

高等学校教材

固体摄像器件 的物理基础

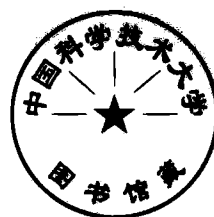
刘继琨

电子科技大学出版社

高等学校教材

固体摄像器件的物理基础

刘继琨 编



电子科技大学出版社

• 1989 •

内 容 简 介

本教材系统地叙述固体摄像器件的物理基础、器件结构设计、工作原理和性能参数，同时也简略介绍了器件的制造工艺技术。最后一章论述了红外焦平面阵列技术，它是固体摄像器件重要的应用和发展，也是当今高技术研究的重要课题。

本教材主要适用于电子物理与器件专业及其他有关专业的本科生和研究生使用，对于研制和使用固体摄像器件的科技工作者也是一本很有益的参考书。

高等学校教材 固体摄像器件的物理基础

刘继琨 编

*

电子科技大学出版社出版
(中国成都市建设北路二段四号)
四川省平武县印刷厂印刷
四川省新华书店发行

*

开本787×1092 1/16 印张15 字数339千字
版次 1989年12月第一版 印次 1989年12月第一次印刷
印数 1—1800册
中国标准书号 ISBN7-81016-153-9/TN·43
(15452·75) 定价: 3.00元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材1986~1990年编审出版规划,由电子物理与器件编审委员会电子物理与器件编审小组征稿,推荐出版,责任编委张兆镗。

本教材由电子科技大学刘继琨编写,机械电子工业部13所由中强担任主审。

本课程的参考学时数为60学时。主要讲授固体摄像器件的物理基础、基本结构和性能参数,器件的制造工艺只作简略的介绍。最后一章还概括地介绍了正在蓬勃发展的焦平面红外阵列器件。

固体摄像器件发展成为实用的器件,只有十多年的历史。尽管性能尚不够完善和理想,与真空摄像器件相比尚有些差距,但它在军事、新闻、科研等领域的应用已显示出很大的优势。况且,固体摄像器件正处于日新月异的发展阶段,新概念、新结构、新工艺的器件不断研制出来,已经研制出高分辨率、高性能的器件,大有取代真空摄像器件之势。

正由于固体摄像器件处于高速度发展时期,研制工作十分活跃,要编写一本能够完整反映这种状况的教材是十分困难的。而且,许多名词术语尚不统一,一些性能参数也无确切的定义,这也给编写工作带来困难,因此本教材算是初步的尝试。

本教材除了作为高等院校电子物理技术专业本科生和研究生教材外,也可供从事固体摄像器件研制、使用及其他有关科技人员参考。

本教材在编写过程中,由中强同志提出了许多宝贵意见,机械电子工业部44所9室和1室的同志也提供了有益的建议,这里表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,肯定会有许多缺点和错误之处,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

一九八九年十月于成都

目 录

第一章 固体摄像器件的物理基础(一)——光敏元的光电特性	(1)
§ 1.1 半导体的光吸收	(1)
1.1.1 本征吸收	(2)
1.1.2 杂质吸收	(4)
§ 1.2 半导体光敏元的性能参数	(6)
1.2.1 响应度和量子效率	(6)
1.2.2 响应时间	(7)
1.2.3 噪声	(7)
1.2.4 光谱特性	(8)
§ 1.3 光电导效应及光电导体	(9)
1.3.1 本征光电导	(10)
1.3.2 杂质光电导	(16)
§ 1.4 光电二极管	(19)
1.4.1 p - n 结的光生伏特效应	(20)
1.4.2 p - n 结光照稳态情况	(21)
1.4.3 光谱特性及响应时间	(24)
§ 1.5 光电肖特基势垒结	(29)
1.5.1 肖特基势垒高度	(29)
1.5.2 肖特基势垒中载流子的输运	(30)
1.5.3 肖特基势垒响应率	(33)
§ 1.6 MOS电容器光敏元	(34)
参考文献	(36)
第二章 固体摄像器件的物理基础(二)——自扫描系统特性	(37)
§ 2.1 MOS物理性质	(37)
2.1.1 稳态情况	(37)
2.1.2 瞬态情况	(47)
2.1.3 界面陷阱电荷(界面态)	(51)
2.1.4 深耗尽下自由载流子的复合和产生	(54)
2.1.5 存储时间	(56)

