

光电探测器原理及应用

雷肇棣

(西南技术物理研究所, 成都 610041)

介绍了光电与系统的组成, 阐述了光电二极管和雪崩光电二极管的工作原理及噪声问题, 对雪崩光电二极管 APD 和光电倍增管 PMT 进行了比较, 并以四象限探测器为例说明了光电探测器的应用问题.

关键词 光电子学系统, 光电探测器, 光电二极管, 雪崩光电二极管

Abstract

The principle and noise problems of photodiodes, and avalanche photodiodes (APDs) are described. The advantages and disadvantages of APDs and photomultiplier tubes are compared. A simple application example for optical detectors is given.

Key words photodetector, photodiode, avalanche photodiode

自 1960 年第一台红宝石激光器问世以来, 古老的光学发生了革命性的变化。与此同时, 电子学也突飞猛进地向前发展。光学和电子学紧密联合形成了光电子学这一崭新的学科。由此发展起来的光电子高新技术, 已深入到人们生活的各个领域, 从光纤通信, 镭射唱盘到海湾战争中的现代化武器, 都和光电子技术密切相关。而光电探测器则是光电子系统中不可缺少的重要器件。可以毫不夸大地说, 没有光电探测器件, 就没有今天的光电子学系统。

一、光电子系统的组成

现代光电子系统非常复杂, 但它的基本组成可用图 1 来说明: 待传送信号经过编码器编码后加到调制器上去调制光源发出的光, 被调制后的光由发射光学系统发送出去。发射光学系统又称为发射天线, 因为光波是一种电磁波, 发射光学系统所起的作用和无线电发射天线所起的作用完全相同。发送出去的光信号经过传输介质, 如大气等, 到达接收端。由接收光学系统或接收天线将光聚焦到光电探测器上, 光电

探测器将光信号转变成电信号。由于光信号经

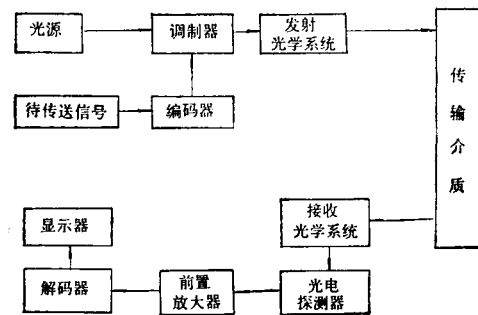


图 1 光电子系统方框图

过长距离传输后会衰减, 使接收到的信号一般很弱, 因此需要用前置放大器将其放大, 然后进行解码, 还原成发送端原始的待传送信号, 最后由终端显示器显示出来。

其实, 这种光电子系统的最基本组成在古代早已形成。例如, 烽火台就是一种最简单的光通信系统: 烽火是光源; 调制方式是点燃烽火与熄灭烽火, 这是最简单的二进制编码调制方式; 传输介质是大气; 光探测器是人的眼睛。这种古代的烽火台通信系统已包括了现代光电子系统中最基本的部分: 发射、调制、接收(眼

睛)、解调(人的大脑)。但是,这种原始的系统有许多不足和缺点:第一,传送的信息量太少,只能告诉人们有敌人(烽火燃)和无敌人(烽火灭)这两种信息,至于敌人多少,谁带领,携带什么武器,从哪个方向来等等,都无法给出;第二,传送距离太近,只能传到肉眼看得到的地方;第三,抗干扰能力差,雨雾天不能传送;第四,保密性很差,点燃烽火后,不仅自己人能看见,敌人也能看见;第五,不能进行识别,城池一旦被攻占,敌人也可根据需要点燃烽火,但自己无法识别究竟是谁点的烽火;第六,响应速度慢,从点火到火光冲天使人们能看到,没有十几分钟到半个小时是不行的,等等。现代光电子系统就是为了解决上述这些问题而设计的,因此系统变得越来越复杂。但万变不离其宗,它的基本思想都是很简单的。

