

# 晶 体 管 译 丛

(第 一 集)

中国科学院第二电子学研究所

人 民 电 子 出 版 社

## 序 言

关于翻譯出版科学技术“譯丛”的必要性，最近报刊上有很多篇論著中已提到这一点。由于我国科学、技术比較落后，中文的科学技术著作很少。解放以来，翻譯出版了許多通俗技术小冊子，也出版了不少教科书，但从真正提高科学水平这个角度上看来，还是远远不够的。我們缺乏經典著作的翻譯，更缺少經典論文的翻譯。大家知道，先進科学的結晶，主要是以論文的形式发表出来的。而每項专业的重要論文往往以各种不同的文字散見于各种杂志上。在目前我国原始資料极端缺乏的情况下，找一篇論文是苦事，要想同时找多篇关于某一专业的主要論文，更是一件費力費时而往往不能完成的任务。科学工作者总不免有常常要这样想：假如有人将这些重要資料全部蒐集攆来，經過挑选、翻譯、出版、放在手头，这該是多么痛快的事！这种工作对有經驗的科学家來說也可以节省他們翻找和抄写的劳力和時間，而对新進的、外文程度不太好的年輕科学家們來說，可能会更有所帮助。

至少，對我們搞电信这一行的人來說是有这样一种需要的。这部“晶体管譯丛”也就是这方面工作的一个小小的嘗試。这一部譯丛打算分几个集子。第一集是对于各种不同型式的晶体管的一般性介紹。第二集是晶体管放大綫路方面的論文的总集。第三集以后介紹欧美各国关于晶体管方面的重要論文，重点是在綫路和应用方面，例

# 目 錄

## 序言

## 第一集編者序

### 第 一 編

#### 一 般 介 紹

1. 半导体的物理基础及技术利用 .....  
..... *E.M.* 伏尔通院士和黃昆、王守武教授 ( 1 )
2. 半导体的特性和半导体元件 ..... *G.L.* 皮尔遜 ( 16 )
3. 晶体管与电子管的比較 ..... *D.G.* 芬克特 ( 24 )
4. 晶体管和軍事部門 ..... *I.R.* 奧本海等 ( 30 )
5. 航空設備中的晶体管 ..... *O.M.* 奧托愛壽 ( 34 )

### 第 二 編

#### 各种不同型式晶体管的一般性介紹

1. 点接触型晶体管的作用 ..... *A.* 犹勒, *J.R.* ( 39 )  
× × × ×
2.  $P-N$ 結和結型(面触式)晶体管 ..... *M.* 斯伯克斯 ( 45 )
3. 結型晶体管 ..... *A.* 犹勒, *J.R.* ( 50 )
4. 生長結合型晶体三极管的研制 ..... *K.D.* 史密斯 ( 54 )
5. 合金晶体管的进展 ..... *J.J.* 艾白斯 ( 59 )
6. 液相型高頻晶体管 ..... 卡魯尔 ( 65 )
7.  $P-N-I-P$ 与 $N-P-I-N$ 結型晶体三极管 *J.M.* 鄂尔索 ( 72 )
8. 柱状极管 ..... *W.* 阿得克等 ( 90 )
9. 結型晶体四极管 ..... *R.L.* 华萊士 ( 94 )
10.  $N-P-N$ 結型高频鐳四极管 ..... *D.* 貝克 ( 98 )
11. 結型晶体光电管 ..... *J.N.* 希文和 *P.* 楠克 ( 110 )  
× × × ×





# 第一編

## 一般介紹

### 1. 半导体的物理基礎及技术利用

B.M. 伏尔通訊院士和黃昆、王守武教授

由于最近几年以来，半导体科学技术的迅速发展，目前这一个年青的部門已經成为最受到普遍重視的新科学技术之一。最近的成就使半导体在国防、通訊、电工、自动化等各个部門的应用迅速地扩大，并且在各种用途中都起着重要的技术革新的作用。完全有根据認為：半导体科学在它的进一步发展之中将更有許多具有极其重大意义的可能性等待我們去发展和探索。

#### (1) 半导体

平常用以傳送电力的金属导体和隔絕电的絕緣体傳电的能力相差在亿亿倍以上。傳电能力介于这两者之間的許多材料都属于半导体的范围，最常用的半导体有矽(硅)，鍺，硒这几种元素，以及許多硫化物和氧化物。

