

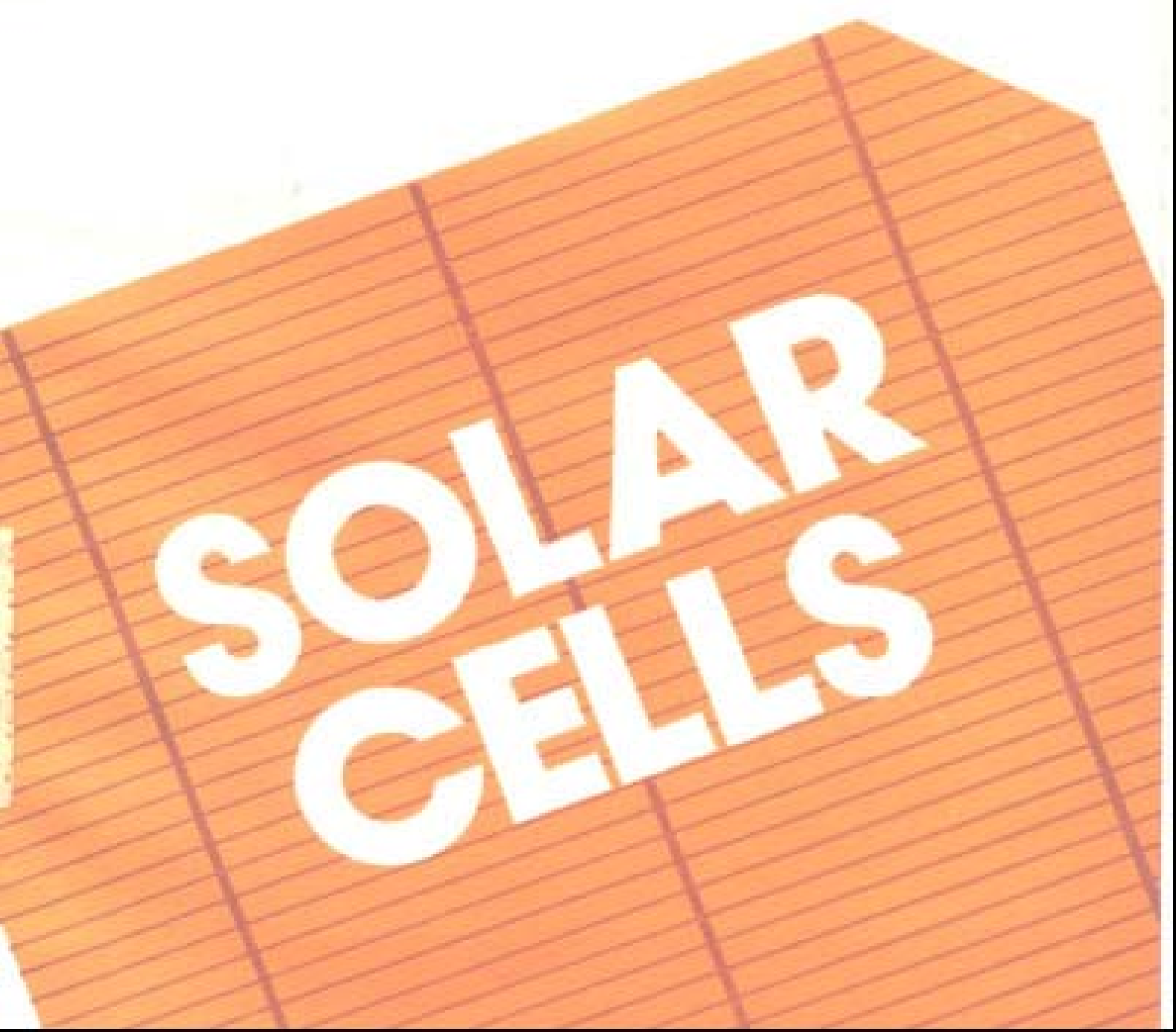
太阳能电池

工作原理、工艺和系统的应用

〔澳〕马丁·格林 著

李秀文 谢鸿礼 赵海滨等 译

刘 熙 校



SOLAR
CELLS

72.1787
466

太 阳 电 池

工作原理、
工艺和
系统的应用

[澳] 马丁·格林 著
李秀文 谢鸿礼 赵海滨等 译
刘 熙 校

34-20/03



内 容 简 介

本书介绍了太阳和太阳电池的知识和基本理论,分析了限制太阳电池转换效率的因素,详细描述了硅太阳电池、组件、方阵和系统的设计、制造工艺、性能测试和应用。

对聚光电池、聚光系统和其它半导体材料的太阳电池以及关于太阳电池研究取得的新进展亦有相应的描述。

本书可供研制、生产和应用太阳电池的技术人员阅读,也可作为大专院校有关专业师生的教学参考书。

SOLAR CELLS

Operating Principles,
Technology,
and System Applications
MARTIN A. GREEN

太 阳 电 池

工作原理、工艺和系统的应用

[澳] 马丁·格林 著

李秀文 谢鸿礼 赵海滨等 译

刘 熙 校

责任编辑: 坚如

*

电子工业出版社出版 (北京市万寿路)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京通县建新印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 8.75 字数: 233.5千字

1987年8月第1版 1987年9月第1次印刷

印数: 2500册

定价: 2.10元

统一书号: 15290·137

ISBN 7-5053-0067-9/TN40

前 言

当阳光照射到太阳电池时，可在没有机械转动或污染性副产物的情况下将入射能直接转换为电能。太阳电池早已不再是实验室仅有的珍品，它已有廿多年的使用历史。开始是提供空间电源，近来已用于地面电源系统。在不久的将来，这类电池的制造技术很可能得到显著改进。这样，太阳电池将可以在合适的价格下生产，从而对世界能源需求做出重要贡献。

本书将重点叙述太阳电池的基本工作原理和设计，目前采用的电池制造工艺和即将实施的改进工艺，以及应用这些电池的系统的設計中的重要考虑。本书前面几章综述了阳光的性质、构成电池的半导体材料的有关性质以及这两者之间的相互作用。接下来几章详细地论述了太阳电池设计中的重要因素、现行的电池制造工艺以及未来可能的工艺。最后几章论及系统的应用，包括目前市售的小型系统和将来可能提供的住户和中心电源系统。

本书首先可供被这一迅速发展的领域所吸引的日益增多的工程技术人员和科学工作者使用，也适合用作大学生和研究生的课本。本书尽力使其内容适合于从不同专业进入这个领域的读者的需求。例如，包括了与理解太阳电池工作有关的半导体性质的形象性的综述。对于许多读者来说，这可作为一个简捷的复习，而对其他读者则可提供一个便于理解以后各章节内容的梗概。不管基础如何，通过学习本书并做练习将使读者在从事这个领域的工作时能很好地胜任。

我要对那些为数众多以致不能一一提及的人们表示感谢。他们在过去十多年中促进了我对太阳电池的兴趣。我要特别感谢 A·布莱克尔 (Andy Blakers), B·高德福莱 (Bruce Godfrey), P·哈尔特 (Phill Hart) 和 M·韦理森 (Mike Willi-

son) 的建议和间接支持我的这一尝试。特别要感谢 G·盖蓝恩 (Gelly Galang) 帮我准备底稿以及 J·妥德 (John Todd) 和 M·韦理森 为本书准备照片。最后我要感谢 J·格林 (John Green) 在本书进展正紧张的时候给予的支持和鼓励。

M·A·格林

译者的话

太阳能电池属于物理电源，是一种特殊的半导体器件。由于它具有结构简单、制造方便、使用寿命长、维护简便、可靠性高、原材料丰富、无污染、无噪音等优点，又有太阳作为它的取之不尽、用之不竭的能源，因此，太阳能电池不仅在人造卫星、宇宙飞船等特殊应用中早就得到重视，而且，在诸如高山、海岛、牧场、人烟稀少的边远地区也已迅速推广。此外，它作为一种“光敏器件”已正在光学仪器、自动控制等领域与光电管相抗衡，无疑它将具有很强的竞争力。

太阳能电池应用的迅速发展已经引起从事教学、科研、生产和应用的有关学者、工程技术人员极大兴趣和关注，并吸引了越来越多的人加入到太阳能电池研制、生产的行列。

本书作者马丁·格林 (Martin A. Green) 教授是澳大利亚新南威尔士大学联合微电子研究中心太阳能电池实验室负责人。他不仅在 MIS 太阳能电池理论方面造诣较深，而且在工艺研究方面也有不少成果。1984 年，他领导的实验室所研制的 MINP 单晶硅太阳能电池的转换效率已达 19.1% (AM 1.5, 28°C)，这是至今国际上所报导的最高水平。

本书比较系统扼要地介绍了太阳能电池的基本理论；分析了限制太阳能电池转换效率的因素；详细描述了硅太阳能电池、组件、方阵和系统的设计、制造工艺、性能测试和应用，以及这方面的最新进展；同时，它还提及聚光电池及其他半导体材料的太阳能电池，内容比较丰富。它可供从事太阳能电池研制、生产和应用部门的技术人员以及有关专业师生阅读。

参加本书翻译的有电子工业部第十八研究所的谢鸿礼、申春幸、郭印池、杜福生、郑彝盎、赵海滨、宋礼彬、胡宏勋、李秀

文、罗荣萱、赵秀田、王保民、张德群、伍炳珍十四位同志（按参加翻译工作量多少顺序排列）。其中李秀文、谢鸿礼、赵海滨承担了预审。全书最后由刘熙和李秀文同志进行了统一审校和加工整理。第十八研究所毕道治总工程师对此书的翻译与出版工作给予了热情的关怀和支持，并亲自审校了部分译稿。

目 录

前 言

第一章 太阳电池和太阳光	1
1.1 引言	1
1.2 太阳电池发展概况	1
1.3 阳光的物理来源	2
1.4 太阳常数	3
1.5 地球表面的阳光强度	4
1.6 直接辐射和散射辐射	6
1.7 太阳的视运动	8
1.8 太阳的日照数据	8
1.9 小结	9
第二章 半导体的特性	13
2.1 引言	13
2.2 晶体结构和取向	13
2.3 禁带宽度	16
2.4 允许能态的占有几率	16
2.5 电子和空穴	20
2.6 电子与空穴的动力学	21
2.7 允许态的能量密度	23
2.8 电子和空穴的密度	24
2.9 IV族半导体的键模型	25
2.10 III族和V族掺杂剂	27
2.11 载流子浓度	28
2.12 掺杂半导体中费密能级的位置	31
2.13 其他类型杂质的影响	32
2.14 载流子的传输	33
2.14.1 漂移	33

2.14.2	扩散	35
2.15	小结	36
第三章	产生、复合及器件物理学的基本方程	39
3.1	引言	39
3.2	光与半导体的相互作用	39
3.3	光吸收	42
3.3.1	直接带隙半导体	42
3.3.2	间接带隙半导体	43
3.3.3	其他吸收过程	47
3.4	复合过程	49
3.4.1	弛豫到平衡	49
3.4.2	辐射复合	49
3.4.3	俄歇复合	51
3.4.4	通过陷阱的复合	52
3.4.5	表面复合	53
3.5	半导体器件物理学的基本方程	54
3.5.1	引言	54
3.5.2	泊松方程	54
3.5.3	电流密度方程	55
3.5.4	连续方程	55
3.5.5	方程组	56
3.6	小结	57
第四章	p-n结二极管	60
4.1	引言	60
4.2	p-n结的静电学	61
4.3	结电容	64
4.4	载流子注入	65
4.5	准中性区的扩散流	67
4.6	暗特性	69
4.6.1	准中性区中的少数载流子	69
4.6.2	少数载流子电流	71
4.7	光照特性	73

4.8	太阳电池的输出参数	76
4.9	有限电池尺寸对 I_0 的影响	77
4.10	小结	79
第五章	效率的极限、损失和测量	81
5.1	引言	81
5.2	效率的极限	81
5.2.1	概要	81
5.2.2	短路电流	81
5.2.3	开路电压和效率	83
5.2.4	黑体电池的效率极限	85
5.3	温度的影响	86
5.4	效率损失	87
5.4.1	概要	87
5.4.2	短路电流损失	88
5.4.3	开路电压损失	89
5.4.4	填充因数的损失	90
5.5	效率测试	93
5.6	小结	96
第六章	标准硅太阳电池工艺	98
6.1	引言	98
6.2	砂子还原为冶金级硅	100
6.3	冶金级硅提纯为半导体级硅	101
6.4	半导体级多晶硅变成单晶硅片	102
6.5	单晶硅片制成太阳电池	103
6.6	太阳电池封装成太阳电池组件	105
6.6.1	组件结构	105
6.6.2	电池的工作温度	108
6.6.3	组件的耐久性	108
6.6.4	组件电路设计	110
6.7	能量计算	112
6.8	小结	113
第七章	改进的硅电池工艺	116

第一章 太阳电池和太阳光

1.1 引言

太阳电池利用半导体材料的电子特性把阳光直接转换成电能。在以下几章里，将从太阳电池工作的基本物理原理出发研究这个微妙的能量转换过程。以此为基础，推导了定量表示能量转换关系的数学公式。接着，叙述了目前商用的、以半导体硅为主体材料的太阳电池的生产工艺和该工艺的改进，以及可能明显降低成本的另一些工艺。最后，讨论了太阳电池系统的设计，涉及的范围从应用于边远地区的小型电源到将来可能应用的住户用电和中心电站。

本章简要地回顾了太阳电池的发展历史，叙述了太阳及其辐射的特性。

1.2 太阳电池发展概况

太阳电池依靠光伏效应工作。1839年贝克勒尔(Becquerel)首先报导了这一效应，他观察到浸在电解液中的电极之间有光致电压。1876年，在硒的全固态系统中也观察到了类似现象。随后，发展了以硒和氧化亚铜为材料的光电池。虽然1941年就有了关于硅电池的报导，但直到1954年才出现了现在的硅电池的第一代产品。因为它是第一个能以适当效率将光能转为电能的光伏装置，所以它的出现标志着太阳电池研制工作的重大进展。早在1958年，这种电池就用作宇宙飞船的电源。到60年代初，供空间应用的电池的设计已经成熟。此后十多年，太阳电池主要用于空间。这个阶段更详细的情况见参考文献^[1,12]。

70年代初，硅电池的发展经历了一个革新阶段，能量转换效

率得到明显提高。大约与此同时，人们对太阳电池的地面应用重又发生了兴趣。到 70 年代末，地面应用的太阳电池的数量已超过了空间应用的数量。成本也随着生产量的增加而明显下降。80 年代初，出现一些新的工艺，这些工艺正通过试生产进行评价，这就为后十年进一步降低成本做好准备。随着成本的不断降低，这种通过光伏效应利用太阳能的方法的商业应用范围会越来越大。

1.3 阳光的物理来源

来自太阳的辐射能对地球上的生命是必不可少的。它决定地球表面的温度，而且实际上提供了地球表面和大气层中自然过程的全部能量。

太阳实质上是一个由其中心发生的核聚变反应所加热的气体球。热物体发出电磁辐射，其波长或光谱分布由该物体的温度所决定。完全的吸收体，即“黑体”，所发出的辐射的光谱分布由普朗克辐射定律确定^(1,2)。如图 1.1 所示，这个定律表明，当物体被加热时，不仅所发出的电磁辐射总能量增加，而且发射的峰值波长也变短。我们几乎都有这样的经验，当金属被加热时，随着温度升高，其颜色由红变黄，这就是一个例证。

据估计，太阳中心附近的温度高达 20 000 000 K。然而，这并不是决定太阳电磁辐射的温度。来自太阳深处的强烈辐射大部分被太阳表面附近的负氢离子层所吸收。这些离子对很大波长范围的辐射起着连续吸收体的作用。这个负氢离子层积聚的热量引起了对流，通过对流，将能量传过光阻挡层（图 1.2）。能量一旦传过光阻挡层之大部分，就重新被辐射到较易透射的外层气体中。这个将对流传热转为辐射传热的界限明显的层就称为光球。光球层的温度比太阳内部的温度低得多，但仍然高达 6000 K。光球层的辐射光谱基本上是连续的电磁辐射光谱，它和预期的黑体在此温度下的辐射光谱很接近。

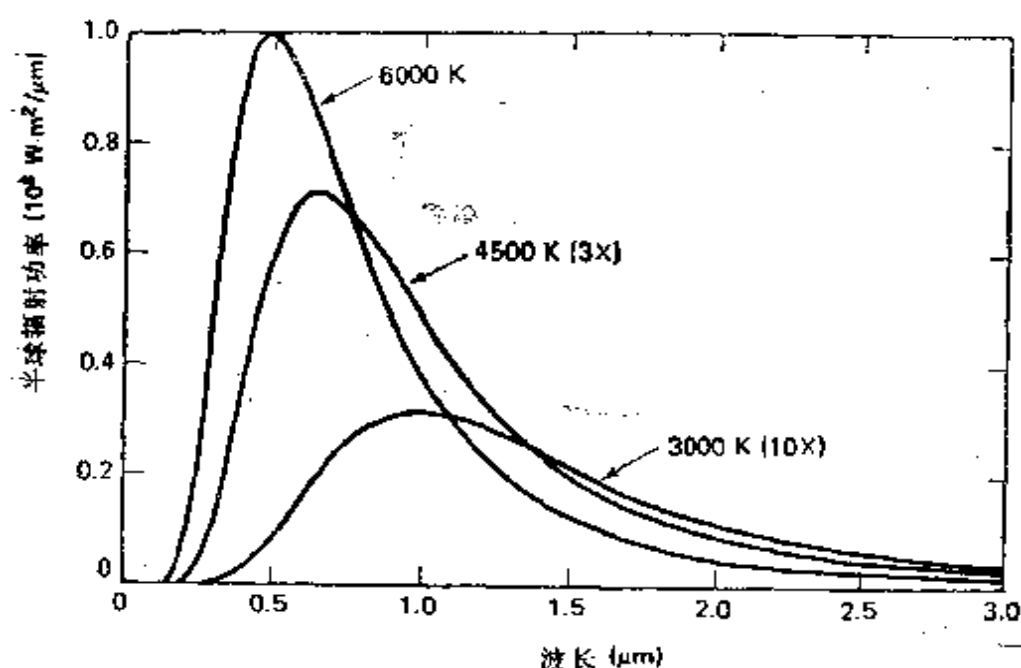


图 1.1 不同黑体温度的普朗克黑体辐射分布

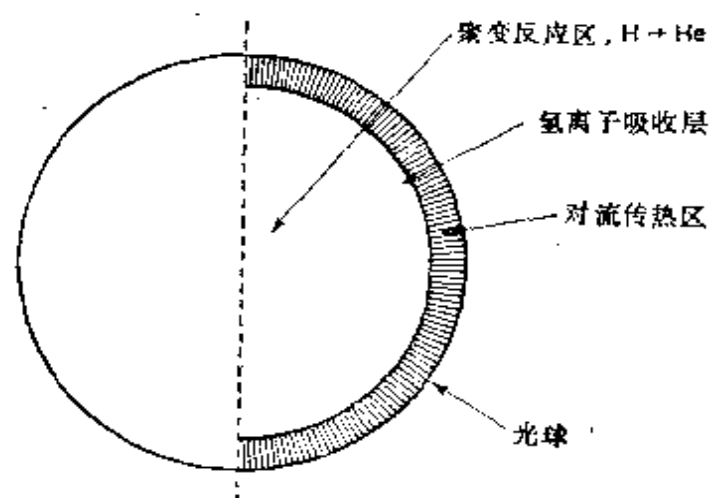


图 1.2 太阳的主要特征

1.4 太阳常数

在地球大气层之外，地球-太阳平均距离处，垂直于太阳光方向的单位面积上的辐射能基本上为一常数。这个辐射强度称为太阳常数，或称此辐射为大气质量为零（AMO）的辐射，其理

由将在下面叙述。

目前，在光伏工作中采用的太阳常数值是 1.353kW/m^2 *。这个数值是由装在气球，高空飞机和宇宙飞船上的仪器的测量值加权平均而确定的^[1,3]。从图 1.3 最上面的两条曲线可以看出，AM0 的辐射光谱分布不同于理想黑体的光谱分布^②。这是由于诸如太阳大气层对不同波长的辐射有不同的透射率这样一些影响造成的。目前采用的分布值见参考文献 1.3 中的表。阳光能量的精确分布对于太阳电池的工作很重要，因为这些电池对于不同波长的光有不同的响应。

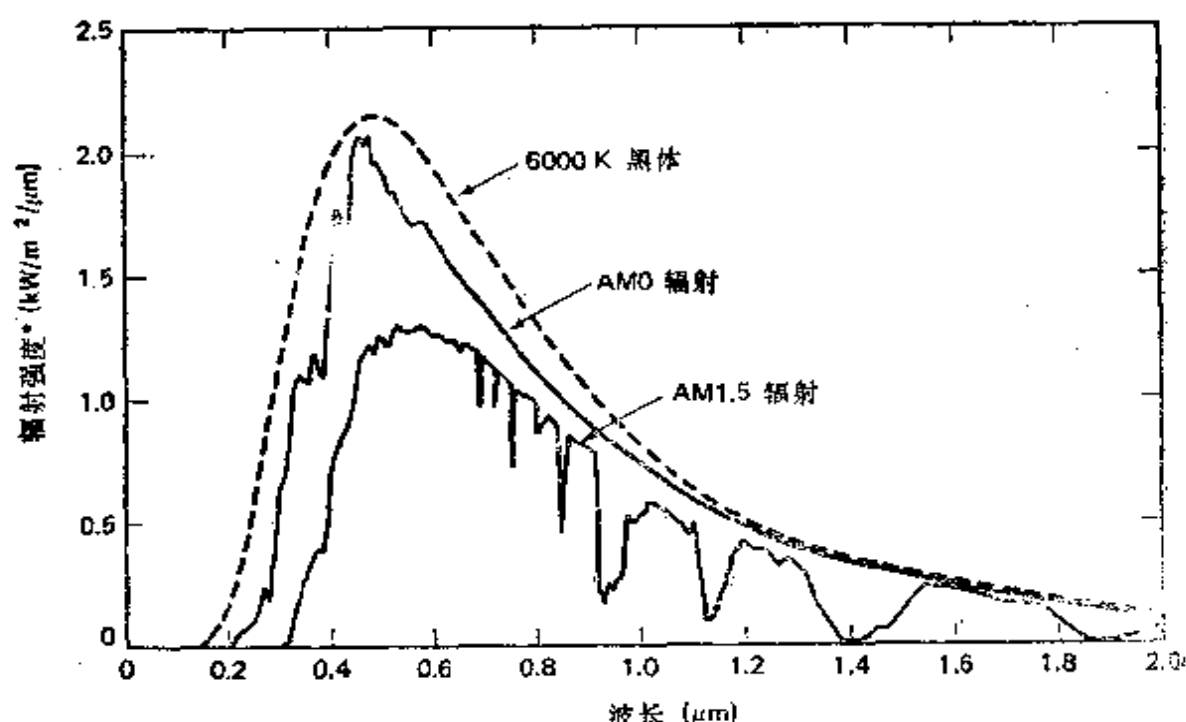


图 1.3 阳光的光谱分布

图中示出 AM0 和 AM1.5 辐射的光谱分布，同时还示出假定太阳是 6000 K 的黑体时所预期的太阳辐射的光谱分布。

(*原文为能量分布，这里是译成习惯用法——译者)

1.5 地球表面的阳光强度

阳光穿过地球大气层时，至少衰减了 30%。造成衰减的原因

* 国际上现已改为 $1.367 \pm 0.007\text{kW/m}^2$ 。——译者

是^[1.43];

1. 瑞利散射或大气中的分子散射。这种散射对所有波长的太阳光都有衰减作用,但对短波长的光衰减最大。
2. 悬浮微粒和灰尘引起的散射。
3. 大气,特别是其组成气体——氧气、臭氧、水蒸气 and 二氧化碳的吸收。

图 1.3 中最下面的曲线表示到达地球表面的阳光的典型光谱分布,同时示出与分子吸收有关的吸收带。

衰减的程度变化很大。晴天,决定总入射功率的最重要参数是光线通过大气层的路程。太阳在头顶正上方时,路程最短。实际路程和此最短路程之比称为光学大气质量。太阳在头顶正上方时,光学大气质量为 1,这时的辐射称为大气质量 1 (AM1) 的辐射。当太阳和头顶正上方成一个角度 θ 时,大气质量由下式得出:

$$\text{大气质量} = \frac{1}{\cos\theta} \quad (1.1)$$

因此,当太阳偏离头顶正上方成 60° 角时,辐射为 AM2 辐射。估算大气质量的最简易方法是测量高度为 h 的竖直物体投射的阴影长度 s 。于是,

$$\text{大气质量} = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{h}\right)^2} \quad (1.2)$$

在其他大气变量不变的情况下,随着大气质量的增加,到达地球的能量在所有波段都遭到衰减,在图 1.3 中的吸收带附近衰减更为严重。

因此,与地球大气层外的情况相反,地面阳光的强度和光谱成分变化都很大。为了对不同地点测得的不同太阳电池的性能进行有意义的比较,就必须确定一个地面标准,然后参照这个标准进行测量。虽然情况还在不断变动,但在写本书时,最广泛使用的地面标准是表 1.1 中的 AM1.5 的分布,这些数据也已绘制成

图 1.3 中的地面光谱分布曲线。1977 年美国政府的光伏计划将此分布按比例放大后作为标准^[1.5]。按比例放大的目的是使得总功率密度为 $1\text{kW}/\text{m}^2$ ，即接近地球表面接收到的功率密度的最大值。

1.6 直接辐射和散射辐射

到达地面的太阳光，除了直接由太阳辐射来的分量之外，还包括由大气层散射引起的相当可观的间接辐射或散射辐射分量，所以其成分更为复杂。甚至在晴朗无云的天气，白天里散射辐射分量也能占水平面所接收的总辐射量的 10~20%。

在阳光不足的天气，水平面上的散射辐射分量所占的百分比通常要增加。根据所观察到的数据^[1.6]，可以看出下列统计趋势。对于特别缺少日照的天气，大部分辐射是散射辐射。一般说来，如果一天中接收到的总辐射量低于一年相同时间的晴天所接收到的总辐射量的三分之一，那么，这种日子里接收到的辐射便大部分是散射辐射。对介于前面提到的晴天和阴天之间、接收到的辐射约为晴天的一半的天气，通常所接收到的辐射中有 50% 是散射辐射。坏天气不仅使世界上一些地区只能收到少量的太阳辐射能，而且其中相当大部分是散射辐射。

散射阳光的光谱成分通常不同于直射阳光的光谱成分。一般地说，散射阳光中含有更丰富的波长较短的光或“蓝”波长的光，这使太阳能电池系统接收到的光的光谱成分进一步变化。当采用通常在水平面上记录的辐射数据来计算倾斜面上的辐射时，来自天空不同方向的散射辐射分布的不确定性给计算又引入一些误差。尽管围绕太阳的空际是产生散射辐射的最主要原因，通常仍假定散射光是各向同性的（在所有方向都是均匀的）。

聚光式光伏系统只能在一定角度内接收太阳光。为了利用太阳光的直接辐射分量，系统必须随时跟踪太阳，与此同时，散射辐射分量浪费了。这就抵消了这种跟踪系统总是垂直于太阳射线

表 1.1 太阳光谱-大气质量1.5*

(*总功率密度 = 832 W/m²。来源: 参考资料1.5)

波长 (μm)	W/(m ² - μm)	波长 (μm)	W/(m ² - μm)	波长 (μm)	W/(m ² - μm)	波长 (μm)	W/(m ² - μm)
0.295	0	0.595	1262.61	0.870	843.02	1.276	344.11
0.305	1.32	0.605	1261.79	0.875	835.10	1.288	345.69
0.315	20.96	0.615	1255.43	0.8875	817.12	1.314	284.24
0.325	113.48	0.625	1249.19	0.890	807.83	1.335	176.28
0.335	182.23	0.635	1243.79	0.9075	782.87	1.384	2.42
0.345	234.43	0.645	1233.36	0.915	778.97	1.432	30.06
0.355	283.01	0.655	1183.02	0.925	217.12	1.457	67.14
0.365	355.88	0.665	1228.40	0.930	163.72	1.472	59.89
0.375	386.80	0.675	1210.08	0.940	248.12	1.542	240.85
0.385	381.78	0.685	1200.72	0.950	231.30	1.572	226.14
0.395	492.18	0.695	1181.24	0.955	255.61	1.599	220.46
0.405	751.72	0.6983	973.53	0.965	272.69	1.608	211.76
0.415	822.45	0.700	1173.31	0.975	539.64	1.626	211.26
0.425	842.26	0.710	1152.70	0.985	496.64	1.644	201.85
0.435	890.55	0.720	1133.83	1.018	585.94	1.650	199.68
0.445	1077.07	0.7277	974.30	1.082	486.20	1.676	180.50
0.455	1162.43	0.730	1110.93	1.094	448.74	1.732	161.59
0.465	1180.61	0.740	1086.44	1.098	486.72	1.782	136.65
0.475	1212.72	0.750	1070.44	1.101	500.57	1.862	2.01
0.485	1180.43	0.7621	733.08	1.128	100.86	1.955	39.43
0.495	1253.83	0.770	1036.01	1.131	116.87	2.008	72.58
0.505	1242.28	0.780	1018.42	1.137	108.68	2.014	80.01
0.515	1211.01	0.790	1003.66	1.145	755.44	2.057	72.57
0.525	1244.87	0.800	988.11	1.147	139.19	2.124	70.29
0.535	1299.51	0.8059	860.28	1.178	374.29	2.155	64.76
0.545	1273.47	0.825	932.74	1.189	383.27	2.201	68.29
0.555	1276.14	0.830	923.87	1.192	424.85	2.266	62.52
0.565	1277.74	0.835	914.95	1.222	382.57	2.320	57.03
0.575	1292.51	0.8465	407.11	1.235	363.81	2.338	53.57
0.585	1234.55	0.860	857.46	1.264	323.88	2.356	50.01

从而能接收到最大功率密度之优点。

1.7 太阳的视运动

地球每天绕虚设的地轴旋转一周，地轴相对于地球绕太阳公转的轨道平面有固定的取向。这个方向与轨道平面的夹角即太阳的赤纬 ($23^{\circ}27'$)。由于上述关系，太阳相对于地球上某一固定点的观察者做视运动的详细情况也许还不为人们所熟悉。

图 1.4 示出太阳对于一个处于北纬 35° 的观察者的视运动。在任意给定的一天，太阳视运动的轨道平面和观察者站立的垂直方向所成角度，等于其所在地点的纬度值。在两分点的时候（3 月 21 日和 9 月 23 日），太阳从正东升起由正西落下，因此，在春分和秋分这两天，太阳在正午的高度等于 90° 减去纬度。夏至和冬至（对北半球分别为 6 月 21 日和 12 月 22 日，而南半球则相反），正午的太阳高度正好比两分点增加或减少一个地球赤纬（有时称方位角） ($23^{\circ}27'$)。

1.8 太阳的日照数据

在设计光伏系统时，最理想的情况是掌握有该系统安装地的日照情况的详细记录。不仅需要直射和散射光的数据，而且相应的环境温度和风速及风向的数据也是有用的。尽管世界各地有着许多监测站对所有这些参数进行监测，但目前从经济上考虑，光伏系统只在边远地区使用才有利，而边远地区未必能得到这些数据。

在给定地点，有效日照不仅取决于象纬度、高度、气候类别和主要的植被这样的总地理特征，而且也强烈地取决于当地的地理特征。太阳日照分布图尽管未能考虑各地的地理特征，但对世界上不同地方仍然有效。这些图通常是将实测得的日照数据遍布世界各地的日照时间监测网估算的数据综合而绘制成的。

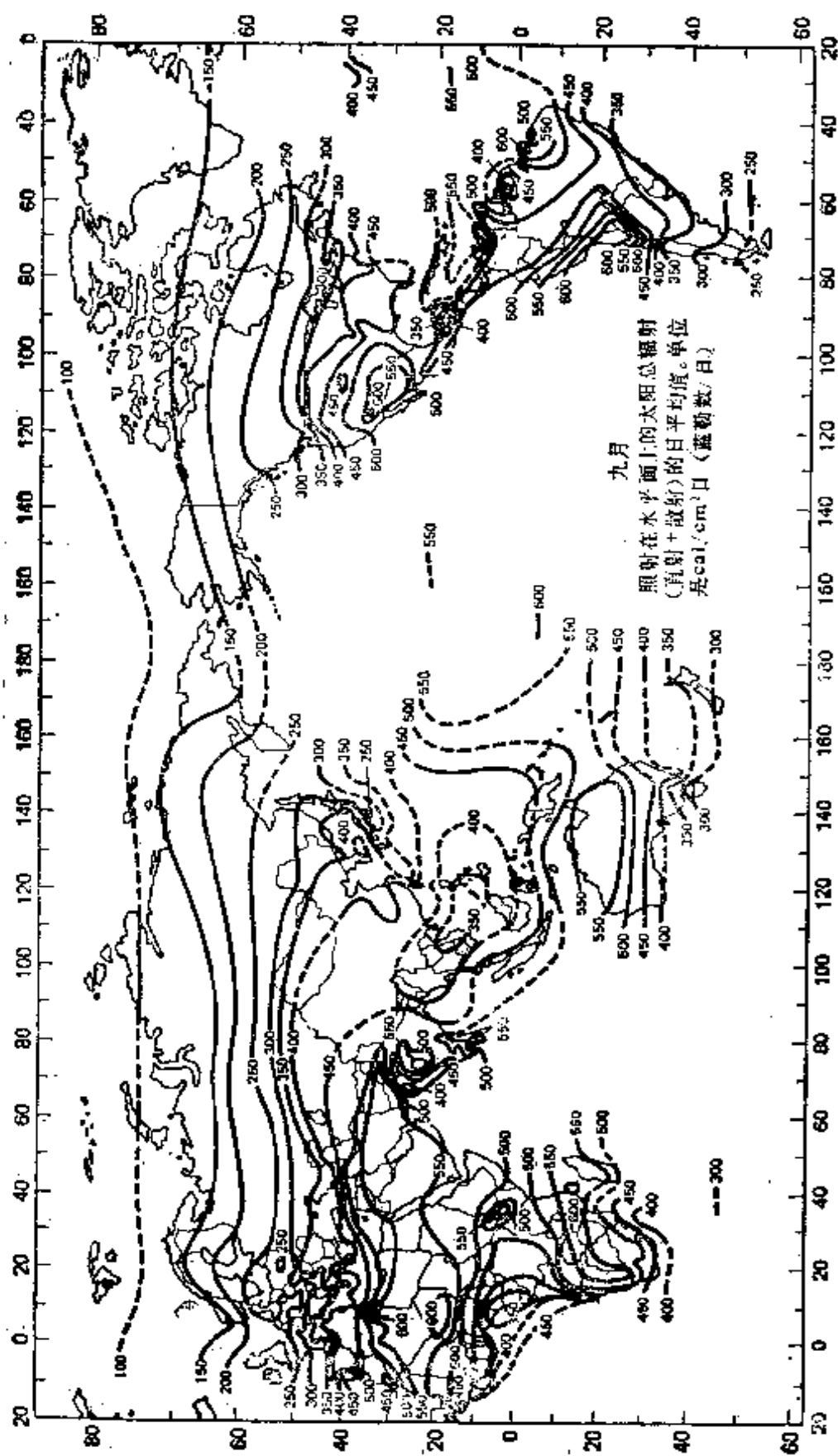


图 1.5 九月份太阳能在世界上的分布

等日照线的值是用蓝勒 (langley) 数表示的照射到水平面上的太阳的总辐射的日平均值。1 蓝勒等于 1 cal/cm^2 。换算成 MJ/m^2 要乘以 0.0418。换算成 kW/m^2 要乘以 0.0116。九月份太阳能的分布大致表示出该地点年平均的日辐射量。其他月份的类似曲线见参考文献 (1.7)

的情况就复杂些。地面阳光的利用率，强度和光谱成分的变化显著且无法预测。晴天，阳光通过大气层的路程，即光学大气质量是一个重要的参数。对不太理想的天气，阳光的间接辐射，即散射辐射部分尤为重要。合理地估算每年在水平面上接收到的总辐射量（直射 + 散射），对于世界上大部分地区是有实用价值的。但是，当将这些估算数据用于具体地点时，由于各地地理条件有很大差异，可能引入误差，而在换算成倾斜面上的辐射时，得到的是近似值。

练 习 题

1.1 已知太阳到地球、水星和火星的平均距离分别为 $1.50 \times 10^{11} \text{m}$ ， $5.8 \times 10^{10} \text{m}$ 和 $2.28 \times 10^{11} \text{m}$ ，请估算水星和火星的太阳高度。

1.2 太阳在相对水平面成 30° 角的高度，其相应的大气质量是多少？

1.3 计算 6 月 21 日中午在悉尼（南纬 34° ），圣弗朗西斯科（北纬 33° ）和新德里（北纬 29° ）的太阳高度。

1.4 夏至中午在阿尔伯克基、新墨西哥（北纬 35° ）总辐射是 60mW/cm^2 ，假定 30% 是散射辐射，并且取如下近似：组件周围地面无反射，散射辐射在空间是均匀的。试估算与水平成 45° 角的面朝南的平面上的辐射强度。

参 考 文 献

- [1.1] M. Wolf, "Historical Development of Solar Cells," in *Solar Cells*, ed. C. E. Backus (New York, IEEE Press, 1976).
- [1.2] R. Siegel and J. R. Howell, *Thermal Radiation Heat Transfer* (New York, McGraw-Hill, 1972).
- [1.3] M. P. Thekackara, *The Solar Constant and the Solar Spectrum Measured from a Research Aircraft*, NASA Technical Report No. R-351, 1970.
- [1.4] P. R. Gast, "Solar Radiation," in *Handbook of Geophysics*, ed. C. F. Campan et al. (New York, Macmillan, 1960), pp. 14~16 to 16~30.
- [1.5] *Terrestrial Photovoltaic Measurement Procedures*,

Report ERDA/NASA/1022~77/18, June 1977.

- (1.6) B. Y. Liu and R. C. Jordan, "The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation," *Solar Energy* 4 (July 1960), 1~19.
- (1.7) G. O. G. Löf, J. A. Duffie, and C. G. Smith, *World Distribution of Solar Energy*, Report No. 21, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, July 1966.

第二章 半导体的特性

2.1 引言

在第一章中概述了阳光的特性，现在该看看太阳能光伏转换中的另一个重要角色——半导体材料的特性了。

本章的目的并不是从基本原理出发严格地论述半导体的特性，而是着重叙述那些对于太阳电池的设计和使用非常重要的半导体性质。因此，本章对已经熟悉半导体性质的读者可作为一个简捷的复习，而对那些不怎么熟悉这些性质的读者，本章有足够资料为他们理解以后各章内容打好基础。为加强这个基础，后一类读者可选一本更深入论述半导体性质的专著作为参考书〔2.1~2.4〕。

2.2 晶体结构和取向

本书所谈到的大部分光伏材料都属于晶体，起码在微观上是如此。理想晶体的特征是组成晶体的原子有规则地作周期性的排列。按照这样有规则的排列，可由小构造单元重叠成整个晶体。最小的这种重复单元称为“原胞”。这种原胞当然包含有重现晶体中原子位置所需的全部参数，但它们常常具有不规范的形状。因此，采用较大的单位晶胞（简称单胞）对工作较为方便，单胞也包含以上的参数，但形状较简单。例如，图 2.1（a）表示面心立方原子排列的单胞，而图 2.1（b）则表示相应的原胞。单胞的三条棱是正交的，而原胞则不然。单胞的棱的长度称为晶格常数。

晶体内平面的取向可利用密勒指数系统用单胞结构来表示。

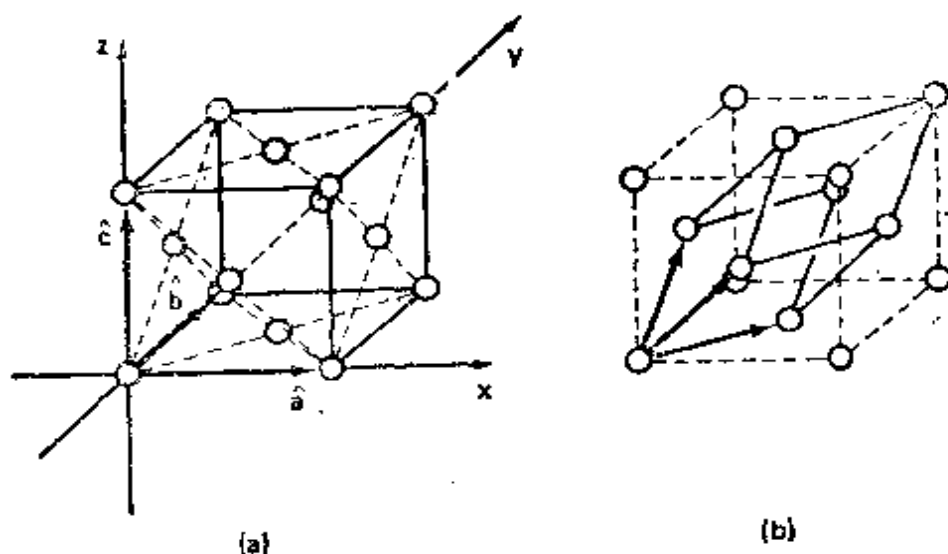


图 2.1

- (a) 面心立方原子排列的单元。选择这样的单元以便其三条棱是正交的，
 矢量 $\hat{a}$ 、 $\hat{b}$ 和 $\hat{c}$ 是每个方向上的单位矢量；
 (b) 相同原子排列的原胞

如图 2.1 (a) 所示，用沿单胞的三条棱所作的三个矢量作为坐标系的坐标轴，设想要定方位的平面通过坐标系原点，然后考虑平行于这个平面且通过坐标轴上原子位置的下一个平面。图 2.2 示出一个例子，在此例子中，沿每个轴的截距是离原点为 1、3 和 2 个原子间隔，取倒数得出 1、1/3 和 1/2。具有相同比例的最小整数是 6、2 和 3。因此，该平面用密勒指数表示为 (623) 平面。负截距可用在相应的数的上方加一横线表示(例如 -2 可写成 $\bar{2}$)。

晶体内的方向用矢量符号的缩写形式表示，在所求方向上的矢量可按比例缩放，因此可用 $h\hat{a} + k\hat{b} + l\hat{c}$ 的形式表示。这里 $\hat{a}$ 、 $\hat{b}$ 和 $\hat{c}$ 是沿着如图 2.1 (a) 所示的坐标系的各个轴的单位矢量， h 、 k 和 l 是整数。因此，这个方向用 $[hkl]$ 方向来描述。用方括号表示方向，以有别于密勒指数。注意：对于立方单胞来说， $[hkl]$ 方向垂直于 (hkl) 平面。

最后，在晶体结构内部存在着等值的平面。例如，对于图 2.1 (a) 的面心立方晶格来说，(100)，(010) 和 (001) 平面

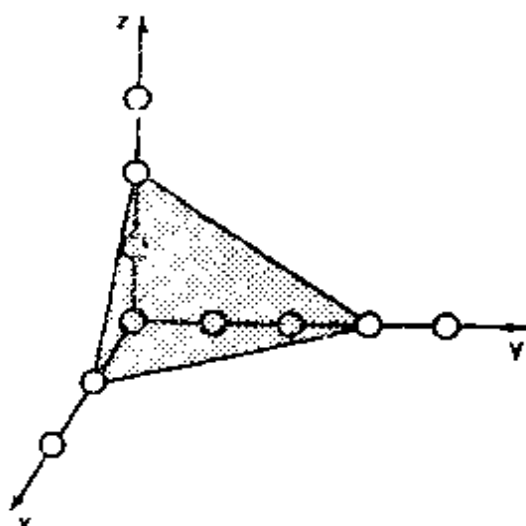
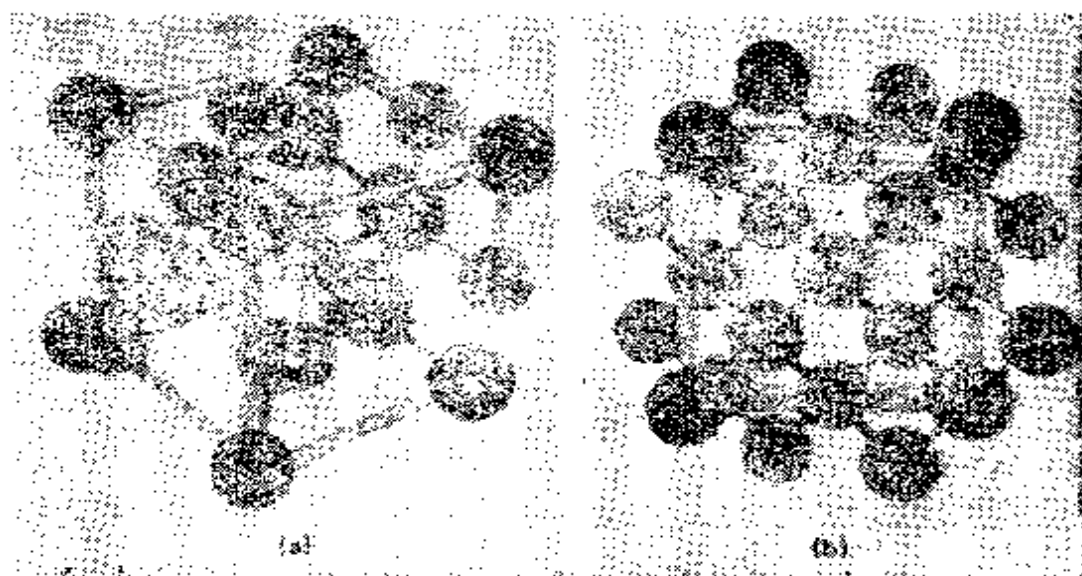


图2.2 用密勒指数 (623) 描述的晶体平面

的区别只依赖于原点的选择。一组相应的等值平面集合起来称为 $\{100\}$ 组，在此情况下，使用大括号。

图 2.3 (a) 示出在许多半导体中发现的对太阳能电池技术起重要作用的原子排列，这些是硅 (Si)、砷化镓 (GaAs) 和硫化镉 (CdS) 三种晶体的排列。后两种是晶体结构中含有一种以上原子的化合物半导体，这种排列通常称为金刚石晶格或内锌矿晶格 (对于象 GaAs 那样的化合物半导体)。如图表明的那样，这种晶体的单胞是立方体。图 2.3 (b)~(d) 示出从所选择的方向看到的原子排列。这些图使我们更看清了原子在不同方向自然排列的重大差别，这些差别引起了太阳能电池工艺中重要的方向变化 (例如：见习题 2.2)。



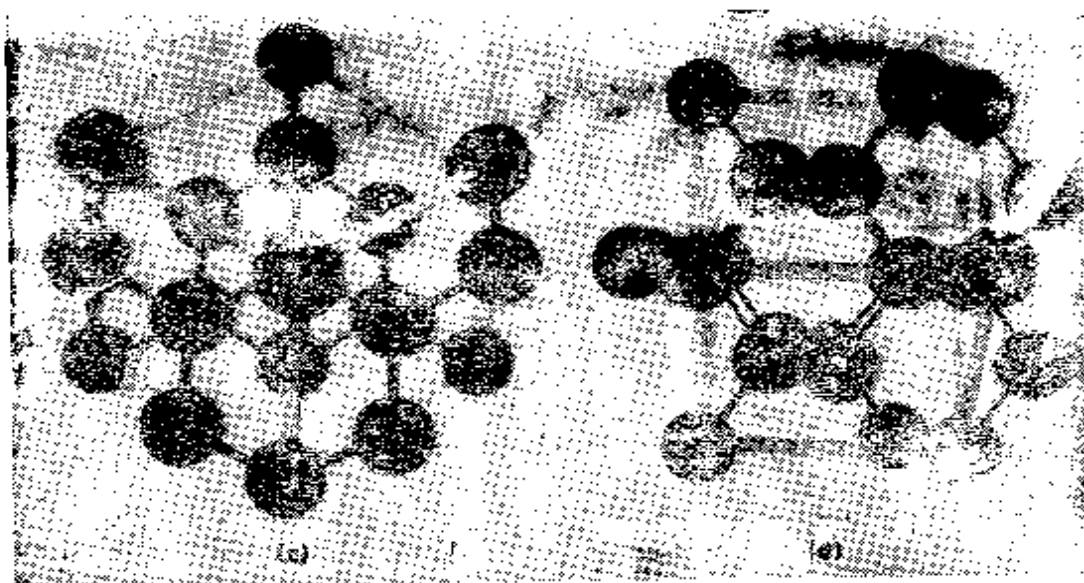


图 2.3

- (a) 金刚石晶格模型 (太阳能电池中许多重要半导体的原子结构),
 图中还示出晶胞的外部轮廓;
 (b) 从 $[100]$ 方向观察同一结构;
 (c)、(d) 分别从 $[111]$ 和 $[110]$ 方向观察

2.3 禁带宽度

自由空间的电子所能得到的能量值基本上是连续的,但在晶体中的情况就可能截然不同了。

孤立原子中的电子占据非常固定的一组分立的能级,当几个原子比较密集地集合在一起时,原来的能级就分裂成允许的能量带,如图 2.4 所示。当原子象在晶体中那样有秩序地排列时,它们之间的距离是一个特征量。图 2.4 (a) 表示晶体的一种情况,此时,在原子间特征间隔 d , 晶体具有被禁带所隔开的电子允带 (相当于原子能级)。图 2.4 (b) 表示一种不同的情况,在不同晶体材料的特征量 d 处,能带有重叠,实际上得到一个连续的允带。

2.4 允许能态的占有几率

在低温时,晶体内的电子占有最低的可能能态。

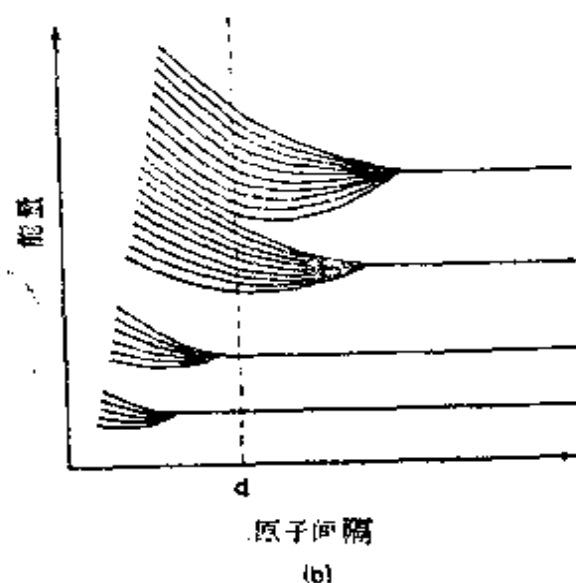
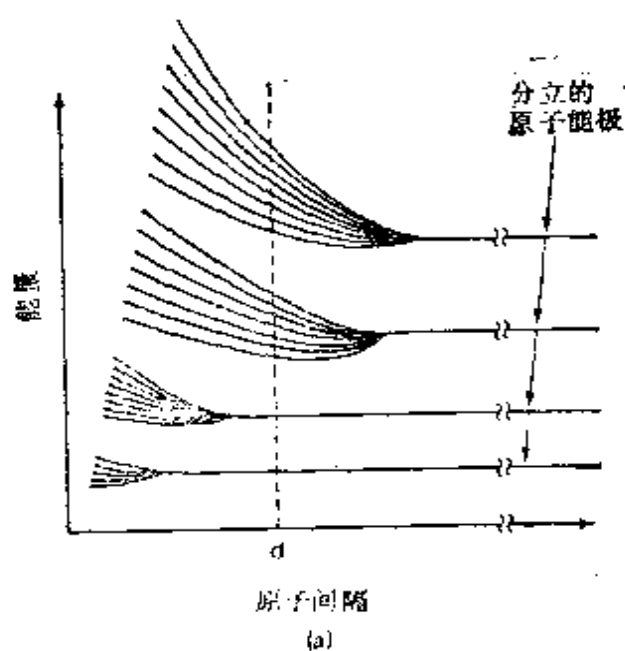


图 2.4 许多相同的原子集成晶体时，孤立原子中分立的电子允许能级如何分裂成允带的示意图

- (a) 在晶体中原子的特征间隔 d 处存在着一些被禁带隔开的电子允许能带；
- (b) 在 d 处最上面的能带发生重叠

乍看起来，可能会想到晶体的平衡状态是电子全都处在最低

允许能级的一种状态。然而，情况并非如此。基本物理定理——泡利 (Pauli) 不相容原理规定，每个允许能级最多只能被两个旋转方向相反的电子所占据。这意味着，在低温下，晶体的某一能级以下的所有可能能态都将被两个电子占据，该能级称为费密能级 (E_F)。

随着温度的升高，一些电子得到超过费密能级的能量，对此更一般的情况，考虑到泡利不相容原理的限制，任一给定能量 E 的一个所允许的电子能态的占有几率可以根据统计规律计算^(2.1~2.4)，其结果是由下式给出的费密-狄拉克 (Fermi-Dirac) 分布函数 $f(E)$ ，即

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}} \quad (2.1)$$

其中， k 是玻耳兹曼常数， T 是绝对温度。该函数的关系曲线绘于图 2.5 中。正如所料，接近于绝对零度时，能量低于 E_F ， $f(E)$ 基本上是 1，能量高于 E_F ， $f(E)$ 为零。随着温度的升高，分布渐渐不那么集中，能量高于 E_F 的能态具有一定的占有几率，能量低于 E_F 的能态具有一定的空位几率。

现在有可能用电子能带结构来描述金属、绝缘体和半导体之间的差别。金属的电子结构是 E_F 位于允带之内 (图 2.6)。其原因可能是：如果能带结构是如图 2.4(a) 所示，可用的电子不足以填满现有能带；或者换一种说法是存在着重叠能带，如图 2.4(b) 所示。绝缘体有一个被电子完全占据了的能带，并且在此能带与邻近的、低温下没有电子的最高能带之间有一个很大的间隙。从本节前面的讨论中可看出， E_F 必定位于禁带之中 (图 2.6)。

不存在电子的能带显然不能对晶体内的电流流动有任何贡献。奇怪的是，被电子完全充满的能带也同样如此。为了对此电流有所贡献，电子必须从作用场中吸取能量。在一个完全填满的能带中，这是不可能的，附近没有空着的允许能级可让受激电子跳到它上面。因此，绝缘体不导电，而金属具有许多这种能级，

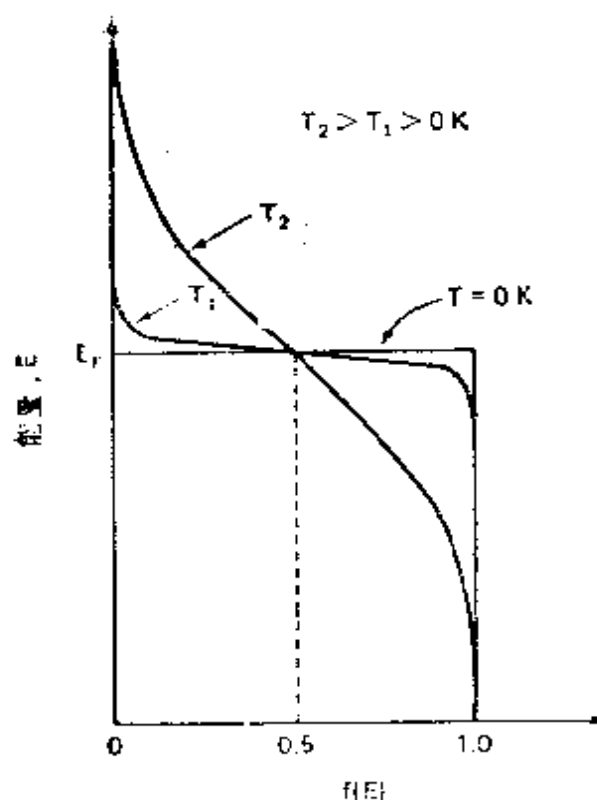


图 2.5 费密-狄拉克分布函数

费密能级 E_F 上面的能态具有低的电子占据几率，而下面的能态几乎全被占据

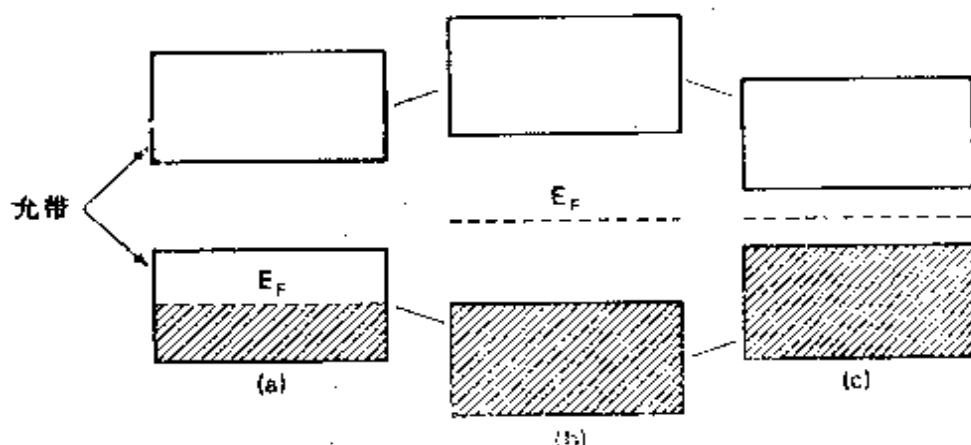


图 2.6 允许能态被电子占据的方式

(a)在金属中；(b)在绝缘体中；(c)在半导体中

故能够导电。

半导体只不过是一种具有窄禁带宽度的绝缘体。在低温下，它不能导电；在较高温度下，费密-狄拉克函数不那么集中，使得原来完全被填满的能带(价带)中的某些能级现在是空的，而邻

近的最高能带(导带)中的一些能级被占据, 导带中的电子因附近有许多未被占据的能态, 故可对电流作出贡献。因为现在在价带中存在着未被占据的能级, 所以价带中的电子也对电流作出贡献。

2.5 电子和空穴

我们可以用一个理想化的两层停车站(图 2.7) 来对半导体中电流流动过程作一个十分简单而又相当好的模拟。

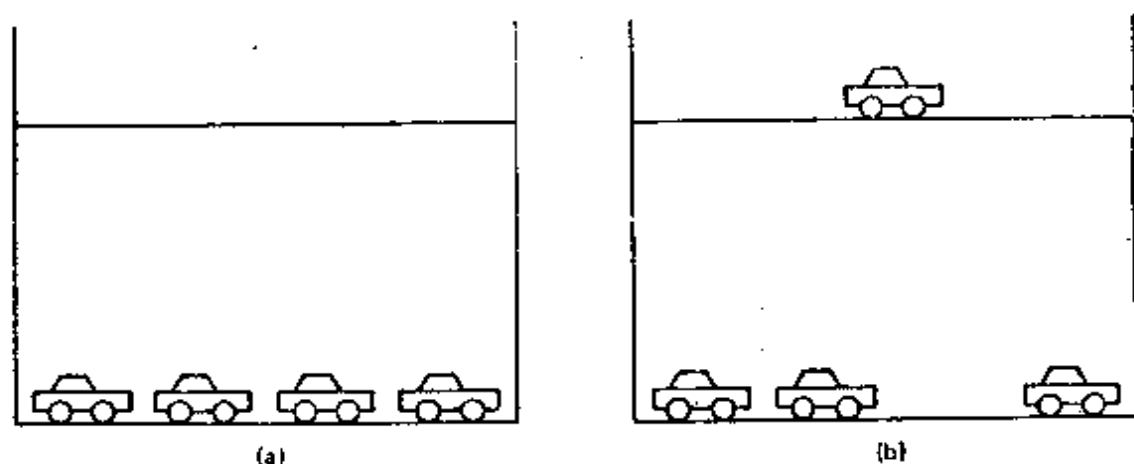


图 2.7 半导体中导电过程的简单“停车站”模拟

(a) 不可能移动; (b) 上下两层都可能移动

首先考虑如图 2.7(a) 所示的情况, 此时这个站的底层完全被汽车填满, 而顶层完全空着, 因此没有任何供汽车移动的余地。如果一辆汽车如图 2.7(b) 所示那样从第一层移到第二层, 那么第二层的汽车就能任意自由移动。这辆汽车相当于半导体内导带中的电子。现在, 在底层将存在一个空位, 附近的汽车就可以移动到这个空位而留下一个新的空位。因此, 现在汽车同样也可以在底层移动。这种移动相当于电子在价带中的运动。我们可以把底层的运动不看作是许多汽车运动的结果, 而比较简单地描述成单个空位的运动。同样地, 在晶体中用价带中空能态的运动来考虑问题较容易。在许多情况下, 如果把空能态看成是称为“空穴”的带正电的物质粒子, 那么它的正确运动是可以预测的。因此, 半导体内的电流可以看成是导带中的电子和价带中的空穴运动的

总和。

2.6 电子与空穴的动力学

半导体内的电子和空穴受到作用力而产生的运动与自由空间粒子的运动不同，除作用力以外，总是存在着晶体原子周期力的影响。然而，量子力学计算的结果表明，在与本书有关的大部分情况下，描述自由空间粒子的概念稍加修正就可用到半导体中的电子和空穴上。

例如，对于晶体导带内的电子，牛顿定律变成

$$F = m^* a = \frac{dp}{dt} \quad (2.2)$$

其中， F 是作用力； m^* 是电子的“有效”质量，它包括了晶格原子的周期力的影响； p 称为晶体动量，它与自由空间的动量相似。

对自由电子来讲，能量和动量是靠抛物线定律联系起来的，即

$$E = \frac{p^2}{2m} \quad (2.3)$$

对于半导体中的载流子，情况可能更复杂一些。在一些半导体中，类似的定律适用于导带中能量接近于该带最小能量 (E_c) 的电子，即有

$$E - E_c = \frac{p^2}{2m_n^*} \quad (2.4)$$

相似的关系式适用于价带中能量近于最大 (E_v) 的空穴，即有

$$E_v - E = \frac{p^2}{2m_p^*} \quad (2.5)$$

图 2.8 示出上述关系。这样的半导体称为直接带隙半导体。在科学技术上最重要的是化合物半导体 GaAs。

在另一些半导体中,导带的最小值可以是晶体动量的有限值,服从下面关系式:

$$E - E_c = \frac{(p - p_0)^2}{2m_*^*} \quad (2.6)$$

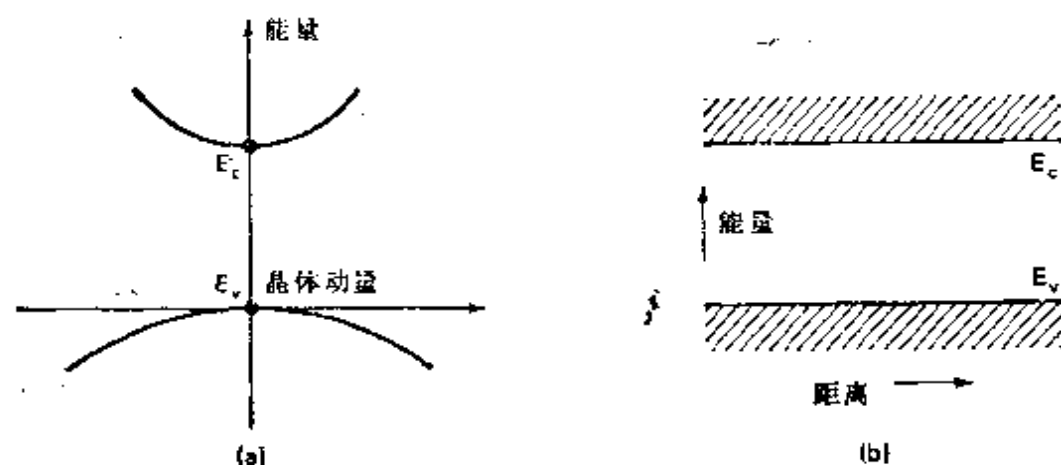


图 2.8

(a) 直接带隙半导体的导带中的电子和价带中的空穴在接近带边处的能量-晶体动量关系; (b) 半导体中允许能量的相应空间表示

对于价带, 存在一个相似的关系式:

$$E_v - E = \frac{(p - p_0')^2}{2m_*^*} \quad (2.7)$$

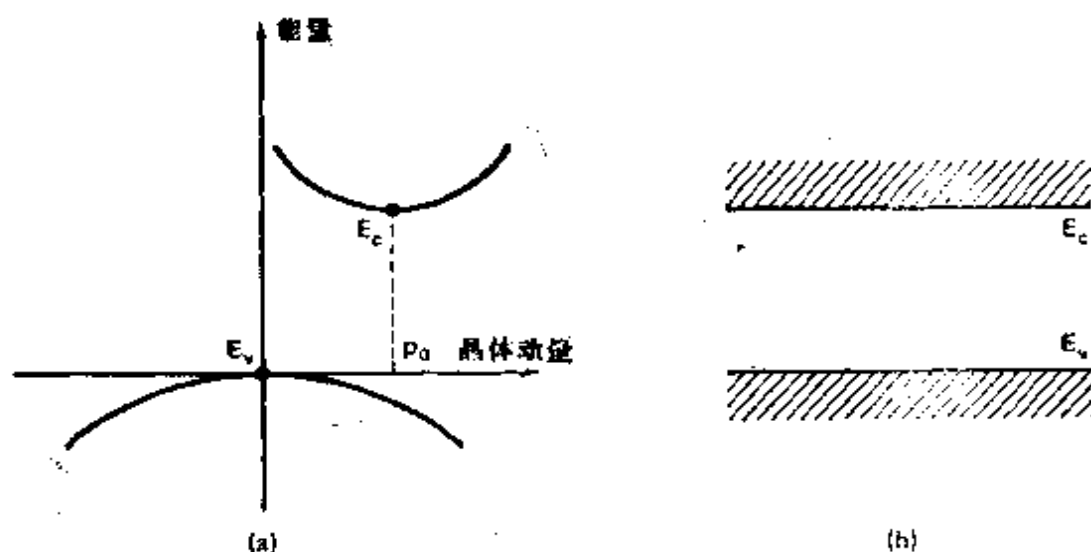


图 2.9 间接带隙半导体在接近带边处的能量-晶体动量关系及能带的空间表示

如果 $p_0 = p'_0$, 则半导体具有直接带隙。然而, 如果 $p_0 \neq p'_0$, 则带隙被称为间接带隙。最普通的元素半导体 Ge 和 Si 都是间接带隙材料。二者都是 $p'_0 = 0$, 而 p_0 是有限的。该情况如图 2.9 所示。

请注意, 在半导体器件中, 表示能量关系时, 一般都是画出能量与距离的关系 (如图 2.8 和 2.9 所示), 并不区分直接和间接带隙半导体。

2.7 允许态的能量密度

半导体中, 每单位体积的允许状态数对于相应禁带的能量来说显然是零, 而在允带内就不是零, 这就引出了有关究竟有多少电子状态分布在允带内的问题。

答案可以相当简单地找到^[2.1~2.4], 至少对于靠近允带边缘的能量是如此。在那里, 可将载流子与自由载流子同样对待。对于靠近导带边 (在不存在各向异性的情况下) 的能量 E , 单位体积、单位能量的允许状态数 $N(E)$ 由下式得出, 即

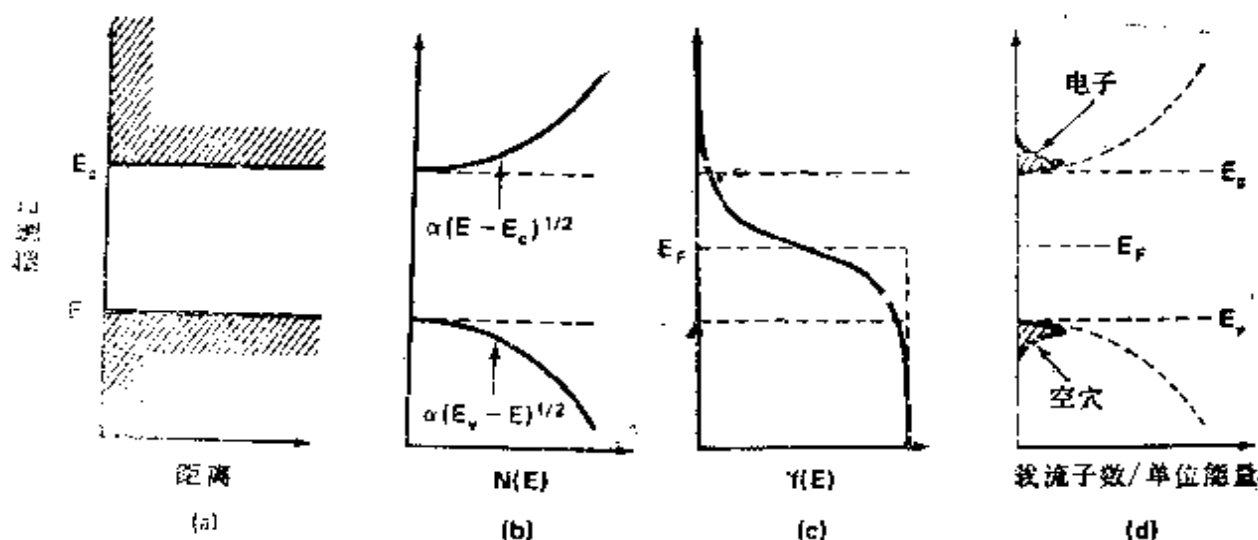


图 2.10

(a) 半导体的能带图; (b) 相应的电子的允许态的能量密度;
(c) 这些状态的占有几率; (d) 所得到的电子和空穴的能量分布 (注意: 大部分集中在各自的带边附近)

$$N(E) = \frac{8\sqrt{2}\pi m_e^{*3/2}}{h^3} (E - E_c)^{1/2} \quad (2.8)$$

其中, h 是普朗克常数。对靠近价带边的能量, 存在类似的表示式。这些允许状态的分布示于图 2.10(b)。

2.8 电子和空穴的密度

知道了允许状态的密度〔式(2.8)〕和这些状态的占有几率〔式(2.1)〕, 现在就可以计算电子和空穴的实际能量分布了。结果如图 2.10 所示。

由于费密-狄拉克分布函数的性质, 导带中的大多数电子和价带中的空穴都聚集在带边附近, 每个带中的总数可通过积分求得。单位体积晶体中, 在导带内的电子数 n 由下式得出, 即

$$n = \int_{E_c}^{E_{\max}} f(E) N(E) dE \quad (2.9)$$

因为 E_c 比 E_F 大许多 kT , 所以对于导带, $f(E)$ 可简化为

$$f(E) \approx e^{-(E - E_F)/kT} \quad (2.10)$$

并且用无穷大来代替积分上限 $E_{\max}$, 只有很小的误差, 因此,

$$\begin{aligned} n &= \int_{E_c}^{\infty} \frac{8\sqrt{2}\pi m_e^{*3/2}}{h^3} (E - E_c)^{1/2} e^{(E_F - E)/kT} dE \\ &= \frac{8\sqrt{2}\pi}{h^3} m_e^{*3/2} e^{E_F/kT} \int_{E_c}^{\infty} (E - E_c)^{1/2} e^{-E/kT} dE \end{aligned} \quad (2.11)$$

把积分变量变为 $x = (E - E_c)/kT$, 则

$$n = \frac{8\sqrt{2}\pi}{h^3} (m_e^* kT)^{3/2} e^{(E_F - E_c)/kT} \int_0^{\infty} x^{1/2} e^{-x} dx \quad (2.12)$$

式中, 积分是标准型积分, 并等于 $\sqrt{\pi}/2$ 。因此,

$$n = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{(E_F - E_c)/kT} \quad (2.13)$$

$$n = N_c e^{(E_F - E_c)/kT} \quad (2.14)$$

这里，对于固定的 T ， N_c 是常数，通称为导带内的有效态密度，可通过比较式 (2.13) 和 (2.14) 来确定。同样，单位体积晶体中在价带内的空穴总数为

$$p = N_v e^{(E_v - E_F)/kT} \quad (2.15)$$

价带内的有效态密度 N_v 用同样的方法确定。

对于没有表面的、纯净而完美的半导体的理想情况， n 等于 p ，因为导带中的每一个电子都在价带中留下一个空位即空穴。因此，

$$n = p = n_i \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} np = n_i^2 &= N_c N_v e^{(E_v - E_c)/kT} \\ &= N_c N_v e^{-E_g/kT} \end{aligned} \quad (2.17)$$

其中， n_i 通称为“本征浓度”， E_g 是导带和价带之间的禁带宽度。从式 (2.16) 也可看出

$$N_c e^{(E_F - E_c)/kT} = N_v e^{(E_v - E_F)/kT} \quad (2.18)$$

于是得到

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_v}{N_c}\right) \quad (2.19)$$

因此，在纯净、完美的半导体中，费密能级位于带隙中央附近，它偏离带隙中央的程度取决于导带和价带的有效态密度的差。

2.9 IV族半导体的键模型

为了讨论化学元素周期表中IV族的一类半导体，可从另一种观点来看迄今所描述的一些比较主要的半导体特性。虽然下面的“键模型”描述方式并不普遍适用于所有半导体材料，但它能以简单的方式介绍杂质对半导体电子学特性的影响。

图 2.3 示出了周期表IV族半导体的特有的晶格结构。图 2.11

(a)是硅晶格的二维示意图。每个硅原子都以共价键与四个相邻的原子连接,每个共价键需要两个电子。硅有四个价电子,于是,每个共价键共用一个来自中心原子的电子和一个来自相邻原子的电子。

在图 2.11(a) 所示的情况下,半导体不能导电。然而,在较高温度下,共价键的某些电子可获得足以脱离键的能量,如图 2.11(b) 所示。在这种情况下,释放出的电子可以在整个晶体中自由地运动,并可对电流作出贡献。位于断裂键附近的共价键的电子也可能向留下的空位移动,同时留下另一个断裂键,该过程也对电流流动作出贡献。

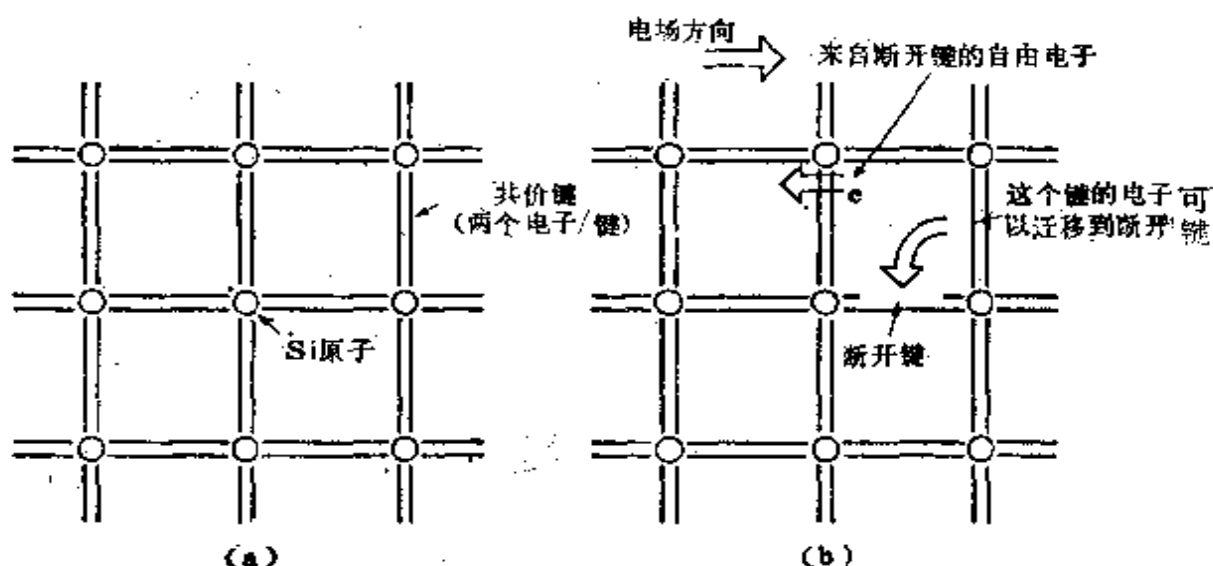


图 2.11 硅晶体晶格示意图

(a)没有断裂的共价键; (b)有一个断裂的共价键,并示出被释放出电子的运动及邻近键的电子向留下的空位的运动

回到前面几节的说法,从共价键放出的电子可被认为是在导带中,而与共价键连在一起的那些电子是在价带中。一个断裂键可被视为价带中的一个空穴。因此,从共价键释放一个电子所需的最小能量等于半导体的禁带宽度。

键模型对于讨论硅中杂质对硅的电子学特性的影响特别有用。下一节将叙述称为掺杂剂的极特殊的杂质的影响。

2.10 III族和V族掺杂剂

杂质原子可通过两种方式掺入晶体结构：它们可以挤在基质晶体原子间的位置上，这种情况称它们为间隙杂质；另一种方式是，它们可以替换基质晶体的原子，保持晶体结构中的有规律的原子排列，在这种情况下，它们被称做替位杂质。

周期表中III族和V族原子在硅中充当替位杂质，图 2.12 示出一个V族杂质（如磷）替换了一个硅原子的部分晶格。四个价电子与周围的硅原子组成共价键，但第五个却处于不同的情况，它不在共价键内，因此不在价带内。对于所表示的情况，它被束缚于V族原子，所以不能穿过晶格自由运动，因此它也不在导带内。

可以预期，与束缚在共价键内的自由电子相比，释放这个多

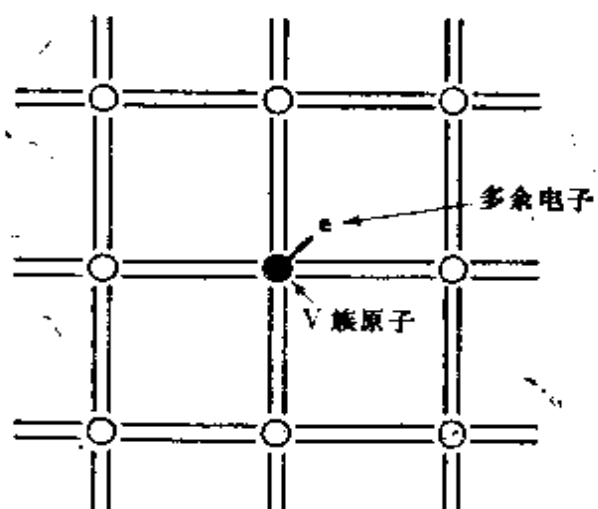


图 2.12 一个V族原子替代了一个硅原子的部分硅晶格

余电子只须较小的能量。实际上情况正是这样。注意到与束缚于氢原子的电子的相似性，可粗略地估算出所需能量。在氢原子的情况下，电离能（释放电子所需能量）的公式是

$$E_i = \frac{m_0 q^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = 13.6(\text{eV}) \quad (2.20)$$

其中， m_0 是电子的静止质量， q 是电子电荷， ϵ_0 是自由空间的

介电常数。多余的电子绕V族原子运动，该原子带有一个未被中和的正电荷。因此，这种情况下的电离能公式是一样的。轨道半径比原子间的距离大得多，因此式(2.20)中的 ϵ_0 可用硅的介电常数($11.7\epsilon_0$)来代替。因为轨道电子要受到硅晶格的周期力，所以电子的质量也要用有效质量(对硅来说， $m^*/m_0 = 0.2$)来代替。因此，释放多余电子所需能量为

$$E_i' \approx -\frac{13.6(0.2)}{(11.7)^2} \approx 0.02\text{eV} \quad (2.21)$$

这要比硅的带隙能量1.1eV小得多。自由电子位于导带中，因此，束缚于V族原子的多余电子位于低于导带底的能量为 E' 的地方，就象图2.13(a)所示的那样。注意，这就在“禁止的”间隙中安置了一个允许的能级。

与此类似，Ⅲ族杂质没有足够的价电子来满足四个共价键，这就造成一个束缚于Ⅲ族原子的空穴。释放空穴所需的能量与式(2.21)所给出的相同。因此，一个Ⅲ族原子在禁带中接近价带顶的地方引入了一个电子允许能级，如图2.13(b)所示。

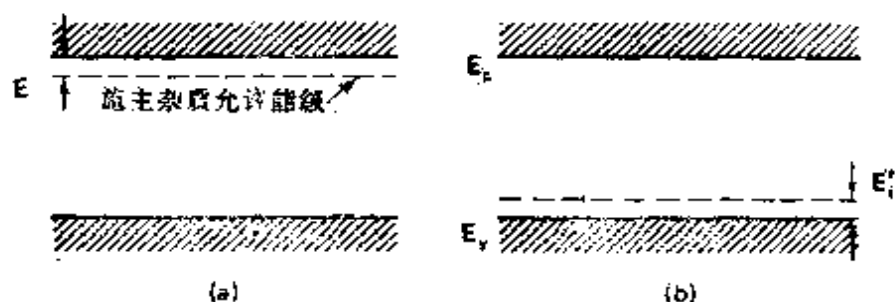


图 2.13

- (a) V族替位杂质在禁带中引入的允许能级，
(b) Ⅲ族杂质的对应能态

2.11 载流子浓度

因为从V族原子释放多余电子所需的能量很小，可以预料，在室温下，大多数多余电子都获得了这个能量。因此，大部分多

余电子离开了V族原子，留下带净正电荷的原子，这些电子可穿过晶体自由地运动。因为V族原子向导带捐献出电子，所以被称为“施主”。关于已获得所需小能量的电子数目的较定量的概念可从图2.14得到。费密-狄拉克分布函数的形式表明：施主能级的占有几率小^②，这意味着，大多数电子都离开施主位置进入导带。

在此情况下，导带中的电子和价带中的空穴之总数可由如下的半导体中的电中性条件得到，即

$$p - n + N_D^+ = 0 \quad (2.22)$$

其中， p 是价带中的空穴浓度， n 是导带电子浓度， N_D^+ 是电离施主（即电子脱离时留下的正电荷）的浓度。从式(2.17)得到另一个重要的关系式：

$$np = n_i^2 \quad (2.23)$$

与前面讨论的纯半导体的情况相比，这是一个更一般的关系式。将式(2.14)、(2.15)和(2.22)连同费密-狄拉克分布函数一起求解，可得出一般情况下的 n 、 p 和 N_D^+ 的精确值。然而，对于本书感兴趣的大多数情况，下面提到的、近似但简单得多的解法将给出具有足够精度的结果。

因为绝大多数施主都将电离，所以， N_D^+ 将接近等于总的施主浓度 N_D 。从式(2.22)可看出， n 将大于 p 。事实上，当 N_D 增大时， n 比 p 大得多。因此，近似解是

$$\begin{aligned} N_D^+ &\approx N_D \\ n &\approx N_D \end{aligned} \quad (2.24)$$

② 实际上，决定施主能级被占几率的统计理论与决定允带内的能级被占几率的统计理论是稍有不同的。施主能级一旦被任一种“自旋”的一个电子占据，中心施主原子上的有效正电荷就被中和，那么就不存在允许被反向自旋的第二个电子占据的引力。其结果得到一个与费密-狄拉克函数稍有不同的占有几率表达式。此差别在本书中不是重要的。

