

# 太阳能技术概论 考试提纲

Africamonkey

2017 年 5 月 12 日

## 1 太阳能概述

### 1.1 什么是广义的太阳能

广义的太阳能包括太阳能、风能、水能、生物质能，也包括煤炭、石油、天然气等化石能源。狭义的太阳能是指太阳辐射能。

### 1.2 什么是太阳能

太阳辐射能，简称太阳能。太阳主要是由氢气与少量的氦气等组成，太阳内部不断地进行着核聚变反应，温度极高，内部温度可达到  $1 \times 10^7 K$  以上，表面也达到  $5800 K$ 。气态的太阳表层可以视为吸收系数为  $A = 1$  的黑体。

### 1.3 太阳能的主要特点

可再生、洁净、分布广泛、永不枯竭，总量大。但能量密度低、间隙性、受到气候、季节变化等因素影响，不稳定。

### 1.4 简单说明太阳与地球的关系

太阳半径为  $6.96 \times 10^8 \text{ m}$ ，而地球半径为  $6.38 \times 10^6 \text{ m}$ ，太阳-地球平均距离为  $1.496 \times 10^{11} \text{ m}$ 。在太阳与地球的中心连线上，地球表面某点至太阳的张角仅为 32 分，因此可近似地将太阳光投射到地球上的光线视为平行光束。

地球表面的平均温度基本保持不变，这源于在太阳表层与地球轨道之间的距离上，太阳作为黑体辐射源与地球保持温度平衡。

### 1.5 太阳常数

太阳常数是地球大气层外垂直面上太阳辐射在单位面积的总量。太阳常数（大气层平均值）为  $1367(\pm 7) W/m^2$ 。由于大气层对太阳辐射吸收、散射等造成衰减，地面接收到的太阳辐射强度一般在  $1000 W/m^2$  以下。

### 1.6 我国的太阳能资源分布情况

最好的地区是西藏、青海、新疆、甘肃、内蒙、云南等。  
东北地区、华北、山东、海南等地区属于第二类地区

华中、华南属于中等地区  
贵州地区与四川成都地区的阳光资源较差。

## 1.7 太阳能利用考虑的两个条件

1. 太阳能资源丰富
2. 空气洁净度好

## 1.8 大气质量

大气质量 (Air Mass) 定义为  $AM = \frac{1}{\sin(\theta)}$ ，其中  $\theta$  表示太阳高度角。

AM0 是大气层外的太阳能辐射分布，是太空太阳能电池的光谱参照。

AM1 是太阳高度角为 90 度的太阳辐射分布。

AM1.5 是太阳高度角为 41.8 度的太阳辐射分布。

## 1.9 太阳辐射光谱分布情况

太阳辐射能量密度是电磁波频率的函数，在地面上的太阳辐射或太阳光的波长范围主要在紫外与近红外之间，一般为 250 - 2500 nm。

紫外线 小于 380 nm，占 9%

可见光 380 - 780 nm，占 45%

红外线 大于 780 nm，占 46%

## 1.10 太阳能转换的基本形式有哪些？主要应用在哪些方面？

基本原理主要有光热转换，光电转换及光化学能转换。

光热技术主要依据光热转换原理，应用方面主要有热水器、干燥除湿、光热发电等。

光伏技术主要依据光电转换原理，主要利用半导体材料发展的光伏发电技术。

植物的光合作用主要是依据光化学能转换原理，光合作用是地球上最广泛地太阳能利用。

## 1.11 什么是光伏效应

光伏效应：光线照在半导体材料上产生光生载流子现象。光电效应：光束照射在金属表面会使其发射出电子的物理效应。

# 2 半导体物理基础

## 2.1 常用高纯硅的硅源料有哪些？各有哪些特点？

半导体硅源主要有  $SiCl_4$ 、 $SiH_2Cl_2$ 、 $SiHCl_3$  和  $SiH_4$  四种。

各种硅源优、缺点比较：

$SiCl_4$  法温度比  $SiHCl_3$  高，制得  $SiCl_4$  氯气消耗量大，现少用；

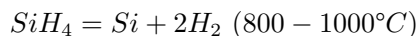
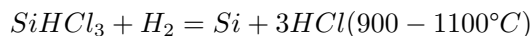
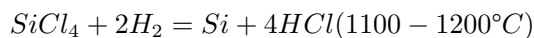
$SiH_4$  法由于消耗金属镁等还原剂，以及  $SiH_4$  法本身易燃、易爆等，在一定程度上受到限制。但此法去除硼杂质很有效，无腐蚀性，生产的硅质量高，多用于外延生长；

