

硅太阳电池

苏联 A. Я. 格里别尔曼 著
A. K. 查依采娃
黄振岗 张德利 译



人民邮电出版社



硅太阳电池

中国科学院上海硅酸盐研究所
中国科学院上海硅酸盐研究所
中国科学院上海硅酸盐研究所



中国科学院上海硅酸盐研究所

硅 太 阳 电 池

A. Я. 格里别尔曼 著
苏联 A. K. 查依采娃
黄振岗 张德利 译

民 華 出 版 社

А. Я. Глиberman и А. К. Эйцева
КРЕМНИЕВЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ 1961

内 容 提 要

在本小冊子中，闡明了把太阳能轉換为电能的硅光电換能器的工作原理，研究了它的电学特性和光譜特性以及影响換能器效率的各种因素，說明了应用太阳電池組的某些特点，描述了太阳電池組的各种結構并列举出在各种科学和技术領域內应用的例子。

本小冊子适合有一定水平的无綫电爱好者閱讀，也是大专学生、技术員和工程师等人員的有益讀物。

硅 太 阳 电 池

著 者：苏联 А. Я. 格里別尔曼 А. К. 查依采娃

譯 者：黃 振 崗 張 德 利

出版者：人 民 郵 電 出 版 社

北京东四 6 条 13 号

(北京市书刊出版业营业许可证出字第〇四八号)

印刷者：北 京 市 印 刷 一 厂

发行者：新 华 书 店

开本 787×1092 1/32

1964 年 7 月北京第一版

印张 2 页数 32

1964 年 7 月北京第一次印刷

印刷字数 44,000 字

印数 1-5,800 册

統一书号：15045·总14001-无392

定价：(科) 0.24 元

(科) 0.24 元

目 录

引 言

第一章 太阳辐射的本质和功率	2
1. 太阳是一种能源	2
2. 地球表面上的太阳辐射强度	2
第二章 光吸收和各种光电元件	4
3. 关于光的本质	4
4. 光在金属中和在纯净半导体中的吸收	5
5. 半导体的杂质导电	7
6. 光电元件	8
第三章 光电换能器的工作原理	10
7. $p-n$ 结	10
8. 光能转换为电能的过程	11
第四章 光电换能器的基本特性	20
9. 太阳换能器的伏安特性和等效电路	20
10. 硅光电换能器的积分灵敏度和光谱特性	26
第五章 影响太阳换能器效率的一些因素	28
11. 概述	28
12. 由光电换能器不完善所决定的一些因素	29
13. 与运用条件有关的因素	35
第六章 太阳电池组及其应用	37
14. 制备硅光电换能器的主要步骤	37
15. 光电换能器的组合方法和太阳电池组的结构实例	41
16. 电池组的运用特点	44
17. 应用太阳电池组的一些例子	52

07201

引 言

近年来，利用太阳能的問題引起了科学家和工程师越来越大的注意。由于利用太阳能的前景寬广，因此引起了人們日益增长的兴趣。由于可能把太阳能直接轉換成其它形式的能量，因而有理由认为至少在地球上，在太阳照射区域内的力能学会得到很大的发展。

直接把太阳能轉換为电能（不必首先轉換为热能和机械能）的那些利用太阳能的方法特別誘人。熟知的将太阳能轉換为电能的方法有三种：热电法，光化电法和光电法。

热电法轉換太阳能系按下述程序进行：太阳能→热能→电能；光化电法为：太阳能→化学能→电能；光电法为：太阳能→电能。

热电法之所以引起人們很大的兴趣，这与半导体的理論研究与实际应用方面的最新成就有关，目前已制成了效率高达8%的热电发电机。

光化电法的基础是：某些化电系統在太阳光的照射下发生了化学反应，同时形成电动势。但是这个方法还处在萌芽阶段。

目前，人們特別注意太阳电池方面的工作。还在1953年，太阳电池的最大轉換效率认为不超过0.6%。但是在1955年，就制成了单个电池的效率高达10%的太阳电池組。最近，有一些工作表明：在估計到各种損耗后，硅太阳电池的理論效率可增加到15%。这就是說，在强度为1千瓦/米²的太阳照射下，从每平方米的受照表面可得到150瓦的电能。目前制成的光电換能器的效率已达6—10%。