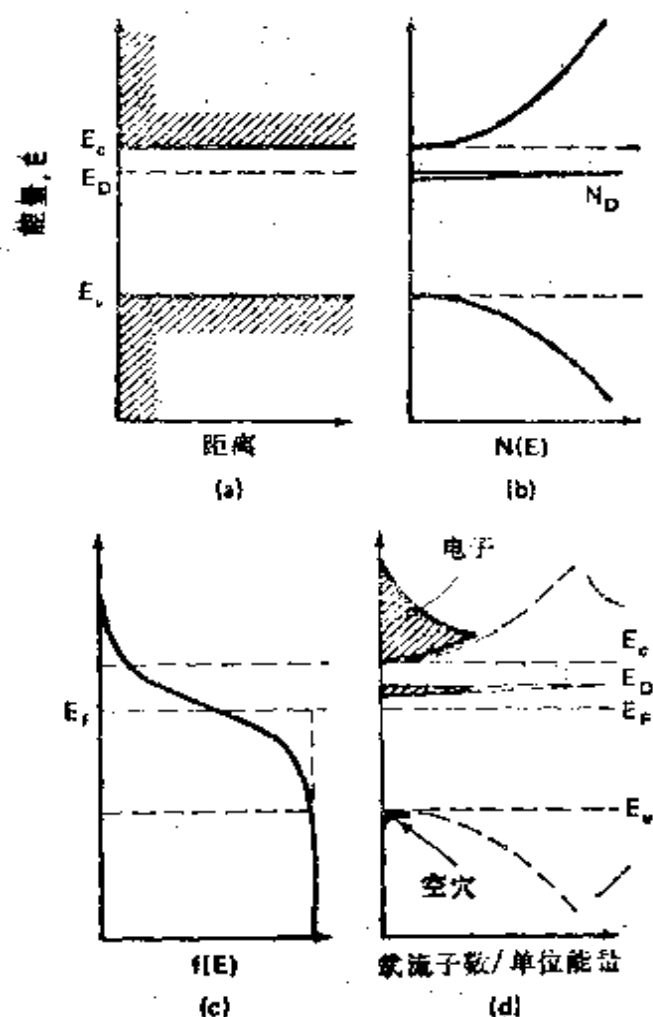


图 2.14

- (a) 掺有单位体积浓度为 N_D 的 V 族替位杂质的 IV 族半导体的能带图；
 (b) 相应的允许态的能量密度； (c) 这些能态的占有几率； (d) 所得到的电子与空穴的能量分布（图中所示的是相当高温度的情况。在中等温度下，施主态的电子占有几率比图示的还要小些）

$$p \approx \frac{n_i^2}{N_D} \ll n$$

当掺有 III 族杂质时，有类似的情况发生，这些杂质很容易把多余的一个空穴让给价带，也就是相当于从价带接受一个电子，因此称它们为“受主”。一个电离了的受主有一个净负电荷。因此，

$$p - n - N_A^- = 0 \quad (2.25)$$

其中， N_A^- 是电离受主浓度。

这种情况下的近似解是

$$N_A \approx N_A$$

$$p \approx N_A \quad (2.26)$$

$$n \approx \frac{n_i^2}{N_A} \ll p$$

2.12 掺杂半导体中费密能级的位置

把已推导出的电子和空穴浓度公式 (2.14) 和 (2.15) 应用到比纯半导体更一般的情况。对于掺有施主杂质的材料 (通称 n 型材料), 这些方程变成

$$n = N_D = N_C e^{(E_F - E_C)/kT} \quad (2.27)$$

或等效为

$$E_F - E_C = kT \ln \left(\frac{N_D}{N_C} \right) \quad (2.28)$$

同样地, 对于掺有受主杂质的材料 (p 型半导体), 有

$$p = N_A = N_V e^{(E_V - E_F)/kT} \quad (2.29)$$

$$E_V - E_F = kT \ln \left(\frac{N_A}{N_V} \right) \quad (2.30)$$

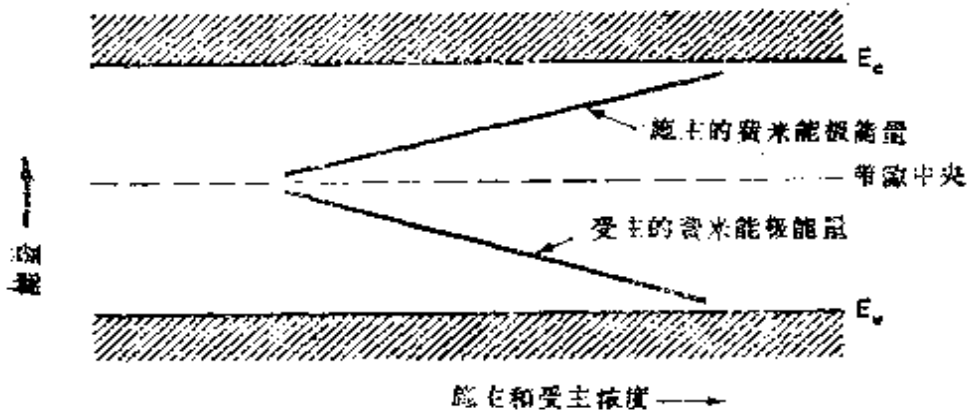


图 2.15 费密能级的能量与施主和受主浓度的关系

随着半导体材料掺杂的加重，费密能级 E_F 离开带隙中央，而接近导带（ n 型材料）或价带（ p 型材料），如图 2.15 所示。

2.13 其他类型杂质的影响

尽管对硅中 III、V 族以外杂质的实际影响已充分了解，但从理论上探讨其特性的工作却开展得很少。

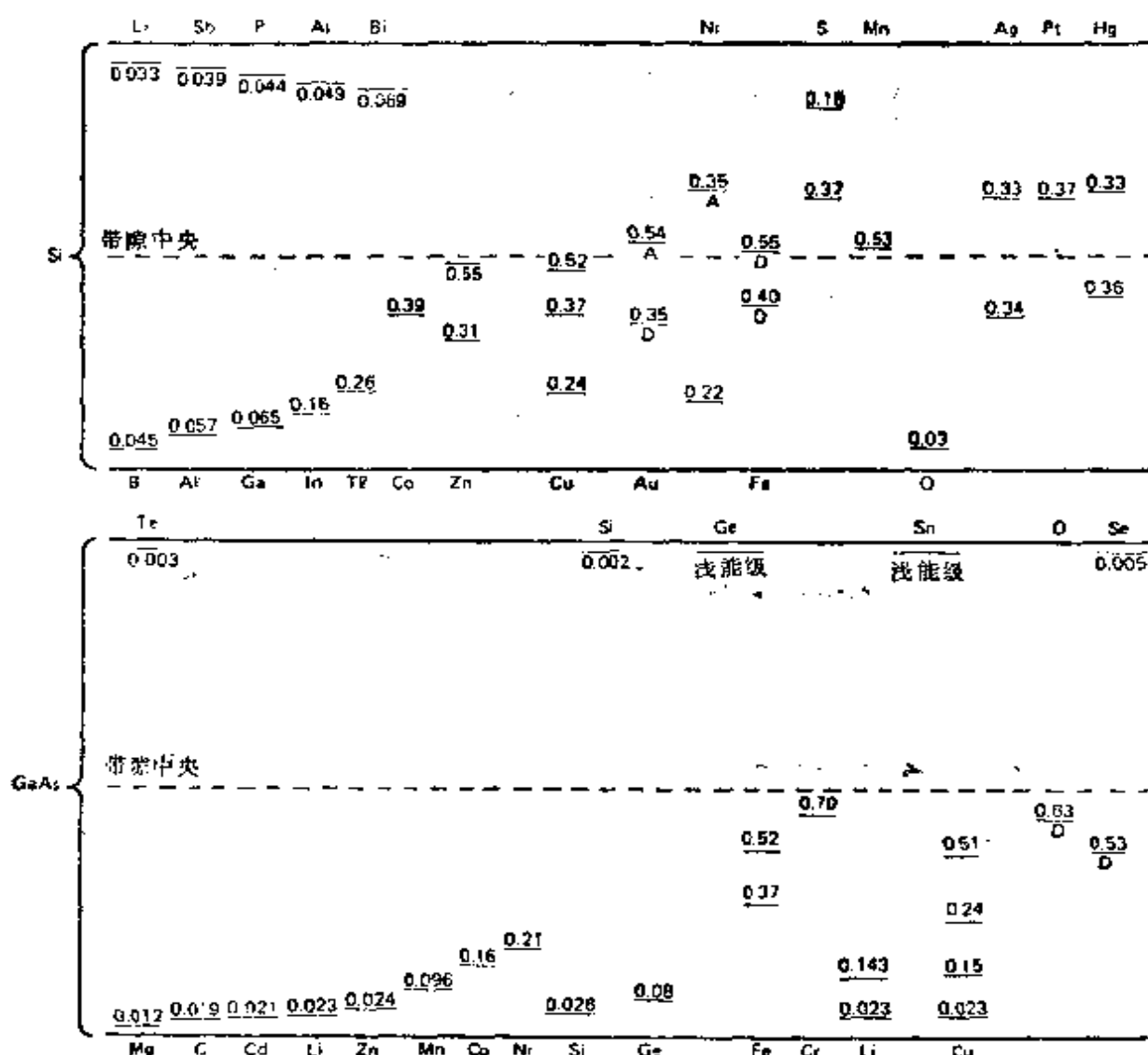


图 2.16 Si 和 GaAs 中的各种杂质在禁带内的能级

A 表示一个受主能级，D 表示一个施主能级。〔依照 S. M. Sze 和 J. Irwin, 固态电子学 11 期 (1968 年) 599 页〕

正如Ⅲ、V族杂质在硅禁带中产生一个允许能级一样，一般杂质也是如此。图 2.16 示出一系列杂质在硅和化合物半导体 GaAs 中产生的允许能级。如图所示，某些杂质造成多重能级，晶体缺陷同样在禁带中引进允许能级。

杂质，特别是那些在禁带中央附近产生能级的杂质，通常使半导体器件的特性变差。因此，制造半导体器件的原材料的杂质浓度要低于工艺所允许的限度（通常低于十亿分之一）。

2.14 载流子的传输

2.14.1 漂移

在外加电场 ξ 的影响下，一个随机运动的自由电子在与电场相反的方向上有一个加速度 $a = \xi/m$ ，在此方向上，它的速度随时间不断地增加。晶体内的电子处于一种不同的情况，它运动时的质量不同于自由电子的质量，它不会长久持续地加速，最终将与晶格原子、杂质原子或晶体结构内的缺陷相碰撞。这种碰撞将造成电子运动的杂乱无章。换句话说，它将降低电子从外加电场得到的附加速度。两次碰撞之间的“平均”时间称为弛豫时间 t_r ，由电子无规则热运动的速度来决定。此速度通常要比场给与的速度大得多。在两次碰撞之间由电场所引起的电子的平均速度的增量称为漂移速度。导带内电子的漂移速度由下式得出：

$$v_d = \frac{1}{2}at = \frac{1}{2} \frac{qt_r}{m^*} \xi \quad (2.31)$$

（如果 t_r 是对所有的电子速度取平均，则去掉系数 2）。电子载流子的迁移率定义为

$$\mu_n = \frac{v_d}{\xi} = \frac{qt_r}{m^*} \quad (2.32)$$

来自导带电子的相应的电流密度将是

$$J_s = qnv_s = q\mu_n n E \quad (2.33)$$

对于价带内的空穴，其类似公式为

$$J_p = q\mu_p p E \quad (2.34)$$

总电流就是这两部分的和。因此，半导体的电导率 σ 为

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{J}{E} = q\mu_n n + q\mu_p p \quad (2.35)$$

其中， ρ 是电阻率。

虽然式 (2.32) 的导出过于简化了，但它使我们对载流子的迁移率 μ_n 和 μ_p 如何随掺杂剂的浓度、温度和电场强度变化有一个直观的理解。

对于结晶质量很好的比较纯的半导体来说，使载流子速度变得紊乱的碰撞是由基体晶体的原子引起的。然而，电离了的掺杂剂是有效的散射体，因为它们带有净电荷。因此，随着半导体掺杂的加重，两次碰撞间的平均时间以及迁移率都将降低。对于高质量的硅，载流子迁移率与掺杂程度 N (在 1cm^3 中) 的相互关系的经验表达式是^(2.5)

$$\begin{aligned} \mu_n &= 65 + \frac{1265}{1 + (N/8.5 \times 10^{16})^{0.72}} \text{ cm}^2/\text{V-s} \\ \mu_p &= 47.7 + \frac{447.3}{1 + (N/6.3 \times 10^{16})^{0.76}} \text{ cm}^2/\text{V-s} \end{aligned} \quad (2.36)$$

同样的原因，少数特殊的杂质及晶格缺陷将进一步降低迁移率。

当温度升高时，基体原子的振动更剧烈，它们变为更大的“靶”，从而降低了两次碰撞间的平均时间及迁移率。重掺杂时，这个影响变的不太显著，因为此时电离了的掺杂剂是有效的载流子的散射体。

电场强度的提高最终将使载流子的漂移速度增加到可与无规热速度相比。因此，电子的总速度归根结蒂将随着电场强度的增加而增加。电场的增加使碰撞之间的时间及迁移率减小了。

2.14.2 扩散

除了漂移运动以外，半导体中的载流子也可以由于扩散而流动。象气体分子那样的任何粒子过分集中时，若不受到限制，它们就会自己散开，这是大家都熟悉的一个物理现象。此现象的基本原因是这些粒子的无规的热速度。

粒子流与浓度梯度的负值成正比（图 2.17）。因为电流与荷电粒子流成正比，所以对应于电子的一维浓度梯度的电流密度是

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx} \quad (2.37)$$

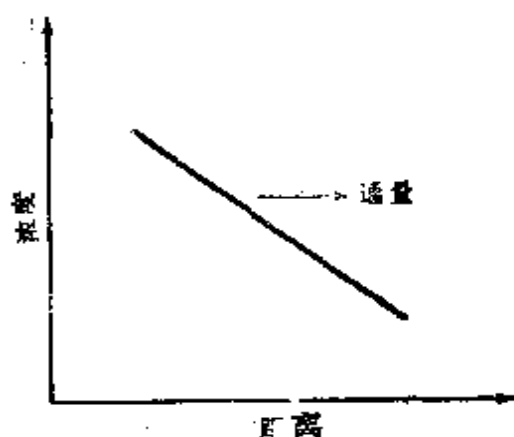


图 2.17 存在浓度梯度时载流子的扩散流

其中， D_n 是扩散常数。同样，对于空穴，有

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx} \quad (2.38)$$

注意：式 (2.37) 和 (2.38) 之间符号不同是由于所涉及的电荷类型相反。从根本上讲，漂移和扩散两个过程是有关系的，因而迁移率和扩散常数不是独立的，他们通过爱因斯坦关系互相联系，即

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n \quad \text{和} \quad D_p = \frac{kT}{q} \mu_p \quad (2.39)$$

kT/q 是在与太阳电池有关的关系式中经常出现的参数，它具有电压的量纲，室温时为 26mV，是一个值得记住的值！

2.15 小 结

本章的重点如下：半导体的电子结构是，实际上完全被电子占有的允带（价带）与邻近的实际上没有电子的允带（导带）之间由一个禁带隔开；半导体中的电流是由导带内的电子运动和价带内的空位或空穴的有效运动二者所构成；在许多情况下，只要用“有效质量”来反映晶体内基体原子周期力的影响，则导带内的电子和价带内的空穴便可以认为是自由粒子；大多数导带电子都具有接近导带边的能量，而大部分空穴都具有接近价带边的能量。

根据导带内电子的能量和它们的晶体动量之间的关系，半导体可分为直接带隙型和间接带隙型。

被称为掺杂剂的特殊杂质掺进半导体时，可以控制半导体导带内的电子和价带内的空穴的相对浓度。当有合适的扰动时，这些能带内的载流子可通过漂移和扩散两种方式流动。

在第三章中叙述了当有光扰动时半导体内所发生的另外一些电子运动过程。从本章和下章所讨论的基本机理将综合出一个自洽方程组，这个方程组将在以后的一些章节中用来确定太阳电池的设计原则。

练 习 题

2.1 对于具有立方单胞的晶体，在晶胞图上指出下列晶面：(a) (100)；(b) (010)；(c) (110)；(d) (111)。

2.2 (a) 通过有选择地腐蚀电池表面以减小反射损失，有可能改善硅太阳电池的性能。图 7.6 示出一个原来取向平行于 (100) 面现在经过化学腐蚀的硅晶体表面。由于在晶体不同方向腐蚀速度不同，结果露出如图所示的许多方形底面的金字塔。已知金字塔的侧面都是 {111} 等效面系列。

的组成部分, 求金字塔相对面之间的夹角。

(b) 垂直入射到原来硅表面的光的一部分 R 被反射。忽略对入射角和波长的依赖关系, 证明经选择性腐蚀后被反射部分减小到略小于 R^2 。

2.3 数量可调节地把杂质掺进硅的一种方法叫离子注入技术。将所要求的杂质离子加速到很高的速度并对准硅表面, 如果离子以平行于图 2.3 (b)~(d) 所示的每个晶体方向撞击表面, 那么你预期在那种情况下离子穿入硅中的距离最大?

2.4 半导体中一个允许电子占有的状态位于费密能级上面 0.4eV 能量处。问在 300K 的热平衡条件下, 该状态被电子占有的几率是多少?

2.5 假设电子和空穴的有效质量等于自由电子质量, 计算在 300K 时硅的导带和价带中的有效态密度。假设带隙为 1.1eV , 求此温度下硅中的本征浓度。

2.6 (a) 硅用磷均匀掺杂, 其掺杂浓度为 10^{22} 磷原子/ m^3 。假设所有这些施主杂质都被电离, 估算在 300K 的热平衡条件下此材料中的电子和空穴浓度。并由所得的浓度计算材料中费密能级位于导带边下面的位置。

(b) 已知磷的施主能级低于导带边 0.045eV , 计算该能级被电子占有的几率, 并进而检验所有施主都被电离的假设 (用 $N_c = 3 \times 10^{25}\text{m}^{-3}$, $N_v = 10^{25}\text{m}^{-3}$ 和 $n_i = 1.5 \times 10^{10}\text{m}^{-3}$)。

2.7 利用有关硅中电子和空穴迁移率的公式 (2.36), 估算习题 2.6 的硅样品的电阻率。

2.8 估算轻掺杂硅导带中的电子与基体晶体原子两次碰撞之间的平均时间。

2.9 一个 10^4V/m 的电场加在掺有 10^{22} 个施主/ m^3 的 300K 的硅样品上, 已知热速度是 10^5m/s , 比较导带电子的漂移速度和热速度。问在多大场强下两者才差不多相等?

2.10 在 300K 的硅截面内, 场强为零, 导带电子的浓度在 $1\mu\text{m}$ 距离内从 $10^{22}/\text{m}^2$ 变到 $10^{21}/\text{m}^2$ 。设电子浓度的变化是线性的, 求对应的电流强度。

参 考 文 献

- [2.1] V. Azaroff and J. J. Brophy, *Electronic Processes in Materials* (New York: McGraw-Hill, 1963).
- [2.2] A. van der Ziel, *Solid State Physical Electronics*, 3rd ed. (Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, 1976).
- [2.3] S. Wang, *Solid-State Electronics* (New York: McGraw-Hill, 1966).
- [2.4] W. Shockley, *Electrons and Holes in Semiconductors* (New York: Van Nostrand Rheinhold, 1950).
- [2.5] D. M. Caughey and R. E. Thomas, "Carrier Mobilities in Silicon Empirically Related to Doping and Field," *Proceedings of the IEEE* 55 (1967), 2192~2193.

第三章 产生、复合及器件物理学 的基本方程

3.1 引言

在第一、二章中已经概述了阳光和半导体的有关性质，本章将研究太阳光伏系统的这两个基本要素之间的相互作用。

接着将叙述半导体材料中过剩载流子的产生和复合的概念，及所涉及的物理机理。最后，所讨论的有关半导体性质的素材归纳为一组可描述大多数半导体器件（包括太阳电池）的理想特性的基本方程。

3.2 光与半导体的相互作用

图 3.1 示出一束单色光垂直入射到半导体的平面部位的情况。入射光的一部分 R 被反射，而其余部分 T 则透射到半导体中。

透射光因其能量将电子由被占有的低能态激发到未被占据的较高能态而被半导体吸收。由于半导体的价带（其中存在大量的被占有能态）与导带（其中有大部分未被占有的能态）之间被禁带隔开，所以，当组成光线的光子的能量大于半导体禁带间隙 E_g 时，吸收才特别可能发生。

吸收材料的折射率 $\hat{n}_0$ 是一个复数，此折射率可写为 $\hat{n}_0 = \hat{n} - ik$ 。式中， k 称为消光系数。在硅的情况下，这个复数的两个部分随入射光波长的变化表示在图 3.2 中。在垂直入射的情况下，光的反射系数由下式确定^[3.1和3.2]，即

$$R = \frac{(\hat{n} - 1)^2 + k^2}{(\hat{n} + 1)^2 + k^2} \quad (3.1)$$

将硅的相应数值代入式 (3.1), 所得到的结果表明, 对太阳能电池工作有用的所有波长, 30% 以上的入射光将被反射掉。显然, 从制造高效率太阳能电池的观点来看, 这是不希望的。为了尽可能减小这个数值, 太阳能电池采用减反射膜及其它技术 (见练习 2.2)。

透射光穿过半导体时会衰减。对给定的波长, 光的吸收速率与光强 (光子通量) 成正比。这个普通的物理现象使单色光穿过半导体时其强度按照指数衰减, 其数学表达式为

$$g(x) = g(x_0)e^{-\alpha(x-x_0)} \quad (3.2)$$

其中, α 是波长的函数, 通称为吸收系数。这个参数在太阳能电池设计中很重要, 因为它确定了给定波长的光离电池表面多深距离就被吸收掉。

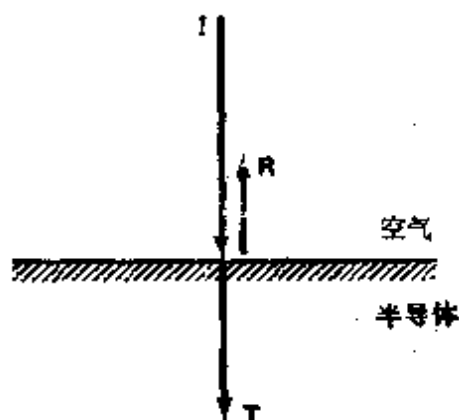


图 3.1 单色光入射到半导体上

吸收系数 α 与消光系数 k 有关。当用在 x 方向以速度 v 传播的频率为 f 的平面波来描述光时, 相关的电场强度是^(3.2)

$$\xi = \xi_0 \exp \left[i 2 \pi f \left(t - \left(\frac{x}{v} \right) \right) \right] \quad (3.3)$$

光在半导体中的速度与光在真空中的速度 c 的关系为

$$v = \frac{c}{\hat{n}_0} \quad (3.4)$$

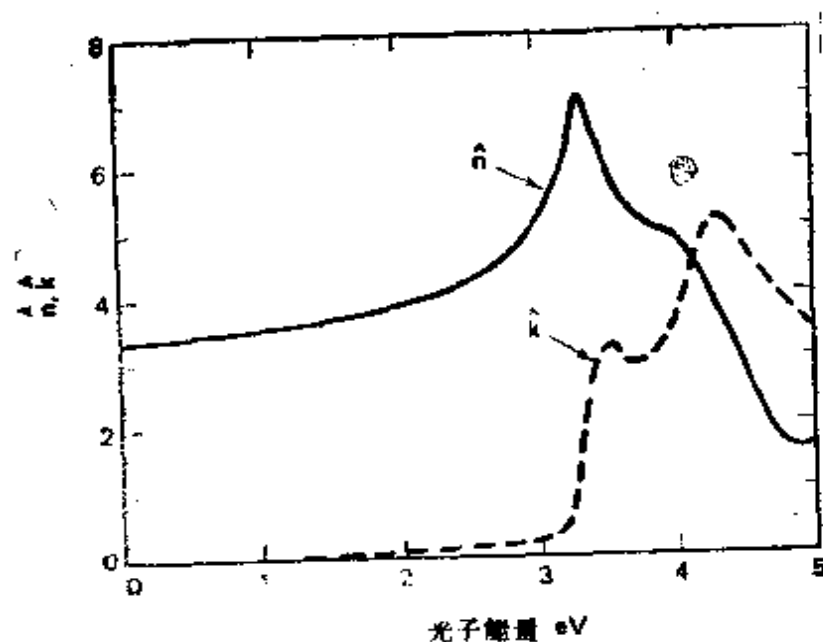


图 3.2 硅的反射系数的实部和虚部

[按照 H. R. Phillip 和 E. A. Tafe, 物理评论 120 (1960), 37~38.]

因此,

$$\frac{1}{v} = \frac{\hat{n}}{c} - \frac{i\hat{k}}{c} \quad (3.5)$$

将式 (3.5) 代入式 (3.3), 得

$$\xi = \xi_0 \exp(i2\pi ft) \exp\left(-\frac{i2\pi x \hat{n}}{c}\right) \exp\left(-\frac{2\pi f \hat{k} x}{c}\right) \quad (3.6)$$

式 (3.6) 中的最后一项是一个衰减因子。功率随电场强度的平方而衰减。比较式 (3.2) 和 (3.6), 可得到下列关系:

$$\alpha = \frac{4\pi f \hat{k}}{c} \quad (3.7)$$

3.3 光 吸 收

3.3.1 直接带隙半导体

本征吸收是指由于将电子从价带激发到导带，同时在价带留下空位所引起的光子的消失或吸收。在这种跃迁过程中，能量和动量必须守恒。光子具有相当大的能量 (hf)，但只有小的动量 (h/λ)。

直接带隙半导体吸收过程的形式示于图 3.3 (能量-动量示图) 中。因为光子的动量比晶体动量小，因此，跃迁过程中晶体动量基本上是守恒的。初始能态和终止能态之间的能量差等于原始光子的能量，即

$$E_f - E_i = hf \quad (3.8)$$

按第二章所述的抛物线关系式，有

$$\begin{aligned} E_f - E_c &= \frac{p^2}{2m_e^*} \\ E_v - E_i &= \frac{p^2}{2m_h^*} \end{aligned} \quad (3.9)$$

因此，跃迁发生时的晶体动量的特定值为

$$hf - E_g = \frac{p^2}{2} \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) \quad (3.10)$$

随着光子能量 hf 的增加，跃迁发生时晶体的动量值也增大 (图 3.3)，初始能态和终止能态与带边能量之差也增加。吸收的几率不仅取决于处在初始能态的电子密度，而且也取决于终止能量的空态密度。因为离带边越远，这两个密度越大，所以，在光子能量大于 E_g 时，吸收系数随光子能量的增大而迅速增大是不足为奇的。简单的理论处理可得到下列结果^(3.2)：

$$\alpha(hf) \approx A^* (hf - E_g)^{1/2} \quad (3.11)$$

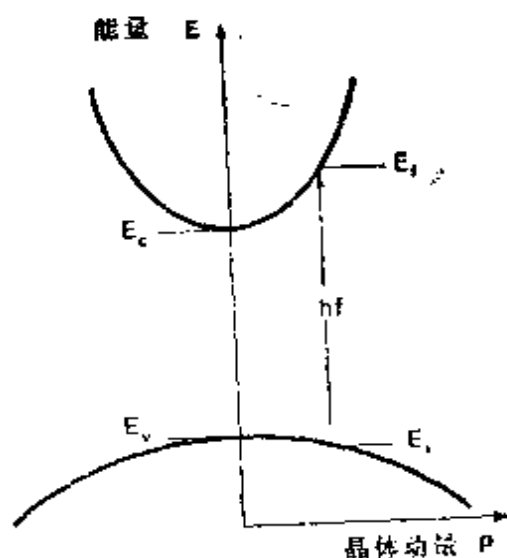


图 3.3 直接带隙半导体的能量-晶体动量图

图中示出了通过将电子从价带激发到导带所引起的光子吸收过程

式中，当 α 用 cm^{-1} 表示， hf 和 E_g 用电子伏特 (eV) 表示时， A^* 是一常数，其值为 2×10^4 。对直接带隙半导体 GaAs，这个表达式的计算结果与实验结果的比较示于图 3.4 中。在吸收系数较高的区域，两种结果相当一致。

由于入射光穿透半导体 $1/\alpha$ 距离时，光强将降低到其初始值的 $1/e$ 。方程式 (3.11) 表明，光子能量大于 E_g 的太阳光进入直接带隙半导体几微米深就被吸收掉。

3.3.2 间接带隙半导体

在间接带隙半导体中，导带的最低能量与价带的最高能量对应于不同的晶体动量值 (图 3.5)，为使 3.3.1 节中叙述的电子从价带直接跃迁到导带的过程得以进行，光子能量需要比禁带间隙大很多。

然而，通过一种不仅包括光子和电子，而且还包括第三种粒子即声子的两级过程，跃迁可在能量较低的情况下发生。正如光可以被认为具有波粒二象性一样，构成晶体结构的原子在其平衡

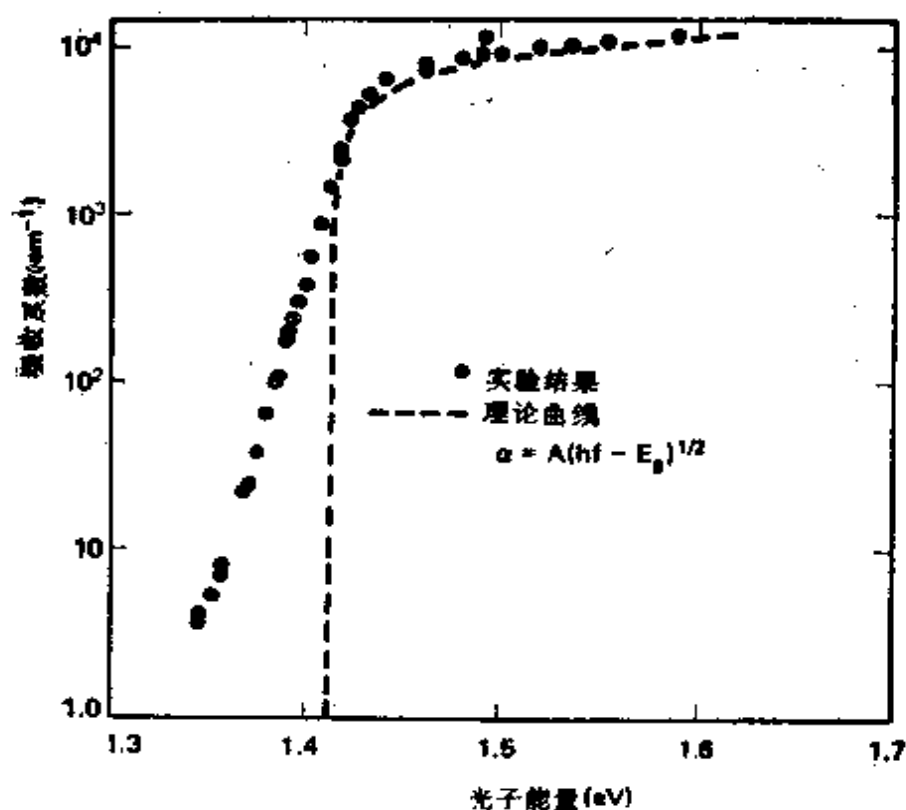


图 3.4 GaAs 的吸收系数与光子能量的关系

[按照 T. S. Moss 和 T. D. F. Hawkins, 红外物理学 I, (1961) 111.]

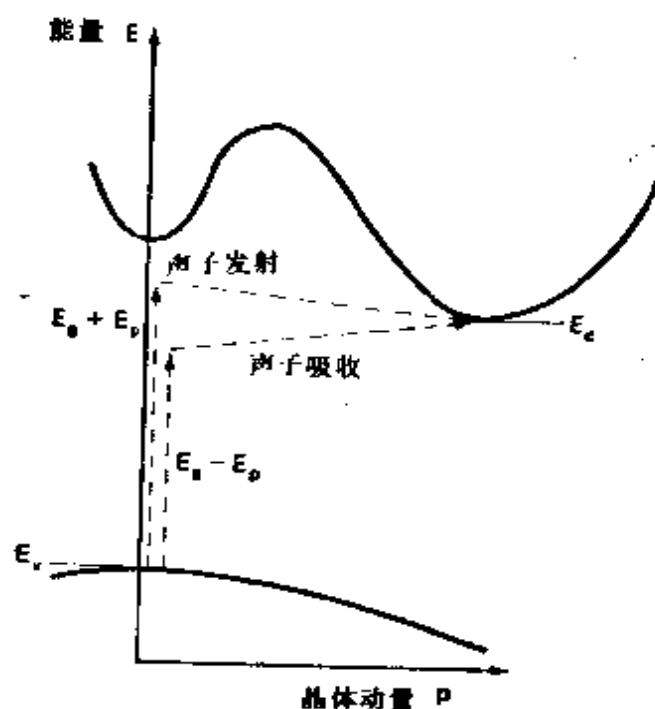


图 3.5 间接带隙半导体的能量-晶体动量图
图中示出包括声子发射或声子吸收的光子两级吸收过程

位置附近的振动也可认为有波粒二象性。声子就是晶格振动的量子或基本粒子。与光子相反，声子具有低的能量，但有比较高的动量。

注意一下声子和声音之间的关系，这种差别便可得到解释。声音靠晶格原子振动在固体中传播。固体中光速和声速的较大差别与相应的基本粒子的能量和动量的比之间的差别有关。

正如图 3.5 的能量-动量示意图表明的那样，在有适当能量的光子的情形下，通过发射或吸收所需动量的声子，电子能从价带的最高能量跃迁到导带*最低能量。因此，将一个电子从价带激发到导带所需的最小光子能量是

$$hf = E_g + E_p \quad (3.12)$$

式中， E_p 是具有所需动量的被吸收声子的能量。

由于间接带隙吸收过程需要另外的“粒子”，所以此过程的光吸收几率比直接带隙的小得多，因此，此时吸收系数低，光进入半导体相当距离才被吸收掉。吸收系数的理论分析得到如下结果^[3,2]：对包括声子吸收的跃迁过程，有

$$\alpha_a(hf) = \frac{A(hf - E_g + E_p)^2}{\exp(E_p/kT) - 1} \quad (3.13)$$

而对包括声子发射的跃迁过程，有

$$\alpha_e(hf) = \frac{A(hf - E_g - E_p)^2}{1 - \exp(-E_p/kT)} \quad (3.14)$$

在 $hf > E_g + E_p$ 的情况下，因为声子发射和声子吸收都是可能的，于是吸收系数为

$$\alpha(hf) = \alpha_a(hf) + \alpha_e(hf) \quad (3.15)$$

图 3.6 示出在不同温度下硅的吸收系数随入射光波长的变化情况。波长大于 $0.5\mu\text{m}$ 的弱吸收区对应于间接带隙过程；波长低于 $0.4\mu\text{m}$ 时，吸收系数极迅速地增大，可以认为这是直接带

* 原文 Valence band 应为 Conduction band.——译者

隙吸收引起的。在 20 到 500K 温度范围内, 光子能量在 1.1 到 1.4eV 区间。已经找到一个包括式(3.11)、(3.13) 和(3.14)诸项的经验公式, 它能精确地描述这些实验结果。此经验公式^[3,3]为

$$\begin{aligned} \alpha(hf, T) = \sum_{\substack{i=1, 2 \\ j=1, 2}} A_{ij} \left\{ \frac{[hf - E_{gi}(T) + E_{pi}]^2}{\exp(E_{gi}/kT) - 1} \right. \\ \left. + \frac{[hf - E_{gi}(T) - E_{pi}]^2}{1 - \exp(-E_{pi}/kT)} \right\} \\ + A_4 [hf - E_{g4}(T)]^{1/2} \end{aligned} \quad (3.16)$$

式中, 常数 A_{ij} 、 E_{gi} 和 E_{pi} 的值已在表 3.1 中给出。

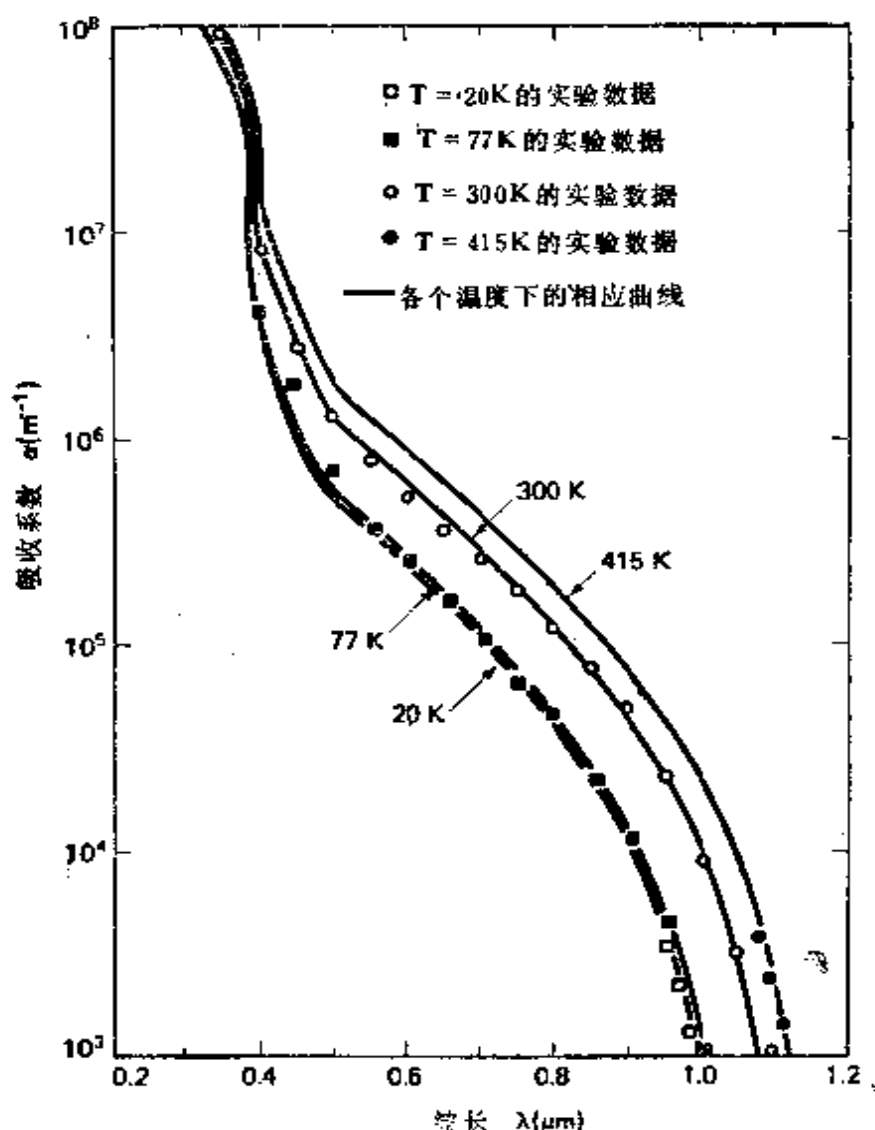


图 3.6 不同温度下硅的吸收系数与入射光波长的关系^[3,3]

表 3.1 硅吸收系数经验公式的常数值

参数	数值
$E_{g1}(0)^*$	1.1557 eV
$E_{g2}(0)^*$	2.5 eV
$E_{gd}(0)^*$	3.2 eV
E_{v1}	1.827×10^{-2} eV
E_{v2}	5.773×10^{-2} eV
A_{11}	$1.777 \times 10^3 \text{ cm}^{-1} / \text{eV}^2$
A_{12}	$3.980 \times 10^4 \text{ cm}^{-1} / \text{eV}^2$
A_{21}	$1.292 \times 10^3 \text{ cm}^{-1} / \text{eV}^2$
A_{22}	$2.895 \times 10^4 \text{ cm}^{-1} / \text{eV}^2$
A_d	$1.052 \times 10^3 \text{ cm}^{-1} / \text{eV}^{1/2}$

* $E_g(T) = E_g(0) - [\beta T^2 / (T + \gamma)]$, 其中, $\beta = 7.021 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ 和 $\gamma = 1108 \text{ K}$ 。
来源: 参考文献 3.3。

3.3.3 其他吸收过程

光在半导体中的吸收决不限于至今讨论的过程。已经指出, 光子具有足够高的能量时, 通过激发使电子穿过像硅这样的间接带隙半导体的直接禁带间隙, 吸收能够发生。同样, 如图 3.7(a) 所示的那样, 在直接带隙半导体中, 也能发生包括声子发射或声子吸收的两级吸收过程。这个过程与 3.3.1 节中所讨论的最强的直接吸收过程同时发生。

同样, 如图 3.7(b) 所示那样, 在伴有声子发射或声子吸收的情况下, 光子能将载流子激发到各自能带的较高能级, 这是比较弱的过程。不过可以预料, 当载流子浓度高时, 在长波部分激发过程最强。虽然这种过程在太阳能电池工作中并不重要, 但它证明的确存在没有产生电子-空穴对的吸收过程。

如图 3.8 所示, 通过载流子在半导体允带和禁带中的杂质能级之间的受激跃迁也能发生光的吸收。

最后, 简要地提一下在太阳能电池中可能会产生次级效应的两

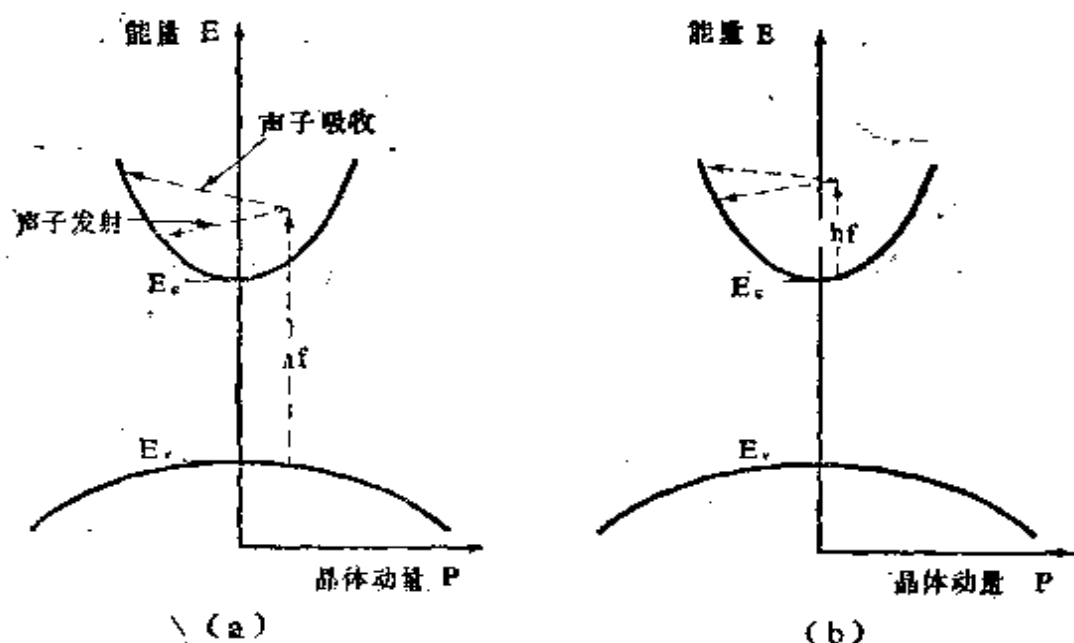


图 3.7

- (a) 直接带隙半导体中的光子两步吸收过程；
 (b) 导带中的自由载流子吸收过程，此过程不产生电子-空穴对

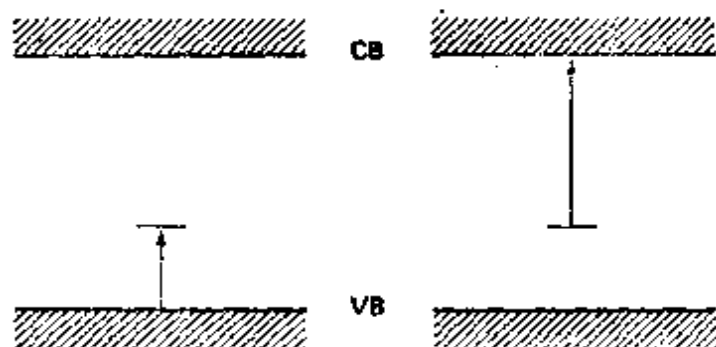


图 3.8 载流子由允带激发到禁带中的能级的光吸收过程

个过程。在存在强电场的情况下，例如在太阳电池的某些区域中，会出现弗兰茨-凯耳戴士 (Franz-Keldysh) 效应^[3,2]。这个效应使吸收边缘移到较低能量处，其效果如同减小了禁带间隙宽度。高掺杂浓度也影响吸收边缘，在这样的浓度下，禁带间隙宽度也减小了。

3.4 复合过程

3.4.1 弛豫到平衡

适当波长的光照射在半导体上会产生电子-空穴对。因此,光照射时材料中的载流子浓度将超过无光照时的值。如果切断光源,则载流子浓度就衰减到它们平衡时的值。这个衰减过程通称为复合过程。后面几节将叙述三种不同的复合机构,这些机构可能同时发生,在这种情况下复合率就是每个过程的复合率的总和。

3.4.2 辐射复合

辐射复合就是 3.3 节叙述的吸收过程的逆过程。占据比热平衡时更高的能态的电子有可能跃迁到空的低能态,其全部(或大部分)初末态间能量差以光的方式发射。所有已考虑到的吸收机构都有相反的辐射复合过程(图 3.9)。由于间接带隙半导体需要包括声子的两级过程,所以辐射复合在直接带隙半导体中比间接带隙半导体中进行得更快。

总的辐射复合速率 R_R 与导带中占有态(电子)的浓度和价带中未占有态(空穴)的浓度的乘积成正比,即

$$R_R = Bnp \quad (3.17)$$

式中, B 对给定的半导体来说是一个常数。由于光吸收和这种复合过程之间的关系,由半导体的吸收系数能够计算出 B (3.2)。

热平衡时,即 $np = n_i^2$ 时,复合率由数目相等但过程相反的产生率所平衡。在不存在由外部激励源产生载流子对的情况下,与式 (3.17) 相对应的净复合率 U_R 由总的复合率减去热平衡时的产生率得到,即

$$U_R = B(np - n_i^2) \quad (3.18)$$

对任何复合机构,都可定义有关载流子的寿命 τ , (对电子)

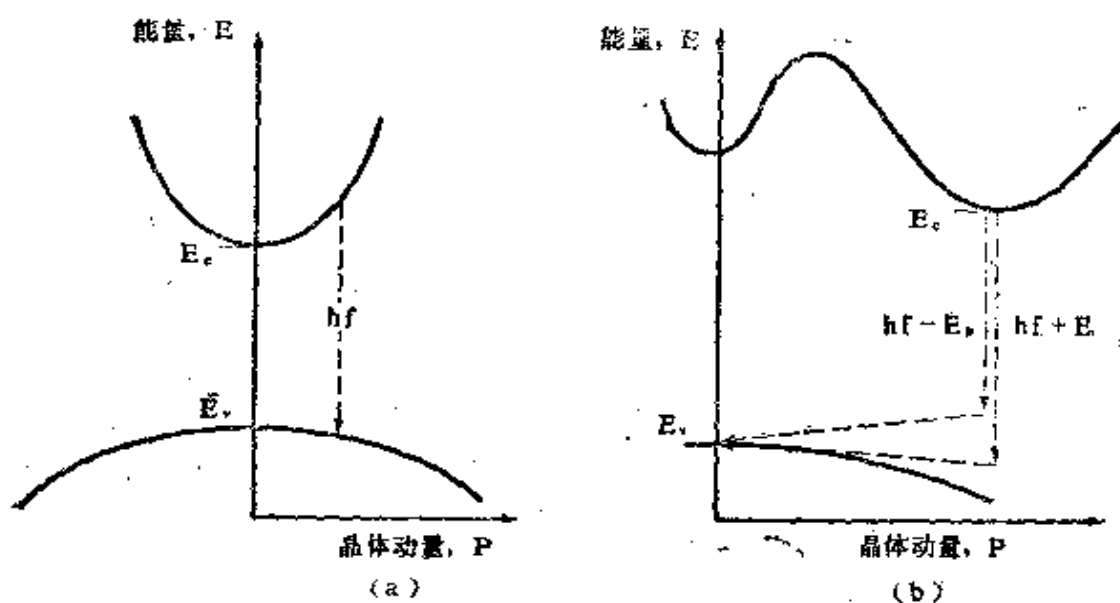


图 3.9 半导体中的辐射复合
(a) 直接带隙; (b) 间接带隙

和 τ_h (对空穴), 它们分别为

$$\tau_n = -\frac{\Delta n}{U} \quad (3.19)$$

$$\tau_h = -\frac{\Delta p}{U}$$

式中, U 为净复合率, Δn 和 Δp 是相应的载流子从它们热平衡时的值 n_0 和 p_0 的扰动。

对 $\Delta n = \Delta p$ 的辐射复合机构而言, 由式 (3.18) 确定的特征寿命是^[3.2]

$$\tau = \frac{n_0 p_0}{B n_i^2 (n_0 + p_0)} \quad (3.20)$$

硅的 B 值约为 $2 \times 10^{-16} \text{ cm}^3/\text{s}$ ^[3.2]。

正如所料, 直接带隙材料的辐射复合寿命比间接带隙材料的小得多。利用 GaAs 及其合金为材料的商用半导体激光器和光发射二极管就是以辐射复合过程作为基础的。但对硅来说, 其它的复合机构远比这重要得多。

3.4.3 俄歇复合

在俄歇 (Auger) 效应中, 电子与空穴复合时, 将多余的能量传给第二个电子 (无论在导带中或者在价带中) 而不是发射光。图 3.10 示出了这个过程。然后, 第二个电子通过发射声子弛豫回到它初始所在的能级。俄歇复合就是更熟悉的碰撞电离效应的逆过程。在碰撞电离的过程中, 高能电子与原子碰撞, 打开了一个键并产生一对电子-空穴对。对具有充足的电子和空穴的材料来说, 与俄歇过程有关的特征寿命 τ 分别是^[3.2]:

$$\frac{1}{\tau} = Cnp + Dn^2 \quad (3.21)$$

或

$$\frac{1}{\tau} = Cnp + Dp^2$$

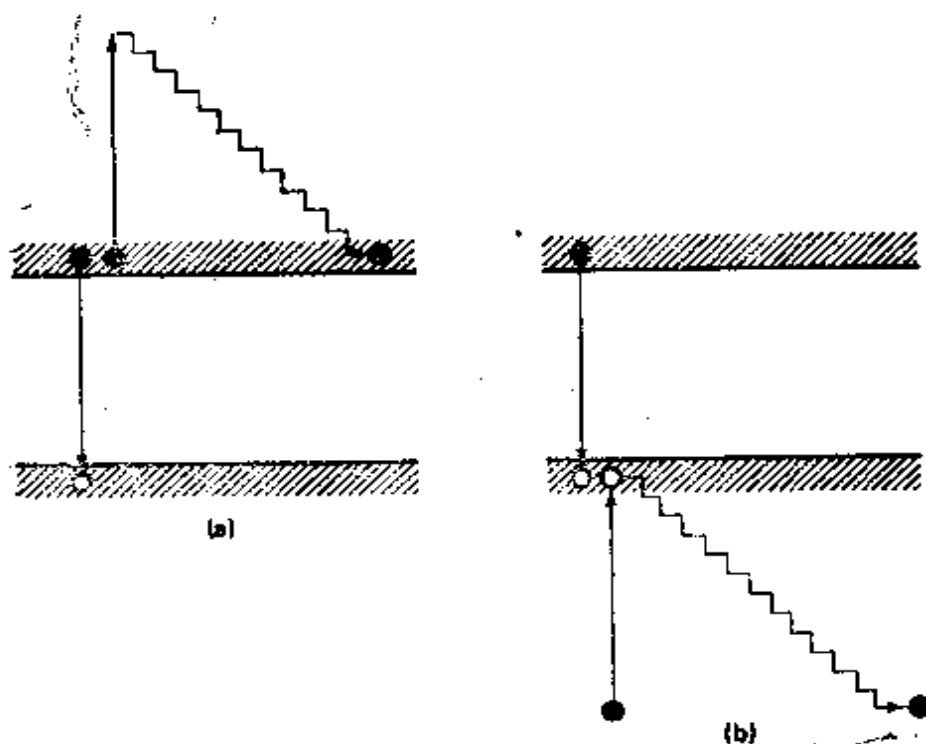


图 3.10 俄歇复合过程

- (a) 多余的能量传给导带中的电子;
(b) 多余的能量传给价带中的电子

在每种情况下，右边的第一项描述少数载流子能带的电子激发，第二项描述多数载流子能带的电子激发。由于第二项的影响，高掺杂材料中俄歇复合尤其显著。对于高质量硅，掺杂浓度大于 10^{17} cm^{-3} 时，俄歇复合处于支配地位。图 3.11 示出高质量硅的寿命随掺杂浓度增加而变化的实验结果。结果表明，在高掺杂的情况下，由于俄歇复合，寿命将迅速减小。

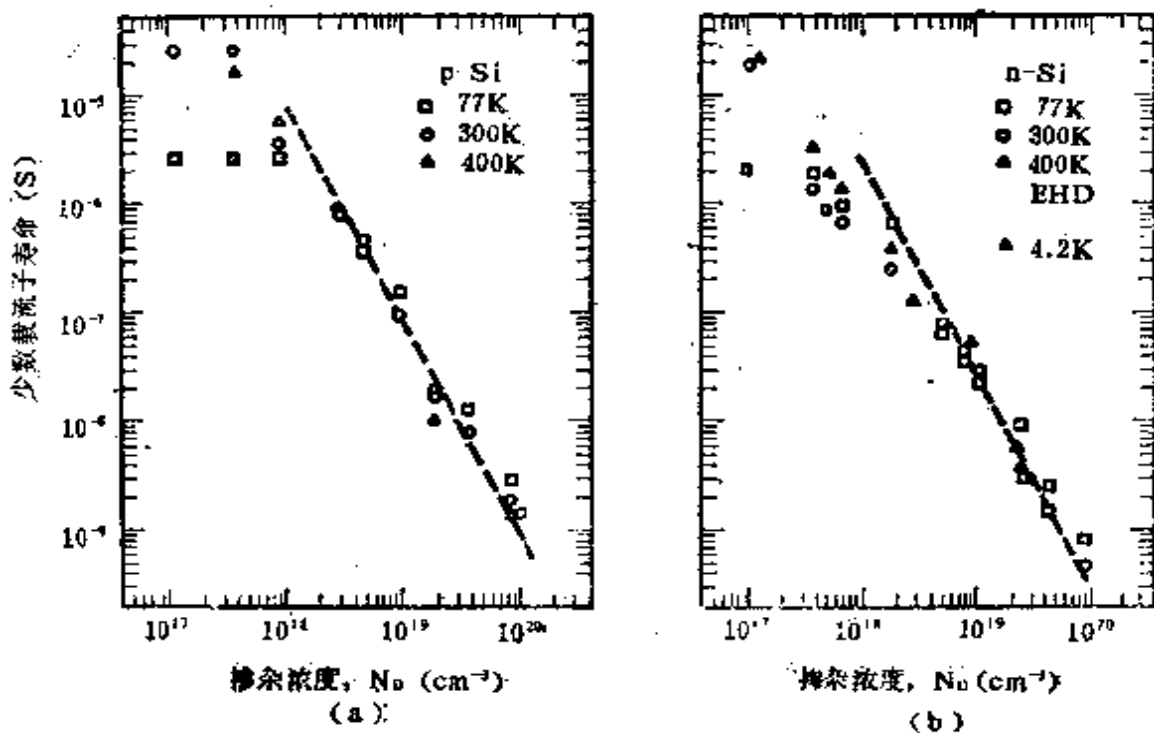


图 3.11 高质量硅中复合寿命的实验结果

短划线代表理论预计的平方关系曲线

(a) p-型硅; (b) n-型硅

[根据 J. Dziewior 和 W. Schmid 应用物理快报
31 (1977) 346~348]

3.4.4 通过陷阱的复合

在第二章已经指出，半导体中的杂质和缺陷会在禁带间隙中产生允许能级。这些缺陷能级引起一种很有效的两级复合过程。如图 3.12(a)所示，在此过程中，电子从导带能级弛豫到缺陷能级，然后再弛豫到价带，结果与一个空穴复合。

对此过程的动力学分析是简单而冗长的^[3,4]。其结果是，通

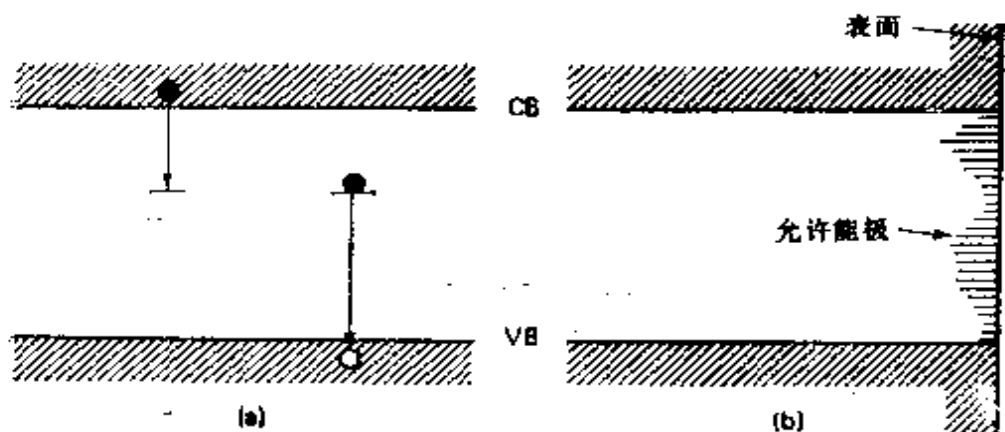


图 3.12

- (a) 通过半导体禁带中的陷阱能级的两级复合过程;
(b) 在半导体表面位于禁带中的表面态

过陷阱的净复合-产生率 U_T 可写为

$$U_T = \frac{np - n_i^2}{\tau_{h0}(n + n_1) + \tau_{e0}(p + p_1)} \quad (3.22)$$

式中, τ_{h0} 和 τ_{e0} 是寿命参数, 它们的大小取决于陷阱的类型和陷阱缺陷的体密度; n_1 和 p_1 是分析过程中产生的参数, 此分析过程还引入一个复合速率与陷阱能级 E_t 的关系式:

$$n_1 = N_c \exp\left(\frac{E_t - E_c}{kT}\right) \quad (3.23)$$

$$n_1 p_1 = n_i^2 \quad (3.24)$$

式(3.23)在形式上与用费密能级表示电子浓度的公式(2.14)和(2.15)很相似。如果 τ_{e0} 和 τ_{h0} 数量级相同, 不难证明, 当 $n_1 \approx p_1$ 时, U 有其峰值。当缺陷能级位于禁带间隙中央附近时, 就出现这种情况。因此, 在带隙中央引入能级的杂质是有效的复合中心。

3.4.5 表面复合

表面可以说是晶体结构中有相当严重缺陷的地方。如图3.12(b)所示, 在表面处存在许多能量位于禁带中的允许能态。因此, 根据3.4.4节所叙述的机构, 在表面处, 复合很容易发生。

单能级表面态每单位面积的净复合率 U_A 具有与式 (3.22) 类似的形式, 即

$$U_A = \frac{S_{e0} S_{h0} (np - n_i^2)}{S_{e0} (n + n_1) + S_{h0} (p + p_1)} \quad (3.25)$$

式中, S_{e0} 和 S_{h0} 是表面复合速度。位于带隙中央附近的表面态能级也是最有效的复合中心。

3.5 半导体器件物理学的基本方程

3.5.1 引言

在前面几节中已经概述了半导体的有关特性, 这些内容现在将被归纳为一组能描述半导体器件工作的基本方程。这些方程的解使我们能够确定包括太阳电池在内的大部分半导体器件的理想特性。忽略其余两维空间的变化, 方程组将写成一维的形式。它们的三维形式与一维形式是相似的, 只是用对矢量 (电场, 电流密度) 的散度算符和对标量 (浓度, 势能) 的梯度算符来代替空间微商。

3.5.2 泊松方程

这个方程组的第一方程也许自静电学就已经是熟悉的。这第一个方程就是泊松方程, 它是麦克斯韦尔 (Maxwell) 方程组中的一个方程^[3.5], 它描述了电场散度与空间电荷密度 ρ 之间的关系, 在一维情况下, 其形式为

$$\frac{d\xi}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (3.26)$$

式中, ϵ 是材料的介电常数。此方程是高斯定律的微分形式。高斯定律对我们来说可能更熟悉些。

让我们来看一看半导体中电荷密度的贡献者。导带中的电子贡献一个负电荷, 而空穴贡献一个正电荷。一个已电离的施主杂

质（即失去其多余的电子）由于不能抵消原子核的多余正电荷因而贡献一个正电荷；同理，一个已电离的受主杂质贡献一个负电荷。因此，

$$\rho = q(p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (3.27)$$

式中， p 和 n 是空穴和电子的浓度， N_D^+ 和 N_A^- 分别是已电离的施主和受主的浓度。较少的特殊杂质和缺陷也能起电荷储存中心的作用，因此，相应的项应该包括在式(3.27)中。然而，由于这种杂质和缺陷的体密度在太阳电池中应尽可能的小，因此对电荷的贡献相对来讲是小的。

如第二章中所提到的，在正常情况下，大部分施主和受主都被电离，因此

$$\begin{aligned} N_D^+ &\approx N_D \\ N_A^- &\approx N_A \end{aligned} \quad (3.28)$$

式中， N_D 和 N_A 为施主和受主杂质的总浓度。

3.5.3 电流密度方程

在第二章中已经看出，电子和空穴通过漂移和扩散过程可对电流作出贡献。因此，电子和空穴的总电流密度 J_n 和 J_p 的表达式可写成

$$\begin{aligned} J_n &= q\mu_n n \mathcal{E} + qD_n \frac{dn}{dx} \\ J_p &= q\mu_p p \mathcal{E} - qD_p \frac{dp}{dx} \end{aligned} \quad (3.29)$$

迁移率和扩散常数的关系由爱因斯坦关系式 [$D_n = (kT/q)\mu_n$, $D_p = (kT/q)\mu_p$] 确定。

3.5.4 连续方程

方程组之最后的一个方程是“簿记”型(“bookkeeping”)

方程,此方程仅留意系统中电子和空穴数目并保证电流的连续性。

参看图 3.13 中长为 δx 、横截面积为 A 的单元体积,可以说这个体积中电子的净增加率等于它们进入的速率减去它们出去的速率,加上该体积中它们的产生率,减去它们的复合率。而它们的进入速率和出去速率是与单元体积各个面上的电流密度成比例的。因此,

$$\begin{aligned} \text{进入速率} - \text{出去速率} &= -\frac{A}{q} \{ -J_n(x) - [-J_n(x + \delta x)] \} \\ &= -\frac{A}{q} \frac{dJ_n}{dx} \delta x \end{aligned} \quad (3.30)$$

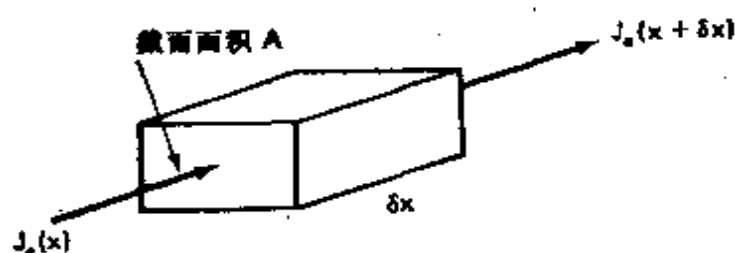


图 3.13 推导电子连续方程用的单元体积

$$\text{产生率} - \text{复合率} = A\delta x(G - U) \quad (3.31)$$

式中, G 是由于外部作用(如光照)所引起的净产生率, U 是净复合率。在稳态情况下,净增加率必须为 0, 这样就有

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} = U - G \quad (3.32)$$

同样, 对于空穴有

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} = -(U - G) \quad (3.33)$$

3.5.5 方程组

基本方程组为:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\xi}{dx} &= \frac{q}{e} (p - n + N_D - N_A) \\
 J_n &= q\mu_n n \xi + qD_n \frac{dn}{dx} \\
 J_p &= q\mu_p p \xi - qD_p \frac{dp}{dx} \\
 \frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} &= U - G \\
 \frac{1}{p} \frac{dJ_p}{dx} &= -(U - G)
 \end{aligned}
 \tag{3.34}$$

对于 U 和 G 还需要辅助的关系式，这些项的表达式取决于所涉及的具体过程。

式 (3.34) 形成一组互相有关的非线性微分方程组，因此不可能找到通用的解析解。但可用数字计算机求出一系列半导体器件结构的理想特性的数值解。参考文献 3.6~3.8 介绍了应用数字计算机求解太阳能电池问题的例子。通过引入一系列考虑周详的近似处理，可能极简单地就可求得这些方程的解，而且对所包括的物理原理有更透彻的理解。这个方法将在第四章中论述。

3.6 小 结

在半导体中，由能量大于禁带宽度的光子所组成的光能通过产生电子-空穴对被吸收。在直接带隙半导体中光很快被吸收。在间接带隙材料中，对于光子能量接近能带间隙宽度的情况，光的吸收过程还需要发射或吸收一个声子，因此，间接带隙材料对这样能量的光子的吸收比较微弱。但是，当光子能量较高时，由于也能直接跃迁，间接带隙材料便变成对光强吸收。

超过平衡状态值的载流子浓度的复合可通过各种各样的过程发生。辐射复合是光吸收的逆过程。对直接带隙半导体来说，辐射复合是一个重要的复合机构。在高掺杂浓度的情况下，俄歇复合是重要的。而对间接带隙半导体和对那些用落后工艺生产的半

导体材料来说，由杂质和缺陷引起的陷阱复合是重要的。这些复合过程是同时进行的，总复合率就是各个复合率的总和。净复合寿命的倒数等于各个寿命的倒数之和。在半导体表面也能特别有效地发生复合。

作为我们复习半导体特性的结尾和分析太阳能电池特性的起点，我们归纳出一组互相牵连的微分方程组，这些方程描述了对确定太阳能电池内部工作很重要的参量的空间分布。对这些方程求解的方法将在第四章讨论。

练 习 题

3.1 单色光垂直入射到平的硅表面，利用图 3.1 的数据，计算下列波长处的反射系数：(a) 1000nm；(b) 400nm；(c) 300nm。〔注意：光子能量 (hf) 和真空中波长之间的关系为 $\lambda (\mu\text{m}) = 1.24/hf(\text{eV})$ 〕。

3.2 (a) 光子通量为每秒、每单位面积 N 个光子的单色光入射到半导体表面，其反射系数为 R 。如果半导体在该波长的吸收系数是 α ，求光子通量与光进入半导体之深度 x 的关系式。

(b) 假设每吸收一个光子产生一对电子-空穴对，根据上述参数求出电子-空穴对的产生率 G 与光穿透半导体之深度的关系式。

3.3 地面阳光的光子通量约在 700nm 波长附近达到峰值。利用图 3.4 和 3.6 的数据，试比较在此波长下光子通量在 Si 和 GaAs 中减小到它刚进入半导体时的数目的 10% 时的深度。

3.4 考虑一个特殊的半导体样品，通过计算，已知少数辐射复合寿命为 $100\mu\text{s}$ ，俄歇复合寿命为 $50\mu\text{s}$ ，陷阱过程的寿命为 $10\mu\text{s}$ 。假定没有其他的有效复合过程，那么该材料的净寿命是多少？

3.5 一个 n 型硅样品经光照射后，电子浓度稳定在 10^{22}m^{-3} ，空穴浓度也稳定在 10^{15}m^{-3} 。假定陷阱位于导带边下面的下列各个能级处：(a) 0.03 eV；(b) 0.3 eV；(c) 0.5 eV；(d) 0.8 eV；(e) 1.0 eV。通过计算以上各种情况下的电子和空穴的复合率，求出陷阱复合效率与陷阱所在能量的关系。假设每种情况中所具有的陷阱密度和俘获截面使得 τ_{n0} 和 τ_{p0} 二者都等于 $1\mu\text{s}$ ，并利用数值： $N_{\text{C}} = 3 \times 10^{25}\text{m}^{-3}$ ， $n_{\text{I}} = 1.5 \times 10^{18}\text{m}^{-3}$ ，及 $kT/q = 26\text{mV}$ 。

3.6 根据半导体的电特性，说明为什么当光子能量接近禁带宽度时吸收系数随光子能量的增加而增大。

参 考 文 献

- [3.1] O. S. Heavens, *Optical Properties of Thin Solid Films* (London: Butterworths, 1955).
- [3.2] J. I. Pankove, *Optical Processes in Semiconductors* (Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, 1971).
- [3.3] K. Rajkanan, R. Singh, and J. Shewchun, "Absorption Coefficient of Silicon for Solar Cell Calculations," *Solid-State Electronics* 22(1979), 793.
- [3.4] C. T. Sah, R. N. Noyce, and W. Shockley, "Carrier Generation and Recombination in p - n Junctions and p - n Junction Characteristics," *Proceedings of the IRE* 45 (1957), 1228.
- [3.5] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices* (New York: Wiley, 1969).
- [3.6] P. M. Dunbar and J. R. Hauser, "A Study of Efficiency in Low Resistivity Silicon Solar Cells," *Solid-State Electronics* 19 (1976), 95~102.
- [3.7] J. G. Fossum, "Computer-Aided Numerical-Analysis of Silicon Solar Cells," *Solid-State Electronics* 19(1976), 269~277.
- [3.8] M. A. Green, F. D. King, and J. Shewchun, "Minority Carrier MIS Tunnel Diodes and Their Application to Electron-and Photo-voltaic Energy Conversion," *Solid-State Electronics* 17 (1974), 551~561.

第四章 p-n 结二极管

4.1 引言

掺有施主杂质的半导体常温下导带中的电子数比掺杂前增多，称为n型材料。掺有受主杂质的称为p型材料。最常见的太阳能电池实质上是面积很大的p-n结二极管。这样的二极管是在n型和p型区之间制造一个结而形成。本章将分析无光照和有光照时这个结的基本性质。

对于光伏能量转换来说，器件的基本要求是半导体结构的电学非对称性。图4.1(a)表示p-n结具有所要求的非对称性。由于n区的电子浓度高而空穴浓度低，因此，电子容易流过这种材料而空穴却很困难。对p型材料来说，情况正好相反。当半导体材料受到光照时，材料内产生过剩电子-空穴对。载流子输运

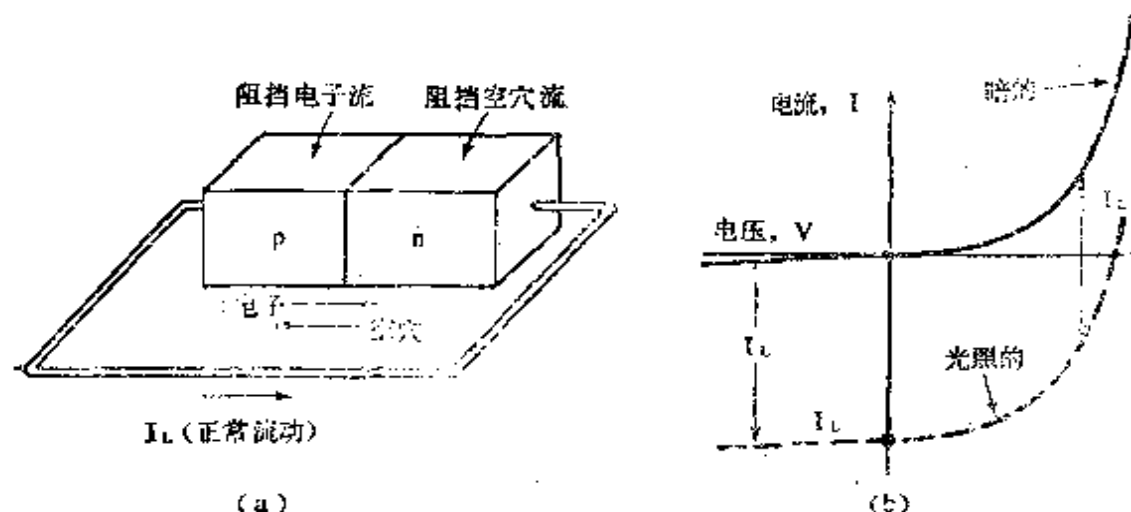


图 4.1

- (a) p-n 结二极管的非对称性，当结受光照时，非对称特性将在连接 p 区和 n 区的外导线里引起净电流；
- (b) 该光生电流叠加到二极管的正常整流电流-电压特性上，结果在第四象限形成一个可以从器件取得功率的区域

性质的固有非对称性促使所产生的电子从 p 区向 n 区流动，而空穴流方向相反。受到光照的 p-n 结在短路时，导线中将有电流流过。本章将指出这种光生电流是叠加到正常二极管整流特性上的，从而给出如图 4.1(b) 所示的可以从电池获得功率的工作区。

4.2 p-n 结的静电学

假定有如图 4.2 所示的孤立的 n 型和 p 型半导体块。如果将它们拼在一起，可以预料电子将从高浓度区（n 型边）向低浓度区（p 型边）流动，空穴也一样。然而，n 型边由于失去电子所呈现出的电离施主（正电荷）将造成这个边的电荷不平衡。同样，p 型边由于失去空穴将呈现负电荷。这些剩余电荷将建立一个阻碍电子和空穴自然扩散的电场，从而达到一个平衡状态。

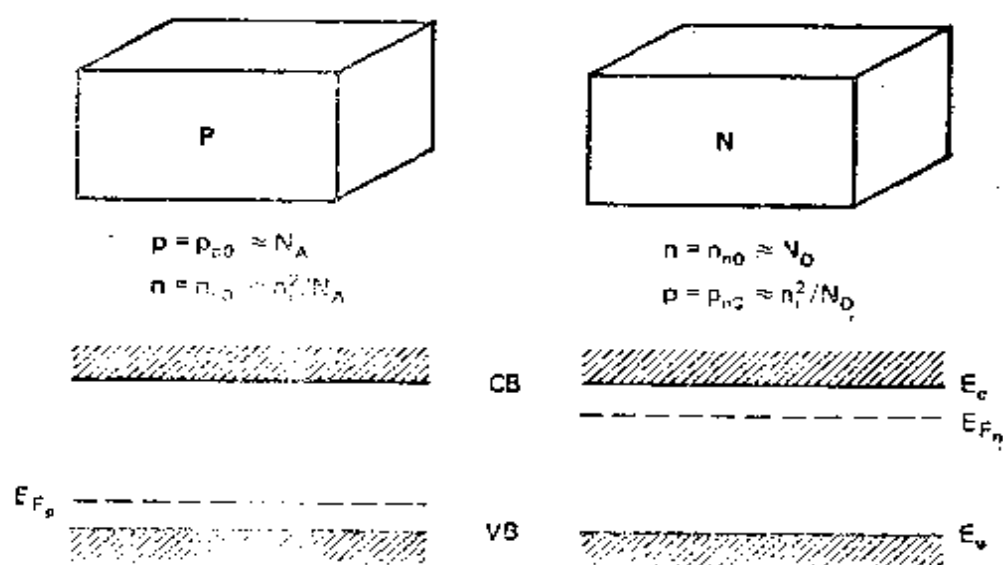


图 4.2 孤立的 P 型和 n 型半导体块及其相应的能带图

通过研究费密能级，可以得到平衡状态的特性。处于热平衡的系统只能有一个费密能级。

可以预料，在离开结足够远的地方，孤立材料的状态将不受扰动。参考图 4.3，这意味着在结附近必定有一个过渡区，在过渡区中，产生电位变化 ψ_0 。由该图可得 ψ_0 的值，即

$$q\psi_0 = E_s - E_1 - E_2 \quad (4.1)$$

E_1 和 E_2 的表达式已由式 (2.28) 和 (2.30) 给出, 也表示在图 4.3 中。因此

$$\begin{aligned} q\psi_0 &= E_s - kT \ln\left(\frac{N_v}{N_A}\right) - kT \ln\left(\frac{N_c}{N_D}\right) \\ &= E_s - kT \ln\left(\frac{N_c N_v}{N_A N_D}\right) \end{aligned} \quad (4.2)$$

而由式 (2.17), 有

$$n_i^2 = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_s}{kT}\right)$$

因此,

$$\psi_0 = -\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) \quad (4.3)$$

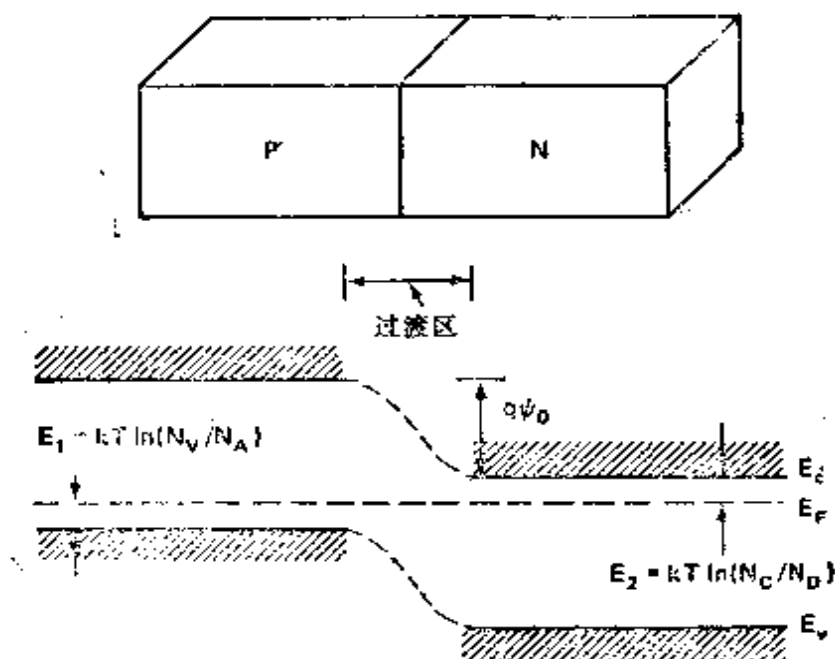


图 4.3 将孤立的 P 型和 n 型区拼放在一起所形成的 p-n 结及相应的热平衡状态下的能带图

外加电压 V_a , 将使二极管两边的电势差变化 V_a 。因此, 过渡区两端的电势将变为 $(\psi_0 - V_a)$ 。

画出对应于图 4.3 的载流子浓度图是有益的。这些载流子浓

度与费密能级和各自能带之间的能量差呈指数关系。用对数坐标表示的载流子浓度示于图 4.4 中。与图 4.4 相对应的由式 (3.27) 给出的空间电荷密度 ρ 的分布图如图 4.5(a) 的虚线所示。耗尽区边缘附近 ρ 的急剧变化导致第一个近似，即耗尽近似。

在这个近似中，器件被分成两个区域，即假设空间电荷密度处处为零的准中性区，和假设载流子浓度是如此之小以至于对空间电荷密度的贡献仅仅来自电离杂质的耗尽区。这个近似实质上只是使空间电荷分布曲线更陡峭，正如图 4.5(a) 中实线所表示的那样。

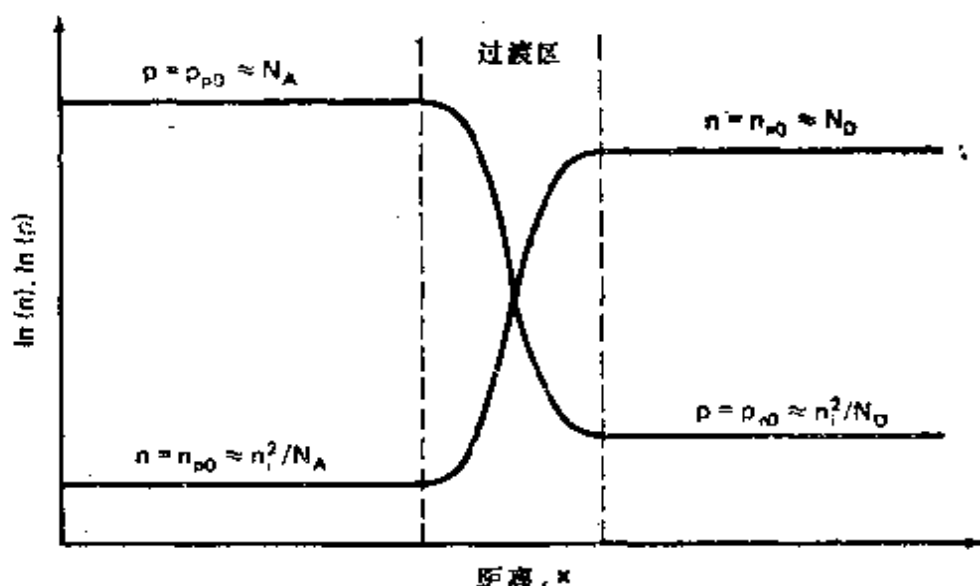


图 4.4 以自然对数坐标表示的对应于图 4.3 之电子和空穴浓度分布
由于这些浓度与费密能级和各自能带之间的能量差呈指数关系，所以与图 4.3 对应的浓度分布图用对数坐标表示时，其分布形状呈线性

借助于这种近似，要求出耗尽区的如图 4.5(b) 和 (c) 所示的电场和电势分布是简单的事情。只要将空间电荷分布依次积分，并记住电场强度是电势的负梯度就可以。耗尽区场强最大值 $\mathcal{E}_{\max}$ ，耗尽区宽度 W ，以及该区在结两边所延伸的距离 l_n 和 l_p ，分别由下列各式表示^(4.1)：

$$\mathcal{E}_{\max} = - \left[\frac{2q}{\epsilon} (\psi_0 - V_a) / \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{1/2}$$

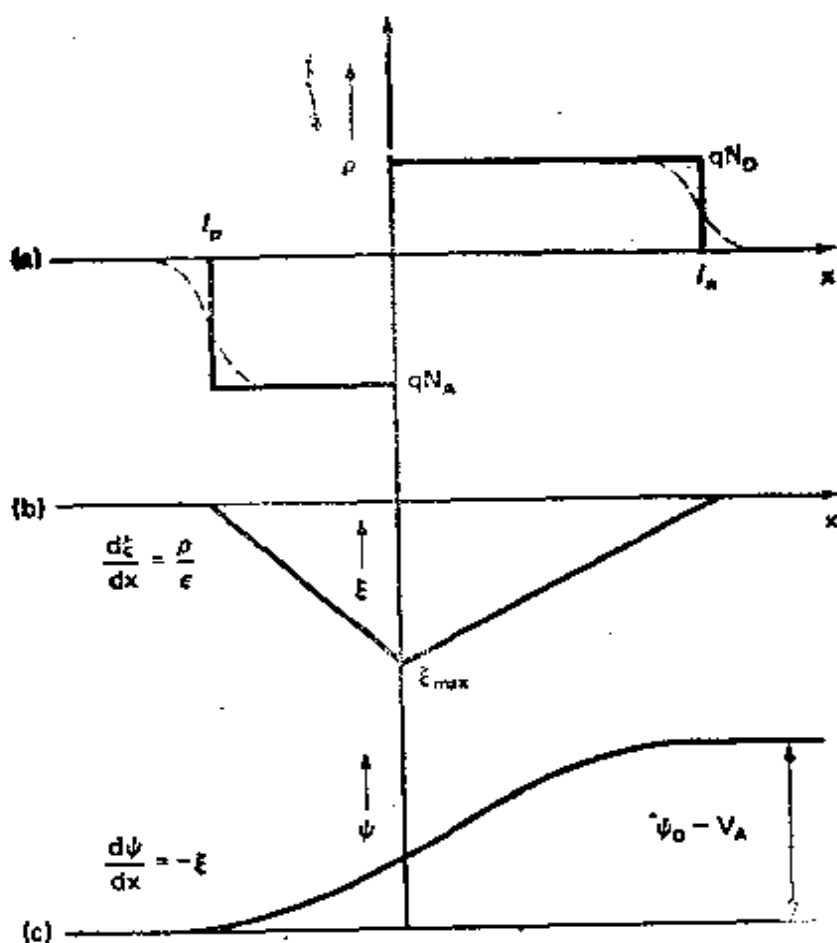


图 4.5

- (a) 对应于图4.4的空间电荷密度，虚线表示实际分布，实线表示在耗尽近似假设情况下的分布；
 (b) 相应的电场强度；
 (c) 相应的电势分布；

$$W = l_n + l_p = \left[\frac{2\epsilon}{q} (\psi_0 - V_A) \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{1/2} \quad (4.4)$$

$$l_p = W \frac{N_D}{N_A + N_D} \quad l_n = W \frac{N_A}{N_A + N_D}$$

4.3 结 电 容

检测 p-n 结二极管中耗尽区的存在和测量其宽度是非常容易的事。在耗尽近似中，外加电压的变化会直接引起耗尽区边缘贮

存电荷的变化，就象图 4.6 表示的那样。这与间距为 W 的平行板电容器的情况一样。因此，耗尽区电容 C 是

$$C = \frac{\epsilon A}{W} \quad (4.5)$$

式中， W 由式 (4.4) 确定。如果二极管的一边是重掺杂，式 (4.5) 可简化为

$$\frac{C}{A} = \left[\frac{q\epsilon N}{2(\psi_0 - V_0)} \right]^{1/2} \quad (4.6)$$

