

光电检测原理及应用

中 册

秦积荣 编著

国防工业出版社



光电检测原理及应用

(中 册)

秦积荣 编著
归绍升 主审

国防工业出版社

2631/02

内 容 简 介

本书分上、中、下三册出版。上册主要介绍光电传感器的原理、组成、计算及光电检测的基本方法；中册介绍几何量和机械量的光电检测；下册介绍温度、浓度、成份等的光电检测及光电器件在其它方面的应用。

光电检测目前已广泛应用于工业各部门，它能使检测自动化、数字化、无接触化，并能与微型计算机相结合，因而在生产中将起着越来越重要的作用。

本书可供从事检测工作的工程技术人员参考，亦可作为高等院校有关专业的选修课教材。

光电检测原理及应用

(中 册)

秦 积 荣 编 著

归 绍 升 主 审

责任编辑 崔金泰

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850 × 1168 ¹/₃₂ 印张12³/₄ 335千字

1987年10月第一版 1987年10月第一次印刷 印数：0,001—4,420册

ISBN 7-118-00140-6/TP15

出版说明

秦积荣副教授从事教学数十年，有较丰富的实践经验。为编写本书，他早在六十年代初期就广泛收集了光电检测方面的素材。在十年动乱期间，他继续收集了美、日、苏各国及国内有关工厂、高等院校和科研单位在这方面的材料，并参加了某些光电检测的科研项目，从而为编著本书奠定了基础。本书初稿曾在有关院校的光学仪器、计量仪器等专业作选修课教材试用，效果较好。

在本书的审稿会上，五所院校的教师一致认为本书内容丰富全面，安排合理，层次清楚，文字通俗易懂，弥补了国内在光电检测专业书籍方面的空白。

本书对学习和研究检测技术有一定参考价值。它既可用作高等院校有关专业的选修课教材，也对高等院校、工厂有关人员进行科研和技术革新有一定参考、启发作用。

前 言

随着生产率和自动化程度的提高，在工农业和国民经济各领域中，光电检测的应用越来越广泛。近年来智能机器人的迅速发展，对电子视觉系统——光电检测提出更高的要求。然而全面和系统叙述这方面的书还很少见，因此，编著这本书，一方面可部分满足读者的急需，另一方面可借以推动光电检测技术的进一步普及和发展。

本书涉及面广，为了压缩篇幅，尽量避免与其它书的内容重复，是按下述原则取材的：

1. 力求对生产有实际的参考价值；
2. 一般书上没有涉及到的内容；
3. 由于产品和电子元件在不断更新，着重介绍各种光电检测装置的基本原理和方法；
4. 照顾到光电检测本身的完整性、系统性和理论性。

叙述力求概念清楚，文字通俗易懂。但阅读本书需具有一定的电子技术和光学的基础知识。

本书由上海交通大学归绍升教授担任主审，并有：副教授方德政、顾立簾、曹友庚、方志成、孙希鲁，讲师张志练、楼维照、叶章光、郑友琴、陈离等参加审稿。对他们提出的许多宝贵意见，在此表示谢意。在编写过程中，还得到有关领导和同志们的关心和支持，甚为感激。

由于本人水平有限，缺点和错误在所难免，敬希读者批评指正。

秦积荣 1985年5月

目 录

第二部分 光电检测装置的应用

第四章	几何量的光电检测	1
§ 4-1	光电检测几何量的基本原理及固体摄像传感器	1
§ 4-2	激光测距	13
§ 4-3	物体长度的光电检测	20
§ 4-4	物体高度的光电检测	43
§ 4-5	物体厚度的光电检测	49
§ 4-6	物体宽度的光电检测	62
§ 4-7	线状或管状材料直径的光电检测	76
§ 4-8	圆形物体偏心度的光电检测	115
§ 4-9	液面和料面的光电检测	119
§ 4-10	面积的光电检测	143
§ 4-11	表面质量或缺陷的光电检测	152
§ 4-12	孔的光电检测和孔深的控制	165
§ 4-13	间隙和细槽的光电检测	171
§ 4-14	光栅式齿轮单面啮合检查仪及传动链的检测	177
§ 4-15	产品识别和分类的光电装置	187
§ 4-16	光电瞄准装置	196
§ 4-17	激光准直仪和导向仪	213
§ 4-18	自动调节带形物或加工工件位置的光电装置	221
§ 4-19	光电跟踪线切割机	242
主要参考资料		255
第五章	机械量的光电检测	260
§ 5-1	光电检测机械量的基本原理	260
§ 5-2	光电重量计和自动定量装置	263
§ 5-3	压力的光电检测	282
§ 5-4	张力的光电自动调节	291

