

来描述它,但是广义相对论的效应大多数都微弱得无法进行实验检验。由此可以说引力场的矛盾和性质是未被充分揭露的。随着近代科学技术的发展,揭露这种矛盾的实验已提到日程上来了,其中最重要的是现在正在进行的引力波探测实验。而引力常数 G 的测量,也是不可忽视的一个方面,现在国际上也已开展起来了。本文所介绍的只限于所了解到的一些进展情况。

参 考 文 献

[1] A. H. Cook, Proceedings of the International Conference on Precision Measurement and Fundamental Constants, (1970), 475.
 [2] R. D. Rose, *Phys. Rev. Lett.*, 23-12 (1969), 657.
 [3] Misner, K. S. Thorne, J. A. Wheeler, *Gravitation*, Freeman, San Francisco, (1973), 1121.
 [4] P. A. M. Dirac, *Proc. Roy. Soc. London A*, **333**-1595(1973), 403; **338**-1615 (1974), 439; *The Physicists's Conception of Nature*, Edited by Jagdish Mehra, (1973).
 [5] T. C. Van Flandern, *Sci. Amer.*, **234**-2 (1976), 44.
 [6] Y. Fujii, *Annals of Physics*, **69**-2(1972), 494.
 [7] Y. Fujii, *Natural Physical Science*, **234** (1. Nov.

1971), 5.
 [8] O. Hanlon, *Phys. Rev. Lett.*, **29**(1972), 137.
 [9] D. R. Mikkelson and M. J. Newman, *Phys. Rev. D*, **16**-4(1977), 919.
 [10] I. I. Shapiro, *Phys. Rev. Lett.*, **26**-1 (1971), 27.
 [11] J. D. Barrow, *Mon. Not. R. Astron Soc.*, **184**-3 (1978), 677.
 [12] T. C. Van Flandern, *Mon. Not. R. Astron Soc.*, **170** (1975), 333.
 [13] 现代物理学参考资料第二集, 科学出版社, (1978), 21.
 [14] J. W. Beams, *Phys. Today*, **24**-5 (1971), 35.
 [15] V. B. Braginsky, C. M. Caves, K. S. Thorne, *Phys. Rev. D*, **15**-8 (1977), 2047.
 [16] W. R. Towler, Proceedings of the International Conference on Precision Measurement and Fundamental Constants, (1970), 485.
 [17] F. N. Hooge, *Appl. Sci. Res.*, **33**-2 (1977), 191.
 [18] D. R. Long, *Nature*, **260** (1. Apr. 1976), 417.
 [19] D. R. Long, *Phys. Rev. D*, **9**-4 (1974).
 [20] D. R. Long, *Phys. Rev. D*, **10**-6 (1974).
 [21] 8th Intern. Conf. on General Relativity and Gravitation, (1977), 268.
 [22] H. Hirakawa, Proc. of 2nd Marcel Grossmann Meeting, (1979).

太 阳 能 电 池

李 春 鸿

(中国科学院长春应用化学研究所)

太阳能电池是利用光生伏打效应,把光能直接转换成电能的一种半导体器件。

光生伏打效应是早在1839年由 Becquerel 首次发现的。用硒和氧化亚铜等半导体材料中也有这一现象,但能量转换效率很低(小于1%)。用这种材料做成的电池只能供照度计用。

1954年,美国 Bell 实验室首次用单晶硅制成 p-n 结太阳能电池,成功地把太阳光直接变成电能,转换效

率达到3—6%^[1-3]。以后的20多年以来,随着宇航事业的发展,硅电池作为人造卫星的电源,目前它的效率已达到10—14%。同时,其他类型的太阳能电池也相继发展起来,如 CdS, GaAs, CdTe 等单晶电池和 CdS, CdTe 等薄膜多晶电池。Si 单晶电池及 CdS 薄膜电池的效率进展情况示于图1^[4]。

一、种类及结构

太阳能电池的种类很多。按其材料分,有硅电池、硫化镉电池、砷化镓电池、碲化镉电池和磷化铟电池等;按其结晶性质分有单晶和多晶等电池;按其结的性质来分有同质结、异质结和肖特基结等电池。太阳能电池的种类、效率及研制情况见表1^[5]。其中,硅单晶太阳能电池在技术上比较成熟,它的可靠性较大,比功率较高,寿命较长,在超过一个月的航天任务中得以广泛的应用。估计到1985年仍将为大多数卫星所采用。它的缺点是成本比较高。CdS 薄膜太阳能电池的特点是重量轻,耐辐照性能好,制造简单,成本低,易于制成大面积方阵。但它不够稳定,因此尚未得到广泛

