

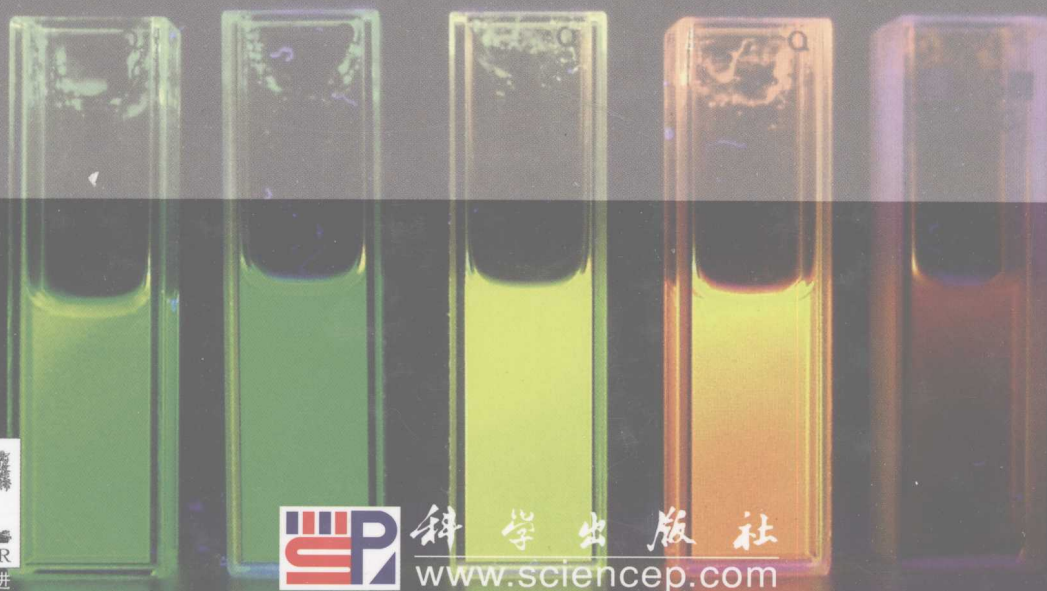


· 导读版 ·

Nanostructured Materials  
for Solar Energy Conversion

# 纳米结构材料在 太阳能转化中的应用

Tetsuo Soga



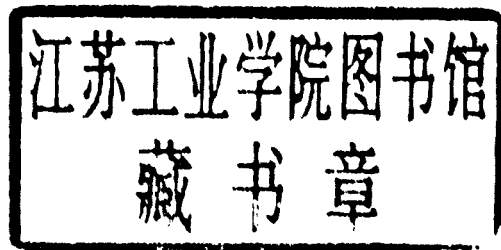
科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

**Nanostructured Materials for Solar  
Energy Conversion**

**纳米结构材料在太阳能  
转化中的应用**

Tetsuo Soga



**科学出版社**  
北 京

图字:01-2007-2317 号

This is an annotated version of

**Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion**

Tetsuo Soga

Copyright © 2006 Elsevier B. V

ISBN-13: 978-0-444-52844-5

ISBN-10: 0-444-52844-X

All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopy, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher.

AUTHORIZED EDITION FOR SALE IN P. R. CHINA ONLY

本版本只限于在中华人民共和国境内销售

#### 图书在版编目(CIP)数据

纳米结构材料在太阳能转化中的应用:英文/(日)曾我哲夫编著. —北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-018982-0

I. 纳… II. 曾… III. 纳米材料-应用-太阳能电池-英文 IV. TM914.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 070110 号

责任编辑:邹凯/责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计工作室

**科学出版社 出版**

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

**中国科学院印刷厂 印刷**

科学出版社发行 · 各地新华书店经销

\*

2007年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2007年5月第一次印刷 印张:38 3/4

印数:1—1 500 字数:756 000

**定价:120.00 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

## 导 读

地球上的化石燃料将在本世纪消耗殆尽,能源短缺和环境恶化已成为人类所面临的愈来愈突出的问题,寻找清洁的能源和可再生的能源已经成为世界各国共同关心的问题。太阳能是一种取之不尽、用之不竭的绿色环保能源,因此怎样有效地将太阳能转化为电能或其它可以利用的能源是摆在物理学和化学工作者面前的重大课题。