从构造来講，半导体和导体，絕緣体相对比，具有它的特点。

在金属中有許多电子不被固定的原子所束縛，而能够在金属中自由运动，好象在气体中的分子一样，无規則的往复运动。导体的傳电作用就是依靠这些自由电子，接上电源，在导体上产生了电压，这些电子就向一定方向移动，形成了电流。

絕緣体和半导体的构造和金属不同，其中电子絕大多数都和原子联系在一起。在平常情形下，只有数目很少的自由电子。这些电

子本来也是和原子联系在一起的，只是由原子不断的热运动的刺激才被释放了出来。如果物体的温度降得很低，原子热运动变得很弱，又没有外来的其他影响的刺激，那么就几乎没有自由电子。

半导体和绝缘体的区别在于，电子和原子联系的牢固程度不同。在绝缘体中电子和原子牢固地相联，原子热运动只能放很少的电子，因此导电能力小至可以忽略。在半导体中，电子和原子结合则是很弱的，所以有较多的电子释放出来，可以起一定的导电的作用。电子和原子联系牢固的程度在半导体和绝缘体大致相差约有十倍。这就是说要把一个半导体的电子释放出来所需要的能量只有在绝缘体情形的  $\frac{1}{10}$ 。

半导体对电子的束缚很弱是一个有决定意义的特点。由于这个特点，外界的影响可以很显著地影响半导体的性质，例如受到外界的光和热的刺激，都可以在半导体中释放出许多自由电子。这种对外界影响的敏感性是半导体能有多钟多样用途的一个主要原因。

## (2) 电子和空穴

半导体的另外一个重要特点就是它不仅依靠自由电子，而且还可以依靠所谓“空穴”来导电，我们用下面的具体例子来说明这一点。

锗和矽(硅)是两种当前最重要的半导体材料。它们的结晶体是靠了原子之间形成共价键。共价键是两个原子很常见的一种结合方式，具体来讲，就是由每个原子给出它最外圈的一个电子，这两个电子就稳固地聚集在两个原子的中间把它们联结起来，这种键既不能容再多的电子；要把键中的一个电子释放也必须花一定的能。

锗和矽的原子最外圈都是四个电子，在它们的结晶体中，原子规则地排列着，每个原子四周都有四个最近的原子，而且以共价键和它相联结（见图）。这样每个原子最外圈的4个电子恰好都被用

于和四个原子相联结，沒有任何电子多余出来，可以自由移动。所以只有受到一定的刺激（如原子热运动）。破坏了共价键才能放出自由电子。

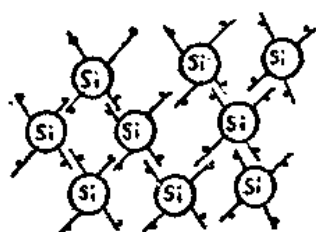


圖 1.

在键里边的电子并不能起傳电作用。因为設想某一个甲键中的电子跑到乙键中去，那么乙键中的一个电子就必然同时跑到甲键中来。否则就等于把键破坏了，这样电子往来交换一下，效果完全抵消，所以也并不产生任何电流。

但是在有的键中的电子受到刺激，例如由于原子的热运动、而被釋放出去时，情形就不同了。因此这时键中就有了空位。隣近键中的电子就可以跑来填充这个空位，那么空位就移到那个键上去了。換句話說，键中的空位是可以移动的。同时空位所在的地方显然是帶着正电的，因为空位是失去了一个帶負电的电子的地方，平常一个物体帶正电，也就是由于它失去一些电子。所以键中的空位是一个可移动的正电。在电压的作用下，它也可以象电子一样往一个方向移动。而形成电流。这样一个空位称为空穴。

所以总地来講，半导体的傳电可以有两个不同的方式：电子傳电和空穴傳电。

### (3) 电子半导体和空穴半导体

在純淨的鍺或矽結晶体之中，如果电子沒有受到任何刺激，那么所有键都是完整的，沒有空位，也沒有自由电子。在平常情況下，由于原子热运动，有些电子被釋放，同时也就产生了同数目的空穴。我們可以利用掺进雜质的办法按照我們的需要来改变电子和空穴的数目；这样就使我們能在很大程度上按我們的需要来制成有一定性能的半导体，从而开辟了利用半导体的广泛途徑。