§ 5-5	利用双折射和干涉现象的光电应力计和测力计	295
§ 5-6	扭矩的光电检测	299
§ 5-7	零件变形的光电检测	309
§ 5-8	角位移和直线位移的光电检测	311
§ 5-9	转速 (角速度) 的光电检测	320
§ 5-10	线速度的光电检测	336
§ 5-11	机械振动的光电检测	355
§ 5-12	用于物体强度试验的光电装置	368
§ 5-13	硬度的光电检测	381
§ 5-14	流量的光电检测	383
主要参考资料		397

第二部分 光电检测装置的应用

第四章 几何量的光电检测

§ 4-1 光电检测几何量的基本原理及固体摄象传感器

在生产过程中，为了确保产品质量，花费的检测时间和用的检测人员数量相当可观。如果能缩减检测时间和减少检测人员，使检测操作简单而精确，就能大幅度地提高生产率。若在加工过程中进行主动测量，及时控制生产过程，就能排除因尺寸不合格而造成的废品，从而降低产品的成本。因此，提高检测精度和检测过程自动化对促进四化建设有着重要的作用。

在检测几何尺寸的方法中，光电检测很有发展前途，因为它有很高的精度并能使检测过程自动化。在第三章已谈到光电检测有直读法、差动法、补偿法和脉冲法等，在本节先谈谈在测量几何量中如何利用这些方法。

图4-1-1(a)示出直读法测量几何尺寸的工作原理⁽¹⁾。光源3发出的光线通过缝隙4照射于光电器件2，光源3和光电器件2都放置于不透光的外壳5内。当被测产品6的尺寸改变时，测量杆1的位置改变，它上面的光门或小旗（图中未示出）遮盖缝隙4的大小发生变化，因而改变了照射于光电器件的光通量和由它产生的光电流，再经过放大后可以从测量机构直接读出几何量的量值，或作用于执行机构，以控制生产过程。

如果不采用光门或小旗，也可采用其他适于测量几何量的方

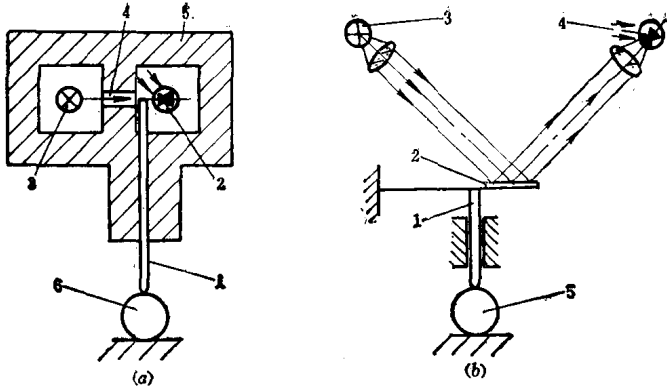


图4-1-1 光电直读法测量几何量的原理图

法。图4-1-1(b)示出利用反射镜倾斜测量几何量。当图中产品5的尺寸改变时，测量杆1使镜2的倾斜度发生变化，因此，光源3发出的光线，经镜2反射至光电器件4的光通量发生变化，从而改变光电流的大小。光电流经放大后就用来测定或控制几何量。