二、作为眼睛的光电探测器

在光电子系统中,最关键最重要的部件是它的“眼睛”——光电探测器。人的眼睛就是一种光探测器,它非常灵敏,但也有不足之处:其一是它的光谱响应范围只限于 $0.4\text{--}0.76\ \mu\text{m}$,对于波长小于 $0.4\ \mu\text{m}$ 的紫外光和大于 $0.76\ \mu\text{m}$ 的红外光一般不能响应(这一范围就是通常说的可见光);其二是眼睛有“视觉暂留”现象,对于“高重复频率”信号不能分辨,例如电影每秒 48 幅图像,电视每秒 50 幅图像,此时,人眼就无法分辨出一幅一幅的图像,而是将它们“平滑滤波”连成一片,产生连续活动的图像;其三是眼睛不能记忆、存储、输出、显示记录的图像,在这些方面它不及光电探测器。

光电探测器种类繁多,不胜枚举。原则上讲,只要受到光照射后其物理性质会发生变化的任何材料都可用来制作光电探测器。现在广泛使用的光电探测器是利用光电效应工作的。光电效应分为两类:内光电效应和外光电效应。真空器件中的光电管或光电倍增管是利用外光电效应工作的,即入射光子打在阴极材料上,将其内部电子轰击出来形成光电流,它随

入射光强改变,从而可检测出光信号。而半导体光电器件(包括光敏电阻,光电池,光电二极管,光电三极管,雪崩光电二极管等)利用的却是内光电效应。内光电效应和外光电效应的区别在于入射光子并不直接将光电子从光电材料内部轰击出来,而只是将光电材料内部的电子从低能态激发到高能态,于是在低能态留下一个空位——空穴,而在高能态上产生一个能自由移动的电子,如图 2 所示。这样一对由入射

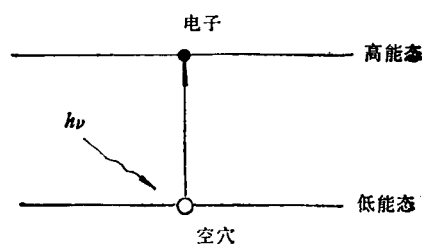


图 2 光生电子空穴对

光子所激发产生的电子-空穴对,称为光生电子空穴对。光生电子空穴对虽然仍在材料内部,但它改变了半导体光电材料的导电性能。如果设法检测出这种性能的改变,就可探测出光信号的变化。

无论外光电效应或是内光电效应,它们的产生并不取决于入射光强,而是取决于入射光波的波长 λ 或频率 ν ,这是因为光子能量 E 只和频率 ν 有关,

$$E = h\nu, \quad (1)$$

式中 h 为普朗克常数。要能产生光电效应,每个光子的能量必须足够大。光波波长越短,频率越高,每个光子所具有的能量 $h\nu$ 也就越大,因而越容易产生光电效应;反之,波长越长,频率越低,就越难产生光电效应。而光强只反映光子数量多少,并不反映每个光子的能量大小。能量 E 可采用电子伏特(eV)为单位,根据换算,具有 1eV 能量的光子,它所对应的光波波长为 $1.24\ \mu\text{m}$ 。

目前普遍使用的光电探测器是光电二极管(photo diode)和雪崩光电二极管(avalanche photo diode,简称 APD)。它们是由半导体材料制作的。在半导体中,电子不是处于单个的

分裂能级中,而是处于所谓“能带”中,一个能带内有许许多多能级,彼此靠得非常近,几乎无法分辨。能带与能带之间的能量间隙称为禁带,禁带中没有电子。电子从下往上填,被电子全部填满的能带称为满带。最高的满带叫价带。紧靠价带上面的能带叫导带,导带或是部分被电子充满,或是全部空着。内光电效应就发生在导带与价带之间(如图3所示),价带中的电

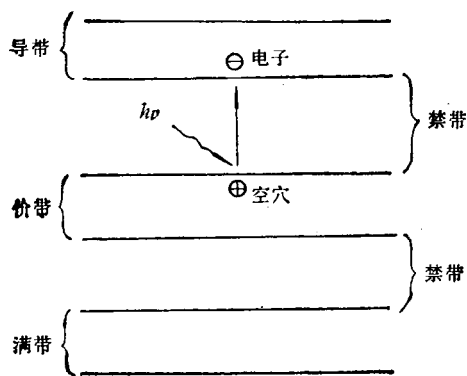


图3 半导体中的能带

子吸收了入射光子的能量 $h\nu$ 后被激发到导带中去,于是在导带中产生一个能自由运动的电子,而在价带中留下一个空穴。空穴可看成是一个带正电的载流子,和带负电的电子正好相反,空穴在价带中的能量高于在导带中的能量。和电子能够在导带内自由运动一样,空穴在价带内也能自由运动。因此,当入射光子在半导体的价带和导带中激发产生光生电子空穴对,将改变半导体的导电性能。