这种利用杂质的重要办法，通过具体例子，是很容易了解的。

設想把一些銻摻进鍺，使一些鍺原子被銻原子所代替，銻原子最外圍有5个电子，到了鍺的結晶之內。只用掉其中4个电子形成与隣近四原子的鍵、这样就多余出一个电子。这个电子只受到很弱的力束縛在銻原子周圍，在平常的溫度之下，原子的热运动已完全足以把这样电子釋放出来。用这种方法，就可以任意增加鍺里边的自由电子；如要增加多少电子，只需要摻入同样数目的銻原子。这样产生自由电子，並沒有破坏任何鍵、所以并不同时产生空穴。

在这种摻入銻原子的鍺中，电子数目的比空穴多，如有足够数目的銻原子，傳电就主要是依靠电子。这种半导体称为N—型半导体。

假使我們摻入外圍只有三个电子的杂质例如鋁，那么就可以得到空穴比自由电子多的半导体。这是因为鋁的三个电子只能和三个最近的原子形成完整的鍵，和第四个原子間就留下了一空位，平常溫度下的原子热运动就足以使这个空位离开到任何其它鍵上去，这样就形成了一个自由的空穴。空穴数目的多少也完全由摻进去的原子数目所决定。这种主要依靠空穴傳电的半导体称为P—型半导体。

把N—型和P—型結合利用就造成了有重大实际意义的半导体器件，可以把交流电变为直流电，可以替代真空管，还可以把日光能直接轉变为电能。

#### (4) P—N結

以上所講的器件都是利用了所謂P—N結的作用。設法把一块半导体晶体的不同部分摻入不同的杂质原子，就可以使它成为一部分是P—型的，一部分是N—型的，两部分交界的区域就叫做P—N結：分析了P—N結附近的情形就能說明这些器件的原理。

在P—N結右边，半导体是N型的，电子很多空穴很少；而在

左边半導體是P型的，空穴很多但是電子很少。這種情形就如同甲、乙兩種分子的混合氣體，右边甲分子占多數，左边乙分子占多數。我們知道，在這種情形，由於分子不規則的運動，更多的甲分子會由右方跑到左方，更多的乙分子會由左方跑向右方，因此不用多少時間，兩邊的甲、乙分子就變成均勻一致了。P—N結的

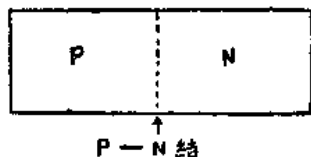


圖 2.

情形和這類似，但又有一個重要的區別。開始時和氣體的例子一樣，電子由右至左，空穴由左至右，但是因為電子和空穴都帶電；電子到左边就累積起負電，同時空穴到右边就累積起正電，造成圖示的情形。由於同性相斥，異性相吸的道理，這種電的累積開始阻礙電子和空穴穿過P—N結。這個道理很容易明白，只要設想一個電子

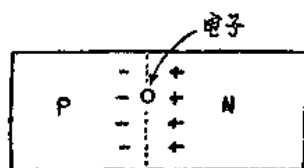


圖 3.

從右方進入正負電中間就可以看到，正電的吸引和負電的排斥都是阻止它繼續向左運動的力。由於這種緣故，在P—N結最後形成的情形，完全和氣體的例子不同，而是在由累積到一定程度以後，就阻止了電子和空穴繼續穿過P—N結。

這種情況常常用能量圖來表示，圖中實線表示空穴的能量圖。空穴要通過由左到右受到電力的阻礙，這裡就表現成為需要爬上一個高地一樣，實際這高度表示空穴要能穿過P—N結所必需的能量。

實際上，在這種情形也並不是完全沒有空穴通過P—N結，而是左右都有少數空穴通過，但是來往數目相同，左边有很多空穴由於不規則的運動來到P—N結，但其中只很少數目能夠爬上高地，右边雖然只有很少空穴來到P—N結，但是它們



圖 4.

不但不会阻碍，能图中的斜坡反而帮助它们很快地滑到左边来。

电子在  $P-N$  结附近所遭遇到的情形也是完全一样的。

### (5) 利用 $P-N$ 结整流

利用半导体的  $P-N$  结可以整流——把交流电变成直流电。这是因为很容易使很大的电流沿一个方向通过  $P-N$  结，然而，在相反的方向最多也只能有极小的电流通过  $P-N$  结。所以把它放在交流电路中，就可以得到几乎完全单方向的电流。

说得更具体，就是在一个方向加电压，能有很大电流通过  $P-N$  结，加相反的电压，就几乎没有电流。设想利用一个电池来产生电压，简单地讲，一个电池的作用表现在它维持它的正极上带一定的正电，负极上带一定的负电，如果把正极连在  $P-N$  结左的  $P$ -

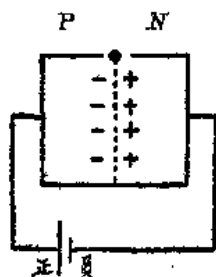


图 3.