式中， N 是 N_A 和 N_D 中较小者。反向偏置时，耗尽区电容在二极管总电容中处于支配地位。因此，测量出二极管或太阳电池的 C 随反向偏压的变化并画出 $1/C^2$ 随 V_0 的变化曲线，就可求出二极管轻掺杂一边的掺杂浓度 N 。当掺杂浓度不是常数时，也可以用类似方法^[4,22]来计算掺杂浓度的空间变化。

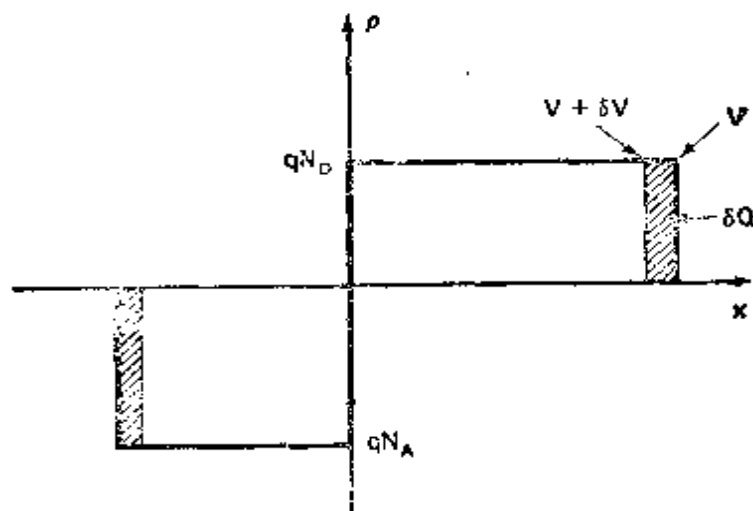


图 4.6 外加电压增加时耗尽区贮存电荷的变化 (耗尽近似)

4.4 载流子注入

下面的计算将求出在耗尽区边缘载流子浓度与偏压的关系。参看图 4.7，可找到浓度 $n_{p,0}$ 和 $p_{n,0}$ 的值。

在零偏置时，已知它们的值 (图 4.4) 为

$$p_{nb} = p_{na} = p_{no} \exp\left(-\frac{q\psi_0}{kT}\right) \approx \frac{n_i^2}{N_D} \quad (4.7)$$

$$n_{na} = n_{nb} = n_{no} \exp\left(-\frac{q\psi_0}{kT}\right) \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$

在耗尽区内，既存在最高电场强度，也存在最大的浓度梯度。通过该区的静电流实际上是两大项间的小小之差。对于空穴，有

$$J_A = q\mu_A p \xi - qD_A \frac{dp}{dx} \quad (4.8)$$

无论是漂移项还是扩散项都是很大的，但是方向相反。零偏置时，它们保持平衡。在中等偏置点，静电流是这两个比零偏置时大得多的项之间的小小之差。这导致第二个近似，即在耗尽区内，有

$$q\mu_A p \xi \approx qD_A \frac{dp}{dx} \quad (4.9)$$

利用 μ_A 和 D_A 间的爱因斯坦关系式，可得到

$$\xi \approx \frac{kT}{q} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} \quad (4.10)$$

在耗尽区内对式 (4.10) 两边之负值分别求积分，得到

$$\begin{aligned} \psi_0 - V_A &= -\frac{kT}{q} \ln p \Big|_a^b \\ &= \frac{kT}{q} \ln \frac{p_{na}}{p_{nb}} \end{aligned} \quad (4.11)$$

整理后得

$$p_{nb} = p_{na} e^{-q\psi_0/kT} e^{qV_A/kT} \quad (4.12)$$

但是，由于在 a 点应遵循电中性条件和引入第三个近似，即只考虑少数载流子浓度比多数载流子浓度低得多的情况 ($p_{na} \gg n_{na}$, $n_{nb} \gg p_{nb}$)，可得到

$$p_{pa} = N_A + n_{pa} \quad (\text{where } n_{pa} \text{ is small})$$

$$\approx p_{p0} \approx p_{n0} e^{q\phi_0/kT} \quad (4.13)$$

这样,

$$p_{pb} = p_{n0} e^{qV_0/kT} = \frac{n_i^2}{N_D} e^{qV_0/kT} \quad (4.14)$$

$$n_{pa} = n_{p0} e^{qV_0/kT} = \frac{n_i^2}{N_A} e^{qV_0/kT}$$

所以, 在耗尽区边缘少数载流子浓度随外加电压增加而指数增加, 由结两边的偏压来控制少数载流子浓度的过程称为少数载流子注入。

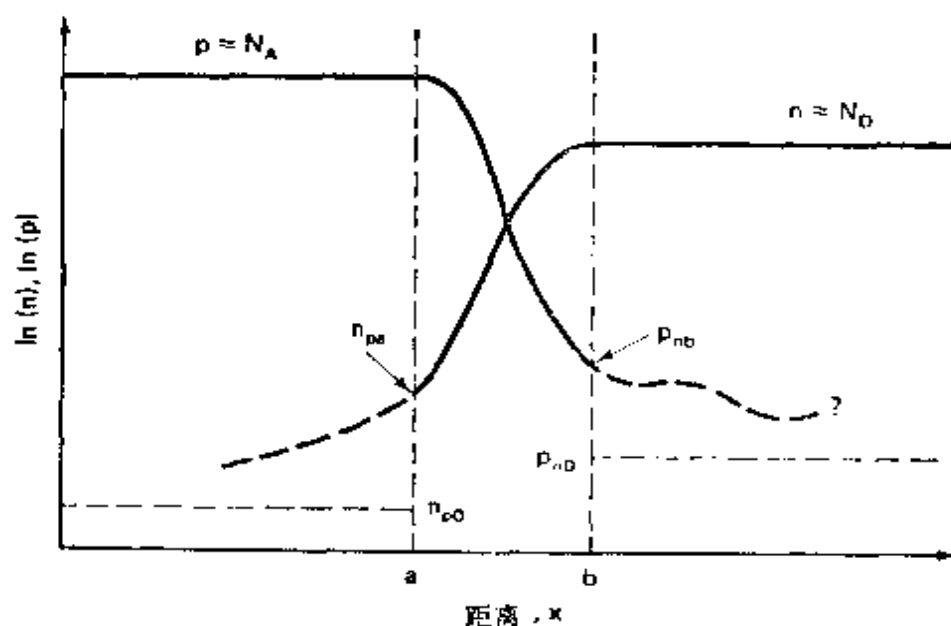


图 4.7 p-n 结加偏压时的载流子浓度分布

正文中已求出结耗尽区边缘的少数载流子浓度 n_{pa} 和 p_{nb} 的表达式, 后面, 还计算了虚线所示分布的精确形式

4.5 准中性区的扩散流

载流子可以通过漂移和扩散两种方式流动。如果半导体材料的均匀掺杂区是准中性的(空间电荷密度近似为零), 而且少数载

流子流并不很小，那么，少数载流子的流动将以扩散方式为主。

证明（间接证明法）：考虑n型准中性材料， $n \gg p$ ，而且少数载流子流并不很小（即 $J_e \gg J_h$ ，符号 $\gg$ 意指“不是远大于”）。

我们有

$$\begin{aligned} J_e &= q\mu_e n E + qD_e \frac{dn}{dx} \\ J_h &= q\mu_h p E - qD_h \frac{dp}{dx} \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$p - n + N_D \approx 0 \quad (\text{准中性})$$

微分后一个方程式，并记住 N_D 是常数，得到

$$\frac{dp}{dx} \approx -\frac{dn}{dx} \quad (4.16)$$

假设少数载流子流中漂移成分不能忽略，即

$$|q\mu_h p E| \ll \left| qD_h \frac{dp}{dx} \right| \quad (4.17)$$

由于 $n \gg p$ ，应用式 (4.17) 以及式 (4.16)，可得

$$|q\mu_h n E| \gg \left| qD_h \frac{dp}{dx} \right| \approx \left| qD_h \frac{dn}{dx} \right|^{*}$$

相当于，

$$|q\mu_h n E| \gg \left| qD_h \frac{dn}{dx} \right| \quad (4.18)$$

此外，由于 μ_e 和 μ_h 的大小差不多，因此有

$$|q\mu_e n E| \gg |q\mu_h p E| \quad (4.19)$$

从式 (4.17) 和式 (4.19) 可得出结论：

* 原文中 $|qD_h \frac{dp}{dx}| \gg |qD_h \frac{dn}{dx}|$ 应为 $|qD_h \frac{dp}{dx}| \approx |qD_h \frac{dn}{dx}|$

$$J_s \gg J_n$$

这就违背了初始条件之一。因此，式 (4.17) 的假设是错误的。这就导致下面的结果：

$$|q\mu_n p \xi| \ll \left| qD_n \frac{dp}{dx} \right|$$

即，准中性区少数载流子的流动以扩散方式为主，这就证明前面所述的结论是正确的。因此，第四个近似是

$$\begin{aligned} J_n &= -qD_n \frac{dp}{dx} \quad (\text{n 型准中性区}) \\ J_p &= qD_p \frac{dn}{dx} \quad (\text{p 型准中性区}) \end{aligned} \quad (4.20)$$

与多数载流子相比，数量较少的少数载流子它们基本上不受电场的影响。在下面章节中可以看到，它与 p-n 结二极管电流的关系是明显的。

4.6 暗 特 性

4.6.1 准中性区中的少数载流子

总结一下到目前为止所做的工作。我们已经说明了在分析过程中将二极管分成耗尽区和准空间电荷中性区是一个合理的近似；已经得知耗尽区边缘的少数载流子浓度与加到二极管上的电压呈指数关系，其结果示于图 4.7；此外，还证明了，当准中性区是均匀掺杂而且多数载流子流很小时，少数载流子主要是通过扩散方式流动。这样，就可以对图 4.7 中虚线所示的分布进行计算。

在二极管的 n 型一边，有

$$J_n = -qD_n \frac{dp}{dx} \quad (4.21)$$

而连续方程得

$$-\frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} = -(U - G) \quad (4.22)$$

在第三章曾给出几种复合机构的复合率的明确表达式。由式 (3.19) 所定义的载流子寿命, n 区的复合率可表达为这样的形式:

$$U = \frac{\Delta p}{\tau_n} \quad (4.23)$$

式中, Δp 是过剩的少数载流子空穴的浓度, 它等于总浓度 p_n 减去平衡浓度 p_{n0} ; τ_n 是少数载流子的寿命, 可以看成是常数, 至少在平衡状态微小扰动的情况下可以这样认为。将上面三个方程联立, 得到

$$D_n \frac{d^2 p_n}{dx^2} = \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_n} - G \quad (4.24)$$

无光照时, $G=0$, 且 $d^2 p_{n0}/dx^2=0$ 。因此, 方程 (4.24) 可简化为

$$\frac{d^2 \Delta p}{dx^2} = -\frac{\Delta p}{L_n^2} \quad (4.25)$$

式中

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (4.26)$$

L_n 具有长度的量纲, 称为扩散长度。以后就会明白, 在太阳能电池工作中, 这是一个十分重要的参数, 方程 (4.25) 的通解是

$$\Delta p = A e^{x/L_n} + B e^{-x/L_n} \quad (4.27)$$

常数 A 和 B 利用下面两个边界条件可以求出:

1. 在 $x=0$ 处, $p_{n0} = p_{n0} e^{qV/L_n T}$;
2. 当 $x \rightarrow \infty$ 时, p_n 是有限的, 因此, $A=0$ 这些边界条件给出特解:

$$p_n(x) = p_{n0} + p_{n0} [e^{qV/L_n T} - 1] e^{-x/L_n} \quad (4.28)$$

同样,

$$n_p(x') = n_{p0} + n_{p0}[e^{qV/L_p T} - 1]e^{-x'/L_p} \quad (4.29)$$

式中, x' 的定义见图 4.8(b)。

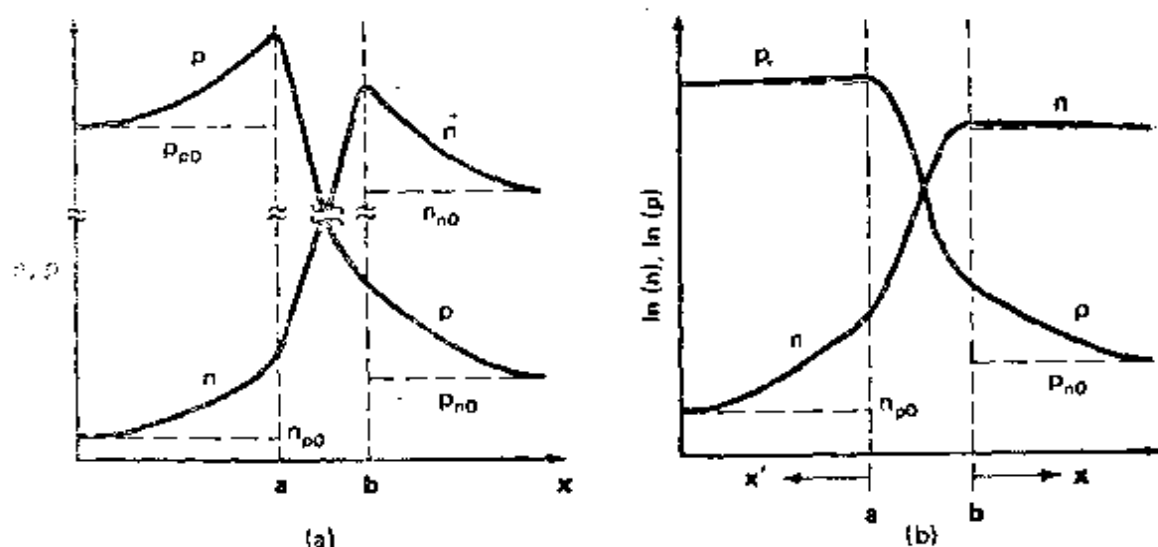


图 4.8

- (a) 正向偏置下, 整个 p-n 结二极管的载流子分布线性图;
 (b) 相应的半对数图;
 注意两图中与多数载流子有关的部分之差别

在整个二极管范围内的少数载流子浓度的这些解被绘制在图 4.8(a) 中。在准中性区, 为了保持空间电荷的中性, 多数载流子浓度的分布必须有相应的变化, 就象图 4.8(a) 中所示的那样。尽管绝对变化相同, 但在图 4.8(b) 的对数坐标图上多数载流子浓度的相对变化就显得非常小。

4.6.2 少数载流子电流

只要少数载流子分布已知, 计算少数载流子电流就是件很简单的事。由于在准中性区电流是扩散电流, 在 n 型一边, 有

$$J_n = -qD_n \frac{dn}{dx} \quad (4.30)$$

将式 (4.28) 代入, 得到

$$J_n(x) = \frac{qD_n p_{n0}}{L_n} (e^{qV/kT} - 1) e^{-x/L_n} \quad (4.31)$$

同样，在P区，有

$$J_p(x') = \frac{qD_p n_{p0}}{L_p} (e^{qV/kT} - 1) e^{-x'/L_p} \quad (4.32)$$

由这些关系式得到的电流分布示于图4.9(a)。为了计算二极管的总电流，必须知道同一点的电子和空穴的分量。现在，我们来考虑耗尽区的电流，由连续方程可得到

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} = U - G = -\frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} \quad (4.33)$$

因此，耗尽区电流的变化量为

$$\delta J_n = |\delta J_p| = q \int_{-W}^0 (U - G) dx \quad (4.34)$$

W 通常比 J_n 和 J_p 的特性衰减长度 L_n 和 L_p 小得多。这表明图4.9(a)非常不按比例。既然 W 很小，那么假设式(4.34)中的积分可以忽略就是一个合理的近似，因此， $\delta J_n = |\delta J_p| \approx 0$ 。这样一来，如图4.9(b)所示的那样， J_n 和 J_p 在整个耗尽区基本上是恒定的。如果按比例绘出 W ，这第五个近似就显得更加合理。由于在耗尽区各点的 J_n 和 J_p 都已知，现在就可以求出总电流。因此，

$$\begin{aligned} J_{\text{total}} &= J_n|_{x=0} + J_p|_{x=0} \\ &= \left(\frac{qD_n n_{p0}}{L_n} + \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} \right) (e^{qV/kT} - 1) \end{aligned} \quad (4.35)$$

由于 J_{total} 是不随位置变化的常数，现在就能够画出整个二极管的 J_n 和 J_p 的分布曲线，如图4.9(b)虚线所示。

分析的结果导出了理想二极管定律：

$$I = I_0 (e^{qV/kT} - 1) \quad (4.36)$$

对本书来说，重要的是所导出的饱和电流密度的表达式：

$$I_0 = A \left(\frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_B} \right) \quad (4.37)$$

式中， A 是二极管的横截面积。

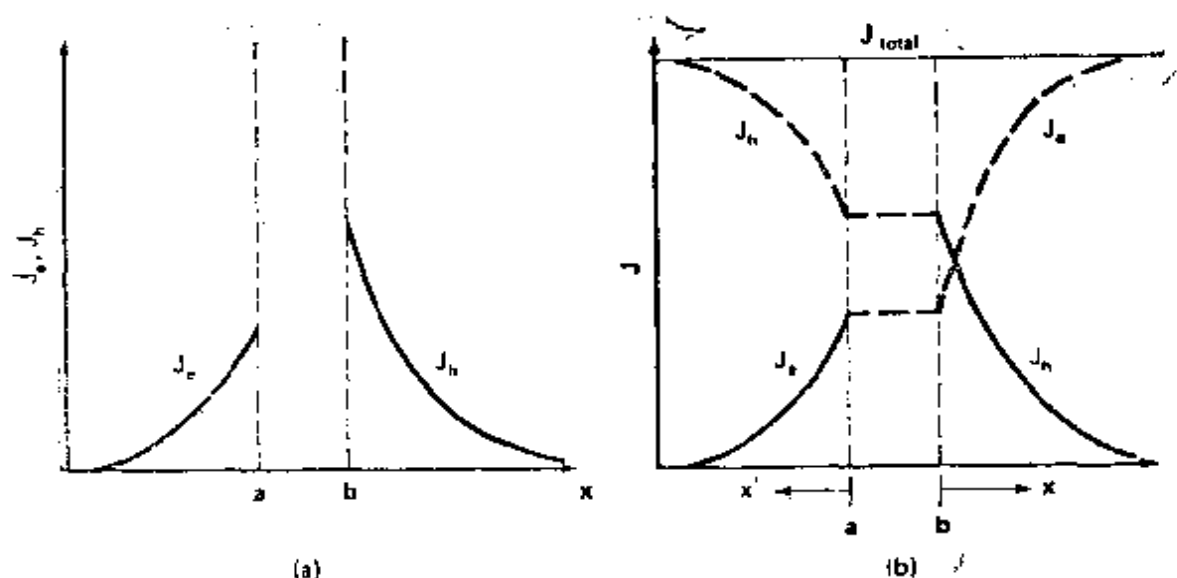


图 4.9

- (a) 对应于图4.8的 p-n 结二极管的少数载流子电流密度；
 (b) 在忽略耗尽区中的复合的情况下，二极管的少数载流子电流密度、多数载流子电流密度和总电流密度的分布

4.7 光照特性

现在我们来探索光照时二极管的特性。为了数学上的简化起见，假设我们考虑的是一个理想的情况，即假定光照时电子-空穴对的产生率在整个器件中都相同。这相当于电池受能量接近于半导体禁带宽度的光子所组成的长波长的光照射的特殊物理情况。这样的光只能被弱吸收，因而，在整个与特性有关的距离内，电子-空穴对的体产生速率基本不变。应当强调，这种均匀产生率的情况与太阳能转换的实际情况并不相符。比较实际的情况将在后面几章中用不同的方法进行研究。

问题：当光照所引起的电子-空穴对的体产生率 G 在整个器

件都相同时,推导 p-n 结二极管受光照时的理想电流-电压特性。

这种分析非常类似于无光照二极管的分析。为巩固这一内容,鼓励读者不看后面的解法,自己设法将这个问题解一遍。

已做出的解答:读者首先应当确信,不管器件是否受到光照,第一个到第四个近似以及由它们得到的中间结果都同样是有用的。既然这样,式(4.24)就仍然有效,只是此时 G 不是零而是常数。因此,在 n 型一边,有

$$\frac{d^2 \Delta p}{dx^2} = \frac{\Delta p}{L_n^2} - \frac{G}{D_n} \quad (4.38)$$

由于 G/D_n 是常数,相应的通解为

$$\Delta p = G\tau_n + Ce^{+x/L_n} + De^{-x/L_n} \quad (4.39)$$

边界条件与无光照二极管分析中的保持一样。这就得到特解为

$$p_n(x) = p_{n0} + G\tau_n + [p_{n0}(e^{qV/kT} - 1) - G\tau_n]e^{-x/L_n} \quad (4.40)$$

如图 4.10 所示,对于 $n_p(x')$ 也有类似表达式。

相应的电流密度为

$$J_n(x) = \frac{qD_n p_{n0}}{L_n} (e^{qV/kT} - 1)e^{-x/L_n} - qGL_n e^{-x/L_n} \quad (4.41)$$

对于 $J_p(x')$ 也有类似表达式。

再次忽略耗尽区的复合效应(近似 5),但包括耗尽区的产生效应,这种情况下可得到该区电流密度的变化为

$$|\delta J_p| = |\delta J_n| = qGW \quad (4.42)$$

因此,按前面所述方法处理,可得出如下电流-电压特性的关系式:

$$I = I_0(e^{qV/kT} - 1) - I_L \quad (4.43)$$

式中, I_0 同式(4.37)的值,而 I_L 的值为

$$I_L = qAG(L_n + W + L_p) \quad (4.44)$$

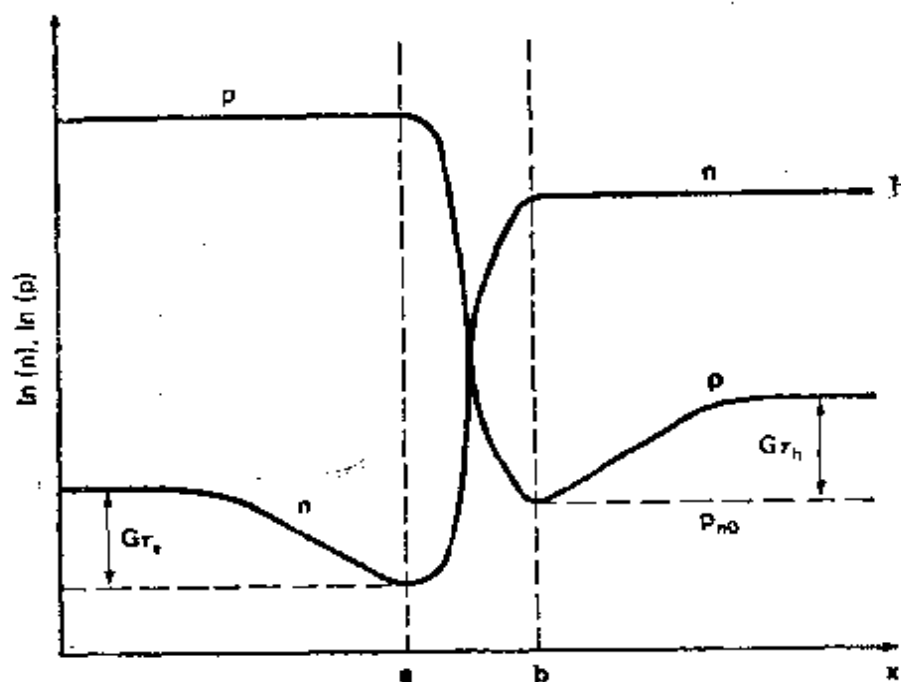


图 4.10 在红外光照射下（假设整个二极管内电子-空穴对的产生率相同）短路时 p-n 结的载流子分布

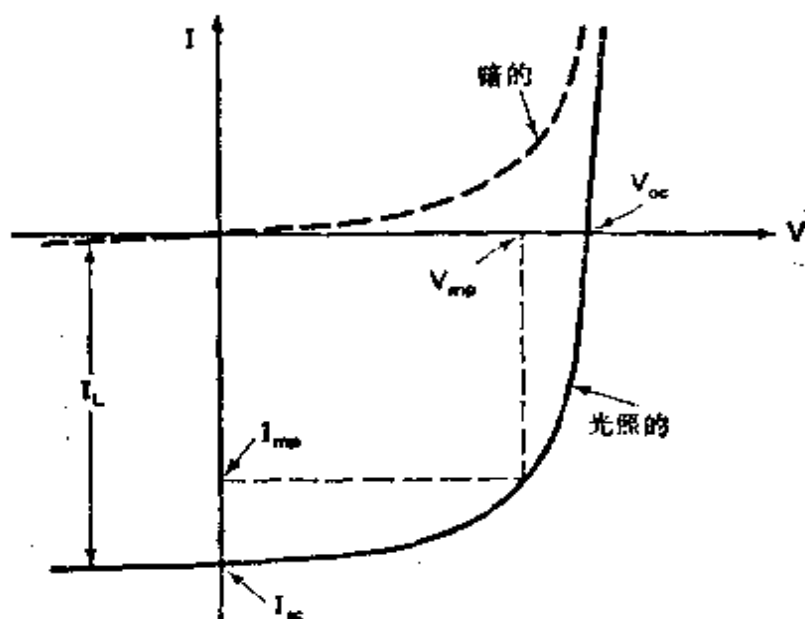


图 4.11 无光照和有光照时 p-n 结二极管的输出特性

这个结果示于图 4.11。请注意，光照下的特性曲线仅仅是将暗特性曲线下移 I_L 。这样，就在该图的第四象限形成一个可以从二极管取得功率的区域。

请注意, 式 (4.44) 的形式提出了一个在后面将要证实的结论。光生电流 I_L 可期望等于在二极管耗尽区及其两边一个少数载流子的扩散长度内全部光生载流子的贡献。耗尽区和通常比耗尽区两边一个扩散长度大得多的区域确实是 p-n 结太阳电池的“有效”收集区。

4.8 太阳电池的输出参数

通常用来描述太阳电池输出特性的有三个参数 (图 4.11)。

其中之一是短路电流 I_{sc} , 理想情况下, 它等于光生电流 I_L 。第二个参数是开路电压 V_{oc} 。令式 (4.43) 中 $I = 0$, 则得到理想值:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (4.45)$$

V_{oc} 由于与 I_0 有关, 因而取决于半导体的性质。第四象限中任一工作点的输出功率等于图 4.11 所示的矩形面积。一个特定工作点 (V_m , I_m) 会使输出功率最大。第三个参数, 即填充因子 FF 定义为

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (4.46)$$

它是输出特性曲线“方形”程度的量度, 对具有适当效率的电池来说, 其值在 0.7~0.85 范围内。理想情况下, 它只是开路电压 V_{oc} 的函数。图 4.12 示出 FF 的理想 (最大) 值与归一化开路电压 v_{oc} 的关系, v_{oc} 定义为 $v_{oc} = (qV_{oc}/kT)$ 。当 $v_{oc} > 10$ 时, 描述这个关系 (精确到四位有效数字) 的经验公式为 (可参看 5.4.4 节)

$$FF = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{v_{oc} + 1} \quad (4.47)$$

于是, 能量转换效率 η 由下式得到, 即

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_{in}} = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \quad (4.48)$$

式中, P_{in} 是入射到电池上的光的总功率。商用太阳电池的能量转换效率通常为 12~14%。

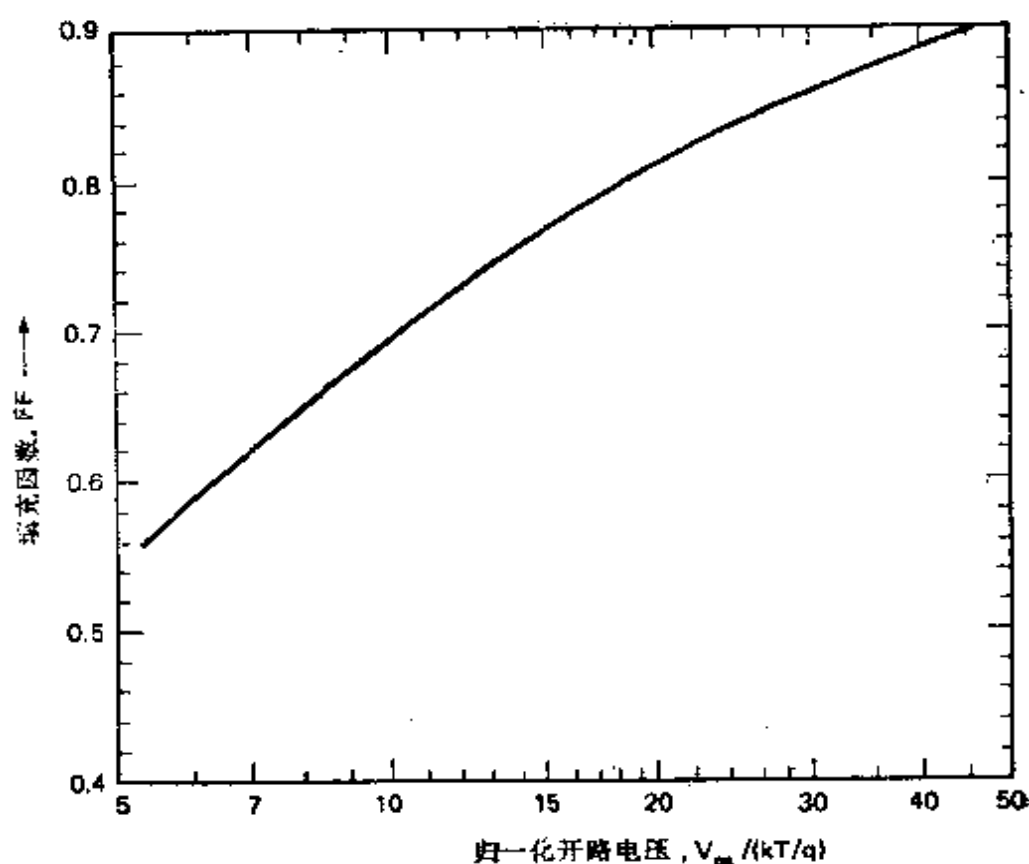


图 4.12 填充因子的理想值与用热电压 kT/q 归一化的开路电压的关系

4.9 有限电池尺寸对 I_0 的影响

正如式 (4.45) 指出的那样, 二极管饱和电流 I_0 决定了 V_{oc} 。在推导有关 I_0 的式 (4.37) 时, 隐含有二极管在结的两边延伸无限远距离的假定。实际的器件并非这样。一个有限大小的太阳电池示于图 4.13。

这就要对饱和电流 I_0 的值进行修正。修正值取决于外露表面的表面复合速度 (3.4.5 节)。所关心的两种极限情况是: (1) 这个速度很高, 接近于无限大; (2) 这个速度很低, 接近于零。在前一种情况下, 表面过剩少数载流子浓度为零; 在后一种情况下,

流入表面的少数载流子电流为零。用这些作边界条件，就可求出修正的 I_0 表达式（练习 4.3）。它有以下的形式^①：

$$I_0 = A \left(\frac{qD_n n_i^2}{L_n N_A} * F_p + \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_D} * F_n \right) \quad (4.49)$$

如果器件 p 型边的表面是高复合速度表面，则 F_p 有如下的形式：

$$F_p = \coth\left(\frac{W_p}{L_p}\right) \quad (4.50)$$

式中， W_p 标明在图 4.13 中。如果 n 型边的表面也是高复合速度表面，则相应的公式适用于 F_n 。

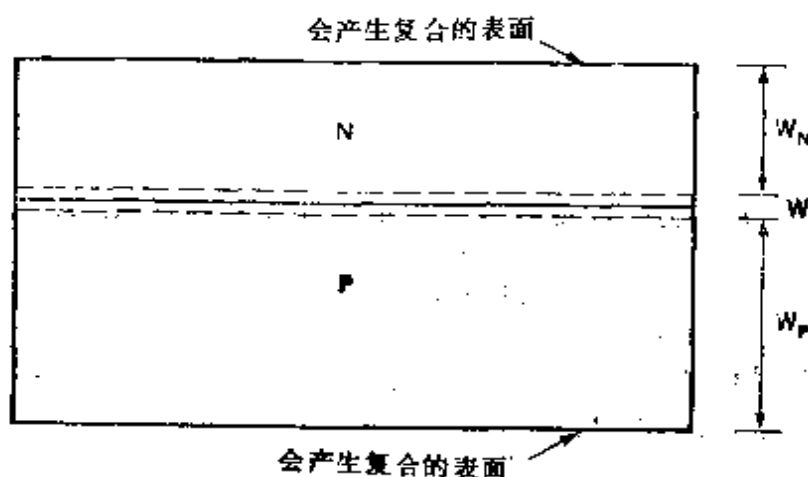


图 4.13 标明重要尺寸之基本太阳电池

① F_N 和 F_P 的一般表达式是 (4.51)

$$F_N = \frac{S_n \cosh(W_N/L_n) + D_n/L_n \sinh(W_N/L_n)}{D_n/L_n \cosh(W_N/L_n) + S_n \sinh(W_N/L_n)}$$

$$F_P = \frac{S_p \cosh(W_P/L_p) + D_p/L_p \sinh(W_P/L_p)}{D_p/L_p \cosh(W_P/L_p) + S_p \sinh(W_P/L_p)}$$

式中， S_n 和 S_p 是 3.4.5 节中引入的各表面的表面复合速度。如果此表面碰巧是低复合速度表面，那么 F_N 由下式确定，即

$$F_N = \tanh\left(\frac{W_N}{L_n}\right) \quad (4.51)$$

如果 p 区的表面也是低复合速度表面，则类似的公式适用于 F_P 。

请注意：如果两个表面都具有低的复合速度， I_0 就会出现最小值，因此 V_{oc} 将出现最大值。

4.10 小 结

通过这一系列近似,描述太阳能电池工作的一般方程组可简化为易于处理的形式。用这种方法求出了太阳能电池暗特性和光照特性的理想形式。

有光照时的特性曲线是将理想的暗电流-电压曲线向下移光生电流那样大的距离。太阳能电池收集光生电流的有效区域是结的耗尽区及耗尽区两边一个少数载流子扩散长度范围内的区域。

用来表征太阳能电池输出特性的参数是短路电流 I_{sc} 、开路电压 V_{oc} 以及填充因子 FF 。太阳能电池的表面状态必然在一定程度上影响开路电压,并且在后面有关章节中将证明它也影响短路电流。

练 习 题

4.1 一只均匀掺杂的 p-n 结二极管, P 型边杂质浓度为 $10^{24}/\text{m}^3$, n 型边杂质浓度为 $10^{22}/\text{m}^3$ 。在 300K 时,在下列偏置条件下,计算最大电场强度、耗尽区宽度以及单位面积的结电容:(a) 零偏置;(b) 0.4V 正向偏置;(c) 10V 反向偏置。

4.2 4.4 节的推导假设:在准中性区少数载流子浓度比多数载流子浓度低得多。求出保证这个假设仍然有效之最大外加电压的表达式。

4.3 (a) 考虑如图 4.13 所示的有限尺寸的电池。对背面复合速度很高和很低两种极端情况,推导无光照时 P 型边电子浓度与外加电压的关系式。在 P 型区的宽度比少数载流子扩散长度小得多的情况下,画出这些分布图并进行比较。

(b) 参考所画出的图,如果二极管的其他参数相同,指出那一种分布对二极管饱和电流贡献最小,也即在光照情况下能给出最大的开路电压?

4.4 下面是本章分析方法的另一个例子,它不要求那么多的数学推导。考虑一只尺寸比相应的少数载流子扩散长度小得多的电池,该电池前后表面的复合速度很高,假定为无限大。在这种情况下,与表面复合相比,忽略体复合将是一个很好的近似(即整个体区复合率 U 可假设为零)。求出当光生电子-空穴对产生率 G 在电池各处都一样时该二极管的饱和电流密度和

短路电流的表达式。

4.5 当电池温度为 300K 时, 面积为 100cm^2 的硅太阳电池在 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 光照下, 开路电压为 600mV, 短路电流为 3.3 A。假设电池工作在理想状况下, 问在最大功率点它的能量转换效率是多少?

参 考 文 献

- [4.1] A. S. Grove, *Physics and Technology of Semiconductor Devices* (New York, Wiley, 1967), p. 153.
- [4.2] Ibid., pp. 169~172.
- [4.3] J. P. McKelvey, *Solid State and Semiconductor Physics* (New York, Harper & Row, 1966), p. 422.

第五章 效率的极限、损失和测量

5.1 引言

入射到太阳能电池表面的阳光，在制造电池的半导体材料内产生电子-空穴对。电池具有不对称的电子学结构，这种结构使所产生的电子-空穴对中的电子和空穴分离并在联结电池两端的负载上产生电流。本章讨论该过程中能量转换效率的极限及各种非理想因素对效率的影响，并叙述光伏器件效率的测量方法。

5.2 效率的极限

5.2.1 概要

在第四章中，我们已用三个参数来表征 p-n 结太阳能电池的特性，它们是开路电压 (V_{oc})、短路电流 (I_{sc}) 和填充因数 (FF)

(图 4.11)。第四章还阐明填充因数的最大值是 V_{oc} 的函数。因此，后面仅讨论 I_{sc} 和 V_{oc} 的理想极限。

5.2.2 短路电流

计算从任何材料的太阳能电池所得到的短路电流的上限相对来说是容易的。在理想条件下，入射到电池表面能量大于材料禁带宽度的每一个光子产生一个电子流过外电路[⊖]。因此，为了计算 I_{sc} 的最大值，必须知道阳光的光子通量。这个数值可以根据阳光的能谱分布(第一章)计算得到。将已知波长的能量值除以该波长单个光子的能量 (hf 或 hc/λ) 即为光子通量。图 5.1(a) 示

⊖ 具有几倍于禁带宽度的极高能量的光子可能产生电子-空穴对，这个电子可具有足够的能量，再通过碰撞电离，在导带边上而产生第二对电子-空穴对 (3.4.3节)。但由于阳光中并没有多少这样的光子，所以这种机理在太阳能电池中是不重要的。

出第一章叙述过的 AM0 辐射和标准的地面 AM1.5 辐射的计算结果。

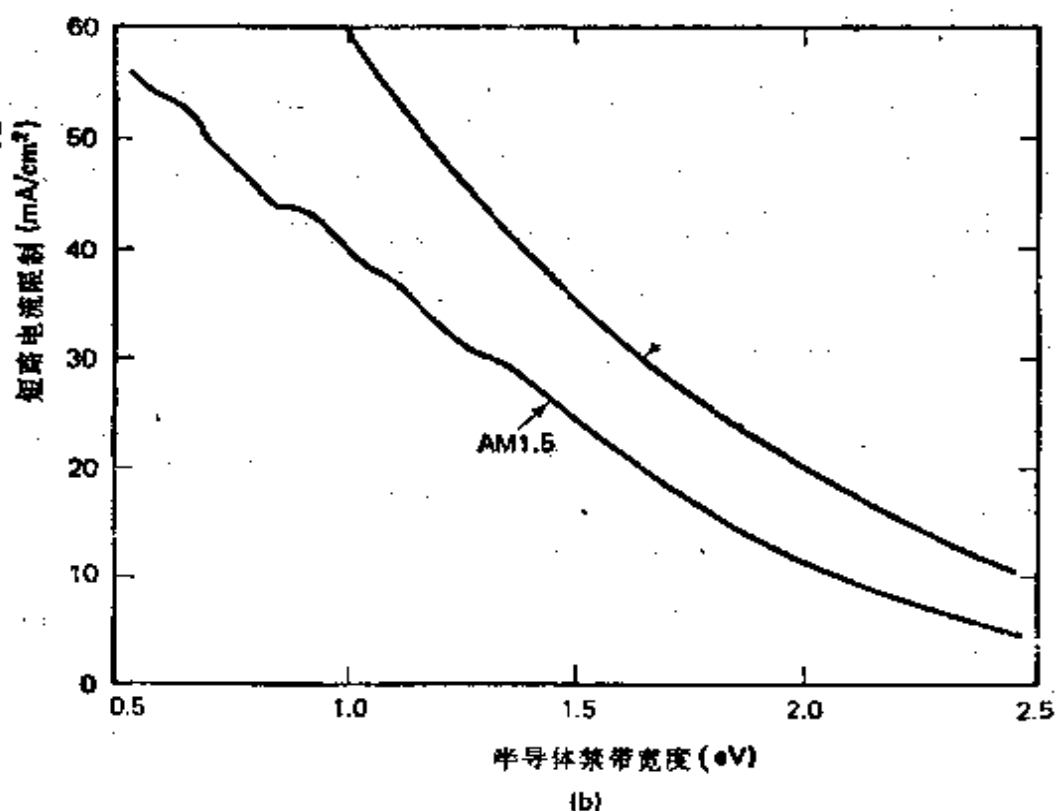
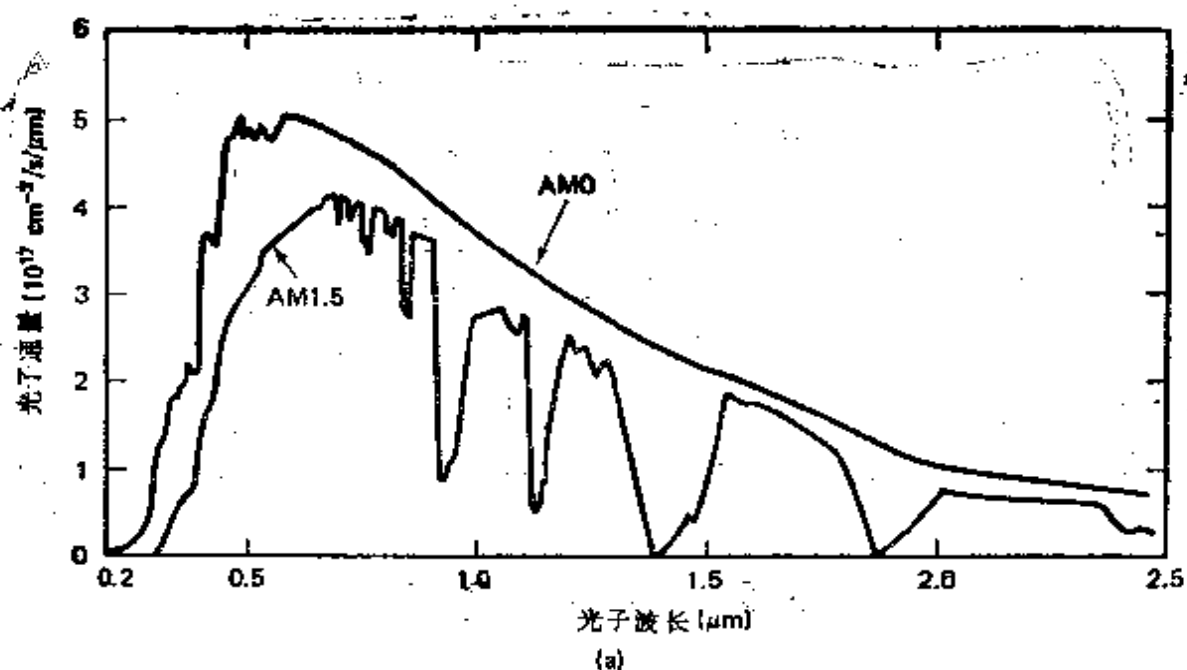


图 5.1

- (a) 对应于图1.3给出的AM0和AM1.5能量分布的阳光中的光子通量;
- (b) 相应的短路电流密度上限与太阳能电池材料禁带宽度的关系

I_{sc} 的最大值可以通过求光子能量分布的积分得出, 积分从短波长进行到刚能在给定半导体中产生电子-空穴对的最长波长 [光子能量 (以 eV 为单位) 与其波长 (以 μm 为单位) 的关系是 $E(\text{eV}) = 1.24/\lambda(\mu\text{m})$ 。对于硅, 禁带宽度约为 1.1 eV, 因此, 相应的波长 λ 是 $1.13\mu\text{m}$]。短路电流密度的上限示于图 5.1(b)。

当禁带宽度减小时, 短路电流密度增加。这并不奇怪, 因为禁带宽度减小将有更多的光子具有足以产生电子-空穴对的能量。

5.2.3 开路电压和效率

限制太阳电池开路电压的基本因素并不非常清楚。在第四章已经证明, 对理想的 p-n 结电池, V_{oc} 可表示如下:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (5.1)$$

式中, I_L 是光生电流, I_0 是二极管的饱和电流, 按下式计算:

$$I_0 = A \left(\frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_D} \right) \quad (5.2)$$

为了得到最大的 V_{oc} , I_0 必须尽可能小。计算 V_{oc} 上限 (因而也就得到最高效率) 的一种方法是给式 (5.2) 中半导体的每个参数赋予合适的值, 而这些值必须保证在生产优质太阳电池所要求的取值范围内^[5.12]。对于硅, 所得到的最大 V_{oc} 约为 700 mV, 相应的最高填充因数为 0.84。将此结果和前一节 I_{sc} 的结果结合起来, 就可求得最高能量转换效率。

式 (5.2) 中与半导体材料的选择关系最大的参数是本征载流子浓度的平方 n_i^2 。由第二章, 有

$$n_i^2 = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (5.3)$$

由式 (5.2) 可以得到最小饱和电流密度与禁带宽度之间的如下关系式:

$$I_0 = 1.5 \times 10^5 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \text{ A/cm}^2 \quad (5.4)^\ominus$$

[⊖] 此为经验公式——译者

这一关系式保证 V_{oc} 的最大值随禁带宽度的减小而减小。这一趋势与 I_{sc} 的变化趋势相反。由此得出，存在一个最佳的半导体禁带宽度可使效率达到最高。

这一点从图 5.2 中可以看出。图 5.2 示出按上述方法算出的最高效率与禁带宽度之间的关系。在禁带宽度为 1.4 到 1.6 eV 范围内，出现峰值效率，而当大气质量从 0 增加到 1.5 时，峰值效率从 26% 增加到 29%。硅的禁带宽度低于最佳值，但最大效率仍然比较高。GaAs 具有接近最佳值的禁带宽度 (1.4 eV)。

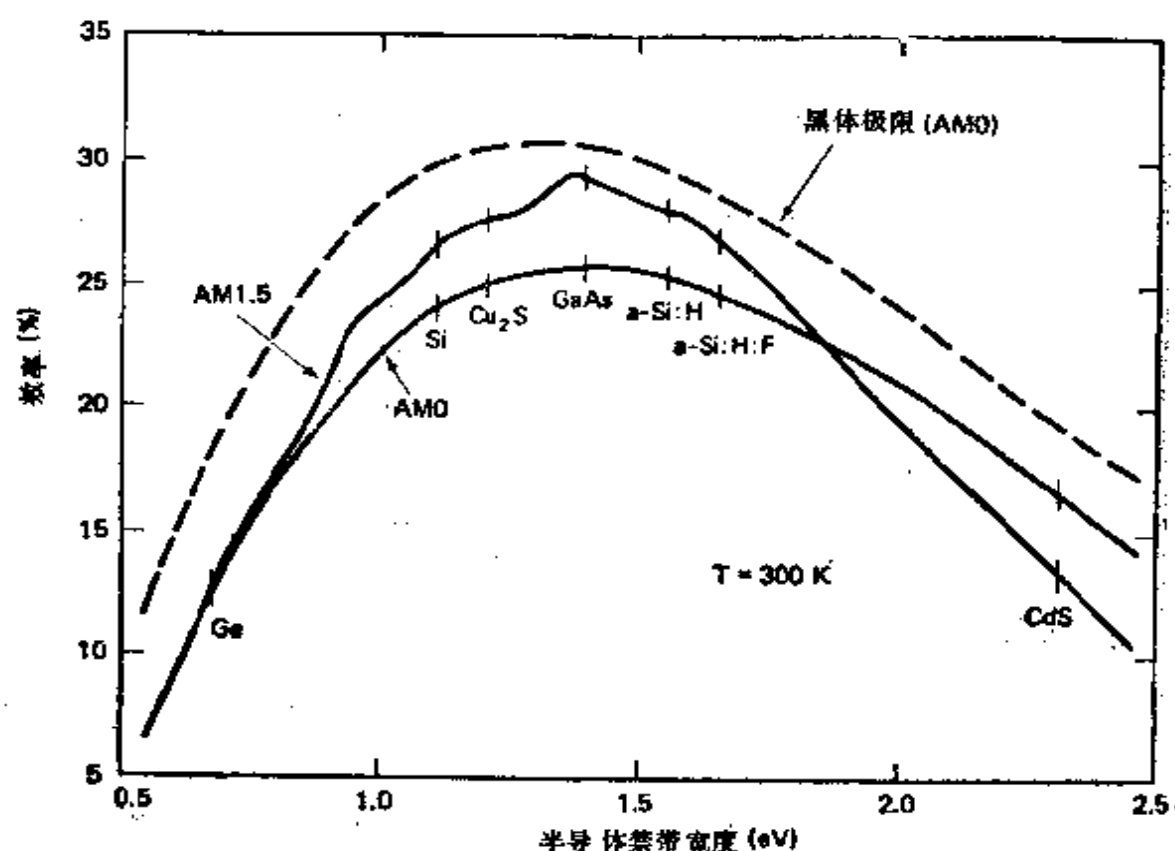


图 5.2 太阳能电池极限效率与电池材料禁带宽度的关系

实线为 AM0 和 AM1.5 太阳辐射下的半经验极限，虚线为 AM0 太阳辐射下根据热力学所得到的黑体太阳能电池的极限

最高效率较低的主要原因是由于吸收一个光子，不管它的能量多么大，最多只能产生一对电子-空穴对。电子和空穴迅速跳回到带隙边缘，同时放出声子（图 5.3）。即使光子能量比禁带宽度大很多，实际上所产生的电子和空穴也仅仅相隔一个禁带宽度。

仅这一效应就限制了可能获得的最高效率只有约 44%^[5.2]。另一个主要原因是，即使所产生的载流子被相当于禁带宽度的电势差所分离，p-n 结电池所能得到的输出电压也仅是这一电势差的一部分。以硅为例，这个部分的最大值是 $0.7/1.1 \approx 60\%$ 。

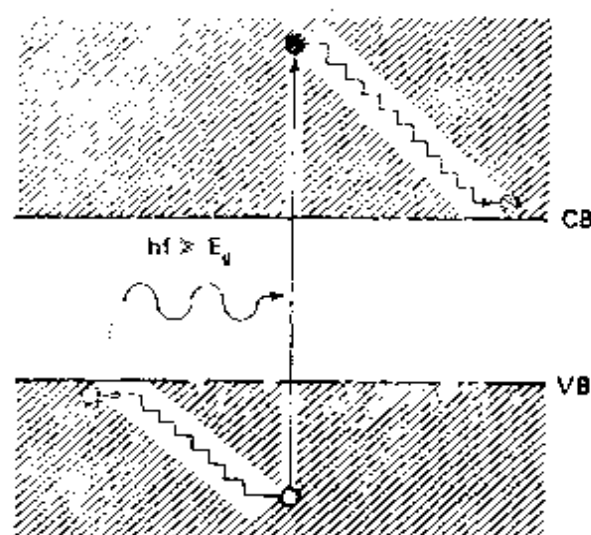


图 5.3 太阳电池的主要损失机理之一
高能光子产生的电子-空穴对迅速“热化”或返回到各自的能带边缘，放出的能量以热的形式耗散掉

以上讨论仅限于单个电池直接暴露在阳光下的情况。以 GaAs 为基础的一类器件，实验中所得到的效率已超过 20%。后面要提到的一些技术有可能进一步提高光伏系统的效率。1978 年报导过^[5.3]一种多层电池系统，其效率达 28.5%。尽管最高效率值是低的，但太阳电池仍然是现有的最有效的光电转换途径。

5.2.4 黑体电池的效率极限

前面计算 V_{oc} 最大值的方法的局限性在于它是凭经验的。尽管如此，在材料制造工艺和（或）太阳电池设计中要取得比图 5.2 更高效率的可能性很小。为了分析黑体太阳电池，文献 5.2 提出了一种更基本的方法。这种黑体吸收所有入射到它表面的阳光。认为这种电池的效率极限至少与非黑体类型的一样高似乎是合理的。

黑体发射出具有一定光谱分布的辐射，其光谱分布形状与它们的温度有关（第一章）。因此，处于平衡状态的黑体太阳电池会发射光子。能量大于禁带宽度的光子主要来源于半导体中的辐射复合过程。在热平衡时，这些辐射复合过程被相等的产生过程所平衡。那么，在热平衡状态下，复合速率的下限就是每单位时间所发射出来的能量大于禁带宽度的光子总数。在复合率最小的电池中，可以证明复合速率随偏压而指数上升。这就可以导出一个与已讨论过的无光照太阳电池的理想二极管定律相同的公式，其中的 I_0 等于电子电荷乘以整个电池的平衡复合率。

对硅的情况进行适当的计算，得到 I_0 最小数值，这个最小 I_0 值相应的黑体硅太阳电池的最高开路电压为 850mV。不同禁带宽度的半导体的计算结果由图 5.2 中虚线示出。对直接光照下的单个电池，所算出的效率上限达 30% 以上。

5.3 温度的影响

由于太阳电池工作的环境温度可以在很宽的范围内变化，所以有必要了解温度对电池性能的影响。

太阳电池的短路电流并不强烈地依赖于温度。随温度上升，短路电流略有增加。这是由于半导体禁带宽度通常随温度的上升而减小使得光吸收随之增加的缘故。电池的其他参数，即开路电压和填充因数二者都随温度上升而减小。短路电流和开路电压之间的关系是

$$I_{sc} = I_0 (e^{qV_{oc}/kT} - 1) \quad (5.5)$$

当忽略小负数项时，此式可写为

$$I_{sc} = AT^\gamma e^{-E_{g0}/kT} e^{qV_{oc}/kT} \quad (5.6)$$

式中， A 与温度无关； E_{g0} 是用线性外推方法得到的零度时制造电池的半导体材料的禁带宽度； γ 包含确定 I_0 的其余参数中与温度有关的因素，其数值通常在 1~4 范围内。对上式求导数，考虑到 $V_{oc} = E_{sc}/q$ ，得到

$$\begin{aligned} \frac{dI_{sc}}{dT} = & A\gamma T^{\gamma-1} e^{q(V_{oc}-V_{f0})/kT} + AT^{\gamma} \left(\frac{q}{kT} \right) \left[\frac{dV_{oc}}{dT} \right. \\ & \left. - \left(\frac{V_{oc} - V_{f0}}{T} \right) \right] e^{q(V_{oc}-V_{f0})/kT} \end{aligned} \quad (5.7)$$

与其他更主要项相比, dI_{sc}/dT 项可以忽略, 结果, 得到下列表式:

$$\boxed{\frac{dV_{oc}}{dT} = - \frac{V_{f0} - V_{oc} + \gamma(kT/q)}{T}} \quad (5.8)$$

这预示着, 随温度升高, V_{oc} 近似线性地减小。代入硅太阳能电池有关数值 ($V_{f0} \sim 1.2\text{V}$, $V_{oc} \sim 0.6\text{V}$, $\gamma \sim 3$, $T = 300\text{K}$), 得到

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = - \frac{1.2 - 0.6 + 0.078}{300} \quad \text{V/}^{\circ}\text{C} \quad (5.9)$$

$$= -2.3 \text{ mV/}^{\circ}\text{C} \quad (5.10)$$

这与实验结果非常一致^①。因而, 温度每升高 1°C , 硅太阳能电池的 V_{oc} 将约下降 0.4% 。理想的填充因数取决于用 kT/q 归一化的 V_{oc} 值。所以填充因数也随温度的上升而减小。

V_{oc} 的显著变化导致输出功率和效率随温度升高而下降。硅太阳能电池温度每升高 1°C , 输出功率将减少 0.4% 到 0.5% 。对禁带宽度宽的材料来说, 这种依赖关系减小。例如 GaAs 太阳能电池温度变化的灵敏度仅为硅太阳能电池的一半。

5.4 效率损失

5.4.1 概要

实际的 p-n 结太阳能电池横截面图示于图 5.4。由于其他各种

① 这基本上可以认为是由于方程 (5.8) 的形式对于比方程推导中的那些情况更普遍的情况也是有效的。

损失机理，实际器件的效率大大低于所讨论的理想极限值。后面几章将要讨论如何设计太阳电池，以便达到在下面几节中讨论的各种损失机理之间的最好折衷。

5.4.2 短路电流损失

在太阳电池中有三种可以称为是“光学”性质的损失。

1. 在 3.2 节中已提到，裸露的硅表面反射相当大。图 5.4 的减反射膜使这种反射损失减少到约为 10%。

2. 为了在太阳电池的 p 侧和 n 侧制造电极，通常在电池受光照射的一侧制造金属栅线，这要遮掉 5%~15% 的入射光。

3. 最后，如果电池不够厚，进入电池的一部分具有合适能量的光线将从电池背面直接穿出去。这就确定了半导体材料所需的最小厚度。如图 5.5 中 Si 和 GaAs 的计算结果所表明的那样，间接带隙材料比直接带隙材料需要更厚一些。

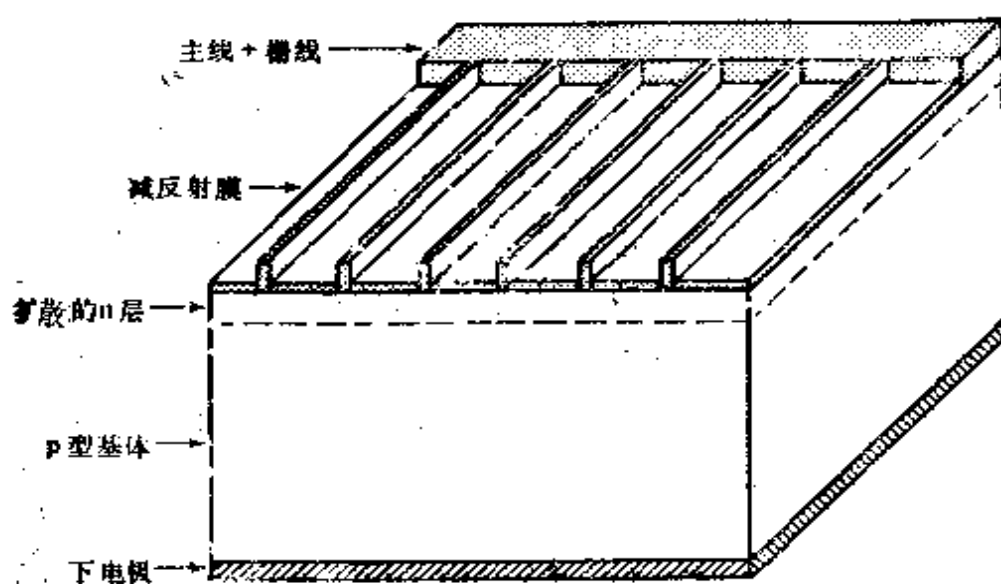


图 5.4 太阳电池的主要部件

为了说明，电池垂直方向上的尺寸和水平尺寸相比有所夸大

I_{sc} 损失的另一个原因是半导体体内及表面的复合。在第四章曾指出，只有在 p-n 结附近产生的电子-空穴对才能对 I_{sc} 作贡献。远离结产生的载流子在它们从产生点移动到器件的终端之

前，很有可能被复合。

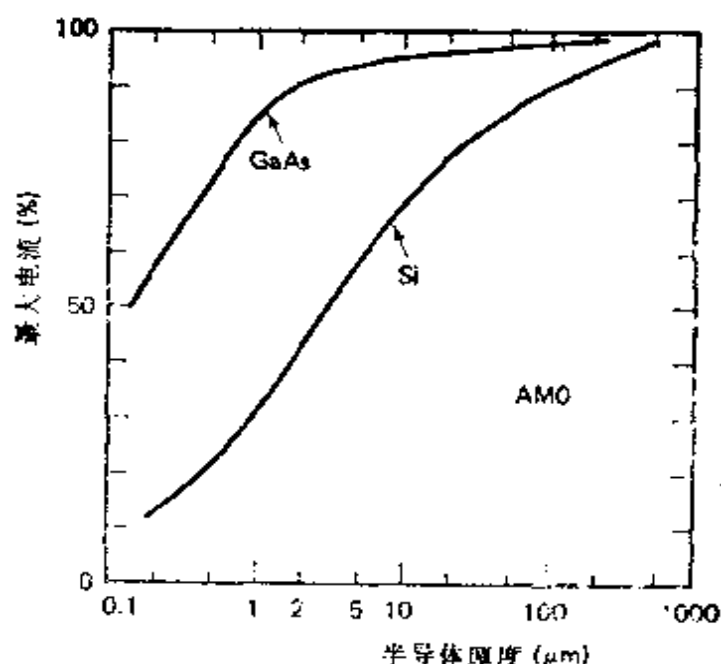


图 5.5 电池厚度对理想太阳电池所产生的最大的短路电流之百分率的影响

请注意直接带隙半导体 (GaAs) 和间接带隙 Si 之间的区别

5.4.3 开路电压损失

决定 V_{oc} 的主要过程是半导体中的复合。这一点在 5.2.4 节通过计算 V_{oc} 的极限已经看出。半导体中的复合率越低， V_{oc} 越高。体内复合和表面复合都是重要的。

可能限制 V_{oc} 的一个重要因素是通过耗尽区中陷阱能级的复合。这种复合机理在这个区域中特别有效。参考过去关于这个机理的关系式 (第三章)，可以得到

$$U = \frac{np - n_i^2}{T_{10}(n + n_1) + T_{20}(p + p_1)} \quad (5.11)$$

当 n_1 和 p_1 很小且 n 和 p 也很小时，此复合率有最大值。当耗尽区内陷阱杂质的能级接近于禁带中央时，这两种条件便可同时成立。由于耗尽区的宽度 W 非常小，因而在第四章分析 p-n 结二极管暗特性时，耗尽区的复合被忽略掉 (近似 5)。但是，在某

些情况下, 这一区域的复合率将增大, 从而变得相当重要。

将耗尽区的复合这一因素加进 p-n 结暗伏-安特性中去, 则得到

$$I = I_0(e^{qV/kT} - 1) + I_w(e^{qV/kT} - 1) \quad (5.12)$$

式中 I_0 的值同前, 而 I_w 为^(5.4)

$$I_w = \frac{qAn_s\pi}{2\sqrt{T_{e0}T_{h0}}} \frac{kT}{q\xi_{max}} \quad (5.13)$$

其中 ξ_{max} 是 p-n 结中最大的电场强度, 对于两侧均匀掺杂的 p-n 结来说, 其值由式 (4.4) 确定。

这些特性用半对数坐标描绘在图 5.6 中。在低电流情况下, 式 (5.12) 的第二项起主要作用, 而在高电流情况下, 则第一项起主要作用。

式 (5.12) 也可写成下列形式:

$$I = I_0^*(e^{qV/kT} - 1) \quad (5.14)$$

其中, n 通常称为理想因子, 它随电流变化的情况与 I_0^* 一样。由式 (5.12) 可见, n 值将从低电流时的 2 减小到高电流时的 1^①。由于光照下的太阳电池伏-安特性是将图 5.6 中的曲线向下移至第四象限, 可见, 这个新加入的耗尽层复合电流的存在将降低 V_{oc} 。

限制 V_{oc} 的其他工艺因素在后几章中讨论。

5.4.4 填充因数的损失

耗尽区的复合同样可以降低填充因数。如果前一节所述的二极管理想因子 n 大于 1, 则填充因子等于电压为 V_{oc}/n 时用理想情况 (图 4.12) 的公式算得的值。此值低于当 n 等于 1 时所算得的值。

通常情况下定义归一化电压 V_{oc} 为 $V_{oc}/(nkT/q)$, 则第四章

① 在电池某些区域, 当少数载流子浓度接近多数载流子浓度时, 在高电流时, n 也可接近于 2^(5.6)。

给出的如下填充因子的经验公式仍然有效（当 $v_{oc} > 10$ 时，大约精确到四位有效数字）：

$$FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{v_{oc} + 1} \quad (5.15)$$

通常，太阳电池都有寄生的串联电阻和旁路电阻，如图 5.7 中太阳电池等效电路所示。与这些电阻有关的物理机理有好几个。串联电阻 R_s 的主要来源是：制造电池的半导体材料的体电阻、电极及互联金属的电阻以及电极和半导体之间的接触电阻。旁路电阻 R_{sh} 则是由于 p-n 结漏电引起的，其中包括绕过电池边缘的漏电及由于结区存在晶体缺陷和外来杂质的沉淀物所引起的内部漏电。如图 5.8 所示，这两种寄生电阻都起到减小填充因数的作用，很高的 R_s 值和很低的 R_{sh} 值还会分别减小 I_{sc} 和 V_{oc} 。

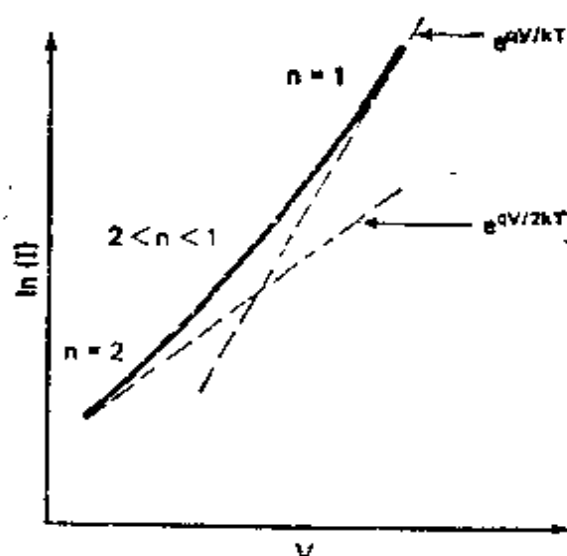


图 5.6 无光照时 p-n 结二极管暗伏-安特性的半对数曲线图
(包括耗尽区复合的影响)

R_s 和 R_{sh} 对填充因数影响的大小可以通过将它们 的数值与由下式定义的太阳电池特性电阻^[5,6]进行比较来决定：

$$R_{CH} = -\frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad (5.16)$$

与这个参量相比，如果 R_s 很小，或者 R_{sh} 很大，那么它们

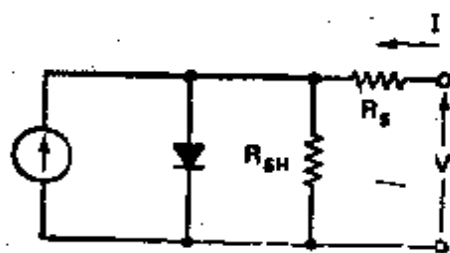


图 5.7 太阳电池的等效电路

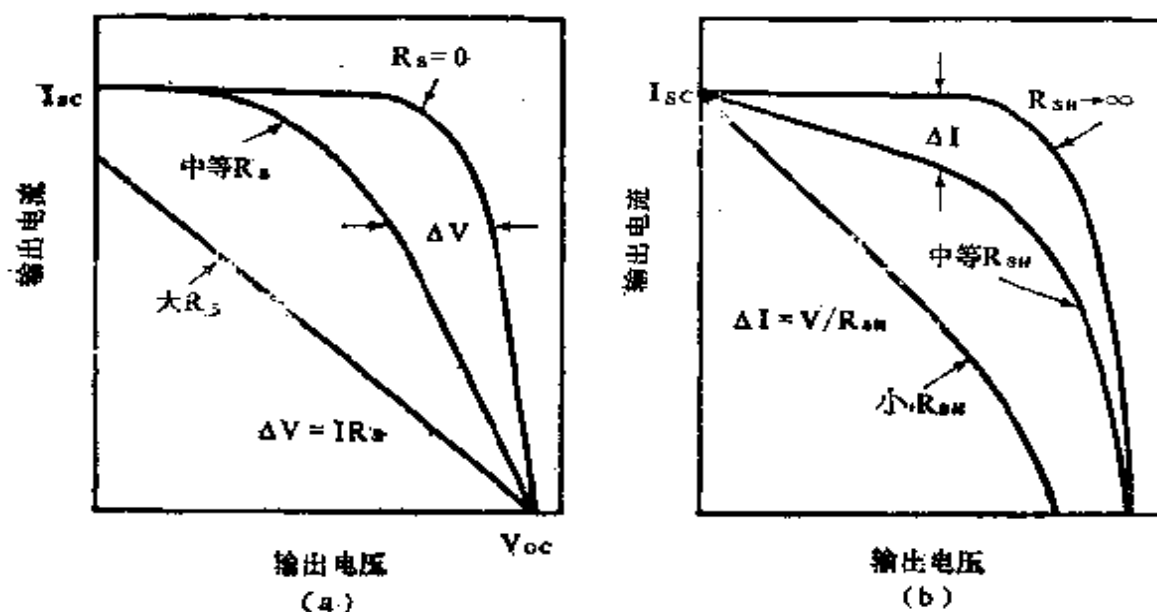


图 5.8 寄生电阻对太阳电池输出特性的影响

(a) 串联电阻 R_s 的影响;

(b) 旁路电阻 R_{SH} 的影响

对填充因数就几乎没有影响。如果定义归一化电阻 r_s 为 R_s/R_{CH} , 当有串联电阻时, 填充因数的近似表达式可写为 (精确数值在图 5.9 中给出)

$$FF = FF_0(1 - r_s) \quad (5.17)^{\ominus}$$

其中 FF_0 是无寄生电阻时的理想填充因数, 它由式 (5.15) 相当精确地描述。当 $v_{oc} > 10$, $r_s < 0.4$ 时, 这个表达式精确到接近两位有效数字。如果定义归一化旁路电阻 r_{sh} 为 R_{SH}/R_{CH} , 同时也采用归一化电压 $v_{oc} = V_{oc}/(nkT/q)$, 则有关旁路电阻影响的相

[⊖] 译者注: 式 (5.17)、(5.18) 均为经验公式。

应表达式可写成如下形式（精确数值也在图 5.9 给出）：

$$FF = FF_0 \left\{ 1 - \frac{(v_{oc} + 0.7)}{v_{oc}} \frac{FF_0}{r_{sh}} \right\} \quad (5.18)$$

当 $v_{oc} > 10$ 和 $r_{sh} > 2.5$ 时，这个表达式精确到接近三位有效数字。当串联电阻和旁路电阻都重要时，在更有限的参数范围内填充因数的近似表达式仍是式 (5.18)，只是式中 FF_0 由式 (5.17) 计算得到的 FF 代替。

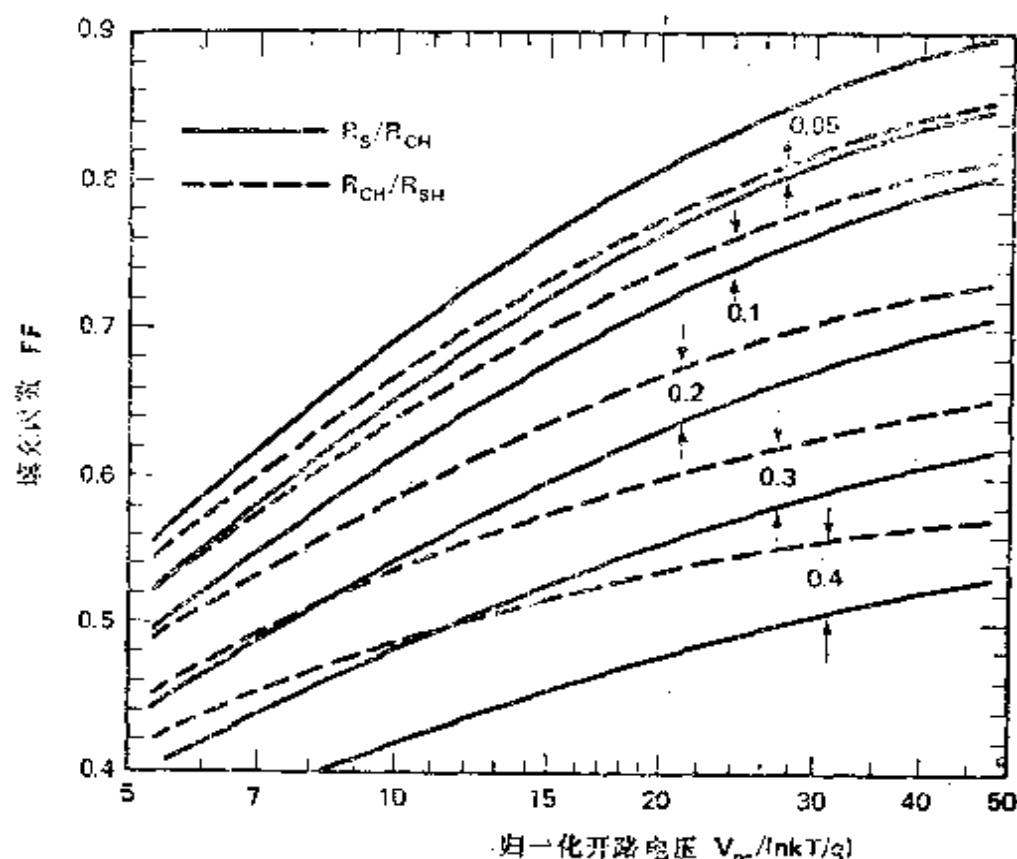


图 5.9 太阳能电池填充因数与归一化开路电压的关系曲线

实线示出填充因数与归一化串联电阻 R_s/R_{sh} 的关系，式中 $R_{sh} = V_{oc}/I_{sc}$ 。虚线示出旁路电阻的影响，其中归一化参数是 R_{sh}/R_{ph} 。由这些曲线可以查得任何一组开路电压、温度、理想因子以及串联电阻和旁路电阻所对应的填充因数。

5.5 效率测试

通过用辐射强度计测定入射阳光的功率和测量电池在最大功

率点产生的电功率的办法来测量太阳电池的效率似乎是比较简单的事情。使用这种方法存在的困难是，被测电池的性能在很大程度上取决于阳光光谱成分的精确程度，而阳光的光谱成分随大气质量、水蒸气含量、混浊度而变化。由于存在这一困难，加上辐射计刻度的误差（一般约为 $\pm 5\%$ ），使得这种办法很难对不是同一时间、同一地点所测得的电池性能作比较。

另一种方法是采用标定过的参考电池为基准。中心测试管理局在标准光照条件下标定参考电池，然后相对于这一参考电池测量待测电池的性能。为了使这个测试方法能够得到准确的结果，必须满足以下两个条件：

1. 在特定的范围内，参考电池和被测电池对不同波长的光的响应（光谱响应）必须一致。

2. 在特定的范围内，用来作比较测试的光源的光谱成分必须接近标准光源的光谱成分。

第一个条件通常要求参考电池和被测电池是由同种半导体材料并用相似的生产工艺制成。在这两个条件都得到满足时，便可以在与标定中心相同的标准光照条件下进行所有的测量。

与上述相类似的方法已用于美国能源部的光伏计划中^[5,7]。在这个方法中，测试中所参考的标准阳光光谱分布是图 1.3 中的 AM1.5 分布。所推荐的测试光源是自然阳光（对云彩、大气质量和光强变化率有一定限制）、带有适当的滤光片的氙灯或 ELI 灯。后者是一种廉价的钨丝放映灯，这种灯有一个对波长灵敏的反射器，它让红外光从灯的背面透过，这就增加了输出光束中可见光的比例，因此，输出光束的光谱成分相当接近于阳光的光谱成分。光源必须能在测试平面上射出一束强度均匀的平行光束，而且，在测试过程中必须是稳定的。

测试太阳电池特性的典型实验装置示于图 5.10(a)。四点接触线路使电压表与电流表到待测电池的引线分开，这就消除了测试引线的串联电阻及有关的接触电阻的影响。电池放置在温控底座上，测试太阳电池的标准温度是 25°C 和 28°C 两种。利用参考电

池，将灯光强度调整到所需的数值，通过改变负载电阻，就可以测得电池的特性。

被测电池的光谱响应也可以通过将电池的输出与已标定过光谱响应的电池的输直接比较测得。最简单的方法是使用一个稳态单色光源，它可以从单色仪或者如图 5.10(b) 所示那样让白光通过一个窄带通滤光器获得。由于电池对光强增加的响应并不总是线性的，较好的方法是使用接近于阳光的白光源来偏置被测的电池，并测量叠加小的单色光分量时增加的响应。

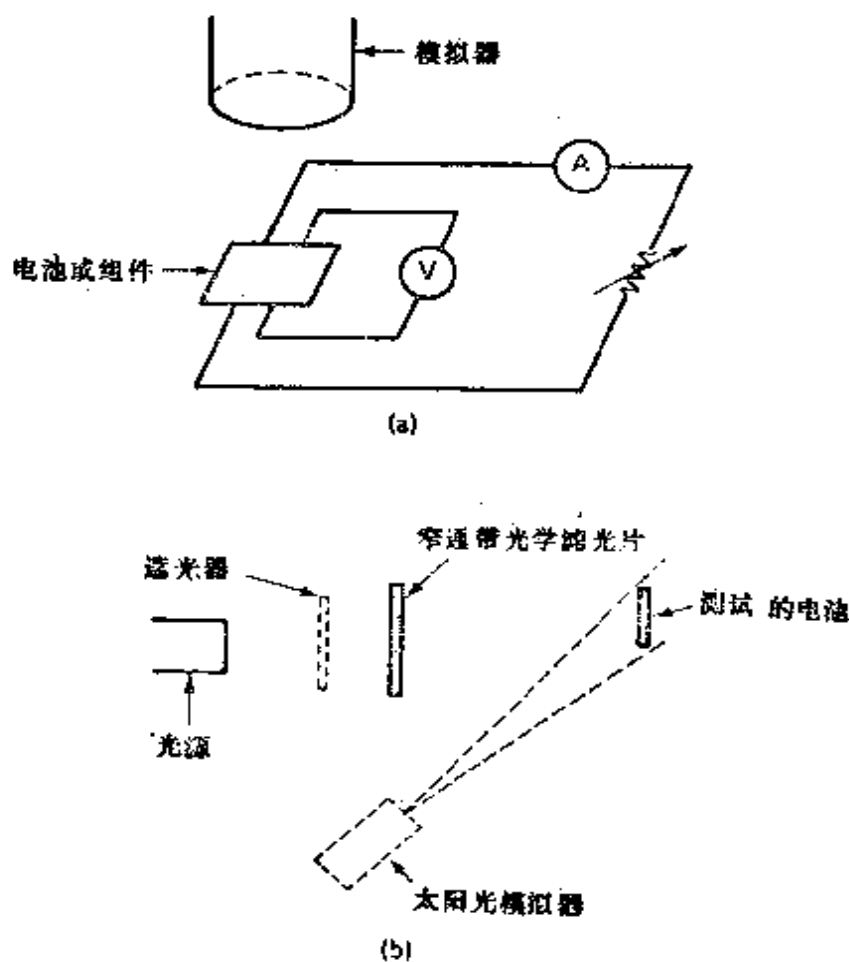


图 5.10

- (a) 测试太阳电池和组件的实验装置；
- (b) 可用来测量光谱响应的装置。对于光谱响应呈非线性的电池需要一个偏置光源以及一个经过遮光器的单色光

5.6 小 结

当电池材料的禁带宽度在 1.4 到 1.6eV 范围内时, 太阳电池达到效率的上限, 约为 $26\%\sim 29\%$ 。几个因素使得实际太阳电池的效率稍低于理想效率。其中部分因素与光和电池的耦合有关, 另一些与半导体的基体中和表面上过渡的复合有关, 再有一些则是由于寄生电阻的影响。

太阳电池的效率随温度上升而减小, 这主要是由于开路电压对温度的灵敏性造成的。

测量太阳电池特性的比较好的实验方法是用标定过的参考电池来消除与直接测量方法有关的各种变化。

练 习 题

5.1 (a) 一只太阳电池受到光强为 $20\text{mW}/\text{cm}^2$ 、波长为 700nm 的单色光的均匀照射, 如果电池材料的禁带宽度为 1.4eV , 问相应的入射光的光子通量及电池所输出的短路电流的上限是多少?

(b) 如果禁带宽度是 2.0eV , 那么, 相应的电流是多少?

5.2 当电流受到表 1.1 的 AM1.5 入射光照射时, 某电池可得到的最大短路电流密度为 $40\text{mA}/\text{cm}^2$ 。如果 300K 时电池的最大开路电压为 0.5V , 问在此温度下电池效率的上限是多少?

5.3 一只电池受到光强为 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 的单色光的均匀照射。 300K 时电池的最小饱和电流密度是 $10^{-11}\text{A}/\text{cm}^2$ 。如果单色光的波长为: (a) 450nm ; (b) 900nm , 试分别计算在此温度下电池将光转换为电能的效率上限, 假设在每一种情况下光子能量都大于材料禁带宽度。(c) 解释所算得的效率之间的差别。

5.4 计算并画出硅太阳电池光谱灵敏度 (短路电流/入射单色光的功率) 上限与波长的关系。

5.5 硅太阳电池的典型开路电压为 0.6V , 而 GaAs 电池的约为 1.0V 。在绝对和相对两种情况下, 试比较两种电池在 300K 时开路电压与温度的理论关系 (零度时的禁带宽度分别为 1.2 和 1.57eV)。

5.6 根据图 5.5, 试比较 Si 和 GaAs 电池要求得到 AM0 光照时最大

电流输出的 75% 所需的厚度。

5.7 一只太阳电池具有接近于理想的特性，其理想因子等于 1。另一只电池的特性主要受耗尽区复合的影响，其理想因子为 2。在 300 K 时，如果这两只电池的开路电压为 0.6 V，试比较它们的理想填充因数。

5.8 一只太阳电池，300 K 时的开路电压为 550 mV，短路电流为 2 A，理想因子为 1.3。求下列各种情况下的填充因数：(a) 串联电阻为 $0.08\ \Omega$ ，旁路电阻大；(b) 串联电阻可以忽略，旁路电阻为 $1\ \Omega$ ；(c) 串联电阻为 $0.08\ \Omega$ ，旁路电阻为 $2\ \Omega$ ；(d) 串联电阻为 $0.02\ \Omega$ ，旁路电阻为 $1\ \Omega$ 。

参 考 文 献

- [5.1] H. J. Hovel, *Solar Cells*, vol. 11, Semiconductors and Semimetals Series (New York: Academic Press, 1975).
- [5.2] W. Shockley and H. J. Queisser, "Detailed Balance Limit of Efficiency of p - n Junction Solar Cells", *Journal of Applied Physics* 32 (1961), 510~519.
- [5.3] R. L. Moon et al., "Multigap Solar Cell Requirements and the Performance of AlGaAs and Si Cells in Concentrated Sunlight", *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Washington, D. C. (1978), pp. 859~867.
- [5.4] C. T. Sah et al., "Carrier Generation and Recombination in p - n Junctions...", *Proceedings of the IRE* 45 (1957), 1228~1243.
- [5.5] J. G. Fossum et al., "Physics Underlying the Performance of Back-Surface-Field Solar Cells", *IEEE Transactions on Electron Devices* ED-27 (1980), 785~791.
- [5.6] M. A. Green, "General Solar Cell Factors...", *Solid-State Electronics* 20 (1977), 265~266.
- [5.7] *Terrestrial Photovoltaic Measurement Procedures*, Report ERDA/NASA/1022~77/16, June 1977.

