

# 锗光电探测器

郭康瑾

(中国科学院上海冶金研究所)

光作为一种传递信息的媒介在科学技术中起着越来越重要的作用,而光电探测器是实现这一功能的不可缺少的器件。由于遥感、自动控制以及光纤通信等新技术的发展,对高灵敏度光电探测器的需求正在迅速增长。

锗光电探测器是发展得较早的一种半导体器件,并且为适应新技术发展的需要还在不断更新,这是因为虽然硅器件工艺相当成熟,但硅的性质决定了它的响应波长截止于 $\sim 1.1 \mu\text{m}$ ,而本征锗的截止波长 $\sim 1.7 \mu\text{m}$ ,掺杂锗的截止波长可达 $\sim 100 \mu\text{m}$ ,可制作多种有用的红外探测器件。

锗光电探测器的工作原理是基于半导体的内光电效应,它有三种工作方式:光电导效应、光生伏效应和光磁电效应。利用这三种效应都可以制成锗光电探测器,但光磁电效应锗光电探测器的实际应用有限,这里主要介绍光电导和光生伏型锗光电探测器。

## 一、锗光电导探测器

锗是一种金刚石结构的半导体,它的室温本征电阻率 $\rho_i = 47 \Omega \cdot \text{cm}$ 。当具有一定能量的光子照射半导体锗时,若光子能量 $h\nu$ 大于半导体的禁带宽度 $E_g$ ,则满带中的电子吸收了能量,跃迁到导带,产生一个自由电子和一个自由空穴,称为本征激发。锗本征光电导响应的长波限 $\lambda_c$ 由下式决定:

$$\lambda_c = \frac{h\nu}{E_g} = \frac{1.24}{E_g}$$

$\lambda_c$ 的单位为 $\mu\text{m}$ 。如果 $h\nu$ 仅大于施主能级到导带的距离或受主能级到满带的距离,就能在导带中产生电子或满带中产生空穴,这称为杂

物理

质激发,也有一个对应的长波限

$$\lambda_c = \frac{1.24}{E}$$

式中 $E$ 为杂质激活能,它随掺杂剂的不同而不同。由于杂质激活能远小于它的禁带宽度,所以杂质光电导的长波限远大于本征光电导的长波限。

半导体中入射光辐射所激发的电子或空穴在进入导带或满带后,与带中原有的热平衡电子或空穴没有什么区别。这种新增加的载流子称为“光生载流子”,由此而增加的电导率叫做“光电导”。利用这种光电导效应做成的探测器叫光电导探测器,它是在块状或薄膜状半导体两端做上欧姆接触而成。由于其电阻值随入射光的强弱而变,所以又叫光敏电阻。锗光电导探测器的结构示于图1。

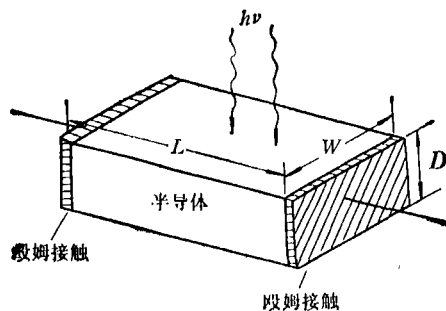


图 1

光电导探测器的功能参数有:光电导增益、暗电流、探测率及光谱响应等。在稳态条件下,如果锗光电导探测器的厚度 $D$ 远大于光的透射深度 $(1/\alpha)$ ,则单位体积中载流子的产生率为<sup>[1]</sup>

$$G = \frac{n}{\tau} = \frac{\eta(P_{\text{opt}}/h\nu)}{WLD}$$

式中  $P_{opt}$  为人射光功率,  $\eta$  为量子效率,  $\tau$  为载流子寿命,  $n$  为载流子密度。

光电导探测器的增益

$$I_p/I_{ph} = \tau/t_r,$$

式中  $I_p$  为电极间实际流动的电流,  $I_{ph}$  为探测器吸收光子后所产生的原始电流,  $t_r$  为载流子在电极间的漂移时间。

如果投射到探测器上的光辐射功率所产生的信号电压正好等于探测器本身的噪声电压, 则这个辐射功率就称为“噪声等效功率”, 记作  $NEP$ 。它的大小依赖于探测器的光敏面积  $A$  和放大器的带宽  $\Delta f$ 。为评定不同结构参数和来源的探测器的性能, 我们定义

$$D^* = \frac{1}{NEP/\sqrt{A\Delta f}}$$

为探测器的探测率, 它是探测器的又一个重要功能参数。它表示: 当探测器具有单位面积, 放大器带宽为 1Hz 时, 单位功率的辐射所能获得的信噪比, 单位为  $cm \cdot Hz^{1/2}/W$ 。这个参数与探测器的光敏面积和放大器带宽无关, 它的数值愈大, 探测器的性能愈好。