型区，负极连在右边的  $N$ -型区。正极积正电的作用，就中和了  $P-N$  结左的负电的一部分，负极的作用同样中和了右边正电的一部分。所以电池的作用就是减弱了  $P-N$  结两边的正负电。因此，表示它们的作用的能量图中的高度相应地减低而成为虚线 1 的情形，这样很多从左边来的空穴就都能够克服这个高度通过  $P-N$  结。

由于左边的空穴很多，所以这样加电压时（称做正方向）就有很多的空穴由  $P$  型涌入  $N$  型区，形成很大的电流。

再设想相反的情形，把电池掉转过来（反向电压）负极接到左边，正极接到右边，这时电池的作用是使  $P-N$  结两边的电都增多，所以，能图中反映它们的作用的高度不是下降而是更提高了，象虚线 2 所表示的情形。它的效果也和以前相反不是左边来的空穴比较容易通过，而是帮助右边来的空穴能更迅速地跑到左边去。但是因为右边是  $N$ -型，空穴十分少，所以，由右方到达  $P-N$  结的

空穴數很少，因此無論能圖的高度怎樣提高，充其量也只能得到很小的由右到左的電流。

$P-N$ 結的這種整流作用是非常強的，同樣大小的正向和反向電壓所產生的電流可以相差到百萬以致於一億倍。

利用半導體  $P-N$  結的整流作用做成的檢波器在第二次大戰中解決了發展雷達技術中的一個關鍵問題，也是雷達技術中不可缺少的儀器。電子計算機用着成千上萬個真空管檢波器，在半導體做的電子計算機中，都可以用半導體檢波器代替，它們的體積十分微小，壽命長，而且用電很少，所以對於電子計算機這樣複雜，龐大的機器的改進具有着十分重大的意義。

目前  $P-N$  結的整流作用對國民經濟有了更為重大意義的用途。這是由於最近的发展使  $P-N$  結能通過很大的電流，因此可以把半導體  $P-N$  結利用到電工上去及需要大量直流電力的設備中。例如電化工業需要的大量直流電的問題，都可以用半導體  $P-N$  結整流器來解決；例如電火車等電力牽引，用直流電才能得到好的效果；過去把所需的直流電在電纜上輸送到機車，在電纜上電能消耗很大，特別是在象火車的情形，輸送的距離很遠，用了半導體整流器，就能夠用高壓的交流電輸送電力，交流電最後可以很方便地在電火車上通過半導體整流器變為所需的直流電，這是一個重要的新發展，今年初已經在國外開始實際應用。很容易了解，這是一個不小的用途，譬如很可能在十二年內我們的電火車就會需要到幾百萬千瓦的電力，占據着全國電力的一個相當的比重。

## (6) 半導體放大器

半導體放大器的結構是由三層不同導電類型的半導體迭在一起所組成，它也等於兩個  $P-N$  結相反地串在一起(如圖)其類型可以為  $P-N-P$  或  $N-P-N$  兩種。中間的一層半導體必須很薄，稱

为基极。两边的半导体称为发射极和集电极。在三层半导体上各引出一条金属丝作为电接头，这就是一个半导体放大器的主要结构。

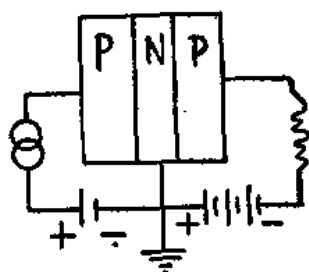


圖 6.