上述数字說明：直接将太阳能轉換为电能的問題，不論在制造携带式仪器的小功率电源方面，还是在建立有普遍用途的动力装置方面，都成了现实問題。

第一章 太阳辐射的本质和功率

1. 太阳是一种能源

可供人类利用的一切形式的能源中，太阳是主要的能源。太阳儲存的能量是取之不尽，用之不竭的。在 11 亿年中太阳仅消耗掉它的儲存能量的 2% 左右，就足以說明这一点。

天文学和現代物理学把太阳当作巨大的火炉来研究，这个大火炉中在发生热核反应的同时有一些元素轉变为另一些元素（例如氢变为氦）。这些热核反应会发出巨大的能量。

我們的地球与太阳的平均距离为一亿四千九百万公里，因此得到的能量还不及太阳輻射能的二百万分之一。此外，平均約有 40% 的入射能在地球的大气层边界被反射而回到星际空間。尽管如此，到达地球表面陆地范围内的总輻射能（估計到能量在大气层內的吸收）每年有 9.5×10^{17} 千瓦·小时。每年由太阳不停地射向地球表面的能量极为巨大，为同期由各种能源（例如矿物燃料，水能等）向世界能量系統提供的总能量的 32,000 倍。

2. 地球表面上的太阳輻射强度

假如太阳射綫垂直照射地球表面，那么在大气层外部的太阳輻射功率約为 1.33 千瓦/米²。前面已指出过，这些能量中有一部分被大气吸收，有一部分散射而回到宇宙空間，所以在

晴朗的夏日，在中緯度（ $60-40^{\circ}$ ）处，太阳射线垂直入射到处于海平面的地球表面上的能量为 $0.8-0.9$ 千瓦/米²。在靠近赤道的地区，在射线通过大气层的最佳条件下，能流可达 1 千瓦/米²（有时甚至超过此数）。

在大气层中损失的能量与大气状态有关（即与大气层的湿度、尘埃等有关），也与射线穿过大气层的路程有关，即与季节、时辰有关。在最佳条件下，每昼夜入射到海平面的平均辐射功率不超过 0.4 千瓦/米²，在阴天此值降低，还不到晴天的十分之一。

每年入射到海平面的太阳辐射的平均功率在 0.1 到 0.2 千瓦/米² 之间起伏，所以每日的平均入射能流为 $2.4-4.8$ 千瓦小时/米²。

射到地球表面的总太阳能由两部分构成：直射辐射，即由太阳发出的沿直线行进的辐射和太空辐射——即所谓漫射辐射或散射辐射。在晴朗白昼的中午射到地球表面的这部分散射辐射能为总辐射能的 20% 。到傍晚，此值升高，在太阳落山后达到 100% （图 1）。

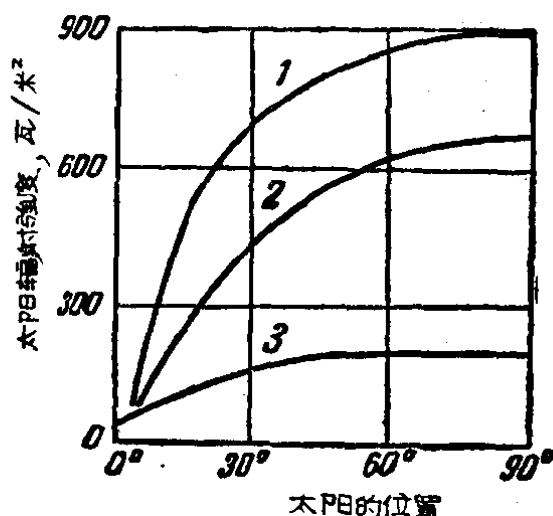


图 1. 在北緯 40° 处，在八月的一个无云白昼入射于海平面的太阳辐射强度
1—总辐射；2—直射辐射；3—散射（漫射）辐射

第二章 光吸收和各种光电元件

3. 关于光的本质

现代物理学把光作为波长一定的、具有两重性的电磁波来研究。它既表现出波动性，又表现出微粒性。光并不是以连续的能流，而是以单个的、互不联系的一份一份的形式（光子）来辐射和传播的。每个光子都是一定能量的载体。各光子本身的能量也互不相同。在波动理论中，用最高频率表征的辐射所相应的光子具有最大的能量。如果只谈可见光，那么紫光光子具有最大的能量，红光光子具有最小的能量。

