

# Theoretical Design of Optimum Thickness for Polycrystalline Thick Film Silicon Solar Cells

Kai He<sup>1</sup>, Nuofu Chen<sup>1\*</sup>, Fandi Kong<sup>1</sup>, Yiming Bai<sup>1</sup>, Xiaoye Mou<sup>1</sup>, Bo Yang<sup>1</sup>, Quanli Tao<sup>1</sup>, Haiyang He<sup>1</sup>, Xinyi Chen<sup>1</sup>, Jikun Chen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source, School of Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing

<sup>2</sup>Changzhou Yingnuo Energy Technology Co., Ltd., Changzhou Jiangsu

Email: [nfchen@ncepu.edu.cn](mailto:nfchen@ncepu.edu.cn)

Received: Jul. 17<sup>th</sup>, 2015; accepted: Jul. 31<sup>st</sup>, 2015; published: Aug. 4<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

The crystalline silicon solar cells are the most mature, most stable and most widely used photoelectric converters in the world. At present, the thickness of crystalline silicon solar cells is generally about 200  $\mu\text{m}$ , and this thickness is not the best for the photoelectric conversion efficiency. In this paper, the thickness of crystalline silicon solar cells is theoretically analyzed from two aspects of the minority carrier diffusion as well as the incident light absorption. The optimum thickness of the crystalline silicon solar cells is 49  $\mu\text{m}$ . In the future, the development trend of crystalline silicon solar cells is the crystalline silicon thick film structure with thickness of about 49  $\mu\text{m}$ .

## Keywords

Polycrystalline Silicon Thick Film, Solar Cell, Minority Carrier Diffusion, Thickness

# 多晶硅厚膜太阳能电池最佳厚度理论设计

贺凯<sup>1</sup>, 陈诺夫<sup>1\*</sup>, 孔凡迪<sup>1</sup>, 白一鸣<sup>1</sup>, 牟潇野<sup>1</sup>, 杨博<sup>1</sup>, 陶泉丽<sup>1</sup>, 何海洋<sup>1</sup>, 陈心一<sup>1</sup>, 陈吉堃<sup>2</sup>

\*通讯作者。

文章引用: 贺凯, 陈诺夫, 孔凡迪, 白一鸣, 牟潇野, 杨博, 陶泉丽, 何海洋, 陈心一, 陈吉堃. 多晶硅厚膜太阳能电池最佳厚度理论设计[J]. 可持续能源, 2015, 5(4): 33-41. <http://dx.doi.org/10.12677/se.2015.54005>

<sup>1</sup>新能源电力国家重点实验室, 华北电力大学可再生能源学院, 北京

<sup>2</sup>常州英诺能源技术有限公司, 江苏 常州

Email: [nfchen@ncepu.edu.cn](mailto:nfchen@ncepu.edu.cn)

收稿日期: 2015年7月17日; 录用日期: 2015年7月31日; 发布日期: 2015年8月4日

## 摘要

晶体硅太阳电池是生产工艺最成熟、性能最稳定、应用最广泛的光电转换器件。目前晶体硅太阳电池的厚度一般为200  $\mu\text{m}$ 左右, 这一厚度对于光电转换效率不是最佳值。本文分别从少子扩散和入射光吸收两方面对晶体硅太阳电池厚度进行了理论分析, 获得晶体硅太阳电池的最佳厚度为49  $\mu\text{m}$ 。今后, 晶体硅太阳电池的发展趋势必然是厚度为49  $\mu\text{m}$ 的晶体硅厚膜结构。