現在讓我們來考慮一下一個  $P-N-P$  型放大器在工作時的情況。我們在發射極和基極之間加上一個小的正向電壓。這時空穴就從發射極向基極中擴散；由於基極中電場很弱，進入基極的空穴將主要依靠熱運動而向前擴散。這樣，這些空穴中的絕大部分就很自然地擴散到基

極靠近集電極的另一面去，而並不奔向接在基極上的金屬電極。現在我們在集電極和基極之間再加上一個高的反向電壓，那麼擴散到集電極附近的空穴就很快地被所加的反向電壓拉到集電極里去了。因此，當加在發射極上的正向電壓有微小變動時，由此而引起的電流的變化卻直接進入了集電極的回路中。這也就是說，原先在低電壓低阻抗的發射極回路中所引起的電流變化，現在直接變成了高電壓高阻抗的集電極回路中的電流變化。這樣我們得到了功率的放大。

當製造半導體放大器的可能性在科學上剛提出來的時候，立刻就受到了極大多數人的重視。這是由於半導體放大器具有很明顯的，各方面的優越性。

和真空管對比起來，半導體放大器不需要抽真空，因此它可以做得非常小而輕，構造既簡單而又堅固。同時半導體放大器又不需要耗費大量電能的熱燈絲，因此用電非常省，而且使用壽命也要比真空管長幾十倍。一個半導體放大器可以做得只有綠豆那麼大，一只由半導體放大器所製成的收音機可以很容易的放在口袋裡，它所消耗的电要比平常真空管收音機小幾百倍，因此三節手電筒用的干電池就可以足夠使用幾百乃至一千小時。

半導體放大器的這些優點，不僅使它可以滿意地代替了一部分

真空管，而且使它在真空管目前所不能被使用的許多領域內，开辟了新的廣闊的用途。例如在導彈上所裝的自動控制設備，就必須是十分輕小而又堅固不怕振動的電子設備，這樣的要求是真空管所不能解決的，而只有半導體放大器才能使這些過去不能解決的問題得到解決。還有一些十分複雜的電子學儀器——例如電子計算機——它們需要成千上萬個電子器件。如果是用真空管來做的話，這樣的儀器就會裝滿了幾個房間，需要極大的電源設備。同時當上萬個真空管中只要有一個真空管突然失效，就會使整個儀器停止工作，因此如果用真空管來做這樣複雜的儀器時，可能由於真空管容易損壞而使儀器發生故障的可能性大為增加。半導體放大器的應用就可能滿意地解決這些問題。此外，對目前尚沒有電力供應的廣大農村的無線電廣播網的建立的來說，用半導體放大器製成的收音機是有極重大的意義的。

### (7) 半導體光電池

當光綫照到一個  $P-N$  結上時，光綫就把半導體中原先是被束縛的電子變成了自由電子，這樣就在半導體中產生一對電子和空穴，新產生的電子和空穴對把原先在  $P-N$  結中存在的平衡狀態破壞了。電子有趨向向一個方向移動而空穴有趨向向相反的方向移動。如果我們在  $P-N$  結的兩個兩極上接通電路的話，那末由於電子和空穴向相反的不同方向移動而在電路中產生電流。這種把光能直接變成電能的器件稱為光電池。光電池很早就被用來當作自動控制和測量光強的元件。目前一般照相用的曝光表里就有一個矽光電池。最近的研究工作使光電池把光能轉換成電能的效率不斷地提高。目前做成的矽光電池，在把日光轉換成電能中效率可達11%。這就是說在一平方米的面積上，在充足的日光照射下，就可以產生100瓦的電能。這樣的效率是足夠大的，因為如果我們真能以這樣的效率把

一平方公里地面上的日光能都轉變成電能的話，那末它將等於一個10萬瓩的發電站。但是問題在於目前日光電池需要超純而又是單晶的半導體材料，其成本是非常貴的。現在做的矽日光電池每發100瓩電所需要的設備費總在10萬元以上。因此，就目前情況來說，利用日光電池來作大規模的發電站還不可能，而且由於日光電池總是需要極高質量的半導體材料，在廣大的地面上鋪滿極高質量的半導體日光電池的現實性在短期內是很小的。但是在特殊用途上，目前用日光電池來作小功率的電源還是有很大意義的。

### (8) 溫差發電器

把半導體的一頭加熱而使另一頭保持冷卻，那末熱的一頭的半導體內部的自由電子或空穴的運動速度和它們的數目都會增加，這樣，這些自由電子或空穴就會向冷的一頭擴散過去。如果在半導體的兩頭接通電路的話，在電路中就會引起電流。這樣我們就可以不用蒸氣鍋爐，透平機，發電機等一聯串的設備而使熱能直接變成電能。這種半導體溫差發電器的效率現在已可達到8%。