已经证明，光子能量 ε 与辐射频率 ν 成正比：

$$\varepsilon = h\nu,$$

式中 h ——普朗克常数 (6.624×10^{-27} 尔格秒)。

光子能量 ε 越大，即频率 ν 越高，电磁辐射的微粒结构就越容易发现。在伦琴射线或 γ -射线流中，实际上主要表现为微粒性。

光子的能量 ε 越小，即频率 ν 越低，则辐射在很大程度上表现为波动性。对长波辐射（无线电波）就仅能很容易地观察到波动性，几乎观察不到微粒性。

可见光的频段很窄，或者说在电磁辐射的频谱中仅占据波长为 $0.4 \sim 0.8$ 微米的一小段。为了描述可见光照在半导体表面上时所发生的物理现象，可把可见光看作具有不同能量的光子流。

4. 光在金属中和在純淨半导体中的吸收

如果光子流射到某种金属的表面上，那么一部分光子被表面反射，而其余部分則被金属吸收。被吸收的光子将自己的能量交給金属的晶格和自由电子，使晶格振动的振幅增加，使自由电子的无規运动速度加快。如果光子的能量很大，則它們的能量便足以把电子打出金属，亦即賦予电子的能量等于或大于逸出功 φ (图 2, a)。这种現象称为外光电效应。如果被吸收的光子的能量不足以把电子打出金属，則这部分能量最終会完全用来加热金属。

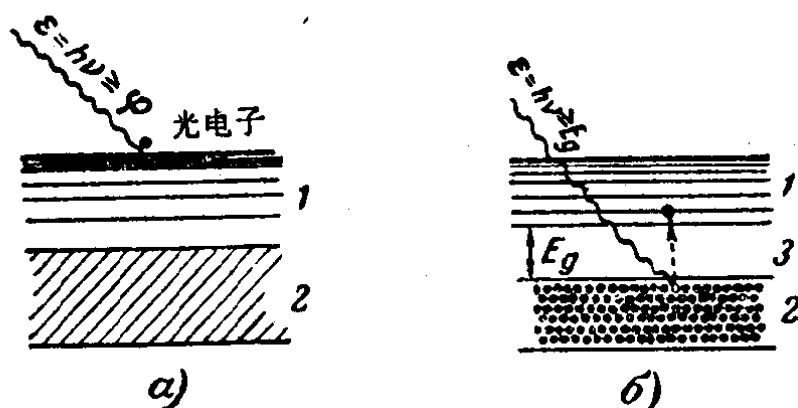


图 2 金属和半导体中的光电效应能带图

a—金属中的光电效应：光量子的能量 $\epsilon \geq \varphi$ ，能把电子（光电子）逐出导带；b—半导体中的光电效应：光量子的能量 $\epsilon \geq E_g$ ， E_g 为使电子由满带激发到导带，亦即产生电子——空穴对所需的能量。
1—导带；2—满带（价带）；3—禁带；黑圆点——电子；白圆圈——空穴

当光子流作用于半导体时，我們观察到另一情景。

純淨（无杂质）的結晶半导体与金属不同，若不受任何外界因素（溫度、电场、光輻射等）影响，便沒有自由电子，即沒有脱离半导体晶格原子的电子。但是因为半导体材料总是处于某一溫度（經常是室溫）下，受原子束縛的少量电子可由热