第六章 标准硅太阳能电池工艺

6.1 引言

自 1953 年研制出第一批具有一定效率的硅太阳能电池之后,这些电池便主要应用于空间飞行器的能源系统。第一次这样的应用是在 1958 年的尖兵一号卫星上。从那时起,为了供给数量不断增加的通信卫星及其他空间飞行器所用的电池,已进行了产量越来越多的小批量生产。对于电性能及可靠性的严格要求导致了研制

表6.1 太阳能电池制造厂家 (约在1980)

美 国	
应用太阳能公司 15251 East Don Julian Road City of Industry, CA 91746	太阳动力公司 20 Cabot Road Woburn, MA 01801
阿科太阳公司 20554 Plummer Street Chatsworth, CA 91311	索拉来克斯公司 1335 Piccard Drive Rockville, MD 20850
莫托罗拉公司 Solar Energy Department Phoenix, AZ 95008	索莱国际公司 12533 Chadron Avenue Hawthorne, CA 90250
光子动力公司 10767 Gateway West El Paso, TX 73935	太阳能公司 23 North Avenue Wakefield, MA 01880
福特瓦特国际公司 21012 Lassen Street Chatsworth, CA 91311	光谱实验室 12484 Gladstone Avenue Sylmar, CA 91342
SES 公司 Tralee Industrial Park Newark, DE 19711	Spire 公司 Patriots Park Bedford, MA 01730

欧 洲

AEG 德律风根公司
Discrete Component Dept.
P. O. Box 1109
7100 Heilbronn, W. Germany

RTC (菲利普集团)
Route de la Delivrande
14000 Caen-Cedex, France

日 本

日本太阳能公司
11-17 Kogabonmachi
Fushimiku, Kyoto
松下电气公司
Kadoma, Osaka

夏普公司工程处
2613.1 Ichinomoto
Tenri-Shi, Nara

澳大利亚

印 度

普得兰得能量 Pty公司
P. O. Box 519
Brookvale, N. S. W. 2100

中央电子公司
Site 4, Industrial Area
Sabibabad, U. P. 201005

标准的电池工艺流程，这种工艺实际上在整个六十年代和七十年代初期一直保持不变。

从1973年以来，由于对新能源越来越重视，致使一些公司生产专门用于地面的电池。表 6.1 列出部分太阳能电池制造厂家。开始，地面电池的生产工艺是引用空间电池的标准工艺。虽然由于地面应用的要求不同，使生产电池的工艺后来有了某些重大的改变。但是，本章要叙述的电池的标准工艺将为讨论这些工艺变化及为将来可能的改进打下基础。

制造电池的标准工艺可以归纳为如下几步。

1. 砂子还原成冶金级硅。
2. 冶金级硅提纯为半导体级硅。
3. 半导体级硅转变为单晶硅片。
4. 单晶硅片制成太阳能电池。
5. 太阳能电池封装为经得起风雨的太阳能电池组件。

6.2 砂子还原为冶金级硅

硅是地球外壳第二位最丰富的元素。提炼硅的原始材料是 SiO_2 ，它是砂子的主要成分。然而，在目前工业提炼工艺中，采用的是 SiO_2 的结晶态即石英岩。为了制取硅，石英岩在图 6.1 所示的大型电弧炉中用碳（木屑、焦炭和煤的混合物）按照下列反应方程式还原^[6.1]：



硅定期地从炉中倒出，并用氧气或氧-氯混合气体吹之以进一步提纯它。然后，它被倒入浅槽，在槽中凝固，随后被破成碎块。

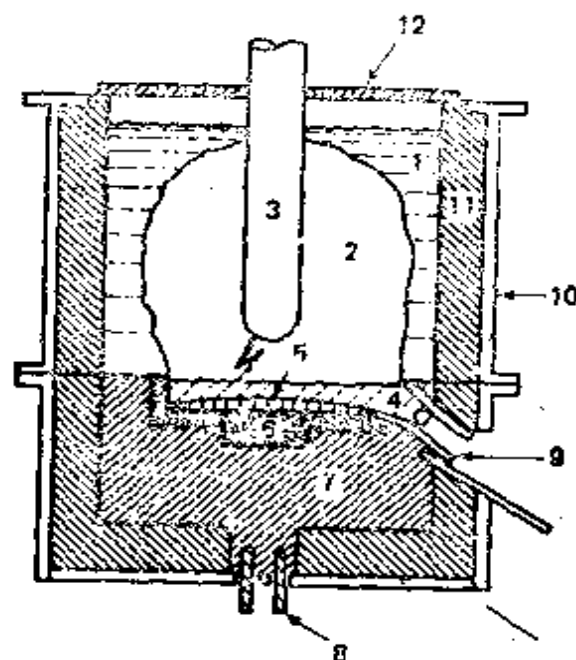


图 6.1 生产冶金级硅的电弧炉的断面图

- 1. 碳和石英岩； 2. 内腔； 3. 电
- 极； 4. 硅； 5. 碳化硅； 6. 炉
- 床； 7. 电极膏； 8. 铜电极；
- 9. 出料喷口； 10. 铸铁壁；
- 11. 陶瓷； 12. 石墨盖^[6.1]

全世界每年生产约一百万吨左右冶金级硅 (MG-Si)，主要

是用于炼钢和炼铝工业。这种硅的纯度通常为 98% 到 99%，由表 6.2 的典型分析结果可看出，其中主要的杂质为铁和铝。还原过程的能量利用率相当高。全部工艺过程所需要的能量类似于提炼铝的钛一类金属所需的能量。材料也相当便宜，冶金级硅产品的很小一部分进一步精炼为半导体级硅（SeG），供电子工业用。半导体级硅每年用不了几千吨。

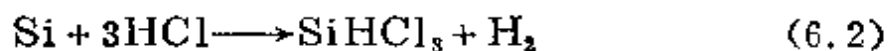
表 6.2 冶金级硅中典型的杂质浓度

杂质	浓度范围(百万分之一, 原子)
Al	1500~4000
B	40~80
Cr	50~200
Fe	2000~3000
Mn	70~100
Ni	30~90
P	20~50
Ti	160~250
V	80~200

6.3 冶金级硅提纯为半导体级硅

用于太阳能电池以及其他半导体器件的硅，其纯度级比冶金级更高。提纯硅的标准方法称为西门子工艺^[6.2]。冶金级硅被转变为挥发性的化合物，接着采用分馏的方法将其冷凝并提纯。然后，从这种精炼产品中提取超纯硅。

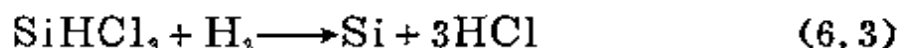
详细的工艺程序是，用 HCl 把细碎的冶金级硅颗粒变成流体，用铜催化剂加速反应进行：



释放出的气体通过冷凝器，所得到的液体经过多级分馏得到

半导体级 SiHCl_3 (三氯氢硅), 这是硅酮工业的原材料。

为了提取半导体级硅, 可加热混合气体, 使半导体级的 SiHCl_3 被 H_2 还原。在此过程中, 硅以细晶粒的多晶硅形式沉积到电加热的硅棒上, 其反应式为



后一步不仅需要大量的能量, 而且产生率低 ($\sim 37\%$)。这就是为什么会出现 6.7 节所讨论的, 生产半导体级硅比生产冶金级硅所需的能量增加很多的主要原因。在这个转化过程中, 成本增加更大。因此, 更有效地提纯冶金级硅一直是改进工艺的主要目标。

6.4 半导体级多晶硅变成单晶硅片

对于半导体电子工业来说, 硅不仅要很纯, 而且必须是晶体结构中基本上没有缺陷的单晶形式。工业上生产这种材料所用的主要方法是示于图 6.2 中的直拉工艺(Czochralski process)。在坩埚中, 将半导体级多晶硅熔融, 同时, 加入微量的器件所需的一种掺杂剂, 对太阳能电池来说, 通常用硼 (P 型掺杂剂)。在温度可以精细控制的情况下用籽晶能够从熔融硅中拉出大圆柱形的单晶硅。通常用这种方法能够生长直径超过 12.5 cm, 长度 1m 到 2m 的晶体。

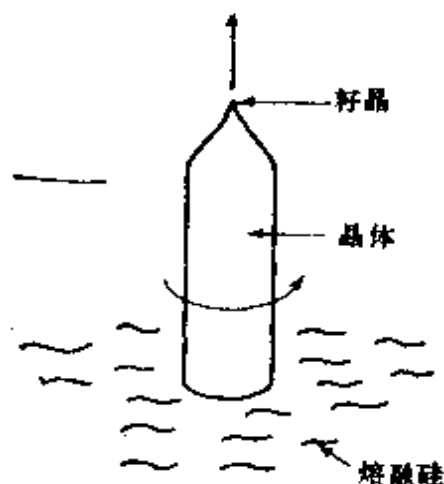


图 6.2 生长大圆柱单晶硅棒的直拉工艺示意图

如在 5.4.2 节中所见，硅太阳能电池仅需 $100\mu\text{m}$ 左右的厚度就足以吸收阳光中波长合适的成分之大部分。因此，大单晶应切成尽可能薄的硅片，如图 6.3 所示。用目前的切片工艺^[6.3]将前面介绍的大晶体切成比 $300\mu\text{m}$ 还薄的硅片并仍保持适当的生产速率是困难的。在加工过程中，一多半的硅因为刀槽或切割损失被浪费掉了。从半导体级硅变成单晶硅片过程中的低产率是标准硅工艺的又一薄弱环节。

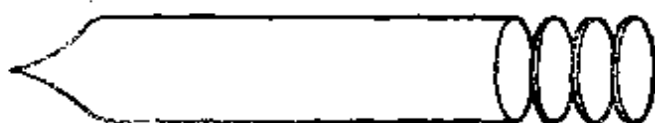


图 6.3 从圆柱硅棒切片

参考文献 (6.3) 对这种切片过程所采用的方法作了叙述和比较。在加工过程中，大约一半硅棒因为刀槽或切割损失被浪费掉了

6.5 单晶硅片制成太阳能电池

硅片腐蚀（为了消除切片过程产生的损伤）并清洗之后，用高温杂质扩散工艺有控制地向硅片中掺入另外的杂质。

前节中已经提及，在标准太阳能电池工艺中，通常将硼加到直拉工艺的熔料中，从而生产出 p 型硅片。为了制造太阳能电池，必须掺入 n 型杂质，以形成 p-n 结。磷是常用的 n 型杂质。最普通的工艺如图 6.4 所示，载气通过液态磷酰氯 (POCl_3)，混入少量的氧后通过排放有硅片的加热炉管，这样，硅片表面就生成含磷的氧化层。在规定的炉温下 (800 到 900°C)，磷从氧化层扩散到硅中。约 20 分钟之后，靠近硅片表面的区域，磷杂质超过硼杂质，从而制得如图 6.5 (a) 所示的一层薄的、重掺杂的 n 型区。在往后的工序中，再除去氧化层和电池侧面及背面的结，得到图 6.5 (b) 的结构。

然后做出附着于 n 型区和 p 型区表面的金属电极。在标准工艺中，采用真空蒸发工艺来做此电极。将待沉积的金属在真空室中加热到足够高的温度，使其熔融并蒸发，结果凝结在真空室中以直线的方式能到达的较冷部分（其中包括太阳电池）。背电极通常覆盖整个背表面，而上电极则需要制成栅线形状。有两种工艺能有效地做出这样的栅线形状的电极：一种是采用金属掩模（图 6.6）；另一种方法是在电池上表面先全部沉积金属，接着，用称为光刻法的照象技术将不需要的部分腐蚀掉。

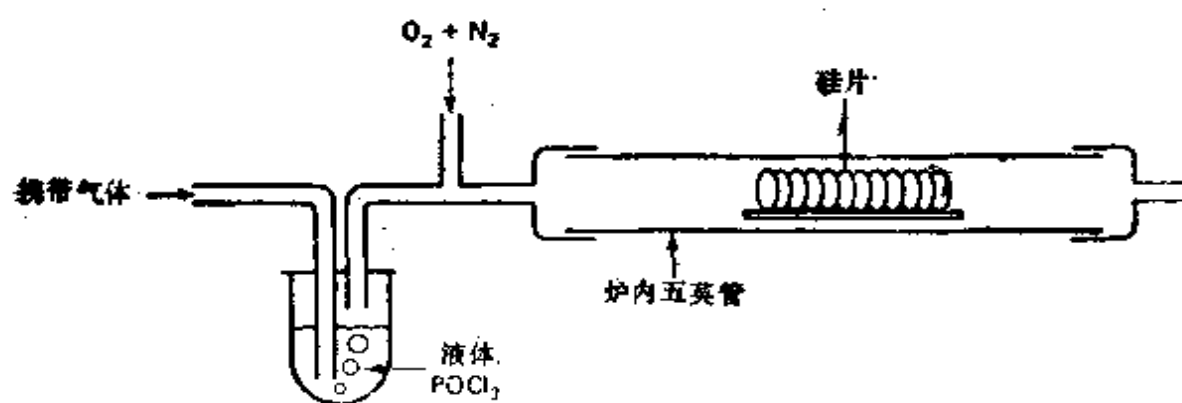


图 6.4 磷扩散工艺

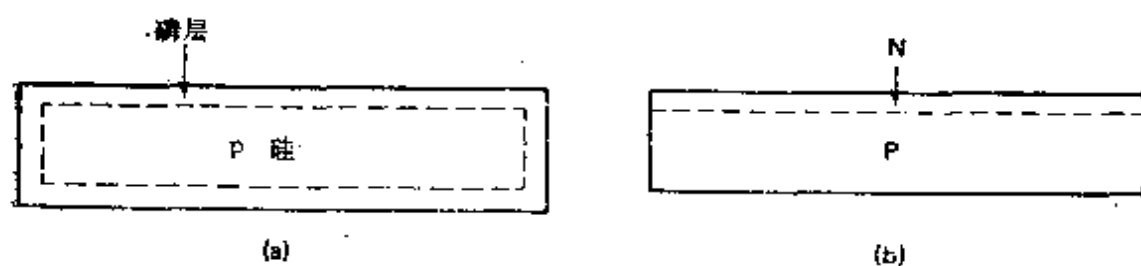


图 6.5 磷杂质分布

(a) 刚扩散之后；

(b) 硅片背面和侧面被腐蚀之后

电极通常由三层金属组成。为了使电极与硅有好的附着力，底层采用薄的金属钛，上层是银，以提供低的电阻及可焊性。夹在这两层之间的是钼层，它可以防止潮湿气氛下钛和银之间的不良反应。为得到好的附着力和低的接触电阻，沉积之后，电极在 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ 下烧结。最后，用同样的真空蒸发工艺在电池上表面

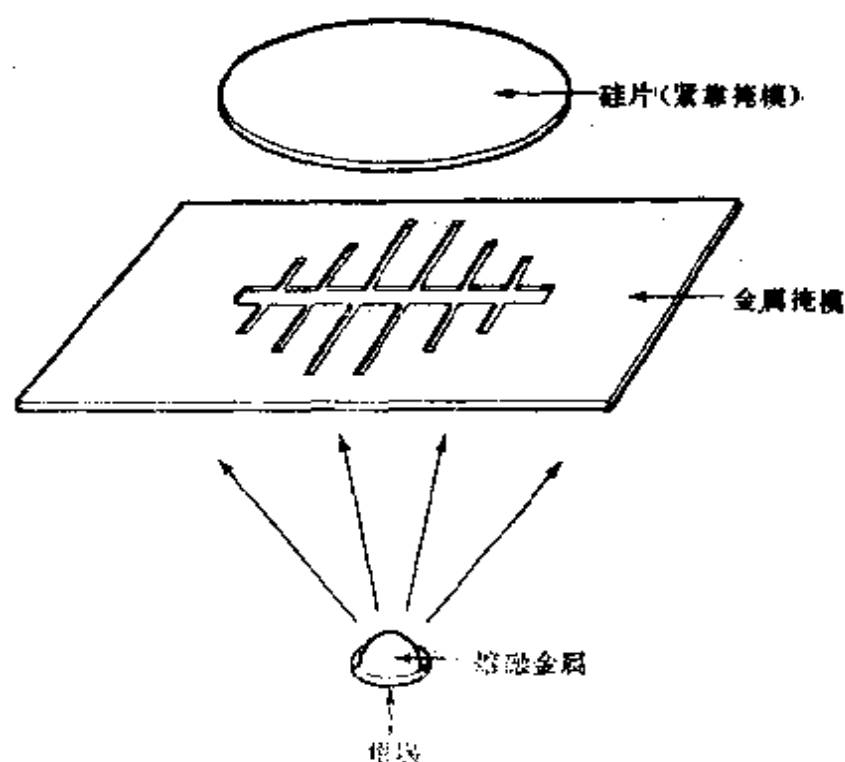


图 6.6 采用真空蒸发工艺和一个金属掩模来制作顶部金属栅线电极的示意图

沉积一层薄的减反射 (AR) 膜。

从硅片开始到做成地面用太阳电池，成品率约为 90%。每批硅片大概为 40 到 100 片，在同一时间内进行上述工序，这就使这种加工过程成为很紧张的劳动。此外，真空蒸发设备与其生产能力相比是昂贵的。而且，由于蒸发工艺的特点，结果只有一小部分金属被蒸发到所需要的地方。当采用象银这样的贵重材料时，这种工艺是很浪费的。

6.6 太阳电池封装成太阳电池组件

6.6.1 组件结构

太阳电池之所以需要密封不仅仅是为了提供机械上的防护，而且也是为了提供电绝缘及一定程度的化学防护。这种密封为支

持易碎的电池及易弯曲的互联条提供了机械刚性，同时也为可能来自冰雹、鸟禽以及下落或投掷到组件上的物体所引起的机械损伤提供了防护。密封还保护金属电极及互联条免遭大气中腐蚀性元素的腐蚀。最后，密封也为电池组合板产生的电压提供电绝缘。某些系统的电压可比地电位高 1500V，密封的耐久性将决定组件的最终工作寿命，理论上，此寿命可达 20 年或更长。

系统密封设计必须具备的其他特性还包括：紫外 (UV) 稳定性；在高低极限温度及热冲击下电池不致因应力而破裂；能抗御尘暴所引起的擦伤；自净能力；以及成本低廉。

组件的封装可以有几种不同方法。其中一个极重要的部分是提供刚性的结构层，这一层如图 6.7 中所示，它可在组件的背面或在组件正面。电池可直接粘附在这一层上并密封在柔韧的密封胶中，或者密封在由这一层支撑的夹层中。最后一层如果在组件的背面，将起抗潮湿的作用；如果在顶部，就要有自净特性，并能改善耐冲击特性。组件周边采用了某种方式的防潮密封。

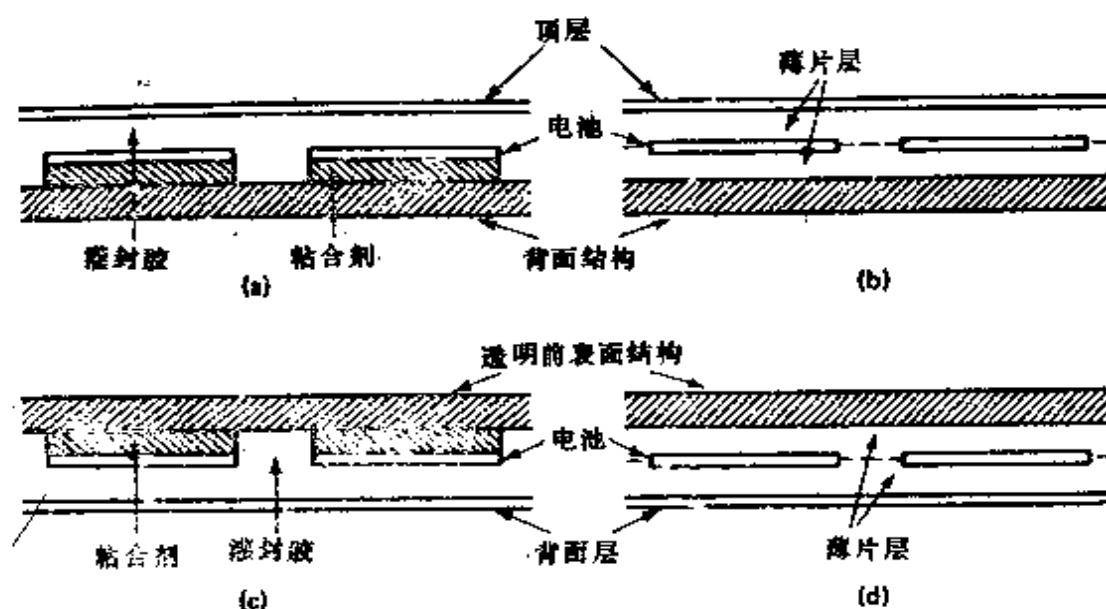


图 6.7 太阳电池的几种封装方法示意图

- (a) 结构层在背面的密封形式；
- (b) 结构层在背面的带夹层密封形式；
- (c) 结构层在正面的密封形式；
- (d) 结构层在正面的带夹层密封形式

对于图 6.7(a) 和 (b) 结构层在背面的密封形式来说, 背面结构层最常用的材料是受过阳极化处理的铝板、陶瓷化的钢板、环氧树脂板或窗玻璃。如果这一层用象木屑板那样的木料混合物可能最为便宜。对于图 6.7(c) 和 (d) 结构层在正面的密封形式来说, 选用玻璃作为结构层是显而易见的。玻璃兼有优良的耐风雨性能、成本低的优点及好的自净特性。为使光容易透过, 大部分设计都采用含铁低的钢化玻璃或回火玻璃。硅树脂已广泛地用来作粘结剂和密封材料, 它具有好的紫外稳定性、低的光吸收特性和为减少组件的热应力所需要的合适弹性。但是, 这种材料很贵。在有夹层的方法中, 几家工厂已采用了聚乙烯醇缩丁醛 (PVB) 和乙烯/醋酸乙烯酯 (EVA) 来作相应层的材料。

结构层在背面的形式的顶层给予组件自净能力, 并在某些组件中起抗湿作用。这一层普遍选用低铁玻璃, 也有采用聚丙烯之类的聚合物。由于某些厂家已注重生产抗湿电池, 因而放松了密封的要求。这种结构可采用软硅树脂密封和一层较硬的硅树脂覆盖层来改善自净特性。对结构层在正面的形式, 为了抗湿, 背面层最普遍选用聚酯树脂或聚氟乙烯。然而, 所有的聚合物都有一点透湿性, 为了解决这一问题, 可在适当的聚合物层与层之间嵌入薄的铝箔或不锈钢箔。

如果背面层是白色的, 则利用零深度聚光效应, 可能在一定

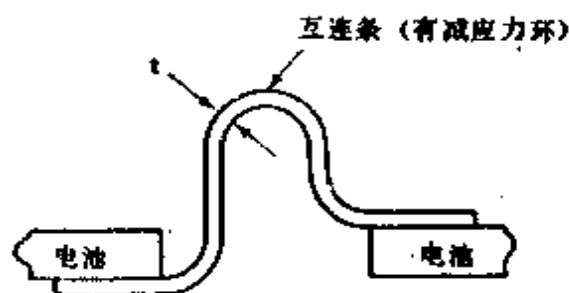


图 6.8 电池间金属互联条的减应力环

它用以防止热循环和扭曲负荷的周期应力引起的疲劳。为使效果最佳, 互联条厚度 t 应当很薄, 而弓形高度应如文献 [6.5] 中所讨论的那样

程度上增加组件的输出^[6.4]。照射到组件中电池之间区域的一些光将被背面层散射并且由玻璃盖板反向组件的工作区。这就增加了组件的输出,尤其当电池的装配密度较低时更是这样。

组件设计的另一个重要方面是电池之间的互联条。为了备用,通常采用复合互联条。这种互联条增加了组件对互联失效(由于腐蚀或疲劳)及电池损坏的承受能力。由于温度膨胀系数及扭曲负荷不同,使互联条产生周期性的应力。电池互联通常需要如图6.8所示的减应力环^[6.5]。

6.6.2 电池的工作温度

不同的组件设计将使密封在其中的电池在相同的工作环境中有不同的温度。由于电池性能因温度升高而变差(5.3节),所以,组件在较低的温度工作时,其性能将相对有所提高。

与其在相同的温度下比较不同组件的性能,倒不如在不同的温度下去比较性能更合适。在每一种情况中,这个温度就是在典型的工作条件下电池所达到的温度。如果规定了一组标准工作条件(日照强度、风速和风向、环境温度、电池负载),那么,对每种形式的组件就会有一个特定的温度,即电池的正常工作温度(NOCT)。为了用非标准工作条件下的现场数据来计算这种温度,已研究出经验方法^[6.6]。

现场数据表明,只要风速不是过快,太阳电池工作温度与环境温度之差大体上与入射光强成正比。根据经验,安装在露天框架上的组件,在充足的阳光照射下($100\text{mW}/\text{cm}^2$),大多数市售组件的电池温度大约高于环境温度 30°C 。因此,电池温度的近似表达式可写为

$$T_{\text{电池}}(^{\circ}\text{C}) = T_{\text{环境}}(^{\circ}\text{C}) + 0.3 \times \text{光强}(\text{mW}/\text{cm}^2) \quad (6.4)$$

当组件安装于屋顶时,电池的工作温度将更高。

6.6.3 组件的耐久性

因为地面环境中不存在使电池“用坏”的机理,所以太阳电

泡密封的耐久性最终将限定太阳能电池系统的工作寿命。

过去，在现场观察到的组件损坏的原因有下面几类：

1. 电池由于热波动或更直接地是由于冰雹引起的过度机械应力所造成的损坏。

2. 金属化层受腐蚀。

3. 不同密封层剥离。

4. 密封材料变色。

5. 灰尘堆积在组件“软”表面上。

6. 由于应力消除得不够充分引起互联条的损坏。

随着现场经验不断增加，组件设计不断改进，寿命提高到 20 年是有可能的。新设计组件的加速寿命试验通常是通过使该组件受到下列几种类型的应力来实现：

1. 热循环

2. 高湿

3. 长时间紫外线照射

4. 周期性的压力负载

这些应力通常会加速组件的损坏，其他可能要进行的鉴定试验包括：

1. 冲击实验

2. 耐磨损试验

3. 自净特性

4. 柔软性（供在弯曲表面上安装的试验）

5. 电绝缘性能（特别是在加速寿命试验之后）

虽然对有软表面的组件尘土堆积会引起某些地方性能严重下降^[6.7]，但是，对玻璃面组件这并不是主要问题。由于下雨和刮风引起的自净能力将使灰尘引起的功率损失低于 10%。因为电池可以在散射光下工作，已经发现，甚至在故意用足够的灰尘覆盖使得仅仅能够识别组件中的个别电池的情况下，组件也能输出其峰值功率的相当大百分数^[6.8]。

6.6.4 组件电路设计

太阳电池组件内电池互联电路的状况对组件的现场性能和工作寿命具有重大的影响。

当太阳电池互联在一起时，由于这些单体电池工作特性的失配，使组件的输出功率小于各个电池的最大输出功率之总和。这个差别即失配损失在电池串联时是最显著的。

串联电池组中特性最差的电池的过热比功率损失更重要。图 6.9 示出串联电池组中电流输出最低的电池的输出特性，同时也给出其余好电池的联合输出特性。当组件短路时，组件中这两部分电池的端电压必须相等，符号相反，组件的短路电流可这样求得，即作一条曲线对电流轴的对称线，找出它与另一根曲线的相交点，如图 6.9 所示。注意，在这种情况下，最差的电池是反向偏置的，它消耗功率等于图中的阴影面积。由图 6.9 很容易看出，在某些情况下，最差电池会消耗掉其余串联电池产生的功率，直至其最大值。其结果会引起最差电池局部过度温升，而这种温升就可能使电池密封受到破坏，并导致整个组件损坏。组件中某

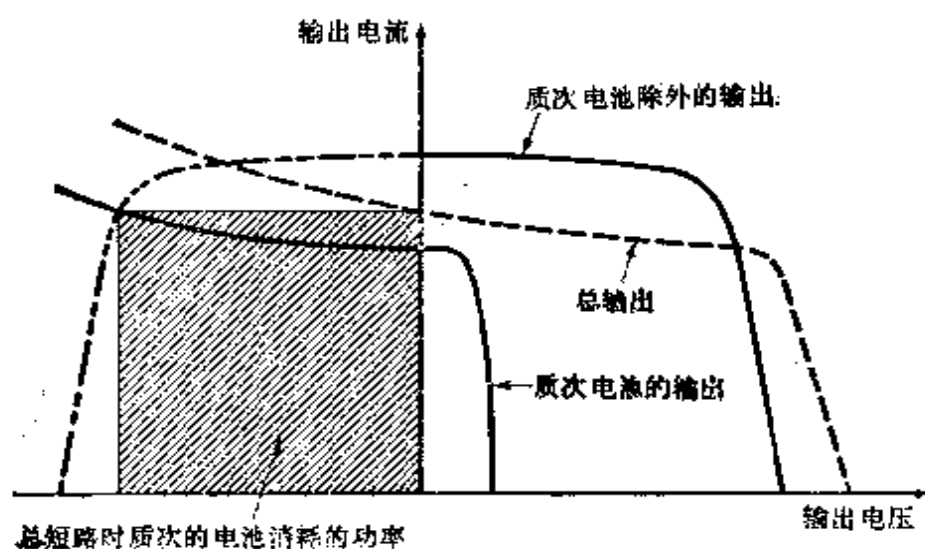


图 6.9 串联电池组中输出失配电池的影响

在短路情况下，输出特性不好的电池成为反向偏置，并且消耗大量的功率。串联电池组的电流输出决定于最差的电池

些电池的局部阴影或破碎的电池也会引起类似的结果。

要证明串联电池组的开路电压是每个电池电压的总和是不困难的。由图 6.9 也很容易看出另一个特性，即短路电流由串联电池组中输出电流最低的那个电池的电流确定。由此可见，在串联电池组中，短路电流的严重失配会引起其中较好电池的电流产生能力完全被浪费。虽然类似的失配损失在并联电池组中也有，但它们远不是如此严重。

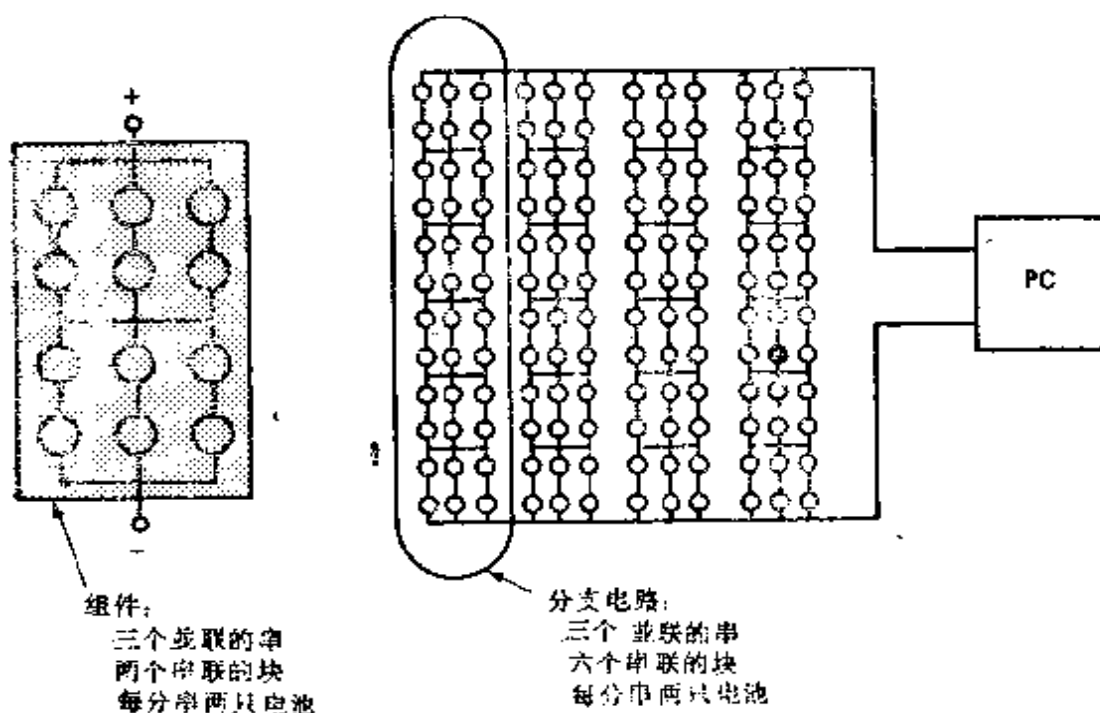


图 6.10 组件电路设计中所用的术语

标以 PC 的方框是功率调节器 (6.9)

为了减少上述影响的严重性，采取两种有效方法 [6.9]。一种称为串-并联法，另一种是应用旁路二极管。图 6.10 说明了描述这种组件电路设计方法时所采用的术语。

用增加每个组件或分路的串联块及并联电池组的数目的方法，可提高组件对电池失配、电池破裂及部分阴影的容忍度，这就是所谓的串并联方法。另一种方法是利用接在组件中的一组或多组串联块两端的旁路二极管。当串联块处在反向偏置时，旁路二极管则成为正向偏置，这就限制了在这方块中的功率损耗，并

为组件或分路电流提供了低阻通道。

6.7 能 量 计 算

对用于大规模发电的器件来说，在其工作寿命期限内，发电能力应比建造、使用和维护它们所付出的能量多，这自然是很重要的。用本章所描述的标准工艺制造的太阳电池在这方面情况怎样呢？

从石英岩中提取冶金级硅的过程能量的利用率相当高。考虑到开采、运输和制备这个过程使用的原材料所需的能量，以及加工所需的能量，生产 1kg 冶金级硅大约需要相当于 24kWh 电能能量 [kWh(e)]^[6,12]。此能量与用同样算法求得的提取 1kg 铝的能量 [19kWh(e)/kg] 或提取 1kg 钛的能量 [46 kWh(e)/kg] 大致相同。

将冶金级硅提纯为半导体级硅的西门子 (Siemens) 工艺成本高、效率低、耗能多，因此它成为将来硅太阳电池工艺改进的主要方面。按以上同样算法，半导体级硅的能量消耗是 621 kWh(e)/kg^[6,12]。

为使这种纯硅变成单晶硅片，需要经过直拉工艺。直拉工艺所生产的圆柱硅棒，切片时半导体级硅得不到充分利用。硅棒加工成硅片的成材率大约是 0.4m²/kg。产率这样低的主要原因是切片工艺不理想。这种工艺要浪费一半原材料，并且生产的薄片比光伏器件所需要的厚度要厚。按以上同样算法，硅片的能量消耗是 1700kWh(e)/m²。

电池的加工和密封估计又要增加 250kWh(e)/m²。假定从硅片到成品组件的成品率为 90%，则总的能量消耗为 2170kWh(e)/m² (电池面积)。

电池能够偿还制造它时投入的能量所需的时间与电池的应用场所有关。在平均每天峰值日照为 5 小时、密封电池的效率为 12% 的情况下，每年产生的能量总计将达 219kWh(e)/m²。因

此，能量的偿还时间略短于 10 年。还有一些不太直接的能量消耗，例如制造用于电池生产的机械所需要的能量、出售和安装系统所需要的能量、动力储存和调节设备所需要的能量，这些将进一步增加这个偿还时间。

然而，重要的是，由于经济方面的原因，过去的一些工艺步骤阻碍了硅太阳能电池的广泛应用，正是这些工艺耗费了制造电池所需能量的最大部分。正如第七章叙述的，改进的硅太阳能电池生产工艺，不仅提高了经济效益，而且显著地降低了制造电池所需的能量。采用这种工艺，能量偿还时间可从本章概述的低效率工艺流程所需要的 10 年减少到不到一年。

6.8 小 结

本章叙述了标准太阳能电池制造工艺，这种工艺是为制造空间电池而研究出的，起初也用于制造地面电池。本章还叙述了将电池组装成能经得起风雨的组件的封装设计。在标准工艺中，有几个方面是希望改进的。改进的电池制造工艺将在第七章介绍。

用这一章所叙述的标准工艺生产空间电池和过去的地面应用电池时所消耗的总能量与它们的输出能力相比是相当大的。而第七章的改进工艺，情况就不是这样了。

练 习 题

6.1 画出把石英岩变为硅太阳能电池的主要步骤的方框图。

6.2 对一个由效率为 12% 的硅电池组成的太阳能电池组件，在明朗的阳光下，当组件处于开路状态并输出最大功率时，试估算电池工作温度与环境温度的差别。

6.3 一只太阳能电池开路电压为 0.55V，短路电流为 1.3A；另一只电池开路电压为 0.6V，短路电流为 1.0A。假设两个电池均服从理想的二极管定律，当他们以：（a）并联方式；（b）串联方式连接时，试计算总的开路电压和短路电流。

6.4 一个假设的太阳电池组件由 40 只相同的电池组成,在晴朗的阳光下,每一只电池的开路电压为 0.6V,短路电流为 3A。在明朗的阳光下,将组件短路,并且其中一只电池部分被遮住。假设电池服从理想的二极管定律并忽略温度影响,试求出被遮电池中的功率损耗与电池被遮部分大小的关系。

参 考 文 献

- [6.1] L. P. Hunt, "Total Energy Use in the Production of Silicon Solar Cells from the Raw Material to Finished Product," *Conference Record, 12th IEEE Photovoltaics Specialists Conference, Baton Rouge, 1976*, pp. 347~352.
- [6.2] C. L. Yaws et al., "Polysilicon Production; Cost Analysis of Conventional Process", *Solid-State Technology*, January 1979, pp. 63~67.
- [6.3] H. Yoo et al., "Analysis of ID Saw Slicing of Silicon for Low Cost Solar Cells", *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaics Specialists Conference, Washington, D. C., 1978*, pp. 147~151.
- [6.4] N. F. Shepard and L. E. Sanchez, "Development of Shingle-Type Solar Cell Module", *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978*, pp. 160~164.
- [6.5] W. Carrol, E. Cuddihy, and M. Salama, "Material and Design Consideration of Encapsulants for Photovoltaic Arrays in Terrestrial Applications", *Conference Record, 12th Photovoltaic Specialists Conference, Baton Rouge, 1976*, pp. 332~339.
- [6.6] J. W. Srultz and L. C. Wen, *Thermal Performance, Testing and Analysis of Photovoltaic Modules in Natural Sunlight*, JPL Report No. 5101-31, July 1977.
- [6.7] E. Anagnostou and A. F. Forestierl, "Endurance Testing of First Generation (Block 1) Commercial Solar Cell

- Modules," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978*, pp. 843~846.
- [6.8] M. Mack, "Solar Power for Telecommunications," *Telecommunications Journal of Australia* 29, No. 1 (1979), 20~44.
- [6.9] C. Gonzalez and R. Weaver, "Circuit Design Considerations for Photovoltaic Modules and Systems," *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaics Specialists Conference, San Diego, 1980*, pp. 528~535.

第七章 改进的硅电池工艺

7.1 引言

在第六章中，叙述了过去生产硅太阳电池所用的标准工艺。将原材料石英岩变为密封的太阳电池时，有几道工序看来是耗资大、耗能多。

国际上正开展旨在降低成本的工作。对于第六章提到的每一个硅电池工艺步骤，这一章都叙述了一些最有希望的新工艺。这些工艺大多都处在研制阶段的后期，一些正通过试生产进行鉴定，而其他的已投入大批量生产。

7.2 太阳电池级硅

从第六章中看出，目前太阳电池是使用为半导体工业生产的超纯硅。然而，在晶体管 and 集成电路中，强调的是硅的质量，而材料价格相对来说是不甚重要的。对于太阳电池，性能和成本之间的折衷是值得研究的。

在 3.4.4 节提到，太阳电池中的杂质通常在禁带中引进允许能级，并起复合中心的作用。从 5.4.2 节看出，复合中心浓度的增加会降低电池的效率。图 7.1 示出了，除了掺杂剂之外只有某一种杂质存在时，一系列不同金属杂质的实验结果^[7,12]。虽然一些金属杂质（Ta、Mo、Nb、Zr、W、Ti 和 V）只要很低浓度就能降低电池的性能，但是另一些杂质即便浓度超过 $10^{15}/\text{cm}^3$ 仍不成问题。此浓度大约比半导体级硅（SeG-Si）的杂质浓度高 100 倍。这样就有可能选用成本较低的工艺来生产纯度稍低的太阳电池级硅（SoG-Si），而仍旧能够制造有足够好的性能的电池。有几种可取的工艺所生产的硅的质量不明显低于 Se-G 硅，

而其生产成本仅为常规工艺的几分之一。

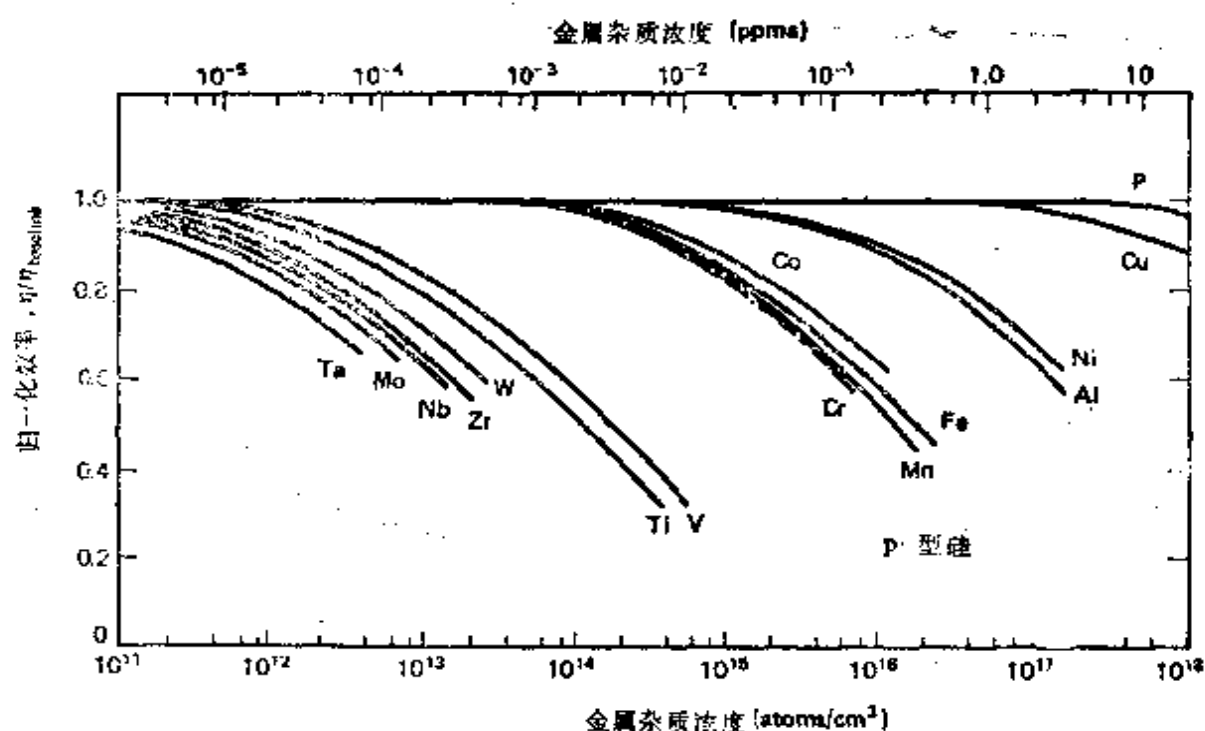


图 7.1 不同金属杂质对硅太阳能电池特性的影响^[7.1]

更有希望的是联合碳化物公司研究的一种工艺。它是由冶金级硅制备硅烷 (SiH_4)，接着由硅烷淀积硅^[7.2]。对这种工艺的分析表明，所生产的硅的价格为目前大量生产的硅价格的 $\frac{1}{5}$ ，耗能仅为 $\frac{1}{5}$ 。贝特尔哥伦布 (Battelle Columbus) 实验室研究的另一种工艺目前正处于研制阶段后期，它基于以锌还原四氯化硅^[7.3]。这些改进的工艺有可能取代常规西门子工艺，它们生产的硅不仅能用于太阳能电池工业，而且能用于半导体电子工业。

7.3 硅 片

7.3.1 硅片的要求

生产出纯硅之后，接着必须将结晶质量优良的硅加工成薄片以便制作太阳能电池。为了从材料得到充分的光伏输出，硅片厚度仅需 100 μm 左右。过去，都是用直拉 (Cz) 工艺形成大的单晶

锭，然后把锭切成薄片。这种将大块硅加工成大面积太阳能电池的方法效率很低。不仅把硅锭切成片时损失要超过一半，而且由于切割极限，硅片比需要的要厚。同时硅片是圆的，这就意味着它们在封装成太阳能电池组件时，不能组装得很紧密，除非把硅片修整成方的或六角形的。

7.3.2 铸锭工艺

直拉方法是铸锭工艺的一个例子。这种工艺的主要限制是生产的硅锭必须切割成薄片，这就带来已经提到的许多缺点。

标准直拉工艺能改进为半连续操作^[7.4]，这样作能节约成本，但得到的仍是圆柱形锭^①，用于太阳能电池仍然不利。

生产硅锭，尤其是方形横截面的锭的简单方法是采用类似浇铸的工艺。通常，这样得到的是对太阳能电池应用来说不理想的多晶硅锭。但是，通过细心控制熔化硅的凝固条件，就能形成大晶粒尺寸的硅。用适当的“铸模”材料，这种大晶粒材料就能生产出性能优良的太阳能电池^[7.6]。

用一个适当的籽晶和象热交换器那样控制凝固速率^[7.7]，用“浇铸”方法有可能生产出基本上为单晶的大尺寸硅锭。用这种材料制作的太阳能电池的特性已经相当于优级直拉材料制造的太阳能电池。研究表明，这种方法有明显的经济效益，甚至超过改进的直拉工艺的水平^[7.8]，

7.3.3 带硅

如果硅能直接形成片状或带状，则硅锭方法带来的限制可以消除。为达到这一目的，已经研究了几种方法。

为大批生产电池研究的第一个方法是如图 7.2 所示的“定边喂膜生长”(EFG)法。这种工艺除拉出的晶体形状受石墨“模具”的限制外，与直拉工艺大体上相同。结果，能够从熔硅^[7.9]直接获得薄带晶体。由于可以从同一熔硅中同时拉出几根带，因

① 直拉工艺可改进为制备大体上是方形横截面的锭[7.5]。

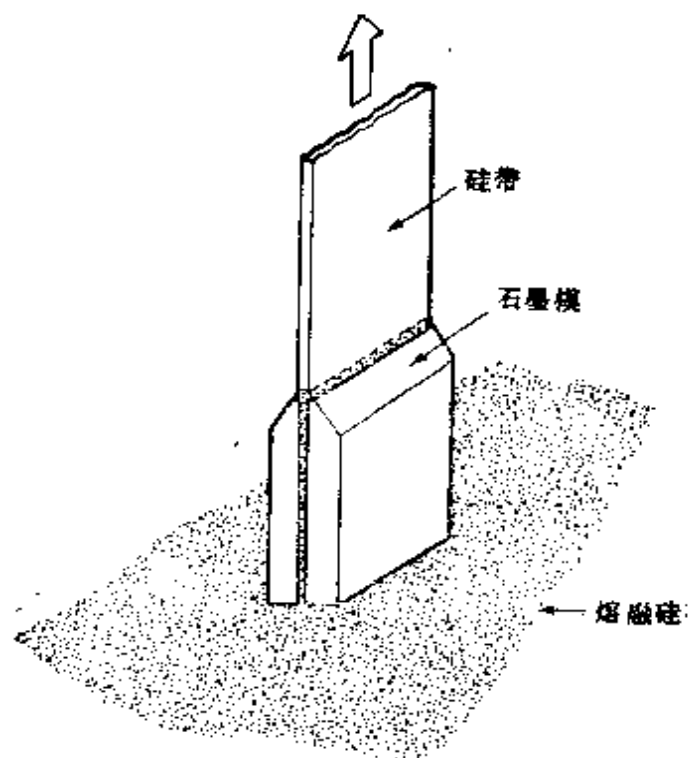


图7.2 EFG法生长硅带的示意图
熔硅由于毛细作用而上升到石墨模具内。硅带形状由模具顶部的形状决定

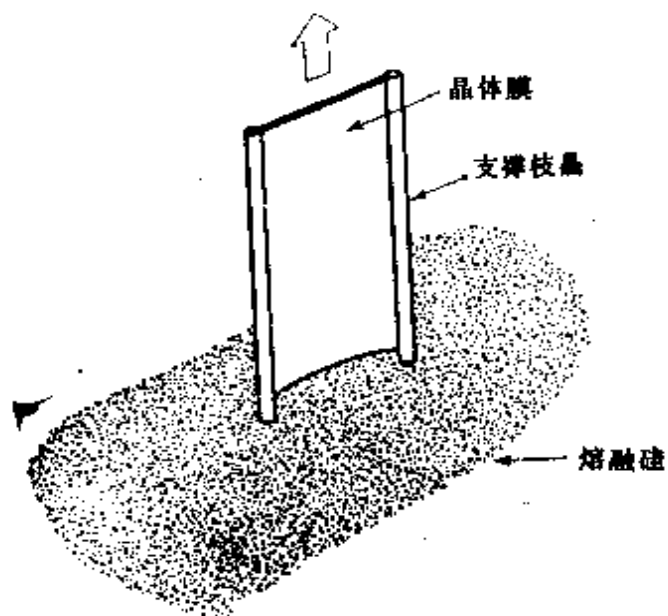


图 7.3 生长硅带的枝状膜方法
不用模具。硅带的形状受熔硅热梯度控制。枝晶沿着硅带边缘往下首先凝固。随着熔硅的拉出，起初的熔硅薄层被捕获集在枝晶之间

而可获得很高的硅生产率^(7,10)。

这种工艺的主要问题是所生产材料的质量问题。这种工艺与直拉法相比，生产的材料结晶质量较差。由于生长工艺的特性，从模具、坩埚和生长炉的环境引入的杂质加入到生长的硅带中（在别的晶体生长工艺中，大多数杂质都从生长的晶体中排除到熔硅）。此外，熔硅往往会与石墨模具反应，生成碳化硅并凝结在硅带中，此碳化硅会中断硅带的生长并降低后来所制得电池的性能。

图 7.3 所示的枝状膜方法克服了上述的一些缺点。通过控制温度梯度，可能促使平行枝晶生长进入熔硅。当这些枝晶从熔硅

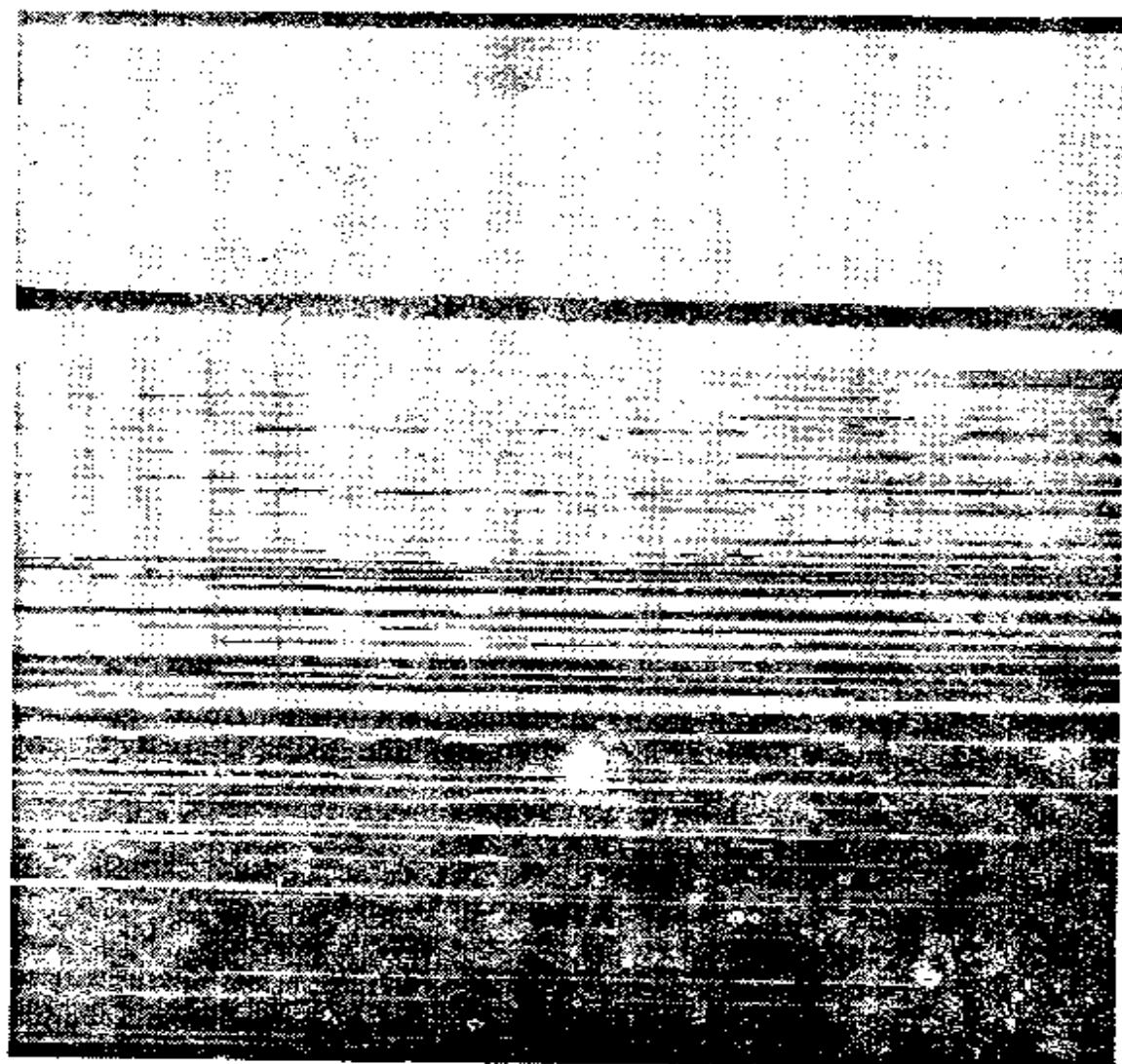


图 7.4 EFG 和枝状膜硅带晶体的外观比较
制成电池后，枝状柱被除去

中拉出时，熔硅薄膜便夹在枝晶间^[7.11]，随后硅膜凝固成与厚的枝晶连在一起的薄硅带。在硅带上制成电池以后，这些枝晶可以去掉并循环使用。由于不用模具，可以得到象直拉法那样好的材料特性。这种工艺的主要缺点是硅晶材料的生产率比较低。

在图 7.4 中，比较了用 EFG 法和枝状膜工艺生产的小硅带样品。注意，表面起皱是由 EFG 工艺所生产的材料的特征，而枝状膜材料则有抛光的镜面。

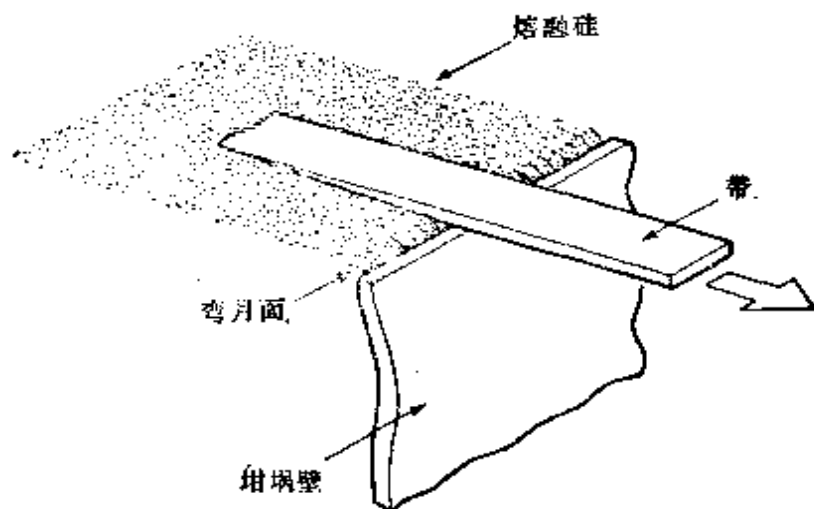


图 7.5 水平或低角度生长硅带法
硅带的生产速率非常高，但过去硅带尺寸的控制一直是一个问题

另外几种硅带生长工艺正处在研制阶段。以硅带的生产速率非常高而出名的一种方法是图 7.5 所示的水平或低角度生长法。这种方法的主要问题是硅带尺寸之控制^[7.12]。直接浇铸成硅片或硅带的方法也一直在探索之中^[7.6, 7.13]。

7.4 电池的制造和互联

如第六章所述那样，在硅片上制造太阳能电池的标准工艺的缺点是：它是一种适合于“分批”的工艺，因此，它仅能用于生产量低的情况；同时在材料的利用方面也是浪费的，尤其是形成电极的金属。现在正在大量生产中应用的一些方法已克服了这些限

制，附带的优点是得到了较高性能的电池。

一个主要进展是应用了绒面硅片，用选择性腐蚀，可以在硅片表面上形成很小的金字塔型^[7.14]。这些金字塔在扫描电镜下高倍放大后的外貌示于图 7.6 中。从这些金字塔的一侧面的反射光被向下反射，这就使反射光得到进入电池的第二次机会。由于减反射膜的应用，反射损失可以降低到低于百分之几。如第八章所表明的，这种工艺甚至在没有减反射膜的情况下也可以给出满意的电池性能。

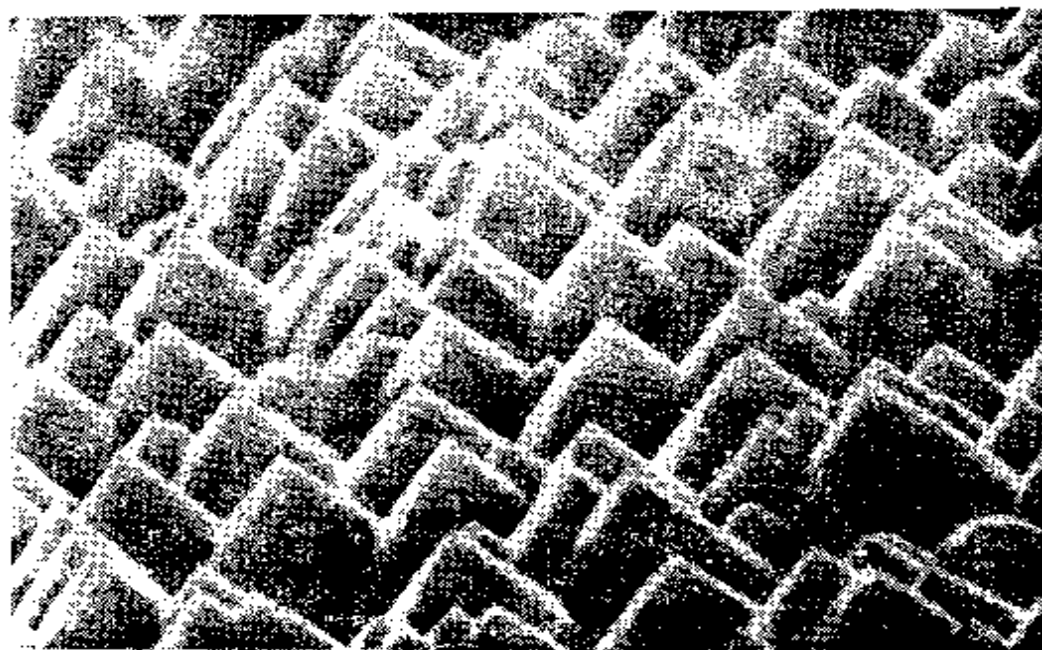


图 7.6 在扫描电镜下绒面电池表面的外貌
高 $10\mu\text{m}$ 的峰是方形底面金字塔的顶。这些金字塔的
侧面是硅晶体结构中相交的(111)面

在前面的标准工艺中，p-n 结是通过扩散杂质分批形成的。一个成本更低的方法是给硅片表面喷涂含有所需掺杂剂的物质，并借助传送带连续扩散杂质^[7.15]。另一种方法是应用称为离子注入的工艺^[7.16]。掺杂剂的离子被加速到很高速度并打到硅片表面。这些离子嵌入硅片中接近轰击表面的地方。随后进行的退火工序消除了由此工艺引起的硅晶格的损伤，而从电子学意义上讲，退火工序“激活”了掺杂剂。施加一个电子束或激光脉冲是有效的退火方法。适于大量生产太阳电池、以离子注入为基础的

一个相当好的工艺流程示于图 7.7 中。

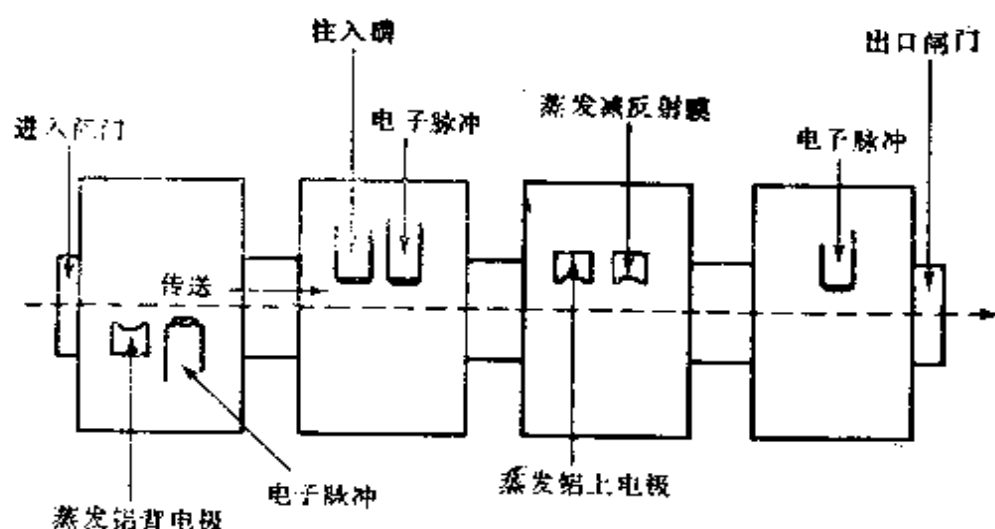


图 7.7 生产太阳电池的连续真空工艺流程图

该流程基于离子注入制结、蒸发金属电极和脉冲电子束退火 (7.10)

通过在电池背面获得低表面复合速度的接触，使太阳电池性能进一步改进。如第五章所述，这不仅提高了电池的开路电压，同时在一定程度上增加了电流输出。

用称为背面场 (BSF) 的工艺 (这样叫法有点不太恰当) 在电池背面获得了低的有效复合速率。如图 7.8 所示，在电池背电极处建立一个重掺杂区，从理论上可以证明，重掺杂区和较轻掺杂的基区之间的界面能够起低复合速率表面的作用。这种工艺不

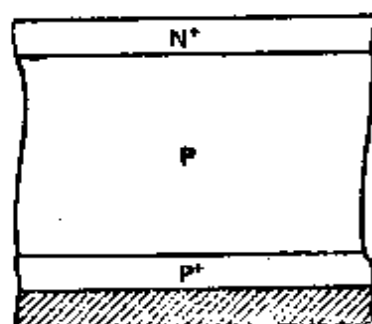


图 7.8 N^+PP^+ 太阳电池略图

电池背面的重掺杂区阻止少数载流子流动，使 PP^+ 结面成为一个有效低复合速度表面

仅如上面提到的那样增加了电压和电流输出，而且还使电池背面电极的接触电阻大为降低。实际上，制备“背面场”最有效的工

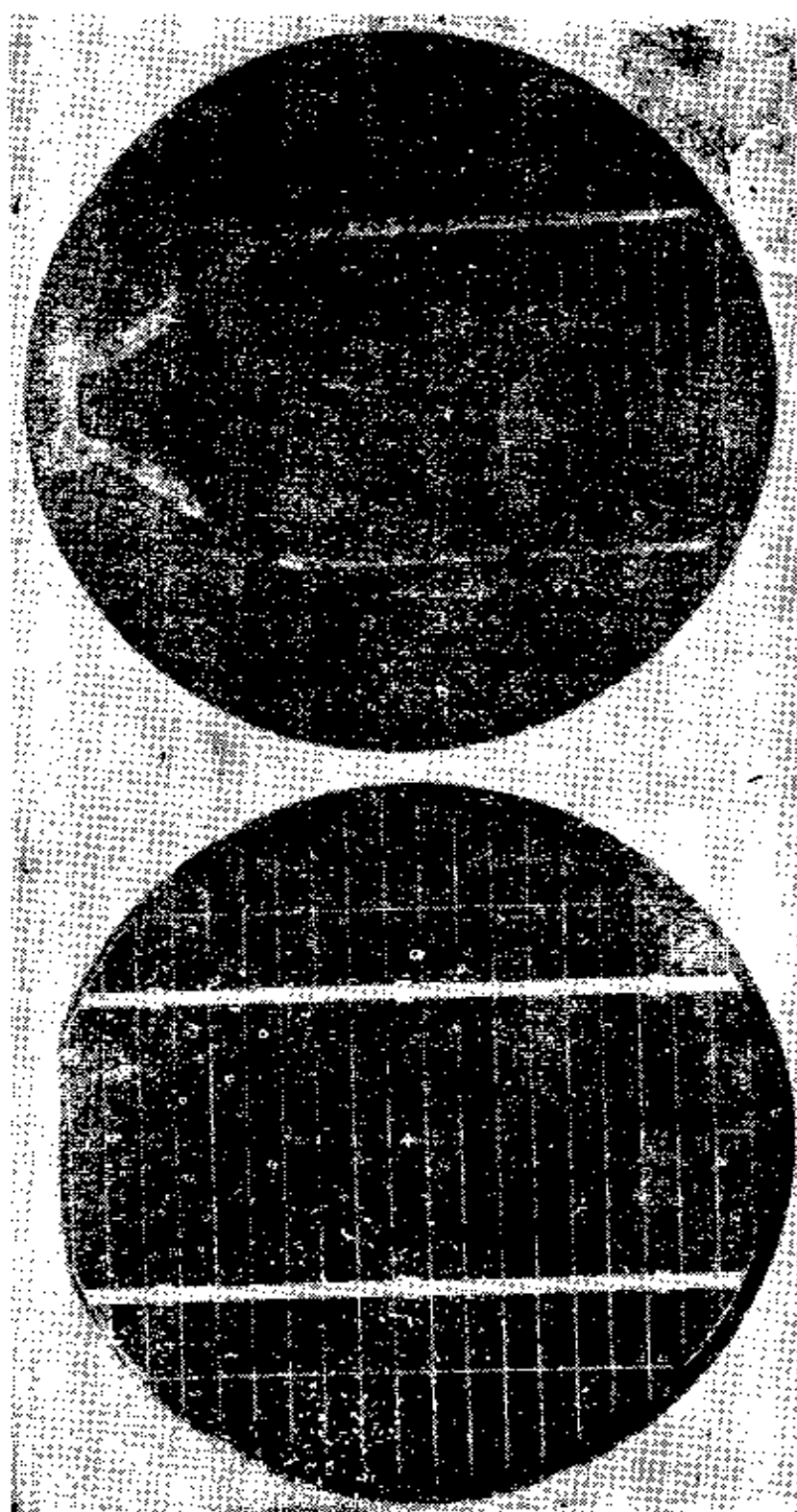


图 7.9 具有浸锡上电极（上面）
和丝网印刷上电极（下面）直径为10cm 的太阳电池

它是在电池背面丝网印刷铝膏，在后面的烧结工序中铝进入硅而形成合金^[7.15]。

金属化是第六章所述的标准太阳能电池工艺流程中的薄弱环节之一。大批量生产电池时应用的两种低成本工艺是丝网印刷和电镀。这两种工艺减少了金属的消耗量，并取消了对昂贵的真空设备的要求。在前一种工艺中，含有金属的膏通过一个掩膜印刷到硅片上，而后烧结以去除膏中的“粘结剂”、降低金属的电阻率。虽然镍、铜和铜膏可能是低成本的替代物，但大量应用的首先是银膏。在电镀工艺中，将电池表面的绝缘层腐蚀出图形，然后通过这个图形电镀出所需的金属层。通常是几种金属连续电镀，因为很少有这样的金属，它们独自同时具备对硅的优良粘附、防腐、低电阻率和低成本的特性。这种工艺的最后一步可以“浸锡”，即用一层防腐和低串联电阻的锡层覆盖住电镀的金属层。图 7.9 比较了具有浸锡上电极和丝网印刷上电极两种电池的外貌。

喷涂似乎是作减反射膜的最廉价方法，虽然有绒面时可以不耍这一层。已经研制出连接电池和把它们封装成太阳能电池组件的自动化机器^[7.17]。

7.5 可供选择的工厂的分析

在前几节中略述了生产太阳能电池的几种可取的途径。为了给这些途径在经济上进行比较提供共同依据，已研究出称为 SAMICS（太阳方阵制造工业预算标准）的预算法^[7.8]。利用以这种方法为根据的计算机程序，已经对制造太阳能电池组件的各工序进行了最有根据的预算。

将本章所述的各种工艺进行不同组合，已经设计出一些大型工厂，并且已利用 SAMICS 方法对所制得的太阳能电池组件的成本进行了比较。其结果是这些工艺的几种组合能够生产低成本太阳能电池组件，这样的成本，使它们在第十四章中所述的一些大规模应用中成为有竞争力的电源。EFG 和枝状蹼生长硅带的工

艺及 HEM（热交换方法）和随后的切片工艺都是可行的硅片工艺，改进的直拉法稍微落后点^[7,8]。

作为一个例子，下面将叙述最早用 SAMICS 方法分析的一个能够生产低成本硅太阳能电池组件的自动化工厂的情况^[7,19]。这个工厂生产的产品如图 7.10 所示，是由 192 个电池组成的一个 $1.2 \times 1.2\text{m}$ 的组件，电池制作在切割成 $10 \times 7.5\text{cm}$ 大小的 EFG 硅带上。组件效率是 11.4%。

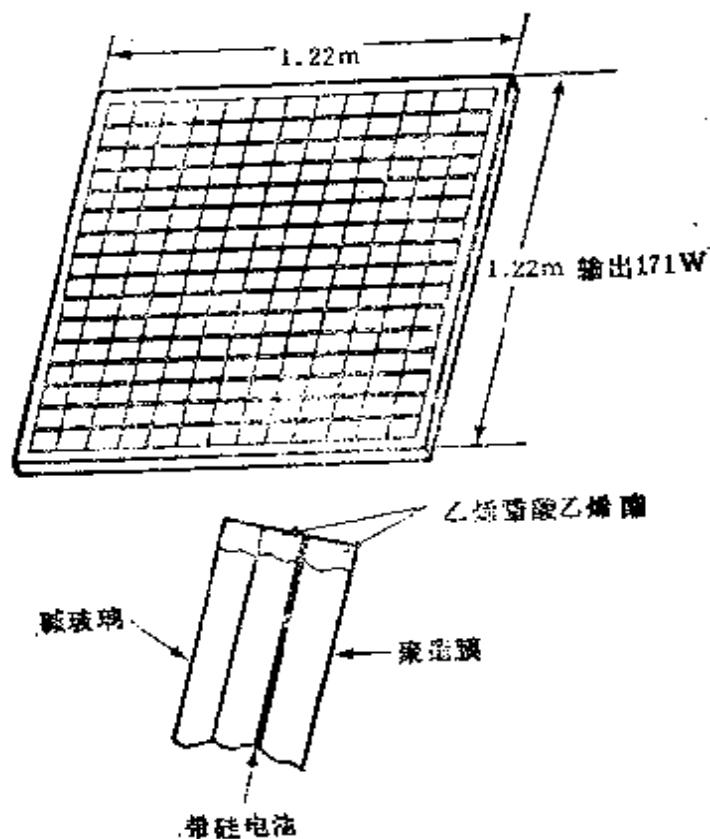


图 7.10 正文所述可供选择的工厂生产的太阳能电池组件^[7,19]

用来生产该组件的工艺流程示于图 7.11。用“联合碳化物”公司工艺提纯冶金级硅，用 EFG 法由这种材料制备硅片并切割成所需的尺寸。在硅片上制作电池的主要步骤包括做出有背面场的背表面、绒面腐蚀、离子注入制结、脉冲退火及丝网印刷电极。然后，将电池封装并测试。

为获得上面提到的低成本，发电量预计必须为 $250 \text{ MW}_e/\text{年}$ 。

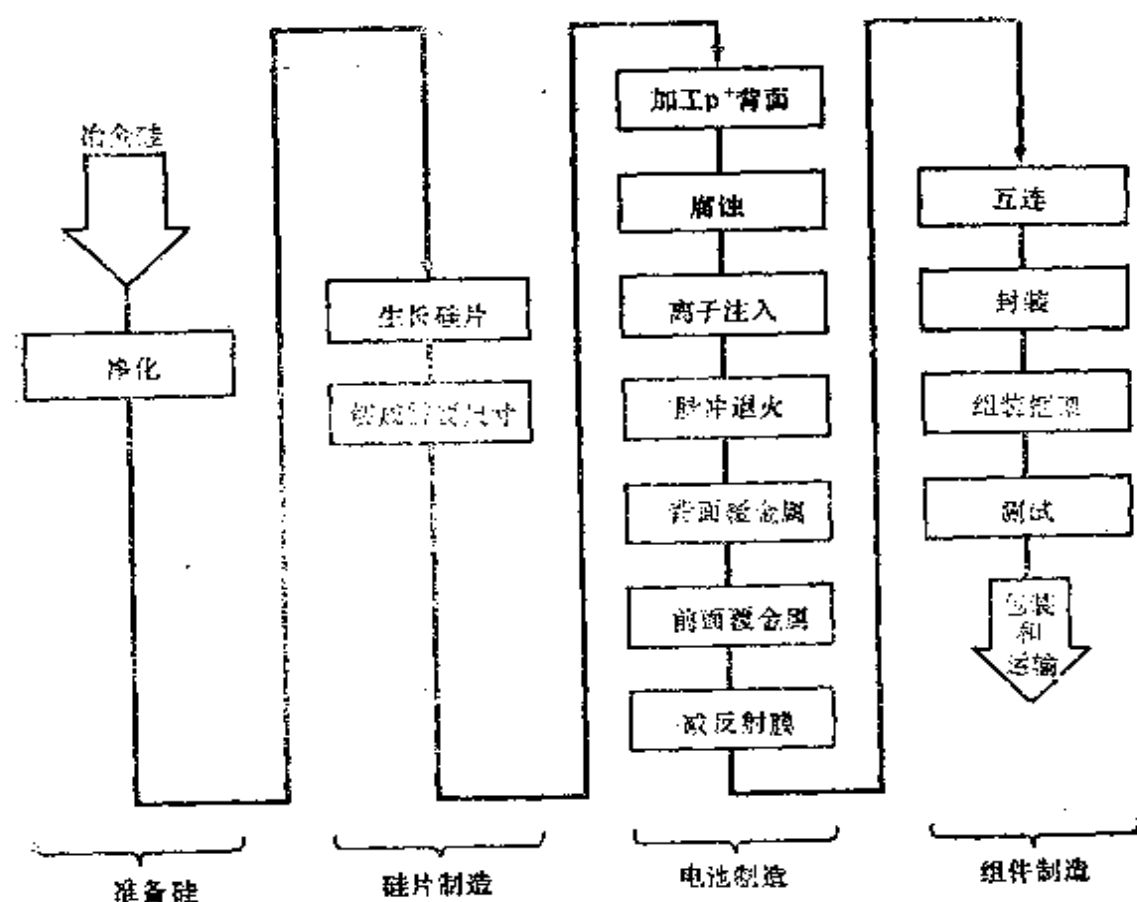
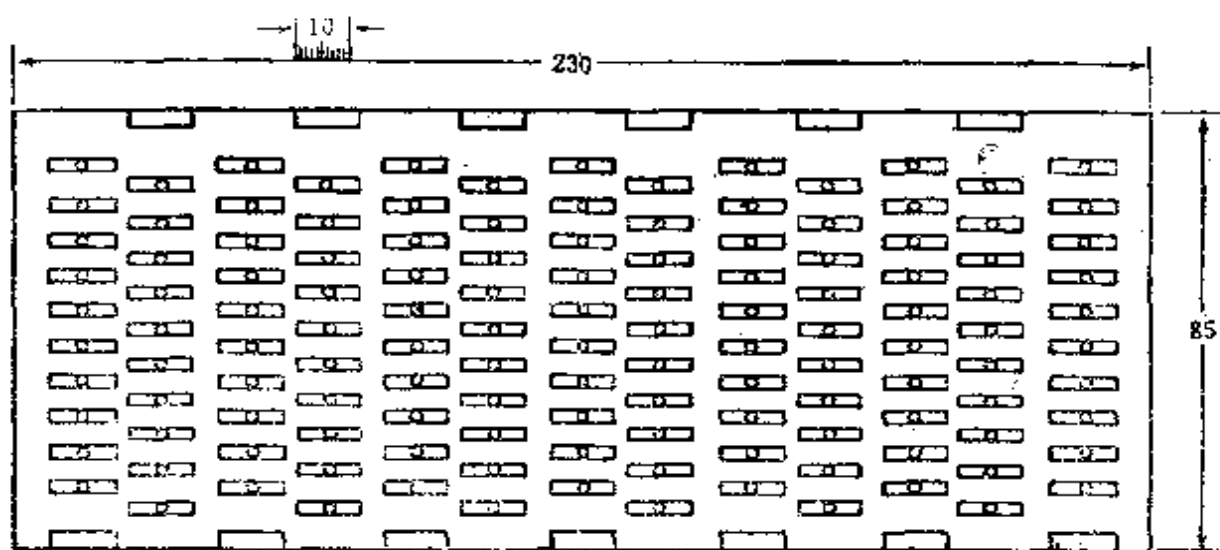


图 7.11 用来生产图 7.10 组件的工艺流程图^(7.10)

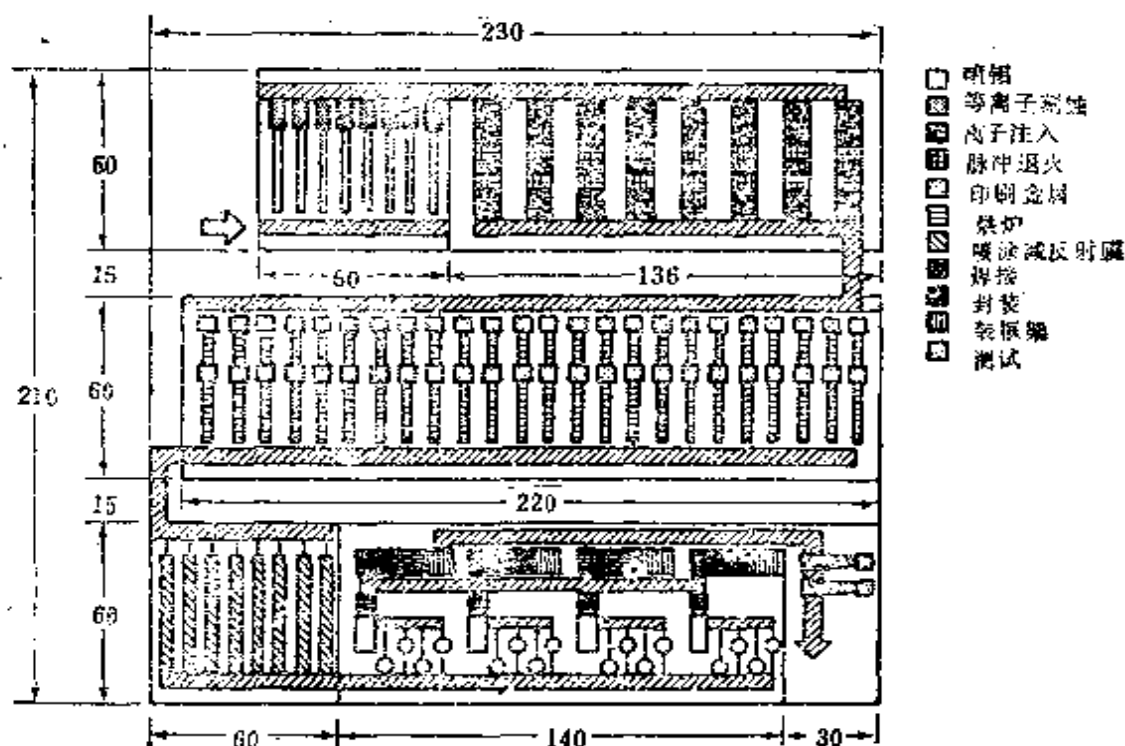
		生产率 (W/年)	250,000,000
		劳动力 (例班制)	1,152 直接 529 间接
ADM	硅的净化	工厂面积 (m ²)	
	3790 m ²	硅的净化	3790
硅片、电池和 组件制造 8910 m ²		硅片生长	1816
		电池制造	2900
		组件制造	948
		仓库	908
		杂项 (通道, 工作间, 自助餐厅 等)	1940
		主要设备 (\$)	
		硅片净化	19,400,000 *
		硅片生长	14,820,000
		电池和组件制造	8,219,000
		* 联合碳化物公司, 能量偿还时间, 片, 电池和组件 0.179 年	

图 7.12 为了生产发电量为 250MW_p/年的电池所需的场地、劳力和资金 (1975 \$ US) 的计算值。用相同的货币单位算得的组件销售价格 (F. O. B 工厂) 为 \$ 0.46/W_p^(7.12)



130对5硅带机会用一个熔料补充机
每行10对机器共用一个操作台
每对机器一个操作员

(a)



(b)

图 7.13

(a)可供选择的工厂拉带状晶体机的具体布置图，用EFG法每个拉带机同时生产5条硅带（尺寸单位为m）；

(b)该工厂电池的加工、封装和测试工段的具体布置图(7.10)

对制造组件的各工序所需的劳力和所需要的面积示于图 7.12 中。只要电池组件工作 65 天，就可偿还制造电池组件的各工序所消耗的能量。

为了使读者对年发电量为 250MW 的可供选择的工厂不同工段的规模和具体布局有一个大致了解，图 7.13(a) 示出了该工厂制备硅片工段的一个可能的布置图。图 7.13(b) 示出了电池制造、封装和测试工段的布置图。

7.6 小 结

已经研究出几种生产低成本硅太阳能电池组件的先进工艺，它们克服了第六章所述的标准生产工艺的缺点。

直接生长硅带的方法免去切片工序，而切片是任何硅锭工艺的薄弱环节。由硅片制造太阳能电池在工艺上的主要要求是：工艺上能高度自动化，并且这些工艺不过分地浪费材料。几种工艺流程满足了这些要求。对由先进加工工序组合起来的可供选择的工厂的经济分析表明，有可能生产出低价格的硅太阳能电池组件，这样的价格使它们可能与常规电源竞争，至少在某些大规模应用的情况下是这样。如第九章所述的那样，薄膜工艺对所需的光伏材料质量的要求不太严格。由于这个原因，与本章所述的以晶硅为基础制造的硅电池组件相比，从长远观点来看，将证明硅薄膜器件会更便宜。

练 习 题

7.1 在硅晶体中硅原子的体密度大约是 $5 \times 10^{23}/\text{cm}^3$ 。问：按图 7.1，在电池性能降低不超过 10% 的条件下，标准太阳能电池中下列几种杂质的允许含量分别为十亿分之几？(a) Mg ；(b) Ti ；(c) Cu 。

7.2 (a) 采用具有先进的硅锭切割工艺的生产装置，近期内预期能达到的最好水平是切得 $250\mu\text{m}$ 厚的硅片，切割或切口损失为 $150\mu\text{m}$ 。用这一工艺，假定切割时的材料损失不能回收，那么从每 kg 初始硅材料获得的硅片的最大面积是多少？

(b) 对于生产厚度为 $100\mu\text{m}$ 硅带的工艺而言相应的数又是多少？

(c) 如果用上述方法生产的材料所制造的电池的能量转换效率分别为 16% 和 12%，分别求出在晴朗的阳光下 ($1\text{kW}/\text{m}^2$)，前面两种工艺的最大

单位材料发电量（表示为峰W/kg）。

（d）如果按目前冶金硅的产量（每年十万吨）生产纯硅，分别求按前面两种工艺制造的太阳能电池的一年最大可能发电量是多少？

7.3 计算由圆形电池组合成矩形组件所能够获得的 最大组装密度（电池面积/组件面积）。

参 考 文 献

- [7.1] J. R. Davis et al., "Characterization of the Effects of Metallic Impurities on Silicon Solar Cell Performance", *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978*, pp. 490~496.
- [7.2] C. L. Yaws et al., "New Technologies for Solar Energy Silicon, Cost Analysis of UCC Silane Process", *Solar Energy* 22 (1979), 547~553.
- [7.3] C. L. Yaws et al., "New Technologies for Solar Energy Silicon, Cost Analysis of BCL Process", *Solar Energy* 24 (1980), 359~365.
- [7.4] G. F. Fiegl and A. C. Bonora, "Low Cost Monocrystalline Silicon Sheet Fabrication for Solar Cells by Advanced Ingot Technology", *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, 1980*, pp. 303~308; A. H. Kachare et al., "Performance of Silicon Solar Cells Fabricated from Multiple Czochralski Ingots Grown by Using a Single Crucible", *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, 1980*, pp. 327~331.
- [7.5] J. C. Posa, "Motorola Pulls Square Ingots," *Electronics*, October 11, 1979, p. 43.
- [7.6] H. Fischer and Pschunder, "Low Cost Solar Cells Based on Large Area Unconventional Silicon", *Conference Record, 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Baton Rouge, 1976*, pp. 86~92; J. Lind. mayer

- and Z. L. Putney, "Semicrystalline versus Single Crystal Silicon", *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, 1980*, pp. 208~213.
- [7.7] C. P. Khattak and F. Schmid, "Low-Cost Conversion of Polycrystalline Silicon into Sheet by HEM and Fast", *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, 1980*, pp. 484~487.
- [7.8] R. W. Aster, "PV Module Cost Analysis", in *LSA Project Progress Report 13 for Period April 1979 to August 1979*, DOE/JPL-1012-29, pp. 3~385 to 3~395.
- [7.9] K. V. Ravi, "The Growth of EFG Silicon Ribbons", *Journal of Crystal Growth* 39 (1977), 1~16.
- [7.10] J. P. Kalejs et al., "Progress in the Growth of Wide Silicon Ribbons by the EFG Technique at High Speed Using Multiple Growth Stations", *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, 1980*, pp. 13~18.
- [7.11] R. G. Seidensticker, "Dendritic Web Silicon for Solar Cell Application", *Journal of Crystal Growth* 39 (1977), 17~22.
- [7.12] T. Koyanagi, "Sunshine Project R and D Underway in Japan," *Conference Record, 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Baton Rouge, 1976*. pp. 627~633; D. N. Jewett and H. E. Bates, "Low Angle Crystal Growth of Silicon Ribbon", *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, 1980*, pp. 1404~1405.
- [7.13] D. J. Rowcliffe and R. W. Bartlett, "Vacuum Die Casting of Si Sheet," in *LSA Progress Report 13 for Period April 1979 to August 1979*, DOE/JPL-1012-39, pp. 3~152 to 3~154.
- [7.14] S. R. Chitre, "A High Volume Cost Efficient Production Macrostructuring Process," *Conference Record, 13th*

- IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978, pp. 152~154.*
- [7.15] N. Mardesich et al., "A Low-Cost Photovoltaic Cell Process Based on Thick Film Techniques," *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, 1980, pp. 943~947.*
- [7.16] A. Kirkpatrick et al., "Silicon Solar Cells by Ion Implantation and Pulsed Energy Processing", *Conference Record, 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Baton Rouge, 1976, pp. 299~302*; also "Low-Cost Ion Implantation and Annealing Technology for Solar Cells", *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, 1980, pp. 820~824.*
- [7.17] H. Somberg, *Automated Solar Panel Assembly Line*, report prepared for Jet Propulsion Laboratory, Report No. DOE/JPL/955278-1, April 1979, and subsequent reports.
- [7.18] R. G. Chamberlain, "Product Pricing in the Solar Array Manufacturing Industry, An Executive Summary of SAMICS," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978, pp. 904~907.*
- [7.19] J. V. Goldsmith and D. B. Bickler, *LSA Project-Technology Development Update*, report to U. S. Department of Energy by Jet Propulsion Laboratory, DOE/JPL-1012-7, August 1978 (JPL Pub #79~26); also D. B. Bickler, "A Preliminary 'Test Case' Manufacturing Sequence for 50¢ /Watt Solar Photovoltaic Modules in 1986," *Proceedings of Second E. C. Photovoltaic Solar Energy Conference* (Utrecht, D. Reidel Publishing Co., 1979), pp. 835-842.