蘇聯在衛國戰爭期間，在游擊隊中就曾利用半導體溫差發電得到通訊用的電力。目前蘇聯生產著一種加在煤油燈罩上用的半導體熱電轉換器，它可以在一些還沒有電力的地方供給收音機需用的電。另外還生產一種電力較大的類型可以用在酒精爐上供給拖拉機站通訊的用電。

就目前情況來看，半導體溫差發電的效率雖然已可達到8%，但是完全用半導體來代替透平機作大規模發電的問題看來還不是短期內所能解決的問題，因此，半導體溫差發電的現實性目前還只局限於小功率電源的範圍里。

### (9) 光敏电阻和热敏电阻

半导体内原先束縛的电子很容易受到光或热的能量而被激发成自由电子，因此，当半导体受到光的照射或它本身的温度增加时，它内部的自由电子数目就会增加而使它的电阻减少。利用这些现象所做成的器件称为光敏电阻和热敏电阻。

半导体光敏电阻不但能察觉很微弱的光，而且利用各种半导体，除去可以度量可见光外，还可以度量各种看不见的光，包括X光，紫外光和红外光。也就是说，利用光敏电阻我们可以看见眼睛不能看见的各种光，而且能量度它们的强弱。

因为凡是热的物体都不断地放出红外光来，所以利用光敏电阻在黑夜里可以觉察到在相当远距离以外的热物体。而且由于用光敏电阻可以看到红外光，这样就可以利用红外光线来传递信号。和无电线相比，有避免被人截获和干扰的好处。上述两点在军事上是很有价值的。

光敏电阻还可以用在各种各样的机械自动化装置上。某一部分机件的动作使照在光敏电阻上的光强改变，这变化通过光敏电阻就被转变为电的变化。这种电的变化可以很方便地控制下一步机器的操作。这办法用在机器的流水线上，就可以使各台机器自动地按时启动和停止操作。

半导体热敏电阻可以被利用来测量温度，它不但可以得到 $\frac{1}{100}$ 度以上的精确度，而且由于它的体积可以做得十分细小，因而它可以测量极小范围内的温度 and 变化很快的温度。这些问题都是普通温度计所不能解决的。

电流通过热敏电阻时会把它烧热，电流愈大，热敏电阻也就烧得愈热。这样，通过热敏电阻的电流的改变会引起它的电阻的改变。利用这个原理，热敏电阻在电工，电讯和自动化机械中可以被

用作自动调节和控制的元件。

## (10) 发光材料

许多半导体是很好的发光材料。今天日光灯里管子上所涂的白粉就是很好的例子。在沒有日光灯以前，普通电灯把电能变成可见光的效率是很低的。在普通电灯里，我們使电流通过灯丝发热，烧热的灯丝就发出光来。用这个方法来发光是很不经济的，因为絕大部分的电能是变成了热和看不见的紅外光。真正变成可见光的只有用去电能的3—4%。日光灯运用了完全不同的原理。它先使电能发生我們看不见的紫外綫，然后使紫外綫打到管子壁上所涂的半导体荧光粉上，使它发出我們可以看见的荧光。这种办法所得到的效率要比普通电灯提高了三倍。

最近在发光方面的研究更提出了新的半导体发光材料，它能够在交变的电场中直接发光，也就是直接把电能转变为光能。这种材料称为电致发光材料。电致发光材料的发光效率目前还是很低，現在还不能预料将来是否可能把它的发光效率提得很高。如果把一层电致发光材料和另一层光敏电阻材料迭在一起，再在两面涂上半透明的金属薄膜作为电极，在电极上加上一个交变的电压，当光綫从一面透过金属薄膜而照在光敏电阻材料上时，光敏电阻材料的电阻减小而使电致发光材料所受到的电场加强，这样电致发光材料层就能发出比原先射入光綫加强几十倍的亮光来（如下图）。这样的器件称为光加强器。光加强器在电视和軍事工程上都將占极重要的地位。

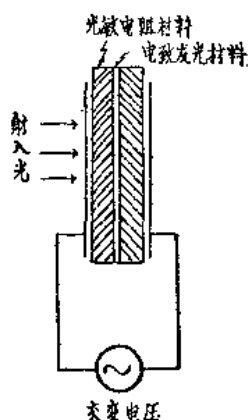


圖 7.