## 关键词

多晶硅厚膜, 太阳电池, 少子扩散, 厚度

## 1. 引言

在 20 世纪 90 年代之前, 太阳能光伏工业主要以单晶硅为基础, 然而单晶硅生产需要消耗大量高纯硅材料并且制作工艺复杂, 成本较高。虽然单晶硅太阳电池的成本不断下降, 但是相比于常规电力还缺乏竞争力, 因此欧美国家开始将注意力转移到多晶硅太阳电池的研制中。利用铸造技术, 人们生产出大尺寸的多晶硅锭, 其材料利用率高、能耗小, 制备成本较低, 使得多晶硅电池的成本有了大幅下降。随着铸造多晶硅的广泛应用, 多晶硅电池不断挤占单晶硅市场, 成为最有竞争力的太阳电池材料, 目前, 我国晶澳公司生产的太阳能多晶硅电池的平均转换效率达到了 19.15%, 居世界最高水平[1]。

然而随着多晶硅电池不断成熟, 降低成本也变得越来越困难, 因为硅材料本身的价格是晶硅电池组件中很难降低的部分。非晶硅薄膜电池虽然具有转换效率高、质量轻、成本低以及可大规模生产等优点, 但是非晶硅薄膜存在光致衰退效应, 使得电池性能很不稳定, 直接影响实际应用[2]。而非晶硅薄膜太阳电池的发展, 也使得人们希望开发出一种既具有晶体硅太阳电池的光电转换性能, 同时又具有非晶硅薄膜电池成本低、面积大的新型太阳电池材料。多晶硅厚膜电池既具有晶体硅电池原料丰富、效率高和稳定性好的优势, 又具有薄膜电池用料少、面积大和制备工艺简单的优点[3]。而在生产工艺方面, 传统方法需要经过重熔铸锭和切片等工序, 利用薄膜多晶硅新技术可将原材料直接转变为多晶硅片费, 如图 1 所示, 不仅节约了原材料, 并且降低了能耗, 这些优点使得多晶硅厚膜材料备受关注。

硅是典型的 IV 族元素, 具有正四面体金刚石型晶体结构, 是一种间接带隙半导体。多晶硅的禁带宽度为 1.12 eV, 吸收系数为  $10^4$  数量级(太阳光谱峰值在 500 至 600 nm 间)。理论上来说, 当硅的厚度为十微米量级时便可吸收大部分太阳光的能量[5]。然而在实际研发过程中, 多晶硅厚膜的厚度一般为 5 至 50  $\mu\text{m}$  [6]。目前, J. H. Petermann [7]等人已通过层转移技术制得厚度为 43  $\mu\text{m}$  的多晶硅厚膜太阳电池, 其效率已经达到了 19.1%。

当前, 晶体硅材料(包括多晶硅和单晶硅)是最主要的光伏材料, 其市场占有率高达 90%以上[8], 而随着太阳电池产业的不断发展, 晶体硅太阳电池厚膜化必将成为发展趋势。因此制备出厚度适宜的多晶硅厚膜太阳电池不仅能够提高电池自身的转换效率, 同时也可以减少太阳电池生产过程中的能耗和材料使用量。进一步降低太阳电池的制造成本, 推动多晶硅厚膜太阳电池的发展。

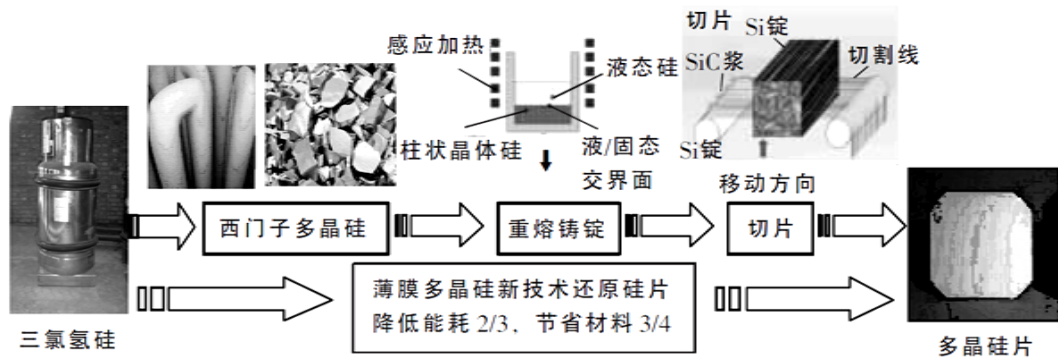


Figure 1. The process comparison between thick film polysilicon and conventional silicon wafer [4]