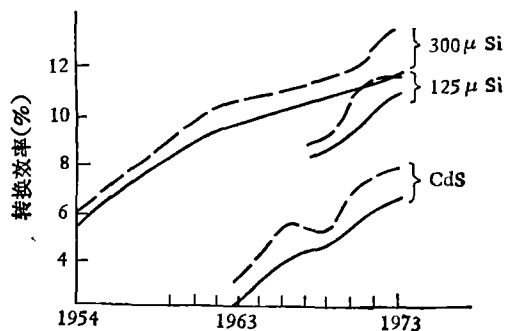


图 1
 --- 最大; — 平均

表1 太阳能电池的种类

种类	转换效率(%)*	材料	结型	现状
Si 太阳能电池	11-12	单晶	n/p, p/n 结	工业化, 已有实际应用
CdS 薄膜太阳能电池	5	多晶(蒸发)	Cu ₂ S-CdS 异质结	有商品出售, 还未实际应用
CdS 烧结太阳能电池	6	多晶(烧结)	Cu ₂ S-CdS 异质结	研究阶段
CdTe 薄膜太阳能电池	3-5	多晶(气相反应)	Cu ₂ Te-CdTe 异质结	研究阶段
GaAs 薄膜太阳能电池	3-3.	多晶(气相生长)	Pt, Cu _x Se-GaAs 异质结	研究阶段
GaAs 单晶太阳能电池	13	单晶	p-n 结	研究阶段
GaAs 单晶太阳能电池	8-9(AM0)	单晶	Au-GaAs 肖特基结	研究阶段
GaAlAs-GaAs 太阳能电池	18	单晶	p-GaAlAs-p-GaAs-n-GaAs	研究阶段
金属-Si 太阳能电池	8	单晶	Cr(Cu)-Si 肖特基结	研究阶段
CdS-InP 太阳能电池	12.5	单晶	CdS(蒸发)-InP 结	研究阶段

* 指平均效率 (AM1).

