

太阳能电池极限效率的原理

一、细致平衡原理的提出

细致平衡原理是考量太阳能电池极限理论效率最重要和最常用的手段。

Detailed balance 这个概念是1954年Roosbroeck和Shockley在在应用物理 (Journal of Applied Physics) 杂志上发的一篇文章提出来的。

1961年William Shockley, Hans J. Queisser 在应用物理上发了 Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells 的文章, 在这篇文章中提出了细致平衡效率极限 (detailed balance limit of efficiency) 的概念, 在一些假设的基础上推导出一个公式用来计算效率极限, 得出单结太阳电池效率极限为31%。

其中这几个假设为：

- 1、太阳和电池被假设为温度分别为6000K和300K的黑体。
 - 2、电子和空穴的复合只有一种辐射复合 (radiative recombination), 这是 detailed balance 原理所要求的。
 - 3、radiative recombination 只是总复合的特定的一小部分, 其余的都是非辐射 (nonradiative) 的。
- 温度为6000K (T_{source}) 和300K (T_{sink}) 的两个热库之间的能量转换效率受卡诺循环限制为95%。

这个数值没有考虑电池光子发射损失, 模型假设这些损失能量又回到了太阳, 使太阳保持自身的温度。修正模型考虑这些光子损失, 并假设过程是可逆的, 满足卡诺循环的条件, 由此得到的转换效率是93.3%。

二、所有的因素都最优化, 太阳能电池最终能够达到怎么样的极限效率

如果所有的因素都最优化, 包括电学的, 光学的, 材料的, 那么太阳能电池最终能够达到怎么样的极限效率? 这是人们最关心的问题之一, 也是各种优化期望达到的方向。细致平衡原理的重要性就在于它是人们现今发现的最低的理论极限, 低于卡洛效率, 低于朗斯堡 (Landsberg) 极限, 它是客观上能达的最高效率。

这个理论有这么几个假设：

- 1、只有能量大于带宽的光子能够被吸收, 小的不能。
- 2、一个光子最多只能产生一个电子空穴对。
- 3、吸收的光子能量都用于激发电子空穴对并储存为电子空穴对的势能。
- 4、只有辐射复合一种情况。
- 5、半导体材料完全符合黑体的行为。

它的大意大概是：太阳如果是6000K的黑体的话 (通常的假设), 他会以符合"普朗克黑体辐射分布"的方式以不同的能量流辐射出不同波长的光子能量, 从0波长开始, 到半导体的带宽为下限。照射到太阳能电池上的时候, 比如我们假设电池有300K的温度 (室温), 那么有一部分能量的损失是不可避免的, 那就是电池作为有一定温度的物体也必然会辐射能量。辐射的方式是怎样的呢? 首先必须服从在300K下的"普朗克黑体辐射分布"; 其次因为能量是以有"能差" (我叫它势能) 的电子空穴对形式分布的, 所以波长对应的能量的下限是带宽刨掉"势能"的值。

把太阳的光子能量分布以能量为变量积分得到总的电池吸收的能量; 当电池短路的时候, 电流密度 = (得到的光子流 - 电池本身辐射掉的电子流) \times (电子电量); 电压 = 电子空穴对的"电势差"; 输出能量 = 电流 \times 电压; 理论极限 = 输出能量 / 输入能量。

说起来很复杂但是刨开数学的本质并不这么麻烦。就是说你从太阳得到的有限量, 而你自己除了消化了干别的你自己还必须要辐射出去一部分 (好像很难理解但是物理事实就是如此), 那你最后可利用的极限就是效率极限。几个有趣的数据可以在脑子里大概有个印象: 在1sun的时候 (不带concentrator的电池), 如果你能够做N层 (N为无限) 把带宽覆盖到整个波长幅度, 那你会得到最多不高于68.2%的效率; 在45800sun的concentrator硅太阳能电池最多不高于40.8%; 1sun硅电池的最多不高于30.0%。

这是理论极限了, 比这个高的, 按照人们现在的理解, 是不可能实现的。

这个基本的方程我们自己可以用程序来算，总的步骤就是先根据黑体辐射公式来算出来短路电流和反向饱和电流，然后电流就可以用电压来表示了，输出功率 P_o 即成为了只包括电压的函数，求导得到最佳电压，再求出最佳效率。在算电流的时候会用到这个理论其中的一个假设，就是"一个光子能产生一个电子空穴对"，所以当你知道有多少个有效光子被利用的时候，就有多少个电荷产生了，然后乘以基本电量就是电流了。

细致平衡效率极限之所以不高，是因为它的假设条件很严格。如"一个光子最多只能打出一个电子空穴对"（实际通过冲击电离的方法，已经能做到一个光子打出多个电子空穴对了）；再有，能量小于禁带宽度的光子能量不被吸收（实际的情况和试验也有表明并不是完全不吸收，有不少被一种叫"激子"吸收了，也存在能量的传递）。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/17443.html>