图 1. 厚膜多晶硅与传统硅片的工艺对比[4]

## 2. 晶体硅太阳能电池厚度理论分析

### 2.1. 少子扩散长度

影响太阳能电池效率因素大致可分为两类：一类为光学损失，由于光能量损耗引起的效率损失；另一类为电学损失，如载流子复合导致少子寿命下降造成的[9]。

因为 p-型 Si 中的少子(电子)的寿命远大于 n-型 Si 中的少子(空穴)的寿命，因此在相同掺杂浓度和相同厚度的情况下，p-型 Si 中载流子的收集和输运比 n-型 Si 更加有效。因此太阳能电池的半导体结一般设计为 n-p 结，即将较薄的 n-型发射区制备在较厚的 p-型基区之上[10]。

p-型 Si 中的电子扩散长度定义为：

$$L_n = \sqrt{\tau_n D_n}$$

式中， $\tau_n$  代表电子寿命， $D_n$  代表电子扩散系数。 $\tau_n$  描述了 p-型 Si 中各种电子复合机制的净复合，主要包括辐射复合、俄歇复合、缺陷复合和表面复合。

其中，辐射复合是指能量以光子形式辐射出去的复合过程，它是直接半导体中最主要的复合形式。p 型基区的辐射复合率可表达为：

$$U_{rad} = \frac{n - n_0}{\tau_{rad}}$$

$$\tau_{rad} = \frac{1}{B_{rad} N_a}$$

式中，辐射少子寿命  $\tau_{rad}$  与受主浓度  $N_a$  成反比。这是因为 Si 是间接带隙半导体，辐射复合较慢。

俄歇复合则是间接半导体中最主要的复合形式，在 p 型半导体中，价带空穴是多数载流子，导带电子为少数载流子，易发生 2 个价带空穴和 1 个导带电子的俄歇复合。即 2 个价带空穴发生碰撞，使得一个发生碰撞的价带空穴和导带电子发生复合，而另一个发生碰撞的电子受到激发，得到更大的动能，最动能以热能的形式，作为声子传递给周围晶格[10]。

p 型基区的电子俄歇复合率为：

$$U_{Aug} = \frac{n - n_0}{\tau_{Aug}}$$

$$\tau_{Aug} = \frac{1}{B_{Aug} N_a^2}$$

式中，俄歇少子寿命  $\tau_{Aug}$  与受主浓度  $N_a$  的平方成反比，因此当 Si 的掺杂浓度很高时，俄歇复合将成为最主要的载流子复合机制。

缺陷复合则是由于带隙内的缺陷引起的非辐射复合除了高纯硅外所有硅材料都会遇到的主要复合机制。P 型基区的缺陷复合率为：

$$U_{trap} = \frac{n - n_0}{\tau_{trap}^n}$$

$$\tau_{trap}^n = \frac{1}{B_n N_t}$$

式中，电子缺陷寿命  $\tau_{trap}^n$  与缺陷浓度  $N_t$  成反比，也与缺陷态在带隙内的位置有关。

P 型基区的少数载流子是电子，因为各种复合机制都与少子浓度成正比，由上述分析可以得到 p 型基区的电子符合率和电子寿命：

$$U_n = U_{rad} + U_{Aug} + U_{trap} = \frac{n - n_0}{\tau_n}$$

$$\frac{1}{\tau_n} = \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{Aug}} + \frac{1}{\tau_{trap}^n}$$