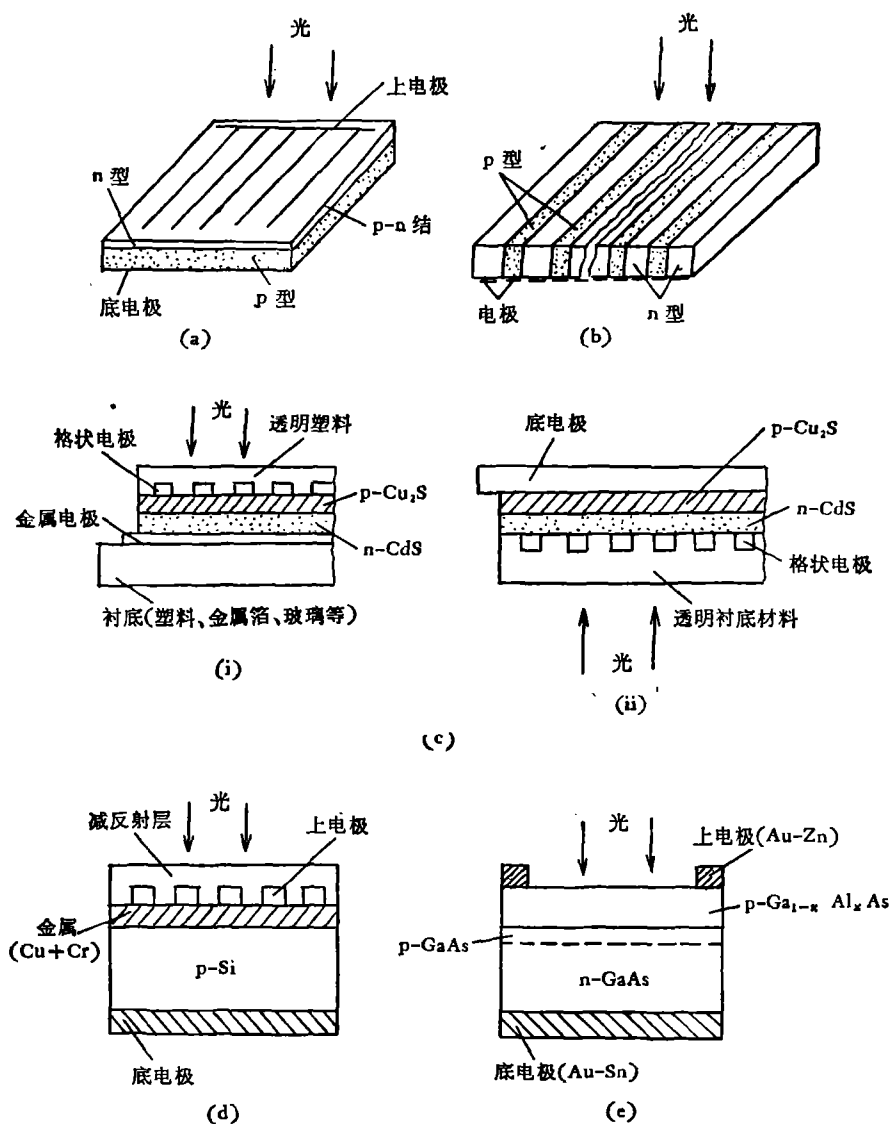


图2 (a) 硅太阳能电池; (b) 垂直多结太阳能电池; (c) 硫化镉薄膜太阳能电池: (i) 为前壁电池, (ii) 为后壁电池; (d) 肖特基结太阳能电池; (e) Ga_{1-x}Al_xAs-GaAs 异质结太阳能电池

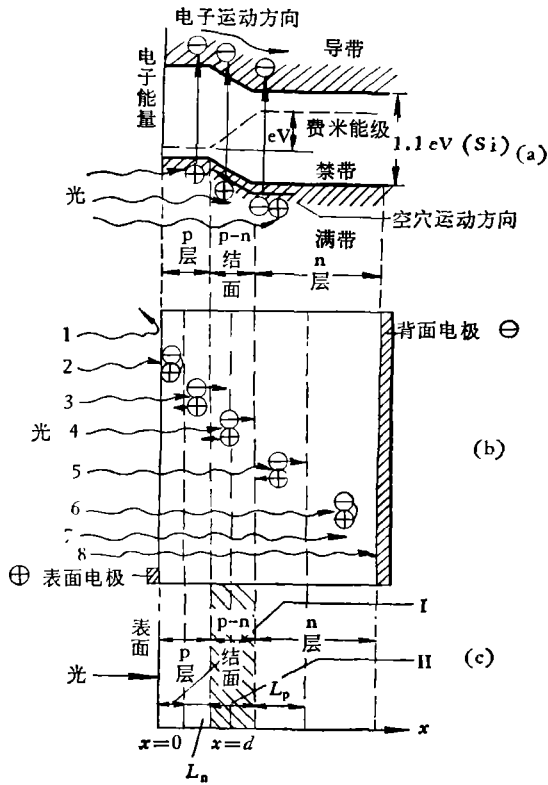


图3 I 为表面复合区域; II 为具有内部电场的结区;
 L_n 为电子的扩散距离; L_p 为空穴的扩散距离

的应用。其它,除砷化镓电池有少量应用外,都处在试验研究阶段。

几种典型的太阳能电池的结构见图2。

二、工作原理及特性

一般的太阳能电池借助于半导体材料的 p-n 结,把太阳辐射能直接转变为电能。硅太阳能电池的工作原理示于图3(a)和(b)^[1,5,6,7]。光照时,入射光分别发生如下几种情况:(1)光在表面被反射;(2)光在表面被吸收生成电子-空穴对,但未到达 p-n 结之前被复合掉,这一部分光大多数是吸收系数大的短波长的光;(3),(4),(5)光在 p-n 结附近或在 p-n 结上被吸收而生成电子-空穴对,并扩散到 p-n 结产生光电动势;(6)光在内部深处被吸收产生电子-空穴对,但不到 p-n 结时就复合掉;(7),(8)光在内部深处被吸收,但由于能量小不产生电子-空穴对或不被吸收而透射过去,这一部分光是长波长的光,不产生光生电动势。

硅的禁带宽度为 1.1eV,所以波长大于 1.13 μ 的光不发生电子-空穴对。硅电池吸收能量 E 大于其禁带宽度 1.1eV 的光子,把价带中的电子激发到导带中去,在半导体内部产生电子-空穴对。由于扩散作用,

