

太阳能电池

王文采

(北京大学物理系 100871)

人类的生存和发展正面临着能源的挑战,开发新能源是一项迫切的任务。我国的可持续发展也离不开能源的保障。新的能源不但要能提供大的能量,而且还要顾及节约成本、保护环境等问题。开发和利用太阳能,优势是显而易见的。一般来说,利用太阳能可以从两个方面着手,一是将太阳能转变为热能;二是直接把它转变成电能。这里我们将谈谈后者。聊聊太阳能电池的过去、现在,并初步展示一下它的未来。从国外的一些发展情况,或许能获得某些借鉴。

一、半导体的光伏效应 太阳能电池的工作原理

当表面蒸发一层透光金属薄膜的半导体薄片被光照射时,在它的另一侧和金属膜之间将产生一定的电压,这种现象称为光生伏特效应,简称光伏效应。半导体 p-n 结上,这种光伏效应更为明显。因此,太阳能电池都是由半导体 p-n 结构成的。

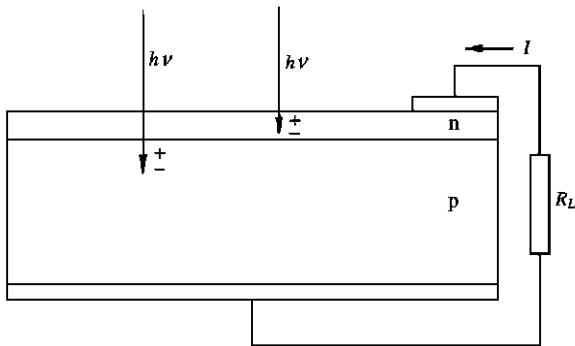
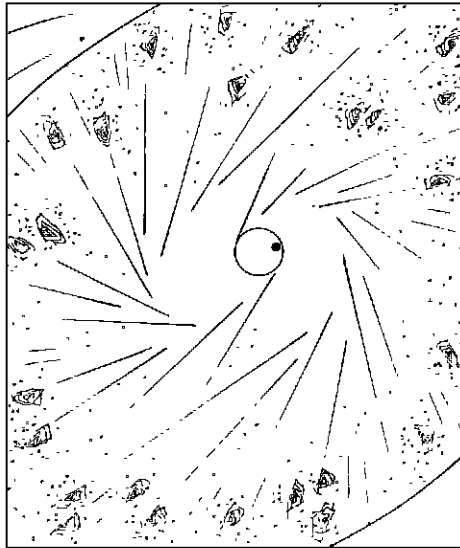


图1 p-n 结太阳能电池原理示意图

最简单的太阳能电池由一个大面积的 p-n 结构成,例如 p 型半导体表面形成薄的 n 型层构成一个 p-n 结(图 1)。由于 n 型层很薄,能透过照射的阳光。光照时,在 p 型和 n 型两区内,光激发下都产生了电子-空穴对。如果在一个扩散长度的范围内,



这些被激发出来的电子或空穴,就都有可能在复合之前通过扩散运动到达 p-n 结的强电场区。大家知道,半导体 p-n 结的界面附近,电荷积累形成的阻挡层(耗尽层)中有一个强电场,场强方向由 n 区指向 p 区。这样,在强电场的作用下,空穴由 n 区被扫到 p 区,而电子则由 p 区扫到 n 区。电子和空穴的这种运动,将使 p 区带正电,而 n 区带负电,p-n 结上就产生了一定的电压。

太阳能电池是把太阳能直接转变成电能的器件,因此能量转换效率的大小至关重要。根据上述 p-n 结的光伏效应,转换效率决定于 p-n 结吸收太阳光的能力以及由光激发所产生的电子和空穴在 p-n 结中的运动情况。研究表明,对于太阳光谱,构成 p-n 结材料的能隙值为 1.1 ~ 1.7 电子伏的最好。因为当入射太阳光光子的能量和材料的能隙相等时,光激发产生电子-空穴对的几率最大,光吸收最强。同时,这也决定了使用材料的厚度。此外,材料的载流子扩散长度、少数载流子寿命等材料性能,也是影响电池特性的主要因素。这两个参数的数值大,光激发出的电子和空穴,才有可能在复合之前被扫到相应的区域,再扩散到电极,从而形成一定的电池电压。

