

# 光探测器及其材料

**提要:** 以目前进展得很迅速的、用于光电交换及光通讯的光探测器为主, 就材料问题进行阐述。明确了利用光电导和光生伏打效应的探测器的特征与工作原理间的关系, 解说了各种材料的带宽、波长灵敏度、时间常数和灵敏度特性。例举了可见及近红外部分有代表性的 CdS 及 PbS 光探测器, 解释了远红外部分目前最引人注目的 CO<sub>2</sub> 激光探测器。阐述了以往一般在实验室规模中使用的 Ge 探测器以及能在更接近常温的条件下使用的、利用化合物半导体 p-n 结的探测器。

近年来光探测器的进展, 很多场合都有赖于利用新的材料。而对光探测器的各种要求在不少地方又促进了材料的进展。最近在由应用方面所提出的要求中, 注意到的首先是用于固体摄像、文字读取等方面的光电交换装置, 现在对探测器的要求之一是, 与光通讯的实用化有关、响应高频、且对长波长的光产生感应。本文试图以与这些应用有关的光探测器为主, 从材料方面进行阐述。

## 一般的光探测器

光探测器的各种特性〔(1)波长灵敏度、(2)时间常数、(3)暗电流等的噪声〕几乎是由它所使用的材料决定的(图1)。

最一般形式的光探测器有(因篇幅关系,

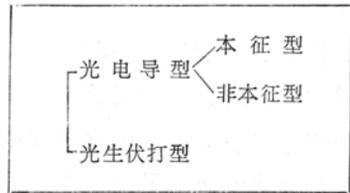


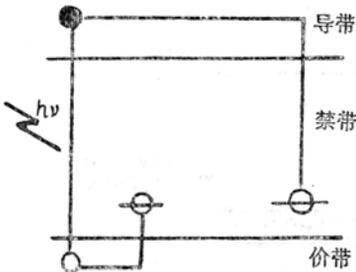
图1 主要的光探测器。

光电磁形<sup>[1]</sup>省略):

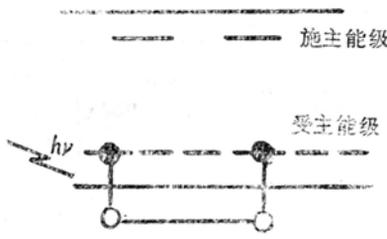
(1)光电导型(本征型)[图2(a)]

由光激发生成自由电子和空穴对。

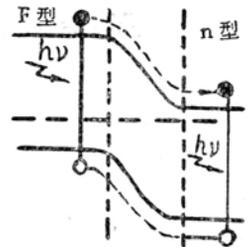
(a)波长灵敏度是从材料的带宽附近向长波长侧伸展。时间常数由所生成自由载流子中寿命较长者决定, 随着复合中心的种类和浓度的改变, 它可在很广的范围内变化。但通常要使时间常数非常小是困难的。除带宽特小者外, 暗电流不大。



a) 光电导型(本征型)。首先由光产生电子·空穴对, 一方的载流子(空穴)立刻被捕获, 接着与迟缓的长寿命的载流子(电子)复合。



b) 光电导型(非本征型)。由于光的作用, 电子从价电子带移至受主能级, 由此生成了自由载流子(空穴)。在处于受主能级的电子和自由空穴之间引起复合。



c) 光生伏打型。少数光生载流子越过结扩散, 产生电动势。少数载流子的寿命通常很短, 因复合而迅速丧失。

图2 能带模型的说明。

(2) 光电导型(非本征型)[图 2(b)]

以 p 型为例说明, 电子从价电子带激励至杂质能级, 由此生成自由空穴。如使用浅能级, 则波长灵敏度可向长波长侧远远伸展(与带宽相比)。时间常数由空穴和处于杂质能级的电子间的复合决定。如提高电子浓度, 便可得到极其快速的响应(达毫微秒量级)。由于能级浅, 容易产生热激励所引起的暗电流, 所以为了防止发生这种情况, 须在低温下使用。

(3) 光生伏打型[图 2(c)]

光激发产生的少数载流子, 在 p-n 结产生的电场的作用下加速, 由此得到光生伏打效应。波长灵敏度通常呈现在带宽或短于带宽的波长处。一般由于少数载流子的寿命

短, 所以时间常数由结电容量或渡越时间决定。通过加一逆向偏压可减小结电容量, 由此也得到了时间常数为 10 毫微秒量级的光生伏打型探测器。即使在带宽很窄的情况下, 暗电流的影响也较光电导型探测器为小。

光探测器及其材料

下面考虑一下用作探测器时有关材料的一些问题。图 3(a) 示出了主要半导体的带宽和主要光源波长之间的关系。使用光源的种类大致取决于光探测器的材料。性质相似的材料, 例如在 Ge 和 Si、CdS 和 CdSe 之间可以制作混晶, 以此有可能使带宽连续地覆盖到宽广的波长范围。在制作红外用的光