锗光电导探测器的工作波段约为 1—100  $\mu m$ , 在国防和国民经济建设中用途甚广。它可用于音速试验装置中探测飞机或导弹表面的疲劳裂缝, 能迅速、实时地探测缺陷的位置和范围; 用于  $CO_2$  激光外差辐射计中, 可遥测大气污染; 可制成光电起爆装置作为导弹的红外引信; 在快速红外扫描显微镜中, 用于探测集成电路中半导体元件的电学等物理特性。此外, 在天文学研究中可探测宇宙空间的红外辐射, 为飞行器作大气晴空湍流的探测和预报等。几种

表 1 几种光电导探测器的特性

材料	响应波长 ( $\mu m$ )	量子效率	响应时间 (s)	探测率 $D^*$ ( $cm \cdot Hz^{1/2}/W$ )
Ge: Au	3—9	0.2—0.3	$3 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^9$
Ge: Hg	6—14	0.62	$1.6 \times 10^{-9}$	$6 \times 10^9$
Ge: Cd	11—20		$10^{-7}$	$4 \times 10^{10}$
Ge: Cu	12—27		$1.3 \times 10^{-7}$	
Ge: Zn	20—40		$2 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{10}$
Ge: B	70—130		$10^{-7}—10^{-8}$	$7 \times 10^{10}$

光电导探测器的特性列于表 1<sup>[2]</sup>。

## 二、锗光伏探测器

光生伏特效应就是半导体材料吸收光能后在 PN 结产生电动势的效应。光伏探测器由对光照敏感的 PN 结构成, 常见的有三种形式: PN 结光电探测器、PIN 光电探测器和雪崩光电探测器。

### 1. 锗 PN 结光电探测器(又称光电二极管)

这种器件主要由一个 PN 结构成, 它内部有一个高电场的耗尽区。在光照下, 如果光子能量大于禁带宽度, 半导体中的原子因吸收光子能量而受到激发, 则在 PN 结势垒区及其附近就会产生电子-空穴对。这些非平衡载流子只要运动到 PN 结的边界便马上被 PN 结强大的内建电场所分离, 结果, 在 N 区边界积累非平衡电子, P 区边界积累非平衡空穴, 产生一个与平衡 PN 结内建电场方向相反的光生电场, 这样在 P 区和 N 区间就建立了光生电动势。图 2 表示了 PN 结光电探测器的工作原理。

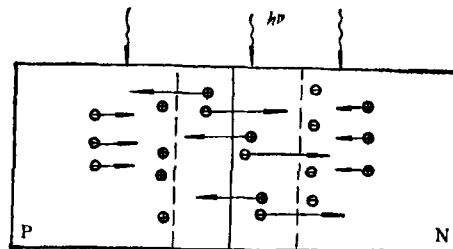


图 2

通常, PN 结光电探测器工作在所谓光电导模式, 即在 PN 结上加有一定的反向偏压。它的优点是器件响应速度快, 稳定性好和动态范围大。锗 PN 结光电探测器的主要功能参数如下。

(1) 量子效率或响应度 量子效率就是每个人射光子所激发产生的载流子数, 可表示为

$$\eta = (I_p/q)/(P_{opt}/h\nu),$$

式中  $I_p$  为光电流,  $P_{opt}$  为人射光功率。

响应度是单位入射光功率所产生的光电流, 它和量子效率有如下关系:

$$R = I_p/P_{opt} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta \lambda}{1.24}$$

(2) 响应时间 响应时间受载流子进入耗尽区前的扩散时间、在耗尽区中的漂移时间和PN结电容三个因素的限制。一般, PN结光电探测器的耗尽区较薄, 响应时间主要由少子向耗尽区的扩散时间决定。

(3) 噪声 探测器中的光电流 ( $I_p$ )、背景辐射引起的电流 ( $I_b$ ) 以及耗尽区中热激发引起的暗电流 ( $I_d$ ) 的随机起伏引起了散粒噪声。而探测器的结电阻 ( $R_j$ )、外部负载电阻 ( $R_L$ ) 以及下一级放大器的输入电阻 ( $R_i$ ) 引起了热噪声。对一个平均功率为  $P_{opt}$  的调制信号, 探测器的信噪比可表达为<sup>[1]</sup>

$$S/N = \frac{\frac{1}{2} (q\eta P_{opt}/h\nu)^2}{2q(I_p + I_b + I_d)B + 4kTB/R_{eq}}$$