§ 2.2 耗尽层耦合.....	(59)
§ 2.3 电荷转移.....	(60)
2.3.1 电荷转移原理.....	(60)
2.3.2 转移效率 η 和转移损失率 ϵ	(62)
2.3.3 界面态对转移损失率的影响.....	(69)
2.3.4 胖零工作模式.....	(72)
2.3.5 转移损失率的测量方法.....	(73)
2.3.6 器件的频率特性.....	(74)
§ 2.4 埋沟电荷耦合器件.....	(75)
2.4.1 耗尽型MOS电容器.....	(75)
2.4.2 埋沟CCD的结构、工作原理及特性.....	(78)
2.4.3 影响埋沟CCD转移效率的因素.....	(81)
2.4.4 高速大容量的埋沟器件.....	(83)
2.4.5 埋沟CCD与表面沟道CCD的比较.....	(85)
参考文献.....	(85)
第三章 电荷耦合器件的结构.....	(86)
§ 3.1 转移电极结构.....	(86)
3.1.1 三相CCD.....	(86)
3.1.2 二相CCD.....	(89)
3.1.3 四相CCD.....	(91)
3.1.4 虚相CCD.....	(91)
§ 3.2 转移沟道的横向界限.....	(93)
§ 3.3 信号输入结构.....	(94)
3.3.1 动态电流注入法.....	(94)
3.3.2 二极管截止法.....	(94)
3.3.3 电势平衡法.....	(95)
§ 3.4 信号输出结构.....	(96)
3.4.1 电流输出.....	(96)
3.4.2 浮置扩散放大器输出 (FDA)	(97)
3.4.3 浮置栅放大器输出 (FGA)	(99)
3.4.4 分布浮置栅放大器输出 (DF GA)	(101)
参考文献.....	(101)
第四章 电荷耦合器件的制造工艺.....	(102)
§ 4.1 硅的热氧化技术.....	(102)
§ 4.2 掺杂技术.....	(104)
4.2.1 热扩散掺杂技术.....	(105)

4.2.2 离子注入掺杂技术	(105)
§ 4.3 多晶硅、氮化硅生长技术	(108)
§ 4.4 光刻技术	(109)
§ 4.5 布线工艺	(110)
4.5.1 铝栅工艺	(110)
4.5.2 硅栅工艺	(111)
4.5.3 几种多晶硅电极工艺的比较	(112)
§ 4.6 器件制造工艺流程示例	(114)
参考文献	(115)

第五章 固体摄像器件 (116)

§ 5.1 电荷耦合摄像器件	(116)
5.1.1 线型摄像器件	(116)
5.1.2 面型摄像器件	(124)
§ 5.2 X-Y寻址方式固体摄像器件	(134)
5.2.1 电荷注入器件 (CID)	(134)
5.2.2 MOS型摄像器件	(140)
§ 5.3 电荷驱动型摄像器件 (CPD)	(144)
5.3.1 结构与工作原理	(145)
5.3.2 器件特性	(146)
§ 5.4 叠层型固体摄像器件 (PLOSS结构)	(147)
5.4.1 ZnSe-ZnCdTe膜叠型器件	(148)
5.4.2 a-Si:H膜叠型器件	(149)
§ 5.5 外围电路的集成化	(151)
参考文献	(152)

第六章 固体摄像器件的性能参数 (153)

§ 6.1 灵敏度	(153)
6.1.1 光谱灵敏度	(154)
6.1.2 响应的均匀性和线性	(156)
6.1.3 饱和输出信号和饱和曝光量	(158)
§ 6.2 噪声	(158)
6.2.1 散粒噪声	(158)
6.2.2 转移噪声	(160)
6.2.3 热噪声 (KTC噪声)	(163)
§ 6.3 信噪比与动态范围	(166)
§ 6.4 分辨率	(168)
6.4.1 几何形状所形成的MTF	(169)