振动中获得足够大的能量而摆脱原子的束缚。于是这些电子便变为自由电子，并能参与导电。

在半导体中，失去电子的原子带有与电子电荷相等的正电荷。但是在原子中失去电子的地方可以被相邻原子的电子所占据。这时，第一个原子变为中性原子，而相邻的原子则带正电。

在原子中由于形成自由电子而空出来的地方等效于一个正的带电粒子，称之为空穴，空穴也能参与导电。

处于受原子束缚状态中的电子所具有的能量把电子限制在一个称之为满带或价带的范围内（图 2, 6 中的带 2）。自由电子的能量相当大，因此处于较高的能带——导带内（图 2, 6 中的带 1）。满带与导带之间有一个禁带（图 2, 6 中的带 3），也就是禁带所具有的能量使该半导体材料的电子既不处于束缚状态，又不处于自由状态。不同半导体的禁带宽度也不同，例如锗的禁带宽度为 0.7 电子伏¹⁾，而硅则为 1.12 电子伏。

因为空穴仅能在半导体晶格原子中形成，所以只能处于满带内。

当半导体表面受光照射时，自由电子—空穴对的数量会迅速增加，这是由于某些光子的能量足以使电子挣脱原子并把电子由满带激发到导带去。这种现象称为内光电效应。

实现内光电效应的条件为：

$$h\nu \geq E_g,$$

式中 E_g ——禁带宽度。

电子和空穴浓度的增加使半导体材料的电导率增加。在纯单晶半导体中，在外界因素的作用下所产生的电导率称为本征

1) 电子伏——在 1 伏加速电位差的作用下，电子所具有的能量。

电导率，因为它仅取决于半导体本身原子的激发状态。自由电子—空穴对随外界作用的消失而消失（电子与空穴互相复合），本征电导率趋近于零。

半导体中也有外光电效应的现象，但其性质比金属要复杂些。

为了在半导体中产生外光电效应，必须使所吸收的量子能量足以把电子逐出满带并进而逐出半导体。

因此，只有在辐射频率远大于发生内光电效应的光频的辐射的作用下，在半导体中才能产生外光电效应。在入射的总太阳辐射中的这部分高频辐射相当少，因此普通半导体的外光电电流极小。

光能仅依靠内光电效应而转换为电能。

5. 半导体的杂质导电

仅具有单一本征导电率的理想纯净半导体材料并不存在。半导体通常都具有某种完全确定的导电类型，或者仅为空穴型（ p 型），或者仅为电子型（ n 型）。半导体的导电类型取决于掺入晶格中的激活杂质的价。

硅中的激活杂质是门捷列也夫周期表中的Ⅲ族（硼、铝、镓、铟和铊）或Ⅴ族（磷、砷、锑和铋）等元素。硅本身是周期表中的Ⅳ族元素。

激活杂质通常掺入硅的晶格结点上。硅晶格是立方形，其中每个原子都位于晶格结点上，并且与四个相邻原子以所谓共价键或成对电子键结合起来。

当在硅中掺进Ⅴ族元素的杂质时（Ⅴ族元素的特征是在其原子的外电子壳层上有五个电子），杂质原子的四个电子与四个相邻的硅原子结合起来，而第五个电子空着未与原子结合。

这个电子在它形成的条件下与它本身原子的结合非常松弛，甚至在极低温度下也很容易变为自由电子。这时杂质原子变成正离子。

因此，Ⅴ族元素的杂质原子很容易交出电子，因而是自由电子的源泉，使硅具有电子导电性。这些杂质称为施主空穴杂质。

如果在硅中掺进一种Ⅲ族元素的杂质（外电子壳层上有三个电子），为了使杂质原子与四个相邻的硅原子完全结合起来，就要从相邻硅原子中“抢走”一个电子，使相邻硅原子中形成“空穴”。这时杂质原子变为负离子。这些杂质称为受主。受主杂质使硅具有空穴导电性。