按照固体物理的观点,目前在太阳能电池产业中广泛并主要应用的硅单晶或多晶硅并不是理想的材料。晶态硅的能带结构比较复杂,吸收光子以后,电子穿过能隙由价带到导带的跃迁是一种非竖直跃迁过程。这种二级过程比较微弱,光吸收系数很小。而对于砷化镓半导体晶体,光吸收的电子跃迁为竖直跃迁,因而只需要 1 微米厚的材料就可以吸收入射阳光的 90%。若采用硅单晶则厚度要增大两个数量级,至少要 100 微米。厚度增加不仅加大了用

材的成本,而且为了保证较大的少子寿命和载流子扩散长度,材料的纯度和晶体的完整性等必须达到更高的要求,材料的高质量更增大了器件的成本。但是,硅材料目前仍然是制备太阳能电池的主要原材料,其原因将在后面介绍。

太阳能电池的性能有3个主要参数:开路电压、短路电流和能量转换效率。其中,能量转换效率由电池的输出功率与输入光强之比决定。当太阳光正照时,海平面阳光的光强为100毫瓦/厘米²。提高太阳能电池的转换效率是发展它的首要任务。

二、硅太阳能电池

制作太阳能电池的材料要考虑带隙的值,同时要能最大限度地吸收太阳光。在这一点上,单晶硅和多晶硅都不可能成为首选。但是,选用材料时以下一些因素也不可忽视。首先,材料易于获得并且无毒;其次,电池的制备工艺简便、重复性好,便于大规模生产;材料还要具有长期稳定性。在这些方面硅材料则具有很大的竞争力。硅是地球上蕴藏量最多的元素之一,稳定无毒,硅材料和微电子技术也已经发展得相当成熟。目前,虽然硅电池的转换效率是制约太阳能电池发展的瓶颈,但是与其他材料制备的商用太阳能电池相比,它仍然是转换效率最高的。此外,有关提高硅太阳能电池的转换效率和降低成本的研究工作也在不断进展,这将为太阳能电池的开发和广泛应用创造美好的前景。硅太阳能电池可以粗略地分为以下几类。

单晶硅电池

基本单元是由硅单晶制作的p-n结。选用p(或n)型硅单晶晶片,顶部通过扩散工艺制备一个n(或p)型薄层。世界上第一个单晶硅太阳能电池1954年在贝尔实验室诞生,转换效率为6%,此后很快增大到10%。目前单晶硅太阳能电池的转换效率,在严格的实验室工艺条件下最高可以达到24.7%,批量生产可达16%左右。除了转换效率尚待提高以外,降低成本还涉及到单晶硅的供应问题。生产太阳能电池尽管对硅单晶的质量要求较高,但是和电路芯片的生产要求相比,还算低的,因此通常可以使用制备电路芯片淘汰的低价晶片。当晶片供应紧张时,“淘汰”晶片供应不足,不得不采用等级高而相对高价的晶片时,无疑将使电池组件的成本提高。

多晶硅电池

采用多晶硅片制备p-n结。晶片价格比单晶硅片低,而且硅材料的利用率也比单晶高。晶片可以做

成方形,这样,制作电池组件时,组装密度将高于圆形或准方形的单晶片。目前150×150和200×200平方毫米大的方形多晶片制造技术已经比较成熟。

提高多晶硅电池转换效率的关键是减小表面反射,需要研究廉价、有效的表面腐蚀工艺来解决。目前多晶硅电池的转换效率虽然低于单晶硅电池,但因成本低,仍占有相当的市场份额。国际上,过去20年单晶硅片和多晶硅片的产量粗略相等,恰好说明了这种情况。随着多晶硅电池转换效率的不断提高,它们对单晶硅电池市场份额所占的比例还将提高。