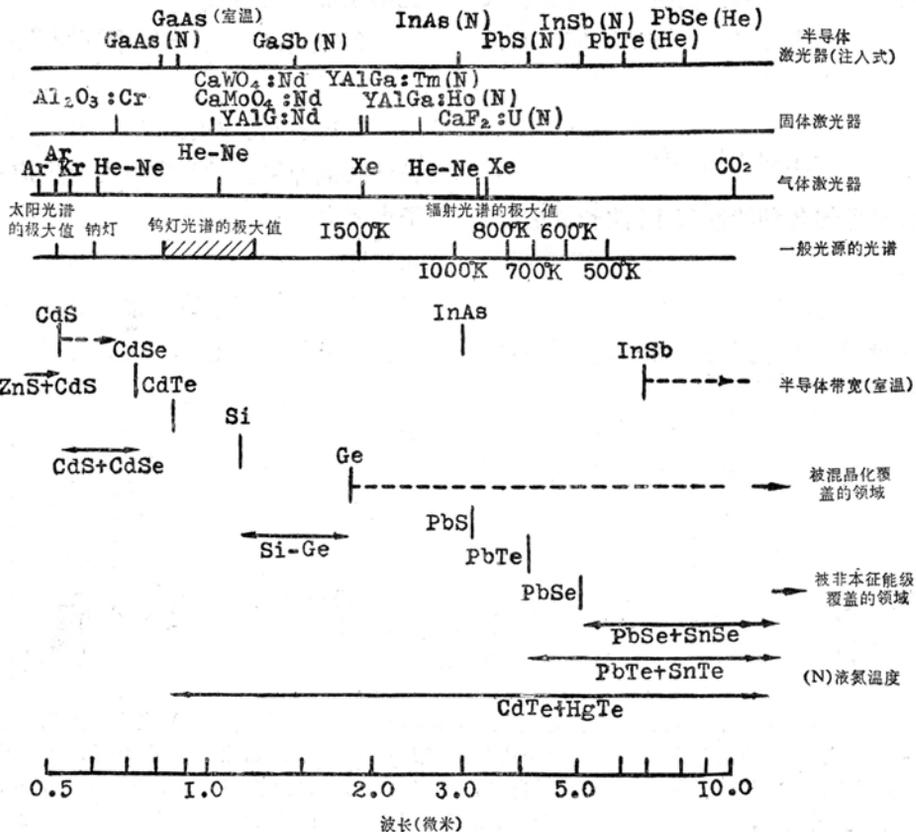


图 3(a) 主要光源的波长和半导体带宽的关系。

探测器时，这种方法特别有效。可见和近红外部分的光探测器的灵敏度示于图 3(b)。

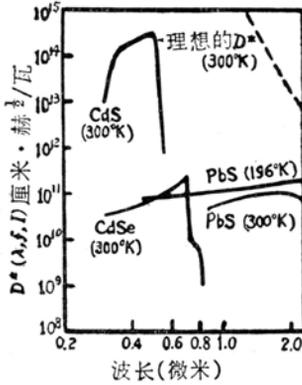


图 3(b) 主要光探测器的灵敏度。

通常取单位频率的平均噪声功率的倒数作为光探测器的灵敏度，用  $D^*$  表示，量纲是厘米·赫<sup>1/2</sup>/瓦。图 3(b) 及图 5 的虚线示出了由热干扰所决定的光探测器的理论极限值。

可见部分的代表性的光探测器将是 CdS 光电导器件。其时间常数取决于光电子的寿命，是毫秒的量级。然而在通常的读取装置中，因为要求低于 0.1 毫秒的响应，所以应用 CdS 光探测器是困难的。另一方面，在固体摄像的应用中，由于扫描时间的缘故，有着 10~100 毫秒的时间间隔，它远大于时间常数，于是不能有效地利用入射光量。为了适应这种情况，可采取一些措施，例如在空气中进行热处理，形成氧能级以增加时间常数等。

PbS (或者 PbSe、PbTe) 光电导器件是一种具有快速响应 (用 CdS 无法实现) 的探测器，时间常数是 0.1~0.01 毫秒量级，由于近红外区域是灵敏的，所以适用于上述的读取等装置中。但是，Pb 化合物的光电导膜在构造上极其复杂，有较多的不完整性，具有噪声大的缺点。最近提出了 PbS 光生伏打型的光探测器。它是将 PbS 薄膜粘附在 CdS 晶体上形成异质结。除噪声较少外，还