自从1954年单晶硅太阳能电池在Bell实验室问世以来,硅电池因其较高的光电转换效率(约20%)已经用做航天器电源,并在各类光伏电池中保持主导地位。但是制造单晶硅太阳能电池需要高纯度的完美晶体材料和相当复杂的制作工艺,硅原材料的短缺和昂贵的价格限制了硅电池的广泛应用。只有太阳能电池成本降至与传统能源价格相当的水平,太阳能电池才能真正得到普及。

研制具有更广阔应用前景的太阳能电池的工作从来没有停止过。由最初的单晶硅太阳能电池陆续发展出了基于薄膜技术之上的太阳能电池。在薄膜电池中,很薄的光电材料被铺在衬底上,大大地减小了半导体材料的消耗(薄膜厚度仅为1mm),也容易批量生产(其单位质量覆盖面积为单晶硅太阳能电池的100倍),从而大大地降低了太阳能电池的成本。薄膜太阳能电池材料主要有多晶硅、非晶硅、以及CdS/Cu<sub>2</sub>S、CuInSe<sub>2</sub>/CdS、(Sn)<sub>x</sub>/GaAs等,成本有所降低。薄膜电池在很大程度上解决了太阳能电池的成本问题,但是效率相对较低,目前商用薄膜电池的光电转换效率只有6%~8%。

随着科学的发展,纳米技术日渐成熟,纳米结构材料成为新颖的太阳能电池材料,它的应用将能够提高太阳能电池的光电转换效率,降低电池的生产成本。

1991年Grätzel小组在Nature上报导了以染料敏化TiO<sub>2</sub>纳米晶膜为光阳极的液结光电化学电池,并使得这类电池的光电转换效率提高到7.9%。该种电池由单分子层染料敏化的TiO<sub>2</sub>纳米晶膜为光阳极、镀铂电极为对电极和含有氧化还原对的有机溶液为电解液构成,其基本工作原理是光子将染料激发,宽禁带的n-TiO<sub>2</sub>接收激发态染料的电子并传导出去作电功,其中电解液承担了在两极间传输电荷的作用。Grätzel太阳能电池的出现,立即在世界范围内掀起了对染料敏化纳米晶膜太阳能电池的研究热潮。经过十余年的努力,此类电池的光电转换效率已达到11.04%,而其成本只有传统硅光电电池的1/10。因此染料敏化纳米晶膜太阳能电池成为目前人们关注的、应用前景看好的光电换能器件,是近年来光电转换领域的研究热点之一。

目前染料敏化纳米晶膜太阳能电池存在的一个重要问题是:电子在传输过程中,由于纳米粒子间存在大量晶界,使得光生电子传输效率低,容易发生反向复合,从而使光电转换效率难以进一步提高。在导电基底上构建一种高空间取向的半导体单晶纳米棒/线阵列电极,是大幅度提高光电转换效率的可能途径。另一个重要问题是:由于使用了电解质溶液,造成封装困难,而且容易渗漏,使光电池的稳定性和寿命降低。因此,将ZnO、TiO<sub>2</sub>等这些宽禁带、高取向半导体单晶纳米线/棒/管阵列等新的光阳极形貌运用到染料敏化太阳电池中,即微/纳米复合结构和直线电子传输概念的引入,为染料敏

化纳米结构太阳电池指出了—个发展方向。同时，寻找性能优异的染料如纯有机染料及染料共敏化，使用离子液体、固态或准固态电解质也将成为染料敏化纳米晶膜太阳电池的重要发展方向。

为了进一步提高太阳电池的光电转换效率，各国学者如新南威尔士大学等开始研究太阳电池的效率极限和能量损失机理并在此基础上提出了新一代太阳电池的概念。此类太阳电池主要还处于概念和简单实验研究阶段，主要包括叠层太阳电池、多带隙（多能带）太阳电池和量子点（量子阱）太阳电池等。量子阱和量子点纳米结构的引入使得该类电池的光电转换效率有望超过传统 p-n 结太阳电池的理论极限值。