6.4.2	转移损失引起的 MTF_T	(170)
6.4.3	扩散引起的 MTF_D	(172)
§ 6.5	暗电流.....	(173)
§ 6.6	固体摄像器件中的假信号.....	(173)
6.6.1	图象光晕效应.....	(174)
6.6.2	拖影.....	(178)
6.6.3	纹波效应.....	(179)
6.6.4	缺陷.....	(179)
§ 6.7	固体摄像器件的微光性能.....	(180)
6.7.1	微光性能分析.....	(181)
6.7.2	固体微光摄像器件的种类.....	(182)
6.7.3	延时-积分(TDI)工作模式.....	(185)
	参考文献.....	(187)
第七章	彩色固体摄像器件与彩色摄像机	(189)
§ 7.1	概述.....	(189)
§ 7.2	三片式彩色固体摄像机.....	(189)
§ 7.3	二片式彩色固体摄像机.....	(192)
§ 7.4	单片式彩色固体摄像机.....	(194)
7.4.1	滤色器结构与制作工艺.....	(194)
7.4.2	单片CCD彩色摄像机.....	(197)
7.4.3	单片MOS型彩色摄像机.....	(199)
7.4.4	单片CPD彩色摄像机.....	(200)
	参考文献.....	(201)
第八章	固体红外摄像器件	(202)
§ 8.1	概述.....	(202)
§ 8.2	红外摄像原理.....	(203)
§ 8.3	红外探测器种类和读出结构.....	(206)
8.3.1	红外探测器的种类.....	(206)
8.3.2	MIS探测器的读出.....	(207)
8.3.3	直接注入读出.....	(207)
8.3.4	交流耦合读出.....	(209)
8.3.5	具有电荷衰减、背景减除和抗光晕控制的读出结构.....	(210)
§ 8.4	探测器的性能参数.....	(211)
8.4.1	响应度.....	(211)
8.4.2	等效噪声功率.....	(211)
8.4.3	探测率.....	(212)

8.4.4 响应波段、峰值波长与截止波长.....	(212)
8.4.5 频率响应.....	(213)
§ 8.5 本征焦平面阵列.....	(213)
§ 8.6 非本征焦平面阵列.....	(217)
§ 8.7 肖特基势垒阵列.....	(220)
§ 8.8 混合FPAs.....	(223)
§ 8.9 红外焦平面阵列的发展趋势.....	(225)
参考文献.....	(226)

第一章 固体摄像器件的物理基础 (一)

——光敏元的光电特性

固体摄像器件主要由两部分组成：光敏元和扫描器（电路），如电荷耦合固体摄像器件就是由光电二极管作为光敏元，电荷耦合器（CCD）作为自扫描器。本章将要讨论光敏元的光电特性，它对于固体摄像器件的性能和参数起着重要作用，因为固体摄像器件的几个主要参数，如灵敏度、分辨率、信噪比等无不与光敏元的特性有关。现在的固体摄像器件所采用的光敏元种类主要有：光电导体、MOS电容器（MOS二极管）、 $p-n$ 结光电二极管和肖特基势垒光电二极管。这些光敏元与扫描器可以组合成多种类型的固体摄像器件。

对固体摄像器件的光敏元总的要求是，响应率高（灵敏度高），即在相同数量的光子作用下，转换成电信号的能力强；响应快和噪声低也是光敏元应具备的特性。根据应用要求不同，光敏元应具备合适的光谱响应范围。这些基本要求不仅与光敏元的种类、结构和特性有关，而且与使用的材料参量有关。对实际器件的研制生产需要综合考虑这些基本要求。

本章开始将简要讨论半导体光吸收性质以及光电器件的一般参数，作为讨论各种光敏元的预备基础知识。而后分节讨论各种光敏元的光电特性，其中以光电二极管作为重点内容。本教材是假定读者已熟悉光学、半导体物理和半导体器件的一般内容，因而在教材中有些公式和概念就直接引用，而不再推导演算和解释了。

