倍增时的光电流。事实上,雪崩机理是一个统计过程,因此测得的  $M$  用平均值来表示。

现在最常见的 APD 是  $p^+ \pi n^+$  拉通型结构,即在重掺杂的  $p^+$ -衬底上依次外延生长本征材料  $\pi$  层、高阻  $p$ -层和高掺杂的  $n^+$ -层。外加反向电压较低时,大部分电位降在  $p-n^+$  结的两端。外加反向电压  $V_a$  达到某一定值(通常  $V_a = (90\% - 95\%)V_b$ ,  $V_b$  为反向击穿电压,即  $V_a$  比  $V_b$  小  $10\% - 5\%$ )时,耗尽层刚好“拉通”到几乎是本征的  $\pi$  区。该区完全耗尽,光经  $p^+$  区进入器件,被  $\pi$  区的材料吸收,产生光生载流子。光生电子经过  $\pi$  区漂移至  $p-n^+$  结,在该区高场作用下发生雪崩效应。显然,倍增因子  $M$  是外加反向电压的函数。APD 的响应度为 PIN 光电二极管的  $M$  倍:

$$R_M = \frac{e\eta}{h\nu} M = M R_0 \quad (9)$$

式中  $R_0 = \frac{e\eta}{h\nu}$  为增益  $M$  等于 1 时的响应度。

在深入研究之后,一种结构更复杂的光电二极管 SAGM APD 问世了,SAGM 的含义为吸收、缓变与倍增区相互分隔 (separate absorption, grading and multiplication regions, SAGM)<sup>[7,8]</sup>。在窄带隙吸收区和宽带隙的倍增区之间,增加一过渡区,例如  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  吸收区和  $\text{InP}$  倍增区之间,增加一层或多层的  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  层,其带隙  $E_g$  介于前两者之间,这种结构将影响频带宽度的一些因素降至最低,即将 RC 时间常数、异质结界面处的空穴陷阱、载流子的渡越时间和雪崩时间等参数降至最小,从而使这种 SAGM APD 的性能大为改进。

#### 4 MSM 光电二极管

MSM 是“金属-半导体-金属”这一专有名词的英文译名 (metal-semiconductor-metal) 的缩写,其结构如图 6 所示。由于这种结构非常容易同场效应晶体管 (FET) 集成在一起,因此对它进行了深入研究,制成了光波系统的接收器光电集成电路 (OEIC)。图 6 所示的 MSM 光电探测器是一种平面结构,在其表面上有两组互相错开的电极,它们是通过在半导体上淀积金属电极而做成的,从而构成了背靠背的肖特基二极管。在这些电极之间的半导体表面附近发生光吸收过程。MSM 光电二极管的主要优点是 (1) 器件结构简单,便于制作 (2) 同 MEFET (场效应晶体管) 和 HEMT (高电子迁移率晶体管) 等电子器件的制作工艺相容,便于制作光电集成电路; (3) 单位面积的电容低,因而器件的面积可以做得相当大,这样能提高器件同光纤的耦合效率,便于应用。如果没有光电导增益,当电极间的间距足够小时,MSM 光电二极管的带宽可以非常高。

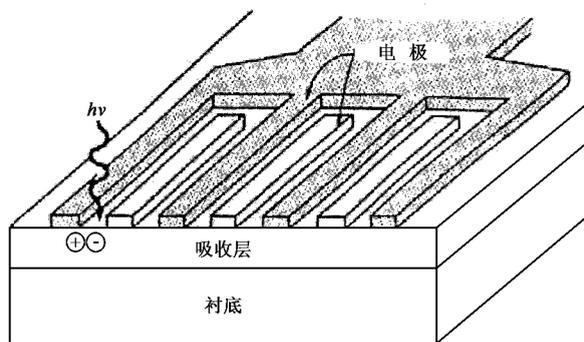


图6 MSM 光电二极管结构图

对 MSM 光电二极管的限制因素为暗电流和量子效率。由于半导体表面或异质界面对横向电流

的流动有很大的影响,因此 MSM 光电二极管中常常难于获得很低的暗电流,长波长的 MSM 光电二极管更是如此.采用异质结构有助于降低暗电流和提高量子效率. MSM 结构中,电极会构成阴影部分,只有那些没有电极遮盖的部分才能接受光照,因而电极会降低量子效率.采用电子束曝光的方法,使电极宽度降至亚微米大小,可以降低阴影所占的比例,提高量子效率.下述三个因素决定了 MSM 光电二极管的响应度的大小 (1)内量子效率可以反映内部增益机制的存在 (2)表面复合会使量子效率降低 (3)电极的阴影比例决定了外量子效率的最大值. MSM 光电