在第三章已经指出，直读式仪表易受元件参数、光源电压的被动等影响，利用差动法或补偿法就可使测量误差减小，精度提高。

图4-1-2为利用差动法或补偿法测量线度尺寸或角位移的原理图。图中光电池5、5'与电位器 R_w 组成电桥。由光源1发出的光线通过半透半反镜2、光阑3、射至反射镜4上。镜4的倾角受被测零件9控制，其旋转角决定于被测零件的线度尺寸或角度；另一方面，由镜2反射的光线通过光阑3'射至反射镜4'上。由镜4和4'反射的光线分别照射光电池5和5'。当被测零件的尺寸正常时，调节光阑3'，使检流计6的指示为零，电桥平衡。为便于理解，设这时两光电池上的光通量相等，电位器 R_w 的滑动

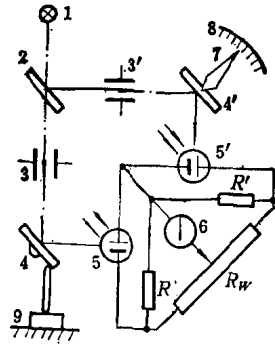


图4-1-2 利用差动法或补偿法测量几何量

阻值调到使检流计6的指示为零，电桥平衡。为便于理解，设这时两光电池上的光通量相等，电位器 R_w 的滑动

触点在中央。当被测零件与正常值偏差 ΔA 时，两光电池5和5'上的光通量不等，电桥失去平衡，检流计6的指针偏向一方，从这指针偏转的大小和方向可测知被测零件的几何尺寸。显然指针的偏转决定于两光电池上的光通量之差或比，故称为差动式。

如果是补偿法，则可采用能转动的镜4'作为光补偿器。当被测零件有偏差 ΔA 时，镜4转过一角度 $\alpha = f_1(\Delta A)$ ，使光电池5上的光通量改变，电桥失去平衡，检流计6的指针偏向一边。欲使检流计的指针回复至零，必须使镜4'旋转适当的角度 $\beta = f_2(\alpha) = f_3(\Delta A)$ ，使光电池5'上的光通量亦作适当改变，电桥才能重新平衡。因镜4'的转动角度 β 为 α 或 ΔA 的函数，因此与镜4'有机械联系的指针7在标尺8上指出相应的读数。如果标尺以 ΔA 为单位，指针就能直接指出读数 ΔA （线度尺寸或角度的偏差）。

图中将电阻 R 和 R' 相联接，是为了保证在光电池负载电阻较小时工作较稳定，并与光通量成一定的线性关系。这样，可适当降低对两光电池一致性的要求。

若电位器 R_w 的滑动触点不在中央，电桥平衡时光电池5'上的起始照度 L' 远大于光电池5上的照度 L ，为了补偿镜4旋转 α 角，要求镜4'的旋转角 β 较大。 $\beta = K\alpha$ ，而 K 决定于 L' 与 L 之比，即 L'/L 。

下面再举一个应用补偿法的例子。图4-1-3所示的装置没有用旋转镜，而是利用可动光门测量几何量的双通道补偿式仪表。

图中被测产品1遮挡投射于光电器件3的光通量 ϕ_1 一部分，光通量被遮挡的多少决定于产品尺寸的大小，因而光电流 I_1 及光电器件负载电阻上产生的电压降 U_1 也决定于被测产品的尺寸。可动光门2遮挡光通量 ϕ_2 的一部分，由光电器件3'产生的光电流 I_2 在它的负载电阻上产生电压降 U_2 ，为了比较电压 U_1 、 U_2 ，把它们的差加在放大器4上，放大器的输出电压为 U_0 ，而

$$U_0 = K(U_1 - U_2) \quad (4-1-1)$$

上式中的 K 为放大器的放大倍数。放大器的输出端●接到可

● 若放大器的输出端接指示仪表。由指示仪表读出被测几何量，则为差动式。

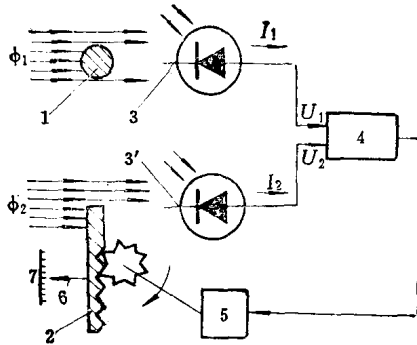


图4-1-3 利用可动光门的补偿式仪表

逆电动机 5，可逆电动机根据放大器输出电压的大小和符号移动光门，减小或增大光通量以进行补偿。当两光通量相等时，放大器的输出电压为零，可逆电动机停止转动，因而，由光门 2 和指针 6 的位置可在刻度尺 7 上指出产品的尺寸。