§ 1.1 半导体的光吸收

当光入射到半导体薄层时，一部分被反射，另一部分透过，其余部分被半导体吸收。光吸收可以用吸收系数 α 描述， α 定义为一定波长的光沿传播路径的强度 I 的衰减率。吸收过程的基本方程：

$$\frac{dI}{dx} = -\alpha I \quad (1.1)$$

一般认为 α 与光强度无关，因而光强度因材料吸收的衰减满足指数规律：

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (1.2)$$

式中 I_0 是入射光强度， $I(x)$ 是距离半导体表面 x 处的光强度。由(1.2)式可知，当光强度减小到初始值的 $1/e$ 时，光所经过的距离称为光的有效透入深度，其值等于 α^{-1} 。所以 α 越大则表示吸收越强烈，光子透入深度浅。 α 是光波波长的函数，取决于半导体对光的不同吸收机理。

在吸收过程中，具有一定能量的光子把电子从较低能态激发到较高的能态，这种跃

迁与半导体的能带结构直接相关。如果入射光子的能量 $h\nu$ 大于半导体的禁带宽度 E_g ，则可以激发带间跃迁，电子从价带跃迁到导带，产生自由电子，并在价带留下自由空穴。如果光子的能量小于 E_g 而接近 E_g ，则可以产生激子，引起杂质能级与有关能带之间的跃迁或杂质能级之间的跃迁。所有纯净的半导体，对于 $h\nu$ 比 E_g 低得多的光，实际上是透明的。

本节讨论半导体吸收过程，只限于对光电转换起重要作用的本征吸收和杂质吸收，它们是光电器件的工作基础。

1.1.1 本征吸收

本征吸收通常指带间吸收，其相应跃迁过程是：价带电子吸收了能量大于或等于禁带宽度的光子后，跃迁到导带，产生自由电子，并在价带留下自由空穴。因此，在本征吸收时，每吸收一个光子，就产生一个电子空穴对。由于本征吸收过程中被吸收的光子要满足

$$h\nu \geq E_g \quad (1.3a)$$

而导带是由一系列能量间隔很小的能级组成的，所以本征吸收谱是连续谱，并有本征吸收低频限或者本征吸收长波限。

$$\nu_c = E_g/h \quad (1.3b)$$

$$\text{或} \quad \lambda_c = \frac{hc}{E_g} \approx \frac{1.24}{E_g (\text{eV})} (\mu\text{m}) \quad (1.3c)$$

式中 c 为光速， h 为普朗克常数，其值为 $4.1357 \times 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{s}$ 。

本征吸收过程中常伴有声子的发射或吸收。在有声子参与的情况下，能量守恒和准动量守恒分别写成：

$$h\nu = E_2 - E_1 \pm E_s \quad (1.4a)$$

$$\mathbf{P} = \hbar \mathbf{K}_1 - \hbar \mathbf{K}_2 \pm \hbar \mathbf{q} \quad (1.4b)$$

其中， E_1 和 E_2 分别是跃迁前后电子所处的能级能量， E_s 是声子能量， $\hbar \mathbf{K}_1$ 和 $\hbar \mathbf{K}_2$ 分别是跃迁前后电子的动量， $\mathbf{P}$ 是光子的动量， $\hbar \mathbf{q}$ 是声子的准动量，“+”和“-”分别表示声子的发射和吸收。声子能量的数量级仅为 10^{-2}eV ，远小于跃迁前后两态的能量差，在粗略计算中可以不计；可见光子波矢绝对值的数量级约为 $10^4/\text{cm}$ ，远小于数量级为 $10^6 \sim 10^8/\text{cm}$ 的能带电子的波矢绝对值，在粗略计算中也可省去。这样，上面的(1.4a)和(1.4b)式简化为：

$$h\nu \approx E_2 - E_1 \quad (1.5a)$$

$$\mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_1 \approx \mp \mathbf{q} \quad (1.5b)$$