第八章 硅太阳电池的设计

8.1 引言

在前几章中叙述了制造硅太阳电池的标准工艺和改进工艺。本章将讨论硅太阳电池的详细设计问题。在结两边的最佳掺杂浓度各是多少？结的最佳位置在什么地方？电池上电极的最好形状是什么？怎样才能使电池的光学损失最小？对于这些问题本章都要做出回答。

虽然这些问题的答案是专门为硅电池提出的，但是对于第十章所讨论的由其他材料制成的电池也存在同样的问题。

8.2 主要依据

8.2.1 光生载流子的收集几率

一个与空间有关的参数即收集几率可以定义为一个光生少数载流子对太阳电池短路电流做出贡献的几率。此几率是电池内产生载流子的位置的函数。下面将看出，这个参数是决定太阳电池物理设计的关键。

为了求出收集几率，我们将分析在图 8.1(a) 中表示的理想化的情况。假定在整个电池中，光生电子-空穴对只产生在一个平面上。在对称性允许进行“一维”分析的情况下，产生率与通过电池的距离之间的关系是一个脉冲函数，如图 8.1(b) 所示。

分析的目的是为了求出在 x_1 点产生的电子中对电池短路电流有贡献的部分的比率。分析过程中没有发现非线性，而且根据叠加原理，此结论也适用于载流子产生过程更接近实际的情况。这个分析与 4.6 节的分析非常相似。

在图 8.1(b) 的区域 1 中, 除了正好在其边缘的 x_1 点外, 各处的产生率都为零。因此, 剩余少数载流子 Δn 必须满足类似于方程 (4.25) 的微分方程:

$$-\frac{d^2 \Delta n}{dx^2} = \frac{\Delta n}{L_e^2} \quad (8.1)$$

式中 L_e 是扩散长度。如前所述, 通解为

$$\Delta n = Ae^{x/L_e} + Be^{-x/L_e} \quad (8.2)$$

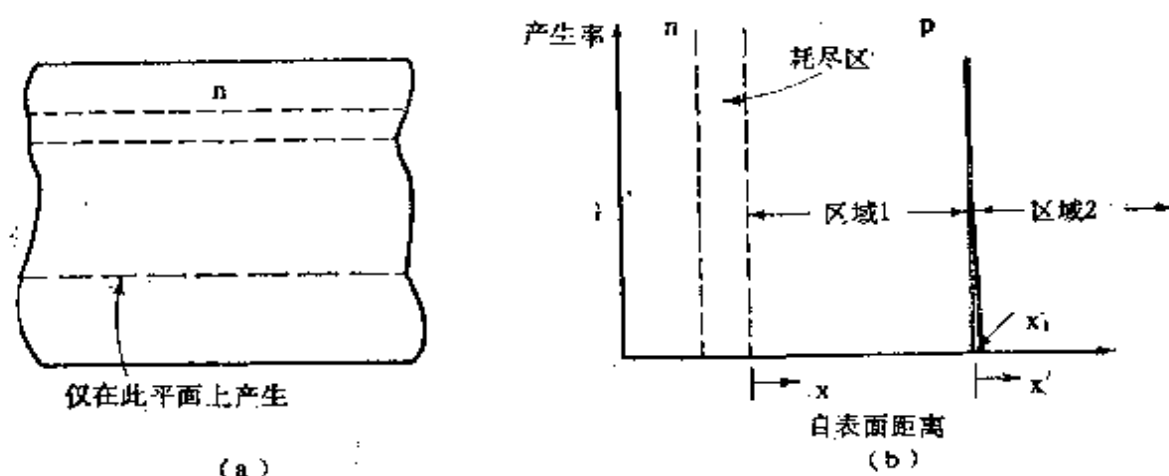


图 8.1 用于计算收集几率的理想化载流子产生情况
在 x_1 点产生的载流子中对电池短路电流有贡献的部分
的比率的表达式在正文中已求出

常数 A 和 B 由边界条件确定。在短路情况下, $x=0$ 处的剩余电子浓度为零, 因为它的值由结电压决定。因此 $A = -B$, 于是

$$\Delta n = A(e^{x/L_e} - e^{-x/L_e}) = 2A \sinh\left(\frac{x}{L_e}\right) \quad (8.3)$$

同样在图 8.1(b) 的区域 2 中, 有

$$\Delta n = Ce^{x'/L_e} + De^{-x'/L_e}$$

其中 x' 坐标的起点为 x_1 。在这种情况下, 当 x' 增大时, 剩余浓度是有限的。因此, $C=0$, 于是

$$\Delta n = De^{-x'/L_e} \quad (8.4)$$

在 x_1 处, 因为电子的浓度是连续的, 所以由方程 (8.3)

和 (8.4) 得出的两个解必然完全相等。因此, 得到

$$D = 2A \sinh\left(-\frac{x_1}{L_p}\right) \quad (8.5)$$

因为只有 在 x_1 处才产生光生载流子, 所以在器件的 n 型区, 载流子产生率处处为零。同样, 当电池短路时, 在耗尽区边缘的剩余空穴浓度 Δp 也是零。由此得出在整个 n 型区 Δp 都为零。所得到的电子和空穴的分布示于图 8.2(a) 中。因为在均匀掺杂的准中性区中, 少数载流子的流动以扩散方式占优势(4.5 节), 所以可以通过对上述分布求导数很容易地计算出少数载流子的流量。其结果示于图 8.2(b)。

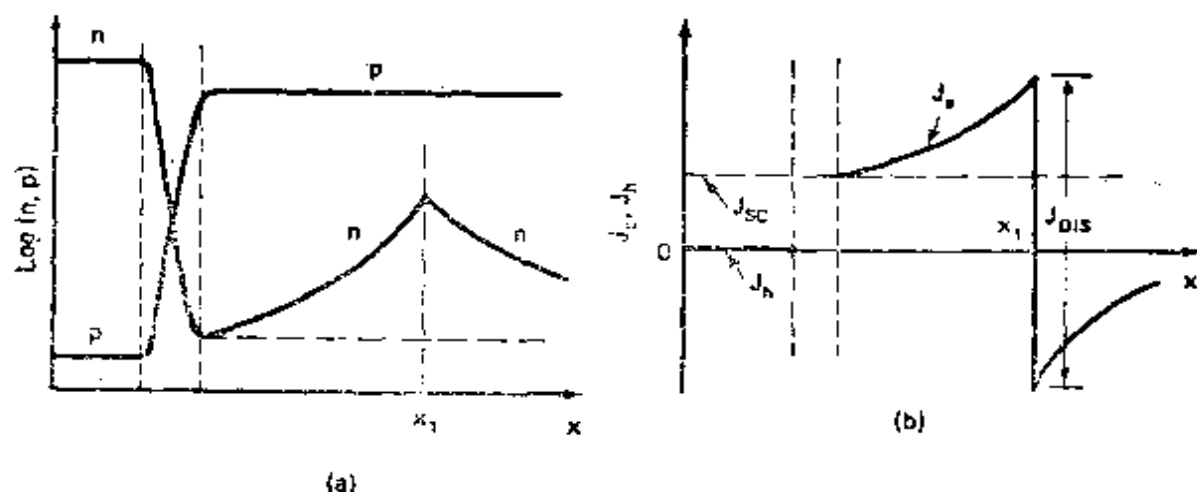


图 8.2

(a) 在图 3.1 的载流子产生情况下, 整个太阳电池中的载流子分布;

(b) 相应的少数载流子流的分布

在 x_1 点电子流密度的不连续性是由于在这点产生载流子引起的。突变的大小等于电子的电荷乘以这点的产生率。假定耗尽区两侧载流子流的变化极小 (如前面 4.6.2 节和 5.4.3 节讨论的), 则器件的总载流子流密度等于在 $x=0$ 处电子流的密度。收集几率 (f_o) 等于载流子在外电路中的流速与其产生率的比。因此

$$f_o = -\frac{J_{sc}}{J_{DIS}} \quad (8.6)$$

然而，在 p 型区

$$J_e = qD_e \frac{dn}{dx} \quad (8.7)$$

因此，在区域 1

$$J_e = -\frac{2qD_e A}{L_e} \cosh\left(\frac{x}{L_e}\right) \quad (8.8)$$

从而得出：在 $x=0$ 处

$$J_{sc} = -\frac{2qD_e A}{L_e} \quad (8.9)$$

J_{DIS} 能够通过突变点两边的两个电流表达式 (J_{e-} 和 J_{e+}) 求出：

$$J_{e-} = -\frac{2qD_e A}{L_e} \cosh\left(\frac{x_1}{L_e}\right) \quad (8.10)$$

$$J_{e+} = -\frac{qD_e D}{L_e} = -\frac{2qD_e A}{L_e} \sinh\left(\frac{x_1}{L_e}\right), \quad (8.11)$$

其中式 (8.11) 由式 (8.5) 和 (8.7) 导出。因此

$$\begin{aligned} J_{DIS} &= J_{e-} - J_{e+} \\ &= \frac{2qD_e A}{L_e} e^{x_1/L_e} \end{aligned} \quad (8.12)$$

由此得出

$$\boxed{f_0 = e^{-x_1/L_e}} \quad (8.13)$$

收集几率随着载流子产生点离结的耗尽区边缘的距离增加而指数地减小。特征衰减长度正好等于少数载流子的扩散长度。因为上述的分析是线性的，所以不管整个器件的载流子产生率的分布如何，这个结论都是正确的。收集几率与深入太阳电池的距离的关系曲线示于图 8.3 中。如前面 (4.7 节) 所假设的，电池的耗尽区和位于它附近的一个少子扩散长度之内的区域是所产生的载流子对电流作出贡献 (即被收集) 的几率最高的区域。在这些区域

以外产生的少数载流子在到达结和接着到达器件的输出端以前有极高的复合几率。

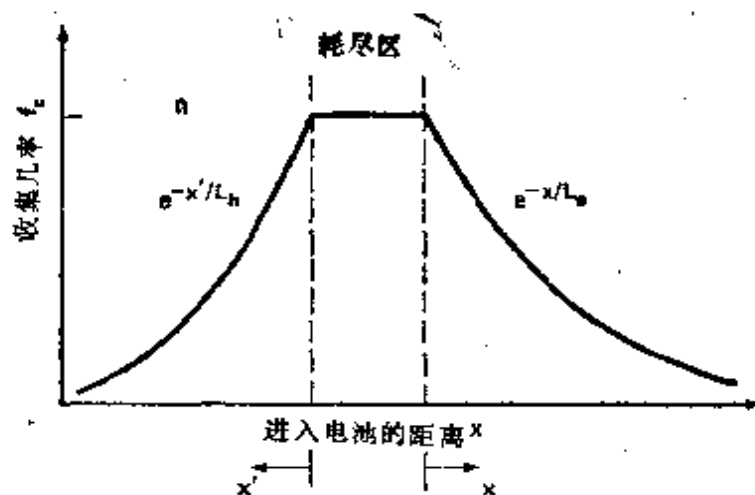


图 8.3 计算得出的光生少数载流子的收集几率与太阳电池中载流子产生点的关系图

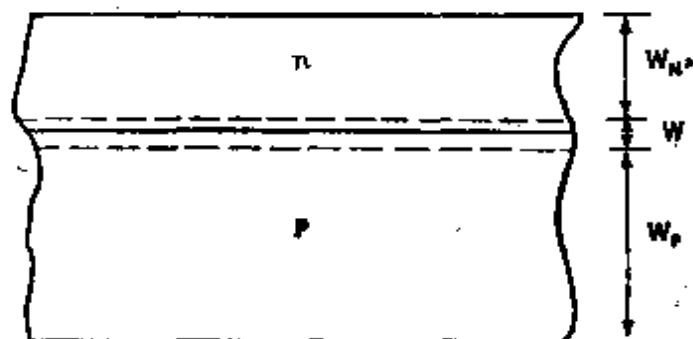


图 8.4 有限范围实际电池尺寸示意图

上述分析包含有这样的假定，即 n 型区和 p 型区的范围要比扩散长度宽得多。而对于如图 8.4 所示的有限范围的实际电池，其收集几率则要进行修正。例如，如果在器件的 p 型一侧的表面有高的复合速度，那么对应于式 (8.13) 的表达式为

$$f_o = \frac{\sinh[(W_p - x)/L_p]}{\sinh(W_p/L_p)} \quad (8.14)$$

如果它有低的复合速度，则

$$f_c = \frac{\cosh[(W_p - x)/L_s]}{\cosh(W_p/L_s)} \quad (8.15)$$

以上二式在 $W_p \gg L_s$ 的情况下近似于式 (8.13)。

8.2.2 结深

暴露的表面（例如在太阳能电池上电极的栅线之间）一般是具有高复合速度的表面。欧姆接触的金属电极和半导体之间的界面一般也是高复合速度区。在 7.4 节已证明，产生低复合速度界面的一种有效的方法就是利用背面场（即在同种掺杂区中，在高掺杂材料和低掺杂材料之间形成一个结）。

考虑到上述情况和式 (8.14) 和 (8.15)，光生载流子的收集几率与离 p-n 结太阳能电池表面的距离的关系曲线具有图 8.5 (a) 中所示的形状。它具有两个重要的特征。其一是背面场增加了靠近背电极处的光生载流子的收集几率，因此增加了电池的短路电流。其二是在靠近太阳能电池上表面处的光生载流子的收集几率一般是低的。

当考虑阳光照射下半导体中载流子的实际产生率时，可以发现，最高的产生率恰好发生在半导体表面。对于单色光，产生率由下式求出：

$$G = (1 - R)\alpha N e^{-\alpha x} \quad (8.16)$$

其中， x 是离开表面的距离； α 是吸收系数； N 是入射的光通量； R 是反射部分。在阳光下，产生率为

$$G(x) = \int_0^{\lambda_{max}} [1 - R(\lambda)] \alpha(\lambda) N'(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)x} d\lambda \quad (8.17)$$

其中 $N'(\lambda)$ 为每个波长的入射通量。这个加权指数的近似形状示于图 8.5 (b) 中。产生率在靠近表面处有很强的峰值，而这里正好收集几率很低。显然，如果结尽可能靠近表面，则这个缺陷可限制到最小。

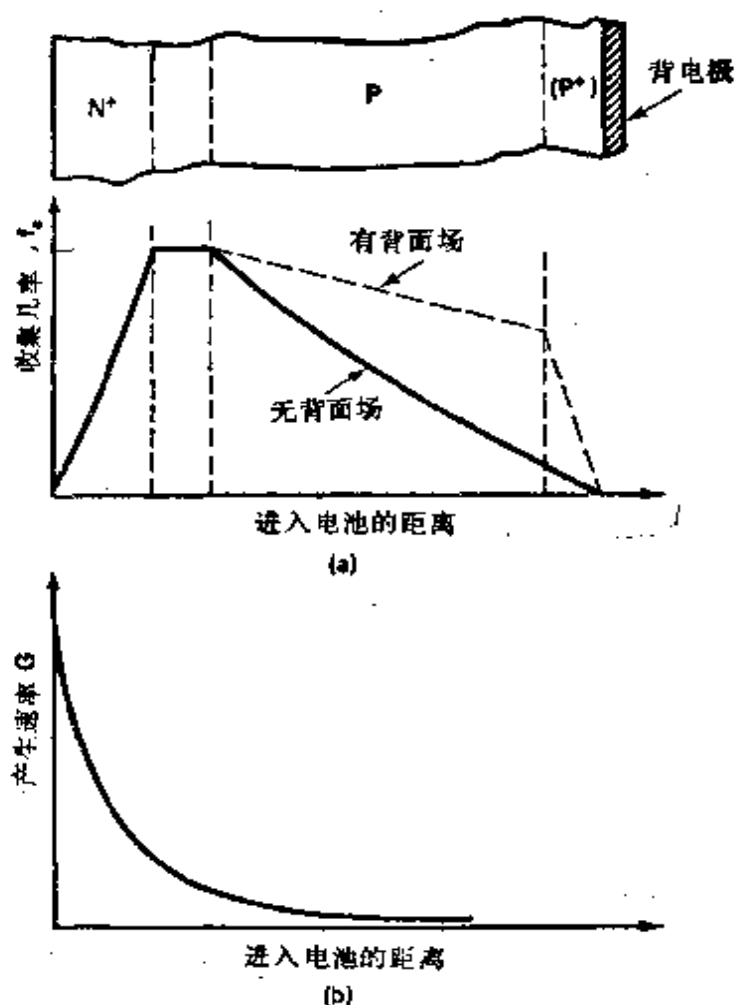


图 8.5

(a) 有背面场和没有背面场两种情况下的有限范围电池的收集几率；(b) 在阳光照射下电子-空穴对产生率与进入电池的距离的曲线

8.2.3 顶层的横向电阻

在电池体内，电流的方向一般是垂直于电池表面的，如图 8.6(a) 所示。为了经部分覆盖电池顶部的电极引出电流，电流就必须横向流过电池材料的顶层。对于均匀掺杂的 n 型层，其电阻率由下式 (2.14 节) 得出：

$$\rho = \frac{1}{q\mu_n N_D} \quad (8.18)$$

更适合于描述这一层的横向电阻的量是“薄层电阻” (ρ_s)，

它等于电阻率除以这层的厚度 t ，即

$$\rho_s = \frac{1}{q\mu_s N_D t} \quad (8.19)$$

对于非均匀掺杂层、乘积 $\mu_s N_D t$ 由积分式 $\int_0^S \mu_s(x) N_D(x) dx$ 代替。薄层电阻有欧姆量纲，但通常表示为 $\Omega/\square$ 。

薄层电阻确定了上电极栅线之间的间隔。参照图 8.6(b)，由横向电流引起的电阻性功率损耗是很容易计算的。在 dy 这一小段中的功率损耗由下式求出：

$$dP = I^2 dR \quad (8.20)$$

其中， dR 等于 $\rho_s dy/b$ ，而 I 为横向电流，在均匀光照下，两条栅线正中间的 I 值为零，并且向两侧线性地增加，在栅线处达到它的最大值。因此，

$$I = Jby \quad (8.21)$$

其中， J 为器件中的电流密度。总功率损耗等于小段功率损耗的积分：

$$P_{\text{loss}} = \int I^2 dR = \int_0^{S/2} \frac{J^2 b^2 y^2 \rho_s dy}{b} = \frac{J^2 b \rho_s S^3}{24} \quad (8.22)$$

在以上研究的这个区域中，在最大功率点时产生的功率是 $V_{mp} I_{mp} bS/2$ 。因此，在这点的相对功率损耗为

$$p = \frac{P_{\text{loss}}}{P_{mp}} = \frac{\rho_s S^2 J_{mp}}{12 V_{mp}} \quad (8.23)$$

对于已知的一组电池参数，容许的间隔 S 不超过 4mm。例如，对于一个典型的市售的硅电池， $\rho_s = 40\Omega/\square$ ， $J_{mp} = 30\text{mA}/\text{cm}^2$ ， $V_{mp} = 450\text{mV}$ 。为了使由于横向电阻影响而引起的功率损耗小于 4%，要求

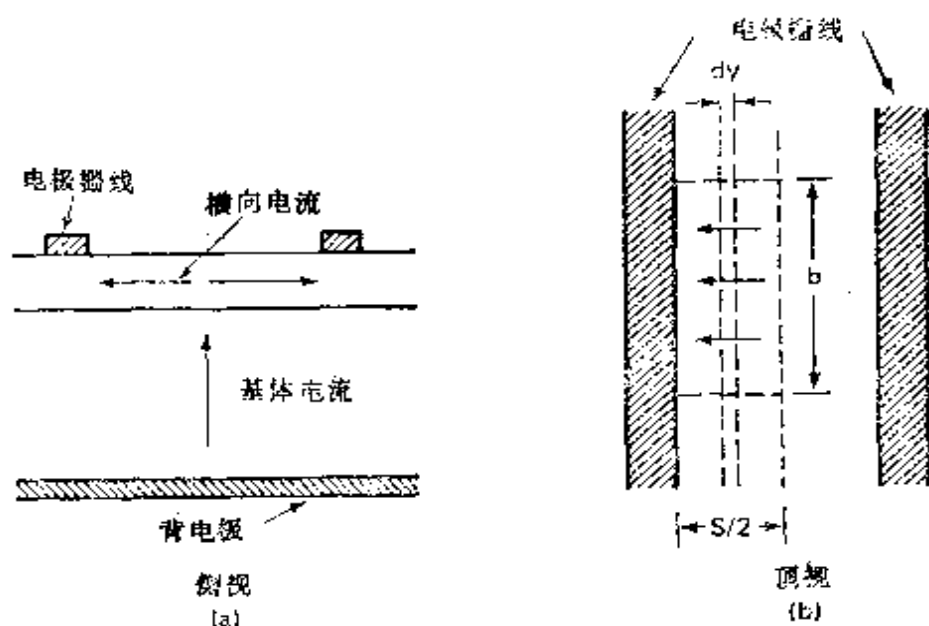


图 8.6

(a) 在 p-n 结太阳能电池的不同区域中电流流动的方向；(b) 计算由顶层横向电阻引起的功率损耗所采用的图

$$S^2 < \frac{12pV_{mp}}{\rho_s J_{mp}}$$

即

$$S < \left(\frac{12 \times 0.04 \times 0.45}{40 \times 0.03} \right)^{1/2} \text{ cm} < 4 \text{ mm} \quad (8.24)$$

这与市售硅电池的栅线间隔是一致的。薄层电阻较小的电池，栅线间隔较大；而薄层电阻较大的电池，栅线间隔较小。根据式 (8.19)，实际上决定薄层电阻的主要因素是结深。事实上，用于制造栅线图形技术的分辨率决定了电池表面下结深的下限。为了使该层的薄层电阻最小，根据实际可能掺杂浓度愈高愈好。

8.3 基体掺杂

从熔融材料制备基体时，对其进行均匀地掺杂。现在讨论掺杂浓度的标准。

结深一旦确定，要获得最大的 I_{sc} ，关键的参数是基体材料的扩散长度。扩散长度主要由这一区域的少数载流子的寿命确定 ($L_e = \sqrt{D_e \tau_e}$)。在 3.4 节阐明了三种不同的复合机理，它们决定少数载流子的寿命值。在所有这三种情况下，一般倾向是寿命随着掺杂浓度的增加而缩短，这一点在图 8.7 中可以看出，图中表示出它们的依赖关系和由三种不同复合过程决定的寿命值。关于陷阱引起的复合，寿命随掺杂而变化的理想表达式从式 (3.22) 得出。它的形式如下：

$$\tau_{sT} = \tau_{s0} \left(1 + \frac{m_1}{N_A}\right) \quad (8.25)$$

式中， m_1 近似等于参数 p_1 和 $\tau_p \cdot n_1 / \tau_n$ 中较大者。它的值由能量决定，或许还与占优势的陷阱捕获截面有关。对于俄歇复合，在高掺杂浓度时，其近似表达式是 (3.4.3 节)

$$\tau_{sA} = \frac{1}{DN_A^2} \quad (8.26)$$

而对于辐射复合 (3.4.2 节)，则是

$$\tau_{sR} = \frac{1}{2BN_A} \quad (8.27)$$

净复合率由下式得到

$$\frac{1}{\tau_s} = \frac{1}{\tau_{sT}} + \frac{1}{\tau_{sA}} + \frac{1}{\tau_{sR}} \quad (8.28)$$

根据以上讨论可以得出这样的结论，即增加 N_A 往往会减少 I_{sc} 。

关于开路电压，二极管饱和电流密度的简单表达式由方程 (4.37) 给出：

$$I_0 = qA \left(\frac{D_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{D_h n_i^2}{L_h N_D} \right) \quad (8.29)$$

I_0 越小则 V_{oc} 越大，因此为了获得最大的开路电压而使 N_A 和

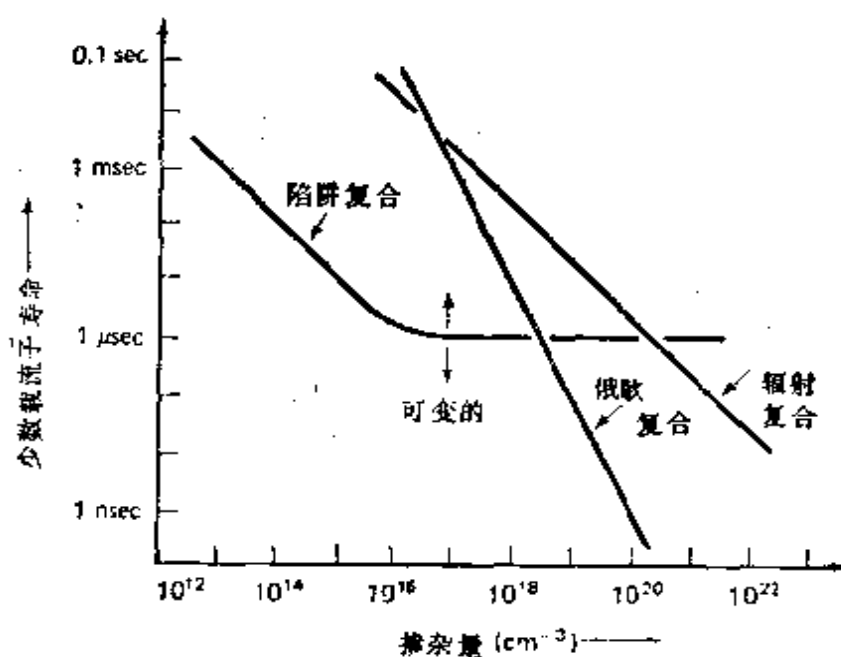


图 8.7 在基体材料为硅的情况下由三种不同复合过程决定的少数载流子的寿命与掺杂浓度的依赖关系及相应的寿命值

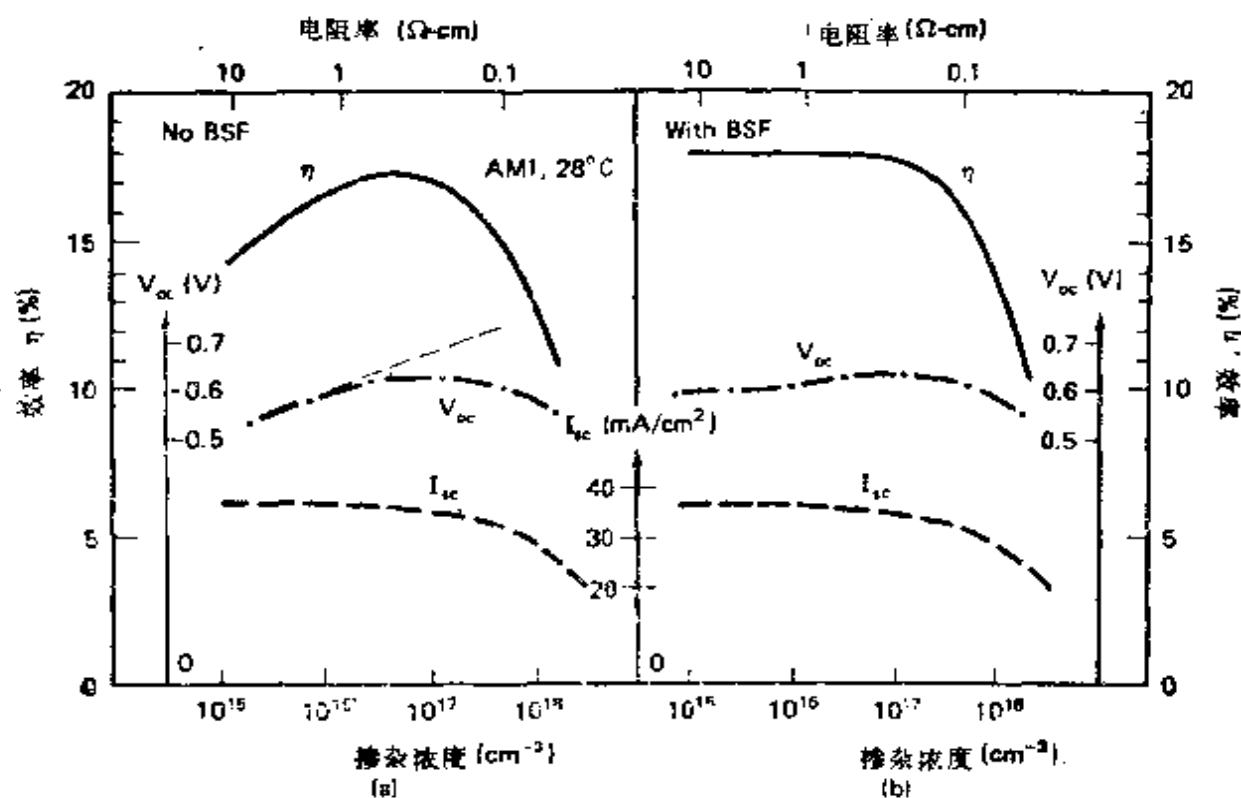


图 8.8 从高性能的试验器件得到的太阳能电池的关键参数对 P 型掺杂浓度的依赖关系
(a) 无背面场的; (b) 有背面场的

N_D 尽可能大似乎是合理的。对于 p 型基体，为了减小薄层电阻，应使 n 型扩散区中的掺杂 (N_D) 尽可能高。因此，正如在 8.6 节进一步讨论的那样，方程 (8.29) 中的第二部分相当小。这就得出这样的结论，即 V_{oc} 往往随 N_A 的增加而增加。

因为 I_{sc} 和 V_{oc} 对于 N_A 有相反的依赖关系，因此为了得到最大的能量转换效率存在一个最佳的基体掺杂浓度。这与在图 8.8(a) 中示出的实验结果是一致的。图中所示的结果表现出在不同掺杂浓度的基体上制做的高性能的试验电池的关键特性。

8.4 背 面 场

前面已经提到，靠近背面电极的高掺杂区会增加短路电流和开路电压。如图 8.5 中所指出的，短路电流的增加是由于提高了下电极附近的收集效率。由于减少了饱和电流而提高了开路电压 (4.9 节)。在有这样的背面场 (BSF) 的情况下，由 p 型基体贡献的饱和电流具有下面形式：

$$I_{0p} = -\frac{qD_p n_i^2}{L_p N_A} \tanh\left(\frac{W_p}{L_p}\right) \quad (8.30)$$

一旦 p 型层的厚度比扩散长度小得多时 ($W_p \ll L_p$)，这个式子简化为

$$I_{0p} = -\frac{qn_i^2 W_p}{\tau_p N_A} \quad (8.31)$$

从图 8.7 中可看出，随着 N_A 减小 τ_p 增加，这意味着在较高电阻率的情况下 V_{oc} 将与电阻率无关。这一点与无背面场的情况下不同。假若基体的串联电阻不成问题的话^①，则最大效率将

① 在高电阻率的情况下，电池工作时少数载流子的浓度可能与多数载流子的浓度相当。这不仅使串联电阻的计算复杂化，而且使用于建立这一节中的表达式的分析无效。在式 (8.31) 所指的那样简单的情况下，暗电流的表达式是^[8.1]

$$I = -\frac{qn_i W_p}{(\tau_p + \tau_n)} (e^{qV/2kT} - 1)$$

发生在杂质浓度较低的情况下。这一点，可以从图 8.8(b) 看出，此图表示出有背面场时与图 8.8(a) 相对应的结果。

8.5 顶层的限制

8.5.1 死层

在 8.3 节曾指出，在电池上表面，高的有效复合速度导致一个最佳的设计，在这个设计中使电池上部扩散层的厚度在能获得适当的薄层电阻的情况下尽可能的薄。在 60 年代为空间使用而研制的电池中，在表面下的典型结深大约是 $0.5\mu\text{m}$ 。为了保持低的薄层电阻，必须使尽可能多的磷掺杂剂扩散进这个厚度里。这样产生了一些不希望的作用。

根据简单的理论分析^[8.2]，在高温扩散以后，从基本是无限的磷源进入到硅里面的磷的分布，最好是高斯分布或类似高斯分布。图 8.9(a) 是在固定的扩散温度下经过不同的扩散时间后，用典型的测试方法测得的电活性的磷的分布图。它清楚地表示出电活性磷的数量上限。这个上限等于在这个扩散温度下磷在硅里面的固溶度。超过这个界限的磷将会结合进富磷的凝结物中去。但在这样过量的磷的区域里，少数载流子的寿命显著地减少。

在太阳电池中，过量磷的区域总是在接近电池表面的地方。这就可能在靠近表面处产生一个“死层”，在这里因为少数载流子的寿命非常短，所以光生载流子被收集的机会非常少。对应于这种情况的收集几率表示在图 8.9(b) 中。当人们清楚地认识到这个问题时^[8.3]，为了制造一种叫做“紫”电池的高效电池，在电池设计上做了重大的改进。为了清除死层，使用很浅的结 ($\sim 0.2\mu\text{m}$)，同时表面磷的浓度保持在固溶度之下。这样就增加了扩散层的薄层电阻（译者注：此句原文为：这样就减少了扩散层的薄层电阻）。因此必须使用密得多的上电极栅线。

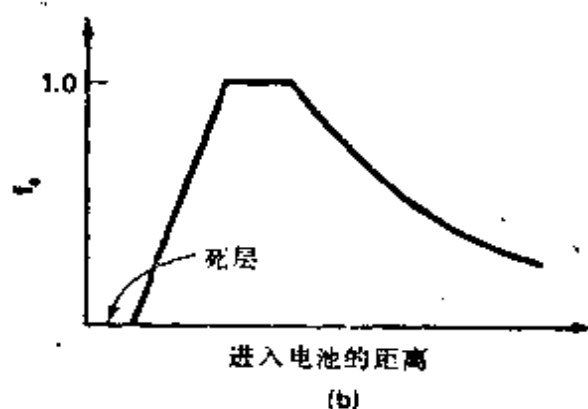
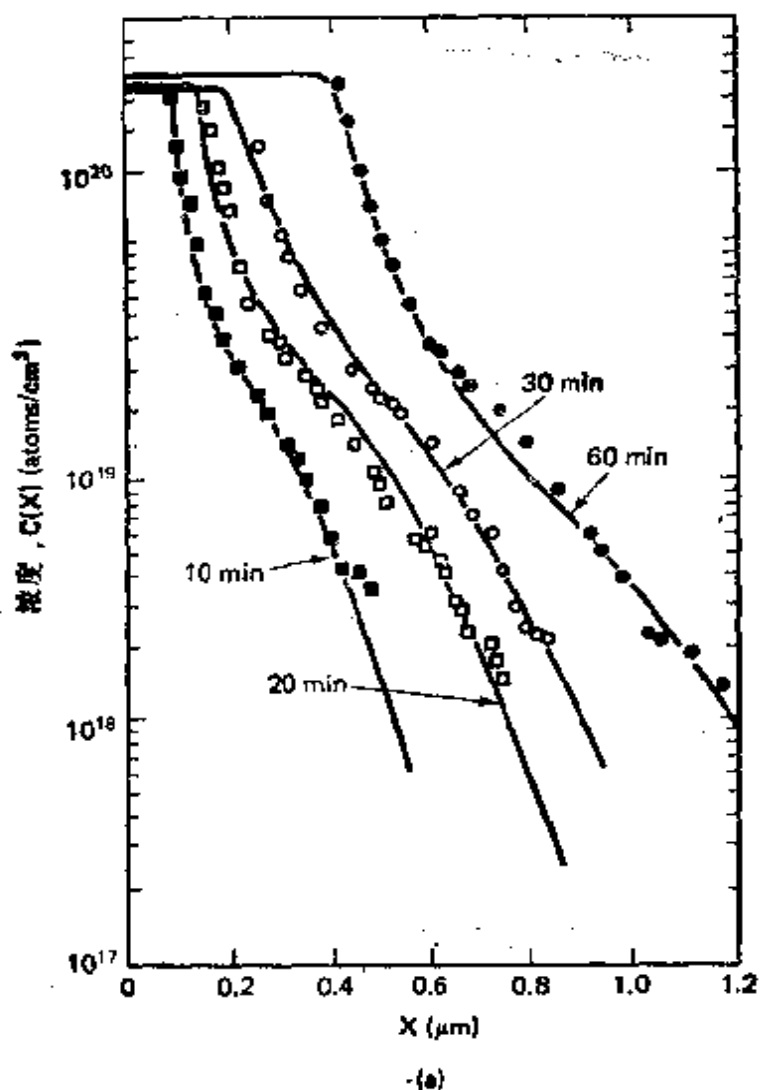


图 8.9

(a) 在固定的扩散温度下经过不同的扩散时间引进的活性磷的分布图 [根据 J. C. Tsai, *Proceedings of the IEEE* 57(1969), P. 1499, ©1969 IEEE];

(b) 有死层的用扩散法制得的电池其收集几率与进入电池的距离的关系曲线

8.5.2 高掺杂效应

由于几方面的原因，一般认为在电池的顶部重掺杂区少数载流子的寿命是低的。由图 8.7 可见，俄歇复合会导致这个区域中具有较低的最大寿命值。此外，高温扩散过程可能在晶格结构中产生凝结物和缺陷，这将增加通过陷阱能级进行复合的复合中心数量。这样就会使寿命减少到俄歇极限以下。

重掺杂区的另一个重要影响是有效地使半导体的禁带宽度变窄^[8.4]。这将主要影响本征浓度 n_i 的有效值。

8.5.3 对饱和电流密度的影响

在 8.3 节和 8.4 节讨论了基区性质对太阳能电池饱和电流 I_s 所产生的影响。重掺杂的顶层对饱和电流也有很大的影响。

人们可以就顶层最好有怎样的特性才能使这个影响减至最小发表一些一般性的意见。例如，在这个区域以及它的表面的复合必须保持最小。然而，因为在重掺杂区里不得不考虑的多重影响，从理论上计算怎样最好地实现这一点就不是简单的事。实验证明，对于用扩散法制作的硅电池，这一层对饱和电流密度的最小贡献在 $1 \sim 3 \times 10^{-12} \text{ A/cm}^2$ 范围内。离子注入的顶层似乎能得到稍低的值^[8.5]。

不管怎样选择基体的特性以便使它对饱和电流密度的影响最小，顶层的影响都会对我们讲过的这类硅电池所能得到的最大开路电压限定一个上限。这个极限在标准测试条件下是 600mV 到 630mV。这个限制的效果可从图 8.8(a) 和 (b) 看出。它使基体材料的光伏潜力不能得到充分利用。在第九章中叙述了另外的电池设计，这些设计克服了这种限制。

8.6 上电极的设计

电池设计的一个重要方面是上电极金属栅线的设计。当单体

电池的尺寸增加时，这方面就变得愈加重要了。图 8.10 示出几种在地面应用电池中已经使用的上电极的设计方法。

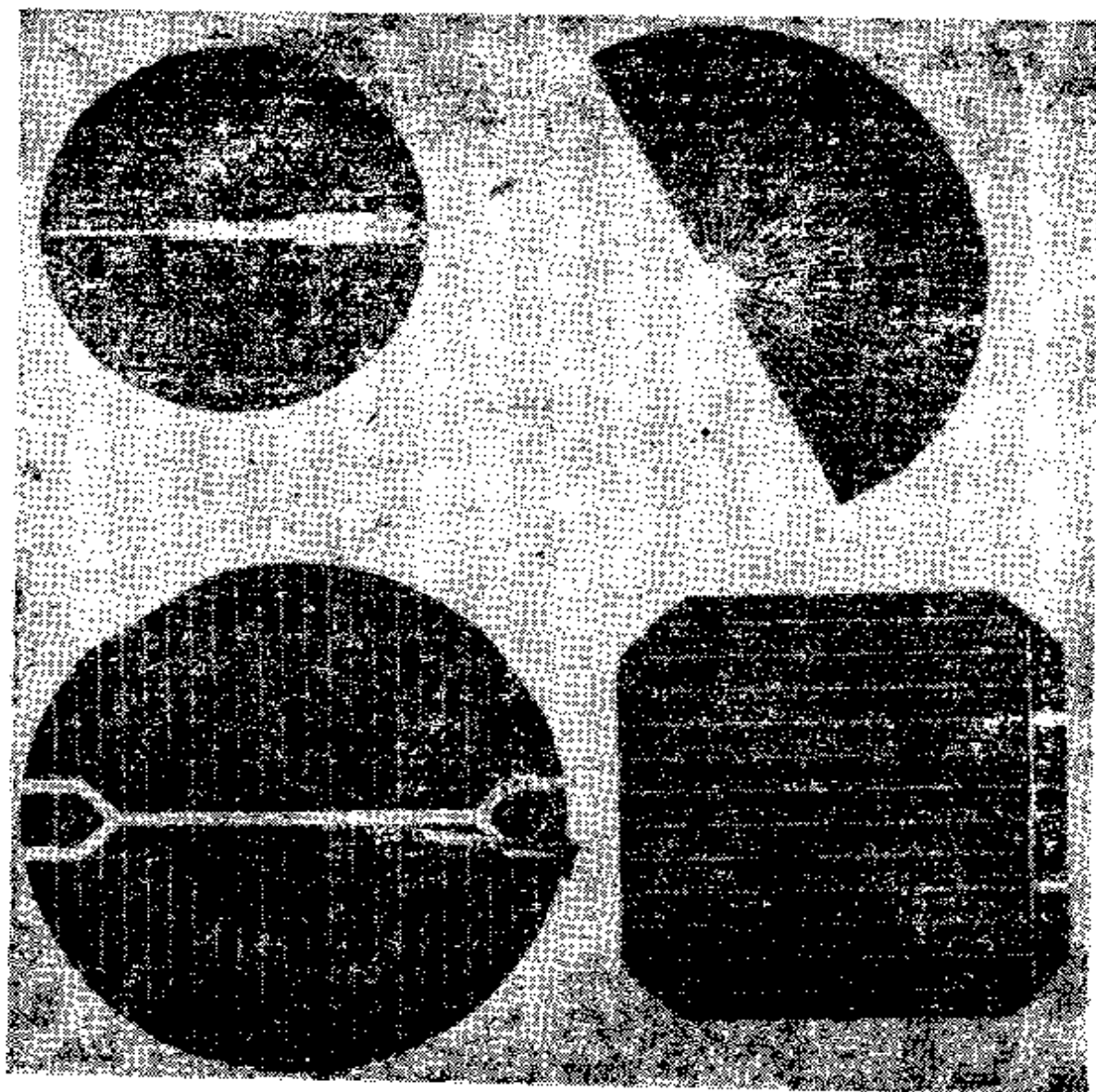


图 8.10 一批硅太阳能电池产品

图中示出几种不同的电池上电极设计方法

有几种与上电极有关的功率损失机理。由电池顶部扩散层的横向电流所引起的损耗前面已经讨论过。此外，还有各金属线的串联电阻以及这些金属线与半导体之间的接触电阻引起的损耗。最后，还有由于电池被这些金属栅线遮蔽所引起的损失。

本节将考虑正方形或长方形电池的电极设计。并联的方法可

以用于普通形状的电池。对于普通的电极设计，如图 8.11(a) 所示，金属电极由两部分构成：主线是直接接到电池外部引线的较粗部分；栅线则是为了把电流收集起来传递到主线去的较细部分。如图 8.10 所示，在某些电池设计中可能有不止一级的栅线。栅线和主线既有等宽度的，也有线性地逐渐变细的和宽度呈阶梯形变化的。

象图 8.11(a) 那样的对称布置的上电极可以分解成如图 8.11(b) 所示那样的一个个的单电池。这种单电池的最大功率输出可由 $ABJ_{mp}V_{mp}$ 得到，式中 AB 为单电池的面积。 J_{mp} 和 V_{mp} 分别为最大功率点的电流密度和电压。栅线和主线的电阻的功率损耗可以用 8.2.3 节中计算电池顶层功率损耗的积分方法计算。用单电池的最大功率输出归一化，得到栅线和主线的电阻功率损耗分别为

$$\rho_{rf} = \frac{1}{m} B^2 \rho_{mf} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \frac{S}{W_f} \quad (8.32)$$

$$\rho_{rb} = \frac{1}{m} A^2 B \rho_{mb} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \frac{1}{W_b} \quad (8.33)$$

ρ_{mf} 和 ρ_{mb} 是电极的栅线和主线的金属层的薄层电阻。在某些情况下，这两种电阻是相等的；而在另一些情况下，如浸过锡的电池，在较宽的主线上又盖了一层较厚的锡， ρ_{mb} 就比较小。如果电极各部分是线性地逐渐变细的，则 m 值为 4，如果宽度是均匀的，则 m 值为 3。 W_f 和 W_b 是单电池上栅线和主线的平均宽度， S 是栅线的线距，如图 8.11(b) 所示。

由于栅线和主线的遮挡而引起的功率损失是：

$$\rho_{rf} = \frac{W_f}{S} \quad (8.34)$$

$$\rho_{rb} = \frac{W_b}{B} \quad (8.35)$$

忽略直接由半导体到主线的电流，接触电阻损耗仅仅是由于

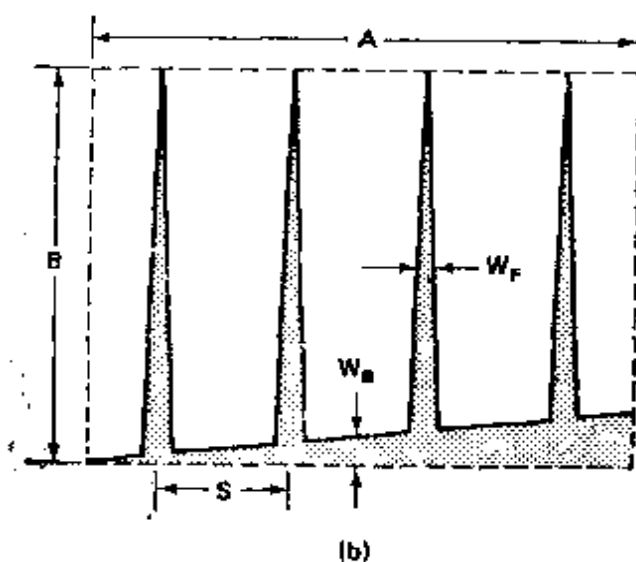
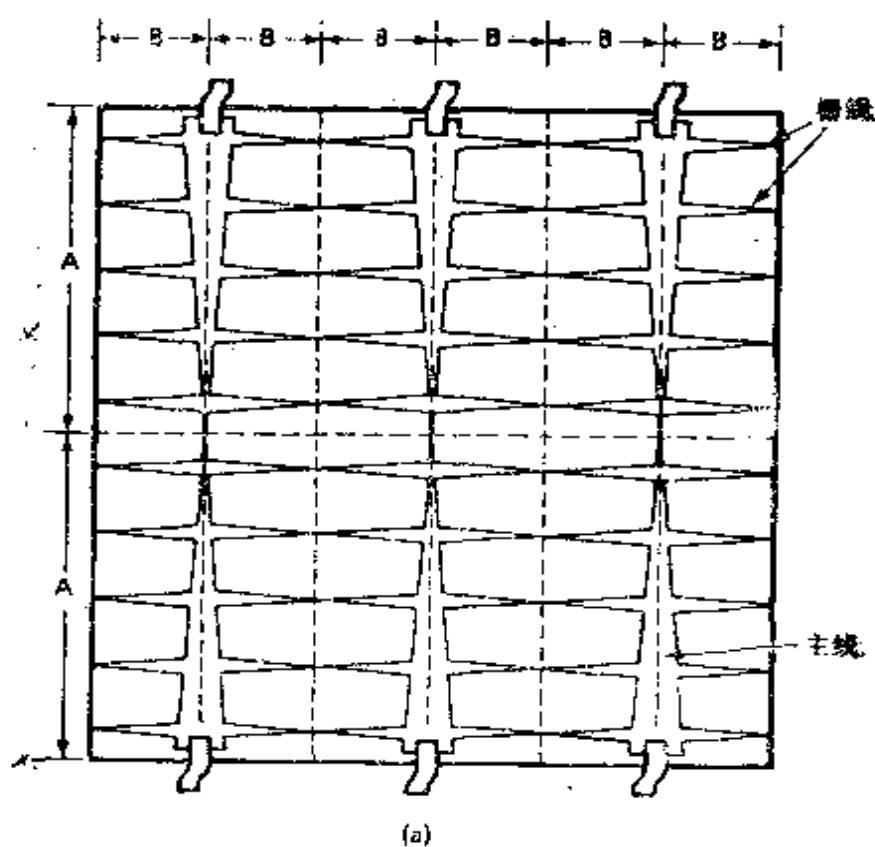


图 8.11

(a)显示出主线和栅线的上电极设计的示意图。图中也表示出这个设计的对称性，根据这种对称性电极可以分解成 12 个相同的单电池；(b)典型的单电池的重要尺寸

栅线所引起。这部分功率损耗一般近似为

$$\rho_{ef} = \rho_s \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \cdot \frac{S}{W_f} \quad (8.36)$$

其中 ρ_s 是接触电阻率。对于硅电池来说, 在一个太阳下工作时, 接触电阻损耗一般不是主要问题。余下的是由于在电池的顶层横向电流引起的损耗。其归一化形式由方程 (8.23) 给出:

$$p_{11} = \frac{\rho_s}{12} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} S^2 \quad (8.37)$$

其中 ρ_s 是这一层的薄层电阻。

主线的最佳尺寸可以通过将式 (8.33) 和 (8.35) 相加, 然后对 W_B 求导而求出^(8.6)。结果是当主线的电阻损耗等于其遮盖损失时, 其尺寸为最佳值。此时,

$$W_B = AB \sqrt{\frac{\rho_{amb}}{m} \frac{J_{mp}}{V_{mp}}} \quad (8.38)$$

同时, 这部分功率损失的最小值由下式得出:

$$(p_{rs} + p_{st})_{min} = 2A \sqrt{\frac{\rho_{amb}}{m} \frac{J_{mp}}{V_{mp}}} \quad (8.39)$$

这表明当使用逐渐变细的主线 ($m=4$) 而不是等宽度的主线时 ($m=3$), 功率损失大约低 13%。

最低一级^①金属栅线的设计是更为复杂的, 因为这个设计也确定了电池顶层横向电流的损耗和电池中接触电阻的损耗。从数字上讲, 当栅线的间距变得非常小以致横向电流损耗可忽略不计, 出现最佳值。于是, 最佳值由下面条件给出, 即

$$S \rightarrow 0 \quad (8.40)$$

$$\frac{W_f}{S} = B \sqrt{\frac{\rho_{mf} + \rho_s m / B^2}{m} \frac{J_{mp}}{V_{mp}}} \quad (8.41)$$

$$(\rho_{rf} + \rho_{sf} + \rho_{sf} + p_{11})_{min} = 2B \sqrt{\frac{\rho_{mf} + \rho_s m / B^2}{m} \frac{J_{mp}}{V_{mp}}} \quad (8.42)$$

^① 如果有一级以上的金属栅线, 则较高级的最佳尺寸可以通过把它们看作是相邻的较低一级的主线来求出。注意, 在这种情况下, 对每一级的金属线都有各自不同的单电池。

实际上，不可能得到这个最佳性能。以前讨论的形成上电极的每项工艺都将提出自己的在生产环境中仍能保持可接受的成品率的条件下， W_F 以及 S 能小到多小的限制。

在这种情况下，可通过简单的迭代法实现最佳栅线的设计。若把栅线宽 W_F 取作某一由工艺水平限制的最小值，则对应于这个最小值的 S 的最佳值能够用渐近法求出。对某个试验值 S' ，可计算出相应的各部分功率损失 $P_{r,f}$ 、 $P_{o,f}$ 、 $P_{s,f}$ 和 P_{it} 。然后可按式求出更接近最佳值的值 $S''^{\ominus}$ ：

$$S'' = \frac{S'(3P_{s,f} - P_{r,f} - P_{o,f})}{2(P_{s,f} + P_{it})} \quad (8.43)$$

这个过程将很快收敛到相应于最佳值的一个不变的值上。从式 8.41 计算的 S 值是一个过高的估计值，由此可求出最佳值的初试值。用式 8.41 所算出的 S 值的一半作初试值就会得出一个稳定的迭代结果。

一个特定的电极设计的总特征一旦确定，用上述方法就可以选择出主线和栅线的最佳尺寸。这些总特征的决定除了考虑最佳化的上电极设计外，还要考虑到象电池间的互相联接要容易实现自动化这样一些要求。根据经验，单电池愈小，上电极损失越小。联接点多，不仅改善了组件的可靠性，而且由于减少了单电池的尺寸而减少了上电极损失。如果主线的薄层电阻小于栅线的薄层电阻，只要接触电阻影响不大，最好采用如本书序言之前的图所示的长主线和短栅线的设计方案。在这种情况下，主线的输送电流部分是金属连接条，它伸展到电池的整个长度。甚至在矩形电池的情况下，除了上面讨论过的由一条条直线组成的电极以外，其他的电极方案也值得考虑。例如，图 8.12 所示的辐射状电极方案也能对矩形电池产生非常低的总损失。

顺便应该提到，这一节所叙述的关系式是建立在某些近似的

[⊖] 这个式子能通过功率损失表达式 $(P_{r,f} + P_{o,f} + P_{s,f} + P_{it})$ 对 S 求导得出。对于最佳的 S 值其导数必须等于零。于是最佳 S 值可利用牛顿迭代法^[6.7]求非线性方程的根得出。

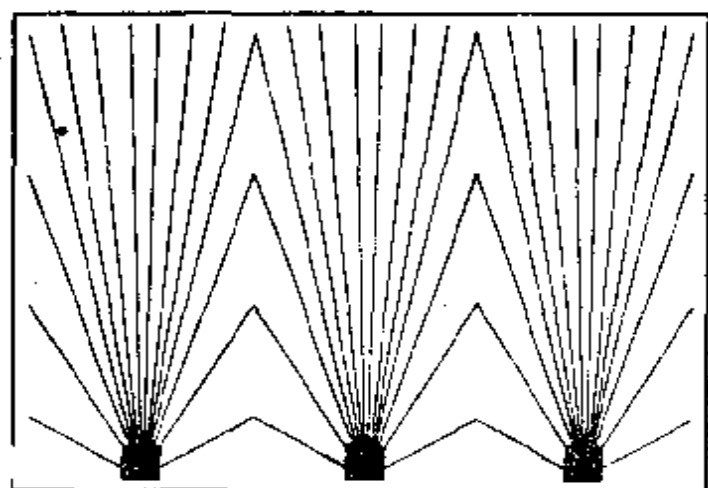


图 8.12 一个矩形电池的辐射状金属电极方案

基础上^[8.8]的。这些近似涉及：归一化的功率损失的大小；电阻的压降量；电流的方向（特别是在栅线和主线相交处附近）。还应该注意，对不同形状的电池，长度上线性地变细的主线或栅线也许不是最佳形状^[8.9]。这些次要的影响有时也可能成为很值得检查的地方。例如，在聚光电池中，电极设计就是关键。

例 题

设计一个 $10 \times 10\text{cm}$ 的硅太阳能电池的上电极。这个电池的最大功率点电压是 450mV ，电流密度大约为 $30\text{mA}/\text{cm}^2$ 。其扩散层的薄层电阻是 $40\Omega/\square$ 。

规定每个电池两个互连点。金属电极的制备方法是先镀后浸锡。栅线宽选定为 $150\mu\text{m}$ 。金属化层的薄层电阻主要由锡层决定，锡的体电阻率是 $15\mu\Omega\text{-cm}$ 。锡在栅线上的平均厚度是 $42\mu\text{m}$ ，在较宽的主线上是 $80\mu\text{m}$ 。栅线和半导体之间的接触电阻率是 $370\mu\Omega\text{-cm}^2$ 。

解：

用本节所用的符号表示。已知条件为：

$$J_{mp} = 0.03\text{mA}/\text{cm}^2$$

$$V_{mp} = 0.45\text{V}$$

$$\rho_s = 40\Omega/\square$$

$$\rho_c = 370\mu\Omega\text{-cm}^2$$

$$\text{锡层的薄层电阻} \approx \frac{\text{体电阻率}}{\text{层 厚}}$$

$$\text{因此, } \rho_{smf} = 0.00357\Omega/\square$$

$$\rho_{amb} = 0.00188\Omega/\square$$

因为 $\rho_{amb} < \rho_{smf}$ ，最好选择长主线、短栅线的电极设计方案。适合于

每个电池两个互连点的一种电极设计方案示于图 8.13 中。这种结构可分解成四个单电池，每个的 $A = 10\text{cm}$ $B = 2.5\text{cm}$ 。

其主线的最佳尺寸可以由式 (8.38) 计算出，采用逐渐变细的主线 ($m = 4$)，每个单电池的主线的最佳宽度是

$$W_B = 10 \times 2.5 \left(\frac{0.00188 \times 0.03}{4 \times 0.45} \right) \text{ cm} = 0.14 \text{ cm}$$

因为实际的主线是位于两个单电池里，所以主线的平均宽度是这个值的两倍。因此，主线从 0.56cm 的最大宽度逐渐收缩到可能作到的最细值。由式 (8.39) 可得出相应的功率损失为

$$P_{r,b} + P_{s,b} = 0.12$$

栅线宽度选定为 $150\mu\text{m}$ ($W_F = 0.015\text{cm}$)，假定这是由于工艺水平所限，使栅线不能作得更细。因为这个限制，所以等宽度的栅线 ($m = 3$) 不会低于最佳值很多。最佳的栅线间距 S 必须用迭代法求出。初试值用式 (8.41) 给出的值除以 2 得出。这样得到

$$S = 0.3286\text{cm}$$

$$P_{r,f} = 0.0109$$

$$P_{s,f} = 0.0005$$

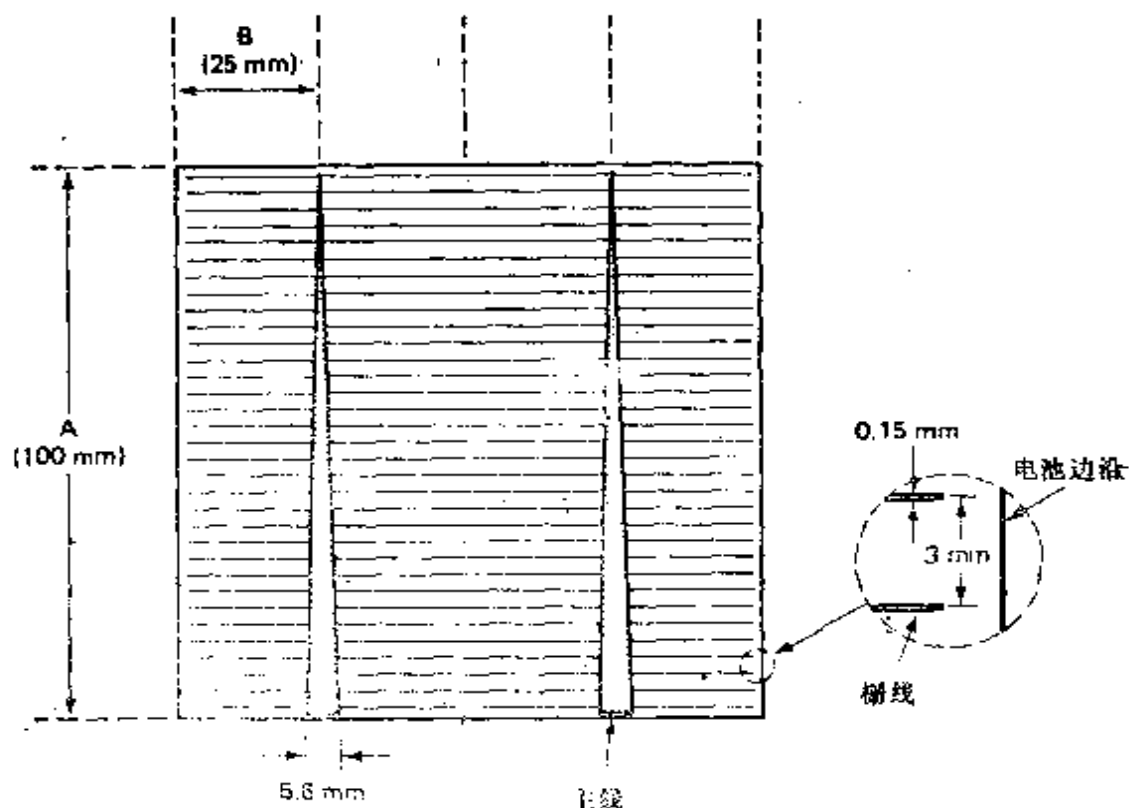


图 8.13 为设计举例所选择的电极设计方案

遮光损失 10.6%，电池的扩散层和电极的电阻损失总共是 8.6%

$$P_{ef} = 0.0456 \quad P_{ti} = 0.0240$$

将这些值代入式 (8.43) 得出修正后的试验解:

$$S = 0.2962 \text{ cm} \quad P_{rf} = 0.0098 \quad P_{ef} = 0.0005$$

$$P_{ef} = 0.0506 \quad P_{ti} = 0.0195$$

继续这一迭代过程, 得出

$$S = 0.2991 \text{ cm} \quad P_{rf} = 0.0089 \quad P_{ef} = 0.0005$$

$$P_{ef} = 0.0502 \quad P_{ti} = 0.0190$$

进一步的迭代没有改变 S 值, 这表明已得到一个最佳值。由于栅线和顶层电阻引起的分功率损失总数为 0.080, 于是在这个电池里因为这样的电极设计引起的总功率损失是电池固有输出的 19.2%。完整的电极设计方案在图 8.13 中详细说明。

8.7 光学设计

8.7.1 减反射膜

在图 8.14 中示出了四分之一波长减反射膜的原理。从第二个界面返回到第一个界面的反射光与从第一个界面的反射光相位差 180° , 所以前者在一定程度上抵消了后者。

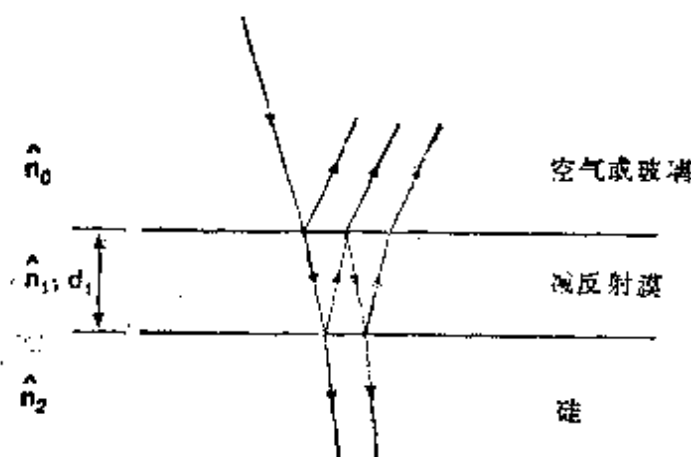


图 8.14 由四分之一波长减反射膜产生的干涉效应

在正常入射光束中从覆盖了一层厚度为 d_1 的透明层的材料表面反射的能量所占比例的表达式是^(8.10)。

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\theta}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\theta} \quad (8.44)$$

其中 r_1 和 r_2 由下式得出:

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (8.45)$$

式中 n_i 代表不同层的折射率。 θ 由下式给出:

$$\theta = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \quad (8.46)$$

当 $n_1 d_1 = \lambda_0/4$ 时, 反射有最小值:

$$R_{\min} = \left(\frac{n_1^2 - n_0 n_2}{n_1^2 + n_0 n_2} \right)^2 \quad (8.47)$$

如果减反射膜的折射率是其两边的材料的折射率的几何平均值 ($n_1^2 = n_0 n_2$), 则反射值为零。对于在空气中的硅电池 ($n_{\text{Si}} = 3.8$), 减反射膜的最佳折射率是硅的折射率的平方根 (即 $n_{\text{opt}} = 1.9$)。图 8.15 中有一条曲线表示出在硅表面覆盖有最佳折射率 (1.9) 的减反射膜的情况下, 从硅表面反射的入射光的百分比与波长的关系。减反射膜的设计使得在波长为 600nm 处产生最小的反射。从覆盖有减反射膜的硅表面反射的可利用的太阳光的加权平均值能保持在 10%, 与此相反, 从裸露的硅表面则超过 30%。

电池通常封装在玻璃之下或嵌在与玻璃的折射率 ($n_0 \sim 1.5$) 相类似的材料之中。这使减反射膜的折射率的最佳值增加到大约 2.3。覆盖有折射率为 2.3 的减反射膜的电池在封装前和封装后对光的反射情况也表示在图 8.15 中。在市售的太阳电池中使用的一些减反射膜材料的折射率列在表 8.1 中。除了有合适的折射率外, 减反射膜材料还必须是透明的。减反射膜常沉积为非结晶的或无定形的薄层, 以防止在晶界处的光散射问题。用真空蒸发方法形成的减反射层一般在紫外波长区要产生吸收。然而利用象使沉积的金属薄层氧化或阳极化这样的工艺所形成的减反射层或

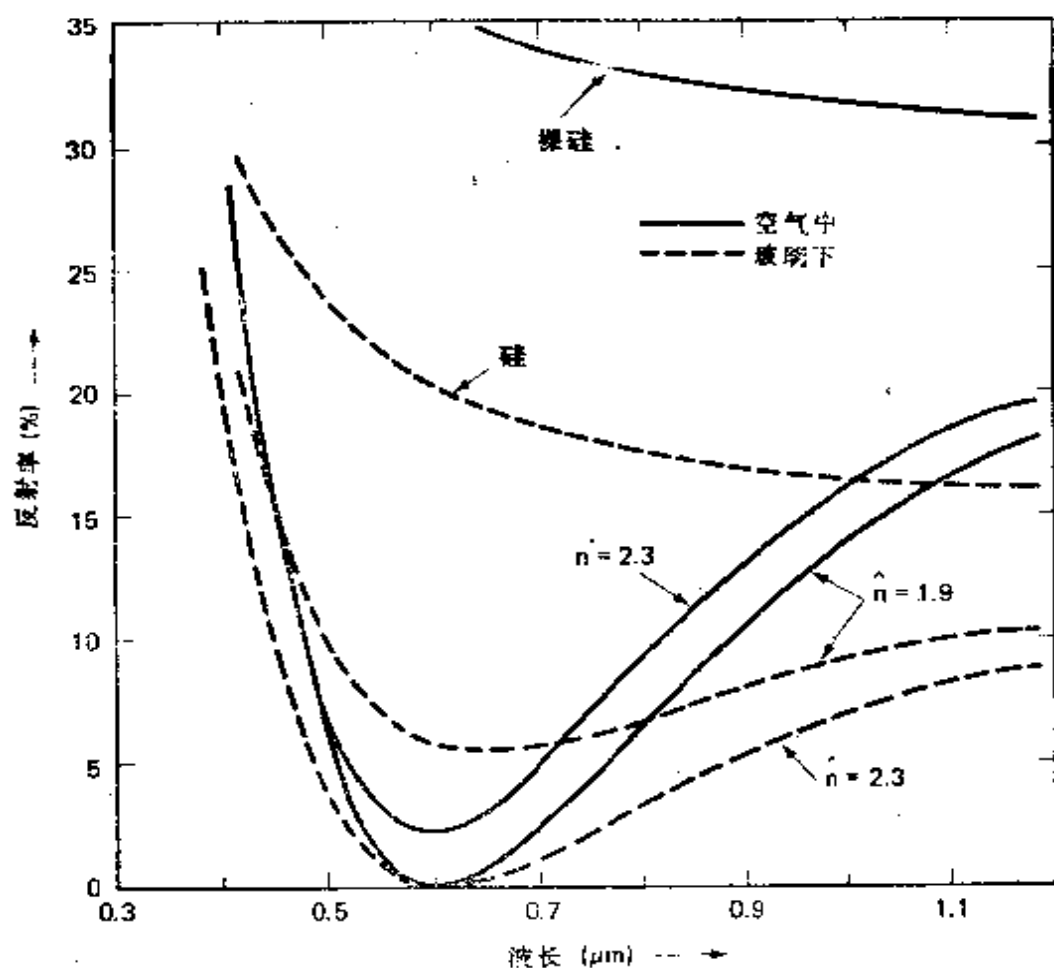


图 8.15 从裸露的硅表面和从覆盖有折射率为 1.9 和 2.3 的减反射膜的硅表面反射的正常入射光的百分比与波长的关系

减反射膜的厚度的选取使得波长在 600nm 处产生最小的反射。虚线表示将硅封装在玻璃或有类似折射率的材料之下的结果

表 8.1 制作单层或多层减反射膜所用材料的折射系数

材 料	折射系数
MgF_2	1.3~1.4
SiO_2	1.4~1.5
Al_2O_3	1.8~1.9
SiO	1.8~1.9
Si_3N_4	~1.9
TiO_2	~2.3
Ta_2O_5	2.1~2.3
ZnS	2.3~2.4

用化学沉积工艺所形成的减反射层往往有玻璃结构（小范围有序的非晶型结构），会减少紫外吸收^[8,11]。

利用不同减反射材料形成的多层膜能够改善性能。这种多层膜的设计更为复杂，但能够在较宽的波段上减少反射^[8,11]。至少，有一家制造厂在高效电池上利用了两层减反射膜，结果使有用的太阳光的反射减少到4%。

8.7.2 绒面

以前提到过的另一个减少反射的方法是采用绒面。这种绒面是采用一种有选择性的腐蚀方法腐蚀硅表面而成。这种腐蚀方法使硅晶格结构的一个方向的腐蚀比另一个方向的快得多。这就使晶格中的某些平面暴露出来。在图7.6中那些外貌似金字塔的一个个小锥体是由于这些晶面相交形成的。根据密勒指数(2.2节)，绒面电池的硅表面通常平行于(100)面，金字塔由(111)面相交而成。通常用稀释的氢氧化钠(NaOH)溶液作选择性腐蚀剂。

金字塔的角度由晶面的取向确定。这些尖塔使入射光至少有两次机会进入电池。如果象正常照射到裸露硅表面的情况一样，在每个入射点有33%被反射，则总的反射是 0.33×0.33 ，约为11%。如果使用减反射膜，则太阳光的反射完全能保持在3%以下。即使没有减反射膜，当嵌镶在折射率类似于玻璃的材料里时，反射也只有约4%。另一个合乎希望的特点是光射入硅中的角度确保光线在更靠近电池表面的地方被吸收。这将增加电池的收集几率，特别是对于吸收较弱的长波部分。

绒面也存在一些缺点。一是在操作中需要更加小心^[8,12]；二是这样的表面会更有效地吸收所有波长的光，包括不希望有的那些光子能量不足以产生电子-空穴对的红外辐射。这样往往使电池温度升高。还有，金属上电极必须沿尖塔的侧面上上下下的延伸过去，如果金属层的高度小于或相当于尖塔的高度($\sim 10\mu\text{m}$)；为了维持与在平坦表面上相同的电阻损耗必须使用二到三倍的金屬。

8.8 光谱响应

在 5.5 节提到过电池的光谱响应,它是指每单位入射单色光功率的短路输出电流与波长的函数关系。测量光谱响应能提供各种太阳电池的设计参数的详细资料。

单色光在半导体内产生的电子-空穴对的空间分布由下式得出:

$$G = (1 - R) \alpha N e^{-\alpha x} \quad (8.48)$$

其中, N 是入射光子通量, R 是反射部分, α 是吸收系数。对于短波长(紫外光), α 较大,如图 8.16(a) 所示,光刚一进入半导体就被迅速地吸收。通常,太阳电池不能很有效地收集产生在表面附近的载流子。如果量子收集效率 η_q 定义为每个入射单色光的光子在外短路负载上所产生的流动电子数,那么,如图 8.16(b) 所示,对于紫外光, η_q 十分低,在中波长, α 值较小,于是大部分光生载流子是在收集几率高的区域里产生的,因此 η_q 增加。电池对长波光的吸收是非常微弱的,因而在电池的活性区就只有小部分光被吸收,因此 η_q 减小,并且一旦光子的能量不足以产生电子-空穴对时 η_q 就降为零。

除了图 8.16(b) 的量子效率曲线外,表示光谱响应的另一种方法是画出如图 8.16(c) 所示的灵敏度(以 A/W 为单位)与波长的关系曲线。图 8.16(c) 也算出了量子极限。在短波长,即使是理想地工作,电池也不能利用所有的光子能量。因此灵敏度是低的。

对于“常规”电池(指为空间使用而研制的电池),由于使用的结深较深,加之减反射膜的吸收,因此短波响应较差。在长波段,光谱响应由电池材料的扩散长度决定。紫电池是在二十世纪七十年代初研制的一种浅结电池。这种电池的设计重点是,通过采用浅结和经过改进的、吸收较少的减反射膜而获得良好的紫

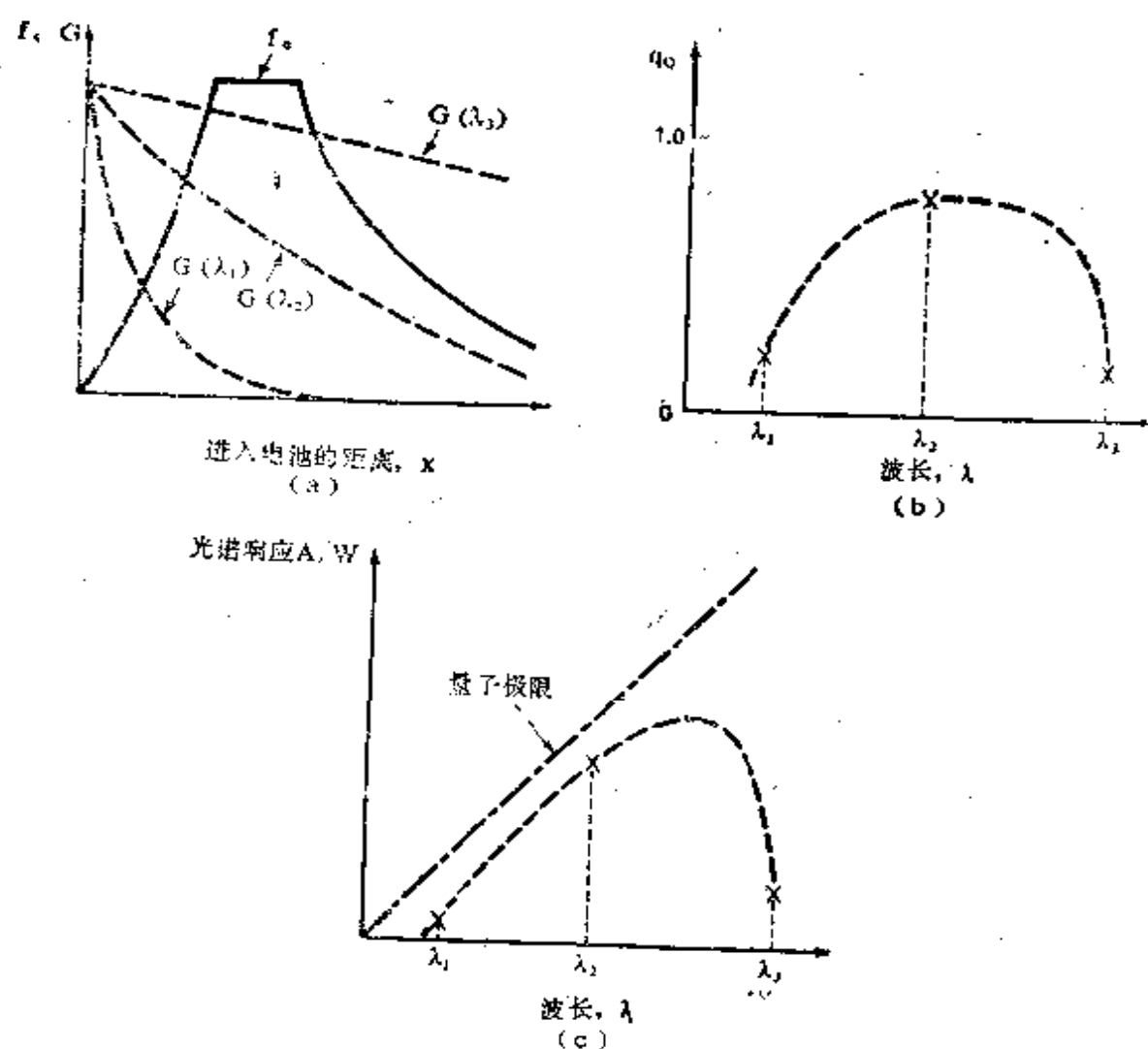


图 8.16

(a) 有代表性的太阳电池的收集几率；三条虚线分别表示在三个不同波长的光的照射下载流子产生率分布图；(b) 相应的量子收集效率 η_q 与波长的关系；(c) 相应的光谱灵敏度 (A/W) 与波长的关系

外波段的收集效率。绒面电池由于减少了反射而改善了对所有波长的光的灵敏度。

背面场 (BSF) 增加了对下电极附近产生的载流子的收集几率，因而提高了长波段的灵敏度。为了给予较长波段以第二次吸收的机会，可以将下电极设计成反射性的。这样的背面场反射器 (BSR) 不仅使薄电池的性能有相当的提高，而且有助于维持低的工作温度。

8.9 小 结

通过对下述问题的考虑,进行了硅结太阳能电池的设计。为了使电池有最大的电流输出, p-n 结必须靠近电池表面。这样一来,这一层的横向电阻提高,因而可能带来一些问题,除非它能掺杂到实用的那么高。然而,此层过多的掺杂又使它的电性能低于最佳值。

对于太阳能电池来说,最佳的基体电阻率取决于是否有背面场。如果没有背场,掺杂浓度在 10^{16} 到 10^{17}cm^{-3} 范围时电阻率最佳;如果有背场,则电池最佳性能对电阻率的依赖较少,因而最佳性能发生在掺杂浓度较低的情况下。

电池上电极的设计中决定功率损失的关键参数是电极的布局、电极的金属层和电池扩散顶层的薄层电阻、确定电极几何形状的工艺所允许的最小线宽。四分之一波长的减反射膜能使太阳能电池的输出电流增加 35% 到 45%。电池表面绒化虽然存在某些缺点,但它能使电池的性能更好。

练 习 题

8.1 有一个在 P 型基体上有非常薄而均匀掺杂的 n 型层的硅太阳能电池。沿 n 型层的表面复合速度是非常大的。假设在 n 型层的少数扩散长度与 n 型层的厚度相比是很大的,试推导少数载流子的收集几率与离开 n 型层表面距离的关系式。(注意:因为扩散长度比 n 型区厚度大很多,所以这个区域的体复合很小,与表面复合速率比可以忽略不计。)

8.2 在练习 8.1 中已知 n 型层掺杂浓度是 $10^{18}/\text{cm}^3$, 厚度是 $0.5\mu\text{m}$ 。计算 n 型层的薄层电阻。

8.3 在 $150\mu\text{m}$ 厚的 P 型硅片上制造常规结构的硅太阳能电池。背面为高复合电极的电池的短路电流为 2.1A , 开路电压为 560mV 。带有背面场的相同电池的短路电流为 2.2A 。已知在加工后, 两种情况下的少数扩散长度都是 $500\mu\text{m}$ 。问有背面场的电池的理想开路电压值应是多少?