$SiH_2Cl_2$  易燃易爆，得到的硅质量高，多用于外延生长；

$SiHCl_3$  的沸点比  $SiCl_4$  低，且易于纯化，此法用得较多。

## 2.2 高纯多晶 Si 的制备工艺有那些？

在半导体工业中就采用这些硅源根据不同工艺来制取多晶硅材料：即  $SiCl_4$ 、 $SiH_2Cl_2$ 、 $SiHCl_3$  还原法和  $SiH_4$  热分解法，反应式如下：



## 2.3 制备多晶硅西门子工艺的技术路线

冶金硅粉与氯化氢反应生成三氯氢硅（无色液体）

通过蒸馏提纯至 11N 以上

加上氢气通入返原炉加热至 1100 度以上

将硅沉积在炉内的 U 型籽晶条上

最后形成高纯多晶硅棒

这是半导体器件与晶体硅太阳能电池所用的硅片的主要原料

## 2.4 什么是半导体？半导体材料的特性？

自然界的物质按导电性的强弱，可分为导体、半导体和绝缘体三类。

它们的电阻率变化范围为：导体  $< 10^{-4} \Omega \cdot cm$ ；绝缘体  $> 10^8 \Omega \cdot cm$ ；半导体  $10^{-4} - 10^8 \Omega \cdot cm$ 。

半导体具有以下特性：

### 2.4.1 掺杂特性

掺入微量杂质可引起载流子浓度变化，从而明显改变半导体的导电能力。此外，在同一种材料中掺入不同类型的杂质，可得到不同导型的材料（p 或 n 型）；

### 2.4.2 温度特性

与金属不同，本征（纯净）半导体具有负的温度系数，即随着温度升高，电阻率下降。但掺杂半导体的温度系数可正可负，要具体分析。

### 2.4.3 环境特性

光照、电场、磁场、压力和环境气氛等也同样可引起半导体导电能力变化。如硫化镉薄膜，其暗电阻为数兆欧姆，而受光照时的电阻可下降到数十千欧姆（光电导效应）

## 2.5 何为 p 型半导体，n 型半导体？

空穴导电为主的半导体为 p 型半导体，电子导电为主的半导体为 n 型半导体。

## 2.6 工业上制备硅单晶有哪两种生产工艺？

一种是直拉法，直拉法是半导体单晶生长用的最多的一种晶体生长技术。

第二种是区熔法，不用坩埚，采用高频电感加热，通过上下移动加热区，将固体多晶硅棒制成单晶硅，也可以用于提纯晶体硅。

## 2.7 简单描述单晶 Si 的直拉法工艺步骤

将高纯多晶硅块料加入石英坩埚，并加入掺杂剂，加热至熔化，将籽晶与熔融硅表面接触，慢慢提拉并旋转，通过缩颈、放肩、等径生长，收尾等步骤，即可生成与籽晶相同晶向的单晶硅棒。

引晶：通过电阻加热，将装在石英坩埚中的多晶硅熔化，并保持略高于硅熔点的温度，将籽晶浸入熔体，然后以一定速度向上提拉籽晶并同时旋转引出晶体；

缩颈：生长一定长度的缩小的细长颈的晶体，以防止籽晶中的位错延伸到晶体中；

放肩：将晶体控制到所需直径；

等径生长：根据熔体和单晶炉情况，控制晶体等径生长到所需长度；

收尾：直径逐渐缩小，离开熔体；

降温：降低温度，取出晶体，待后续加工

## 2.8 简单描述单晶 Si 的区熔法工艺步骤

先制成所要求直径的多晶硅棒，在下端接上一个籽晶，通过高频电感加热，使得与籽晶接触处熔化，然后从下向上提拉，直至多晶硅棒形成如同籽晶一样的晶向的单晶硅棒。

## 2.9 直拉单晶 Si 的和区熔单晶 Si 的质量区别

直拉：需要石英坩埚，氧含量高，用于太阳能电池，价格低

区熔：不用石英坩埚，氧含量低，用于集成电路、价格高

## 2.10 电子级和太阳能级半导体材料的纯度范围

电子级 9N 以上，用于半导体器件，太阳能级 6-9N，用于太阳能电池。

## 2.11 晶体硅所用的掺杂元素有哪些？

p 型半导体：常用 B, Ga 等元素

n 型半导体：最常用 P 元素

## 2.12 硅片制造工艺流程

直拉法制备单晶硅锭，或浇铸法制备多晶硅锭，采用带锯切成硅砖，然后通过多线切割切成硅片。单晶硅片边长多为 150 mm，厚度 180-200  $\mu\text{m}$ 。