近年来,由熔体通过模具拉制出多晶硅薄带的技术也在发展。例如,已经拉制出平均壁厚280微米、长5.3米的八角形薄壁硅管,接着用激光切割成10×10平方厘米的硅片。这样获得的硅片表面起伏不平,质量也比单晶硅片差,但是由于省去了切片工序,节约原材料、工艺简化,大大降低了生产成本。因此,一些企业纷纷研究性能优良的多晶硅带的制备工艺。据报道,利用多晶硅带实验室制备的电池,面积为1平方厘米时,转换效率可以达到15.1%。

非晶硅电池

有关报道最早出现在1976年。非晶硅的能带结构虽然与晶态硅类似,但是由于原子排布缺乏长程序,光激发的电子跃迁没有竖直或非竖直跃迁之分,因而它的光吸收系数比晶态硅增大很多。对太阳光谱中主要部分的可见光区域,非晶硅的光吸收系数大约比晶态硅高出一个数量级。1微米厚的非晶硅薄膜可以吸收约60%的太阳光能量。含有氢的非晶硅:氢合金薄膜曾经被看作是制备太阳能电池最有希望的薄膜材料。非晶硅薄膜的能隙接近于最佳禁带宽度,而且,因为缺陷态密度较低,容易形成有效的p或n型掺杂,制备出p-n结的阻挡层比较宽;光生载流子的寿命也比较长,这些都有利于制备出高性能的太阳能电池。同时,淀积非晶硅薄膜的工艺也不复杂,制备工艺的功耗和成本低,并且容易实现大面积、大规模生产。因此,非晶硅薄膜及其太阳能电池曾经受到人们很大的重视。然而,以后的研究发现,单纯用非晶硅薄膜制备的太阳能电池,受到光的照射以后,材料的性能将退化,电池的性能也将变差,特别是转换效率将降低。因而,非晶硅太阳能电池的转换效率一般低于10%。

为了提高非晶硅太阳能电池的能量转换效率,在非晶硅——氢合金的基础上发展了多种多元合金材料。例如,非晶硅—碳—氢,它的能隙较大,通过

调整碳含量还可以使能隙的值在 1.6 ~ 2.8 电子伏的范围内变化,制成的电池,开路电压和短路电流都比非晶硅——氢合金电池相应的参数值增大。又如,纳米晶硅——氢合金,材料的晶粒大小为 3 ~ 30 纳米,性能介于非晶与多晶硅之间,但更接近于非晶硅。非晶硅——锗——氢材料,对太阳光谱中的近红外波段的吸收增强,从而提高了电池的能量转换效率。

提高非晶硅太阳能电池转换效率的另一种途径是制备变带隙的多层电池。这一类电池是由多个不同的 p-n 结叠成多层构成。对太阳能电池来说,获得高的开路电压与短路电流对材料能隙宽度的要求恰好相反。能隙窄时,光子容易激发出电子——空穴对,形成大的短路电流;但同时因为 p-n 结的势垒较小,开路电压就比较低。解决这一矛盾的一种方案就是设计由不同带隙材料组成不同 p-n 结构成的多层电池。因为当光子能量与带隙能量相等时,光子被吸收的几率最大,带隙不同的材料可以分别吸收太阳光谱中波长不同的光,从而使入射的阳光被充分利用。多个 p-n 结串联的总电压使电池的开路电压增大。但是,各层电池串联,要求它们的短路电流相等,成为制备多层电池的主要困难。这样,尽管非晶硅在制备多层 p-n 结工艺上比单晶硅要简单容易,但是,要同时满足吸收不同波段的阳光和短路电流相等两个条件,设计和工艺上还存在不少有待解决的问题。