综上所述，检测几何量的原理是：光源发出的光经过光学系统后被光电器件接收，此光学系统使射到光电器件的光通量由被测产品的尺寸或角度决定，光电器件把光通量的变化转换成电信号，经放大后或者由测量仪表读出(直读式或差动式仪表)，或者由与补偿装置有联系的读数装置读出(补偿式仪表)，或者由继电器作用于自动化装置的执行机构来控制生产过程。光源和光电器件的布置可以采用直射型(图4-1-1 a 和图4-1-3)，或反射型(图4-1-1 b 和图4-1-2)。因此，检测长、宽、厚、直径、面积、表面光洁度、角度等任何几何量，从原理上讲大致相同，也就是说，测量某种几何量的仪器，加以适当的改装，有可能测量其他的几何量，例如可将测量角度的仪器改成测量线度的仪器等。

上面介绍的为测量几何量的基本方法和原理，至于比较特殊的方法，将结合具体的测量内容进行介绍。

随着大规模集成电路的发展，最近出现的固体摄像(图象)传感器(Image sensor)是受人重视的检测元件之一，特别对几何量的光电检测非常适合，因此在这里作简单介绍。

固体摄像传感器可分为线阵和面阵两类。线阵传感器由数百或上千个光敏单元排成一列或一行组成，因而能用于检测一维变量（线度尺寸），如宽度、液面高度等。因为只有一列分辨单元，芯片的有效面积比较小，读出结构也简单，所以容易获得沿器件轴线上很高的空间分辨能力。如果要从线阵传感器获得二维图象，第二维必须用机械方法扫描，例如用旋转镜，或者让被扫描的对象在摄像传感器面前运动。但若获取快速变化的活动图象，例如电视摄像，则直接用光敏元件排列成面的面阵摄像器件较合适，它在两维方向上都用电子自扫描。由于测量线度的几何量一般不需面阵摄像器件，因此下面讨论线阵摄像传感器的原理。

由图 4-1-4 可见，线阵固体摄像传感器由排列成一行的光敏二极管、MOS型场效应管开关及移位寄存器组成^[2,3]。

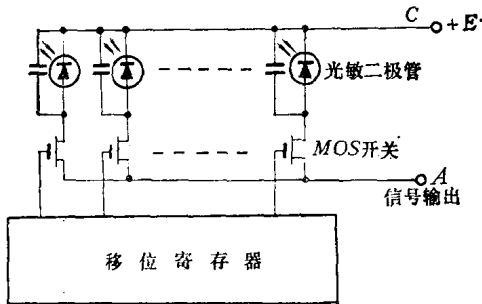


图 4-1-4 线阵摄像传感器

移位寄存器的各输出端分别控制对应的场效应管，当它导通时，从公共线 C 加反向偏置电压于光敏二极管，使 PN 结的结间电容充电至饱和状态，此后场效应管截止，光敏二极管保持反向偏置电压。但如果这时有光照射于光敏二极管，光电流使结间电容器放电，存储于光敏二极管结电容上的电荷随入射光强成比例地减少，这些失去的电荷直到移位寄存器下一循环（下一次扫描）使 MOS 管导通时再补充。显然，这充电电流与每个光敏二极管的结电容的放电程度有关，即与每个光敏管上受光照的强弱有关，