其中  $\tau_{rad}$ 、 $\tau_{Aug}$ 、 $\tau_{trap}^n$  分别为辐射少子寿命、俄歇少子寿命和空穴陷阱寿命。

少子寿命是指当能量大于半导体禁带宽度的光照射半导体时，光子将价带电子激发到导带上，产生电子 - 空穴对。而光照停止时，由于复合的原因，非平衡载流子随时间按照指数规律减少，即从产生到被复合之间，载流子所存在的平均时间称为少数载流子寿命[11]。而温度和掺杂浓度不同则影响着复合机制的主次地位。对于 p-型硅来说，室温下轻掺杂时缺陷复合占据主要地位，其电子寿命大约为 10  $\mu$ s，而高温或者重掺杂情况下，俄歇复合占据主要地位；对于 n 型硅来说，室温下轻掺杂时其空穴寿命仅为 1  $\mu$ s，而高温或重掺杂时，俄歇复合也占据主要地位[10]。

在商业应用领域，p-型多晶硅少子寿命的要求为  $\geq 1 \mu$ s [12]，因此这里我们取 p 型多晶硅少子寿命为 1  $\mu$ s。

由于电子扩散系数  $D_n$  与迁移率  $\mu_n$  之间存在如下关系：

$$\mu_n = \frac{qD_n}{k_B T}$$

即爱因斯坦关系式，式中  $q$  代表电子电量， $k_B$  代表玻尔兹曼常数， $T$  代表温度。

因此在特定掺杂浓度下，可由迁移率  $\mu_n$  推算出电子扩散系数  $D_n$ 。目前 p 型多晶硅掺杂浓度为  $8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  至  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  之间，由图 2 可以看出，多晶硅迁移率随掺杂浓度升高而降低。而迁移率主要受到材料内部散射因素的影响，因为晶体内存在不断振动的原子和自由运动的载流子，因此载流子在运动过程中不可避免的与其他原子和载流子发生碰撞。当掺杂浓度较低时，Si 晶格是散射的主要原因，而当掺杂浓度升高时，杂质原子形成了更多的散射中心，迁移率下降较快。由于目前 p 型多晶硅掺杂浓度为  $8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  至  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  之间，根据图 2 所示的迁移率随掺杂浓度变化曲线，取电子迁移率  $\mu_n$  约为  $1350 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{v}^{-1}$ ，带入爱因斯坦关系式，可以计算出在该掺杂浓度条件下，电子扩散系数  $D_n$  约为  $34 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

综上，当电子寿命  $\tau_n$  为 1  $\mu$ s，电子扩散系数  $D_n$  为  $34 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  时，根据  $L_n = \sqrt{\tau_n D_n}$ ，可得最小少子扩散长度约为 58.3  $\mu$ m。