三、-族化合物半导体电池

砷化镓的能隙是制备太阳能电池最理想的材料。制备出的电池的能量转换效率高,抗辐射能力也优于硅电池。但因原材料本身的价格贵,制备的电池多用于专门的处所。砷化镓为基的镉镓磷/砷化镓/锗构成的两层或三层电池已经被用作宇宙飞船和人造卫星上的能源。除了成本高以外,这类材料的制备过程中还需要注意人体的健康防护和环保。

化合物半导体制备 p-n 结时,常常由不同的晶体材料构成,称为异质结,例如砷化镓/铝镓砷、砷化镓/镉镓磷、镉镓磷/锗等。制备异质结时,需要注意不同材料间的晶格匹配,失配系数要尽量小;而且界面重构的速率要低。-族化合物太阳能电池多数做成多 p-n 结级联型,可以达到 40% 以上的转换效率,因而特别受到研究者的重视。但是,实现超高效率的多结太阳能电池,需要解决以下的关键问题。

顶部电池材料的选择和质量改进

顶部电池材料关系到太阳光的穿透和吸收,对电池性能有很大影响。特别是它的少子寿命等性能。例如,当砷化镓或锗作为衬底时,顶部选用镉镓磷与铝镓砷相比,在与衬底晶格匹配、界面重构速率低、不易氧化以及少子寿命等方面前者都更具有优势,是更好的窗口层。

电池内部通过低损耗的穿透结连接,并防止杂质从穿透结扩散

电池的高效率需要通过两个以上的电池连接来实现。这就要求有对光和电损耗低的内部连接。简并掺杂的隧穿结作为首选,通过上电池重掺杂的 n (或 p) 型层与下电池重掺杂 p (或 n) 型层之间,由于电子和空穴的隧道复合形成欧姆接触。同时,它在电池的制备工艺中仅仅增加一个步骤。然而,为了减小光的吸收,需要构成薄和宽带隙的隧穿结。另一方面,隧穿电流随带隙能量的增大而指数下降,又将对电池的性能造成不利影响。此外,在制备顶部电池的过程中,还将发生从高掺杂隧穿结的杂质扩散,造成隧穿结的电阻增大,也要注意避免。研究表明,双异质结结构可以防止杂质扩散。例如,镉镓磷的隧穿电流峰值采用双异质结结构时,可以由 5 毫安/厘米² 增加到 2 安培/厘米²。

电池材料与衬底之间晶格匹配

宽带隙背表面场层的效率

1997 年 8 月镉镓磷/砷化镓/锗双 p-n 结太阳能电池已经用于商业卫星。为了广泛应用超高效电池,目前除转换效率有待提高以外,还需要降低成本。采用 3 和 4 个 p-n 结的多结电池或使用聚光器,实现 40% 以上的效率,这类电池的潜力是大的。

光学聚光是一种提高太阳能电池转换效率具有发展前景的技术。将阳光会聚到小面积的电池上,电池仅构成整个系统成本很小的一部分。由于光强的增大,电池的转换效率将提高 10%—20%。只要电池温度保持恒定,电池及整个组件的效率可以分别达到 25% 及 30% 以上。至今,聚光器市场发展较慢,主要原因在于适当、中等大小(100 千瓦)的电源系统市场还比较小;其次,聚光器技术的可靠性也有待改进。

四、其他太阳能电池技术

太阳能电池发展的关键是提高性能和降低成本。为此,寻找新型材料、研究新的制备工艺,已经和正在进行的工作有很多方面。例如,纳米晶染料

弱电统一理论的标准模型

魏安赐

(河北工业大学理学院 天津 300130)