$$\frac{S}{N} = \frac{\text{光电流产生的信号功率}}{\text{光电二极管的噪声功率} + \text{放大器的噪声功率}} \quad (10)$$

为了提高信噪比,光电二极管量子效率应当尽可能地高,以便产生大的信号功率,同时探测器和放大器的噪声应当尽可能地小.

在没有内部增益的 PIN 和 MSM 光电二极管中,主要有量子噪声、本体暗电流和表面暗电流.量子噪声是光信号入射到探测器上时产生和收集光电子过程的统计性质引起的,这种统计遵从泊松过程<sup>[9]</sup>.量子噪声电流的均方值与光电流  $i_p$  的平均值成正比,即

$$i_q^2 = 2ei_p BM^2 F(M), \quad (11)$$

式中  $F(M)$  是与雪崩过程的随机特性有关的噪声系数,实验测得  $F(M) \approx M^x$ ,  $x$  在 0—1 之间,并依赖于材料.对于 PIN 和 MSM 光电二极管来说, $M$  和  $F$  都等于 1.

本体暗电流  $i_{DB}$  是由光电二极管 p-n 结中热生成的电子与空穴引起的.雪崩光电二极管中的本体暗电流的均方值为

$$i_{DB}^2 = 2ei_{DB} BM^2 F(M) \quad (12)$$

式中  $i_{DB}$  是没有倍增时 ( $M = 1$ ) 的本体暗电流,  $B$  为带宽.

表面暗电流就是表面漏电流,它同表面的缺陷、清洁度、偏置电压大小、表面面积等参数有关,其均方值的大小为

$$i_{DS}^2 = 2ei_L B, \quad (13)$$

式中  $i_{DS}$  为表面漏电流.值得注意的是,雪崩倍增是一种体效应,表面暗电流同倍增无关.

光电接收的负载电阻  $R_L$  上产生的热噪声电流  $i_T$  的均方值为

$$i_T^2 = \frac{4kT}{R_L} B, \quad (14)$$

二极管的电容小,因而其工作频率可以很高.例如,其电容通常小于 100 pf,如果电阻为 50Ω,则这一器件很容易地获得大于 32 GHz 的带宽.

## 5 光电二极管的噪声和响应时间

光波系统中,必须将光电二极管同其后面的放大电路一起构成最佳匹配,使其能检测到尽可能微弱的光信号,同时又维持合适的信噪比.信噪比的定义为

式中  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为温度.综合上述的 (11) 式至 (14) 式,得出信噪比为

$$\begin{aligned} \frac{S}{N} &= \frac{i_p^2 M^2}{i_q^2 + i_{DB}^2 + i_{DS}^2 + i_T^2} \\ &= \frac{i_p^2 M^2}{2e(i_p + i_D)M^2 F(M)B + 2ei_L B + (4kTB/R_L)} \end{aligned} \quad (15)$$

一般说来, PIN 光电二极管组成的接收器中的噪声主要来自负载电阻的热噪声电流  $i_T$  和后面的放大器的噪声电流  $i_{amp}$ ; 雪崩光电二极管的噪声主要来自器件本身的噪声  $i_q$ ,  $i_{DB}$  和  $i_{DS}$ , 而热噪声不太重要.