由半导体材料制作的光电二极管,其核心部分是 p-n 结。p-n 结是 P 型半导体和 n 型半导体结合形成的。所谓 n 型半导体是指负的半导体,其中电子浓度高于空穴浓度,而 P 型半导体则为正的半导体,其空穴浓度高于电子浓度。由于扩散作用始终是浓度高的向浓度低的方向进行,所以当 P 型半导体和 n 型半导体结合在一起时,P 区的空穴将扩散到 n 区,而 n 区的电子将扩散到 P 区,使 P 变负而 n 变正。电荷堆积在 p-n 结两侧形成一自建电场,其方向由 n 指向 p。p-n 结的自建电场阻止了电子和

空穴进一步向对方扩散而达到平衡,于是在 p-n 结区形成耗尽层。为了提高光电二极管的响应速度,我们希望光生电子空穴对的产生尽量发生在耗尽层内。因为在这一区域内一旦产生电子空穴对,电子和空穴立即被 p-n 结内强烈的自建电场分开而各自向相反方向作“漂移”运动,如图4所示。由于自建电场很强,所以电子

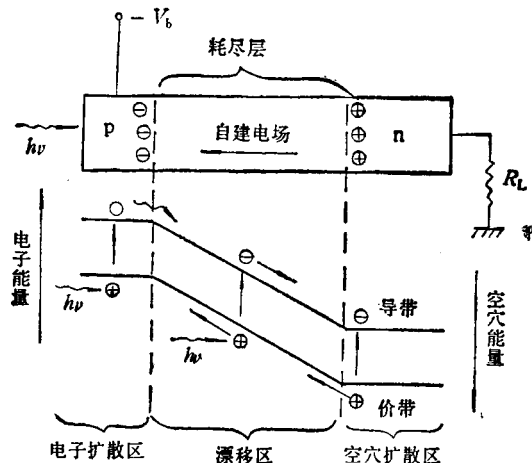


图4 光电二极管工作原理

和空穴“漂移”运动的速度很快。如果光生电子空穴对在耗尽层外部产生,由于耗尽层外不存在强烈的自建电场,电子和空穴只能靠“扩散”运动到达 p-n 结区,而扩散运动比漂移运动的速度低得多,所以将影响探测器的响应速度。为了进一步提高响应速度,在实际使用时是将光电二极管反向偏置的。即将 n 接正, p 接负,外加电场方向与 p-n 结内自建电场方向一致。这一外加电场使 p-n 结两侧的势垒差进一步加大,耗尽层宽度进一步加宽,允许更多的光生电子空穴对在高场强区产生,同时减小了二极管的结电容,从而进一步提高光电二极管的响应速度和灵敏度。为了改善和提高光电二极管的性能,通常还在 P 区和 n 区之间形成一个本征区或 i 区 (intrinsic region),构成所谓 pin 光电二极管。无论一般的光电二极管或是 pin 光电二极管,它们都没有内部增益,也就是说内部没有放大作用。

三、具有内部增益的雪崩光电二极管

雪崩光电二极管有内部增益或放大作用,一个人射光子可产生 $10\sim 100$ 对光生电子空穴,使光电流大大增加,明显地提高了光电探测器的灵敏度。雪崩光电二极管内部增益是怎样产生的呢?如前所述,在反向偏置二极管的耗尽层中,存在着相当强的电场。反向偏置电压越高,耗尽层中电场强度越大。如果耗尽层中的电场强度达到非常高时,例如,对半导体硅雪崩光电二极管(Si-APD)来说,电场强度超过 10^5V/cm 时,在耗尽层中的光生电子和空穴会被强电场加速而获得巨大的动能,它们将与其他原子发生碰撞而激发产生新的二次碰撞电离的电子空穴对。这些新产生的电子空穴对反过来又在耗尽层中被强电场加速而获得足够的动能,再一次又与其他原子发生碰撞电离而激发产生更多的电子空穴对。这样的碰撞电离一个接一个地不断发生,就形成所谓“雪崩”倍