目前高效率太阳电池通常是以无机半导体为原料。由于这种材料本身的加工工艺非常复杂，材料要求苛刻且不易进行大面积柔性加工，以及某些材料具有毒性，大规模使用会受到成本和资源分布的限制。从 20 世纪 70 年代起人们开始探索一些具有共轭结构的有机化合物或金属配合物用作太阳电池材料。与无机半导体太阳电池相比，有机材料制备太阳电池的优势在于有机化合物的种类繁多、廉价、制作技术要求不高、制造面积大、可以在卷曲折叠的衬底上制成柔性薄膜电池，因此，近年来受到广泛的关注。有机太阳电池材料主要是一些具有大的共轭结构的有机小分子化合物，有机大分子化合物，富勒烯及其共轭多聚物等。然而，受电池结构的影响，其光谱吸收面较窄，光电转换效率很低。目前全固态有机太阳电池的转换效率小于 5%。有机太阳电池的未来发展还需要通过增加光的吸收、有效的电子转移、高的载流子传输来改善其性能，通过物质分层的纳米晶结构将是首要的选择。

总之，太阳电池经过半个多世纪的发展，转换效率有了大幅度提高，生产成本也有所降低。但是作为大规模的应用，单纯依靠传统技术达到这个目标非常困难，还有许多问题亟待解决。降低太阳电池成本，提高光电转换效率的一个重要思路是利用纳米技术，也就是说，在太阳电池中使用纳米结构材料。尽管人们对纳米结构材料进行了广泛的研究，但是，迄今为止没有一本书能够提供有关用于太阳转换的纳米结构无机和有机材料的全面介绍。

本书对用于太阳转换的纳米结构材料进行了全面系统的综述，内容包括纳米结构太阳电池的基本原理，传统薄膜太阳电池中的纳米结构，染料敏化太阳电池，基于有机材料和碳的太阳电池以及其它纳米结构太阳电池。尽管纳米结构太阳电池的研究时间还不长，但我们相信，高效能、性能稳定、成本低廉、大面积化的纳米结构太阳电池必将成为太阳电池中的重要—员。

郭 敏

北京科技大学理化系

蔡生民

北京大学化学与分子工程学院

## 序 言

我们的社会以煤、石油和天然气为基础，由于这些化石燃料的储量有限，在不久的将来即将消耗殆尽。另外，化石燃料燃烧产生二氧化碳，其浓度在大气中的快速增长已经影响到了气候，导致全球的温室效应。在这种情况下，光伏太阳能电池作为一种可再生的清洁能源越来越引起人们的关注。

由于光伏太阳能电池可以把太阳能直接转换成电能并且不释放出二氧化碳，因此，它能够提供清洁电能。同时，太阳能取之不尽、用之不竭，无需成本，分布均匀。人们已经对单晶硅太阳能电池进行了广泛的研究，并且该类电池已投入使用。但是，单晶硅材料价格昂贵，制作过程能耗大，从而使得单晶硅太阳能电池生产成本居高不下。另外，此类电池供电系统的投资回报周期较长，在很大程度上限制了光伏电池的普遍使用。

近年来，为了取代块体太阳能电池，人们对基于硅和半导体化合物的薄膜太阳能电池进行了积极的研究。然而这类太阳能电池的价格依然太高，不能与公共供电价格相竞争。2004 年日本工商业经济委员会、新能源与工业技术发展机构提出“面向 2030 年光伏计划蓝图 (2030PV)”，其目标是到 2030 年，单一光伏电池模块的产品价格为 50 日元/瓦。据预测，到那时光伏发电能够提供大约 50% 的居民电力消耗（大约 10% 的全部电力消耗量）。但是，单纯依靠传统技术达到这个目标非常困难。降低太阳能电池成本，提高光电转换效率的一个重要思想是利用纳米技术，也就是说，在太阳能电池中使用纳米结构材料。纳米结构材料主要分为无机材料和有机材料。尽管人们对这两种纳米结构材料进行了广泛地研究，但是，迄今为止，对于这两种材料的讨论依旧在学术会议和研究机构中进行。目前，没有一本书全面综述用于太阳能转换的纳米结构无机和有机材料。