因此得到了与影像有关的信号电流。输出端若接上电阻，则可得到信号电压。每一循环或每一次扫描的时间间隔越长，在同样的入射光强下，结电容的放电时间长，MOS管导通时结电容充电到饱和电压的电流越大，因而灵敏度可提高。由上述可知，光敏二极管线阵把光强度的变化转换成电量，导通或截止由移位寄存器控制的MOS场效应管，依次把各光敏二极管上的信号输出，这样就可依次得到与各点光强度成比例的输出信号。下面以传送带上测量窄的金属板宽度为例说明其应用。

见图4-1-5(a)⁽⁴³⁾，被测金属板2在传送带1上通过，并被

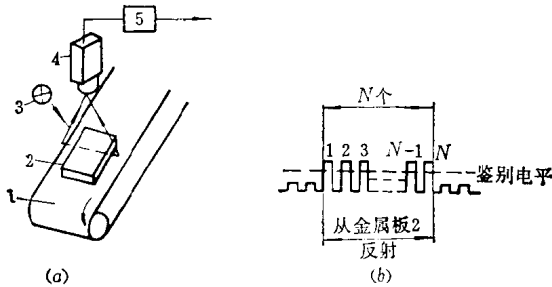


图4-1-5 线阵摄像传感器测量金属板的宽度

光源3照射，通过透镜组使被测金属板成象于摄像传感器4内的线阵光敏二极管上。由于传送带1和金属板2的反射率不一样，反射至每个光敏二极管上的光强度不一样。若金属板的反射光较强，则从线阵光敏二极管输出的脉冲波形如图4-1-5(b)。图中的虚线为斯密特电路5的翻转电平，则从图可得与被测金属板宽度成比例的 N 个脉冲，两边幅值较小的脉冲由传送带1反射，不能使斯密特电路翻转。如果用计数器计数，再乘上每个脉冲的宽度当量，就可得被测金属板2的宽度。

随着集成电路的发展，自1970年后出现电荷耦合器件(Charge-Coupled Devices)，缩写或通称为CCD，由于它具有结构简单，集成度高，制造工序少、功耗低、信噪比好等优点，因而

日益受到人们的重视。它的用途较广泛，用途之一是用作固体摄像器件，既可用作电视摄像，亦可用于工业检测，下面介绍在检测几何量中很有前途的CCD线阵摄像传感器^[5, 6, 7, 8, 9]。

1. MOS光敏单元的工作原理 所谓MOS结构，一般都以硅作为半导体衬底，在其上热生长一层二氧化硅 (SiO_2)，并在二氧化硅上面淀积具有一定形状的金属层 (图4-6)。因为它是由金属 (M)-氧化物 (O)-半导体 (S) 三层所组成，故称 MOS 结构。

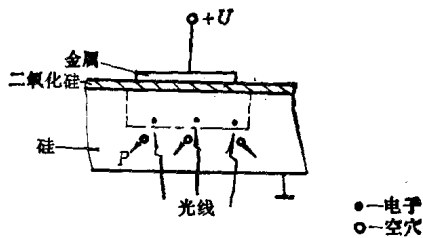


图4-1-6 MOS光敏单元

衬底可以是P型或N型半导体，这里以P型为例进行说明。当在金属电极上加正电压 U 时，在电场作用下，电极下P型区域里的多数载流子空穴被排斥、驱赶，形成一个“耗尽区”。但对少数载流子电子，电场则吸引它到电极下的耗尽区。耗尽区对带负电的电子而言是一个势能很低的区域，术称“势阱”。如果此时有光线从背面或正面入射到半导体硅片上 (图中采用背面入射)，在光子的作用下，半导体硅产生电子-空穴对，由此产生的光生电子被附近的势阱所收集，而空穴则被电场排斥出耗尽区。此时，势阱内吸收的光生电子数量与入射到势阱附近的光强成正比。这样一个MOS结构单元就称为光敏单元或一个像素；而把一个势阱所收集的若干个光生电荷称为一个电荷包。图4-1-6中仅画出一个光敏单元。