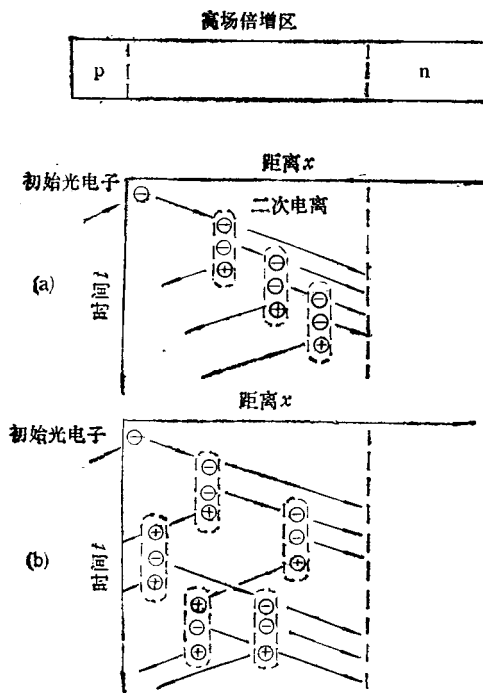


图5 雪崩光电二极管工作原理
(a) 只有电子产生电离碰撞; (b) 电子和空穴二者都参与电离碰撞

增现象,使光电流放大,如图5所示。很明显,在半导体中,不仅电子可引起这种雪崩倍增,空穴同样也会造成雪崩倍增。当所加的反向偏置电压低于某个确定电压时,即低于所谓雪崩电压时,由碰撞电离而产生的电子空穴对的总数是有限的,平均来说是正比于入射光子数或初始光生载流子数的。一个载流子(电子或空穴)穿过单位距离时,由于碰撞电离所产生的电子空穴对的平均数,称为载流子的离化率。离化率和耗尽层内的电场强度密切相关。不同的半导体材料,离化率不相同。即使在同一种半导体材料中,不同类型的载流子的离化率也是各不相同的,即电子离化率和空穴离化率是彼此不同的。

雪崩光电二极管的一个重要问题是噪声问题^[4]。除了一般光电探测器所具有的噪声之外,由于雪崩光电二极管有内部增益,因而还将引入附加噪声。这种附加噪声和雪崩管内的碰撞电离有关。理论证明,当只有一种载流子引起碰撞电离,那么雪崩光电二极管的噪声就比较低,它的增益带宽积才比较大。也就是说,或者是由电子产生碰撞电离而空穴不产生碰撞电离,或者是由空穴去产生碰撞电离而电子不产生碰撞电离,这样的雪崩光电二极管的性能才会比较好。反之,若电子和空穴这两种类型的载流子都同时引起碰撞电离,就会使附加噪声增加,增益带宽积减小,从而导致整个雪崩光电二极管器件性能下降。

很明显,要实现只有一种类型载流子产生碰撞电离,就要求半导体材料的电子离化率和空穴离化率二者的差值越大越好。由于半导体硅的电子离化率和空穴离化率二者相差较大,因此硅是制作雪崩光电二极管较理想的材料之一。除了半导体材料本身特性外,还可以在工艺结构上采取一些措施来尽量保证只有一种类型的载流子才能产生碰撞电离。例如,可以设法将雪崩管中的耗尽层分为吸收漂移区和高场倍增区。让人射光尽量在漂移区中被吸收而产生初始光生电子空穴对,然后只让其中一种类型的载流子进入高场强区域产生倍增。图6(a)所