杂质电导率的数值与所掺杂质的浓度成正比，因而可在很大的范围内变化。

杂质导电的半导体在吸收光以后，由于基本材料（例如硅）中的原子激发而形成电子—空穴对。由于产生了附加的自由载流子，因此半导体材料的电导率增加。

在光的作用下，杂质导电半导体的电导率的变化远小于本征导电半导体的电导率的变化。在光的作用下，杂质半导体的电导率的增量随着杂质浓度的增加而变小。

6. 光 电 元 件

就工作原理而言，一切光电元件可分为两类。第一类是基于外光电效应的光电元件——真空和充气的光电元件。第二类是半导体阻挡层光电元件，也称障层光电元件，其工作原理基于内光电效应。氧化亚铜、硒、锗和硅等光电元件都属于第二类。

为使真空光电元件和充气光电元件工作，必须利用附加的

直流电压（干电池，蓄电池）建立电场，电场强度必须保证被光线由光电阴极打出的全部电子都落到阳极上。

障层光电元件与所有其他形式的光电元件的区别在于：在辐射光的作用下能产生本征电动势，在一系列情况下，在直射阳光的作用下这个本征电动势为十分之几伏。因此，障层光电元件就可直接将辐射能转换为电能。用作电源的光电元件通常称为光电换能器。硅光电换能器是目前最完善的光电换能器。

选择硅作为原材料有许多原因。首先，硅元素在地球上的数量仅次于氧，并且它的生产工艺已经掌握。其次，理论证明：由禁带宽度在 1—1.5 电子伏范围内的那些半导体制成的光电换能器，对于太阳光谱，能得到最大的输出功率（图 3）。

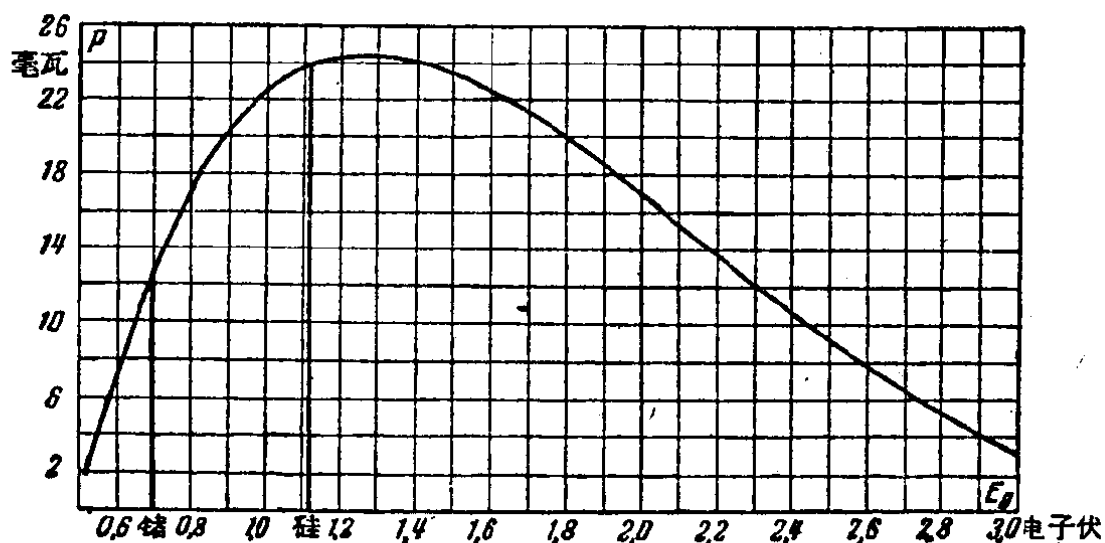


图 3 在明亮的阳光照射下，从面积为 1 厘米²的换能器得到的最大功率与半导体禁带宽度的关系

第三，对利用太阳辐射能而言，硅光电换能器的灵敏度光谱分布与太阳光谱极为接近。第四，例如与锗换能器比较，硅换能器对温度波动的敏感性较小。最后，硅的反射损失能做到最小。很容易在硅上形成一层绝对透明的，折射率介乎硅与周围

媒质折射率之间的表面氧化膜，这样便能减小光直接在硅表面上的反射。

第三章 光电换能器的工作原理

7. $p-n$ 结

几乎所有的半导体器件，包括光电换能器，都是由 p 型和 n 型的两块半导体互相紧密接触组成的系统。导电类型相反的两块半导体之间的过渡区域(边界)是在半导体材料的内部，称为电子—空穴结或 $p-n$ 结。