8.4 设计一个尺寸为 $7.5 \times 10\text{cm}$ 的矩形硅太阳能电池的上电极并计算所

设计电池的总功率损失。该电池的扩散层薄层电阻是 $60\Omega/\square$ 。在晴朗天气的阳光照射下，这个电池在 430mV 电压和 $28\text{mA}/\text{cm}^2$ 的电流密度下产生最大功率。规定每个电池有三个互连点，并全部位于电池同一边。

金属化层是采用真空蒸发工艺通过金属掩模蒸发而成。最小线宽定为 $180\mu\text{m}$ 。金属化层是由靠近硅表面的 $0.12\mu\text{m}$ 钛层和最外层的 $4\mu\text{m}$ 的银及夹在中间将银和钛分开的一薄层钯 ($0.02\mu\text{m}$) 组成。这种电极与硅的接触电阻率是 $200\mu\Omega\text{-cm}^2$ 。这些金属的体电阻率分别是 48、11 和 $1.6\mu\Omega\text{-cm}$ 。

8.5 有一个电池，已知上电极的几何形状，并且金属化层及电池的参
数已固定。说明当电池尺寸增加时与上电极有关的功率损失也增加。

参 考 文 献

- [8.1] J. G. Fossum et al., "Physics Underlying the Performance of Back-Surface-Field Solar Cells," *IEEE Transactions on Electron Devices ED-27* (1980), 785~791.
- [8.2] A. S. Grove, *Physics and Technology of Semiconductor Devices* (New York, Wiley, 1967), pp. 44~69,
- [8.3] J. Lindmayer and J. F. Allison. *Conference Record, 9th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Silver Spring, Md., 1972*, p. 83; also *Comsat Technical Review* 3 (1972), 1.
- [8.4] J. G. Fossum, F. A. Lindholm, and M. A. Shibib. "The Importance of Surface Recombination and Energy-Bandgap Narrowing in p - n Junction Silicon Solar Cells", *IEEE Transactions on Electron Devices ED-26* (1979), 1294~1298.
- [8.5] J. A. Minnucci et al., "Silicon Solar Cells with High Open-Circuit Voltage," *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, 1980*, pp. 93~96, also *IEEE Transactions on Electron Devices, ED-27* (1980), 802-806.

- [8.6] H. B. Serreze. "Optimizing Solar Cell Performance by Simultaneous Consideration of Grid Pattern Design and Interconnect Configurations", *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978*, pp. 609~614.
- [8.7] C. E. Froberg. *Introduction to Numerical Analysis* (Reading, Massa, Addison-Wesley, 1965), p. 19.
- [8.8] A. Flat and A. G. Milnes, "Optimization of Multi-layer Front-Contact Grid Patterns for Solar Cells," *Solar Energy* 23 (1979), 289~299.
- [8.9] G. A. Landis, "Optimization of Tapered Busses for Solar Cell Contacts," *Solar Energy* 22 (1979), 401~402; R. S. Scharlack, "The Optimal Design of Solar Cell Grid Lines," *Solar Energy* 23 (1979), 199~201.
- [8.10] E. S. Heavens. *Optical Properties of Thin Solid Films* (London, Butterworths, 1955).
- [8.11] E. Y. Wang et al., "Optimum Design of Antireflection Coatings for Silicon Solar Cells," *Conference Record, 10th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Palo Alto, 1973*, p. 168.
- [8.12] M. C. Coleman et al., "Processing Ramifications of Textured Surfaces," *Conference Record, 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Baton Rouge, 1976*, pp. 313~316.

第九章 其他器件结构

9.1 引言

半导体器件中，光伏作用的基础是器件结构的电子学不对称性。当然，产生这种不对称性的方法除了前面几章中所叙述的利用硅的 $p-n$ 结以外还有很多。本章将概述另外几种器件的基本原理。

9.2 同质结

常规的硅太阳能电池都是同质结。结两边的半导体材料相同，仅掺杂剂类型不同。第八章中介绍了具有浅同质结的常规电池结构，这个结平行于光照面。本节介绍三种具体器件以说明几种不同的同质结概念，而不一一罗列全部可能的同质结。

第一种是如图 9.1 (a) 所示的高-低发射极 (HLE) 结构，它克服了常规方法的一些限制。这种器件的不同点在于， $p-n$ 结要深得多，同时结上部的掺杂浓度较适中。在器件的顶部采用了“前表面场”，这就克服了常规电池结构中顶部扩散层对开路电压的限制。据报导，采用这个方法已显著提高了开路电压^[9.1]。器件各处所产生的载流子的收集几率示于图 9.1(b)。载流子收集不是最佳，因此，电流输出比其他结构有所减小。

第二种器件结构是图 9.2 所示的前表面场电池。采用这种结构^[9.2]两个电极可同时从背面引出。这就消除了常规顶部电极那样的阴影损失，并使电池便于互相连接。然而，所需工艺更为复杂。这种电池的厚度必须比少子扩散长度薄，以得到最大限度的电流输出。这对大面积电池来说，操作是有困难的。

第三种结构是使结垂直于电池的光照表面，即垂直结电池。

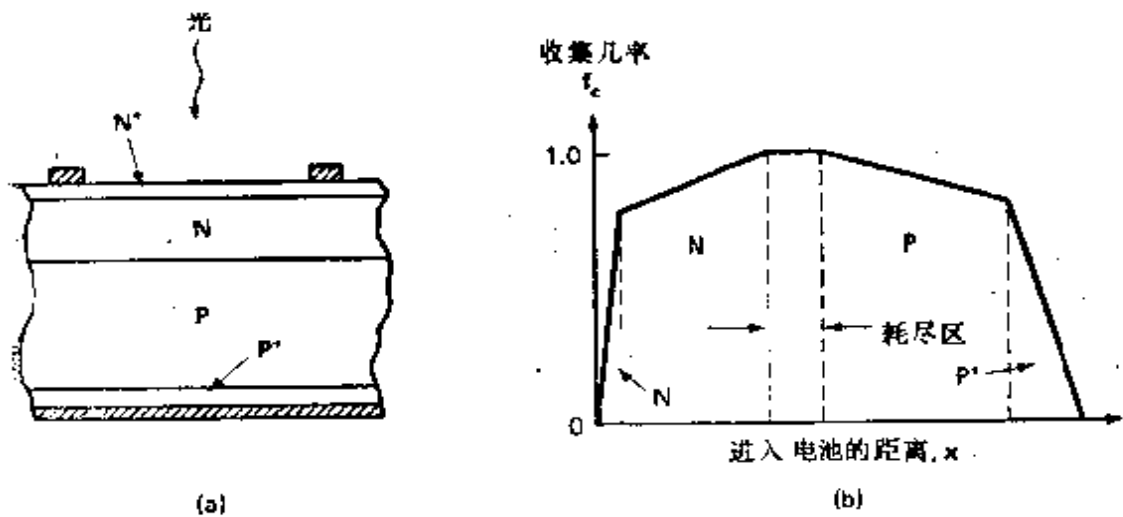


图 9.1

- (a) 高-低发射极太阳能电池结构示意图;
 (b) 相应的收集效率与离开电池表面距离的关系

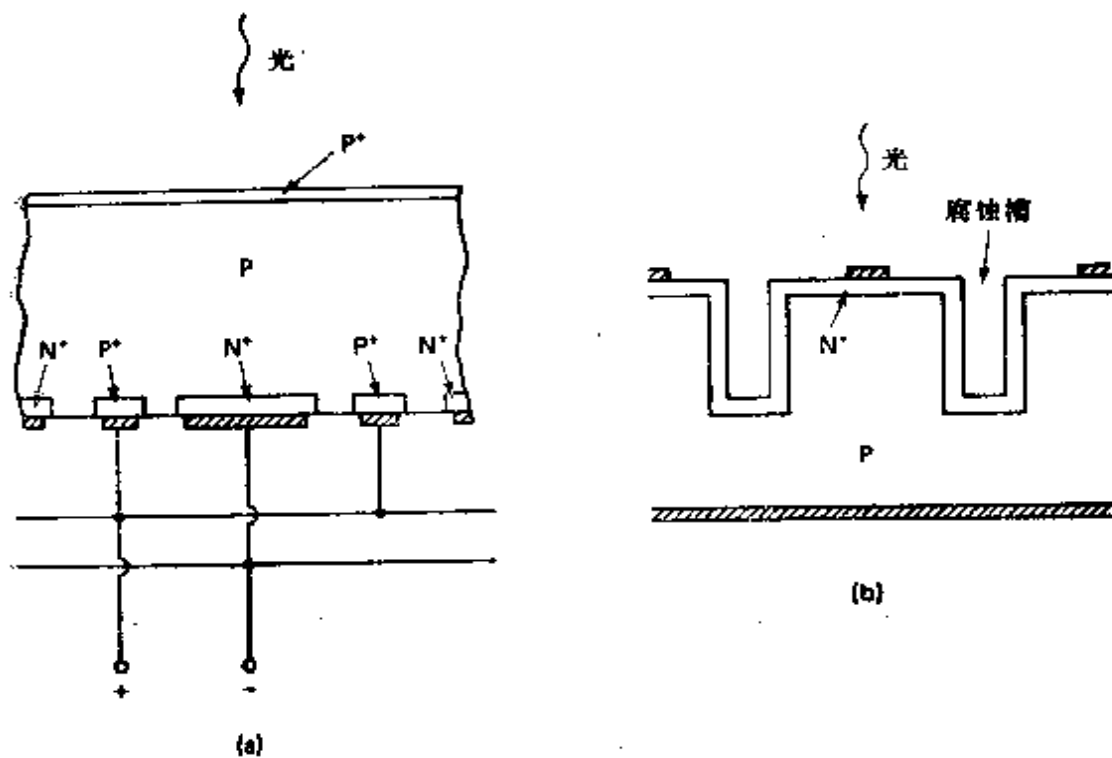


图 9.2 其他同质结太阳能电池结构

- (a) 前表面场电池;
 (b) 垂直多结电池

图 9.2(b) 的垂直多结 (VMJ) 电池是实现这种结构的最切实

可行的做法。利用各向异性腐蚀^[9.3]在电池上腐蚀出深槽，接着进行扩散，同时得到平行结和垂直结。这些垂直结保证了能够收集电池深处产生的载流子。垂直结的间距相当于扩散长度时最为有效。虽然，扩散长度愈小，所需的表面尺寸愈精细。但是，从原理上说这样的结构更能容许小的扩散长度。

9.3 半导体异质结

在半导体异质结中，结两边的材料都是半导体，但却是不同的半导体。

在 4.2 节中通过设想的实验，即将孤立的 p 型区和 n 型区相接触导出了同质结情况的能带图。再将这个方法用于异质结情况，孤立的两个半导体的能带图示于图 9.3(a) 中。三个重要的参数是功函数（从半导体费米能级移去一个电子所需要的能量）、电子亲和力（从导带边的能级移去一个电子所需要的能量）以及半导体禁带宽度。在两个孤立的半导体中，不仅掺杂程度不同，而且电子亲和力、功函数和禁带宽度也不同。当这两种材料在热平衡状态下连接在一起时，整个系统的费米能级必须是不变的，如图 9.3(b) 所示。因此，器件的两部分之间必将建立起静电势差，它等于两部分功函数之差。这个电势的空间分布可以用与第四章中同质结情况相同的方法，依据结两边过渡区中所贮存的电荷计算出来。此外，在结附近的导带边将有一个不连续点，其能量差等于两部分电子亲和力的差，在价带边也有一个相应的不连续点，其能量差取决于两部分禁带宽度的差，如图 9.3(b) 所示。与同质结电场不一样，在理想界面两边位移矢量 ($\epsilon\vec{E}$) 是连续的。

在光伏器件工作中，不希望有像图 9.3(b) 那样的导带尖峰。利用 4.1 节介绍的太阳电池的不对称性概念，n 型区对空穴起阻止作用，p 型区对电子起阻止作用。图 9.3(b) 中 n 型区导带中的尖峰也起到阻止电子从 p 型区流向 n 型区的作用。因此尖峰将使 p 型区对光电流难以做出贡献。光子亲和力和掺杂程度的

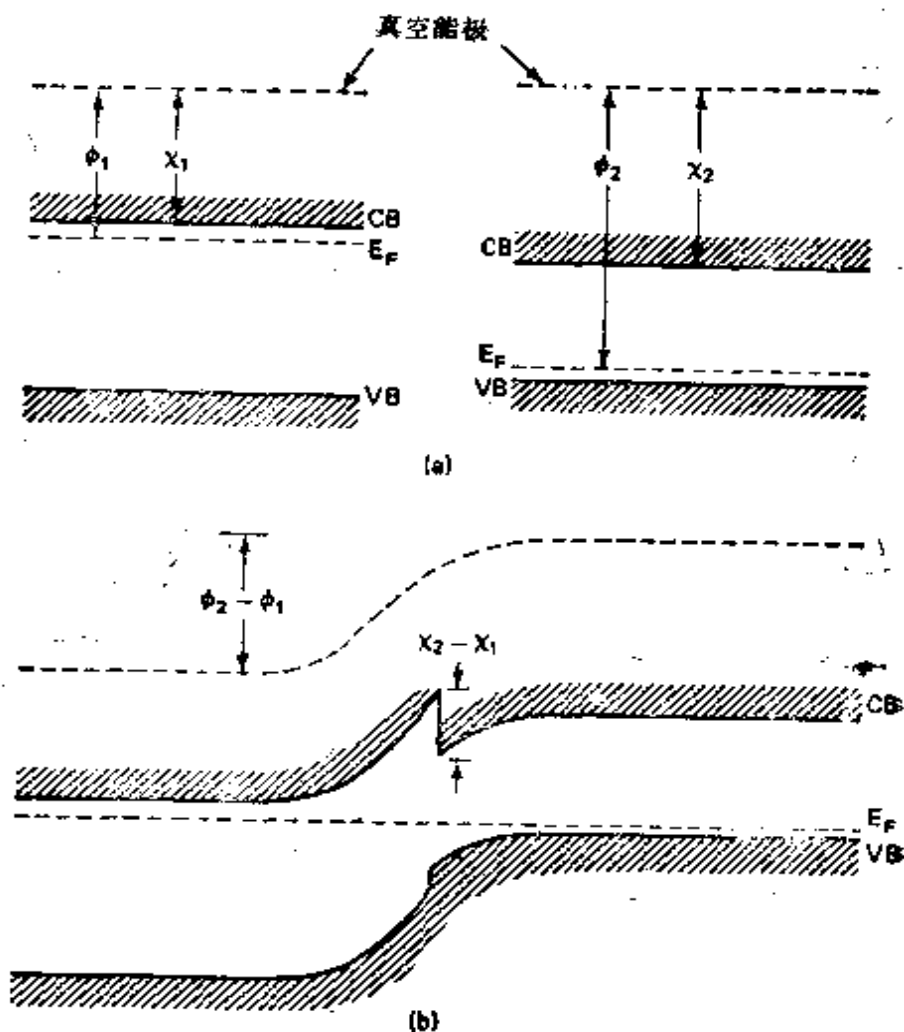


图 9.3

- (a) 孤立的两个不同半导体（一个掺杂 P 型，另一个掺杂 n 型）的能带图；
 (b) 设想将这两部分连接所形成的异质结的能带图

适当配合能够避免这样的尖峰^[9.4]。

对于只有小的尖峰或根本无尖峰的理想情况，异质结电池的最大效率受较小禁带宽度材料的理想效率限制。之所以考虑异质结这是出于实用，而不是因固有的效率优点。

到目前为止，还未论及很重要的实际需考虑的问题。对常规的同质结来说，结两边晶体结构相同，沿整个结是连续的。对异质结来说这是不可能的，因为两种半导体的晶体结构有很大差别。从图 9.4(a) 很容易看出，将形式相同但晶格间隔不同的两

种晶格连在一起时，所得的晶格结构中就会出现缺陷。缺陷密度取决于晶格间失配的程度。如图 9.4(b) 所示，晶体晶格中的缺陷将在禁带中产生允许能级。这些允许能级位于耗尽区中，因此是十分有效的复合中心。它们还能够为从结的一边到另一边的电流传输的量子力学隧道过程提供场地。任何情况下，它们都起降低太阳能电池性能的作用。为制作接近理想特性的异质结，最重要的是结两边采用晶格结构几乎相同的半导体。

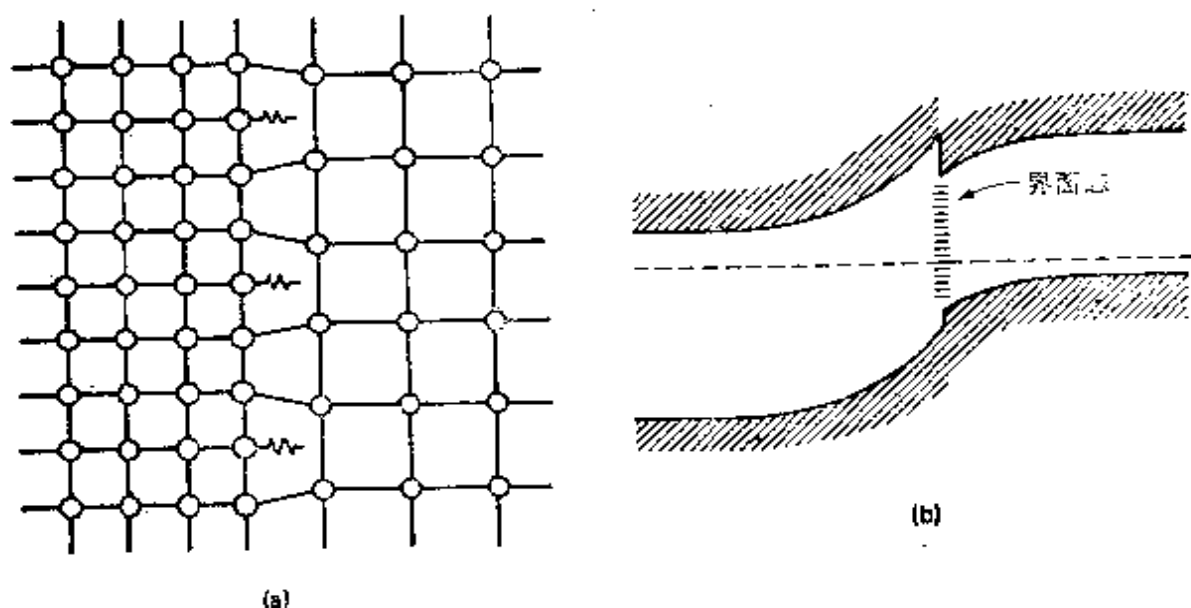


图 9.4

- (a) 不同晶格常数的两个晶格间的界面处失配所引起的缺陷；
(b) 由这种失配在禁带中引起的相应的缺陷态

9.4 金属-半导体异质结

当金属和半导体接触时，象在半导体异质结中那样，由于功函数不同，在界面区将出现电位降。由于金属和半导体中电荷载流子数量上的差别，所有的电位降基本上都出现在结的半导体一边，如图 9.5(a) 中所示。同 p-n 结情况一样，这将在交界面处产生一个耗尽区。从金属对耗尽区静电学性质影响的观点来看，它起着类似于重掺杂半导体材料的作用。

具有这种耗尽区的金属-半导体接触称作肖特基二极管。它具有整流和光生伏特两重性质。半导体区中少数载流子的情况基本上和 p-n 结二极管情况相同。例如,无光照时,耗尽区边缘处的剩余少数载流子浓度与外加电压呈指数关系,进入体内则呈指数衰减 (4.4 节和 4.6 节)。少数载流子流对总的二极管电流有同样的贡献。对 n 型半导体,有

$$J_{0s} = \frac{qD_s n_i^2}{L_s N_D} (e^{qV_{s0}/kT} - 1) \quad (9.1)$$

对金属和半导体之间多数载流子流的唯一阻碍是界面处的耗尽区势垒。如图 9.5(b) 和 (c) 所示,这个势垒的高度随外加电压而改变。这就得出了由下式^[9.5]确定的电流的热电子发射分量:

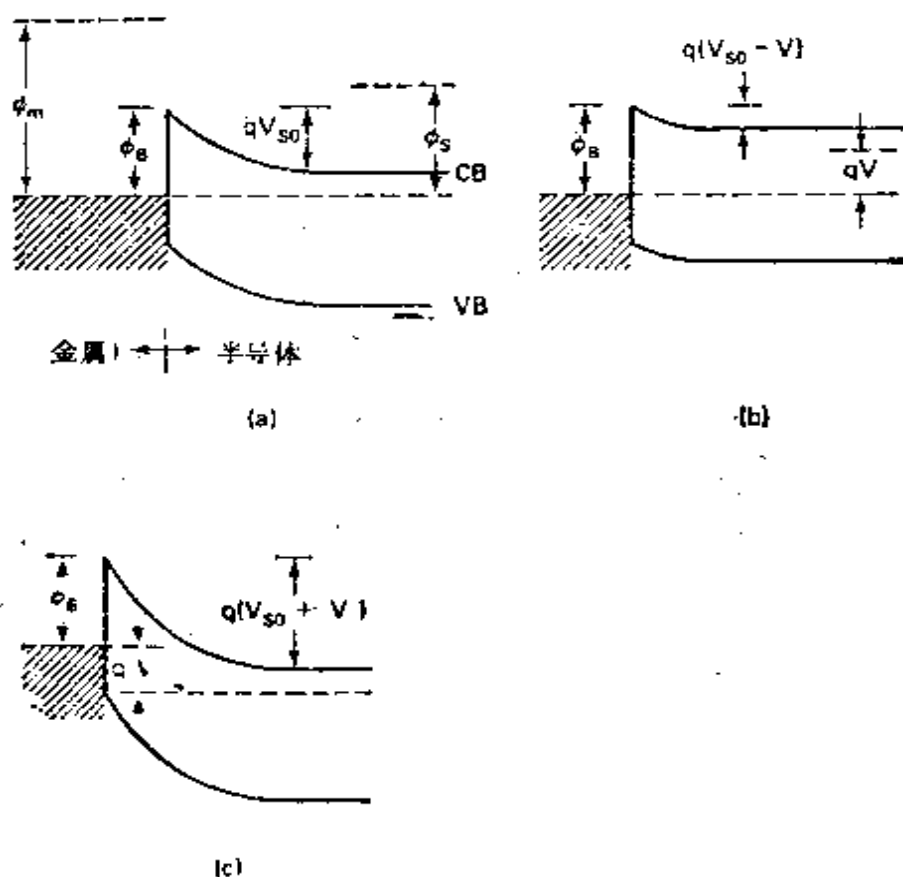


图 9.5 金属-半导体异质结的能带图

- (a) 零偏压;
- (b) 正向偏压;
- (c) 反向偏压

$$J_{0s} = A^* T^2 e^{-q\phi_B/kT} (e^{qV/kT} - 1) \quad (9.2)$$

其中, A^* 是有效理查逊 (Richardson) 常数 (~ 30 到 $120 \text{ A/cm}^2/\text{K}^2$)。这个分量的大小首先取决于界面处的势垒高度 ϕ_B 。如图 9.6 (a) 所示, 电流的多数载流子分量通常比少数载流子分量大得多。从光伏能量转换的观点来看, 这个额外的电流分量是不希望有的, 因为它将增加二极管暗饱和电流, 因而减少开路电压。图 9.6 (b) 表明这一点。因此, 势垒 ϕ_B 愈大, 则器件性能愈好。

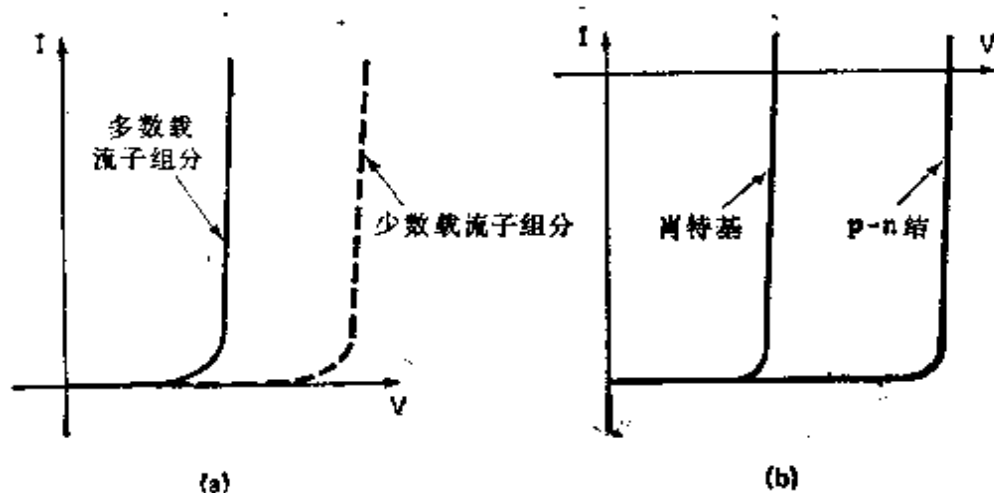


图 9.6

- (a) 无光照时肖特基二极管的两个电流分量;
(b) 肖特基器件和 p-n 结器件光照特性的比较

似乎只要选择金属的功函数使得在金属-半导体界面处产生一个很高的势垒就能解决这个问题。然而, 实验发现, 对许多半导体来说, 所产生的势垒的大小与金属的功函数无关。这是因为晶格失配和半导体表面可能的玷污使金属-半导体交界面存在大量的界面态的缘故^[9.6]。这些界面态起着箝制表面区电位的作用。

虽然肖特基二极管因为不需要制作 p-n 结而能很简单地制出, 但它们的性能将受到上述超过 p-n 结的电流分量的附加“寄生”电流分量的限制。

9.5 实用的低电阻接触

从 9.4 节知道，通过选择适当的金属难以控制金属-半导体交界面的势垒大小，因而提出了这样的问题，即怎样才能能在金属和半导体之间制造一个非整流或低阻接触？如果检测了与整流接触有关的耗尽区宽度，就可得到答案。随着半导体中掺杂浓度的增加，耗尽区的宽度将减小。

金属与重掺杂的半导体间的接触示于图 9.7 中。耗尽区变得这样薄，以致载流子能通过量子力学隧道过程穿过禁区^[9.7]。实质上这是由于电子的波动性，它使电子能穿越这种区域。因此，虽然在表面有一个势垒，载流子仍能穿过金属和半导体之间的界面，好象这个薄的势垒不存在一样。这样就得到一个好的低电阻接触。

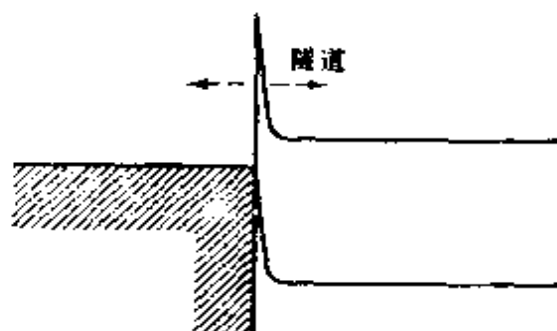


图9.7 金属和重掺杂 n 型半导体之间的接触

在半导体区中的势垒很薄，载流子通过量子力学
隧道过程能直接穿过

因此，为电池的重掺杂扩散层制备一个好的低阻接触是不困难的。对轻掺杂基区的电接触可以用合金的方法制造，经过合金工序，在界面附近将产生一个重掺杂区。另一方面，高度损伤的“锯齿状”表面对防止整流作用也不够理想。

9.6 MIS 太阳电池

已经看到，金属-半导体接触对许多半导体来说并不理想，这

些半导体界面势垒并不象简单的理论所认为的那样强烈地依赖于金属的功函数。这种非理想状态如图 9.8 (a) 所示, 可以通过在金属和半导体之间引入一层薄绝缘层而消除。在这样的金属-绝缘体-半导体 (MIS) 器件中, 极端的金属功函数能在半导体中产生极端的效应。

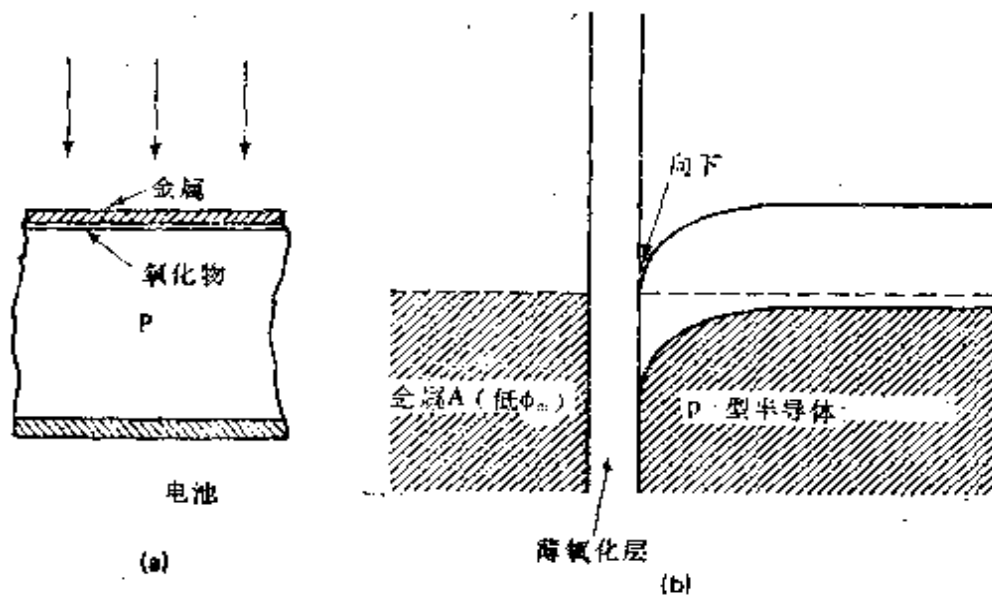


图 9.8

(a) 金属-绝缘体-半导体结构示意图;
(b) 相应的能带图

例如, 对图 9.8 (b) 的 P 型器件来说, 低的金属功函数会在半导体表面产生一个很高的势垒。如果这个绝缘层很薄, 则载流子通过量子力学隧道效应将能穿过它。通过这个过程流过绝缘体的电流随绝缘层厚度的减薄而指数增加。那末, 由方程 (9.2) 给出的电流的暗热电子发射分量的表达式可改为

$$I_{01} = P_t A^* T^2 e^{-\phi_B / kT} (e^{(V_{so} - V_s) / kT} - 1) \quad (9.3)$$

其中, V_s 是半导体表面处的电势; V_{so} 是热平衡状态时半导体表面电势值; P_t 是粒子的隧道穿透几率。薄绝缘层还将减少少数载流子在金属和半导体之间流通的最大速率。然而, 只要薄绝缘层不太厚 (一般小于 $20 \text{ \AA}$), 那末这些载流子的传输将由于它们

穿过半导体时传输速率较小而受到限制。在这种情况下，少子的状况和在 p-n 结二极管中的相同，相应的暗电流由下式给出（4.6 节）：

$$J_{0s} = \frac{qD_s n_i^2}{L_s N_A} (e^{qV/kT} - 1) \quad (9.4)$$

比较肖特基器件和 MIS 器件电流的两个分量的相对大小，可以看出，MIS 器件中电流的热电子发射分量大为降低。其原因是：能得到较大的 ϕ_B 值； P_1 （隧道穿透几率）比 1 要小很多；式（9.3）中的 $V_{0s} - V_{0s}$ 比外加电压 V 小。由图 9.6 可见，这种电流的降低将增加电池的开路电压。

最后结果示于图 9.9。在 MIS 太阳电池的情况下，电流的热电子发射分量已降到很低，以致由式（9.4）给定的 p-n 结型的电流占主要地位。因此，虽然结构上大不相同，但是能制造出电学上相当于理想 p-n 结二极管的 MIS 器件^[9.8]。

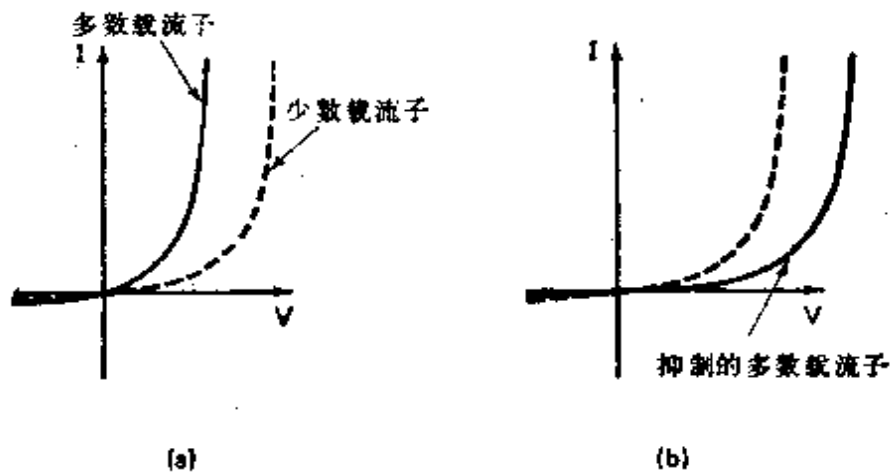


图 9.9 肖特基太阳电池 (a) 和最佳设计的 MIS 太阳电池 (b) 的暗特性比较

在肖特基和 MIS 两种太阳电池中，顶部金属层起着作为电极和形成势垒两种作用。由图 9.8 (a) 很容易看出，必须找到某种使光线能穿过这层金属的方法。图 9.10 中示出了两种方法。一种是用足够薄 ($<100 \text{ \AA}$) 的金属层以便它对光基本上是透明的。它的薄层电阻高，因此，如图所示，就需要一个较厚的接触

栅线。第二种方法是采用基本上和常规电池顶部电极相同，但要细得多的栅线结构。在栅线之间吸收的光所产生的载流子在复合之前就很有可能到达附近的栅线。沿表面如能静电感应一层少数载流子的话^[9.9]，情况还能进一步改善。第三种方法是采用如氧化锡、氧化铟、氧化锌或氧化镉这样的透明导体作为顶部接触。这些接触氧化物实际上是重掺杂半导体。因此，所得到的结构称为半导体-绝缘体-半导体 (SIS) 太阳电池^[9.10]。这样的 SIS 器件接近于 9.3 节的半导体异质结。

MIS 方法的主要优点是完全取消了高温扩散制结工序，这样就能保持硅材料的原始特性，并避免了有关扩散层的弊端。在 8.7 节中已经看到，这些弊端限制了硅太阳电池开路电压的上限。据报导，采用密栅型 MIS 方法的硅太阳电池有很高的开路电压^[9.8]。由于电流输出都相差不大，而填充因子有较大潜力，MIS 电池效率超过扩散电池的潜在优点主要由于输出电压高。

9.7 光电化学电池

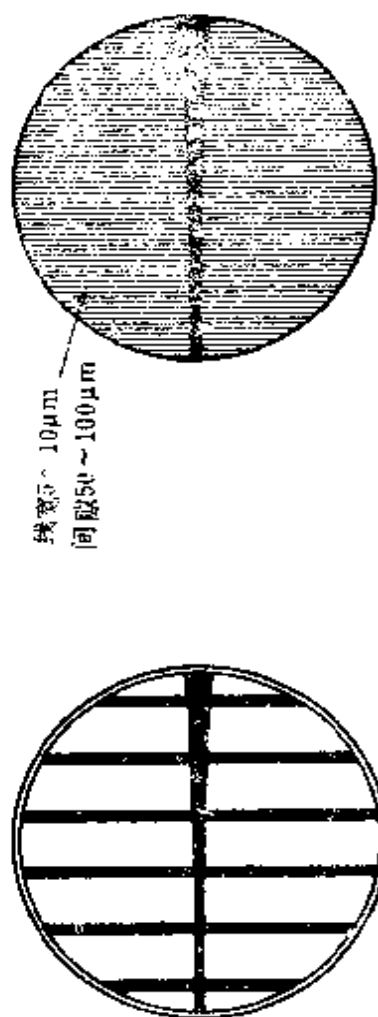
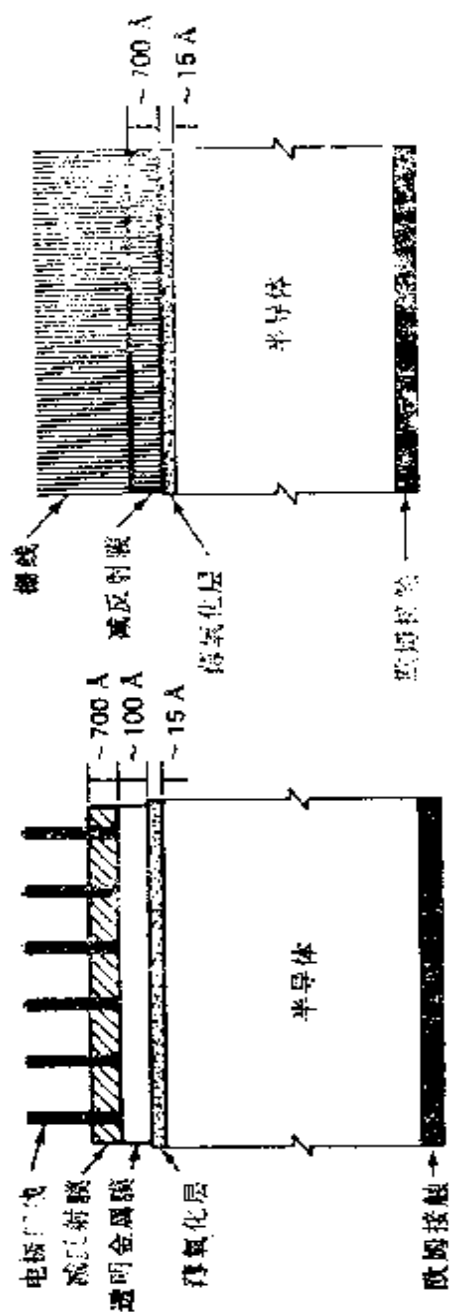
9.7.1 半导体-液体异质结

如果半导体与电解液接触，像本章论述的其他异质结那样，在半导体表面将产生势垒。制造这样的半导体-液体异质结需要的器件工艺过程最少，尽管如此，其能量转换效率却有超过 12% 的记录^[9.11]。这种方法的主要问题是按这样的工作方式半导体很容易受光腐蚀^[9.12]。

与导电的对电极组合在一起时，这种“光电电池”能够用来发电或通过光电解分解水产生氢。

9.7.2 电化学光伏电池

在这类器件中，液体中含有一种具有氧化态和还原态的物质。如果这种物质接受一个电子，它就从氧化态变成还原态。相



(a)

(b)

图 9.10 MIS 太阳能电池顶部接触的二种设计方法:

(a) 透明金属结构;

(b) 密栅结构

反，如果失去一个电子或接受一个空穴，它就被氧化。这种物质称作氧化还原对。

在电化学光伏电池中，电解液中的氧化还原对的能级理论上位于半导体少子能带带边的能级附近。图 9.11(a) 示出了在有金属对电极的 n 型半导体情况下的电化学光伏电池的能带图。

光照下，半导体中产生的少子空穴将向与电解液的交界面移动。如图 9.11(a) 所示，空穴将穿过交界面到达氧化还原对的还原态，使它们氧化：

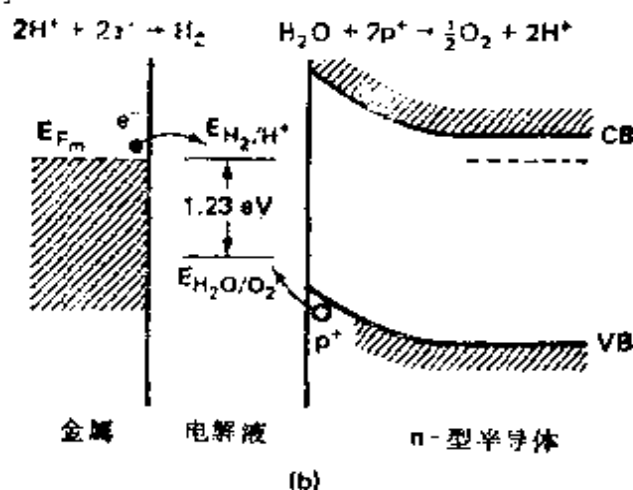
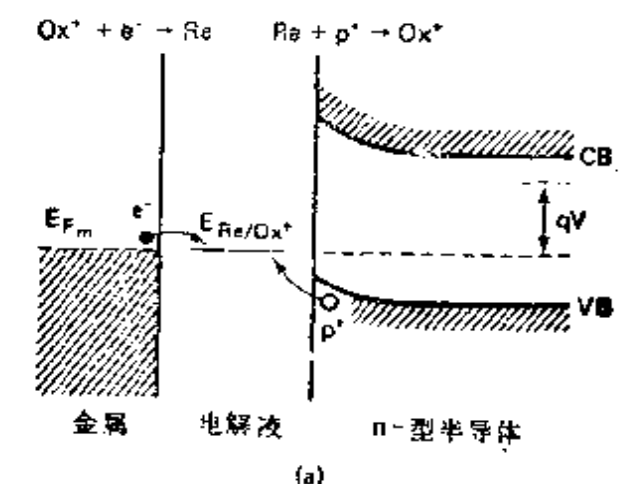


图 9.11

- (a) 光照下电化学光伏电池的能带图，电解液中的氧化还原对能级使电荷可以在金属和半导体价带之间移动；
- (b) 光照下光电解电池的能带图，电池工作在金属与半导体背面外短路的理想情况下



在对电极上,电子从金属移到氧化还原对的氧化态,使它们还原:



如果在电池的两端连接一个负载,构成一个完整的电路,那么像常规的太阳电池一样,将对负载供电。

这类电池中的电解液仅用来在金属和半导体之间传送电荷。正如参考文献 9.13 进一步讨论的那样,这种器件结构与 9.6 节的 MIS 结构很类似。

9.7.3 光电解电池

这种电池非常类似于 9.7.2 节中介绍的那种电池,通过光电解它也能用来产生化学燃料。通过水的光电解产生的最普通的燃料是氢。

对 n 型半导体而言,反应过程如 9.7.2 节所述。氧化反应在半导体-电解液交界面附近的电解液中进行。还原反应在对电极附近发生。与 9.7.2 节所介绍的情况不同之点是,在每个电极处参加反应的物质是不同的。对水分解的情况来说,在半导体电极处的反应是^(9.14)



在对电极处则是



如图 9.11(b) 所示,与这些反应有关的状态间的能量差是 1.23eV。这就规定了为使反应进行所需的半导体禁带宽度下限。按这种方式工作时,禁带宽度远大于这个下限的半导体几乎都发现遭到腐蚀^(9.12)。

氧化钛是所发现的能够在这种以光电解模式工作的水溶液中稳定工作的第一个半导体。然而,它的禁带宽度大 (3eV),因而只对紫外线照射有响应。所以,太阳能转换效率低 (~1%)。这种

材料吸收太阳光太少。实际上它已作为一种“无吸收”的减反射膜用于某些市售硅太阳电池上！对于这种 TiO_2 器件，为使反应进行，需从外部电源供给小的偏压（0.3~0.5 V）。现在正在寻求无需这种偏置、稳定性好的小禁带宽度材料。

9.8 小 结

除了前面几章介绍的浅同质结以外，还有许多可能的光伏器件结构。本章已经叙述了一些可采用的器件结构。两种不同带隙半导体之间的异质结在效率方面没有胜过同质结。但是，如在第十章中将看到的那样，它有工艺方面的优点。金属-半导体异质结制造很简单，但是，由于存在附加的寄生电流分量，实质上其效率比同质结低。然而，采用金属-绝缘体-半导体（MIS）异质结结构就能减小甚至完全消除这个缺陷。

在液体和半导体之间形成的异质结也具有令人感兴趣的光伏特性。已能很简单地制备出具有相当效率的实验室光伏电池。以光电解模式工作时，太阳光通常以储氢方式直接转换为化学能。只要能量转换效率能大幅度提高并超过过去所报导的数值的话，这种能量收集和储藏相结合的模式就可能引起人们的兴趣。

练 习 题

9.1 (a) 室温下，由材料 1 制造的同质结太阳电池的典型暗饱和电流密度是 10^{-8} A/m^2 ，由材料 2 制造的电池相应的数值是 10^{-11} A/m^2 。这两种材料中那一种具有较小的禁带宽度？

(b) 在这两种材料之间形成 p-n 异质结。假设在金属结处无电流限制峰，并且晶格结构相似，这样，在此结中几乎没有晶格失配，试以这个异质结估算暗饱和电流密度。问哪一种材料对确定该电池的开路电压最为重要？

(c) 问哪一种材料将限定异质结中产生的电子-空穴对数目的上限也就是短路电流的上限？

9.2 (a) 求出肖特基二极管太阳电池在 300 K 时由越过金属-半导体交

界面处的势垒的热电子发射引起的暗饱和电流密度与由通过半导体体内的少数载流子扩散引起的暗饱和电流密度的比率。半导体是 n 型硅, 300K 时具有下列参数: $N_D = 10^{22} \text{m}^{-3}$, $D_n = 0.001 \text{m}^2/\text{s}$, $L_n = 10^{-4} \text{m}$, $n_i = 1.5 \times 10^{16} \text{m}^{-3}$ 。交界面处的势垒高度是 0.8eV , 有效理查逊常数为 $10^6 \text{A}/\text{m}^2/\text{K}^2$ 。

(b) 在明亮的阳光下 ($1 \text{kW}/\text{m}^2$), 如果电池短路电流为 $300 \text{A}/\text{m}^2$, 试计算开路电压的理想值及电池效率。

9.3 制造了一只类似练习 9.2 的肖特基结构的 MIS 电池。假设通过降低电流的热电子发射分量的大小使其大大低于少数载流子的扩散分量, 器件达到最佳性能。试计算开路电压和效率, 并与练习 9.2 的结果作比较。

9.4 在明亮的阳光下 ($1 \text{kW}/\text{m}^2$), 一只二氧化钛光电解电池在二极管表面产生氢。电池需要 0.4V 的偏置电压以进行工作。由偏置使电池获得 $7 \text{A}/\text{m}^2$ (电池面积) 的电流。由氢获得的功率是 $1.48I$, 其中 I 为电池电流, 1.48 是氢燃烧热的电压当量。问该电池的阳光转换效率是多少?

参 考 文 献

- [9.1] F. A. Lindholm et al., "Design Considerations for Silicon HLE Solar Cells", *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington D. C., 1978*, pp. 1300~1305; also C. T. Sah et al., *IEEE Transactions on Electron Devices ED-25* (1978), 66.
- [9.2] O. Van Roos and B. Anspaugh, "The Front Surface Field Solar Cell, a New Concept", *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978*, pp. 1119~1120.
- [9.3] J. Wohlgemuth and A. Scheinine, "New Developments in Vertical Junction Silicon Solar Cells", *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego 1980*, pp. 151~155.
- [9.4] W. D. Johnston, jr., and W. M. Callahan, *Applied Physics Letters* 28 (1976), 150.
- [9.5] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices* (New York, Wiley, 1969), p. 378.
- [9.6] Ibid, p. 372.

- [9.7] B. Schwartz, ed., *Ohmic Contacts to Semiconductors* (New York: Electrochemical Society, 1969).
- [9.8] M. A. Green, F. D. King, and J. Shewchun, "Minority Carrier MIS Tunnel Diodes and Their Application to Electron- and Photo-voltaic Energy Conversion: Theory and Experiment", *Solid State Electronics* 17 (1974), 551~572; R. B. Godfrey and M. A. Green, "655mV Open Circuit Voltage, 17.6% Efficient Silicon MIS Solar Cells", *Applied Physics Letters* 34 (1979), 790~793.
- [9.9] P. Van Halen, R. E. Thomas, and R. Van Overstraeten, "Inversion Layer Silicon Solar Cells with MIS Contact Grids", *Conference Record, 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Baton Rouge, 1976*, pp. 907~912.
- [9.10] R. Singh, M. A. Green, and K. Rajkaran, "Review of Conductor-Insulator - Semiconductor (CIS) Solar Cells", *Solar Cells* 3 (1981), 95~148.
- [9.11] A. Heller, B. A. Parkinson, and B. Miller, "12% Efficient Semiconductor-Liquid Junction Solar Cell", *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978*, pp. 1253~1254.
- [9.12] H. P. Maruska and A. K. Ghosh, "Photovoltaic Decomposition of Water at Semiconductor Electrodes", *Solar Energy* 20 (1978), 443~458.
- [9.13] S. Kar et al., "On the Design and Operation of Electrochemical Solar Cells", *Solar Energy* 23 (1979), 129~139.
- [9.14] A. J. Nozik, "Electrode Materials for Photoelectrochemical Devices", *Journal of Crystal Growth* 39 (1977), 200~209.

第十章 其他半导体材料

10.1 引言

前几章主要关心的半导体材料是单晶硅。还有大量其他半导体材料能用来制造效率令人满意的太阳能电池^[10.1]。本章并不试图去罗列这些材料，而只是讨论用某些能取代单晶硅的更新的材料制作的太阳能电池的结构及性能。这有助于弄清楚对更一般的材料必须考虑的重要问题。

10.2 多晶硅

通常，制备多晶硅的工艺比制备单晶硅要求要低一些。为得到合格的光伏性能，制备多晶硅所用的硅原材料的纯度仍必须与制备单晶硅所用的相同。那么，为了生产出较好的太阳能电池，多晶硅尚需具备另外哪些特性呢？

多晶硅电池的重要部位是晶粒边界。类似于9.3节中金属-半导体异质结的情况，在晶粒边界的两边会形成静电势垒^[10.2]。这将阻止多数载流子流动，其作用基本上相当于一个大的串联电阻。多晶硅可以制成图10.1(b)所示的圆柱状晶粒结构，晶粒可从电池的正面延伸至背面。这种结构优于图10.1(a)所示的细小晶粒结构。由于存在晶体结构缺陷，晶粒边界在半导体材料的禁带中引入了允许能级，充当非常有效的复合中心。因此，可以把它们视为少数载流子的“耗尽层”。正如太阳能电池中在结的一个扩散长度内所产生的少数载流子可被结收集一样，在晶粒边界大约相同的距离内产生的少数载流子也可被晶界吸收并复合掉。这些载流子对电池的电流输出并无贡献。因此，为了防止电流输出损失太大，多晶材料中晶粒的横向尺寸必须大于少子扩散

长度^[10.3]。晶粒边界的另一个有害影响是它们为 p-n 结电流提供了旁路。这种通路也许是在制结过程中由于预扩散掺杂剂时杂质落入晶粒边界而产生的，如图 10.1(c) 所示。晶粒边界附近大密度的沉淀物也增加了这种旁路作用。

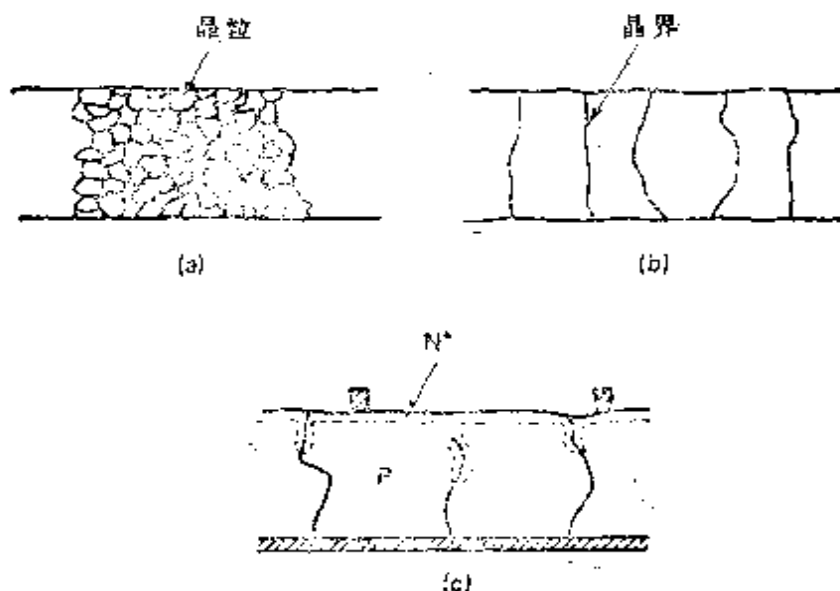


图 10.1

- (a) 细小晶粒多晶材料；
- (b) 圆柱形晶粒延伸过硅片厚度的多晶材料；
- (c) 在电池生产过程中掺杂的杂质落入晶粒边界的预扩散

硅是一种弱吸收的间接带隙半导体 (3.3.2 节)，为了获得好的光伏特性，需要具有大的扩散长度，约为 0.1mm。要想使晶粒边界处由于复合引起的光电流损失小些，晶粒的横向尺寸必须比扩散长度大得多，约为几mm。由于电池厚度通常只有零点几mm，这样大的晶粒尺寸使如图 10.1(b) 所示的圆柱形晶粒比较容易得到。此外，电池单位面积晶粒边界的总长度随晶粒尺寸的增加而减小，这也减少了由晶粒边界引起的旁路影响的重要性。

这种大晶粒比通常所说的多晶材料的晶粒大得多，因而用术语“半晶”称之更为合适。图 10.2 是从这种材料的立方锭切得

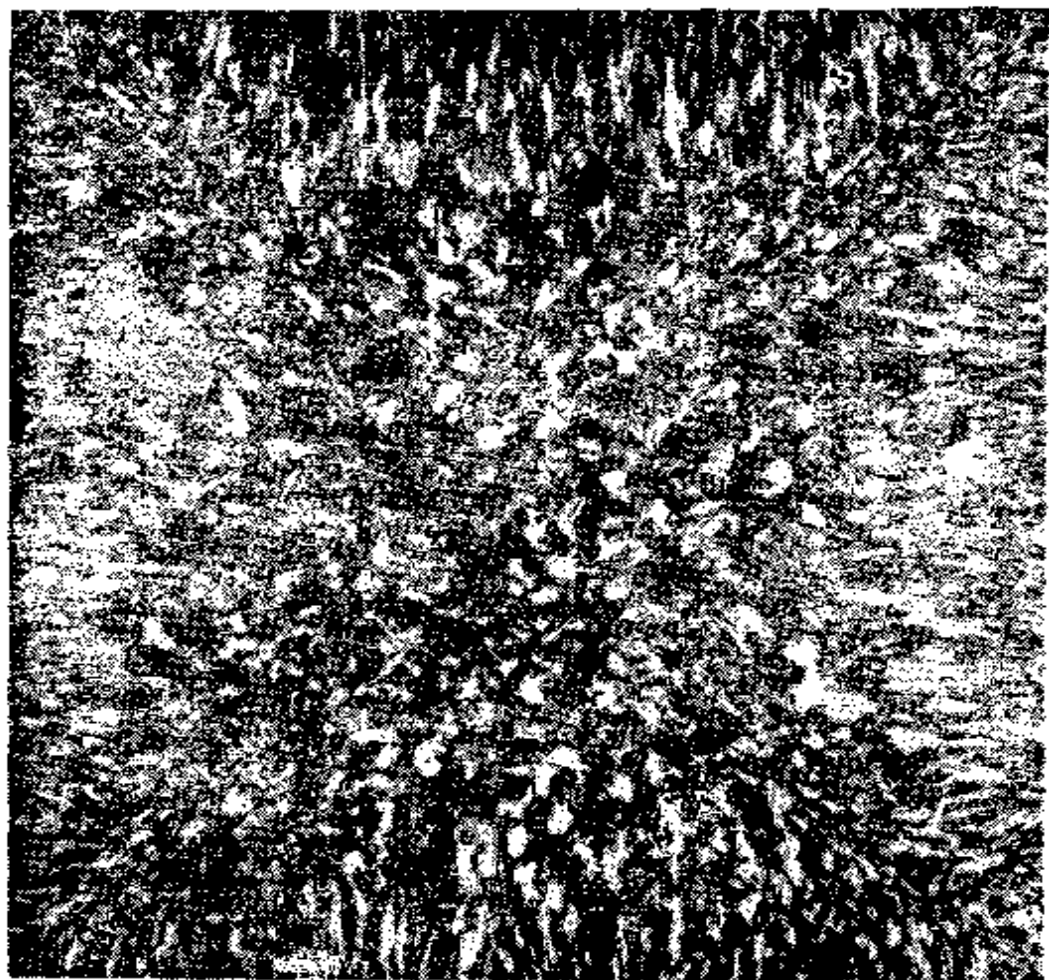


图 10.2 从浇铸工艺制得的硅锭切取
的 $10 \times 10 \text{cm}^2$ 多晶硅片

用这种硅片通常可生产出效率为 10% 的太阳电池

的一片单晶硅片的照片。1976 年已经用这种材料制得效率大于 10% 的太阳电池^[10.4]。后来曾报导，用大晶粒材料制得的电池之效率已超过 14%^[10.5]。这种单晶硅制作的太阳电池组件现在市场上已有出售。

10.3 非 晶 硅

制备非晶硅所要求的条件原则上比制备多晶硅更低。非晶硅材料与晶体材料不同之处在于它的原子结构排列不是长程有序。例如，非晶硅的硅原子通常与四个其他硅原子连接，连接键的角度和长度通常与晶体硅的相类似，但小的偏离迅速导致长程有序

的排列完全丧失。

单体的非晶硅本身并不具有任何重要的光伏性质。如果没有周期性的束缚力，则硅原子很难与其他四个原子键合。这使材料结构中由于不饱和或“悬挂”键而出现微孔。再加上由于原子的非周期性排列，增加了禁带中的允许态密度，结果就不能有效地掺杂半导体或得到适宜的载流子寿命。

然而，1975 年报导了由辉光放电分解硅烷 (SiH_4) 产生的非晶硅膜可以掺杂形成 p-n 结^[10.6]。此膜中含有氢 (SiH_4 分解时所产生的)，氢在材料总原子数中占有相当的比例 (5~10%)。一般认为氢的作用是如图 10.3 所示那样填补了膜内部微孔中的悬挂键及其他结构缺陷。这就减少了禁带内的态密度，并允许材料进行掺杂。

1976 年已报导了用这种方法制备的非晶硅-氢合金 (a-Si:H 合金) 太阳能电池的效率为 5.5%^[10.7]。该电池是采用 MIS 结构，虽然面积非常小，但却引起了人们对此方法的可能性的注意。后来制出了效率接近此值、但面积大得多的 p-n 结及 MIS 器件^[10.8]。 a-Si:H 合金的带隙远大于晶体硅的，而且光吸收能力也强得多。这意味着厚度约为 $1\mu\text{m}$ 的膜即可符合要求。这种膜可以沉积在各种衬底上，掺杂程度可在沉积过程中通过含有所需掺杂剂的小量气体来控制。结果证明，这种材料的少子扩散长

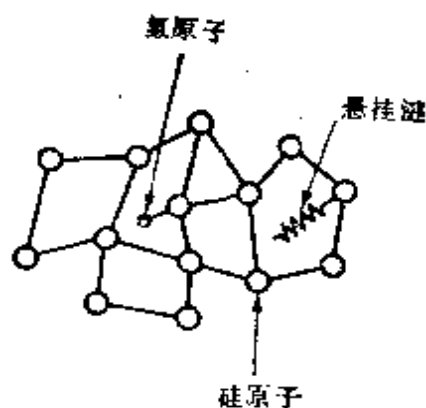


图 10.3 非晶硅结构示意图

图中表明悬挂键是怎样产生以及怎样被氢钝化

度非常小，远小于 $1\mu\text{m}$ 。因此，耗尽层成为电池的大多数载流子的收集区。电池体区的串联电阻会是个问题。但是，当电池受光照射时电阻将减小（光电导效应），这可以在某种程度上使上述问题得到补偿。

因为电池是如此容易沉积，所以在同一衬底上形成几个内部互连的电池并不困难。这个优点可以使单个电池的尺寸保持很小，因而电极无需做成栅线形状^[10.9]。用非晶硅制作的首批商用

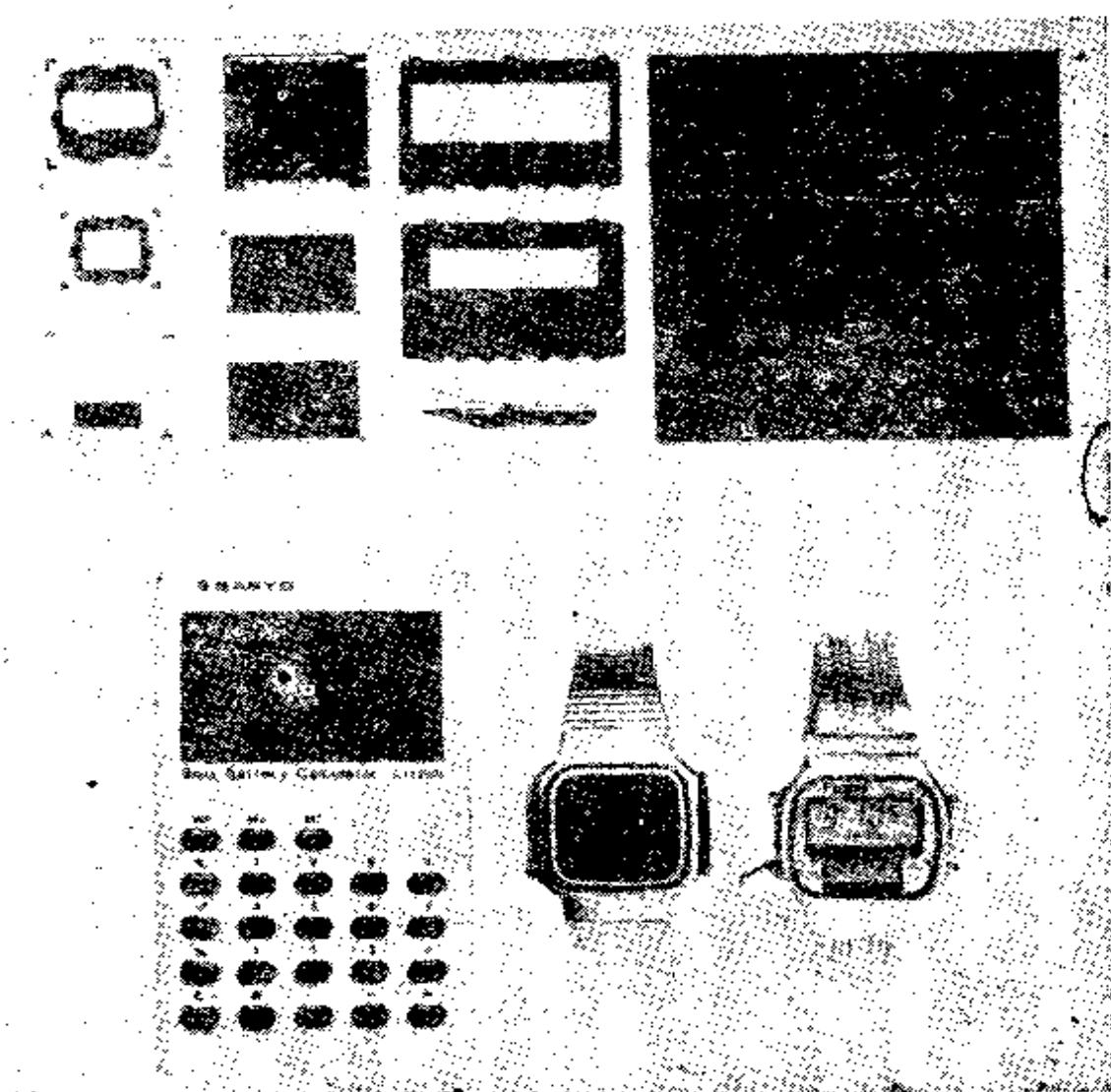


图 10.4

- (a) 为用于消费产品而设计的第一只商用非晶硅太阳能电池组件；
- (b) 由这种组件供电的计算器 and 手表

产品出现于 1980 年。如图 10.4(a) 所示, 它们由在同一衬底上的几个小电池互连而成。这些电池为图 10.4(b) 所示的消费品提供所需要的电压和电流。这种电池的太阳能效率超过 3%, 而在室内荧光下与单晶硅电池的性能大体相当。世界上许多实验室正在对非晶硅材料进行研究, 以满足室外应用的要求。

在这方面所开展的研究工作之一是采用掺有氢和氟的非晶硅层^[10,10]。这种 $a\text{-Si:F:H}$ 合金已通过在有氢的环境中辉光放电分解 SiF_4 生成。据报导, 这种方法能得到好的光伏特性, 特别是减少了禁带中的态密度^[10,10]。

10.4 砷化镓太阳电池

10.4.1 GaAs 的特性

砷化镓 (GaAs) 是化合物半导体的一个例子。它的结晶结构与硅类似 (图 2.3), 只是相隔的原子不同 (不是 Ga 就是 As)。砷化镓也是直接带隙半导体 (3.3.1 节), 这意味着进入基体内的阳光很快被吸收, 也意味着少子寿命及扩散长度比硅的短得多。这些差别导致电池的设计原则也有所不同。

由于市场上对可用于制作发光二极管及半导体注入型激光器的砷化镓材料产生兴趣, 所以砷化镓制备技术得到迅速发展。这项技术的一种方式是利用 GaAs 和 AlAs 合金。AlAs 是间接带隙半导体 ($E_g \approx 2.2\text{eV}$), 其晶格结构类似于 GaAs, 晶格间隔接近相等 (仅失配 0.14%)。GaAs 和 AlAs 的合金常写成 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$, 其晶格间隙和禁带宽度在 GaAs 和 AlAs 之间。由于晶格间隔匹配较好, 所以 GaAs 和 AlAs 之间的异质结以及它们的合金有较低的界面态密度, 因此具有接近于理想的特性。这就增加了设计光伏器件的灵活性。

由于这种材料有接近理想的带隙 (图 5.2) 及先进的工艺, 所以 GaAs 电池是报导过的太阳电池中效率最高的。在 AM1

阳光下,地面 GaAs 太阳电池的效率超过 22%,大大高于硅电池的相应效率值 (18%)。然而,用 GaAs 做太阳电池材料也有一些缺点。镓的资源有限^[10.11],将使 GaAs 永远是贵重材料。但是,这一点因 GaAs 太阳电池很适用于聚光系统而得到弥补 (第 11 章)。这样,对于一个给定的功率输出来说,所需要的材料量可以减少。GaAs 是直接带隙材料也就意味着进入基体中的光很快被吸收。因此,这一层只需几 μm 厚即可,这就进一步减少了对材料的需求。第二个缺点是砷的毒性。使用由毒性材料制造的大型太阳电池系统时应仔细调查其对环境的影响^[10.12]。

10.4.2 GaAs 同质结

因为光进入像 GaAs 这样的直接带隙半导体中会迅速地被吸收,所以常规的同质结结构中高表面复合速度的问题比硅更严重。1978 年以前报导的 GaAs 同质结电池的效率只是中等水平。

硅电池中为减少表面复合的影响所采用的方法是把同质结的表面层减薄到相当于光子吸收的平均深度 (6.2.2 节)。同样的方法也适用于 GaAs,当然此层必须比硅薄一个数量级。据报导,图 10.5(a) 所示的 N^+PP^+ 结构的太阳电池的效率已达 20% 以上,其顶部 N^+ 层的厚度仅 $450 \text{ \AA}$ ^[10.13]。

GaAs 电池的制造工艺与先前描述的常规硅电池制造工艺不同。不是用将杂质扩散进入 GaAs 的方法形成掺杂层,更通常的做法是用化学方法形成具有所需杂质浓度的掺杂层。附加到器件上的这些层延伸了衬底的晶体结构,故称“外延层”。这些层是通过在含有要沉积的材料的气相或液相化学物质的环境中加热衬底形成的。

图 10.5(a) 所示结构的形成过程是由重掺 P^+ 衬底开始,外延生长几 μm 轻掺 P 型层,然后再制造一个重掺 N^+ 层。将此层的一部分进行阳极氧化以形成减反射膜,这有助于使该层的表面复合速度减至最小^[10.13]。

10.4.3 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}$ 异质界面电池

用以克服直接带隙 GaAs 材料表面复合速度大这一缺点的另一个方法是采用如图 10.5(b) 所示的异质界面结构。因为 GaAs 和它与 AlAs 合金的结构接近相同，这就可能在同质结电池的表面上形成一个 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 外延层。假使参数 x 大约等于 0.8，这一层将有较大的间接带隙。阳光通过该层时几乎不被吸收。它的作用基本上相当于窗口层，如图 10.5(d) 所示，阳光可透过它而到达下面的电池。因为与衬底的晶格匹配较好，所以在异质界面引起的界面态很少，窗口层也起到了钝化下面的 GaAs 表面的作用。

这种结构已得到迄今所报导的单体电池的最高效率，在阳光下，地面电池的效率值超过 22%^[10.14]。其工艺步骤是，采用 n 型 GaAs 做初始衬底，用液相外延法在其上面生长一层 p 型 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 层，同时，由于 p 型杂质的扩散，在衬底的上部变成 p 型。在 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 层上获得稳定的低阻接触是困难的，而低阻接触对用于聚光系统的电池来说有其特殊的重要性。这个问题可通过两个办法来解决，一个办法是在接触部位腐蚀掉这一层然后在下面的 p 型 GaAs 上做接触电极^[10.15]，另一个办法是在这一层顶部的接触部位上再制作一层重掺杂的 GaAs p 型层^[10.16]。

10.4.4 AlAs/GaAs 异质结

如图 10.5(c) 所示，在 n 型 AlAs 和 p 型 GaAs 间做成“真”异质结，这种电池的效率也已超过 18%^[10.17]。 AlAs 有大的间接带隙，因此它相当于一个窗口，允许大部分入射光被吸收进入太阳电池的体内。 AlAs 和 GaAs 的电子亲和力的失配引起异质结的导带能量有一个尖峰（9.3 节）。使 AlAs 为重掺杂，这种尖峰的不利影响便可减至最小^[10.17]。

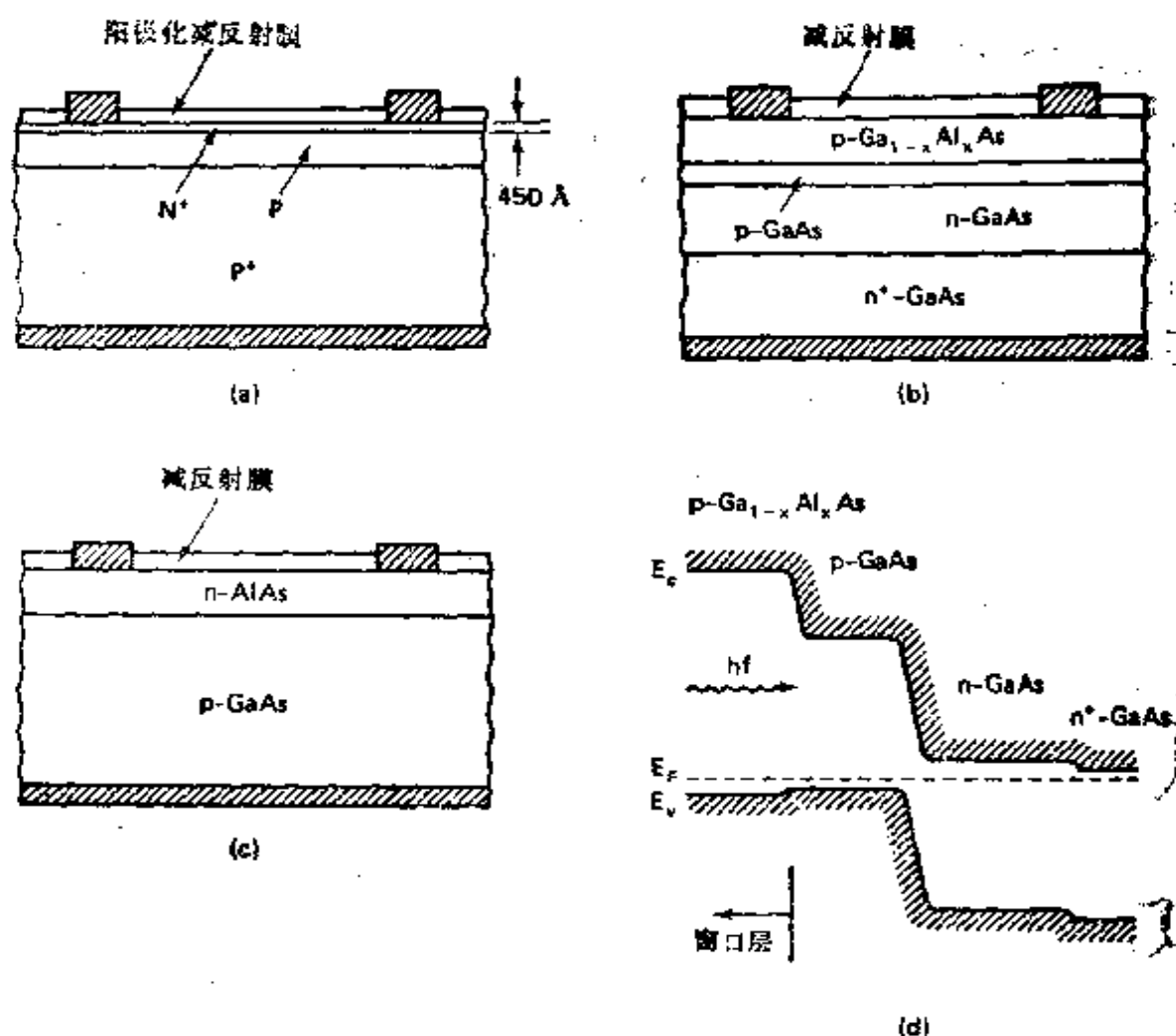


图 10.5 GaAs 太阳能电池不同设计方法的示意图
 (a) GaAs 同质结; (b) $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}$ 异质界面电池;
 (c) AlAs/GaAs 异质结; (d) (b) 中所示的异质界面电池相
 应的能带图

10.5 $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ 太阳电池

10.5.1 电池结构

CdS 电池的研制历史可追溯至 1954 年^[10.18], 与用扩散法首次成功制得硅太阳电池大约在同一年。从那时起, 人们几次试图用这种材料来生产商用太阳电池。

这种电池的显著特点是制造容易。由于细晶粒多晶 CdS 适

合做衬底材料，所以有很多方法可制备这种衬底。其中，真空蒸发和喷涂看来是最有希望的。

CdS 电池通常用所谓 Clevite 工艺来制作。CdS 被真空蒸发到金属片或金属覆盖的塑料或玻璃片上。沉积的 CdS 大约只有 $20\mu\text{m}$ 厚，该层的晶粒直径大约为 $5\mu\text{m}$ 。然后，将其浸在氯化亚铜溶液中 ($80\sim 100^\circ\text{C}$) $10\sim 30\text{s}$ 。在厚度大约 $1000\sim 3000\text{\AA}$ 的表面层中，Cu 取代了 Cd，得到 $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ 异质结。然后沉积出栅线电极。图 10.6(a) 是所得到的电池的结构。如图所示， Cu_2S 层在晶粒边界处可向下延伸几个 μm 。图 10.6(b) 为相应的能带关系图。 Cu_2S 是 p 型材料，禁带宽度为 1.2eV ；CdS 是 n 型，禁带宽度为 2.3eV 。

用这种方法制得的电池效率超过 9% [10.19]，小批量生产时，效率可达 5% 。

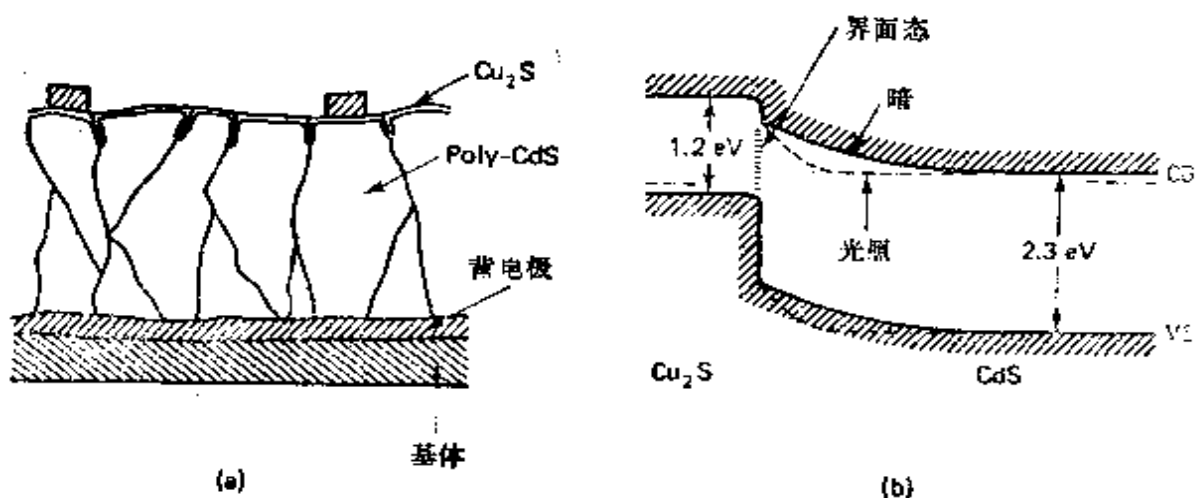


图 10.6

- (a) $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ 薄膜太阳能电池示意图；
(b) 无光照和有光照时相应的能带图

10.5.2 工作特性

考虑到 $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ 电池制造简单，可以说其性能是意外的好。但是电池性能好的机理远不如 Si 和 GaAs 电池那样清楚。除了利用 Si 和 GaAs 电池的一些概念以外，只要引入另外几个

概念就能描述这种电池的工作情况。其工作原理只能结合后面的电池类型进行描述。

$\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ 电池的响应包含几个非线性区。最明显的证据是,如图 10.7(a) 所示,它在光照下的电流-电压特性曲线可能和它的暗特性曲线交叉。此外,从图 10.7(a)也可看出,这种电池的开路电压和填充因数不仅取决于光生电流密度,而且也取决于光源的光谱成分。受光照时,电池的电容也增加很多倍(10~100 倍)。电池的光谱响应如图 10.7(b) 所示,也强烈依赖于偏置光的强度(也依赖于光谱成分)。虽然上述效应通常都可观察到,但由于制造条件的不同,它们的数值变化非常之大。

电容变化的结果表明,在光照条件下耗尽区的宽度收缩,如图 10.6(b) 所示。这种现象的一种解释是在耗尽区中产生了陷阱能级^[10.20]。产生的原因是因为在 Cu_2S 层形成过程中或在后面的热处理时,铜杂质扩散进耗尽区。光照时光生空穴可为此能级所捕获。这就增加了 n 型区的正电荷,因而耗尽区变窄,如式 (4.4) 所描述。从式 (4.4) 也可看出,这也就增加了该区的电场强度值。

这也使这种电池的光谱响应得以解释。由于晶格失配,在 $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ 界面附近的禁带中可能有大量的允许态。图 10.6(b) 表示出这些允许态。它们起有效复合中心的作用。然而,可以证明;在强的电场下,这种复合中心的作用降低。在这种情况下,载流子被迅速地扫过这些复合中心,因而复合几率减小。大部分光生载流子来自禁带宽度为 1.2eV 的薄 Cu_2S 顶层,小部分来自禁带宽度较宽的 (2.3eV) CdS 层^[10.21]。没有偏置光时,界面的场强相对小些,因此所收集的载流子复合的可能性较大,电池的光谱响应差,如图 10.7(b) 所示。有偏压时,场强变大,复合便减小,光谱响应也得到改善。

不同波长的光特性不一样,这可能与不同波长的光引起的空穴占有界面附近陷阱的能力不一样有关。然而,上述对特性的解释仅是许多可能的解释中的一种。即使基本上是正确的,也还需

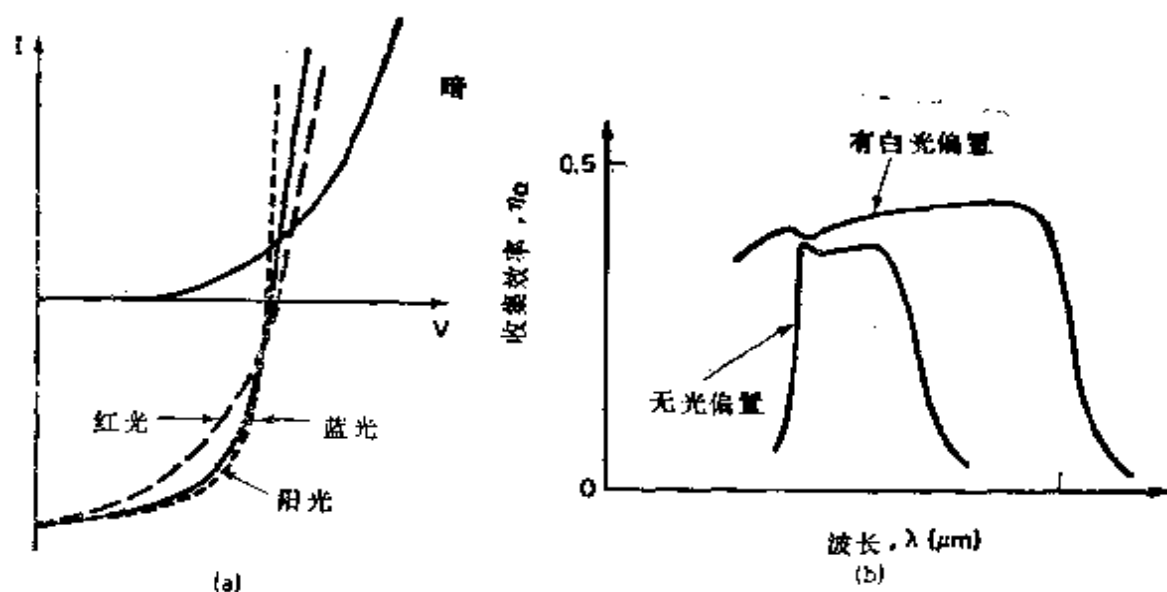


图 10.7 与 $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ 太阳能电池工作有关的非线性

(a) 无光照和有光照特性曲线的交叉及有光照特性曲线与光源的光谱组分的关系;

(b) 采用偏置光所引起的光谱响应增强^[10.20]

要其他的机理与它一起来描述观察到的全部实验特性。

10.5.3 $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ 电池的优缺点

$\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ 电池最主要的优点是可在不同的衬底上制作, 非常适合于大规模自动化生产, 电池生产成本低廉。

这种电池的主要缺点是效率低, 缺少硅电池那种固有的稳定性。由于效率低, 对于一定的输出来讲所需太阳能电池面积便要增加, 因而系统其他部分的成本变得更重要了。系统的其他成本, 如场地准备、支撑结构及布线所需的费用在整个系统成本中所占的比例可能如此之大, 以致即使低效电池免费, 也不如用成本较高的高效电池来得合算。根据经验, 对于经济上可行的大规模太阳能发电来说, 10%的组件效率或许是可以容许的最低值。

同样, 上述考虑亦适用于电池的封装成本。由于 $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ 电池稳定性比其他电池差, 因此, 封装要更仔细才会有与其他电池相似的使用寿命。

已经证明 CdS 电池在如下几种情况下就会退化^[10.22]: (1)在

高湿度条件下；(2)在空气中受热 ($>60^{\circ}\text{C}$)；(3)高温下受光照；(4)负载电压超过 0.33V 。

电池吸湿后将增加陷阱,减少短路电流。这是一个可逆过程,经适当的热处理,电流还可恢复。假如电池在空气中加热至 60°C 以上,短路电流可能发生不可逆变化,这可能是由于 Cu_2S 与氧和湿气反应转变成 CuO 和 Cu_2O 的混合物的缘故。即使没有空气,在这样的温度下光照也可能降低效率,这是由于 Cu_2S 层中产生了光活化相变,某些 Cu_2S 转变成 Cu_xS , 其中 $x < 2$ 。化学当量上的这种变化使效率大大降低。电池在电压超过 0.33V 工作时,可能引起 Cu_2S 变为 CuS 和 Cu 的光活化变化,铜可以形成细纤维使结旁路。

人们认为,这种退化可以通过制造方法的稍许变化和通过电池的密封来消除。从光伏器件广泛应用的观点来看, CdS 技术还面临着 Cd 的储藏量不是特别充足和 Cd 的毒性问题。

10.6 小 结

有许多材料能够用来代替作为现在太阳电池工业之基础的单晶硅。本章只叙述了发展较早的一部分。

GaAs 是一种工艺较成熟、带隙对光伏能量转换来说接近理想的半导体材料。迄今为止,以 GaAs 材料制作的太阳电池效率仍为最高。同质结、异质界面及异质结电池由于克服了直接带隙材料表面复合的严重限制,已证明具有高的效率。 GaAs 材料的主要缺点是成本高。

$\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ 电池可以非常简单地在细粒多晶 CdS 上制造。虽然在低工艺成本方面有潜力,但由于在大量生产的情况下要求达到 10% 的效率所存在的困难,以及为防止退化对包装提出的严格要求将妨碍其广泛应用。

多晶硅的缺点是它要求晶粒大。这就淘汰了许多低成本的制作方法。采用大晶粒半晶硅材料甚至有一些优点超过单晶硅。正

因为如此，已用这种工艺制得商用电池。最有希望的硅薄膜工艺是采用非晶硅合金为材料。自从它的优良特点被确认以来，用这种工艺制作太阳电池已在实验室和商用两个方面取得迅速进展。

练 习 题

10.1 在金属衬底上沉积多晶硅薄层。该层的晶粒结构是如图10.1(b)所示的圆柱形。晶粒横向尺寸等于该层厚度。在此层表面附近形成p-n结，择优扩散时落入晶粒边界处的杂质小到可以忽略。假设：晶粒边界对少数载流子起无限大的接收器作用；电池背面的金属-半导体界面的复合速率也很大；每个晶粒近似为立方体。试计算一个正好在晶粒体积的中心产生的少数载流子对电池短路电流做出贡献的最大几率。(提示：短路情况下，p-n结对少数载流子是很有吸引力的区域，起另一个接收器的作用。当少数载流子的扩散长度比晶粒尺寸大得多时，有最大的收集几率，这相当于晶粒体积内部无复合的情况。)

10.2 对图10.5(b)所示的异质界面电池，画出电子-空穴对的产生率与离开电池表面的距离之关系曲线。

10.3 采用某一工艺生产效率为10%的太阳电池组件，其成本是在晴朗天气下(1kW/m^2)每峰瓦输出要1美元。在一种特殊的应用中，系统中那些与方阵面积有关的部分的成本总计是80美元/ m^2 。假设其他成本在每一种情况中都相同，那么，用第二种工艺生产的效率为5%的组件必须以何种价格出售才能使得系统的全部成本不变？

参 考 文 献

- [10.1] A. L. Fahrenbruck, "I-V Compounds in Solar Energy Conversion," *Journal of Crystal Growth* 39 (1977), 73~91; A. M. Barnett and A. Rothwarf, "Thin-Film Solar Cells, A Unified Analysis of Their Potential," *IEEE Transactions on Electron Devices* ED-27 (1980), 615~630; S. Wagner and P. M. Bridenbaugh, "Multicomponent Tetrahedral Compounds for Solar Cells," *Journal of Crystal Growth* 39 (1977),

- 151~159; M. Scholjet, "Possibilities of New Materials for Solar Photovoltaic Cells," *Solar Energy Materials* 1 (1979), 43~57.
- [10.2] J. G. Fossum and F. A. Lindholm, "Theory of Grain-Boundary Intragrain Recombination Currents in Polysilicon p - n Junction Solar Cells," *IEEE Transactions on Electron Devices* ED-27 (1980), 692~700.
- [10.3] H. C. Card and E. S. Yang, "Electronic Processes at Grain Boundaries in Polycrystalline Semiconductors under Optical Illumination," *IEEE Transactions on Electron Devices* ED-24 (1977), 397~402.
- [10.4] H. Fischer and W. Pschunder, "Low Cost Solar Cells Based on Large Area Unconventional Silicon," *Conference Record, 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Baton Rouge, 1976*, pp. 86~92.
- [10.5] J. Lindmayer and Z. C. Putney, "Semicrystalline versus Single Crystal Silicon," *Conference Record, 14th Photovoltaic, Specialists Conference, San Diego, 1980*, pp. 208~213.
- [10.6] W. E. Spear and P. G. LeComber, *Solid State Communications* 17 (1975), 1193.
- [10.7] D. E. Carlson et al., "Solar Cells Using Schottky Barriers on Amorphous Silicon," *Conference Record, 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Baton Rouge, 1976*, pp. 893~895.
- [10.8] D. E. Carlson, "An Overview of Amorphous Silicon Solar-Cell Development," *Conference Record 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, 1980*, pp. 291~297.
- [10.9] J. J. Hazak, "Monolithic Solar Cell Panel of Amorphous Silicon," *Solar Energy* 23 (1979), 145~147; Y.