式中  $1/R_{eq} = 1/R_j + 1/R_L + 1/R_i$ ,  $B$  为带宽。

## 2. 锗 PIN 光电探测器

PIN 光电探测器和 PN 光电探测器的区别, 主要是在 P 区和 N 区之间有一层高阻的 I 区。由于在适当的反向偏压下这高阻区是耗尽区, 并且光吸收基本在高阻区中实现, 因此 PIN 光电探测器不但量子效率较高, 且响应速度较

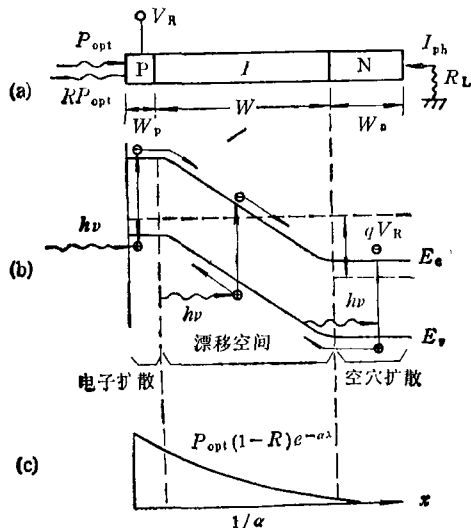


图 3

(a) 结构示意图; (b) 能带图; (c) 光吸收图

快。PIN 光电探测器的结构和工作原理示于图 3。

锗 PIN 光电探测器的参数与 PN 结探测器相似, 这里主要考虑它的响应时间和反向电流。

(1) 响应时间 影响 PIN 光电探测器响应时间的三个因素和 PN 结光电探测器的相同。但是, 因为 PIN 探测器中光吸收区就是耗尽区, 且结电容较小, 所以响应时间主要由载流子通过耗尽区的漂移时间决定, 即

$$t_{drift} = W/v_{sat}^{[3]}$$

式中  $W$  为耗尽区宽度,  $v_{sat}$  为载流子漂移的饱和速度。

(2) 反向电流 探测器的反向电流是指它的暗电流, 主要由扩散电流、产生电流和表面漏电流组成。其中, 扩散电流密度为

$$J_d = -q \left( \frac{D_n n_{p0}}{L_n} + \frac{D_p P_{N0}}{L_p} \right)$$

耗尽区中产生电流密度为  $J_g = qW \frac{n_i}{2\tau}$ 。室温

下锗 PN 结扩散电流的典型值为

$$J_d \sim 10^{-6} \text{A/cm}^2,$$

而产生电流密度的典型值为  $J_g \sim 10^{-9} \text{A/cm}^2$ 。

一般说来, 反向电流主要由扩散电流决定。由于锗本身没有性能优良的自身钝化介质, 所以表面漏电也是反向电流增大的重要原因。

## 3. 锗雪崩光电探测器

雪崩光电探测器是一种具有内部放大作用的半导体器件。当入射光子被吸收并产生电子-空穴对后, 这些载流子在渡越耗尽区时被加速而获得足够的能量。它们碰撞晶格, 使之电离, 产生二次电子-空穴对。然后, 这些二次电子-空穴对又被加速, 产生更多的电子-空穴对。这样就获得了一个光电流增益, 称为雪崩倍增, 它的物理过程示于图 4<sup>[4]</sup>。雪崩光电探测器不仅有较高的增益, 且响应速度快, 是一种理想的高灵敏度探测器。

倍增因子是雪崩光电探测器的重要参数。它定义为总的输出电流  $I$  与初始电流  $I_p$  之比。总的输出电流等于倍增光电流  $I_m$  与倍增电压

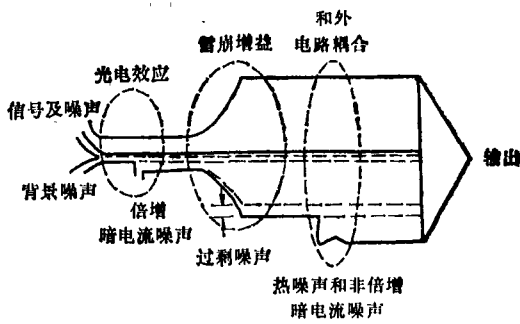


图4 雪崩光电探测器中的物理过程

下的暗电流  $I_{md}$  之和。初始电流等于低压下光电流  $I_0$  和这时的暗电流  $I_{d0}$  之和。因此，倍增因子<sup>[5]</sup>

$$M = \frac{I}{I_p} = \frac{I_m + I_{md}}{I_0 + I_{d0}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{V - IR}{V_b}\right)^n},$$