物理

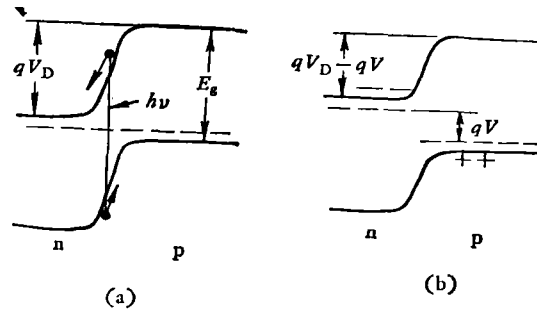


图4 p-n 结太阳能电池光照时的能带图
 (a) 短路光电流; (b) 开路电压

电子-空穴对到达 p-n 结,并在 p-n 结两端产生电动势。这就是光生伏打效应。

产生光生伏打效应三个条件:(1)由光照而产生的电子-空穴对的浓度应超过它们在热平衡时的浓度;(2)过剩的异号电荷必须受到某一不均匀静电势的作用,这种静电势可由金属-半导体结(肖特基结)产生,也可由半导体 p-n 结产生;(3)所产生的电子-空穴对必须可以运动,并有一定长的寿命^[3,9]。

太阳能电池有四个重要参数,即短路电流 I_{sc} 、开路电压 V_{oc} 、匹配负荷电流 I_{mp} (即在最大功率转换条件下的电流)及其相应电压 V_{mp} 。

图4表示发生短路电流及开路电压的情形^[9]。图5是太阳能电池的 $I-V$ 曲线,图中 I_{mp} 和 V_{mp} 表示最大功率点的电流及电压^[3]。最大功率点是当结内部电阻和负载电阻相等时的功率,由式 $P_{max} = I_{mp} \cdot V_{mp}$ 求得^[9]。好的太阳能电池有一个近似于矩形的 $I-V$ 曲线,它的 I_{mp} 值与 I_{sc} 值相近, V_{mp} 值与 V_{oc} 值相近。

硅太阳能电池的等效电路如图6所示^[10]。

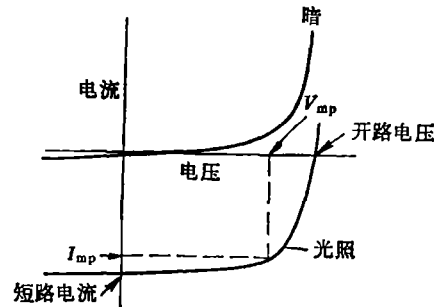


图5

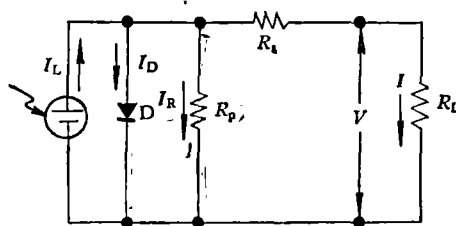


图6

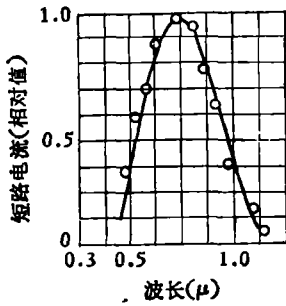


图7 硅太阳能电池的光谱灵敏度
—— 实测值；○ 计算值

负荷电流由下式给出:

$$I = I_L - I_D - I_R$$

$$= I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{kT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

如果串联电阻 R_s 非常小, 并联电阻 R_p 非常大, 则

(1) 式可以简化成

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \frac{qV}{kT} - 1 \right), \quad (2)$$