- Kuwano et al., "A Horizontal Cascade Type Amorphous Si Photovoltaic Module," *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, 1980*, pp. 1408~1409.
- [10.10] A. Madan, S. R. Ovshinsky, and W. Czubyj, "Some Electrical and Optical Properties of a-Si: F, H Alloys," *Journal of Electronic Materials* 9 (1980), 385~409.
- [10.11] H. J. Hovel, *Solar Cells*, Vol. 11, Semiconductor and Semimetal Series (New York, Academic Press, 1975), pp. 217~222.
- [10.12] T. L. Neff, "Comparative Social Costs and Photovoltaic Prospects," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978*, pp. 1001~1003.
- [10.13] J. C. C. Fan and C. O. Bozler, "High-Efficiency GaAs Shallow-Homojunction Solar Cells," *Conference Record, 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978*, pp. 953~955.
- [10.14] J. M. Woodall and H. J. Hovel, *Applied Physics Letters* 30 (1977), 492.
- [10.15] R. Sahai et al., "High Efficiency AlGaAs/GaAs Concentrator Solar Cell Development," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978*, pp. 946~952.
- [10.16] H. A. Vander Plas et al., "Performance of AlGaAs/GaAs Terrestrial Concentrator Solar Cells," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978*, pp. 934~940.
- [10.17] W. D. Johnston, Jr. and W. M. Callahan, "Vapor-Phase-Epitaxial Growth, Processing and Performance of AlAs-GaAs Heterojunction Solar Cells," *Conference Record, 12th IEEE Photovoltaic Specialists*

- Conference, Baton Rouge, 1976, pp. 934~938.*
- [10.18] F. A. Shirland, "The History, Design, Fabrication and Performance of CdS Thin Film Solar Cells," *Advanced Energy Conversion* 6 (1966), 201~222.
- [10.19] J. A. Bragagnolo et al., "The Design and Fabrication of Thin-Film CdS/Cu₂S Cells of 9.15 Percent Conversion Efficiency," *IEEE Transactions on Electron Devices ED-27* (1980), 645~651.
- [10.20] A. Rothwarf, J. Phillips, and N. Convers Wyeth, "Junction Field and Recombination Phenomena in CdS/Cu₂S Solar Cell," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978, pp. 399~405.*
- [10.21] J. A. Bragagnolo, "Photon Loss Analysis of Thin Film CdS/Cu₂S Photovoltaic Devices," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978, pp. 412~416.*
- [10.22] Reference 10.11, pp. 195~198.

第十一章 聚光系统

11.1 引言

在目前的电池工艺下，降低光伏发电成本的一条可行途径是将阳光会聚，以减小给定功率所需的电池面积。采用聚光方法，能够使系统成本中的一部分从电池成本转移到聚光元件和跟踪系统（如果需要的话）成本上去。

一般来说，聚光率越高，聚光系统所接收到的光线的角度范围越小。一旦聚光率超过 10，则系统只能利用直射阳光，因而，系统必须按太阳在天空运行轨迹跟踪太阳。聚光率越高，对太阳跟踪的要求越要精确。由于太阳本身是有一定大小的，因此，光由太阳到地球有一定的角度范围，这一角度范围决定了可能得到的最大聚光率（约 45000）。

将太阳光会聚到一个电池上还会使电池工作温度升高，这将降低电池效率。被动冷却（采用翼式散热片等）适用于聚光率在 50 以下的场合。对较高的聚光率需要主动冷却。既利用光伏能量又利用冷却系统收集的热能的全能系统（total energy systems）是完全做得到的。

11.2 理想聚光器

几何聚光率 C 定义为系统的口径面积与电池的有效面积之比。如前所述，这个比值是与聚光系统所接收到的光线的角度范围 θ 密切相关的。从热力学定律可导出最大聚光率和接收角的关系。对一个将接收角范围内从各个方向到达的光线进行同等程度会聚的系统来说，如图 11.1(a) 所示的二维或线状聚光器，其最大聚光率由下式给出^[11-1]：

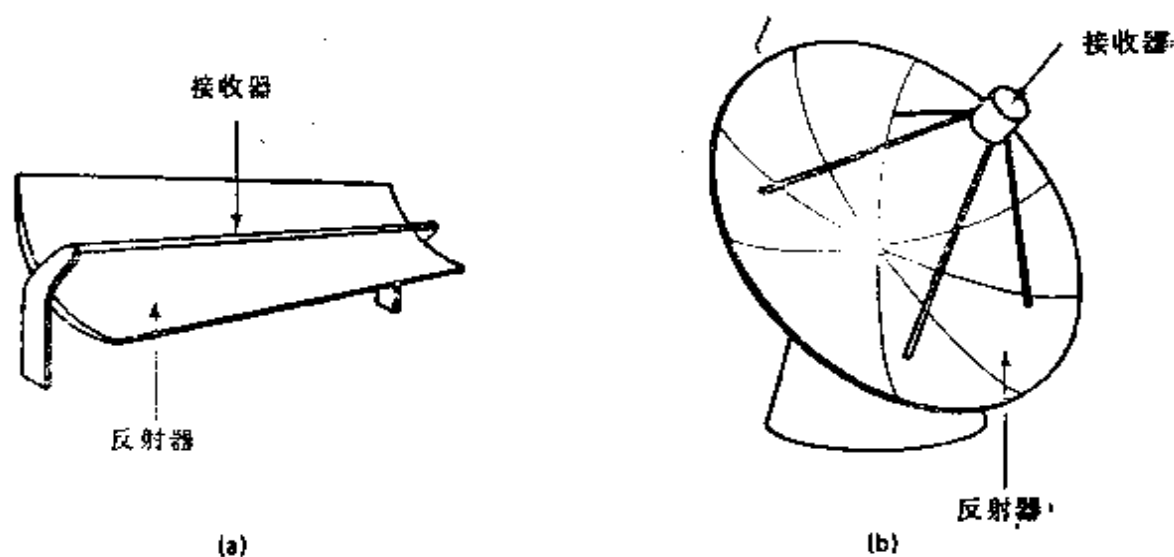


图 11.1

(a) 二维或线状聚光器；(b) 三维或点聚光器

$$C_{m(2D)} = \frac{1}{\sin(\theta_{mz2})} \quad (11.1)$$

而如图 11.1(b) 所示的三维或点聚光系统，其最大聚光率则由下式决定：

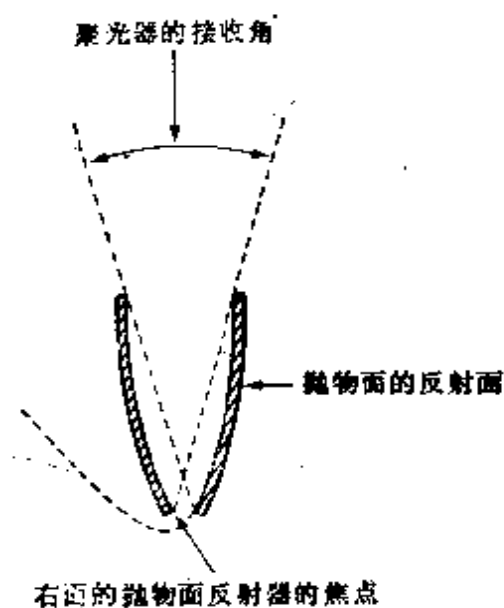


图 11.2 非成像组合抛物面聚光器示意图

$$C_{m(3D)} = \frac{1}{\sin^2(\theta_m/2)} \quad (11.2)$$

由于太阳本身的尺寸，使得直射日光的角度范围约为 $\frac{\pi}{2}^\circ$ (9.4mrad)。这就决定了点聚光系统可能得到的最大聚光率为 45000。

象聚焦抛物面和透镜之类的一般聚光器，其理想性能达不到式 (11.1) 和式 (11.2) 给出的极限值，两者相差一个 2~4 的系数^[11.2]。第一个被认为具有与该极限值相等的理想性能的聚光器是如图 11.2 所示的非成像组合抛物面聚光器 (CPC)。它由焦点位于图中所示位置的两个抛物面反射器构成。

11.3 固定式和定期调整式聚光器

对固定聚光器和取向每天调整或季节性调整的聚光器，显然希望得到尽可能大的接收角以提高聚光效果。作为一个例子，让我们考虑槽式聚光器的情况，它的纵轴位于东西方向。由于太阳高度的变化，太阳射线的方向会发生很大的改变。可以证明，太阳高度位于其二分点轨道平面 $\pm 36^\circ$ 之内的时间，在全年任何一天中起码有 7 小时。所以，一个最佳设计的固定槽式聚光器，如果它的收集角是 72° ，那么它每天至少应能聚光 7 小时，可能得到的最大聚光率为 $1/\sin(\frac{72^\circ}{2})$ ，只有 1.7。如果缩短最少收集时间，或者把聚光器设计成可以周期性调整倾斜度的，则可能得到较高的聚光率。

阿贡(Argonne)国家实验室在 1976 年制造了小型的 CPC 光伏组件。一组组件采用抛物面反射器；第二组组件是利用在一个 CPC 形状的固体聚丙烯壳体中的总的内反射。二者都需要季节性调整，以得到 7~9 的聚光率。

以上讨论表明，固定式聚光器达到的聚光率是相当低的（大大低于 3），而定期调节可使聚光率增大到 12 左右。用一完全固

定式聚光器，尽管不必借助于复杂的外部设备，但所得到的聚光水平也许太勉强了。然而，它们有一个人们希望的特点（尤其是对不对称聚光器^[11.14]）即能用以提高太阳能系统冬季输出，使冬夏季输出相对平衡。对独立系统（第十三章）来说，这样一个聚光器不仅能够减少所需的电池面积，而且能够减少所需储能装置的数量和减少储能装置周期泄放的困难。

低聚光率系统（ <5 ）的一个优点是能够利用大量生产的非聚光用电池，从而收到双重经济效果。聚光率较高的系统则需要改变电池设计。

荧光式聚光器是无跟踪聚光器的一种新形式^[11.5]，其结构如图 11.3 所示，在一个玻璃或塑料薄板中掺入一种荧光物质，将太阳电池沿一个侧面安装在平板上，而其他三个侧面都做成反射面。入射的阳光被添加剂吸收，然后以一窄波长范围的荧光形式发射出来。大部分发射光或者由于总的内反射或者由于侧面反射而被限制在平板内，直到它们到达安装的太阳电池上为止。这种系统可达到的聚光率不受前面所述的极限的约束。各个角度的入射光都可接收，最大聚光率受到象发射光在平板中的吸收这样一些实际因素的限制。

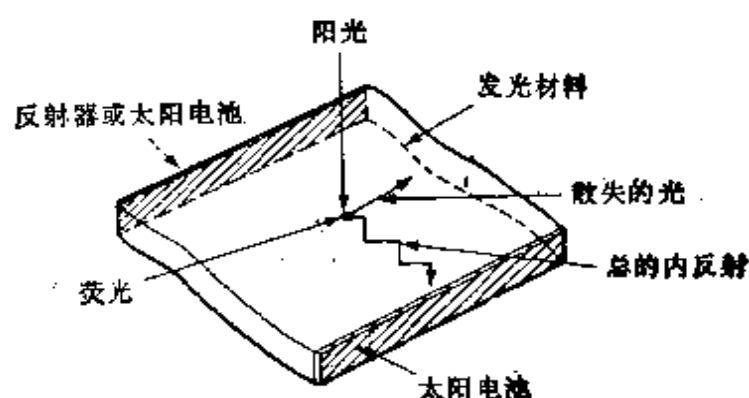


图 11.3 荧光聚光器

吸收的日光被以荧光方式再发射，大部分发射光由于总的内反射而被限制在平板内，被限制的光最后到达太阳电池

11.4 带跟踪的聚光器

聚光光伏系统中主要的还是聚光率在 20 以上并能跟踪太阳的系统。已经对这种系统的几个不同设计进行了研究。

为设计一个 10kW 的分系统而提出了两种不同结构,这个分系统在 1978 年和 1979 年间安装在桑地亚 (Sandia) 实验室。第一种结构如图 11.4(a) 所示,利用抛物面槽将阳光会聚到二次聚光器上,然后再会聚到太阳能电池^[11.6]。总几何聚光率为 25。

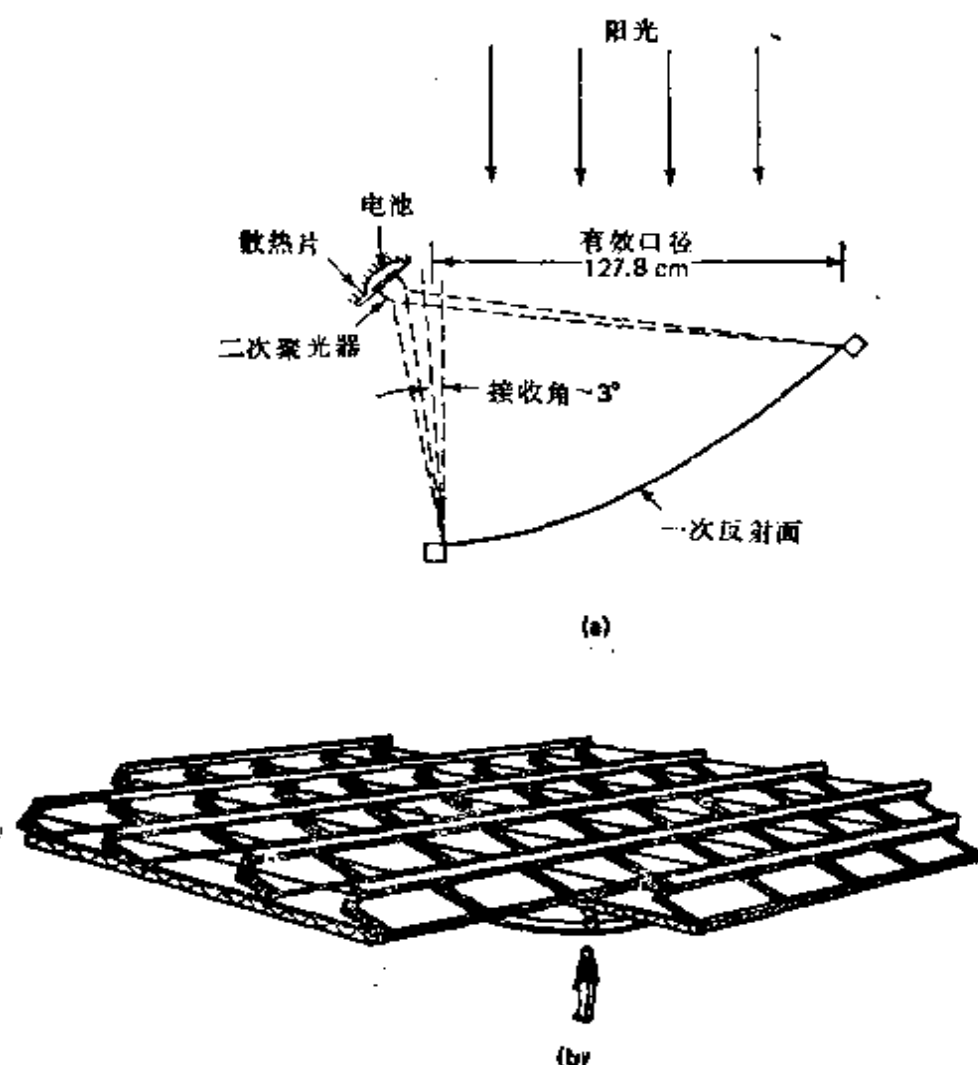


图 11.4 采用抛物面槽聚光器的 10kW 聚光光伏系统
(a) 聚光元件和电池装置; (b) 安装在一个圆形轨道上的整个系统^[11.6]

这种安排放宽了对一次聚光器的精度要求，虽然这意味着要使用两套聚光器，使到达太阳电池的阳光最大值减少到入射光的 78%。在电池上安装有散热器，以保证电池的被动冷却。一个安装在水平跟踪的圆形轨道上的 10kW 方阵示于图 11.4(b)。

另一种结构示于图 11.5，它利用折射效应工作。在这类应用中，菲涅尔透镜具有一些优点。透镜不但起聚光作用，而且也为电池提供了外罩。图示的系统采用这种透镜将阳光会聚到安装在散热器上的电池上。在这种系统中，散热片面积可以做得和系统口径面积一样大，这样即使在聚光率高达 40 的情况下也能保证电池得到合理冷却。图 11.5 也示出一个采用这种结构的 2.2kW

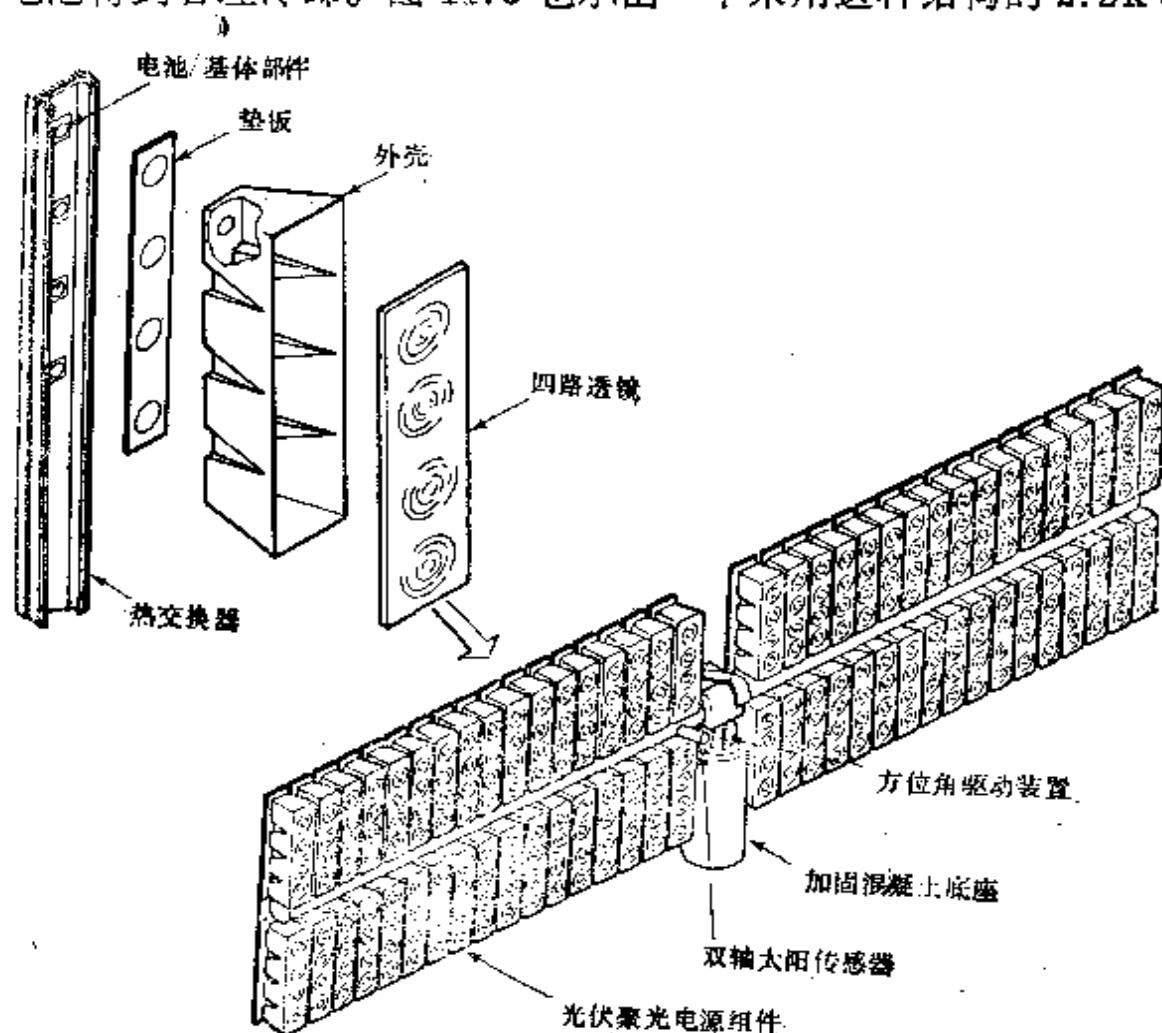


图 11.5 2.2kW 菲涅尔透镜聚光器

透镜不仅聚光而且是电池外罩的一部分。在该设计中，散热片面积与系统口径面积相当(11.7)

方阵⁽¹¹⁻⁷⁾。由与此相同的单元组成的一个 350kW_p 系统在 1980~1981 年间在沙特阿拉伯安装。当时，它是投入使用的最大的光伏系统。

11.5 聚光电池设计

在温度恒定的情况下，电池的理想效率随聚光率的增加而增加，这是因为短路电流随光强线性增加，开路电压随光强呈对数增加，而填充因数随开路电压增加而增加。实现上述效率增加的主要困难是在于高电流密度下串联电阻损耗的影响显得更加重要了。因为对于一个给定的功率输出，电池的效率决定了所需的聚光元件的面积，所以电池达到尽可能高的效率是极其重要的。

为使一个太阳电池的电阻尽可能小，建议采取以下措施：
(1)为降低体电阻和接触电阻损耗，采用具有背表面场的低阻衬底；
(2)使正常扩散层的顶层薄层电阻尽可能小；(3)采用细栅线图形的上电极，以减少横向电流引起的损耗；(4)采用厚的金属接触层，以减少在栅线和主线上的电阻损耗。

以上措施在现代聚光电池生产中都被采用了。衬底电阻率取得比普通电池更低一些^①。扩散层的薄层电阻也适当降低，但是，太低的薄层电阻值会导致第七章中所谈到的电池性能降低的结果。制备上电极的每种工艺都面临一个电极的栅线究竟能做到多细的问题。这一极限还取决于所需要的上电极金属厚度。根据经验，栅线的厚度只能做到其宽度的一半左右。一般做法是用真空蒸镀法沉积电极金属，再用光刻法加工成所需图形，然后电镀银，使栅线尽可能加厚。

在聚光应用中，电池一般设计成上表面只是部分受光照。例如，图 11.6 所示的典型点聚光系统电池的电极设计中，环绕电池外沿的未被主线覆盖的面积为设计面积。效率是按到达设计面积

① 由于“高注入效应”，背场高阻衬底电池在某些情况下会呈现低的串联电阻。这为制作聚光电池提供另一条途径。请看 8.4 节的脚注及其参考文献。



图 11.6 典型的点聚光系统用聚光电池

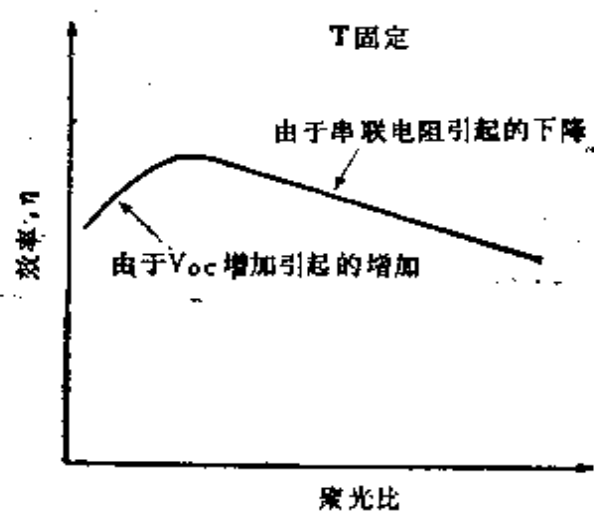


图 11.7 固定温度下太阳电池效率随聚光率增加而变化的典型曲线

(而不是全面积)的光通量计算的。在固定温度下,效率随聚光率变化的关系曲线示于图 11.7。一般趋势是,在低聚光率时,电池效率随聚光率的增加而增高,在高聚光率时,则随聚光率的增加而降低。峰值效率可能出现在 20 到几百个太阳之间的任何聚光率上。在低聚光率时,效率随聚光率增加而增加是因为输出电压随电流密度增加呈对数增加。在高电流密度时,串联电阻损耗变得更为重要,由于填充因数降低,效率便降低。

据报导,硅聚光电池已获得超过 20% 的峰值效率^[11.8],而 GaAs 电池的峰值效率约为 25%^[11.9]。实际工作效率比这个值要低一些,因为在聚光系统中,由于功率密度的增加,电池很可能要在比较高的温度之下工作。光学损失使系统效率进一步降低。如果所设计的系统能使到达其受光面的光中的 85% 到达电池,聚光系统的设计者就应该非常满意了。

11.6 超高效率系统

11.6.1 概要

聚光系统的光伏元件的能量转换效率是决定系统成本的关键参数。它决定了给定输出条件下的系统口径面积。在以下几节中,将探讨几个可得到特别高的能量转换效率的概念。这种达到特高效率的能力是聚光系统的一个特点,它使得聚光系统完全不同于平板组件。

11.6.2 多带隙电池概念

选择太阳能电池材料的最佳禁带宽度可看作是进行这样一种折衷,即所选的禁带宽度不能太宽,以免太多光子因其能量不足以产生电子空穴对而被损失掉,但也不能太窄,以免因所产生的电子空穴对能量大大超过禁带宽度而造成光子能量的太大浪费。

如果阳光中的低能光子照射到由窄禁带半导体制造的电池上(在这种电池中,低能光子能被利用),而高能光子照射到宽禁带

电池上（在这里，光子能量不会因所产生的电子空穴对的能量远远超过禁带宽度而被浪费掉），则可以得到一种更加有效的系统。

将光照射到禁带宽度合适的电池上的两个设计方案示于图 11.8。第一种方案称为“光谱分离”，使用光谱敏感反射镜将光投射到适当的电池上。第二种方案称“串联电池法”，利用一系列叠在一起的电池，宽禁带材料电池位于最上层。低能光子将穿过上面的电池，直至到达一个其禁带宽度窄到可以利用这个光子的电池为止。因为这两种设计方案比单一电池复杂得多，所以多带隙电池设计方案最适用于高倍聚光的系统。

采用这种多带隙电池设计方案所能获得的最大效率取决于所使用的不同禁带宽度的电池数量。表 11.1 给出了这个关系，并给出了这些电池的最佳禁带宽度。所援引的效率是对应于 1000 个太阳下（AM 1），其理想值见图 11.9(a)。可以看出，多带隙电池系统与单电池系统相比理想极限效率提高一倍。实际上，这样的系统比单电池系统会产生更多的不可避免的光学损失。考虑到这些损失，效率降低到如图 11.9(b) 所示的比较保守的数值。采用多电池带来的好处减小到 20%~50%。

表 11.1 多禁带宽度电池的最佳禁带宽度和效率
(1000 × AM1)^(11.16)

电池数目	系统效率 (%)	禁 带 宽 度 (eV)
1	32.4	1.4
2	44.3	1.0 1.8
3	50.3	1.0 1.6 2.2
4	53.9	0.8 1.4 1.8 2.2
5	56.3	0.6 1.0 1.4 1.8 2.2
6	58.5	0.6 1.0 1.4 1.8 2.0 2.2
7	59.6	0.6 1.0 1.4 1.8 2.0 2.2 2.6
8	60.6	0.6 1.0 1.4 1.6 1.8 2.0 2.2 2.6
9	61.3	0.6 0.8 1.0 1.4 1.6 1.8 2.0 2.2 2.6
10	61.6	0.6 0.8 1.0 1.4 1.6 1.8 2.0 2.2 2.4 2.6
11	61.8	0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0 2.2 2.4 2.6

当我们考虑一个二电池系统时，硅并不是窄禁带宽度电池的最佳选择。但是，硅电池（禁带宽度 1.1eV ）与一个禁带宽度为

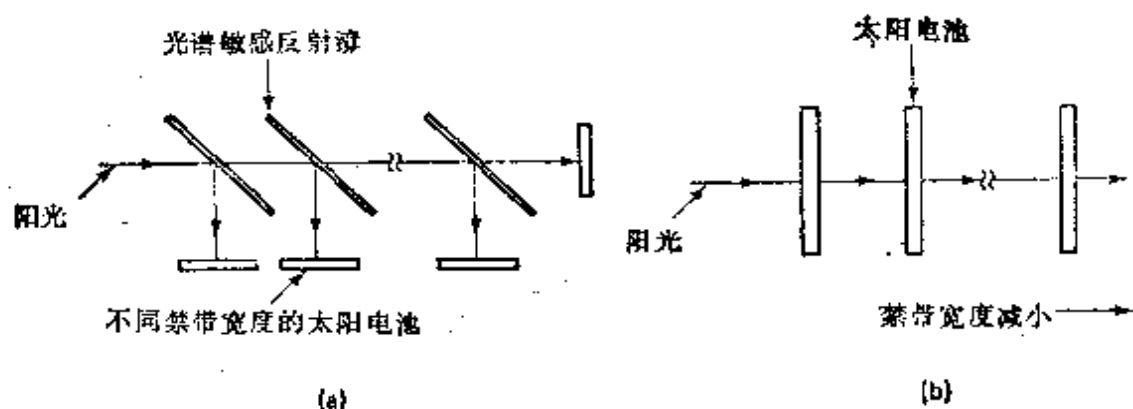
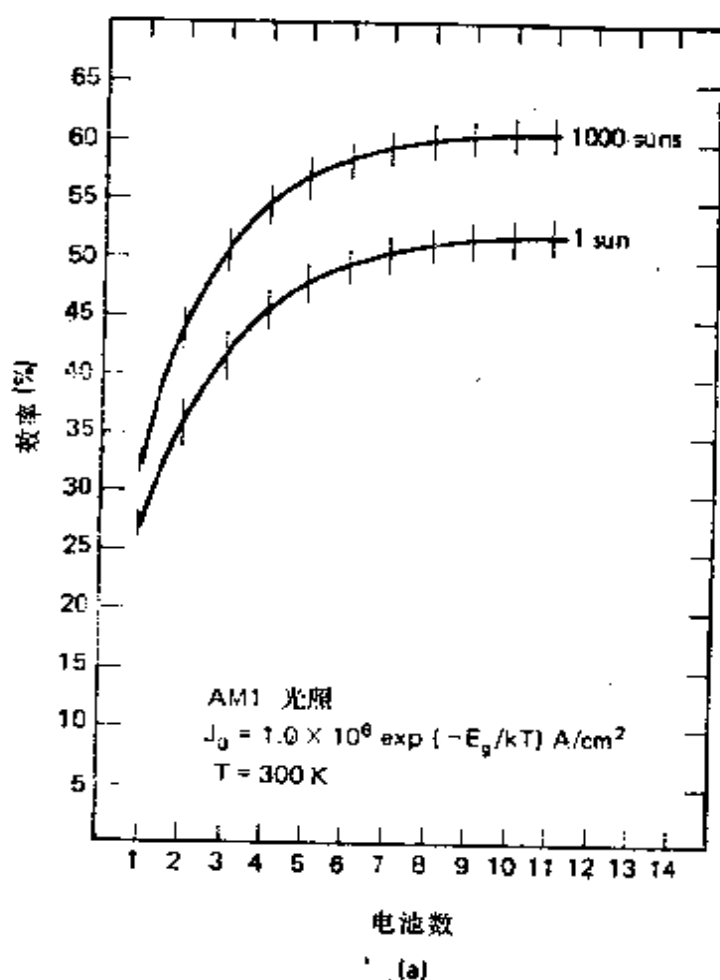


图 11.8 多带隙电池概念
(a) 光谱分离设计方案；(b) 串联电池设计方案



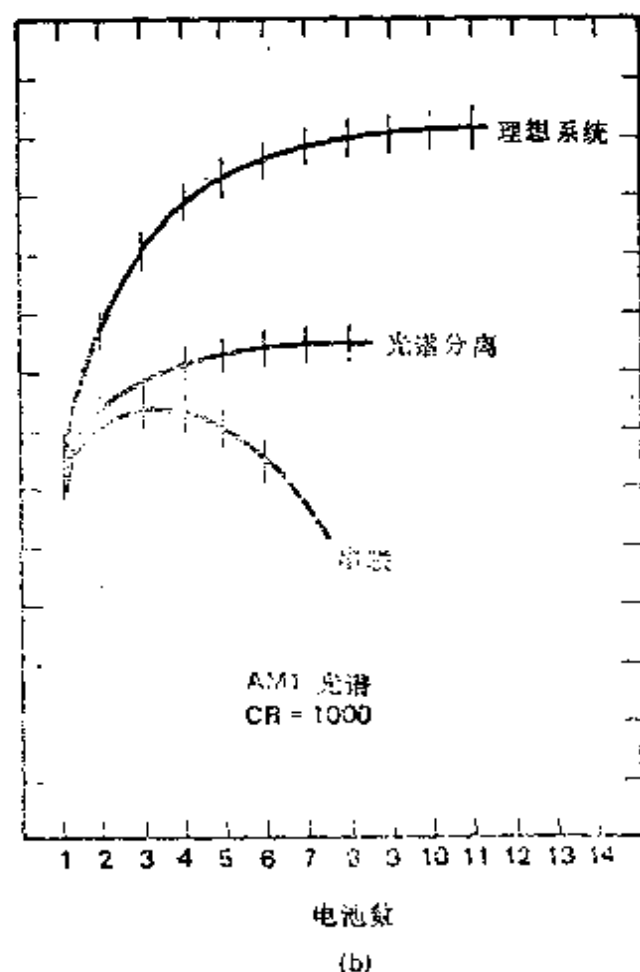


图 11.9

(a) 有聚光和无聚光情况下多带隙电池的最佳效率; (b) 光学损失的影响^[11-10]

1.6~2.1eV 的材料组成的二电池系统可能得到接近最佳的性能^[11-11]。多带隙电池设计方案的第一个真正引人注意的实验结果是 1978 年在一个由硅电池和 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 异质结电池组成的系统上得到的^[11-11]。这个异质结电池的窄禁带层的禁带宽度为 1.61eV。一个波长选择反射镜用来反射能量小于 1.65eV 的光子到硅电池上, 而其余的光子穿过它到达异质结电池。在 165 个太阳聚光下, 该系统的总输出表示系统具有 28.5% 的效率, 这是当时所有光伏系统所达到的最高效率。

在多带隙电池系统中, 不同禁带宽度电池的电压输出不同,

其电流输出一般也不同。对每一种电池设置独立的电路当然可以，但增加了复杂性。另一种方法是将电池串联联接，但如 6.6.4 节所述，串联电池组的电流输出等于其中最差的电池的电流。为保持多电池结构的效率，需要将不同类型的电池设计成具有相同的短路电流。有人认为，这也是一个选择电池禁带宽度以得到最大效率的合理准则^[11-11]。

在这方面，一个有意思的想法是在一块衬底上做出内部串联起来的“串联”电池组。这种电池组可用与 10.4 节中所谈到的

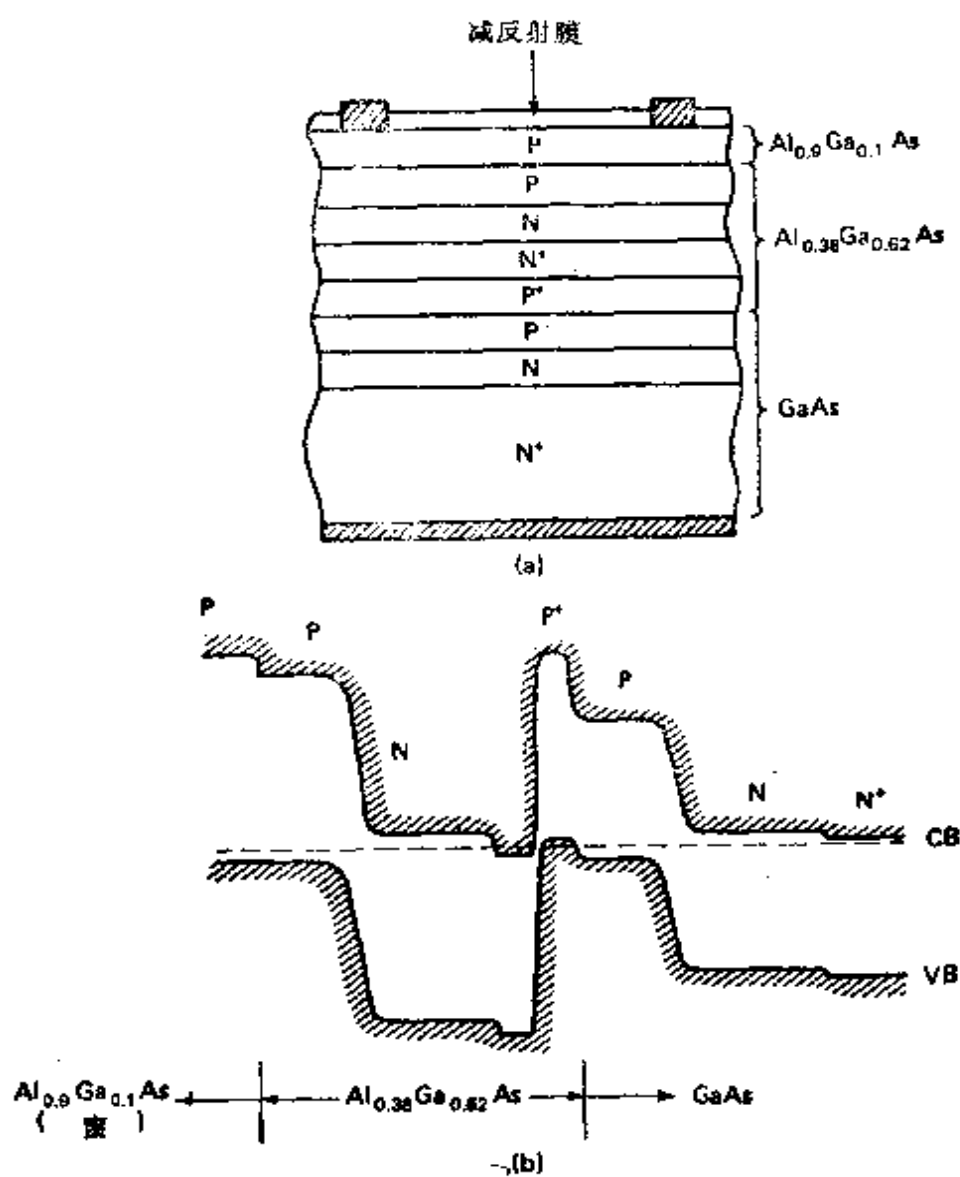


图 11.10

(a) 在一块衬底上用外延工艺制备的二串联电池；(b) 相应的能带图

制造 GaAs 电池同样的外延生长工艺制得。例如，图 11.10 示出了一个二串联电池的结构和相应的能带图^[11.12]。

对下面的 $\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ 电池来说，顶层的作用相当于一个窗口。在这个电池下面有两个具有多种功能的重掺杂层。对上而的电池来说，它们起背表面场的作用；对下面的电池来说，则起前表面场的作用。这二层之间的结区耗尽层很薄，由于量子力学的隧道效应，电子可在其导带和价带之间流动。因而，该区起电池间的串联联接作用，而且对下面的 GaAs 电池来说是一个光学窗口。这种结构的复杂程度不会超出制造半导体激光器发展起来的工艺所能达到的范围^[11.13]。

对串联的多带隙电池来说，一个重要的问题是，当电池在正常条件下工作时，阳光的光谱成分是否有大的变化。这种变化会使电池电流输出的相对值发生变化，因而对系统的效率有显著的影响。这方面的初步资料表明，虽然由于云雾或在太阳刚升起的时候这种变化会发生，但不认为这是一个主要的损失机理^[11.11]。

11.6.3 热光伏转换

在太阳电池中一项重要损失是由于具有远远超过禁带宽度的能量的光子只能产生一个电子空穴对。因而，它对电池输出的贡献与一个能量低得多的光子是一样的。图 11.11(a) 示出入射到硅电池的能量的利用率与波长的关系。

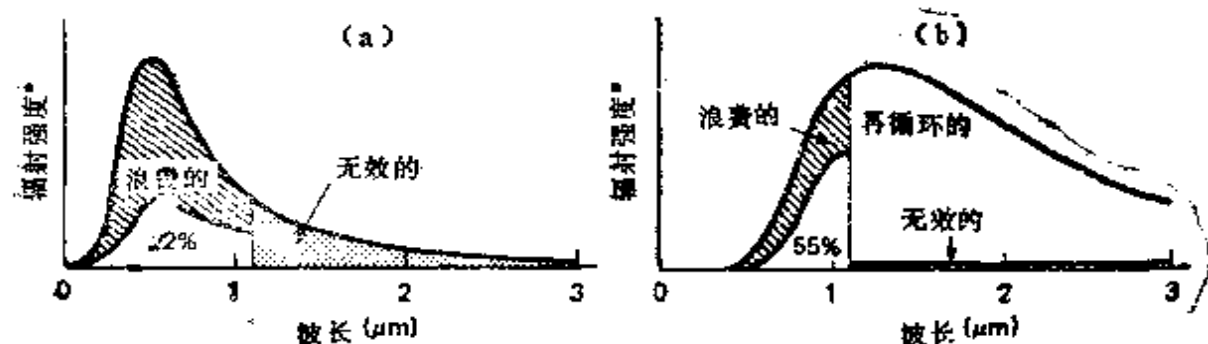


图 11.11 由两种不同温度的黑体辐射到硅电池上的能量的利用情况

(a) 6000°C; (b) 2000°C

(*原文为光谱强度，这里按习惯用法译——译者)

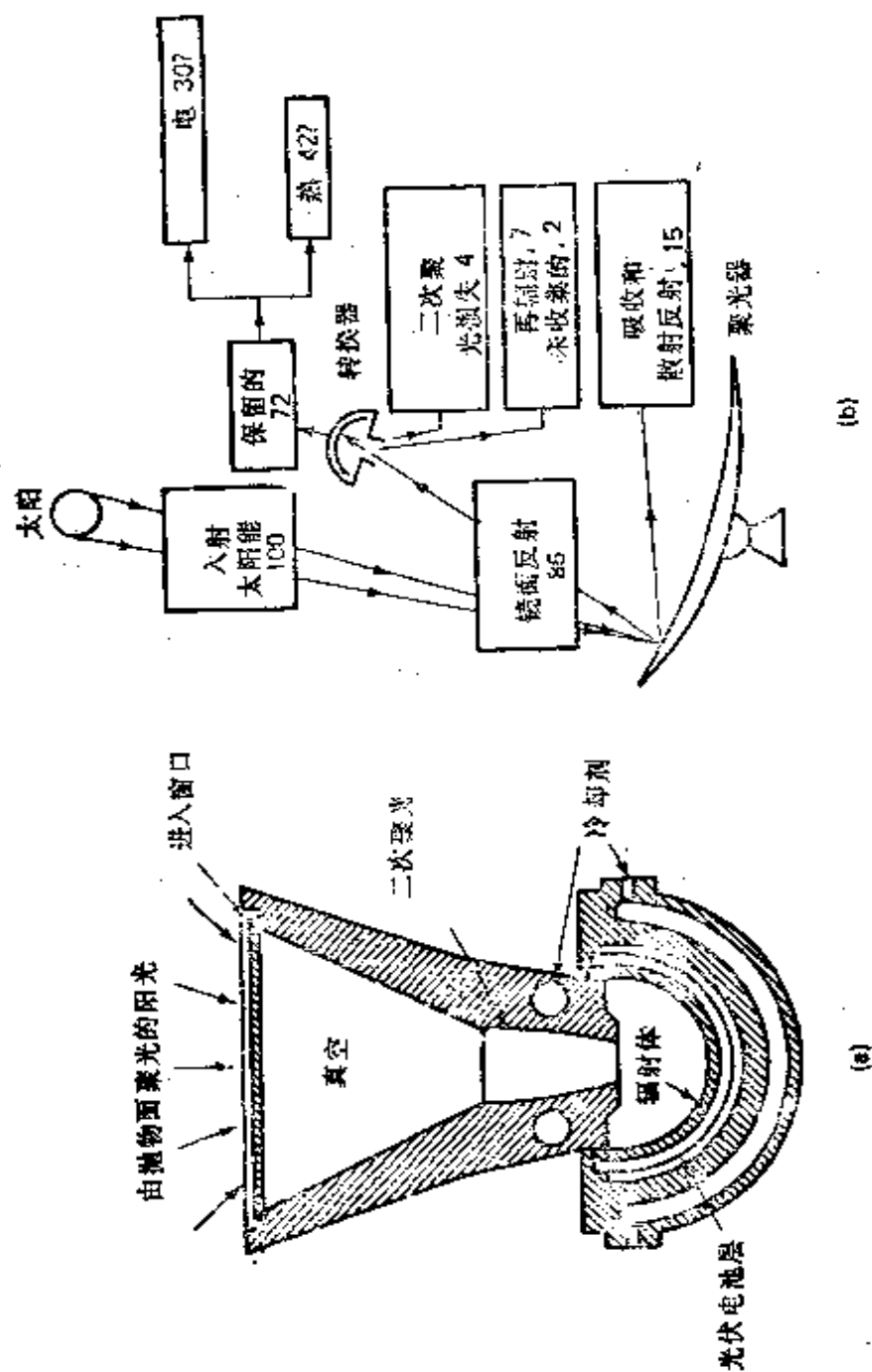


图11.12

(a) 热光伏太阳能转换器的主要部件; (b) 相应的能量转换系统和能量预算 (11.12)

如果用一个温度较低 (2000°C) 的黑体照射太阳电池, 则结果修改为如图 11.11(b) 所示的情况。在能量超过禁带宽度的光子中, 有较多的能量可被利用。实际上, 电池的效率将会降低, 因为能量超过禁带宽度的光子数目相对减少了。但是, 如果大部分无效光子能够改道射到黑体上并在黑体中被吸收, 以保持黑体的温度, 那么情况就不同了。这些光子不再是无用的了, 它们提供用以保持黑体温度所需的部分能量。

在热光伏太阳能转换中^[11.14], 太阳把一个辐射器加热到高温, 然后辐射器再发出辐射到太阳电池上。电池不能利用的长波辐射重新回到辐射器。一个热光伏转换器的主要部件示于图 11.12。电池的背面做成高反射性的, 以便通过电池的长波辐射被反射回辐射器。虽然这种设计的理论效率上限非常高, 但因为它涉及一系列的过程, 使得实验效率未必会达到那么高^[11.15]。

11.7 小 结

采用聚光技术的结果将光伏系统的成本从电池成本转移到聚光元件和跟踪元件的成本上。为保持聚光率超过 12, 聚光器就需要连续跟踪太阳。

在一定温度下, 电池效率的上限随聚光率的增加而增加。但是, 电池应用于聚光系统时, 由于通常工作温度较高, 会抵消这一有利的效果。在低聚光率系统中, 电池的被动冷却是可行的, 对聚光率超过 50 的系统则需要循环水之类的主动冷却。这就导致了利用阳光既产生电能又产生热能的全能系统。

在聚光系统中, 与电池成本相比, 电池效率可能是更关键的指标。为实现增加效率的目的, 允许采用比较复杂的方案。采用禁带宽度不同的几个电池, 对太阳光中的不同光谱成分进行转换的设计, 有可能使系统效率达到 30% 左右。利用热光伏效应来改善太阳光谱成分, 也能达到同样高的效率。

练 习 题

11.1 有一个如图 11.3 所示的荧光聚光器。如果荧光物质再发射的光是以均匀密度射向各个方向, 计算在平板中由于总的内反射所收集的光的百分比。发射点位于平板中间, 假定平板的折射系数是 1.5。

11.2 一个浅结硅太阳能电池的顶层薄层电阻率为 $30\Omega/\square$ 。在一个太阳下, 当电压为 450mV, 电流密度为 $30\text{mA}/\text{cm}^2$ 时该电池给出最大功率。试估算在 100 个太阳下工作并要求横向电流流过表面层引起的功率损失少于 4% 的条件下, 该电池上电极栅线之间的最大允许间隔。

11.3 在一个太阳下 ($100\text{mW}/\text{cm}^2$), 在温度为 300K 时, 一个太阳能电池的开路电压为 0.60V, 短路电流为 0.6A。电池的设计面积为 20cm^2 , 它的理想因数为 1.2, 串联电阻为 0.007Ω 。假定后两个参数不随光强变化, 计算并画出在温度为 300K 时电池效率随聚光率变化的关系曲线聚光率变化范围以 1~50。[利用式 5.17 计算串联电阻对太阳能电池输出的影响。]

11.4 参见图 5.1(b), 选择一个 AM1.5 光照下二电池串联结构的第二电池的理想禁带宽度。假定第一电池为: (a) Si ($E_g = 1.1\text{eV}$); (b) GaAs ($E_g = 1.4\text{eV}$)。计算每一种情况下在 AM1.5 ($83.2\text{mW}/\text{cm}^2$) 及 $1000\times\text{AM1.5}$ 辐照下的极限效率。假定电池温度保持在 300K。

参 考 文 献

- [11.1] W. T. Welford and R. Winston, *The Optics of Nonimaging Concentrators* (New York, Academic Press, 1978).
- [11.2] A. Rabl, "Comparison of Solar Concentrators," *Solar Energy* 18 (1976), 93~112.
- [11.3] J. L. Watkins and D. A. Pritchard, "Real-Time Environmental and Performance Testing of Concentrating Photovoltaic Arrays," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978*, pp. 53~59;
M. W. Edenburn, D. G. Schueler, and E. C. Boes, "Status of the DOE Photovoltaic Concentrator Technology Development Project," *Conference Record, 13th*

- IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978, pp. 1028~1039.*
- [11.4] D. R. Mills and J. E. Giutronich, "Ideal Prism Solar Concentrators," *Solar Energy* 21 (1978), 423~430.
 - [11.5] C. F. Rapp and N. L. Boling, "Luminescent Solar Concentrators," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978, pp. 690~693.*
 - [11.6] J. A. Castle, "10 kW Photovoltaic Concentrator System Design," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978, pp. 1131~1138.*
 - [11.7] R. L. Donovan et al., "Ten Kilowatt Photovoltaic Concentrating Array," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978, pp. 1125~1130.*
 - [11.8] E. C. Boes, "Photovoltaic Concentrators," *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, 1980, pp. 994~1003.*
 - [11.9] R. Sahai, D. D. Edwall, and J. S. Harris, Jr., "High Efficiency AlGaAs/GaAs Concentrator Solar Cell Development," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978, pp. 946~952.*
 - [11.10] A. Bennett and L. C. Olsen, "Analysis of Multiple-Cell Concentrator/Photovoltaic System," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978, pp. 868~873.*
 - [11.11] R. C. Moon et al., "Multigap Solar Cell Requirements and the Performance of AlGaAs and Si Cells in Concentrated Sunlight," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978, pp. 859~867.*

- [11.12] S. M. Bedair, S. B. Phatak, and J. R. Hauser, "Material and Device Considerations for Cascade Solar Cells," *IEEE Transactions on Electron Devices* ED-27 (1980), 822~831.
- [11.13] E. W. Williams and R. Hall, *Luminescence and the Light Emitting Diode*, Vol. 13, International Series on Science of the Solid-State, ed. C. R. Panydin (Oxford: Pergamon Press, 1978).
- [11.14] R. M. Swanson, "A Proposed Thermophotovoltaic Solar Energy Conversion System," *Proceedings of the IEEE* 67 (1979), 446~447.
- [11.15] R. N. Bracewell and R. M. Swanson, *Proceedings of the Electrical Energy Conference*, Institute of Engineers, Australia, Publication 78/3, May 1978, pp. 52~55.

第十二章 光伏系统：组成和应用

12.1 引言

前几章比较详细地讨论了任何一个光伏系统的最主要部件即太阳能电池本身的性能。本章及以后几章将介绍光伏系统所需要的其他部件，还将介绍整个系统的性能及商业化生产的可行性。

由于在地面环境中太阳能系统的输出是间歇式的、并且是难以预见的，因此，如果系统需要随时供电的话，就需要某种形式的储能装置和（或）备用电源。我们将探讨一下目前用的和今后可能利用的储能方式。

太阳能电池产生直流输出功率。最大功率点的电压随太阳光的强度及电池温度变化。由于最常见的供电方式为交流形式，所以在太阳能电池组件与用电负载之间需要某种形式的功率调节装置。本章还介绍了功率调节装置应具备的一般特点。

过去，由于成本较高，太阳能电池的商业性应用只局限于作为边远地区相当小型的独立电源。随着电池价格的不断下降，商业性应用范围在不断扩大^{〔12.1〕}。随后几节将介绍几个应用实例。

12.2 能量的储存

12.2.1 电化学电池

在过去安装的光伏系统中，主要选用电化学电池组作为储能部件。已经使用的有铅酸蓄电池，少数场合使用镍镉蓄电池。这种储能方式的主要困难是蓄电池的成本太高，以及大规模提供蓄电池需要大量的材料。

为了能在机动车辆上以及供电系统的短期储能（“负载校平”）方面应用，正在研制另外几种蓄电池系统^{〔12.2〕}。这就使将来用于

光伏系统的蓄电池有希望做到成本很低^[12.3]。目前看来,最有希望的系统包括锌-氯蓄电池和高温电池,如钠-硫及锂-硫化铁蓄电池。

在电化学储能方面,特别适用于独立光伏系统的一项新成果是氧化还原蓄电池^[12.4]。有关氧化还原对的概念在9.7.2节已介绍过,这个术语是指溶液内部的一种氧化和还原状态。在氧化还原蓄电池中,两种分开的氧化还原对溶液相互保持严格绝缘。充电时一个氧化还原对被氧化,而另一种溶液中的氧化还原对被还原。放电时的情况则相反。

最受重视的氧化还原对溶液是铬(氧化还原对: $\text{Cr}^{2+}/\text{Cr}^{3+}$)和铁(氧化还原对: $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$)的酸性氯化物溶液。图12.1表示一个最简单的氧化还原系统装置。每个槽内装有一种氧化还原对溶液,用泵使这些溶液通过功率转换部分,在这里,溶液被一个高选择性离子交换膜隔开。每种溶液用惰性碳电极作为引出电极。隔膜能阻止铁离子和铬离子通过,但氯离子和氢离子则很容易地通过它。

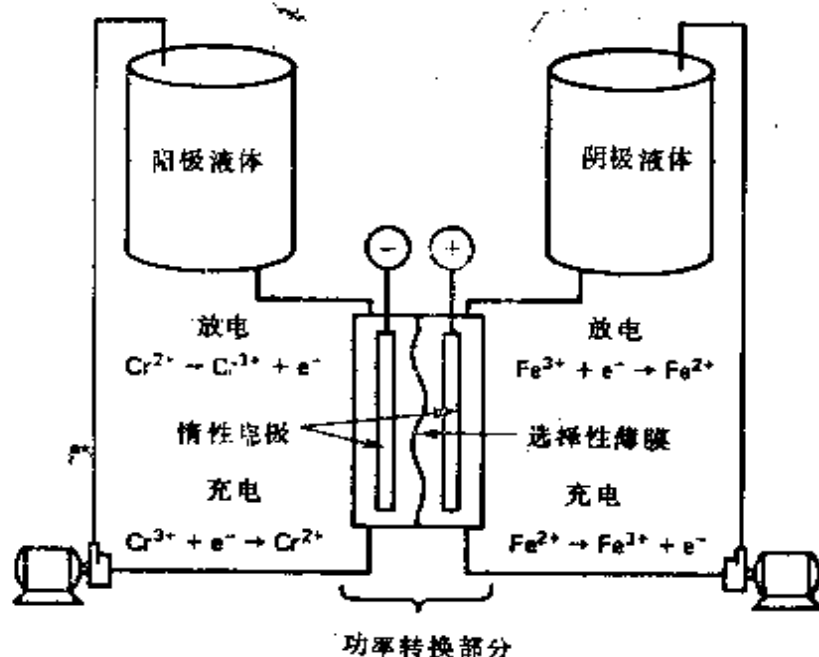


图12.1 一种可反复充电的氧化还原储能系统示意图^[12.4]

当储能系统充电时,铬溶液里的铬离子大部分处在还原态

(Cr^{2+})，而铁溶液里的铁离子大部分处在氧化态 (Fe^{3+})。放电时，发生如下反应：

1. 在阳极，铬离子被氧化：



2. 在阴极，铁离子被还原：



3. H^{+} 离子从阳极穿越隔膜到达阴极，而 Cl^{-} 离子向相反的方向运动以保持电中性。

在外电路中，电子从阳极流向阴极，使电流从电池两端引出。给电池充电时，外加电压加在电池两端，促使反应向相反方向进行。几个电池可以在溶液上并联，而在电气上串联以提高输出电压。

氧化还原系统不同于普通蓄电池的特点是，由功率转换部分的尺寸决定系统功率的大小和由所用液槽容积和溶液浓度决定储能容量这两者可独立选定。这一特点使该系统对独立的光伏系统特别理想，这种系统往往需要一星期或更长时间的能量储备，以应付低日照时期的需要。因为溶液较稀，可采用廉价塑料作为液槽和管道。此外，系统允许的充放电次数理论上无限的，预计系统的工作寿命可达 30 年。这个方法的缺点是电解液的功率密度比较低。一定体积的荷电溶液可产生的电与大约 $\frac{1}{100}$ 体积的

石油燃料所产生的数量相同，不过主要区别在于溶液可以再次充电。

12.2.2 大容量储能途径

蓄电池是一种既适合于很小光伏系统也适合于很大光伏系统的储能装置。正如第十四章所谈到的，能量储存装置作为常规电网的一个组成部分，它起着提高包含有太阳能发电装置的电力系统的可行性的作用。在这方面，值得注意的是几种大容量储能技

术已经在这样的电网中使用。

对于大规模储存电能来说，最成熟的技术是注水储存法。在供电低峰期间，把水从低位水池注入高位水池，用这种方法把能量储存起来。在供电高峰期间，水向相反方向流动，驱动涡轮发电。用这种方法可重新获得原有电能的三分之二。目前，这种方法因缺乏适合建立储能装置的地点而受到限制。对该系统新提出的一项研究成果可在某种程度上消除上述缺点。其做法是把系统中的低位水池建在地下几百米的坚硬岩石中。对于一定的储能容量来说，大的落差还可以允许高位水池做得小一些^[12.2]。

在压缩空气储能二厂，用过剩能量把压缩空气储存在地下容器内。虽然这项技术实际上比注水法要复杂，但它的优点是具有较高的能量储存密度和较大的设置地下容器的灵活性^[12.2]。装置较小，但经济上还是可行的。世界上第一台工业用装置在西德的洪托夫，其工作容量超过五十万千瓦小时。注水储能装置必须大一个数量级才能获得充分的经济效益。

用转换成氢的方法储存电能是特别适合于光伏系统的另一可行途径，因为其电解只需要低的直流电压。实际上，正如在 9.7.3 节所看到的，光电解能够在半导体表面直接完成，虽然目前效率很低。氢作为储能介质，有一些优点：它可以用管道经济地远距离输送；它适合用作移动电站的发动机燃料或燃料电池的燃料，有效地发电。这些特点导致了一个“氢的有效使用”概念。在这里，氢成为人类的基本燃料^[12.5]。从光伏储能的观点来看，氢的一个主要缺点是储能效率目前尚低（低于 50%）。

另外几种可能的方法是以超导磁体的形式储能或用飞轮储存机械能。不过，目前这两种方法从本质上看似乎比其他方法成本更高一些。

12.3 功率调节装置

通常，光伏系统是由太阳电池、储能装置、某种形式的备用

电源（辅助发电机或电网）以及交流或直流电负载组成。为了在这些不同的系统构件之间提供一个过渡接口，必须有功率调节和控制装置。图 12.2 对此作了简要的说明。

最简单的太阳能电池系统是电池直接接到负载上，无论何时，只要有足够的光照，就可以供电。使用直流电动机带动水泵抽水，就是这种系统的一个例子。再一个最简单的系统是在蓄电池储备有足够能量的情况下给直流负载供电，这样就不要备用发电机了。在这种情况下，为了防止阳光充足期间因过充电而损坏蓄电池，系统中只需安装一个调节器。较复杂的一种是采用类似的系统给交流负载供电，在这种情况下，需要用一个变换器把太阳能电池和蓄电池的直流输出功率转换成交流形式。再复杂一些的系统还要包括备用发电机（或供电网），在这种情况下，需用某种控制方式来决定何时启动备用电源。

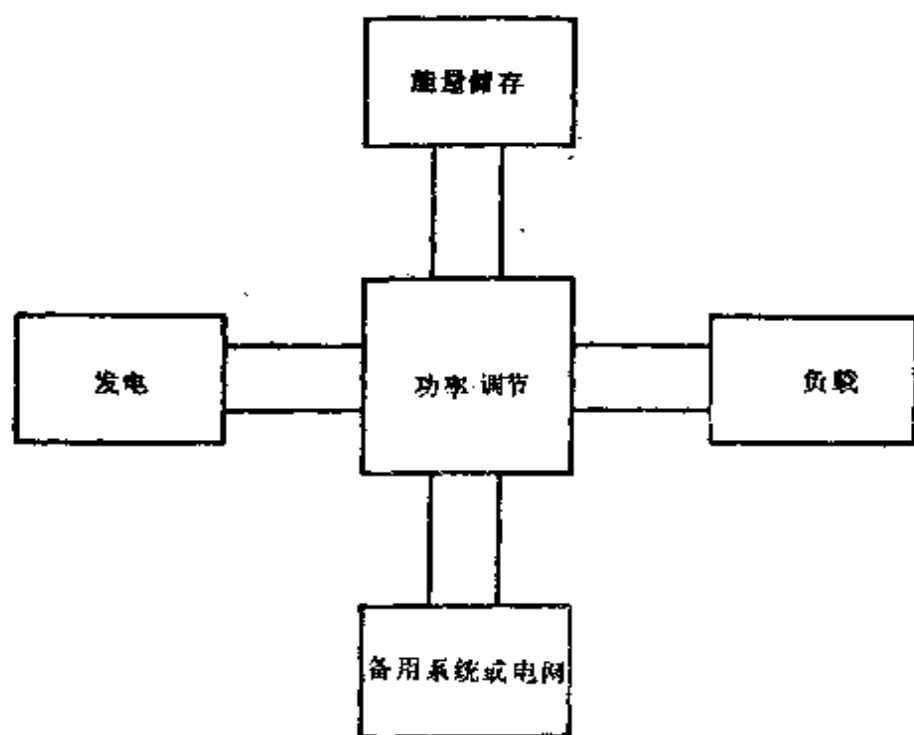


图12.2 功率调节装置的功能

在大多数情况下，该装置不仅起光伏系统的不同部件间的接口作用，而且还执行控制和保护功能

功率调节方面的主要研究方向是提高变换器的性能及降低其成本。关键的性能参数是效率和空载功率损耗^[12.6]。

12.4 光伏应用

过去,由于太阳电池的成本很高,商业性应用只限于远离电网地区的小功率供电。无线电通信系统是太阳电池商业市场的支柱。这些系统从需要峰值几 kW 发电容量的微波中继站电源到供边远地区无线电话业务用的额定功率仅几十 W 的小型电池组件。

其他大量应用还有电动导航设备和报警设备、铁路交叉口装置、气象及污染监控装置、使用外加电流的防腐技术以及电动消费品(如计算器和钟表)。太阳电池也已经应用于发展中国家的电化教学以及与免疫有关的致冷技术。

随着太阳电池成本的不断下降,特别适合发展中国家的其他应用在经济上成为可行的^[12.7]。小规模의提水灌溉和饮水净化就是两个例子。开发性的援助计划也许是为这个市场提供太阳电池的一个途径,这大概会克服为太阳能系统增加投资带来的问题。

对世界能量需求可能有明显影响的第一个光伏应用是在北美为住宅提供电源。在设想的工作方式中,如第十四章所述,住宅还可能同供电网相连,电网起着长期储能装置的作用。第七章谈到的那些硅电池工艺看来能够生产出成本符合于住宅用电要求的电池。

对大规模发电(例如大容量的中心电站)来说,其太阳电池的成本必须约为住宅用电池成本的一半才有竞争力。薄膜太阳电池工艺实现这样低的可能性的要大得多。这种应用方式所要求的其他特性将在第十四章讨论。

12.5 小 结

除少数应用外，任何一个光伏系统除了太阳电池以外还需要其他部件。一个光伏系统大概包括太阳电池、能量储存装置、功率调节和控制装置以及备用发电机。功率调节装置的主要部分一般是变换器，它能把太阳电池和蓄电池的直流输出功率转换成一般负载所需要的交流形式。

过去，太阳电池的商业性应用只限于边远地区的小规模供电。将来，随着太阳电池成本的不断下降，应用范围将会更加广泛。在美国的有电网地区，住宅供电被看作是一个很有潜力的应用，利用目前新发展起来的工艺，这种应用在经济上是可行的。为了使大容量中心电站发的电得以使用，其太阳电池成本必须大约是住宅用电池成本的一半。使用半导体材料最少的薄膜工艺是最有可能生产出成本这样低的电池的技术途径。

练 习 题

12.1 用蓄电池来为一个能提供负载 10kW 峰值功率和 1kW 平均功率的光伏系统储能。假设一个能供给峰值功率的改进型铅-酸蓄电池储存每 kWh 能量的价格为 100 美元，而氧化还原蓄电池功率转换部分每 kW 峰值功率售价为 300 美元，再加上每 kWh 能量储存费 40 美元。对于：(a) 储存 4 小时；(b) 贮存 5 天，购买哪种系统费用低些？

参 考 文 献

- [12.1] D. Costello and D. Posner, "An Overview of Photovoltaic Market Research," *Solar Cells* 1 (1979), 37~53.
- [12.2] F. R. Kalhammer, "Energy Storage Systems," *Scientific American* 241, No. 6 (December 1979), 42~51.
- [12.3] *Handbook for Battery Energy Storage in Photovoltaic Power Systems*, Final Report, DOE Contract No. DE-AC03-78ET 26902, November 1979.
- [12.4] L. H. Thaller, "Redox Flow Cell Energy Storage Systems," Report No. DOE/NASA/1002-79/3, NASA TM-79143, June 1979.
- [12.5] J. O'M. Bockris, *Energy: The Solar Hydrogen Alternative* (London: Architectural Press, 1975).
- [12.6] G. J. Naeijer, "Transformerless Inverter Cuts Photovoltaic System Losses," *Electronics* 53, No. 18 (August 14, 1980), 121~126.
- [12.7] L. Rosenblum et al., "Photovoltaic Power Systems for Rural Areas of Developing Countries," *Solar Cells* 1 (1979), 65~79.