多晶硅片边长多为 156 mm，厚度 180-200  $\mu\text{m}$ 。

## 2.13 硅片的主要电学技术指标

单晶硅片的电阻率 1-3  $\Omega\text{cm}$ ，少子寿命 10  $\mu\text{s}$

多晶硅片的电阻率 0.5-3  $\Omega\text{cm}$ ，少子寿命 1-2  $\mu\text{s}$

## 2.14 p-n 结制备工艺有哪些

扩散、合金化、离子注入、外延等工艺。半导体工业主要采用离子注入，而晶体硅太阳能电池主要采用热扩散工艺。

## 2.15 导体、绝缘体与半导体的能带

导体、绝缘体与半导体的导电能力的差别在于它们的能带结构不同的缘故。导体，如金属的价带与导带之间没有禁带，两者或是重叠，或是价带能级没有被电子填满，而有许多空能级。因此，即使在常温下，靠热激发也有大量的自由电子参与导电。所以，金属的电阻率很低。 $(< 10^{-4} \Omega\text{cm})$

半导体与绝缘体的价带与导带之间都有一个禁带。但是半导体的禁带宽度较这窄（小于 3 eV），随温度升高，价带顶附近的电子容易通过热激发跃迁到导带成为导电电子。其电阻率高于金属，但比绝缘体要小，且随温度升高而减少  $(10^{-4} - 10^8 \Omega\text{cm})$

绝缘体的禁带宽度比半导体宽的多（大于 3 eV），所以一般情况下，其导带上电子极少，即绝缘体如玻璃、陶瓷、橡胶和塑料等不导电  $(> 10^8 \Omega\text{cm})$

## 2.16 什么是非平衡载流子？

当处于热平衡的半导体受到外界作用时，将产生比平衡态时多出来的载流子，称为非平衡载流子。光、电等作用也会产生非平衡载流子。

## 2.17 什么是载流子的复合与寿命？

非平衡态载流子从产生到消失（或复合）的平均存在时间定义为非平衡态载流子的平均寿命。寿命是半导体材料的重要参数。一般说寿命往往是指非平衡少数载流子寿命，简称少数寿命

## 2.18 什么是载流子的复合中心？

直接复合：空穴与电子直接相遇（砷化镓）；

间接复合，通过复合中心（硅、锗）；复合中心：一为重金属，二是晶体缺陷。

## 2.19 p-n 结的内建电场是如何形成的？

一般对于晶体硅太阳能电池来说，p-n 结是通过热扩散形成的，p 型硅片通过采用三氯氧磷进行热扩散，就可在硅片表面形成 n 型层，即形成 p-n 结。这样由于存在浓度差别，空穴向 p 型区、电子向 n 型区相互扩散，在硅片表面除处形成一个只有施主或只有受主的区域，即空间电荷区，从而形成一个内建电场，这个内建电场阻止空穴与电子的进一步扩散，达到一个动态平衡。

# 3 太阳能电池原理与工艺

## 3.1 简单说明晶体硅太阳能电池的制备工艺过程

必考

硅片清洗、制成绒面结构、扩散制备 p-n 结、利用 PECVD 沉积氮化硅减反射薄膜、丝网印刷正负电极、烧结、最后检测分类。

## 3.2 简单描述晶体硅太阳能电池的工作原理

必考

在光照下，硅片表面产生电子-空穴对，在内建电场的作用下，空穴向 p 型区、电子向 n 型区迁移，从而形成电流。

### 3.3 太阳能电池标准测试条件有哪些？

必考

光强  $1000\text{W}/\text{m}^2$  、大气质量 AM1.5、温度 25 度

### 3.4 硅片表面湿化学处理的目的

一是清除污染物，二是在硅片表面形成陷光结构。对于单晶硅片通过碱腐蚀形成金字塔结构；对于多晶硅通过酸腐蚀形成凹坑结构。

### 3.5 硅片表面金字塔构造的作用

由于金字塔结构形成，可使得光线两次以上接触硅片，从而增加硅片对光线的吸收效果。

### 3.6 [111] 和 [100] 硅片，哪个可通过化学腐蚀法实现表面织构化处理，为何？

硅片的 (111) 晶面为密排面，化学键多；相比之下，(100) 晶面化学键少，易于腐蚀。选用晶向为 [100] 硅片，由于 (100) 晶面腐蚀速率快，最后留下在硅片表面留下许多 (111) 组成的所谓金字塔结构，即可达到限制光线反射效果。

### 3.7 氮化硅薄膜在多晶硅太阳能电池中的作用

减少光线反射，并通过氢离子与硅的悬挂键结合，对硅片可以起到表面钝化作用。

### 3.8 晶体硅太阳能电池表面金属化的工艺

晶体硅电池的金属化：丝网印刷在背面印上银铝浆电极、烘烤，然后印刷铝背场、烘烤，再印正面银电极，最后烧结。

### 3.9 太阳光谱的分布范围和晶体硅、非晶硅太阳能电池的响应范围？

太阳光谱一般在 300 - 2500 nm 范围，晶体硅电池可利用到 1100 nm，而非晶硅电池只利用到 800 nm。

### 3.10 写出太阳能电池的填充系数和效率基本公式

记最大工作点电流为  $I_m$ ，最大工作点电压为  $V_m$ ，短路电流为  $I_{sc}$ ，开路电压为  $V_{oc}$ 。

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}}$$

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_{Licht}} = \frac{FF I_{sc} V_{oc}}{P_{Licht}}$$