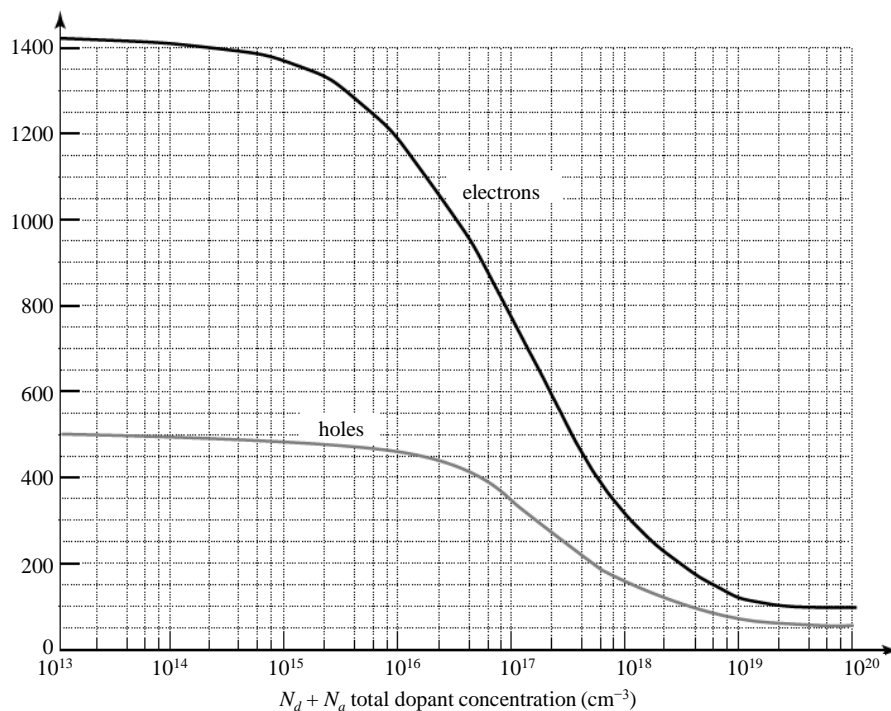


Figure 2. 300 K, the mobility of electron and hole change with the doping density  
图 2. 300 K 时硅中电子与空穴的迁移率随掺杂浓度的变化

## 2.2. 入射光吸收厚度

设计理想晶体管太阳能电池的厚度除了要考虑少数载流子扩散长度，还需要考虑材料本身对于入射光的吸收能力。

宏观上，入射光的吸收可用吸收系数  $\alpha$  来描述，它表示了入射光照射在材料后的弛豫程度。当入射光以太阳光强度  $P(0)$  垂直照射在半导体材料时，用  $P(x)$  表示单色光强，则  $dx$  厚的半导体材料将吸收光照强度为(如图 3 所示)。

$$dP(x) = -\alpha(x)P(x)dx$$

对上式积分可得：

$$\int_0^x \frac{dP(X)}{P(X)} = \int_0^x -\alpha(X)dx$$

考虑到材料的表面反射，可得到：

$$P(x) = [1 - R(E)]P(0)e^{\int_0^x -\alpha(X)dx}$$

其中  $R(E)$  为材料反射率。

在此我们认为多晶硅各处的吸收系数是相同的，并不考虑入射光反射率对于光谱能量的变化，则入射光与材料厚度遵循朗伯比耳定律[10]，即：

$$P(x) = P(0)\exp(-\alpha X)$$

根据文献[13]所得到的太阳光波长与吸收系数量化关系，可绘制波长与吸收系数对数坐标图(如图 4)。其中，横坐标为太阳光波长(nm)，横坐标为吸收系数  $\alpha$ 。

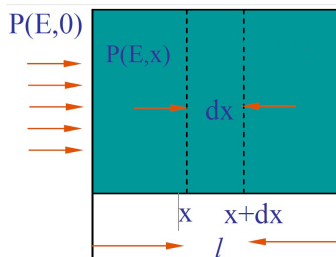


Figure 3. The relationship between the incident light absorption and thickness  
图 3. 入射光吸收与厚度关系示意图

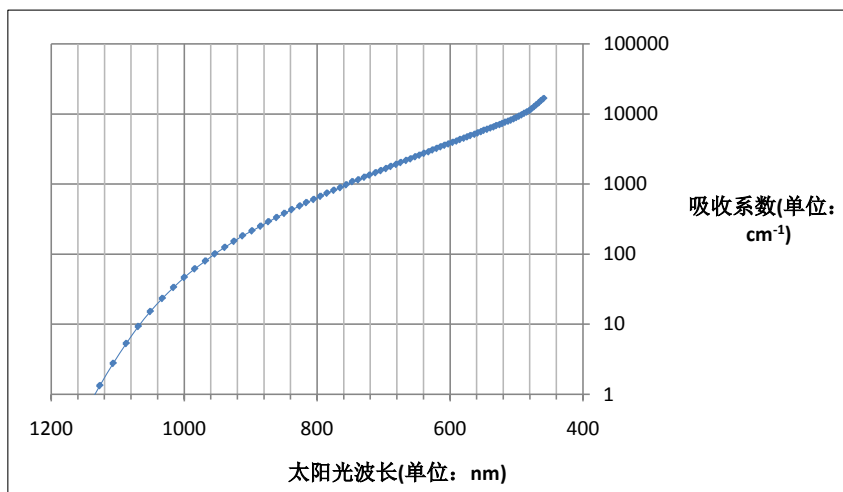


Figure 4. Relationship between wavelength and absorption coefficient  
图 4. 波长与吸收系数间关系