具有红外部分的量子效率恒定的特点<sup>[3]</sup>。这种光生伏打效应的原因，可根据从 PbS 一侧向 CdS 一侧的光电子发射加以说明。

### 应用范围宽广的探测器

从现在起到不久的将来，具有最广泛应用范围的探测器将是 Si 探测器。以固体摄像为例，它能和集成电路化的扫描电路相结合。例如，计算出存贮在 p-n 结内的电荷在扫描时间内光所引起的衰减量，就可对光强进行积分，而提高灵敏度。在最简单的情况下，可以直接使用 Si 太阳能电池作为光通讯用的探测器。但是，这里的时间常数取决于结电容量，所以不会太小。为了克服这个缺点，采用了 p-i-n 结构或者肖脱基 (在位选金属和半导体的界面间的)，或者附加大的逆向偏压以促进电子的倍增作用。涉及到光雪崩二极管的许多类型的探测器也有所研究<sup>[2]</sup>，时间常数可达到 0.1 毫微秒或低于此值。Si 光电二极管有如此丰富多彩的应用的理由在于：在材料方面，完整性好，热和电性能稳定；同时它以 p-n 结为元件的基本单元，便于成形亦易于操作。其重要性将愈益增长。但是，由图 3(a) 可知，其波长灵敏度限于可见及近红外区域的一部分，对于不在此范围的波长，必须使用其他的材料。

在波长更长的红外区域，特别感兴趣的是能探测 10.6 微米的 CO<sub>2</sub> 气体激光的光探

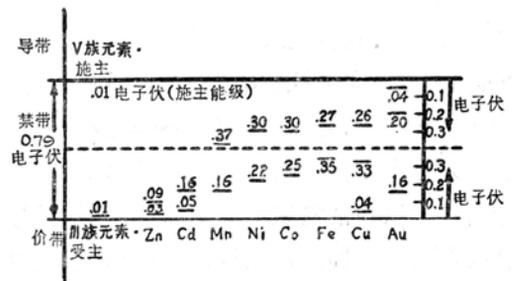


图 4 Ge 的杂质能级。

测器。这种光源具有极大的输出，而且由于在空气中的衰减小，用于光通信的可能性很大。现在广泛使用 Ge 探测器<sup>[4]</sup>。Ge 具有

如图 4 所示的杂质能级，并能得到具有各种波长灵敏度的探测器(见图 5)，在 10 微米附近可以使用 Ge : Au 和 Ge : Cu 探测器。时

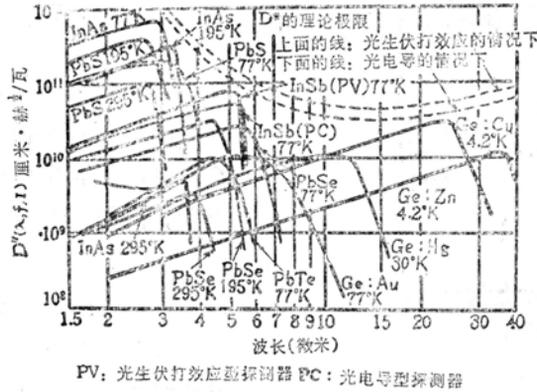


图 5 主要的红外探测器的灵敏度。

间常数通常是 1 微秒的量级，如果混入适当浓度的施主以补偿受主，便能提高复合速度，甚至可得 1~10 毫微秒量级的探测器。但是 Ge 光电导探测器的最大缺点是：由于存在暗电流，必须冷却到接近液氮温度。作为实验室用的探测器，这个缺点尚无关紧要，但在一般应用时将会因此而受到很大限制。

### 化合物半导体光探测器的材料

由于这样的原因，人们对利用化合物半导体光生伏打效应的光探测器予以相当的重视，即 PbSe、CdTe 的带宽都处在近红外部分，如能制成这些晶体和 Hg 或 Sn 的化合物(带宽几乎是 0)的混晶，则能使它的带宽大大延伸而与放射线的波长相一致。大致对 10.6 微米具有极大灵敏度的成分是  $Pb_{0.83}Sn_{0.17}Te$ 、 $Cd_{0.195}Hg_{0.805}Te$  等。通常在 p 型的化合物半导体上，作成 10~20 微米的几层，以此形成 p-n 结<sup>[5]</sup>。这些光生伏打型光探测器可以在液氮温度或干冰温度下工作，有报告表明，时间常数已达 20~200 毫微秒。但是，这些混晶的 p-n 结的逆向性能一般还

不能说是良好的，如果加一逆向偏压，往往会招致探测器温度的上升，基于这一点，对材料性能的改善尚寄予一定的期望。因此，人们希望出现对红外的长波段敏感的、能响应高频的、而且在常温或接近常温时可以工作的光探测器。要红外测辐射热计得到低于 1 毫秒的时间常数是困难的。有报告表明，人们对利用热电性能的光探测器感到兴趣<sup>[6]</sup>，这是利用了铁电体  $Sr_{1-x}Ba_xNb_2O_6$  ( $x \sim 0.3$ ) 中自激偏振伴随着温度一起变化的特性，由于输出电压和温度随时间的变化成比例，所以观察到了频率性能良好的值(30 毫微秒)。利用这种性能的光探测器，除能在常温或常温之上工作外，还可望得到与以往的光探测器有相同量级的灵敏度。

因此，为了在光生伏打或光电导现象之外，借助其他显著的物理现象制造红外波长的新型光探测器，尚有待于今后继续努力工作。

### 参考文献(略)

取自 三田陽, <エレクトロニクス>, 1969 (11 月), 14, №12, 1450~1453