由于在 $p-n$ 结的一侧有过剩的自由电子(n 区)，而另一侧有过剩的自由空穴(p 区)，这两种自由载流子都有往缺乏它们的半导体材料的区域扩散的趋势(热自扩散)。因此，空穴将由半导体的 p 区往 n 区扩散，而电子则将由 n 区往 p 区扩散。

但是，这种多数载流子¹⁾的扩散不能持续很长的时间。事实上，电子往半导体 p 区的扩散使 p 区带负电， n 区由于有一部分电子离开而带正电。空穴自扩散作用的后果相同，即 p 区带负电而 n 区带正电。扩散的空穴和电子以体电荷偶层的形式积累在 $p-n$ 结附近，并在此偶层之间形成电位差。这时在黑暗中，在靠近 $p-n$ 结的 p 区一侧集中了负的体电荷，而在 n 区一侧集中了正的体电荷，如图 4, a 的上图所示。这两部分体电荷所形成的电场会阻止多数载流子穿过 $p-n$ 结作进一步的自扩散。

据以制成各种半导体器件(光电换能器、大功率整流器、二极管、光电二极管、三极管和光电三极管等)的一些现象，

1) 多数载流子指的是电荷符号与该种材料的导电类型相应的自由载流子，即 n 区的电子及 p 区的空穴。

都是由于在 $p-n$ 結处形成了势垒。

8. 光能转换为电能的过程

在光的照射下，半导体中的原子受到激发，并且不論是在晶体中的 n 区还是在 p 区都产生附加的（过剩的）电子——空穴对，如图 4, 6-2 的上图所示，所形成的电子和空穴由于参加热运动，便在各个方向迁移，包括向 $p-n$ 結的迁移。

由于势垒的存在， $p-n$ 結主要把扩散到結的过剩少数载流子分开。这样分开的結果，在晶体的 n 区内有过剩电子的积累，而在 p 区内有过剩空穴的积累。在光电换能器 n 区内的（被結分开的）过剩电子和在 p 区内的过剩空穴的积累将补偿集中在 $p-n$ 結附近的附近的空体电荷，亦即形成方向与原有的电场方向相反的电场。光生电场使左边的 p 型层（光照层）带正电，而使右边的 n 型层带负电。在 n 区与 p 区之间的薄层产生了光生电动势。在 $p-n$ 結附近过剩光生载流子的浓度，也就是光生电动势的数值与光强以及与接在光电换能器外电路内的负载电阻 R_H 有关。

假如光电换能器的电路断开 ($R_H = \infty$)，如图 4, 2 的上图所示，那么被 $p-n$ 結分开的所有过剩载流子便会积累在 $p-n$ 結附近，并以最大的可能值补偿結势垒，于是，产生了等于开路电压 U_{xx} 的最大光生电动势。

为了不使綫路复杂化，图 4 的上图仅限于画出那些能建立势垒的载流子，即平衡载流子¹⁾的积累。

1) 半导体中处于热平衡状态的电子和空穴的浓度，称为平衡浓度。过剩的或者非平衡的自由载流子——指的是在暂时的外界因素（光、电场、加热等）的作用下产生的空穴和电子，其浓度不及平衡浓度大。仅当外界因素的作用停止后，过剩自由载流子才会消失（复合掉）。外电路中的电流可认为是过剩载流子的流动。