由于地面上太阳辐射的波长范围为 295 nm 至 2200 nm 之间，并且不同波长区间所占整个太阳辐射强度权重并不相同，在 AM1.5 标准条件(25℃, 1000 w/m<sup>2</sup>)下，各个波长区间所占太阳光强权重如表 1 所示。

从左到右分别为：波长区间、中心波长、该波长区间所占整个太阳辐射强度权重、波长折射率。

因此在 AM1.5 标准条件下，各波长区间内光照强度如表 2 所示。

由于多晶硅光谱响应范围为 460 nm 至 1006 nm 之间，因此对于多晶硅电池来说，其能够吸收的能量仅为波长在 460 nm 至 1006 nm 间的入射光辐射能量。因此我们只考虑该波长范围内的太阳辐射。由上述计算可以看出，对于不同波长区间来说，其所占太阳辐射强度权重并不相同，并且相对应的吸收系数也不相同，因此在利用朗伯比耳定律计算薄膜厚度对于入射光强吸收的影响时应当对不同波长区间分别计算，这样才能得出较为准确的辐射强度。

因此根据朗伯比耳定律，将 AM1.5 标准状态下不同波长区间太阳光强作为  $P_\lambda(0)$ ，根据图 4 不同波长对应的吸收系数作为式中的  $\alpha$ ，利用公式：

$$P(x) = \sum_{\lambda} P_{\lambda}(0) e^{-\alpha(\lambda)x}$$

可计算出厚度为  $x$  时所对应的光照强度，如图 5 所示。

利用公式：

$$\frac{P(x)}{P_0} = \frac{P(x)}{\sum_{\lambda} P_{\lambda}(0)}$$



可将上述计算所得不同厚度的光照强度值归一化处理可得到入射光随厚度的变化曲线,如图6所示,其中横坐标为多晶硅电池厚度,纵坐标为在该厚度时太阳光强占总太阳光强的百分比。

由图可看出,太阳光强度随着厚度增加而减下,其中当厚度小于40  $\mu\text{m}$  时入射光强下降较快,当厚度大于40  $\mu\text{m}$  后下降趋势变缓,而当厚度大于49  $\mu\text{m}$  后,其光强已小于太阳光强的10%,利用率较低,因此,可以认为较为理想的多晶硅厚膜厚度约为49  $\mu\text{m}$ 。

**Table 1.** The changes of wavelength and intensity of radiation [14]

**表 1.** 不同波长区间辐射强度变化[14]

$\Delta\lambda_i$ ( $\mu\text{m}$ )	$\lambda_i$ ( $\mu\text{m}$ )	$W_i$	$N_i$
0.295 - 0.40	0.374	0.0267	1.4358
0.40 - 0.43	0.416	0.0275	1.4293
0.43 - 0.45	0.441	0.0244	1.4252
0.45 - 0.47	0.46	0.0291	1.4231
0.47 - 0.49	0.48	0.032	1.4104
0.49 - 0.51	0.5	0.0327	1.419
0.51 - 0.53	0.52	0.0323	1.4176
0.53 - 0.55	0.54	0.0322	1.417
0.55 - 0.57	0.56	0.0319	1.4151
0.57 - 0.60	0.585	0.0473	1.414
0.60 - 0.63	0.615	0.0473	1.4122
0.63 - 0.66	0.645	0.0475	1.411
0.66 - 0.69	0.675	0.0456	1.4098
0.69 - 0.73	0.709	0.0537	1.4083
0.73 - 0.78	0.753	0.0591	1.4071
0.78 - 0.83	0.804	0.0562	1.406
0.83 - 0.89	0.857	0.0623	1.4045
0.89 - 0.99	0.953	0.0606	1.4022
0.99 - 1.06	1.024	0.0565	1.4011
1.06 - 1.21	1.129	0.0621	1.3998
1.21 - 1.52	1.274	0.0649	1.3983
1.52 - 2.20	1.642	0.0681	1.3962