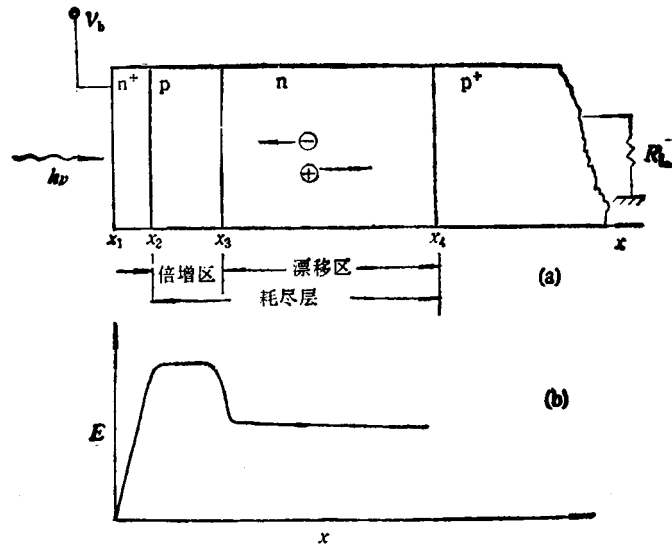


图6 达通型硅雪崩光电二极管
(a) 结构示意图; (b) 相应各区域的电场分布

示的达通型硅雪崩光电二极管就是这种结构。图6(b)是它相应各区域的电场分布。达通型硅雪崩光电二极管通常简称RAPD(reachthrough avalanche photodiode的缩写)。RAPD由 $n^+ - p - \pi - p^+$ 层组成,其中 n^+ 、 p^+ 分别表示重掺杂的n型和p型半导体, π 表示p型高阻层。在 x_1 到 x_2 之间是 n^+ 接触层。 x_2 到 x_3 是p型倍增区,雪崩倍增主要发生在这一区域。从 x_3 到 x_4 是 π 漂移区,入射光子大部分在该区域被吸收,因为 π 区比p区宽得多。 x_4 以后是 p^+ 接触区,为雪崩管的衬底。从这种 $n^+ - p - \pi - p^+$ 结构雪崩管内的电场强度分布图可以看出,在 $n^+ - p$ 靠近p区一侧电场强度最高,在低压反向偏置时,所加电压大部分降落在该 $p - n^+$ 结区上。当外加反偏压增大时,p型倍增区将随之加宽,在达通电压 V_{rt} 下,一直“拉通达到”(reach-through)近似于本征半导体的 π 区。正因为如此,所以称为“达通”型雪崩光电二极管。当超过达通电压 V_{rt} 后,外加电压将降落在包括整个 π 区的 $p - n$ 结耗尽层上。由于 π 区比p区宽得多,所以此时p型倍增区的电场随外加电压增加相对来说变化较慢,于是倍增因子的增加也相对较慢。在正常工作时,虽然 π 区电场低于 $p - n^+$ 结倍增区电场,但仍然相当高,以

便使在该区产生的光生载流子能以略低于产生二次碰撞电离的速度快速运动,这样才能保证雪崩管的快速响应。 π 区相当宽,能保证入射光绝大部分在该区被吸收,而且只有在该区产生的初始电子空穴对中的电子才能进入 $p - n^+$ 结高场倍增区去产生碰撞电离,获得增益。在 π 区产生的空穴是向相反方向运动的,不可能进入高场倍增区,从而抑制了空穴产生碰撞电离的可能性。虽然在 n^+ 区和p区由入射光子所产生的空穴也可能在高场区中发生碰撞电离,但毕竟 n^+ 和p区很窄,所以在该区产生的初始光生空穴是很少的。另外,硅的空穴离化率又比电子离化率小得多,因此,硅雪崩管的空穴在倍增过程中起的作用很小,在倍增区主要靠一种载流子,即 π 区来的电子产生碰撞电离。如前所述,当只有一种载流子产生碰撞电离时,雪崩管的响应速度就比较快,而由倍增所引入的过剩噪声也就比较小。

四、光电倍增管 PMT

对光信号能进行“放大”的另外一种光电探测器是光电倍增管,简称PMT(photomultiplier tube的缩写)。光电倍增管是一种电真空器件,

它是由光电阴极，几级打拿极 (dynode) 以及阳极组成。打拿极是一种辅助电极，起二次电子发射和电流放大作用。光电倍增管利用的是外光电效应，其工作原理如图 7 所示。当光子