第十三章 独立系统的设计

13.1 引言

过去，光伏系统的商用产品主要是边远地区用的可靠、小型的电源。这些系统只依赖太阳进行工作，它是负载的唯一电源。这一章将讨论这种系统的设计。

图 13.1 是简单的太阳供电系统的示意图。大多数这样的小型系统的负载是利用直流形式的功率，这正是太阳电池所能产生的。除太阳电池方阵和蓄电池组以外，系统的其他组件还有用以防止在晚上蓄电池组向太阳电池充电的阻塞二极管和用以防止在强光照时蓄电池组过充的调节器。

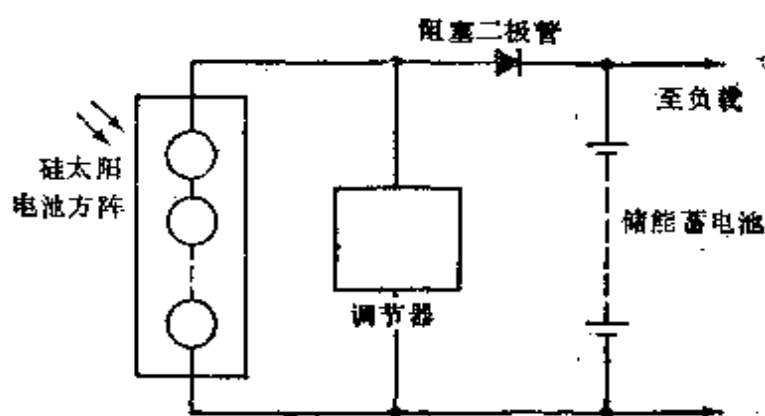


图13.1 简化的独立太阳发电系统^(13.2)

13.2 太阳电池组件的性能

目前，太阳电池组件一般含有足够多的串联单体电池，以便能产生足以给 12V 的蓄电池组充电的电压。组件串联可以增加系统的输出电压，而并联可以增加系统的输出电流。考虑到某些

原因，为了对标称 12V 蓄电池充电，要求串联单体电池数比基本要求数量适当的多一些。对于铅-酸蓄电池组，要使一个标称 12V 的蓄电池完全充足电，需要 14V 以上的电压。如果使用硅阻塞二极管，最少还需增加 0.6V，以使其正向偏置。另外，组件在现场的工作温度常常超过 60℃。温度每升高 1℃，组件的开路电压下降约 0.4% (5.3 节)。这就是说，规定在 25℃ 下开路电压为 20V 的电池组件，开路电压大约减小 3V。像在 6.6.2 节中指出的一样，不同的组件设计会使电池在现场的工作温度不同。组件安装成背面空气可以循环的比不是这样安装的温度要低一些。

为了获得最好的性能，组件的安装应该是在北半球面向南，在南半球面朝北，而且与水平面成一定角度，角度大小依赖于所在地点的纬度。得到全年最大输出的角度大约等于纬度角。对本章所描述的有 10 到 30 天储能容量的电池组系统而言，为了提高系统在冬天的输出，这个角度的最佳值大约要增加 15°。

为对 12V 蓄电池充电而设计的组件通常在白天光照下都能产生足够充电的电压。电流输出与照射到组件上的阳光强度几乎成正比。因此，在设计本章所叙述的系统时，注意的焦点是组件的电流输出。

有关组件性能的最后一点是积聚灰尘的影响。这是一个周期效应，雨后灰尘遮盖最小。对于用玻璃覆盖的组件，得到的数据表明，由于这种影响而引起的损失平均是 5~10%。

13.3 蓄电池性能

13.3.1 性能要求

在目前价格下，光伏系统具有竞争力的特点是其高可靠性和低维修费用。为了实现这些特性，所设计的系统带有一个大的辅助蓄电池储能装置，使它能顺利地渡过可能的最差日照期。一般地说，独立光伏系统的维修主要是蓄电池的维修。

对于这样大容量的蓄电池来说，蓄电池上的充放电循环是一种季节性的循环，夏天对蓄电池充电，而冬天让蓄电池放电。在这种季节性循环之上又加上小得多的日循环，白天给蓄电池充电，而晚上消耗掉它的荷电的很小一部分。因为蓄电是季节性的，最重要的是要求蓄电池的自放电小。另外，还希望有高的充电效率(能够从蓄电池输出的电量与向蓄电池充进的电量之比)。

13.3.2 铅-酸蓄电池组

太阳能系统最常用的蓄电池组是铅-酸蓄电池组。对于专门的太阳能系统来说，像汽车上常用的含镉型铅蓄电池是不合适的，因为它们的自放电率高(每月高达容量的30%)，而且寿命短。

最适合于独立供电系统的商用蓄电池组是固定型也就是浮充式电池组。这些蓄电池组是作为诸如不能断电的供电系统的应急电源而设计的。在这种应用中，蓄电池组保持全充状态，一旦主电源失效，它就立刻满足负载需要。在这类应用中，蓄电池组的使用寿命一般超过15年。这些蓄电池组通常设计为8或10小时放电率，采用铅-钙或纯铅极板。最近，这种类型的蓄电池已经发展到能满足光伏工作模式的特殊要求^[13.1]。

在本章所描述的这类太阳能系统中，蓄电池以一种相当独特的方式工作。在夏天它保持在全充状态，而只有在冬天的大部分时间才处在不完全充电状态。长时间处于充电不足状态会使蓄电池的极板上形成的硫酸铅结晶比放电时通常所形成的要大得多。这个称为硫酸化的过程会使蓄电池容量减少、寿命降低。良好的设计应保证蓄电池的储能足够大，使它在冬天的月份里也能保持在比较接近全充的状态。这样就使得在这些月份里电解液中的硫酸浓度较高而减小冻结的可能性^[13.1]。

在夏天，太阳能电池会产生超过负载需要的过剩能量，因而蓄电池有可能过充。由于以下一些原因这是不希望的。电池过充会引起一个称为“释气”的过程——氢气和氧气从电池中逸出，使电解质损失和引起危险。它还会导致极板的过度长大和活性物质从

电极上脱落，降低蓄电池的寿命。从另一方面来说，实践证明，将铅-酸蓄电池组定期过充是行之有效的。所产生的气体搅拌电解液，防止了较浓物质在电池底部“分层”。过充或“均衡充电”也保证了蓄电池组中较差的电池得到充足电的机会^(13.1)。

图 13.2 表示出当用恒流充电时蓄电池组中单体电池两端电压如何随电池的充电程度变化。当充电到大约 95% 时，单体电池两端电压会突然升高。这相当于释气点。为了限制释气量，同时考虑到定期过充有好处，那么对于图示的情况，合理的折衷办法是用电压调节器把蓄电池组的每个单体电池的电压限制在大约 2.35V^(13.2)。

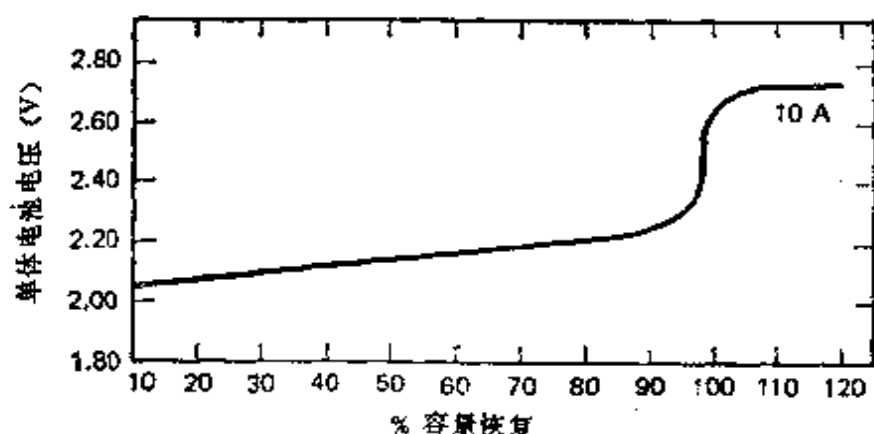


图13.2 适合于太阳能应用的铅-酸蓄电池的恒流充电特性^(13.2)

另一个有关的问题是电池容量随放电率和温度变化的关系。蓄电池的容量一般是在一定放电率下规定的。例如，图 13.3 示出一个蓄电池在两种不同放电率下所测出的输出安培小时数。在 10 小时放电率下，当每个单体电池放电到 1.85V 时，电池组容量规定为 550Ah (55 安培连续放电 10 小时)。可以看出，蓄电池在 10 小时放电率下的实测容量超过规定的值。在 300 小时放电率下 (这更符合太阳能系统工作条件)，蓄电池的容量几乎是所规定值的两倍。由此可见，在设计太阳能系统时，不仅蓄电池的容量是重要的，而且规定该容量时的放电率也是很重要的。

蓄电池的容量随着温度的降低而减小，这是很遗憾的，因为

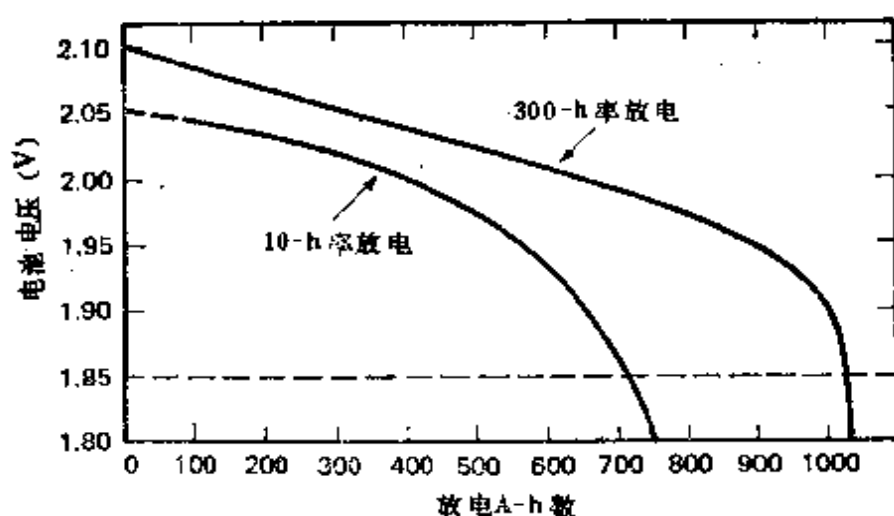


图13.3 不同放电率下铅-酸蓄电池的恒流放电曲线^[13.2]

蓄电池大多是在冬天发挥作用。根据经验，在大约 20°C 以下温度每降低 1°C 容量大约下降 1%。由于这个原因，再考虑到电解质冻结的可能性，最好是将蓄电池与非常冷的环境隔绝开。在另一极端，高温会加速蓄电池的老化，增加自放电速率，增加电解质的消耗，因此，也要求蓄电池组得到适当的遮盖以避免高温。

在中等充电率和放电率下，铅-酸电池组大约有 80~85% 的充电量可以再放出来。大部分无效消耗是由于充电时释气所引起的。在独立光伏工作模式中，在冬天，不大可能出现释气，因为此时蓄电池要向相当大量的负载供电。因此，在这些关键月份充放电效率要比上面的值高很多。曾经有过库仑效率高到 95% 的报导^[13.3]。

13.3.3 镍-镉蓄电池组

极板盒式的镍-镉蓄电池组也已用到太阳能系统中。与 13.3.2 节所述的铅-酸蓄电池组比较，它们的主要优点是：

1. 能经受过充而不损坏；
2. 能经受长时间少量充电而不损坏；
3. 机械强度好，使得它们更便于运输；
4. 能经受冷冻而不损坏。

它们的主要缺点是:

1. 价格较高 (在大量应用的情况下, 对同一指定容量, 其价格约高三倍);
2. 充电效率低 (对于太阳能工作是 55~60%);
3. 在太阳能应用中, 由于放电速率低, 使较小的容量显著增加。

就现在来看, 在大多数太阳能应用中它们的优点并不超过它们的缺点。

13.4 功率控制

阻塞二极管通常接在蓄电池和太阳电池方阵之间, 以防止在晚上蓄电池通过太阳电池方阵漏电。当太阳电池方阵向蓄电池充电时, 其充电电压为方阵电压减去二极管上的电压降。对于硅二极管, 其管压降大约是 0.6 到 0.9V, 但若使用肖特基二极管或锗二极管, 则管压降减少到 0.3V。

为防止蓄电池组过充, 需要某种方式的电压调节。对于小的太阳电池方阵, 可以用简单的线性分流调节器耗散不需要的功率。图 13.4 示出一个 12V/60W 太阳电池方阵的调节器线路

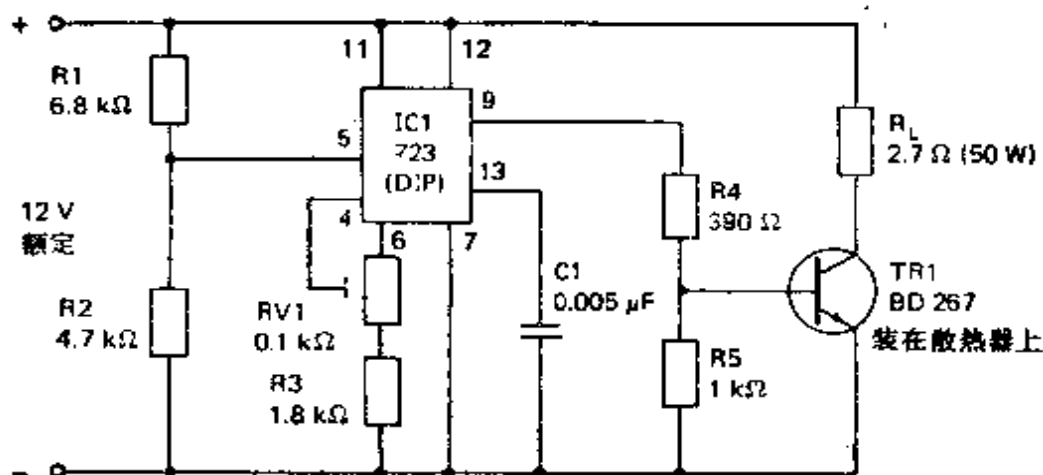


图13.4 12V/60W太阳电池方阵的分流调节器^[13,23]

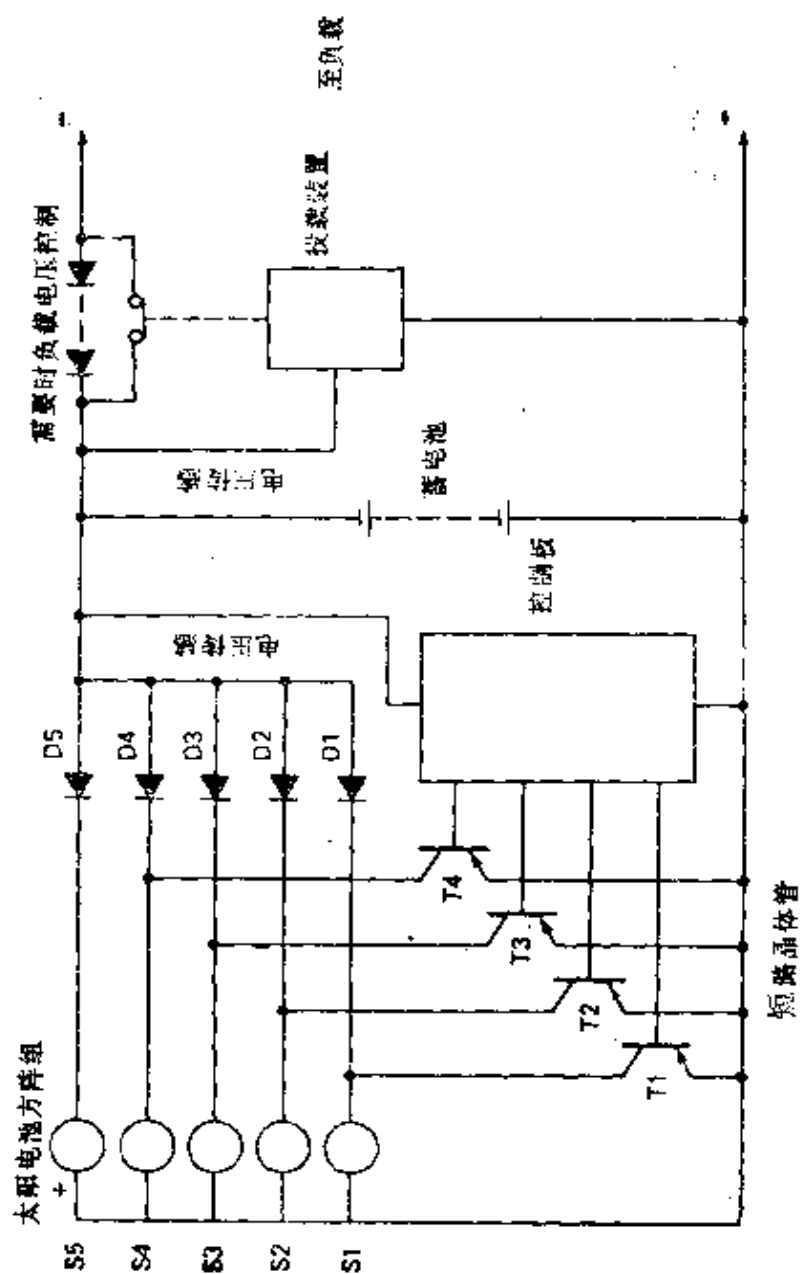


图13.5 大太阳能电池方阵可能采用的短路调节方法

这种类型的调节除非方阵的各部分装有旁路二极管这样的保护元件，否则不宜采用 [13.3]

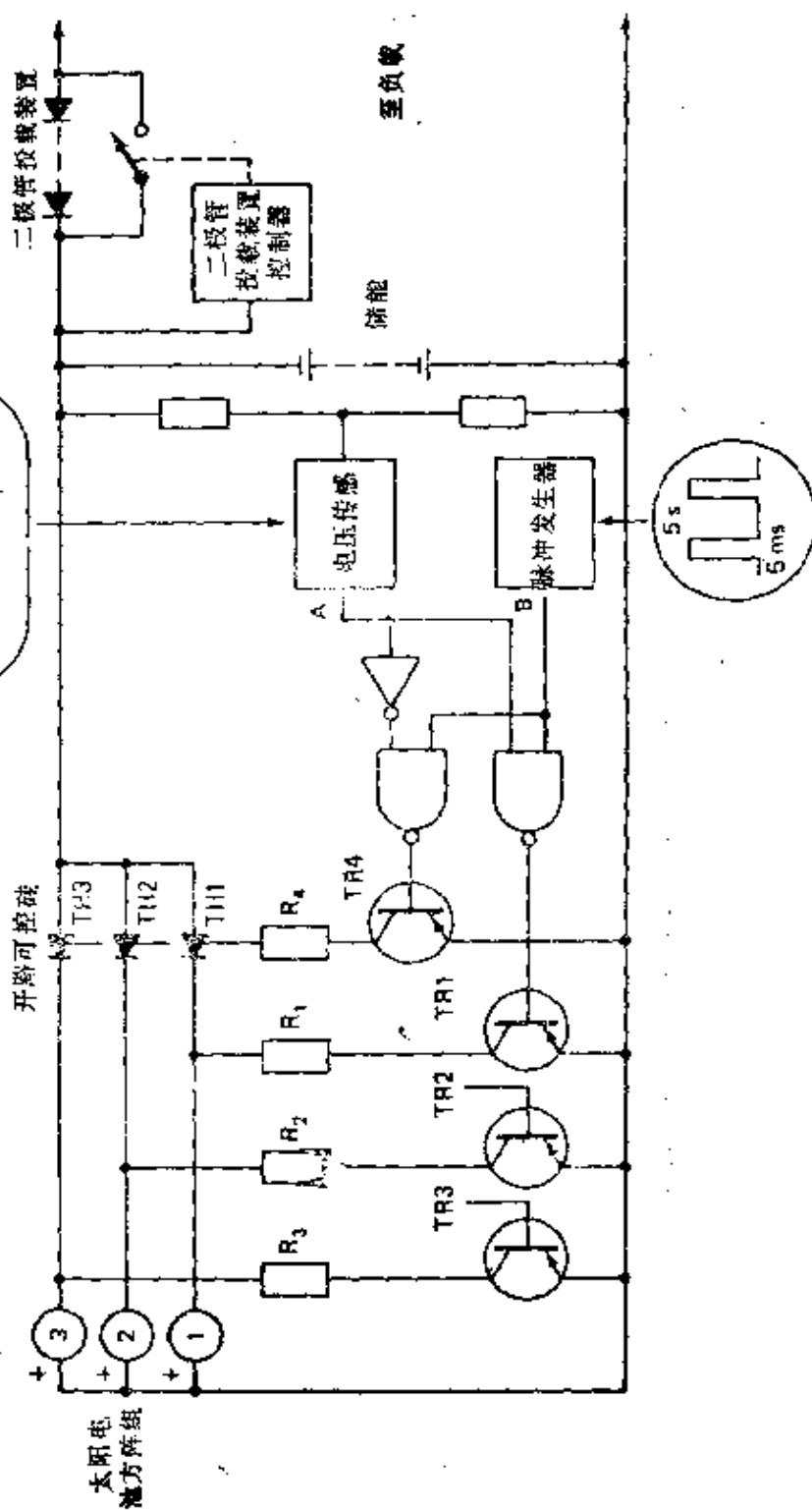


图 13.6 可控制万略型通用-5(13.2)

图^[13.2]。RV1 调整到调节器接通的位置上，以大约 14.1V 为宜。蓄电池充电到高于这一电压时，充电电流就通过 R_L 和 TR1 分流。

大太阳能电池方阵不宜用这种方法，因为它会产生大量的热。较好的方法是由分散的太阳能电池本身以热的形式消耗掉多余的能量。这可通过将太阳能电池方阵的一部分短路或开路来实现。

图 13.5 是短路型调节器的原理图。晶体管能把太阳能电池方阵并联的各个部分依次地短路掉以维持蓄电池电压在所希望的极限值以下。虽然个别单体电池短路是容许的，但如果整列串联的单体电池都短路就可能出现问题。正如 6.6.4 节所讨论的那样，输出低于平均电流的单体电池就变成反向偏置，实际上它要耗散电池组件的全部峰值输出。采用这种短路型调节，现场失效是常见的。因此，除非有像旁路二极管这样的特殊保护元件接入构成方阵的太阳能电池组件中，否则不宜采用这种方法。

另一种方法是使方阵并联的某些部分开路。采用可控硅的一种方法示于图 13.6 中。让我们考虑太阳能电池方阵组 1，根据蓄电池的电压，脉冲可能加到 TR1 或 TR4 的基极。脉冲加到 TR1，就保证 TH1 不导通，方阵的那一部分便开路。脉冲加到 TR4 便将可控硅转换到它的导通状态。在这个状态下，它完全

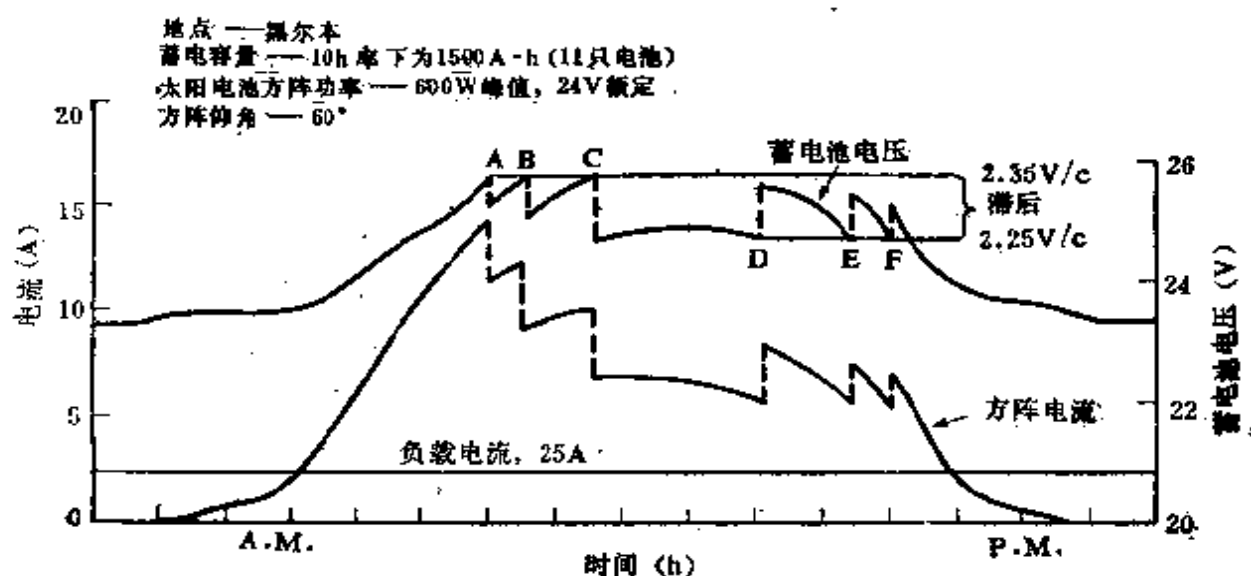


图13.7 图 13.6 的调节方法的工作特性^[13.4]

起到普通阻塞二极管的作用。为了稳定，电压传感线路上要有点滞后。图 13.7 示出在夏天（这时蓄电池接近全充状态）这种系统所得到的蓄电池电压和太阳电池方阵电流。

13.5 系统的设计

为设计太阳能系统，必须知道所要提供的负载的精确数据和指定地点所能得到的最可靠的辐射数据。

对于像微波中继站这样的应用，负载很容易确定，因为它实际上是恒定的。其他用途，如家用无线电话，传播时要求功率大，负载依赖于用户的叫话率，因此，不能预测。对于使用独立太阳能系统的边远地区不大可能有现成的详细辐射数据。最好的办法是从类似地区的观测站所记录的数据外推得到所需的数据。在缺乏比较详细的资料时，参考文献 13.4 是很好的数据来源。

太阳电池的提供者和主要用户已研究出用以设计光伏系统的计算机程序，计算诸如温度对太阳电池和蓄电池电压的影响以及蓄电池容量随温度下降这样的一些问题，这些程序是十分完善的。现在要叙述的是一个简单的设计方法，这样的方法不仅能说明所涉及的概念，而且对数据不足、不能进行较详细的设计的情况，这样的简单设计方法是足够的。

设计程序的第一步是选择所需要的蓄电池的储备容量。可以认为，蓄电池的储备容量要能满足两方面的需求。一是在较长时间没有阳光也就是太阳电池系统失效的情况下提供一个储备容量来补偿。另一目的是提供季节性的储备^[13.3]。

所需要的储备容量的大小与几个因素有关。气候是其中之一。阳光充足且干燥的地区比有雾的海岸地区所需要的储备容量要少。地点的远近、系统控制的规律性和系统失效的后果是另外一些重要因素。通常，储备 10 至 20 天的容量较为适宜，30 天就过分保守了。在选定蓄电池容量时，要考虑温度和放电率对蓄电池容量的影响。

选定储备容量之后，下一步是决定在太阳能输入的正常季节性波动下系统中蓄电池可接受的放电深度。正如 13.3.2 节指出的那样，过深的放电深度会缩短铅-酸蓄电池的寿命。放电到可获得容量的 50% 的深度是所希望的最大值。反之，放电深度设计得非常浅会增加太阳电池方阵的大小。随着太阳电池组件价格的下降，最佳设计可以改变到较浅的放电深度。

由于季节性的波动而引起的放电深度一旦选定，蓄电池的总容量就可以计算。既然要求蓄电池即使由于季节的变化而处于荷电最低的状态也能提供储备容量 (C_R)，那么所需的总容量是 $C_R/(1-d)$ ，其中 d 是所要求的放电深度。

蓄电池的大小现在已经选定，下一步是选择太阳电池方阵的大小。电流输出和电压输出分别确定。电压输出要选得足够大，以保证全年都能有效地对蓄电池组充电。电流输出的选择要保证蓄电池不会因季节变化的影响而放电至低于所选定的放电深度。

为了设计继续进行，就需要辐射数据。这些数据通常包括水平面上的总辐射 (R) 以及水平面上的散射辐射 (D)。如果后者得不到，可以用参考文献 13.5 所描述的方法提供一个合理的估计。为了把可得到的数据转换成照射在不是水平方向的太阳电池方阵上的辐射数据，必须做一些假设。假设在水平面上的日平均直射辐射 (S) 是由下式给出：

$$S = R - D \quad (13.1)$$

从图 13.8(a) 可看出，与水平面成 β 角的表面上的直射分量由下式给出：

$$S_\beta = S \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha} \quad (13.2)$$

其中， α 是中午时的太阳高度。从图 13.8(b) 可看出， α 由下式给出：

$$\alpha = 90^\circ - \phi \pm \delta \quad (13.3)$$

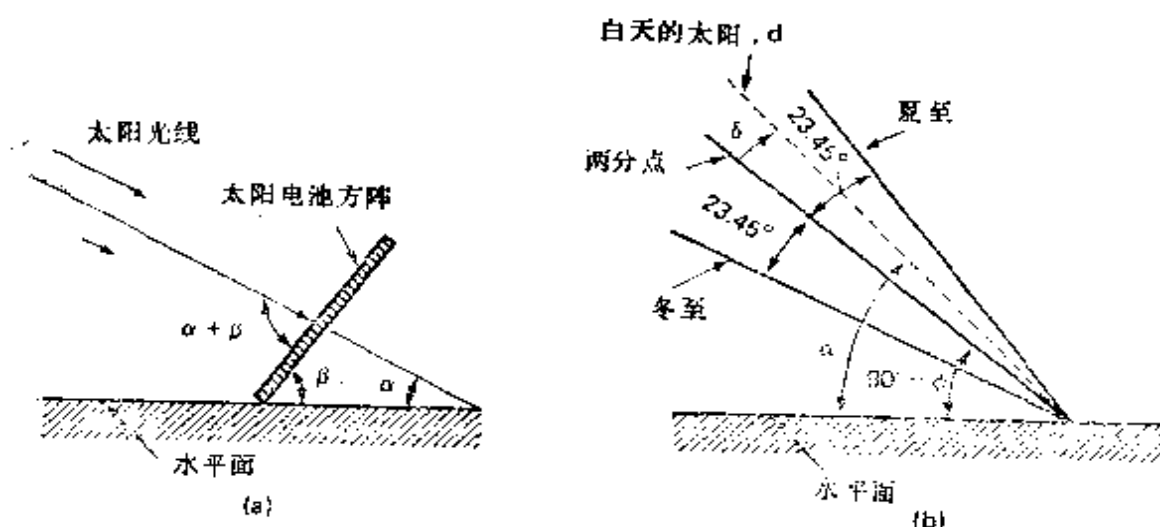


图 13.8

(a) 中午时与水平面成 β 角的太阳电池方阵上的太阳辐射 (α 角是太阳高度)

(b) 太阳高度 (α)、太阳赤纬 (δ) 和地理纬度 (ϕ) 之间的关系

北半球采用正号，南半球采用负号。式中， ϕ 是地理纬度，而 δ 是太阳的赤纬，可由下式给出：

$$\delta = 23.45^\circ \sin\left[-\frac{360}{365}(d - 81)\right] \quad (13.4)$$

其中 d 是从一年开头算起的天数。假设散射辐射与电池方阵的倾斜角无关，则在方阵上的总辐射由下式给出^[13.2]：

$$R_p = S \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha} + D \quad (13.5)$$

式 (13.5) 只是在正午时才严格正确，但它为将每日水平辐射转换成倾斜表面上的辐射提供了一个合理的近似。更复杂的算法会得到更加精确的结果^[13.2]。

通过一个具体例子，能够更好地描述设计程序。我们来设计一个在澳大利亚的墨尔本（南纬 37.8° ）能够连续为一个 24V 直流负载提供 100W 功率的太阳能系统。

对于这一系统，储备天数选为 15 天。因为负载要求 100Ah/天，这相当于 1500Ah 的储存容量。考虑到太阳光强的季节性变化，同时为了延长蓄电池的寿命，放电深度的设计值选为 25%，

这样,得到在 480 小时 (20 天) 的放电率下的总装配容量为 $2000\text{Ah} [1500\text{Ah}/(1-0.25)]$ 。

下一步的设计任务是决定为了保证蓄电池放电时不会低于 25% 的放电深度所要求的太阳电池组件的大小。固定太阳电池方阵的最佳倾斜角是纬度角加 15 到 20° , 对于现在的位置来说就是 60° 。这个与水平面的夹角 β 一旦选定, 原始的辐射数据就可转换成这一倾斜表面上的辐射数据。墨尔本的数据由表 13.1 给出。在这个地区, 任一与水平面成 60° 的方阵上的平均日辐射是 $21.0\text{MJ}/\text{m}^2$ 。令全年输入方阵的电量等于负载所需要的电量, 就可计算出方阵必须产生的电流的下限。这是储备容量为无限大的理想系统的情况。在现在的情况下, 负载要求 $100\text{A}\cdot\text{h}/\text{天}$ ($100\text{W} \div 24\text{V} \times 24\text{h}$)。在倾斜表面上平均日辐射强度是 $21.0\text{MJ}/\text{m}^2$, 用 3.6 去除, 得到 $5.83\text{kWh}/\text{m}^2$ 或 $583\text{mWh}/\text{cm}^2$ 。这相当于受峰值阳光强度为 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 的晴朗阳光照射 5.83 小时。因此, 在 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 辐射强度下, 太阳电池方阵峰值电流至少必须是 17.2A ($100\text{Ah}/5.83\text{h}$)。

考虑到实际上提供给蓄电池的电量不是全都可以从蓄电池中取出, 在释气点以下估计只有 95% 的电量能取出, 并且灰尘积聚使性能平均降低 10%。计入这些影响以后, 方阵峰值电流下限估计是 20.1A ($17.2 \div 0.95 \div 0.90$)。

用最坏月份的辐射数据重做这些计算就可以得到方阵必须产生的电流的上限值。如果系统是用这样的方法设计的, 则除了天气寒冷的时期以外, 蓄电池将非常接近于全充状态。对现在这个例子而言, 最坏的月份是六月份。在这个月份中, 在倾斜表面上的辐射量只相当于 4.26h 的充足太阳光辐射。得到的上限值是 27.5A ($20.1 \times 5.83 \div 4.26$)。

方阵的最佳额定峰值电流将位于这两个极限值之间。它可由尝试法算出, 该计算包括对蓄电池全年荷电状态的检查。对这个例子来说, 最佳的方阵额定峰值电流是 25A 。表 13.1 列出全年各个月份中所产生的 Ah 值、所消耗的 Ah 值和蓄电池的荷电状

表13.1 独立太阳能系统设计数据

系统数据

位置：墨尔本 南纬37.8°
 方阵倾角：与水平成60°
 方阵额定峰值电流：25A
 负载：100W 24V
 蓄电池容量：2000Ah

月份	平均日辐射量 (mWh/cm ²)			月A-h数		蓄电池状态	
	总辐射(R)	散射(D)	方阵上*	方阵+	负载**	差值	开始 最终 %全充
1	839	210	688	4559	3147	1412	2000 2000 100
2	708	149	648	3878	2842	1036	2000 2000 100
3	562	166	609	4035	3147	888	2000 2000 100
4	436	127	575	3687	3045	642	2000 2000 100
5	297	98	463	3068	3147	-79	2000 1921 96
6	246	79	426	2732	3045	-313	1921 1608 80
7	277	82	462	3061	3147	-86	1608 1522 76
8	374	120	520	3446	3147	299	1522 1821 91
9	516	148	596	3822	3045	777	1821 2000 100
10	697	197	673	4459	3147	1312	2000 2000 100
11	732	241	627	4021	3045	976	2000 2000 100
12	890	214	701	4645	3147	1498	2000 2000 100

* 用式 (13.5) 计算；*按下式计算，额定峰值电流 × 月天数 × 平均日辐射量 × 充电效率 × 灰尘堆积因子/100mW/cm²；
 ** 包括每月 (30天) 蓄电池峰值容量的30%放电 (原文为3% - 译者注)。
 来源：采用参考文献13.2的数据。

态。应该注意的是，蓄电池全年荷电维持在设计数值的75%以上。如果它下降到这个数值以下，则方阵的尺寸就要增大。如果荷电状态总是维持在大大高于这个数值，则用小一些的方阵会更为经济。虽然表中列出的是全年的所有月份的计算结果，但只有那些月辐射比平均值小的月份才需要加以考虑。计算结果表明，采用这样的设计方法将导致在夏天大量的能量被浪费掉。图3.9示出在三种不同方阵额定电流下蓄电池的荷电状态在一年中的变化。它清楚地说明，方阵尺寸稍稍增加一点就有明显的影响。例如，方阵尺寸增加4%比蓄电池容量增加一倍对提高蓄电池全年的荷电水平的作用还要大。

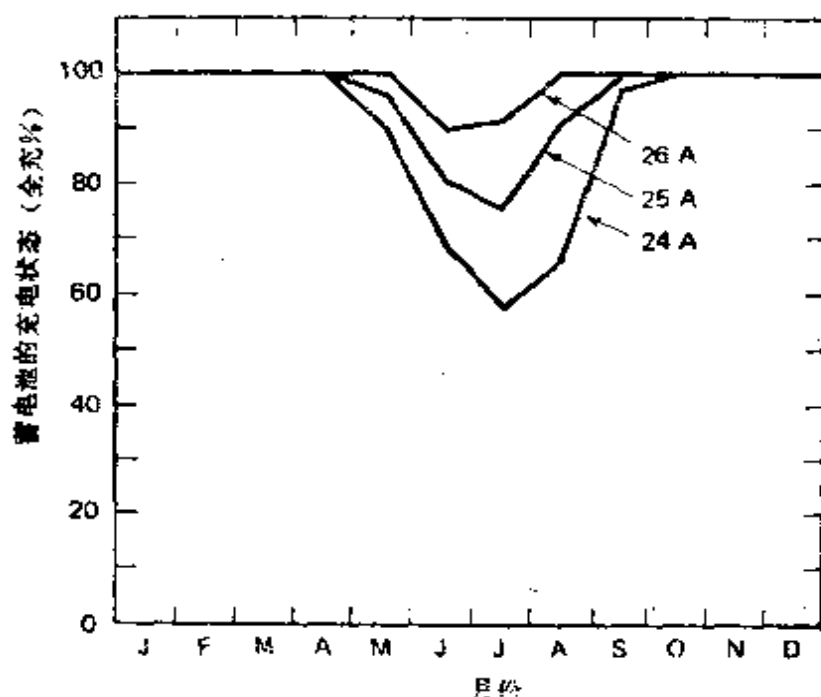


图 13.9 正文中的设计实例在三种不同方阵尺寸下的蓄电池荷电状态

为了完成系统的设计，必须规定方阵的电压。若要上述设计精确有效，在正常工作中所能够达到的最高温度下，甚至在蓄电池接近充满时（每只单体电池 $\sim 2.35\text{V}$ ），方阵也必须能够提供所需要的峰值负载电流。对这个设计实例而言，其假设的最高温度是 60°C ，方阵就必须能够在温度为 60°C ，电压为 29V 的情况下 $[12 \times 2.35\text{V} + 0.8\text{V}$ （为阻塞二极管）]提供 25A 的峰值电流。

因此，在 60°C 时方阵的额定峰值功率必须是 725W 。因为方阵功率下降大约为 $0.5\%/^{\circ}\text{C}$ ，所以在正常规定温度 (25°C) 和入射功率为 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 的情况下，方阵的额定峰值功率必须是 879W 。

但是，这是一个保守的设计，因为在夏天会有大量的能量白白地浪费掉。在寒冷的月份（此时太阳电池组件的输出是最关键的时候），墨尔本的天气数据表明，环境温度在 20°C 以上是不大可能的。对于普通的组件，在这些月份电池温度不大可能超过 44°C 。如果方阵输出电压 29V 是在这个温度下规定的，那么在冬天的月份方阵将提供所计算的功率。夏天时的输出会比计算值低，可是，由于在这些月份产生的功率大大有余，所以这不算个问题。

在墨尔本，蓄电池在七月达到它的最低荷电状态。在这个月份，墨尔本的平均温度大约是 10°C 。假设蓄电池在此环境温度下工作，则需增加蓄电池容量以保证在这个月它也能够满足储备容量的要求。假设在此温度下容量减少 10% ，那么在室温下 480 小时放电率时要求容量增加到 2222Ah 。对太阳电池组件和蓄电池的要求也许都必须做某些修改，使它们可以从市售元件互连组成。阳光充足的地区可以用比较小的方阵来满足同样负载的需要。例如，在澳大利亚的某些地区，只用对墨尔本所算得的方阵大小的三分之二就可满足同样负载的需要^[13.2]。图 13.10 是为了供给大约相同大小的负载而设计的太阳能工厂的照片。一只装货箱既用来支撑太阳能组件，又用来遮蔽蓄电池和控制用的电子设备，并作为工作人员的工作间。

设计步骤概括为：

1. 确定负载数据；
2. 按照地理纬度和当地的气候特征选定蓄电池的大小；
3. 选定方阵的倾角；
4. 从落在选定倾角的方阵上的平均和最小月辐射量估算方阵大小的下限和上限；
5. 求出方阵的最佳尺寸以保持蓄电池全年荷电都在某一百

分数之上；

6. 如果需要的话，修改方阵的倾角以求得最佳值；

7. 规定最高工作温度下的方阵电压，要求在这个电压下能提供满负载电流。

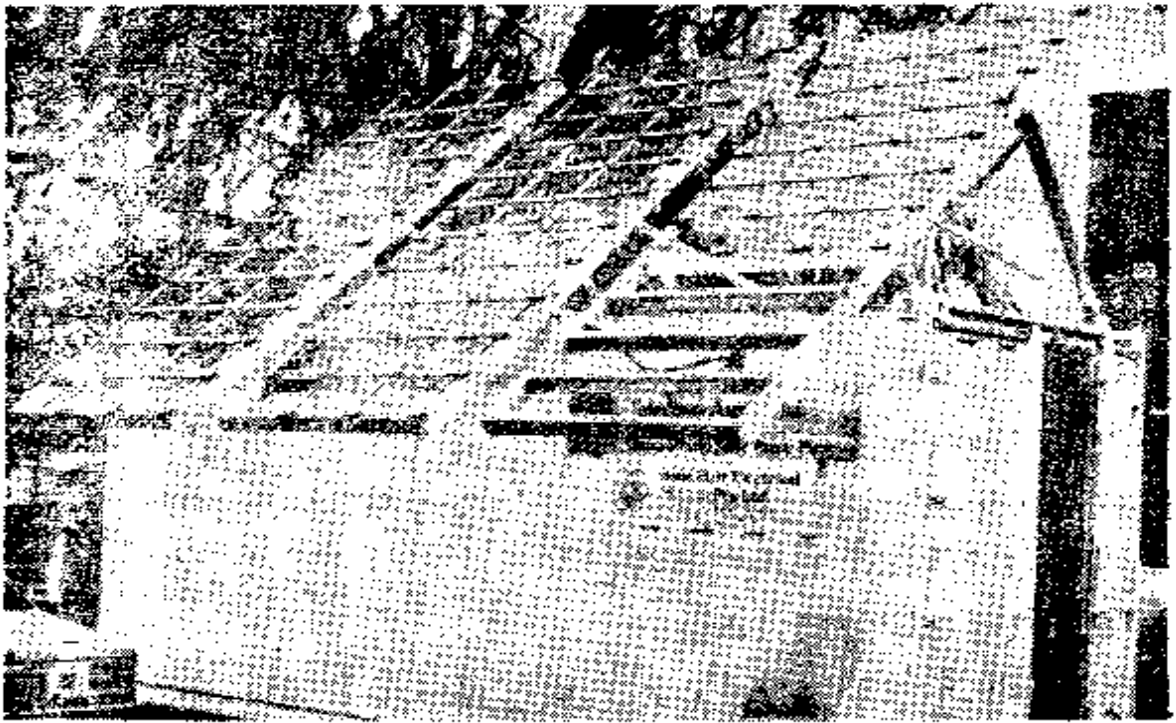


图 13.10 为了向微波中继站连续提供约 100 到 150W 的电能而设计的太阳能电源

装货的箱子既用来支撑太阳能电池组件，又用来遮蔽蓄电池和控制用的电子设备，并作为工作人员的工作室

13.6 水 泵

小型水泵很适合于利用太阳能，其原因有两个：第一，太阳能电池方阵可以直接与泵的电动机连接，不需要过渡的功率调节，也不需要蓄电池储能，因而系统十分简单、轻便、很少需要维修；第二，很多应用场合都是当太阳光弱时要求泵水也少，这就使系统设计经济。通过储存泵上来的水可以很好地实现能量的储存。

这样的小型太阳能水泵最能发挥作用的是为不发达地区提供灌溉^[13.6]。灌溉可以大大地提高单位面积产量，从而增加收益。

微型光伏发电灌溉系统 ($\sim 250\text{W}$) 对个体农户的小块耕种非常适用。当个体农户无法增加必要的资金时, 建议在开发性援助计划中包括这种系统^[13.6]。这样做有两个目的: 其一是在这些地区增加粮食产量; 其二是在近期内为太阳能电池提供一个大的市场以加速其发展。

13.7 小 结

一般地说, 独立光伏系统的维修主要是蓄电池的维修。它需要每年或半年加一次电解液。但是, 为使蓄电池得到最长寿命, 系统设计必须谨慎, 既要防止铅-酸电池过充, 又不能充电不足, 否则, 它会使蓄电池长时间处于低储存电量状态。

电子通信设备所要求的功率和太阳能电池的价格都不断下降, 这就使得无线电通信成为太阳能电池在地面大量应用的主要方面。类似于本章所描述的独立系统已经推广应用到微波中继站、导航设备、气象站和防腐方面。

在独立系统的设计中, 用大的储存容量来保证高可靠性, 而通过选择适当大小的太阳能电池方阵来保证在低光照的冬季月份中蓄电池能保持不低于所要求的荷电状态。在这个设计模型中, 太阳能系统全年不会产生最大的功率输出。理想的独立光伏装置, 方阵的额定峰值功率必须大约是系统供给的平均功率的五倍。在边远地区, 此值可能增加一倍或更多倍。

练 习 题

13.1 就表 13.1 的设计例子, 试将蓄电池荷电状态的典型日周期变化与季节性变化进行比较。

13.2 对于北纬 34° 地区, 利用正文中所述的近似方法, 求出在 11 月份系统输出为最大的太阳能电池方阵的倾斜角。11 月份在这个地区的水平面上的平均总辐射是 $12\text{MJ}/\text{m}^2/\text{天}$, 而相应的散射辐射值是 $4.1\text{MJ}/\text{m}^2/\text{天}$ 。

13.3 设计一个位于北纬 23° 地区的独立光伏系统。这个光伏系统对:

需要 48V 直流电压和 250W 功率的恒定负载供电。1 至 12 月份水平面上的总辐射数据 (括号内的数字为相应的散射辐射值) 分别为: 15.5 (13.2), 17.2(4.2), 21.6(4.0), 23.3(6.0), 24.9(7.0), 24.1(8.8), 23.8(8.9), 22.9(8.1), 20.7(7.3), 8.9(4.8), 15.6(4.7) 和 14.5(3.8) MJ/m²/天。

参 考 文 献

- [13.1] *Handbook for Battery Energy Storage in Photovoltaic Power Systems*, Final Report, DOE Contract No. DE-AC03-78ET 26902, November 1979.
- [13.2] M. Mack, "Solar Power for Telecommunications," *Telecommunication Journal of Australia* 29, No. 1 (1979), 20~44.
- [13.3] *Solar Electric Generator Systems: Principles of Operation and Design Concepts*, booklet prepared by Solar Power Corporation.
- [13.4] G. O. G. Lef, J. A. Duffie, and C. O. Smith, *World Distribution of Solar Radiation*, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Report No. 21, July 1966.
- [13.5] S. A. Klein, "Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces," *Solar Energy* 19 (1977), 325~329.
- [13.6] D. V. Smith and S. V. Allison, *Micro Irrigation with Photovoltaics*, MIT Energy Laboratory Report, MIT-EL-78~006, April 1978.

第十四章 住户用的和集中的光伏电源系统

14.1 引言

本书的最后一章将讨论关于太阳能电池可能的长远应用问题。光伏发电对世界能源需求可能作出重大贡献的两个领域是提供住户用电和用于大型的中心电站的发电。由于要达到这个水平，电池的产量必须很大，而且一项新技术要进入商用领域需要有相当长的发展时间，因此在新世纪到来之前，用户未必会超过百分之几。但这并不意味着在这之前不可能出现经济实用的这类系统。

经济分析表明，采用第七章所叙述的大多数新的硅工艺进行大批量生产时，所生产的太阳能电池组件的售价使这些组件在供给住户用电方面具有竞争力。为了在大规模中心电站应用方面有竞争力，对光伏组件成本的要求倍加严格。正如第十章所叙，薄膜光伏器件最有希望达到这样低的组件成本。

14.2 住户用的系统

14.2.1 储能方式的选择

第十三章描述了用于边远地区的独立光伏供电系统。虽然可以独立于供电机关这点上独立光伏供电系统是具有吸引力的，但在有供电网路的地区它却是无生命力的，因为这需要大幅度降低小型储能系统的价格才行。采用象十二章所描述的氧化还原系统也许有可能达到降低价格的目的。

在没有廉价的储能方法之前，最可行的方法是将光伏系统接到供电网上，这样就不需要长期的能量贮存。在这种并网方式中，可能有几种不同的系统结构，每一个这种系统都必须有一个换流

器，以便将太阳电池的直流输出转换为交流形式。

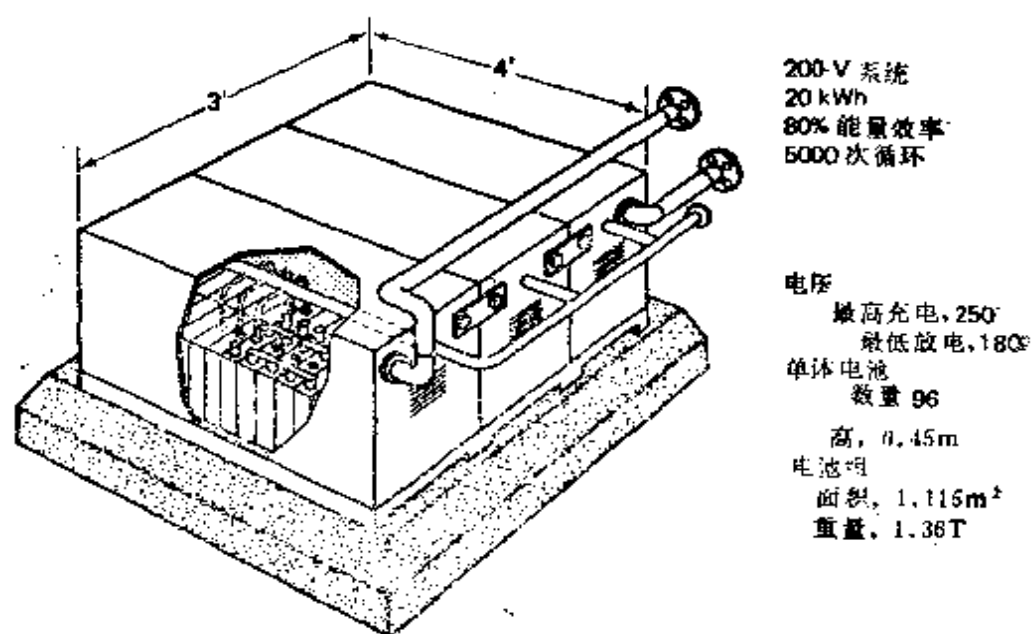
尽管供电网可作为一个长期的储能手段，但仍需提出就地短期储能是否必要的问题。这种储能有助于系统顺利地渡过夜间和短期的恶劣天气。在长期恶劣天气情况下，有了短期储能，供电网可以在其适宜的时候给住户供电。当然也可采取不具备就地储能装置的系统，在供电公司有能力而且愿意回收多余电力的时候尤其是如此。在这种情况下，方阵的最佳尺寸随回收价格的增加而加大。

从住户角度出发，最佳系统取决于太阳电池系统和储能系统之间的相对价格，以及电力公司的价格结构。不同时间电费的差价越大，越会促使增大储能装置。但如果电力公司愿意用相当于售价的一部分的合理价格来回收住户所产生的多余电力，则应减小最佳的储能装置的尺寸。蓄电池储能是最有希望的储能方法。其主要缺点是蓄电池对住宅的环境有潜在危害性且需要定期维护。虽然如此，在有合适通风和蓄电池的电子保护装置的情况下，这种储能方式还是可行的^[14.1]。图 14.1 (a) 示出一种可能的蓄电池组结构。假如第十二章所述的氧化还原系统能研制成功，它将会有若干优点。也考虑过飞轮储能装置^[14.2]，其单元尺寸见图 14.1 (b)。

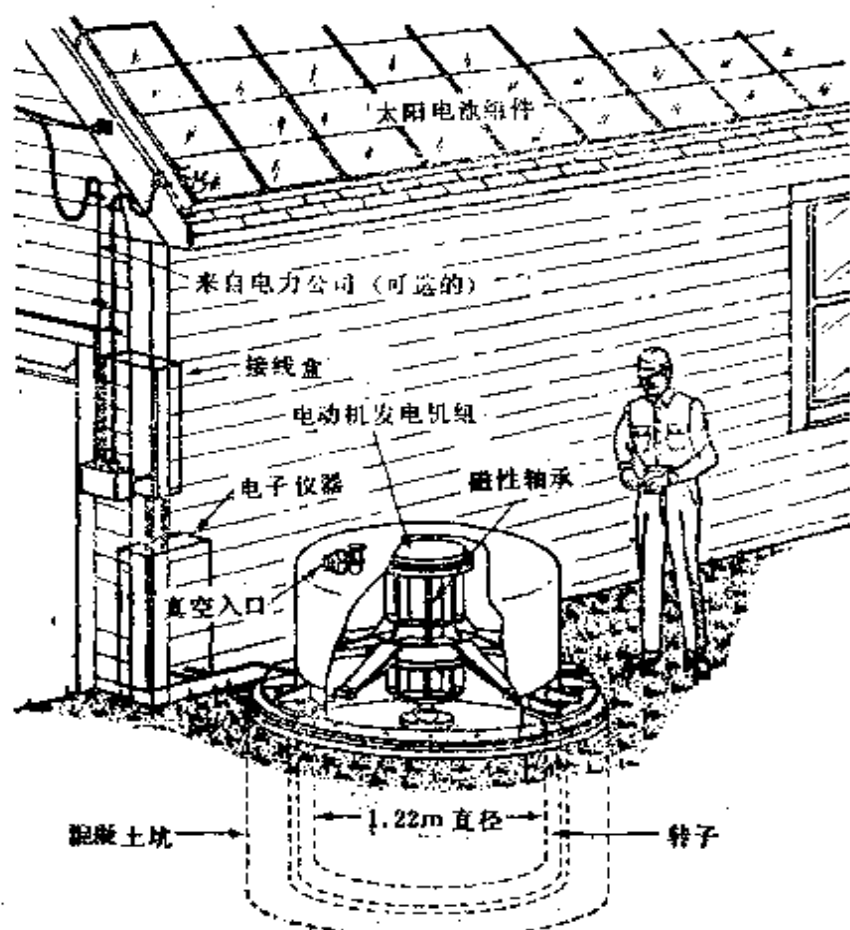
14.2.2 组件的安装

研究结果表明，安装太阳电池组件最廉价的方法是如图 14.2 (a) 所示那样，将它们与屋顶盖瓦组成整体，这样它们具有产生电能和保护部件的双重作用^[14.3]。改进的组件可安装成如图 14.2 (b) 所示的支座式。虽然两者的安装费用相近，但用与盖瓦组成整体的太阳电池组件替代正常屋顶材料将会增加支出。

这种用途的最佳组件尺寸估计为 $0.8 \times 2.5\text{m}$ ，其相应的组件重量约 25kg ^[14.3]。布线费用将随方阵输出电压增高而下降。但直流电压超过 100V 时，这种依赖关系就不很显著了^[14.3]。所列举的参考文献指出，从审美观点来看，长宽比为 $2:1$ ，颜色为暗



(a)



住户用电飞轮系统

(b)

图14.1 住户用系统的能量储存装置原理图

(a) 可选用的蓄电池结构(14.1); (b) 飞轮储能装置(14.2)

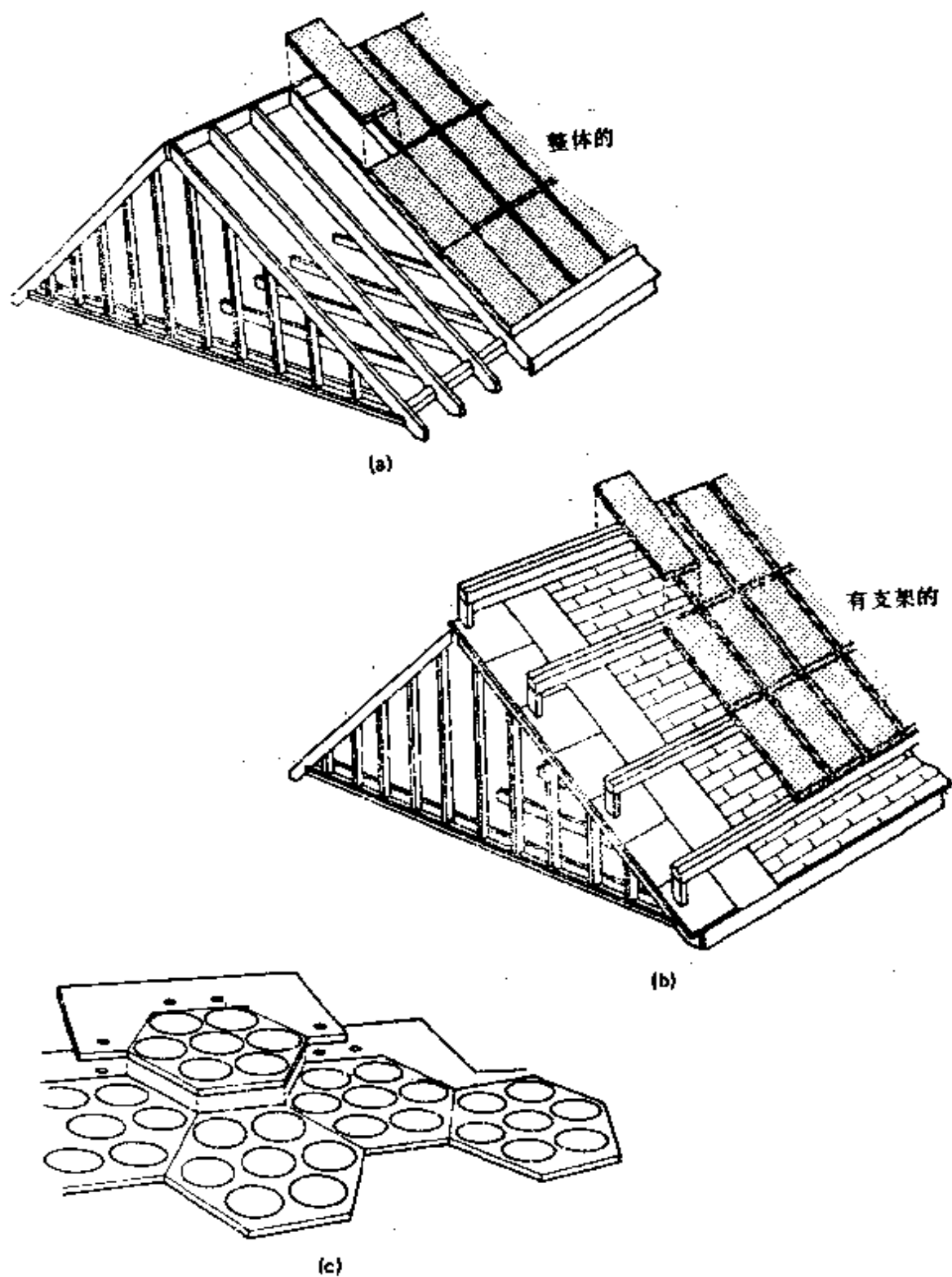


图 14.2 屋顶太阳能电池组件的几种可能安装方案
(a)整体的〔14.3〕, (b)有支架的〔14.3〕, (c)叠板式的

土色并具有无光泽面的矩形组件比较美观大方。如果能研究出廉价互连工艺，则盖板式组件〔图 14.2(c)〕也是很有吸引力的。

14.2.3 供热

住户所用的大部分能源是供热水系统和室内取暖用的低级热能。因此，产生了如何使包括光伏电池在内的系统完满地提供这些热能的问题。三种可能的方法是：利用光伏组件既提供住户用电也提供热；利用单独的太阳集热器给热负荷供热；利用混合的光伏/热组件（或称全能系统）。

尽管用同一个组件实现光伏功能和热功能的全能系统的设想是很吸引人的，但它有一些缺点。太阳电池必须在高温下工作，因此效率低。集热器的工作效率也比较低，因为太阳电池也将消耗部分能量。所产生的热能和电能的比例一般不会正好是住户所需要的。研究表明，住户用全能系统很难在成本上优于具有最佳面积的光伏组件和热组件^{〔14.5〕}。

究竟选这种全能系统还是全光伏系统决定于后一种系统的简易性是否能超过太阳能转换为电能再转换为热能所固有的低效率性。当光伏组件价格低时就会出现这种情况。

14.2.4 系统的线路

图 14.3 示出了一些可能的系统连接方案。在图 14.3(a)所示的第一种线路中，采用蓄电池组储能，在组件和蓄电池之间连有一个控制器（防止蓄电池过充），输给换流器的电压是蓄电池电压。图 14.3(b)表示一种更有效的改进线路，在这种线路中仅将电池组件输出中用于给蓄电池充电的部分转向控制器分路。图 14.3(c)是不采用蓄电池储能的线路，组件连到换流器，该换流器设计成能保证组件在其最佳功率点提供电能。最后，图 14.3(d)表示一个集热器是怎样连接到上述系统中去的。在每一种情况下，换流器的交流输出均与供电公司的输入同步。

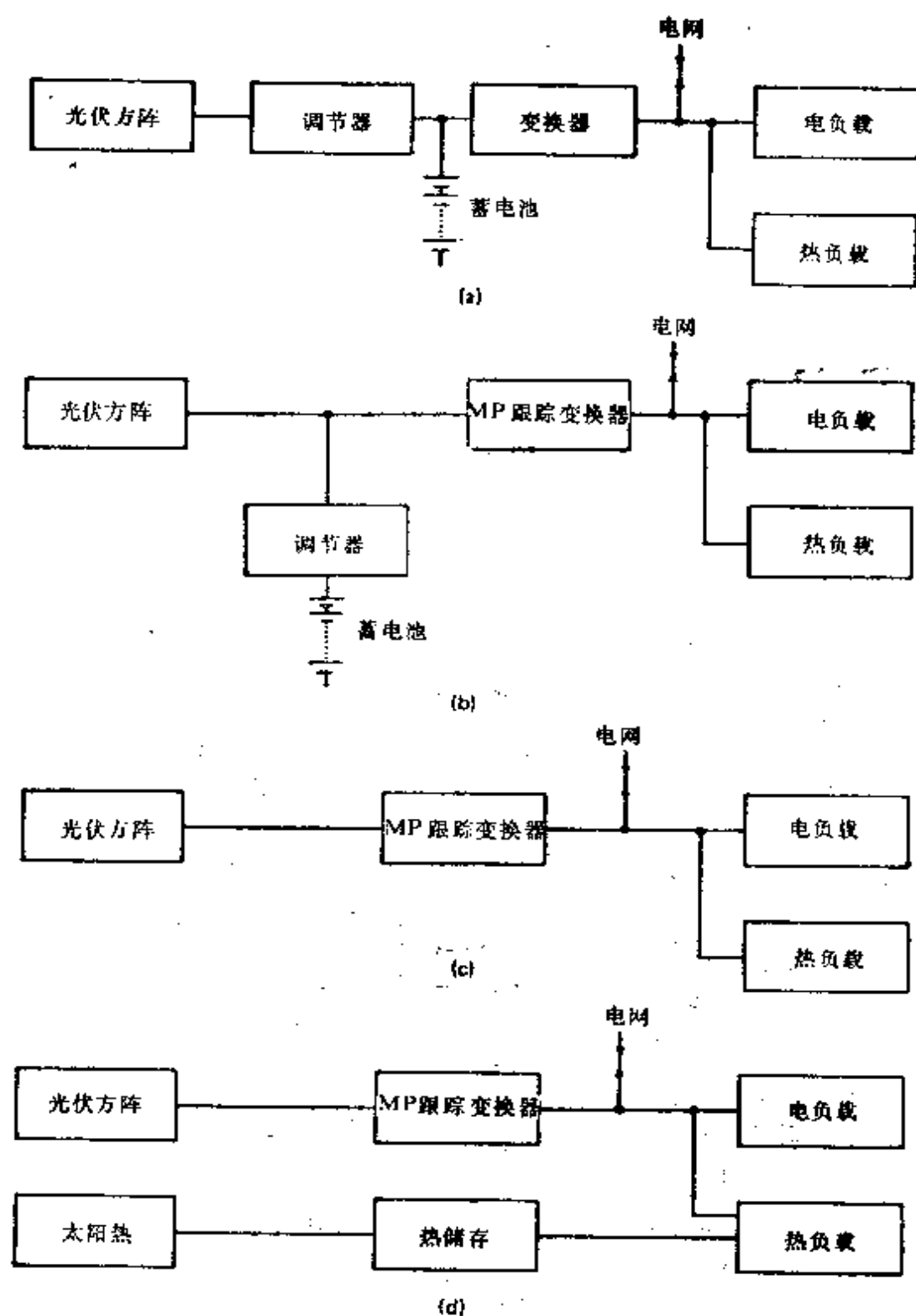


图 14.3 住户用光伏系统可能的连接方案(详见课文)

14.2.5 示范计划

1979 年末,美国能源部开始了一项住户用太阳光伏计划。其

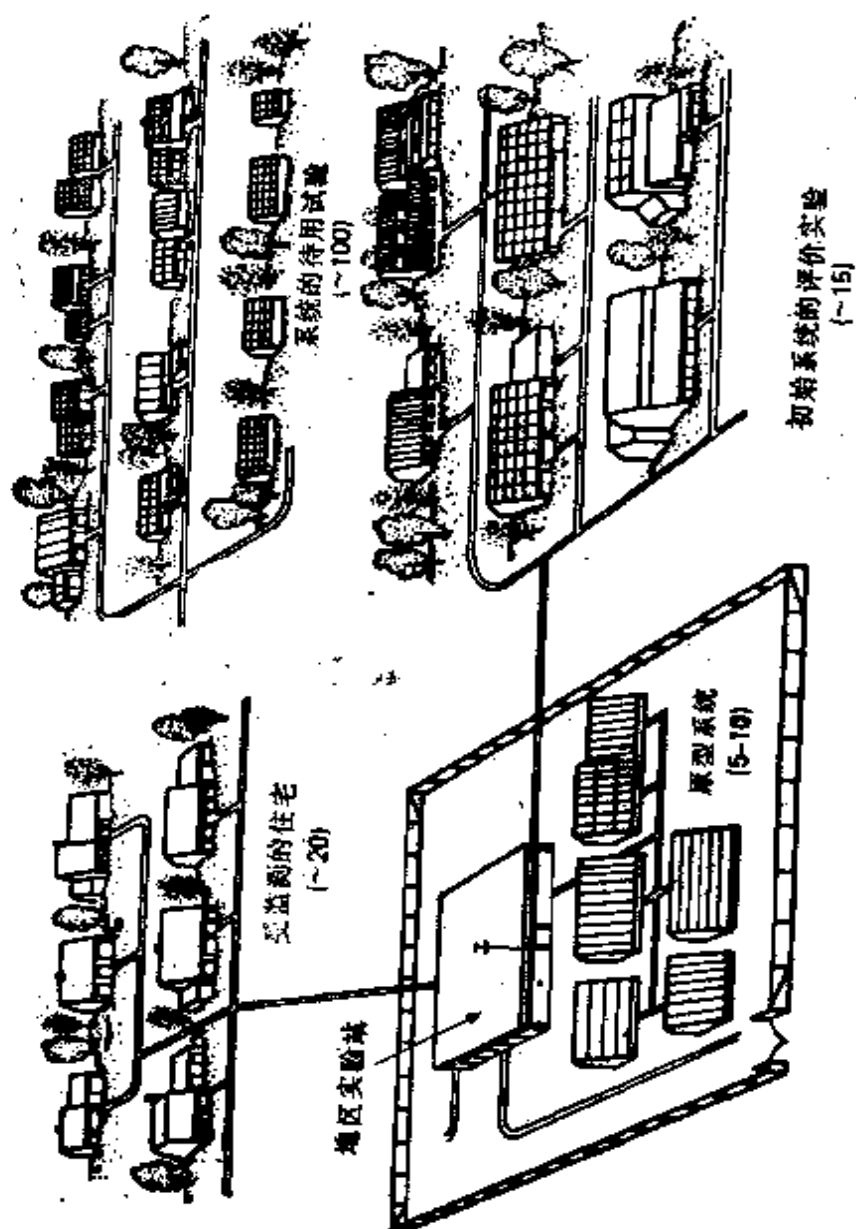


图 14.4 能源部住户用太阳光伏计划的示意图

从地区试验站的初始原型试验系统到商业上待用试验的大量太阳能电池住宅(14.6)

目的是弄清楚在有电网地区住户用光伏系统使用中的有关问题，并促进适用系统的商业化。正象当初所述^[14.6]，该项计划将于1988年完成。如图14.4所表明的那样，它共分三个主要阶段：

第一个阶段是在农村有代表性的地区建立地区性的试验站。这些试验站将试验由工厂设计和组建的原型系统。这些安装在试验站的原型系统是纯屋顶式系统，提供估算的住户所需的电能和热能。同时监测试验站附近住户的实际用电量，以考核原型系统性能的适应性。

在下一阶段，将试验结果好的系统改进后安装在试验站附近少数住人的住宅并进行试验。这些初期系统的评价试验不仅着眼于其物理性能，同时着眼于住户和公众的反应。

最后一个阶段计划自1984年开始，将脱离地区试验站独立地进行系统的待用试验。在这个阶段中将建立约100个太阳供电住宅群，以发现由于光伏系统在住宅区广泛应用所引起的制度上的和工程上的问题^[14.7]。

14.3 中心发电站

14.3.1 一般考虑

光伏发电的最终目标是在用于中心发电站大量发电时在经济上能与通常方法相竞争。若干研究已明确了实现上述目的的必要条件。

一个很显然的条件是中心电站用的太阳电池组件必须是便宜的，其价格必须比住户用的要稍微低一些。其次，组件效率必须高。太阳电池方阵的效率希望至少达到10%。对一定的输出功率而言，低效率将增加所需要的方阵面积，这样也就增加了诸如场地准备、支架结构、安装和维护这样一些费用。这些费用以及功率调节装置的费用通常都归为系统其余成本，必须仔细推敲以使系统其余成本降到最低。

研究结果表明，大规模应用的组件最佳尺寸大约为 1.2×2.4

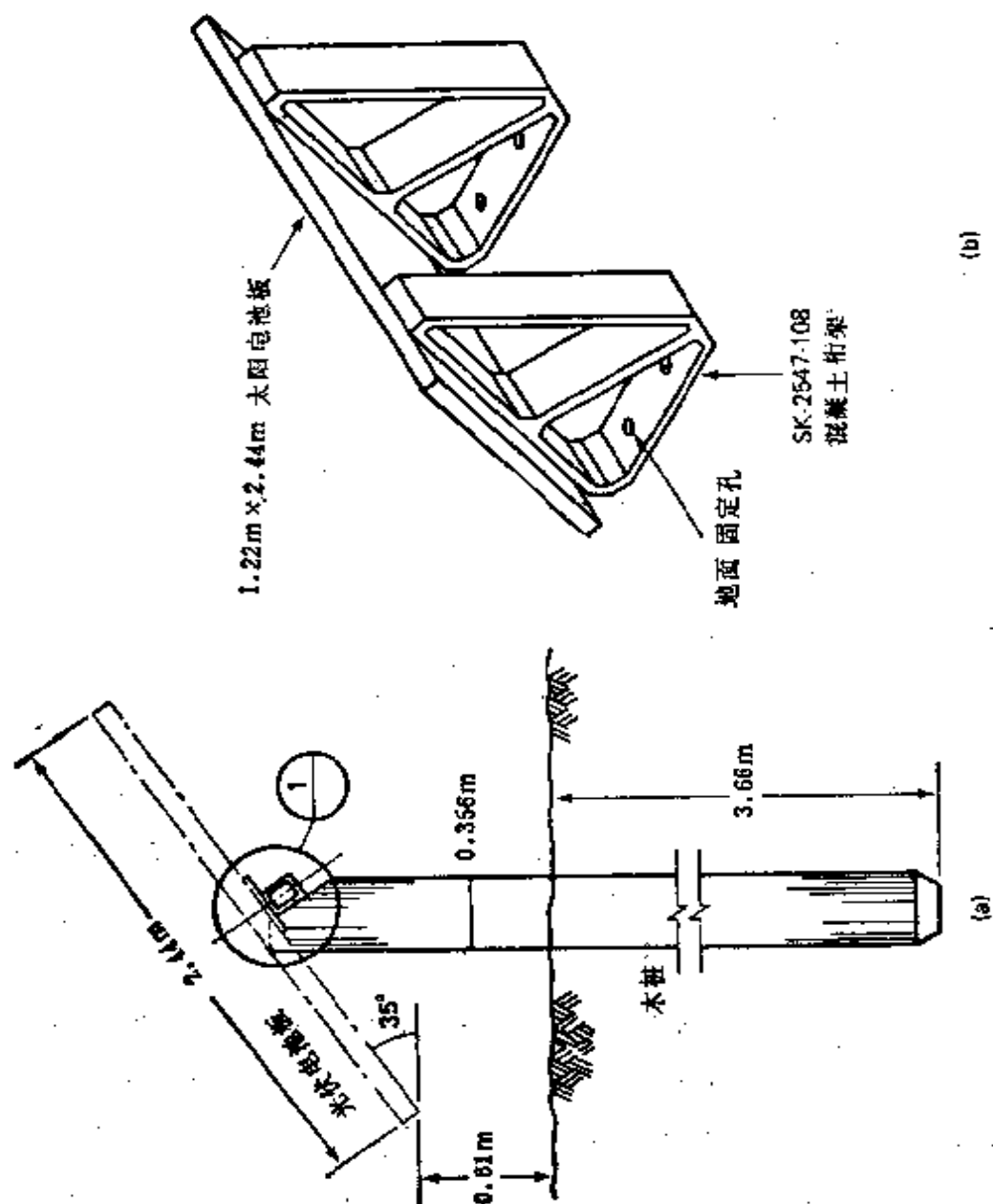


图 14.5 大场地安装的支撑太阳能电池组件的两种可供选择的方案
(a) 木杆/扭力管系统; (b) 混凝土桁架系统

m^[14.8]。已对许多不同方案的支架结构进行了研究。支架结构的最苛刻负荷是风力，风力负荷的设计在很大程度上决定了支架结构的成本。低矮的方阵以及方阵场区内相邻方阵或周围围墙的气流屏蔽作用都会大大减小这些负荷。初步结果证明：图 14.5(a) 的木杆支架系统适于较小型的装置；图 14.5(b) 的混凝土桁架式支架系统对于大型装置具有竞争能力^[14.9]。

任何电网不大可能只用地面光伏系统作为唯一电源，这或者因为长期储能成本太高，或者因为若要在阴天也能供给所需的电能，方阵尺寸就必须很大。这个困难可通过将光伏系统与一低功率非太阳发电站及短期的储能装置联用而减轻。光伏系统在可预见的未来一段时间内，在大电网中可能起的最大作用是可以节省燃料。因为这样的电网在满足随时间变化的用电需求时具有相当大的伸缩性，所以只要光伏系统所供电量不超过电网总容量的 10%，光伏系统便可在没有储能的情况下使用。

由于太阳辐射的分散特性，用光伏系统产生相当大量的能量需要大面积土地。土地利用问题的前景可通过研究一些国家若采用光伏系统产生其所需全部能量时，需占用的土地面积占全国土地面积的百分比看出来。其计算结果见表 14.1。尽管由于明显的

表 14.1 1970 年用效率为 10% 的光伏系统产生该国所需全部能量需要的土地面积占全国土地面积的百分数

澳大利亚	0.03	挪威	0.50
加拿大	0.20	南非	0.25
丹麦	4.5	西班牙	1
爱尔兰	1	瑞典	0.75
法国	3.5	英国	8
以色列	2.5	美国	1.5
意大利	4	西德	8
荷兰	15		

来源：D. O. 豪尔“光合成能解决能源问题吗？”见“太阳能和燃料”。J. R. 包尔顿编辑(纽约：学术印刷厂，1977) p. 36。

原因，有些欧洲国家的计算结果不能令人满意，但是在很多象美国这样的国家所需要的土地面积却少于目前人工建筑物（如房屋和道路）所覆盖的面积。在几十年内建一个能供应全世界能量需求的光伏系统的工作虽然是很艰巨的，但在工程上是可能的。

14.3.2 工作方式

图 14.6 (a) 示出一个假想的电业局在有代表性的一天内的用电曲线，同时也示出当太阳能电站连到该电业局的网路中时对系统其他部分所供给的负荷的影响。如果系统的用电高峰在傍晚，太阳能电站的作用是使日供电曲线的高峰变尖，凹谷加宽。

如前所述，如果光伏系统所供电量只占电网总容量的很少一部分，则光伏系统可在没有储能的情况下工作。正象能承受目前的负荷波动一样，网路能够承受太阳能供电的波动。在没有储能的情况下，太阳能电站可用来节约燃料，并减少发电装置处于中等和峰值发电状态的时间。但是，如图 14.6 (b) 和 14.6 (c) 所示，太阳能电站使用电曲线高峰变尖的趋向可以提高削平曲线高峰所需的储存能量的效率。所以，如图 14.6 (b) 所示，尽管储能装置是由网路上的常规发电设备而不是由太阳能电站充电，在太阳能电站和储能装置间仍存在一种协同效应。有了一个便会提高另一个的性能和寿命。因此，目前装有储能装置的用煤或核为燃料的常规发电厂，在将来一旦配上太阳能发电站后就会处于最佳状态。

有关中心电站工作的另一重要概念是太阳能电站的可信的极限发电量。也许有人会认为，光伏电站不会有什么可信的极限发电量。因为阴天时它的输出很低，在这样的日子里还需要给予发电量补偿。实际情况会更加复杂。常规装置有时也会因突然出现故障而不能工作。计算系统容量的一种方法是，规定符合使用要求的可靠性水平，并计算在此可靠性水平下的最大负荷。

图 14.7 示出一个具体的电网系统在三种情况下的计算结果。这三种情况是：不带光伏电站的基本系统；装有 500MW_p 光伏

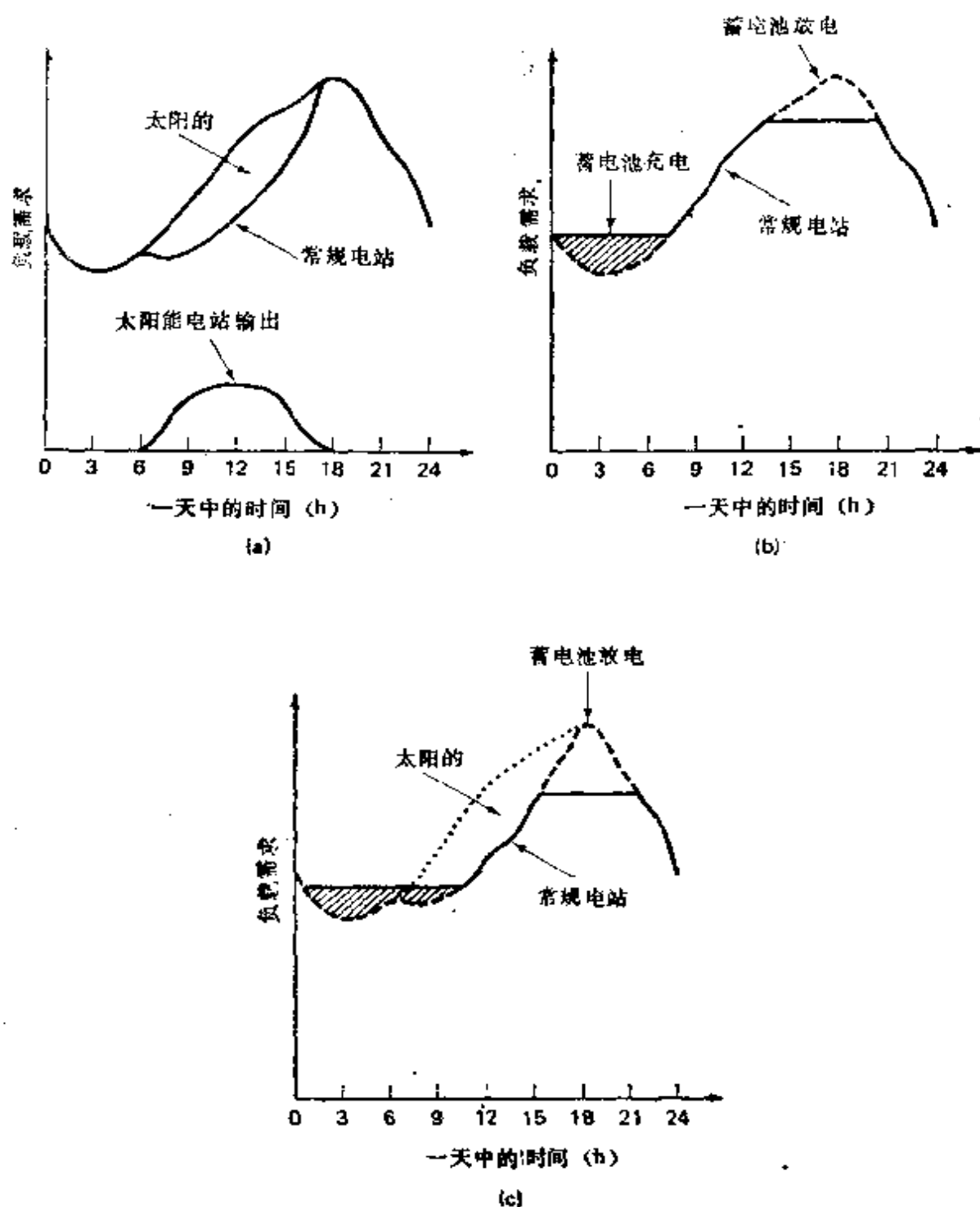


图 14.6

(a) 典型的日用电曲线(同时示出太阳能电站少量供电的影响); (b) 对无太阳能电站的系统利用能量储存削平用电曲线的高峰; (c) 除有太阳能电站输入外, 其他同(b) [14.10]

电站的系统; 有 500MW, 光伏电站并有 2000MWh 储存能力的蓄电池的系统 [14.10]。在此系统中, 光伏电站的可信的极限发电

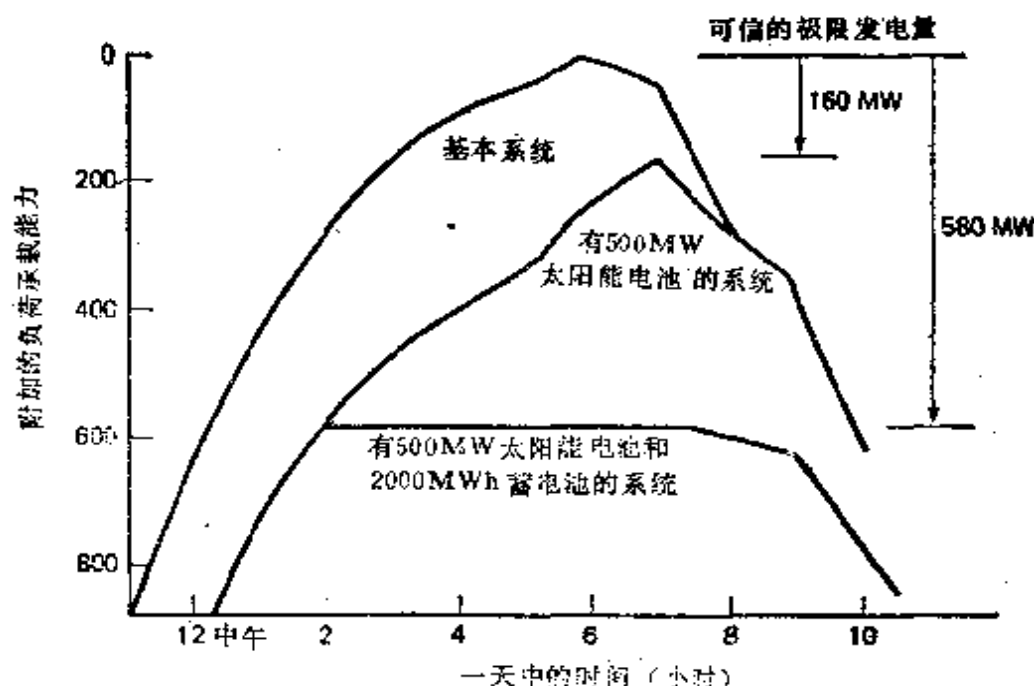


图 14.7 计算机模拟太阳能电站的可信的极限发电量的结果

所示例中可信的极限发电量约为电站峰值容量的三分之一。蓄电池储能大大增加了可信的极限发电量(14.10)

量是峰值容量的三分之一。若加上蓄电池储能，可信的极限发电量增加到 580MW。在此例中，用电最多的时间是在下午 6 点，这是夏季美国典型的用电情况。如果用电的高峰是在中午前后，那么单有光伏电站时的可信的极限发电量将占峰值发电量更大的部分。反之，如果系统用电高峰不在白天（如冬季傍晚），则可信的极限发电量将会小得多。

14.3.3 卫星太阳能电站

全面论述太阳能发电的书籍，都应涉及用大的太阳电池方阵在空间接收太阳光并将能量以微波束方式发送回地面的设想。这一设想的大意如图 14.8 所示。卫星太阳能电站必须安置在围绕地球的同步卫星轨道上，其高度大于地球半径，这样可以保证除去在春秋分前后几周中该地午夜前后的一小时以外，地球阴影不会遮住方阵。参考文献 14.11 对此进行了更详细的讨论。

这种太阳能电站的主要优点是除了上面所提到的时间以外，

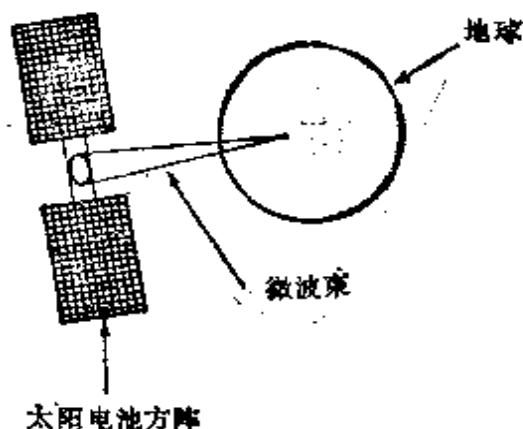


图 14.8 卫星太阳能电站
(所收集的太阳能以微波束的形式发送回地面)

它可连续得到阳光。这种电站不需要储能，可象常规发电那样应用。另外的优点是，在空间阳光强度较高，并且比较容易保持方阵总是几乎与太阳光线垂直。处在峰值工作状态的空間太阳电池方阵所能发出的能量为阳光充足地区之同样大小的地面方阵所发出的能量的五至八倍。因为在将所收集到的能量传输到地面的过程中能量会有损耗，因而这个倍数会减少一些。

这种太阳能电站的主要缺点是战略上的脆弱性和系统的高成本。此外，如何在空间建立这样的方阵以及如何维护它还是尚待解决的大问题，而且还必须在地面建造巨大的能量接收器。具有所需大小和强度的微波束对环境的影响也值得仔细研究。

14.4 小 结

本书的最后一章讨论了有关太阳电池的两项长远应用问题。为使太阳电池在这两项应用中具有生命力所要求达到的电池价格在技术上无疑是可能的。

与供电网连接的住宅用光伏组件的成本可以比中心电站光伏组件成本高一些，因为在前一种情况下，一般计算成本是从用户观点出发。从技术上看，已有几种太阳电池工艺被认为可以按这种用途所要求的成本制造出电池。光伏发电用于住户的主要障碍

不是技术上的，而是制度上的。问题涉及建立法规、与电力公司的关系以及太阳方阵的投资等等。

光伏电站不大可能单独用作集中电站，因为所需要的储能成本太高。对供电量只占电网总容量的一小部分但意义重大的光伏电站，不一定非要储能。光伏电站和储能装置确实在某种程度上能互相协同，有了一个就会使另一个更加有生命力。在具有一个非太阳能的备用系统和合适数量的储能的情况下，光伏电站将最终能发出电网提供的功率的大部分。

当今能够生产出单位面积成本符合中心电站应用要求的太阳能电池的工艺要数薄膜技术。但这种电池的单位面积功率输出尚需提高。薄膜的非晶硅电池在1980年已经可以大量买到，对于室内应用，其性能相当于高质量单晶硅电池。光伏技术所面临的挑战是制造出能达到上述水平的用于室外的薄膜电池。

参 考 文 献

- [14.1] W. Feduska et al., *Energy Storage for Photovoltaic Conversion: Residential Systems-Final Report*, Vol. 3, prepared for US National Science Foundation, Contract No. NSF C-7522180, September 1977.
- [14.2] A. R. Millner and T. Dinwoodie, "System Design, Test Results, and Economic Analysis of a Flywheel Energy storage and Conversion System for Photovoltaic Applications," *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego*, 1980, pp. 1018~1024.
- [14.3] P. R. Rittelmann, "Residential Photovoltaic Module and Array Requirements Study," in *Proceedings of the U. S. DOE Semi-Annual Program Review of Photovoltaics Technology Development, Applications and Commercialization*, U. S. Department of Energy, Report No. CONF791159 (1979), pp. 201~223.

- [14.4] N. F. Shepard, jr. and L. E. Sanchez, "Development of a Shingle-Type Solar Cell Module," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978*, pp. 160~164.
- [14.5] V. Chobotov and B. Siegal, "Analysis of Photovoltaic Total Energy System Concepts for Single-Family Residential Applications", *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978*, pp. 1179~1184.
- [14.6] M. D. Pope, "Residential Systems Activities," in *Proceedings of the U. S. DOE Semi-Annual Program Review of Photovoltaics Technology Development, Applications and Commercialization*, U. S. Department of Energy, Report No. CONF-791159 (1979), pp. 346~352.
- [14.7] E. C. Kern, jr. "Residential Experiments," in *Proceedings of Photovoltaics Advanced R and D Annual Review Meeting*, Solar Energy Research Institute Report No. SERI/TP-311-428 (1979), pp. 17~36.
- [14.8] P. Tsou and W. Stolte, "Effects of Design of Flat-Plate Solar Photovoltaic Arrays for Terrestrial Central Station Power Applications," *Conference Record, 13th IEEE photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978*, pp. 1196~1201.
- [14.9] H. N. Post, "Lost Cost Structures for Photovoltaic Arrays," *Conference Record, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, 1980*, pp. 1133~1138.
- [14.10] C. R. Chowaniec et al., "Energy Storage Operation of Combined Photovoltaic/Battery Plants in Utility Networks," *Conference Record, 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D. C., 1978*, pp. 1185~1189.
- [14.11] D. L. Pulfrey, *Photovoltaic Power Generation* (New York: Van Nostrand Reinhold, 1978), pp. 56~62.

附录 A

物 理 常 数

q	电子电荷 $\approx 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$
m_0	电子静止质量 $= 9.108 \times 10^{-28} \text{g}$ $= 9.108 \times 10^{-31} \text{kg}$
C	真空中的光速 $= 2.998 \times 10^{10} \text{cm/s}$ $= 2.998 \times 10^8 \text{m/s}$
ϵ_0	自由空间介电常数 $= 8.854 \times 10^{-14} \text{F/cm}$ $= 8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$
h	普朗克常数 $= 6.625 \times 10^{-27} \text{erg}\cdot\text{s}$ $= 6.625 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$
k	玻尔兹曼常数 $= 1.380 \times 10^{-16} \text{erg/K}$ $= 1.380 \times 10^{-23} \text{J/K}$
$\frac{kT}{q}$	热电压 $= 0.02586 \text{V}$ (在 300K 时)
λ_0	真空中 1eV 能量的光子相应的波长 $= 1.239 \mu\text{m}$

词 头

毫(m) $= 10^{-3}$	千(k) $= 10^3$
微(μ) $= 10^{-6}$	兆(M) $= 10^6$
毫微(n) $= 10^{-9}$	千兆(G) $= 10^9$
微微(p) $= 10^{-12}$	

附录 B

硅的部分特性 (300K时)

- E_g 禁带宽度 = 1.1 eV (见表 3.1)
 N_c 导带有效态密度 = $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
 $\quad \quad \quad = 3 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$
 N_v 价带有效态密度 = $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
 $\quad \quad \quad = 1 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$
 n_i 本征浓度 = $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
 $\quad \quad \quad = 1.5 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$
 ϵ_r 相对介电常数 = 11.7
 $\hat{n}$ 折射系数 = 3.5 (波长 $1.1 \mu\text{m}$ 时) (见图 3.1)
 μ_e 电子迁移率 $\leq 1350 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$
 $\quad \quad \quad \leq 0.135 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ [见方程 (2.36)]
 μ_h 空穴迁移率 $\leq 480 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$
 $\quad \quad \quad \leq 0.048 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ [见方程 (2.36)]
 D_e 电子扩散系数 = $0.02586 \mu_e$
 D_h 空穴扩散系数 = $0.02586 \mu_h$
 ρ 电阻率 [见方程 (2.35)]
 $\quad \quad \quad \text{密度} = 2.33 \text{ g/cm}^3 = 2330 \text{ kg/m}^3$

附录 C

符号一览表

- E 电场强度
 α 吸收系数
 ϵ 介电常数

ϕ	功函数
ϕ_B	势垒高度
λ	波长
μ	迁移率
η	效率
ρ	空间电荷密度; 电阻率; 薄层电阻; 比接触电阻
σ	电导率
τ	寿命
ψ_0	内建势垒
χ	电子亲合力
A	截面积
c	真空中的光速
D	扩散系数
E	能量
E_σ	导带底能量
E_V	价带顶能量
f_σ	光生载流子收集率
E_F	费密能级
FF	太阳电池填充因数
G	电子-空穴对产生率
h	普朗克常数
I	电流; 强度
I_0	二极管饱和电流
I_{sc}	短路电流
J	电流密度
J_e	电子电流密度
J_h	空穴电流密度
k	玻尔兹曼常数
k	消光系数
L_e	电子扩散长度

L_k	空穴扩散长度
m_0	电子静止质量
m_e^*	电子有效质量
m_h^*	空穴有效质量
n	电子密度
$n_{n,0}$	n型半导体热平衡电子浓度
$n_{p,0}$	p型半导体热平衡电子浓度
$\hat{n}_c$	折射系数
$\hat{n}$	折射系数的实部
n_i	本征载流子浓度
N_c	导带有效态密度
N_v	价带有效态密度
N_A	受主浓度
N_D	施主浓度
p	空穴浓度; 晶体动量; 部分功率损失
$p_{n,0}$	n型半导体热平衡空穴浓度
$p_{p,0}$	p型半导体热平衡空穴浓度
q	电荷
R	电阻
t	时间
T	温度
U	净复合率
V	电压; 电势
V_{oc}	开路电压