通常在半导体硅片上制有成百上千个相互独立的MOS光敏单元，如果在金属电极上加上正电压，则在半导体硅片上就形成

成百上千个相互独立的势阱。如果此时照在这些光敏单元上是一幅明暗起伏的图象，那末这些光敏单元就会产生出一幅与光照强度相对应的光生电荷图象，因而得到了影象信号。

2. 移位寄存器 移位寄存器也由金属电极、氧化物介质及半导体三部分组成，也是MOS结构，它与上述MOS光敏单元的区别是不能使它受光照射，应防止外来光线的干扰。

见图 4-1-7(a) 所示。在二氧化硅表面排列多个金属电极 $a_1, b_1, c_1; a_2, b_2, c_2; a_3, b_3, c_3 \dots a_n, b_n, c_n$ 等，每三个电极如 a_1, b_1, c_1 组成一个传输单元，在三个电极上分别加上三相脉冲电压 U_a, U_b, U_c ，它们的波形如图 4-1-8 所示。下面来介绍电荷如何进行移位（传输）。

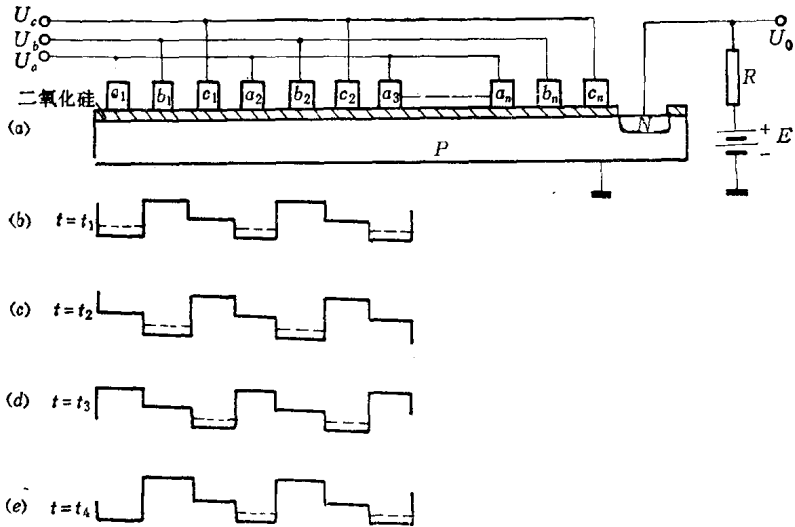


图 4-1-7 CCD的电荷移位

见图 4-1-8。在 $t = t_1$ 时， $U_a = U$ ， $U_b = 0$ ， $U_c = \frac{1}{2} U$ 。金属电极上所加正电压越大，金属电极下的电场越强，多数载流子空穴被排斥的耗尽层越厚，对少数载流子电子则势阱越深，图 4-1-7(b) 示出该瞬时的势阱深度分布，即 $a_1, a_2 \dots a_n$ 极上的电压最

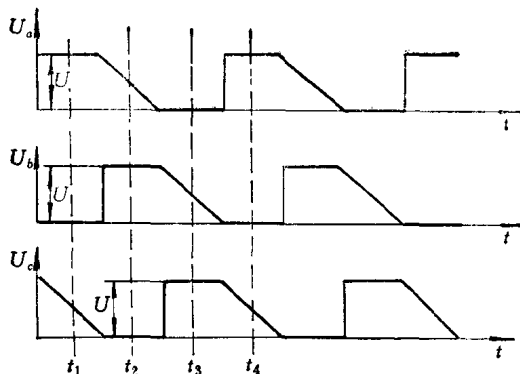


图4-1-8 U_a 、 U_b 、 U_c 的电压波形

高，势阱最深； b_1 、 $b_2 \cdots b_n$ 上的电压为零，不产生势阱； c_1 、 $c_2 \cdots c_n$ 的势阱介于两者之间。设 a_1 、 $a_2 \cdots a_n$ 等势阱中已有若干电子（如何注入在下面说明），在图中以“负号”的多少表示电子的数量。虽然真实的少数载流子电子位于二氧化硅和硅半导体的界面处，但这个模型在定性描述CCD的电荷传输过程时很有用，较形象化，故采用它来进行说明。