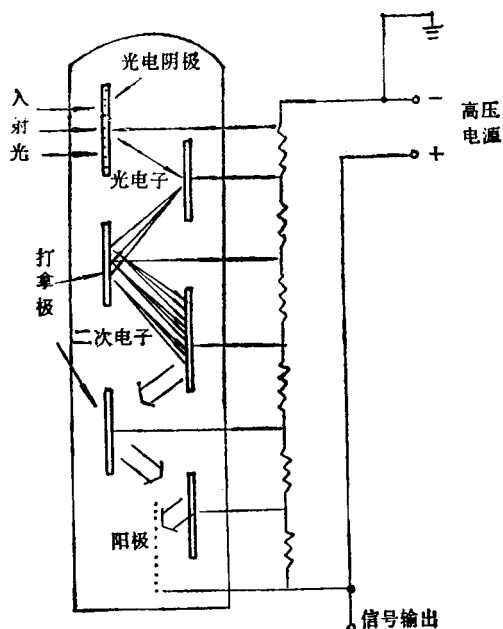


图 7 光电倍增管工作原理

入射到光电阴极表面上时，使光电阴极发射出光电子。光电子在正的静电场作用下加速，然后撞击到打拿极金属表面上，使打拿极产生二次电子发射。发射出的二次电子又被正静电场加速后撞击到下一个打拿极的金属表面，再一次产生二次电子发射，发射出更多的二次电子。如此经过几级打拿极，使二次发射电子越来越多，从而使光信号或电流得到放大，最后二次发射电子到达阳极被阳极收集，输出被放大的光电流。

光电倍增管已有 50 多年的历史，比雪崩光电二极管长得多。由于它是电真空器件而又需二次电子发射。因此，它有两点明显的缺点：一是器件的体积尺寸较大，二是工作时需要高压供电，且供电电流比所需最大光电流大 20 倍，这给使用造成极大的不方便。正因为如此，当固体雪崩光电二极管一出现，就有人断言，雪崩光电二极管 APD 将取代光电倍增管 PMT。

的确，雪崩光电二极管具有明显的优点，它体积小，重量轻，工作电压低，只需十几伏到一百伏的电压。不仅如此，而且它价格便宜，响应速度快，动态范围大，抗外部电磁干扰性能好，抗强光损伤性能也比光电倍增管好，几乎光电倍增管能做的每一件事，似乎雪崩光电二极管 APD 至今并未全部取代光电倍增管 PMT，原因何在呢？这是因为光电倍增管仍然保留有几个独特的优点：一是光电倍增管的增益很高，倍增因子可达 10^3-10^7 倍，此时仍保持相当好的信噪比，而最好的雪崩光电二极管的倍增因子则一般只有几十到 100 倍；二是光电倍增管可以探测非常微弱的光信号，甚至微弱到探测只有一个光子的光信号，这就是所谓光子计数器或闪烁计数器^[2]。而目前最灵敏的硅雪崩光电二极管 APD，对于微弱到只有几个光子的光信号就无法探测了，一般它都需要光信号中包含几十上百个光子才能进行探测。光电探测器的灵敏度，或者说它探测最微弱光信号的能力，主要是受器件本身暗电流大小的限制。所谓暗电流，是指在没有任何光照的情况下产生的电流。APD 的暗电流比 PMT 大几百倍，而探测器的噪声正比于暗电流的平方根，所以 APD 的灵敏度要比 PMT 低几十倍。或者说，PMT 最小可探测功率要比 APD 小几十倍。因此，PMT 适合于探测十分微弱的光信号。由于雪崩管 APD 的暗电流是和光敏面大小有关的，因此减小面积可降低暗电流，从而提高探测灵敏度。美国 EG&G 公司称他们已试制出直径为 $150\mu\text{m}$ 的 APD，工作电压上千伏，增益接近 10^6 ，可探测单个光子^[3]。但它毕竟是个别器件，且光敏面太小，只能用于光纤，要达到实用化可能还有相当的距离。和 APD 不一样，光电倍增管 PMT 的光敏面积可以很大，从直径小于 2.54cm 到大于 50.80cm 的都有，而一般的固体光电二极管 (PN 和 PIN) 最大的光敏面积只有几个平方厘米，对于雪崩管 APD 光敏面则更小，一般直径只能做到 1—2 毫米。当然，近年国外也有人做出直径 12.7mm 的 APD，