其中 I_0 为二极管的饱和电流, q 为电子电荷, k 为玻耳兹曼常数, T 为绝对温度。

若 R_L 开路, 则 $I = 0$, 因此开路电压 V_{oc} 为

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right). \quad (3)$$

若 R_L 短路, 则 $V = 0$, 因此

$$I_{sc} = I_L.$$

光电流等于短路电流, 它与入射光的光强及器件的面积成正比。由 (3) 式可以看出, 开路电压与入射光强的对数成正比, 与器件的面积无关, 与串联的数目成正比。

图7表示以 $d = 2.0 \mu$, $L_n = 0.5 \mu$, $L_p = 10 \mu$ 的硅太阳能电池为例计算的光谱灵敏度及实际测得的

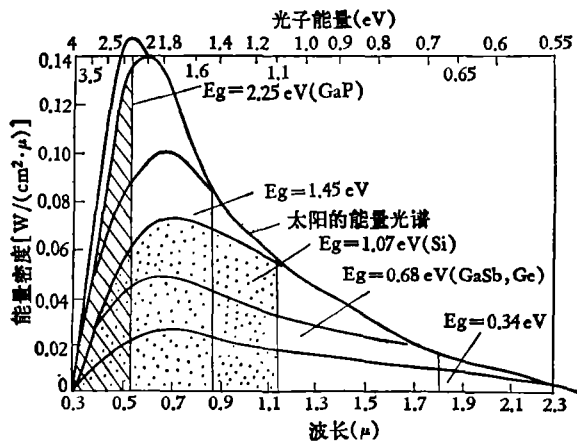


图8 太阳辐射光谱及半导体太阳能电池的回收能量光谱

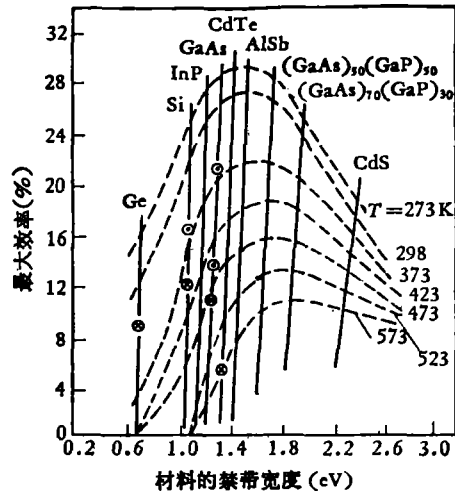


图9 各种半导体 p-n 结太阳能电池的理论转换效率及其与温度的关系

⊗ 表示实测效率; ⊙ 表示异质结实测效率

实验曲线^[11,13]。

对太阳能电池来讲, 电池的光谱灵敏度分布曲线与太阳辐射光谱分布曲线的匹配是很重要的。匹配得越好, 能量的转换效率越高。但是从图7中可以看出, 对硅电池来讲, $0.5-1.1 \mu$ 的波长范围有光谱灵敏性, 在 $0.7-0.8 \mu$ 之间灵敏度最高。 0.5μ 以下的光灵敏度小, 这是因为这时光的吸收系数大, 所生成的电子-空穴对在表面上被复合中心复合。波长大于 1.1μ 以上的光灵敏度小是由于光的能量比 Si 的禁带宽度 (1.1 eV) 小, 不产生电子-空穴对。同时, 此波段内的光实际上反射损失很大, 大部分不被吸收。所以太阳能电池材料的禁带宽度对电池所能达到的最大效率起着重要作用。图8表示到达地球表面的太阳辐射能的光谱分布与几种半导体材料的 p-n 结所能回收的光谱灵敏度^[11,13]。

图9表示对几种半导体材料(忽略结层的复合电

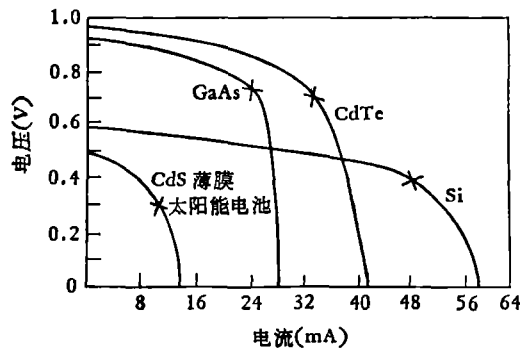


图10 几种太阳能电池的 $I-V$ 曲线
受光面积为 2 cm^2 , AM1; CdS 薄膜电池为肖特基结电池, × 号表示最大功率输出点

表 2 硅太阳能电池及硫化镉薄膜太阳能电池的基本特性

	硅单晶电池	硫化镉薄膜太阳能电池
转换效率 η	10—13%	4—8%
开路电压 V_{oc}	0.55—0.6V	0.45—0.5V
短路电流 I_{sc}	25—30mA/cm ²	17.5—30mA/cm ²
温度系数: { 转换效率 { 短路电流 { 开路电压	-0.6%/°C +0.05mA/°C·cm ² -0.002V/°C	0.0013—0.0016V/°C(-50~+150°C)
入射光强	140mW/cm ²	100mW/cm ²