在 $t = t_2$ 时， $U_a = \frac{1}{2}U$ ， $U_b = U$ ， $U_c = 0$ ，根据电极上的电压越高，电极下的势阱越深的原则，势阱分布如图 4-1-7(c)，原来在 a_1 、 $a_2 \cdots a_n$ 处的势阱变浅，在 b_1 、 $b_2 \cdots b_n$ 处的势阱变为最深。因此，原来在 a_1 、 $a_2 \cdots a_n$ 处的电子移下势阱最深的 b_1 、 $b_2 \cdots b_n$ 处，即电子如图朝右方向移动了。

在 $t = t_3$ 时， $U_a = 0$ ， $U_b = \frac{1}{2}U$ ， $U_c = U$ ，势阱分布如图 4-1-7(d) 所示。 b_1 、 $b_2 \cdots b_n$ 处的势阱变浅，而 c_1 、 $c_2 \cdots c_n$ 处的势阱变为最深，因此在 b_1 、 $b_2 \cdots b_n$ 处的电子向右移移至势阱最深的 c_1 、 $c_2 \cdots c_n$ 处。

在 $t = t_4$ 时， $U_a = U$ ， $U_b = 0$ ， $U_c = \frac{1}{2}U$ ，势阱分布如图 4-1-7(e) 所示。 c_1 、 $c_2 \cdots c_n$ 处的势阱变浅，电子移向势阱最深的

$a_2, a_3 \dots a_n$ 处。

从 t_1 到 t_4 为脉冲电压的一个周期，原来在 a_1 极下的电子移向 a_2 极，原来在 a_2 极下的电子移向 a_3 极... 依次类推。但，还需一个信号输出装置，现用二极管输出来说明其工作原理。

输出端的设置见图 4-1-7。在靠近最右电极的一侧扩散一个 N 区作为收集区，它与衬底之间形成 PN 结。电源 E 通过 R 加在该 PN 结两端，使它处于反向偏置状态。如果有电子传到最后一个电极 c_n 下面，就被该收集区收集，在电阻 R 上有电流流过，并转换成电压的变化，输出一个脉冲。这与一般双极型三极管的收集结工作情况相类似。显然，输出脉冲的幅值，依次与原来贮存于 $a_n, a_{n-1}, \dots, a_2, a_1$ 势阱中的电子数成正比，是属于串行输出。从上述可知，信号向右传输直至输出是一个电荷耦合的过程，因此把这类器件称之为电荷耦合器件。

3. 光敏单元中的电荷向移位寄存器转移 上面分别介绍了光敏区、移位寄存器，以及它们之间的关系。现在来说明光敏单元中的电荷是怎样转移（读出）至移位寄存器的。

见图 4-1-9(a)。光敏区中产生的电荷，由转移门（电极） Z 控制转移至 $a_1, a_2 \dots a_n$ 极下的势阱。但光敏区中的光敏单元数与

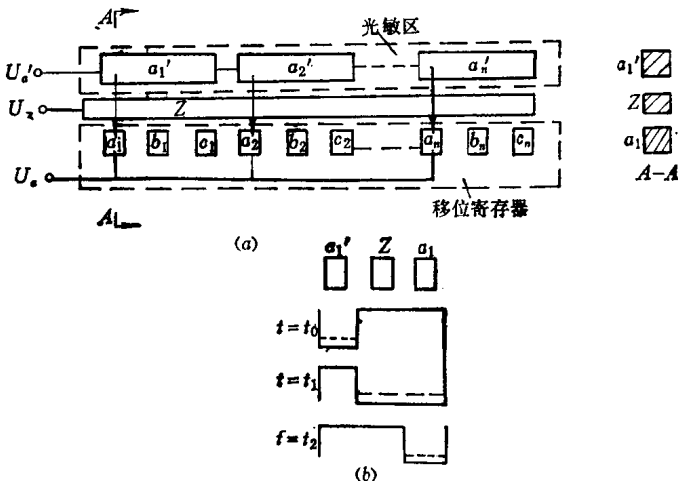


图 4-1-9 光敏区向移位寄存器转移电荷