**Table 2.** The relationship between Wavelength and intensity of radiation

**表 2.** 波长区间与光照强度关系

波长区间( $\mu\text{m}$ )	辐射值( $\text{w}/\text{m}^2$ )	波长区间( $\mu\text{m}$ )	辐射值( $\text{w}/\text{m}^2$ )
0.295 - 0.40	26.7	0.66 - 0.69	45.6
0.40 - 0.43	27.5	0.69 - 0.73	53.7
0.43 - 0.45	24.4	0.73 - 0.78	59.1
0.45 - 0.47	29.1	0.78 - 0.83	56.2
0.47 - 0.49	32	0.83 - 0.89	62.3
0.49 - 0.51	32.7	0.89 - 0.99	60.6
0.51 - 0.53	32.3	0.99 - 1.06	56.5
0.53 - 0.55	32.2	1.06 - 1.21	62.1
0.55 - 0.57	31.9	1.21 - 1.52	64.9
0.57 - 0.60	47.3	1.52 - 2.20	68.1
0.60 - 0.63	47.3	0.66 - 0.69	45.6

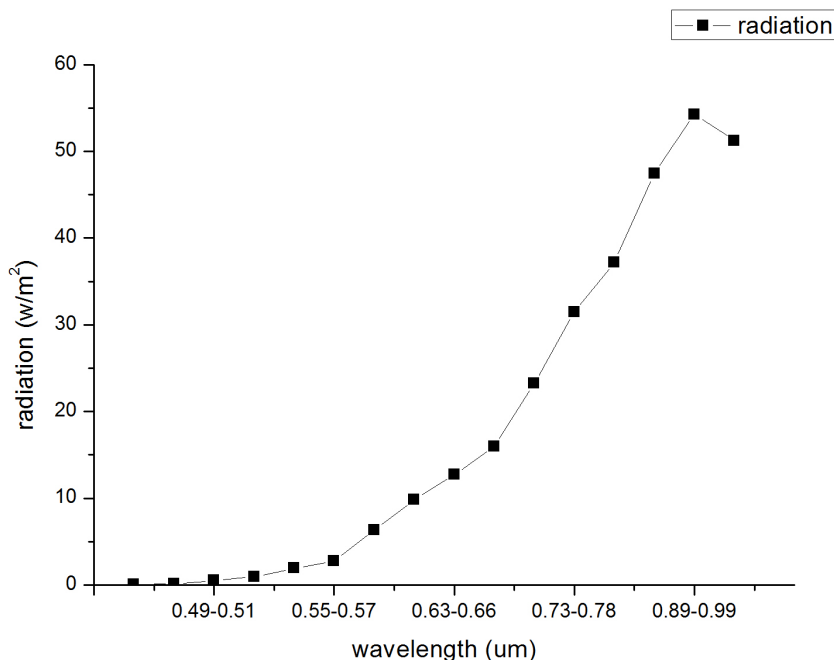


Figure 5. The illumination intensity when the thickness is 1  $\mu\text{m}$   
 图 5. 厚度为 1  $\mu\text{m}$  时对应光照强度