流)进行计算的理想的太阳能转换效率及其与温度的关系。由于在太阳能电池的光照面上存在载流子的复合,所以实际的硅太阳能电池转换效率只有理论效率的一半,即12%左右(见图9)。从图9中可以看出,从理论上讲,GaAs, CdTe比Si有更高的能量转换效率。

图10指出几种实际太阳能电池的I-V曲线^[13]。图10中短路电流 I_{sc} 与光照面积及器件结构有关,开路电压 V_{oc} 是由p-n结扩散电位及结材料掺杂浓度、禁带宽度等条件所决定的常数。如果某一太阳能电池的I-V曲线已确定,那么该电池输出的最大功率就可以求得,可以在这根曲线下画出尽可能最大的矩形,找得 I_{mp} 和 V_{mp} ,并相乘之。最大功率和 $(V_{oc} \cdot I_{sc})$ 之比叫做曲线因子(或叫填充因子)。曲线因子也是表示太阳能电池性能的参数之一。一般太阳能电池的曲线因子为0.65—0.75左右。

一些实际太阳能电池的某些特性见表2^[11,14]。

三、应用

太阳能电池的应用,是作电源和作检测光信号的光检测元件。

在作电源方面,主要用于空间技术(人造卫星等),也作一般小功率电源使用。在空间技术中,为了使人造卫星上的电子设备获得所需要的电压和电流,常将若干个太阳能电池串联和并联起来。通常太阳能电池方

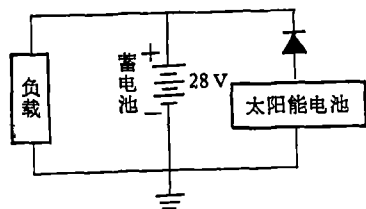


图11 卫星系统的太阳能电池电源的工作原理
光照时电源输出32V

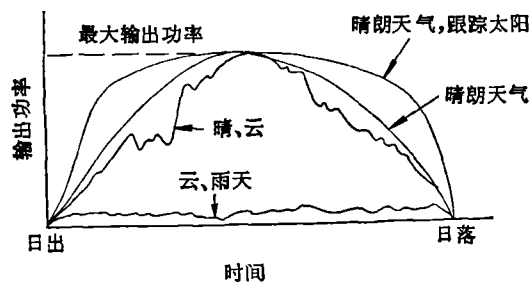


图12

阵的输出功率比卫星实际所需要的功率大很多,过剩的功率由一个调整器接收起来。工作原理如图11,当无光照时,太阳能电池的输出电压为零,二极管是处于反向偏置。这时,负载由蓄电池供电,而二极管则阻止蓄电池通过太阳能电池放电。当有光照时,太阳能电池的输出电压是32V。这时,负载由太阳能电池供电,而蓄电池也被充电。太阳能电池负载的一部分,同时被充电。太阳能电池处于光照与无光照的情况,就相当于一个按轨道运行的卫星交替地进入黑暗区和明亮区。

把太阳能电池作为小功率电源使用的装置有无人灯塔、海上浮标灯、无线电中继站、遥测仪、气象观测站、家用照明灯、晶体管收音机、电钟、电子手表及电子计算机等。这些太阳能电源装置,大多数也是把太阳能电池与蓄电池连接起来使用,以便调整电源,并在没有太阳时供电。在地面上,太阳能电池在一天内输出功率变化情况如图12所示^[13],它受到气象条件的影响。

作为光检测元件使用的主要有测量仪表和各种自动化器械、医疗器械、安全装置、防火设备等。

四、研究动态

对太阳能电池进行评价,除根据转换效率高之外,还要考虑稳定性、单位输出功率的成本及重量、耐辐照特性及操作是否简便等因素。特别是地面上应用

的电池,它的单位输出功率的成本更有重要意义。目前,在地面上应用太阳能电池,最大的障碍是成本太高,所以必须降低成本。

为了降低成本而进行的研究工作有以下几方面:

1. 降低硅材料的成本

- (1) 廉价多晶硅的批量生产技术的研 究;
- (2) 硅化合物 (SiH_4 , SiHCl_3 , SiCl_4 等) 的廉价精制技术的研究;
- (3) “太阳能电池”级多晶硅的批量生产技术的研 究。