根据声子参与的情况，本征吸收中电子的跃迁可分为直接跃迁和间接跃迁两种类型。

直接跃迁是无声子参与的跃迁，这样(1.5b)式便成为：

$$\mathbf{K}_2 \approx \mathbf{K}_1$$

即跃迁前后电子动量近似不变，对应的初态和终态在波矢-能量曲线中近似地处于一竖直线上，如图1.1(a)所示。间接跃迁是指有声子参加的本征跃迁。按(1.5b)式所示，间接跃迁前后电子动量将发生变化，初终两态不再处于竖直线上，如图1.1(b)所

示。

与上述情况相对应，半导体也存在两种类型：直接带隙半导体和间接带隙半导体。前者导带极小值和价带极大值位于相同的波矢值（ $K=0$ ），在这种半导体中实现直接带间跃迁的几率较大。GaAs、InSb、InP、InAs等绝大部分Ⅲ-V族化合物半导体属于此类。这类半导体吸收系数的光谱曲线是连续的，具有很强的短波吸收，吸收边缘呈陡峭状态，如图1.2所示。后者导带最小值与价带最大值位于不同的波矢值。这种情况，间接带隙跃迁具有优先的几率。Si、Ge和GaP等半导体属于此类。这类半导体吸收系数的光谱曲线无陡峭的边缘，图1.2中可明显看出。图1.2中所列的Ge、Si和GaAs三种半导体在300K时的禁带宽度 E_g ，分别为0.67、1.12和1.43eV，相应的长波限分别为1.85、1.11和0.87 μm 。

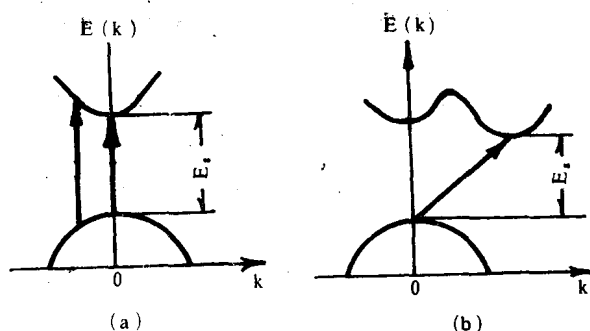


图1.1 直接跃迁与间接跃迁

硅是常用作固体摄像器的材料，如果利用本征吸收，由图1.3可见，它只能够探测一小部分近红外线。但是，硅是可见光的良好探测材料，它的探测灵敏度峰值约在0.8 μm ，响应范围延伸到0.4 μm 以下。当然，禁带比硅窄的半导体材料也能探测可见光，但是，其峰值位置一般在红外区，在可见光区的灵敏度比较小。例如，锗的灵敏度峰值在1.5 μm ，可见光的灵敏度只及硅的一半左右。