光电二极管及其输出电路的响应时间主要取决于 3 个因素 (1)耗尽层中光生载流子的渡越时间; (2)耗尽层外光生载流子的扩散时间 (3)光电二极管及其有关电路的  $RC$  时间常数.耗尽层中载流子的渡越时间  $t_d$  由该层厚度  $d$  和载流子漂移速度  $v$  决定:  $t_d = d/v$ .若  $d$  为 10 μm,则典型的高速光电二极管的响应时间的极限约为 0.1 ns.在耗尽层外,载流子的扩散过程要缓慢得多,因此在器件结构设计上要尽量减少这一过程的影响.如果  $R_T$  为负载电路和其后的放大电路的总体等效电阻,光电二极管和放大器的总体电容为  $C_T$ ,那么光波接收器的带宽为

$$B = \frac{1}{2\pi R_T C_T} \quad (16)$$

显而易见,只有降低负载电阻、放大电路的电阻和分布电容才可能增大带宽.

## 6 结束语

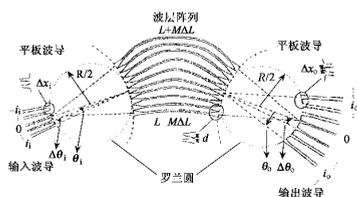
在研制高性能的光电二极管的过程中,异质结构起了关键作用.采用异质结构改善了带宽,增大了响应度,降低了暗电流.采用边耦合型的 InGaAs 多模波导光电二极管,带宽 > 40 GHz,量子效率达 68% 以上.谐振腔型光电二极管可以将吸收区作得很薄,大大缩短了载流子的渡越时间,而布拉格谐振腔又使光吸收大为增强,从而研制出了一批 InGaAsP/InGaAs, SiGe/Si 光电二极管<sup>[10]</sup>,并获得了许多好的性能.MSM 光电二极管在设计 OEIC 回路中显示出独特的优越性,为制作多功能的回路提供了便利.雪崩光电二极管以其具有内部增益而独树一帜,InGaAsP/InGaAs SAGM APD 的增益-带宽乘积高达 107 GHz,Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs APD 的增益-带宽积高达 126 GHz.随着 InGaN 蓝绿光激光器的出现,一些在可见光波段的新材料和新结构的光电探测器也陆

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Keiser G. 著,于耀明等译.光纤通信原理.北京:北京人民邮电出版社,1998.183—271[ Keiser G. Optical Fiber Communications. Academic press, 1983. Chapter 6 (in Chinese) ]
- [ 2 ] Campbell J C. Heterojunction Photodetectors for Optical Communication, Heterostructures and Quantum Devices, edited by Einspruch N G and Frensley W R. Academic press, 1994. 243—271
- [ 3 ] Wake D, Spooner T P *et al.* Electron. Lett. ,1991, 27 :1070
- [ 4 ] Jewell J L, Harbison J P *et al.* IEEE J. Quantum Electron. ,1991, 27 :1332
- [ 5 ] Campell J C. Heterostructures and Quantum Devices, edited by Einspruch N G and Frensley W R. Academic Press, 1994. 243—271
- [ 6 ] Kagawa T, Kawamura Y, Asai H *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1990, 57 : 1895
- [ 7 ] Nishida K, Taguchi K *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1979, 35 :251
- [ 8 ] Ekholm D T, Gerary T M, Hollenhorst J N *et al.* IEEE Trans. Electron. Dev. ,1988, ED-35 :2434
- [ 9 ] Oliver B M. Proc. IEEE, 1965, 53 :436—454
- [ 10 ] Li C, Yang Q Q, Wang H J. Appl. Phys. Lett. , 2000, 77 :157

### · 信息服务 ·

## 美国伦斯勒理工学院招生信息



Troy, New York, U.S.A.

August 2002

JOIN OUR GRADUATE SCHOOL IN PHYSICS

Ph. D. in Department of Physics, Applied Physics and Astronomy

Areas of research :Astronomy, Elementary Particles Physics, Origins of Life, THz Imaging, THz Electronics, Nano-Particles Physics.

Teaching, research assistantships and fellowships are available.

**Application** : <http://www.rpi.edu/dept/grad-services/>

**Information** : <http://www.rpi.edu/dept/phys/>

**Email** : [gradphysics@rpi.edu](mailto:gradphysics@rpi.edu)