2. 改进现有技术的方法,降低成本

- (1) 改进片状单晶、薄膜等的加工技术
 - (a) 单晶硅带的制造采用定边喂膜法 (EFG 法)、枝蔓膜状晶体生长法、横拉法等;
 - (b) 采用单晶剥离法、悬浮基板化学蒸气沉积法。
- (2) 高效率、最佳条件的设计
 - (a) 改进电池结构,如背面场电池 (BSF) 的设计,即在硅单晶背面引进一个电场,使光生载流子不在背面接触电极处复合,因而提高收集效率;
 - (b) 提高光的利用率,如采用减反射层,或采用锯齿波复盖层,能增加入射光强。这是由于表面反射光的减少和入射光的再导向,使落到收集栅极上的光再反射到电极表面上,把收集栅极引起的光损失减少一半。
- (3) 简化结构和实现制造工程的连续自 动化
 - (a) p-n 结的形成及电极排列等处理工程实现自 动化;
 - (b) 改进组装技术。
- (4) 采用标准化的生产技术,提高互换性
 - (a) 使电池结构及材料标准化;
 - (b) 使组装块结构及材料标准化;
 - (c) 使性能参数及尺寸规格标准化。

3. 采用新技术、新原理,实现高效率及低成本

- (1) 研制多晶薄膜太阳能电池,如 n-p/多晶硅/C, Ni/SiO₂/n-GaAs/Ge, n-CdS/p-InP/C, n-CdS/p-Cu₂S, p-Cu_{2-x}Te/n-CdTe/n-CdS 等;
- (2) 研制 MIS (金属-绝缘体-半导体)型太阳能电池,如 Ti/TiO₂/p-Si, Au/SiO₂/n-GaAs 等;
- (3) 改进光学上的匹配,如紫光电池,采用浅结 (1000—1500 Å)、密栅 (30 条/cm, 宽 3 μ) 使电池的光谱效应扩大到 0.3 μ,提高由短波长的光激发的载流

子收集效率;

(4) 研制异质结电池,可以改善能量的转换效率。原因是一般的 p-n 同质结的光照面厚度由光的穿透深度所决定,所以非常薄,大约 1 μ 左右。因此,其串联电阻及表面复合所造成的能量损失比较大。但如果光照面是用禁带宽度 E_g 较大的半导体材料(与衬底材料相比)构成的异质结时,由于光照面对能生成光生载流子的大部分光子透明而可以加厚,因此可以改善能量的转换效率。另一方面,光生电子-空穴对能在离表面稍深的内部产生而减少表面复合,如 (In-Sn) 氧化物/p-Si, p-AlGaAs/p-n-GaAs, n-Cds/p-InP, n-SnO₂/n-Si, n-ZnCdS/p-CdTe 等;

(5) 研制无定形半导体太阳能电池 (辉光放电法无定形硅薄膜),如 (In-Sn) 氧化物/p-i-n⁺/Al, Pt/i-n⁺/钢;

(6) 研制垂直多结电池(如图 2(b)),它是由许多 P 型和 n 型交错排列组成,光从平行于结面的方向入射。通过提高少数载流子到达 p-n 结的几率来提高少数载流子的收集效率。p-n 结间距和扩散长度之比越小,输出电流越大。

关于至今所研究的一些高效率、低成本的太阳能电池的种类和性能可参阅文献[16]。

对于空间应用的电池,则应着重研究提高其性能,而较少计及成本问题。

主要的研究内容包括:(1) 提高单电池的效率;(2) 增大方阵功率及提高重量的比功率;(3) 研究耐电子及质子辐照性能;(4) 提高方阵的可靠性;(5) 研究耐环境变化的电池,如耐湿度、真空、紫外线辐照、冷热循环、冲击等的变化。

在耐辐照性能方面所采用的具体措施是:(1) 采用 n/p 型结构;(2) 提高母体结晶的电阻率;(3) 覆盖防护玻璃等。此外,从根本上解决问题的方法是在 Si 中掺锂使它自行恢复。

目前研究较多的各种不同用途的太阳能电池及其转换效率可参阅文献[17]。

参 考 文 献

- [1] 松沢、藤崎,電子材料, 13-10(1974), 52.
- [2] 吉川重夫,テレビジョン, 24-6(1970), 415.
- [3] 吉川重夫,日本物理学会誌, 30-9(1975), 660.
- [4] 吉川重夫,電子材料, 13-10(1974), 58.
- [5] 鈴木浩夫,エレクトロニクス, 17-10(1972), 1374.
- [6] 片岡照榮,エレクトロニクス, 19-5(1974), 517.
- [7] 片岡照榮,エレクトロニクス, 17-10(1972), 1366.
- [8] J. J. Loferski, Proc. 10th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., Palo Alto, Calif., (1973).
- [9] 浜川圭弘,エレクトロニクス, 17-11(1972), 1330.
- [10] 久保田,樋口,安田,エレクトロニクス, 23-12(1978), 1129.