但价格昂贵,还有一个使人对光电倍增管 PMT 感兴趣的原因是它封装坚固,适合高温等恶劣条件下使用,例如它能承受油井钻探时地下产生的 150—200℃ 的高温。而在高温下雪崩二极管 APD 的噪声迅速增加以至无法使用。正因为这样,使光电倍增管 PMT 至今仍在光电探测器领域占有一席之地,在目前技术条件下,还不可能被固体雪崩光电二极管 APD 完全取代。特别是在核医学如 CT 扫描器中,在地质勘探如油井钻探中,在高能物理基本粒子研究中,目前仍广泛使用光电倍增管 PMT。

五、广阔的应用前景

光电探测器应用十分广泛。在光通信、光纤传感、激光测距、跟踪、制导、自动控制以及激光唱机、商品条码读出器、计算机光笔乃至游戏机的枪内等军用、民用产品中,都大量使用各种不同类型的光电探测器。现以国外一种用激光进行照明,用四象限光电探测器进行自动寻找(即寻找目标)的制导炸弹为例来简单说明一下光电探测器的应用。为了要攻击一个目标,可以在飞机上装一台激光器,用激光光束照射到该目标上,然后向该目标发射导弹。导弹的前端是一个透镜,它将照射到目标上的激光光斑成像在透镜后面的光电探测器上。这种探测器是四象限探测器。用十字叉线均匀对称地将一个圆形光敏面分成四部分,即可组成四象限探测器。因此,它实际上是由四个性能完全一致、紧密靠在一起的光电探测器 A, B, C, D 组成,如图 8 所示。如果照射到被攻击目标上激光光斑的

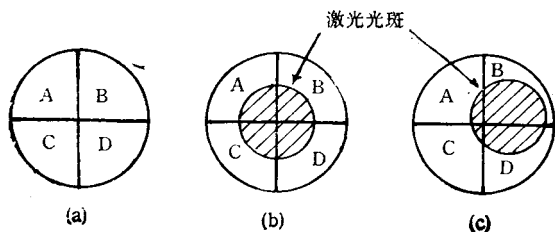


图 8 四象限光电探测器

像正好落在四象限探测器的中心,那么, A, B, C, D 四个象限探测器输出的信号(分别为 A, B, C, D)完全相等,此时有

$$\begin{aligned} (A + B) - (C + D) &= 0, \\ (A + C) - (B + D) &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

这说明导弹正好对准了目标。若导弹未对准目标,则照射到被攻击目标上光斑的像将不在四象限探测器的中心。当

$$(A + B) - (C + D) \neq 0 \quad (3)$$

时,说明上下或俯仰位置有偏差,此时会输出一误差信号去控制导弹水平尾舵,以改变它的俯仰状态,使导弹调整到对准目标。一旦目标对准后,将不会再有俯仰误差信号输出,此时

$$(A + B) - (C + D) = 0. \quad (4)$$

类似地,当导弹左右方向上未对准攻击目标时,则有左右方位误差信号输出,即

$$(A + C) - (B + D) \neq 0. \quad (5)$$

这一误差信号将被送去控制导弹的垂直尾舵以改变导弹的左右方位状态,最后使导弹在左右方向上也调整到对准目标。一旦目标对准后,又会达到

$$(A + C) - (B + D) = 0. \quad (6)$$

此时不会再有左右方位误差输出。利用这种四象限光电探测器,可以有效地控制导弹自动地不断改正自己的飞行方向,直至准确地飞向被攻击的目标。

在激光唱盘中,用两个二象限光电探测器,配合适当的光学系统,可实现激光唱盘与拾音头自动寻迹和自动聚焦,有兴趣的读者可参考文献[4],其原理和上述例子大同小异。总之,光电探测器应用十分广泛,无法也不必在此一一叙述了。

- [1] 雷肇棣,光通信技术,10-1(1986),1.
- [2] D. L. Thoman, The Photonics Design & Applications Handbook, Laurin Publishing Company, Inc. (1991), 100—101.
- [3] M. Noble, Lasers & Optronics, Sept (1991),32—39.
- [4] 雷肇棣、彭远旺,光通信技术,16-1(1992),7.