### 3.11 说明选择性发射结太阳能电池结构与原理

硅片表面实现选择性掺杂：电极下面重掺杂，接受光线处可疑轻掺杂。这样改善短波响应，同时可疑减少串联电阻。

### 3.12 为何 HIT 太阳电池可以实现高效率

非晶硅与单晶硅结合，非晶硅可见光谱范围相应好；单晶硅在近红外光谱响应好，低温工艺，材料损伤小，可实现双面电池。

### 3.13 薄膜太阳电池有哪些种类与特点

薄膜电池有 a-Si, CdTe, CIGS 等。

直接带隙材料，需要很薄的材料就可吸收光线；衬底材料选择玻璃、金属、塑料等，能够实现大面积生产；容易实现柔性电池；容易实现叠层电池；弱光性能好。

### 3.14 非晶硅薄膜与电池的有哪些特点？

a-Si 禁带宽度为 1.7 eV, 通过掺 B 或掺 P 可得到 p 型 a-Si 或 n 型 a-Si;

非晶硅掺 C, 可得到 a-SiC, 禁带宽度  $> 2.0$  eV (宽带隙), 掺 Ge, 可得到 a-SiGe 禁带宽度 1.7-1.4 eV (窄带隙);

在太阳光谱的可见光范围内，非晶硅的吸收系数比晶体硅大将近一个数量级，其本征吸收系数高达  $10^5 \text{ cm}^{-1}$ ;

非晶硅太阳电池光谱响应的峰值与太阳光谱的峰值接近;

由于非晶硅材料的本征吸收系数很大， $1\mu\text{m}$  厚度就能充分吸收太阳光，厚度不足晶体硅的  $\frac{1}{100}$ ，可节省昂贵的半导体材料。

非晶硅薄膜利用光谱范围局限于可见光，效率较低。

### 3.15 什么是 S-W 效应

非晶硅及其合金的光暗电导率随光照时间加长而减少，经 200 度退火 2 小时可恢复原状。

### 3.16 提高太阳电池效率的原理与方法

光学、电学两方面考虑：

光学：光谱分割利用；聚光；光子能量上、下转换；全背面电极

电学：叠层电池；异质结电池

### 3.17 如何评价太阳电池性能？

重要参数是能量转换效率，即单位面积上输出电量与输入光能的比值。

提高太阳电池转换效率主要从两个方面进行。

一是光学方面，尽可能提高太阳电池对入射光的吸收，以产生更多的光生载流子；

另外是电学方面，尽量减少光生载流子在电池体内及表面处的复合，同时减少各种上、下电极的电阻损耗，使更多的电能能够输出到外部负载。

## 4 往年考试试题

考试方式：闭卷

考试时间：120 分钟

### 4.1 判断题（共 10 题，30 分）

1. 光热转换与光电转换的基本原理是一样的。
2. 非晶硅电池的效率比晶体硅电池要高，因为非晶硅电池对太阳光谱的可见光部分有很好的吸收利用。
3. 大气质量 AM0 是指大气层外太阳光谱强度和分布。
4. 像金属一样，本征半导体具有正的温度系数，即随着温度升高，电阻率上升。
5. p 型半导体中多数载流子是电子，n 型半导体中多数载流子是空穴。
6. 直拉单晶 Si 氧含量高，主要用于太阳电池；区熔单晶 Si 氧含量低，主要用于集成电路。
7. 绝缘体的价带和导带之间没有禁带，或是价带能级没有被电子填满，有许多空能级。
8. p 型硅片通过采用三氯氧磷进行热扩散，就可在硅片表面形成 n 型层，即形成 p-n 结。
9. 太阳光谱的主要能量分布在 300-2500 nm 范围，晶体硅太阳电池发电可利用的范围为 300-1100 nm。
10. 晶体硅太阳电池的电极下面重掺杂，形成选择性发射极（SE），可以改善短波响应，同时减少串联电阻。

### 4.2 问答题（共 5 题，30 分）

1. 高纯多晶硅采用西门子工艺，请描述主要工艺过程。
2. 晶体硅太阳电池的主要工艺有哪些？
3. 晶体硅同质结太阳电池 p-n 结的内建电场是如何形成的？
4. 薄膜太阳电池有哪些种类与特点？
5. 太阳电池国际标准测试（STC）条件有哪些？

### 4.3 小论文（共 2 题，选做 1 题，40 分）

1. 如何提高晶体硅太阳电池的转换效率？请谈谈你的观点。
2. 关于光伏发电应用，请谈谈你的想法与建议。