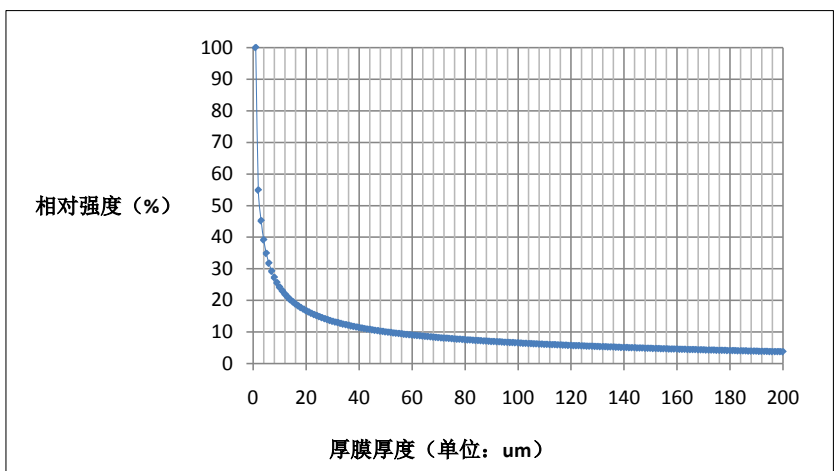


Figure 6. Relationship between incident light and thickness  
 图 6. 入射光与厚度关系

### 3. 结论

本文综合考虑晶体硅的少子扩散长度和对太阳光的吸收系数，分析计算了晶体硅太阳电池的最佳厚度。首先通过少子寿命和少子扩散系数来计算少子扩散长度，得出少子扩散长度约为为 58.3  $\mu\text{m}$ ，因此晶体硅太阳电池的厚度应小于 58.3  $\mu\text{m}$ ，否则会使得少子由于多晶硅材料中的缺陷等因素而被复合。其次，我们又分析了入射太阳光被晶体硅材料的吸收情况。通过朗伯比耳定律分别计算了太阳光入射进晶体硅不同厚度时的辐射强度值，得到当厚度大于 49  $\mu\text{m}$  时，光强已小于太阳光强的 10%，对于太阳电池发电价值较低。所以，晶体硅太阳电池的厚度不应大于 49  $\mu\text{m}$ ，此时既满足了少子扩散的条件，也基本吸收了太阳光的辐射能。



因此, 今后晶体硅太阳能电池的发展趋势是厚度为 49  $\mu\text{m}$  的晶体硅薄膜太阳能电池。

## 基金项目

北京市自然科学基金资助项目(No: 2151004)和中央高校基本科研业务费专项资金资助(No: 13ZD05)。

## 参考文献 (References)

- [1] 佚名 (2014) 晶澳多晶硅电池平均转换效率超 19%. *人工晶体学报*, **2**, 313.
- [2] 吴波, 王伟杨, 魏相飞 (2014) 玻璃衬底多晶硅薄膜太阳能电池. *微纳电子技术*, **10**, 17-23.
- [3] 吴强, 等 (2014) 铝诱导多晶硅薄膜籽晶层的电学性质. *微纳电子技术*, **1**, 623-627.
- [4] 何海洋, 等 (2013) 多晶硅薄膜太阳能电池. *微纳电子技术*, **3**, 137-166.
- [5] 杨德仁 (2007) 太阳能电池材料. 化学工业出版社, 北京, 235-237.
- [6] 雷永泉 (2000) 新能源材料. 天津大学出版社, 天津, 222-236.
- [7] Peterm Ann, J.H., Zielke, D., Schmidt, J., et al. (2012) 19% efficient and 43  $\mu\text{m}$ -thick crystalline Si solar cell from layer transfer using porous silicon. *Progress in Photovoltaics Research and Application*, **20**, 1-5.
- [8] 郑炎, 何伟艳 (2015) 浅谈多晶硅产品发展状况及发展趋势. *内蒙古科技与经济*, **4**, 73-74.
- [9] 张妹玉, 张宁, 翁铭华, 陈朝 (2014) 表面处理对低成本多晶硅太阳能电池性能的影响. *半导体光电*, **2**, 233-236, 240.
- [10] (英)Nelson, J., 著, 高扬, 译 (2011) 太阳能电池物理. 上海交通大学出版社, 上海, 153-154.
- [11] 赵燕娇, 杨飞飞, 王海刚 (2015) 多晶硅电池工艺参数控制的研究. *山西化工*, **1**, 50-52, 60.
- [12] GB/T 29054-2012 (2012) 太阳能级铸造多晶硅块. 中国标准出版社, 北京.
- [13] Virginia Semiconductor, Inc. Optical Properties of Silicon. <http://www.docin.com/p-61776546.html>
- [14] Cosby, R.M. (1977) The linear Fresnel lens—Solar optical analysis of tracking error effects. *International Solar Energy Society, Annual Meeting*, Orlando, 6-10 June 1977, 3514-3518.