式中  $R$  为串联电阻与空间电荷区电阻之和， $V_b$  为击穿电压， $V$  为外加电压， $n$  为常数。

雪崩光电探测器中的噪声与器件的体漏电流、光电流等有关。倍增以后的噪声电流均方值为

$$\overline{i_n^2} = 2q[I_{d0} + (I_0 + I_b + I_d)M^{2+\alpha}] \cdot B,$$

式中

$$M^\alpha = F = M \left[ 1 - \left(1 - \frac{1}{K}\right) \left(\frac{M-1}{M}\right)^2 \right],$$

称为过剩噪声。在半导体锗中， $K \approx 1$ ， $F \approx M$ ，散粒噪声电流的均方值随  $M^3$  而变化。

光伏型锗光电探测器一般可工作在  $0.5 - 1.7 \mu\text{m}$ 。由于在  $1.0 - 1.7 \mu\text{m}$  波段硅器件不能工作，所以锗光电探测器更是一种不可缺少的重

要器件了。通常，PN 结光电探测器用于制作  $0.5 - 1.7 \mu\text{m}$ ，尤其是  $1.0 - 1.7 \mu\text{m}$  波长的光功率计；也可用于  $1.3 \mu\text{m}$  和  $1.5 \mu\text{m}$  激光器、发光管输出特性的测量装置和老化考核装置中作为检测元件。而 PIN 光电探测器和雪崩光电探测器，由于它们响应速度快，量子效率高，是  $1.3 \mu\text{m}$  和  $1.5 \mu\text{m}$  长波长光纤通信系统中光接收机的关键元件，它可将数字或模拟光信号变为电信号，广泛地用于长途和市内电话通信系统，电缆、电视传输系统；用于在强电磁场中或接近强电磁场的区域传输信号，向高压线输送信号或耦合出信号；在飞机、导弹和军舰上安装光纤数据传输系统或控制系统作为内部的通信联络和操作控制。这样的系统不但重量轻、体积小，而且不受核爆炸闪光和核脉冲效应的影响<sup>[6]</sup>。此外，还用于色度计、瓦斯报警装置以及激光测距等仪器装备中。几种光伏型锗光电探测器的特性列于表 2。

#### 参 考 文 献

- [1] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons Inc., New York, (1981).
- [2] P. T. Arecchi and E. O. Schulz-DuBois, Laser Handbook, North-Holland, (1972).
- [3] J. Wilson and J. F. B. Hawkes, Optoelectronics, Prentice-Hall International Inc., London, (1983).
- [4] R. K. Willardson and A. C. Beer, Semiconductors and Semimetals, Vol. 12, Academic Press, New York, (1977).
- [5] 王家骅等，半导体器件物理，科学出版社，(1983)。<sup>†</sup>
- [6] F. M. Mims III, Optoelectronics, Indianapolis, Indiana, (1975).
- [7] Optoelectronics Data Book, Vol. 30, Book 20, Aug. (1985).

表 2 几种光伏型锗光电探测器的特性<sup>[7]</sup>

名 称	暗电流	响 应 度 (A/W)	面 积 (in) <sup>2</sup>	响 应 时 间	电 容 (pF)	光 谱 范 围 ( $\mu\text{m}$ )
CG4100	1.0nA	0.4	$6.2 \times 10^{-6}$	1.0ns	1.4	1.0—1.6
CG4000	1.5nA	0.4	$12 \times 10^{-6}$	1.0ns	3.0	1.0—1.6
L4520	10 $\mu\text{A}$	0.5	$47 \times 10^{-6}$	100ps	5	1.0—1.8
FLD13R13WX	15 $\mu\text{A}$				10	1.3
7461	16 $\mu\text{A}$	0.2	0.8	50ns	28	0.9—1.9
E7460	6pA	0.7	0.8	150ns		0.4—2.0
FPD-150M	50nA	$\eta = 0.75$				
Ge n <sup>+</sup> -p	20nA	$\eta = 0.5$		120ps	0.8	0.4—1.55
Gen <sup>+</sup> np	1 $\mu\text{A}$	$\eta = 0.8$	$\phi 150 \mu\text{m}$	$f_T = 500 \text{MHz}$		