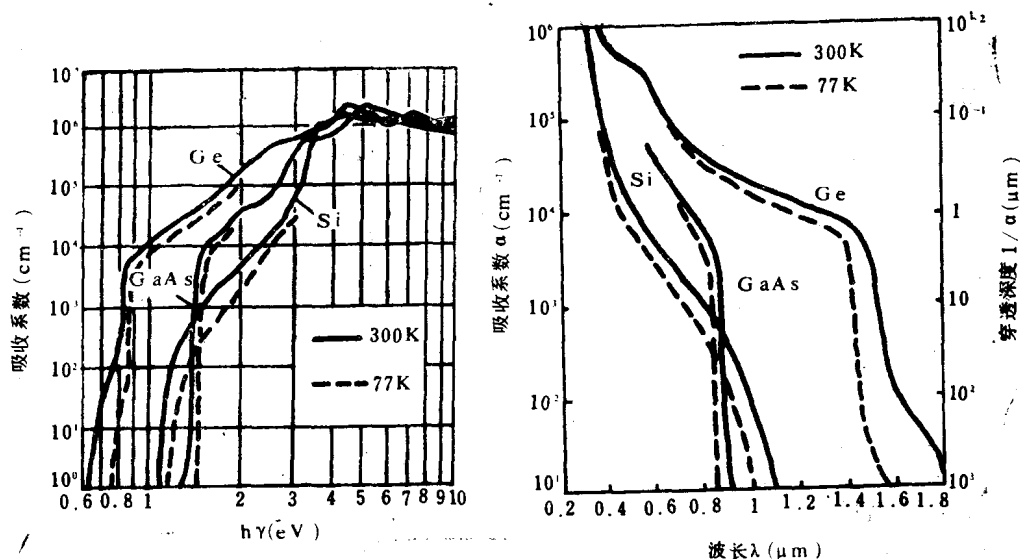


图1.2 硅、锗、砷化镓的本征吸收系数与辐射频率及波长的关系

利用本征吸收的红外探测器（ $\lambda_c=3.0\sim 13.0\mu\text{m}$ ）材料的禁带宽度应该在0.1~0.4eV范围，符合这个要求的窄带半导体材料相当多，表1.1列出某些本征半导体的 E_g 与

对应的 λ_c 关系。值得注意，表1.1中的最后两种材料的 E_g 可以调节合金成分得到不同的 E_g ，现已有一些经验公式可求出不同的 E_g 对应的合金成分比例。

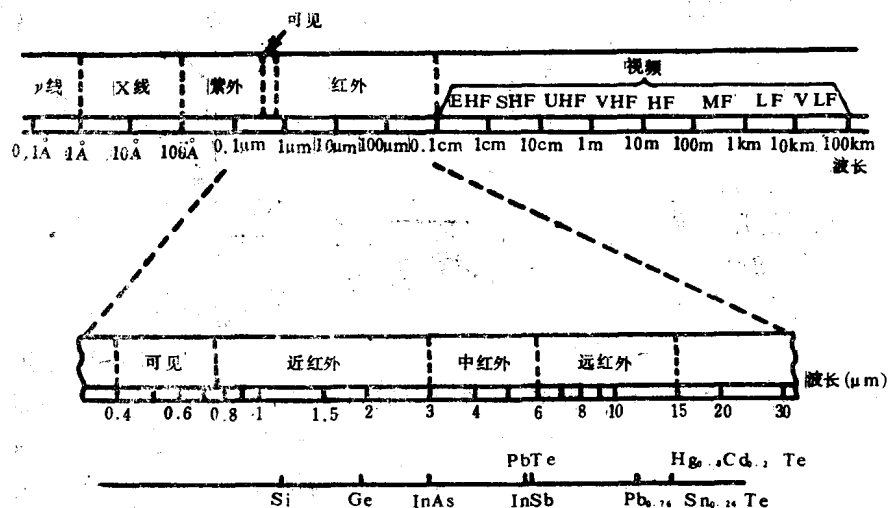


图1.3 电磁波谱和几种材料的长波限

表1.1 在所示温度下，某些半导体的 E_g 与对应 λ_c 关系

半 导 体	T (K)	E_g (eV)	λ_c (μm)
CdS	295	2.4	0.52
CdSe	295	1.8	0.69
CdTe	295	1.5	0.83
GaP	295	2.24	0.56
GaAs	295	1.35	0.92
Si	295	1.12	1.1
Ge	295	0.67	1.8
PbS	295	0.42	2.9
PbSe	195	0.23	5.4
InAs	195	0.39	3.2
InSb	77	0.23	5.4
$\text{Pb}_{0.2}\text{Sn}_{0.8}\text{Te}$	77	0.1	12
$\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$	77	0.1	12

1.1.2 杂质吸收

杂质吸收是指处于杂质能级中的电子与空穴也可以引起光的吸收。电子吸收光子，会从杂质能级跃迁到导带，而价带中的电子吸收光子会跃迁到杂质能级，在价带中留下空穴。杂质吸收所产生的光生载流子或是空穴，或是电子，不象本征吸收使电子空穴成对产生。图1.4说明了这种情况。