一、弱电统一理论的背景

普适弱相互作用理论

1958年,美国物理学家费恩曼和盖尔曼共同提出了矢量流减轴矢量流理论。在电磁相互作用中,电磁流 j^{EM} 守恒,同强相互作用无关的电子和参与强相互作用的质子的电荷大小相等。在弱相互作用中,轻子弱流 j^l 和核子弱流 j^h 的矢量部分形式完全相同,显示核子弱流 j^h 的矢量部分 j^V 守恒,它和电磁流 j^{EM} 的同位旋矢量部分,在同位旋空间是同一矢量沿不同方向的分量。盖尔曼提出:类似于电磁相互作用中的磁性,弱相互作用中也应有弱“磁”性。1963年被吴健雄在美国哥伦比亚大学做的实验所证实。只需一个耦合常数就可表征弱相互作用的各种过程,该理论称为普适弱相互作用理论。

弱作用和电磁作用的统一性思想

20世纪60年代,格拉肖、温伯格和萨拉姆在普适弱相互作用理论的基础上,透过电磁作用和弱作用表现形态的差异性(如它们的强弱、力程、作用时间分别都不相同),洞察其内在实质的同一性(如它们都是普适性、矢量型相互作用,都呈现为流的形式——电磁作用呈现电磁流、弱作用呈现弱流)。根据杨振宁—米尔斯规范场理论,先后独立提出电磁作

用和弱作用具有统一性的思想,建立弱电统一理论。

二、弱电统一理论的内容

电磁作用和弱作用对应基本规范场

电磁作用是宇称守恒的,弱作用是宇称不守恒的。它们分别对应的一维么正对称群 $U(1)$ 和二维么么么正对称群 $SU(2)$,各自不能同时容纳两者。能同时容纳它们的是 $SU(2) \times U(1)$ 群,该群有4个生成元,3个是 $SU(2)$ 的,1个是 $U(1)$ 的。这4个生成元共对应轻子和夸克所带有的4种弱荷及其生成的4种基本规范场(规范场是传递物质场及其相应粒子相互作用的矢量场) $W_{\mu}^1, W_{\mu}^2, W_{\mu}^3, W_{\mu}^Y$ 。符号中的上标表示其序号,其中 Y 称为电弱超荷。基本规范场使物质场(自旋量子数为 $1/2$ 的轻子和夸克对应的旋量场)和标量场(其相应粒子的自旋量子数为零)的运动规律,在 $SU(2) \times U(1)$ 定域规范变换(与时空坐标 x_{μ} 有关的相变换)下保持不变。但是基本规范场没有可观察的量子即没有相应粒子。

基本规范场两两组合成

中间矢量玻色子场和电磁场

自然界中存在一种被称为希格斯场的标量场。上述4种基本规范场在同希格斯场的相互作用中两

敏化电池、有机太阳能电池等,这里不再赘述。值得注意的是关于薄膜电池的研制。除前面介绍的非晶硅薄膜电池外,还有晶态硅薄膜电池。这类电池可以极大地节约原材料,减少工艺流程。它的主要结构是硅淀积在玻璃或耐高温材料的衬底上。特别是后者,能够实现连续生产线,获得高生产率和高转换效率的产品。关键是解决具有理想技术特性、价格低的衬底材料问题。再如,非晶硅/晶态硅异质结太阳能电池。非晶硅膜淀积在硅片两面。太阳光主要由单晶硅或多晶硅吸收。这类电池的优点是具有较高的转换效率;表面钝化好,因而载流子表面复合速率低;制备工艺可以在摄氏温度200以下进行,加工过程热积累低,能耗小;产品的成本低。

太阳能电池系统与建筑结合,国际上正在迅速发展。这类建筑不仅美观、无污染,而且还可以自身供电。据介绍,目前采用太阳能电池系统进行外装修的成本和普通大理石持平,比钛合金板便宜得多。随着太阳能电池成本的下降,这类建筑应更多地发展。

据2002年11月底《科学时报》综合报道,我国太阳能并网发电不多,但离网应用做得很好。仅“送电到乡”工程就需要20兆瓦的装机容量,这将对我国太阳能电池的市场具有很大的推动作用。我国西部地区日照时间很长,特别是偏远山区,发展太阳能光伏工程不但非常需要,而且是可以大有作为的。