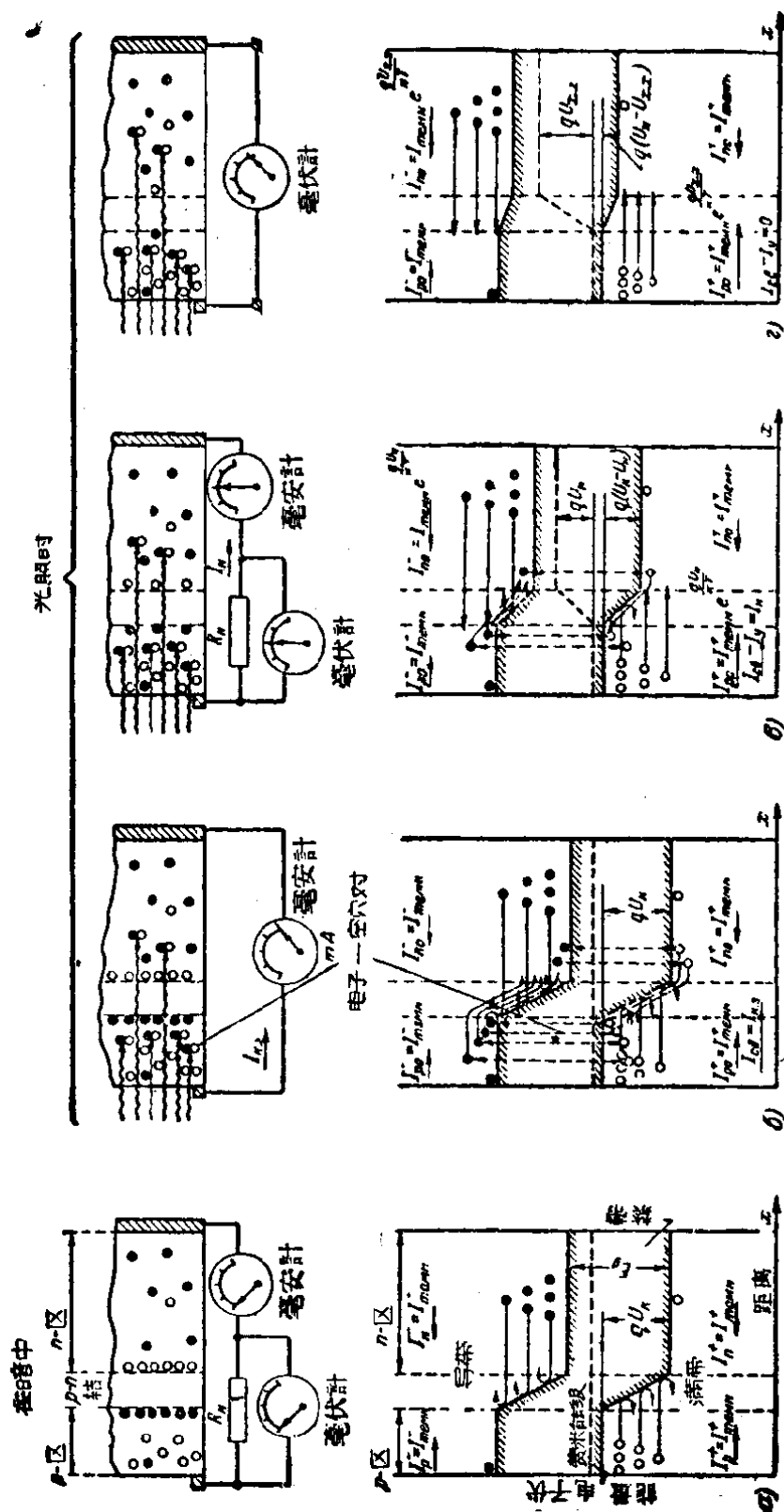


图 4 太阳能光电换能器工作原理说明图

a) 一在黑暗中, 通过 $p-n$ 结的多数载流子与少数载流子的电流相互补偿, 总电流等于零, b) 一在短路状态, 所有在其生存时间内来得及到达 $p-n$ 结的过剩的光生少数载流子都穿过结, 并且因为外电路闭合, 所以引起了电流循环, c) 一在外电路通过负载电阻 R_H 而闭合的状态中, 所有在其生存时间内来得及到达 $p-n$ 结的过剩的光生少数载流子有一部分消耗于降低 $p-n$ 结的势垒, 其余部分构成了通过结以及外负载的电流, e) 一在开路状态, 所有在其生存时间内来得及到达 $p-n$ 结的过剩的光生少数载流子消耗于降低结的势垒。