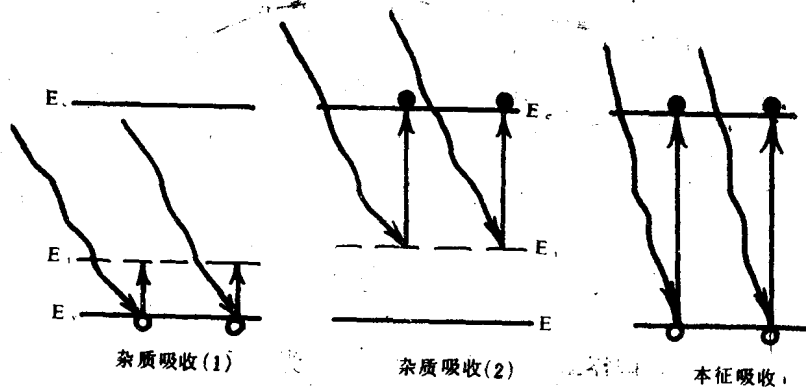


图1.4 杂质吸收与本征吸收的比较

杂质吸收引起的跃迁，光子的能量不应小于杂质的电离能。因此，杂质吸收也存在一个长波限为：

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_i} = \frac{1.24}{E_i (\text{eV})} (\mu\text{m}) \quad (1.6)$$

由于杂质电离能比禁带宽度 E_g 小，所以这种吸收出现在本征吸收限以外的长波区。表1.2列出了锗和硅中杂质的电离能 E_i 与长波限 λ_c 的关系。

表1.2 锗和硅中电离能 E_i 和长波限 λ_c

半导体:杂质	E_i (eV)	λ_c (μm)
Ge:Au	0.15	8.3
Ge:Hg	0.09	14
Ge:Cd	0.06	21
Ge:Cu	0.041	30
Ge:Zn	0.033	38
Ge:B	0.0104	120
Si:In	0.155	8
Si:Ga	0.0723	17
Si:Bi	0.0706	18
Si:Al	0.0685	18
Si:As	0.0537	23
Si:P	0.045	28
Si:B	0.0439	28
Si:Sb	0.043	29

从(1.6)式可知，杂质电离能 E_i 决定于引入杂质的选择，这意味着，我们可以得到，至少在原理上能得到一种材料，它对任意长的辐射波长灵敏，这无疑是很 有 意义

的。可惜，杂质吸收的吸收系数较本征吸收系数小，激发的光生载流子浓度也较小。原因是多数有用的杂质在基质半导体的晶格中固溶度低。

采用杂质吸收材料制造的红外探测器，为了避免热电离，都要求有足够低的工作温度。就是窄带材料制的本征红外探测器，也要求致冷工作，因为其本征载流子浓度太高。

§ 1.2 半导体光敏元的性能参数

本章前言中提到，固体摄像器件所采用的各种光敏元有共同的要求，实际上就是光敏元的一般性能参数。我们可以用这些参数比较光敏元品质的优劣和指导具体的光敏元应用工作。本节介绍这些参数的定义及一些有关知识。

1.2.1 响应度和量子效率

(一) 响应度

响应度 R 定义为均方根光电流 I_L 或均方根光电压 V_L 与入射的均方根功率 P 之比，即

$$R = I_L / P \quad (\text{A/W}) \quad (1.7a)$$

或

$$R = V_L / P \quad (\text{V/W}) \quad (1.7b)$$

因而响应度的意义是投射于光敏元上的单位辐射功率所产生的光电流或光电压。

测量响应度时，常用单色光源进行，并要说明入射辐射的波长 λ ，因为响应度 $R(\lambda)$ 是辐射波长的函数。但器件常应用于复色光源下，故响应度也可在复色光源下测试。这时所测的是积分响应度：

$$R = \int R_\lambda d\lambda \quad (1.7c)$$

式中 R_λ 是响应度的光谱密集度，其意义是波长 λ 处（即从 λ 到 $\lambda + d\lambda$ 范围内）单位波长内的单位辐射功率所产生的光电流或光电压，即

$$R_\lambda = \left. \frac{dR(\lambda)}{d\lambda} \right|_\lambda \quad (1.7d)$$

R_λ 的常用单位是 $\text{A}/(\text{W} \cdot \mu\text{m})$ 。在测量积分响应度时应说明所用光源及色温。例如，对红外探测器测量常用500K的全辐射体光源，而对光电二极管测量常用色温为2856K的白炽灯泡。之所以要作这种规定是因为 R 值与光源辐射功率的光谱分布有关。