(下转第 341 页)

我们用光导热塑料记录了压电换能器的振动模式,见图15。

全息干涉计量术是全息技术最有成效的应用之一。除以上提到的之外,在检验光学及机械工件面形变化、分析应变、应力、风洞气流等方面,都有很大的潜力。

2. 全息信息存贮

全息存贮是光存贮技术中有希望实现高速度、大容量贮存的途径之一。可用于计算机贮存系统及用于图书、资料、文件的贮存等。光导热塑料是一种较理想的可存、取的全息存贮介质^[9]。图16是一页文字的 Fourier 变换全息图的重现象。它在光导热塑料上所占面积直径不到3mm。

3. 光学信息处理

光学信息处理是一种光学模拟运算技术。因为全息术的发展提供了记录和调制光场的有力手段,所以大大促进了光计算技术的发展。全息技术在光学信息处理中应用得十分广泛。尽管光计算本身速度很快,但是输入、输出及调制器的制作等方面遇到的问题使得光计算技术的

应用受到很大的限制。所以,创造一种可反复使用、实时、方便易行的器件是发展光计算技术的一大关键。光导热塑料的实时、原位、可反复使用等特性为光计算技术的发展提供了一种十分有希望的记录材料。我们已将它有关工作中使用。

五、结束语

光导热塑料取得的进展为全息技术的推广使用创造了条件。但是作为一种比较理想的全息记录材料,还有一系列工作尚待深入研究。如同时录像法目前应用的比较多,但对同时法的分析和了解却很不深入。此外,获得一张高质量的光导热塑料全息照相的关键是有效地抑制“无规霜变”,牵涉到充电、加热、曝光等条件的控制。我们认为这方面还有很大潜力,改进方法和设备还有许多工作可做。关于材料本身也有待于进一步研究,不断提高。

本工作中所用的实验样品是中国科学院化学研究所、中国科学院物理研究所共同研究提供的。对化学研究所参加工作的人员多年来密切有效的合作表示感谢。

参 考 文 献

- [1] D. Gabor, *Nature*, **161** (1948), 777.
- [2] E. N. Leith and J. Upatniks, *J. Opt. Soc. Am.*, **54** (1964), 1295.
- [3] J. C. Urbach and R. W. Meier, *Appl. Opt.*, **5** (1966), 666.
- [4] T. L. Credelle and F. W. Spong, *RCA Review*; **33** (1970), 206.
- [5] W. S. Colburn and E. N. Tompkins, *Appl. Opt.*, **13**(1974), 2934.
- [6] 中国科学院物理研究所、化学研究所光塑全息小组, *物理*, **3-5**(1974), 264.
- [7] H. Steinbechler, J. Smith, *Laser+Elektro Optik*, **3** (1977), 20.
- [8] U. S. Patent, 3485623, Dec. 23, 1969.
- [9] L. H. Lin and M. L. Beachamp, *Appl. Opt.*, **9** (1970), 2088.

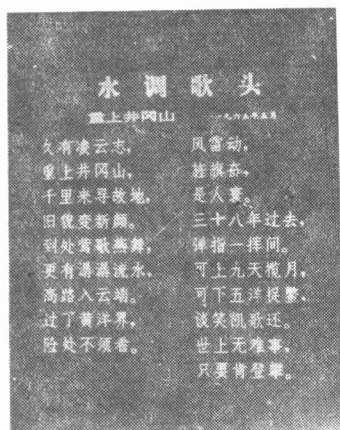


图16 Fourier 变换全息图重现象

(上接第370页)

- [11] 浜川圭弘, *エレクトロニクス*, **19-1**(1974), 48.
- [12] 浜川圭弘, *应用物理*, **44-7**(1975), 713.
- [13] M. Wolf, *J. Vac. Sci. Technol.*, **12-5** (1975), 984.
- [14] F. A. Shirand, *Advanced Energy Conversion*, **6-4**

(1966), 201.

- [15] 马场 泰, *電子材料*, **12-11**(1973), 69.
- [16] 浜川圭弘, *電子材料*, **17-4**(1978), 82.
- [17] 宇佐美晶, *電子材料*, **16-4**(1977), 93.