(二) 量子效率

量子效率可定义为流出器件的光生电子流与入射光子流之比，即

$$\eta = \frac{I_L / q}{P / h\nu} = \frac{I_L}{P} \cdot \frac{h\nu}{q} \quad (1.8a)$$

η 是个无量纲量，其意义是单位时间内每入射一个光子所引起的流动电子数。量子效率与响应度密切相关，只需将(1.8a)式代入(1.7a)式便可看出其关系：

$$\eta(\nu) = R(\nu) \frac{h\nu}{q}$$

$$R(\nu) = \frac{q}{h\nu} \eta(\nu) = \frac{q}{hc} \eta(\nu) \cdot \lambda \quad (1.8b)$$

从(1.8b)式可知,量子效率实际上是用光的粒子性描述响应度,要提高响应度,就得提高量子效率。这一结果对于器件设计和制造具有指导意义。

我们如果将光子流 $P/h\nu$ 照射下器件中光生载流子的总产生率(即单位时间内整个器件内光生载流子的平均产生数)用 $\bar{g}$ 表示,可以将(1.8a)式改写成为:

$$\eta = \frac{\bar{g}}{P/h\nu} \cdot \frac{I_L/q}{\bar{g}} = \xi \cdot \kappa$$

其中 ξ 称为量子产额,其表达式为:

$$\xi = \bar{g} / (P/h\nu)$$

ξ 为每一个入射光子在器件中激发的光生载流子的平均数目(若光生电子空穴成对产生,则为载流子对的数目),其值不大于1。 κ 定义为

$$\kappa = (I_L/q) / \bar{g}$$

它是单位时间内流出器件的光生电子数与器件中光生载流子产生数之比,具有增益意义。运用这些关系,可以看出,对于p-n结光电二极管等无内部增益的器件, $\kappa \leq 1$,因而 $\eta \leq 1$ 。但对于象光电导器件等有电流增益的器件, κ 可大于1,因而 η 也可能大于1。鉴于“效率”大于1不符合一般习惯,所以 η 有时改称增益或光学增益。

1.2.2 响应时间

光敏器件工作于开关状态,随着信号光的脉冲频率的升高,输出的电流脉冲会发生相对于信号光脉冲的延迟和畸变。造成这种现象的原因是器件的响应速度低于光信号的变化,而响应时间就是描述响应速度的参数。

响应时间由两部分构成,辐射突然加于器件上时,器件的输出由无辐照时的值上升到相应于此辐照的稳定值时所需的时间称为上升时间;当此辐照突然除去后,器件的输出回到无此辐照时的值所需的时间称为下降时间。响应时间即为上升时间与下降时间的和。但在用脉冲测量响应时间时,其具体定义随光敏器件的不同而略有差异。

1.2.3 噪声

无辐照输入时,器件输出的均方根电压或电流叫作噪声。器件噪声包含有各种频率成分。噪声电压按频率的分布称为噪声谱。给出器件的噪声电压时,必须注明电子线路的通频带。

光敏元的类型不同,噪声与响应度的大小以及噪声与响应度的频率分布都是不同的。同种光敏元,如果工艺控制不严,其噪声、响应度以及它们的频率分布,彼此间也有出入,即具有一定的分散性或不稳定性。

通常光敏元中主要噪声有散粒噪声、热噪声、产生复合噪声、 $1/f$ 噪声等。现分别简介如下:

(1) 热噪声

热噪声是由于固体中载流子的无规则运动引起的。所有导体、半导体,无论其中有