本书对用于太阳能转换的纳米结构材料进行了全面综述，内容包括了从无机到有机的各种材料和器件类型。本书分为以下五部分：纳米结构太阳能电池的基本原理，传统薄膜太阳能电池中的纳米结构，染料敏化太阳能电池，基于有机材料和碳的太阳能电池以及其它纳米结构太阳能电池。本书中各章节的作者均为各自研究领域的专家。由于我能力有限，一些重要的纳米结构材料内容可能没有包括在本书内，为此，我深感抱歉。本书可用作对纳米结构太阳能电池感兴趣的电子工程、化学工程、材料科学、物理学等领域研究人员、科技人员、工程师、研究生和本科生的用书。我所写章节的内容是我们系——环境技术与城市规划系一门研究生课程的主题，主要针对的是光伏电池的初学者。我非常希望你们能够从本书中获得一些启示来促进太阳能电池的发展，为光伏太阳能电池的进步贡献自己的一份力量。

Tetsuo Soga  
名古屋 2006 年春天

# 介 绍

Tetsuo Soga

环境技术与城市规划系，名古屋技术研究所

Gokiso-cho, Showa-ku, 名古屋 466-8555, 日本

太阳能电池中的能量转换包括两个步骤：一是半导体材料吸收太阳光产生电子-空穴对，二是在内部电场作用下电子和空穴的分离。当两电极的引线在外电路接通时，由两电极收集的载流子将产生光电流。当一个电阻性负载与两个电极引线相连接时，分离的载流子之间产生一个电势差。

大多数用于地面的太阳能电池是块体单晶或多晶硅太阳能电池。这种电池的典型结构是在厚度约为  $300\text{ }\mu\text{m}$  的 p 型基底上制备一层厚度小于  $1\text{ }\mu\text{m}$  的 n 型发射层。光生电子-空穴扩散到空间电荷层的界面并在这里借助内部电场得以分离。有效电荷的分离取决于单晶硅中电子空穴的扩散长度。我们的目标是降低太阳能电池模块生产成品的价格，然而，仅仅依靠传统太阳能电池材料和电池结构来大幅度降低电池成本，提高转换效率是不可能实现的。另外，尽管太阳能电池所使用的硅主要来自于电子工业中单晶硅生产过程中的边角废料，但是，据预测，在不久的将来高纯度硅原材料将会短缺。因此，研究开发低生产成本，高转换效率和低原材料消耗的太阳能电池成为该产业发展的必然趋势。

为了达到上述目标的要求，一个重要思路就是在太阳能电池中采用纳米结构材料替代块体材料。其应用目标主要分为以下三个方面：

1. 提高传统太阳能电池的性能；
2. 基于低成本低能耗制备的廉价材料，获得相对较高的太阳能电池转换效率；
3. 获得光电转换效率高于传统 p-n 结太阳能电池的理论极限。<sup>1</sup>

本书综述了用于太阳能转换的有机和无机材料，全书由以下五部分组成：

## 第一部分 纳米结构太阳能电池的基本原理

研究纳米结构太阳能电池的基本问题主要从器件模型、光学和电学模型、折射率模型以及量子太阳能电池反射率几个方面进行了阐述。本章从半导体材料和传统 p-n 结太阳能电池的基本性质出发讨论了纳米结构的太阳能电池。

## 第二部分 传统薄膜太阳能电池中的纳米结构

本章对传统薄膜太阳能电池中的纳米结构例如硅基太阳能电池、黄铜矿基太阳能电池、CdS 基太阳能电池、CdTe 基太阳能电池进行了阐述。与块体单晶硅相比，非晶硅在降低电池生产成本方面引起人们的广泛关注，然而这种材料的稳定性仍然存在问题。最近，由纳米晶构成的微晶薄膜太阳能电池得到广泛研究，这种材料的性质介于块体和

非晶材料之间。据预测，采用非晶硅/微晶硅叠层太阳能电池可以获得非常高的光电转换效率（大于 15%）。另外，本章也对提高黄铜矿基、CdS 基、CdTe 基及 CuS 基薄膜太阳能电池的性能，降低其成本的可能性进行了阐述。

### 第三部分 染料敏化太阳能电池

本章对染料敏化太阳能电池的工作原理和研究现状进行了阐述。在传统 p-n 结太阳能电池中，只有能够扩散到空间电荷层界面的电子和空穴才能得以分离，进而被收集起来形成电流。为了使电子-空穴具有较长的扩散长度，人们应该提高半导体材料的纯度，降低其缺陷的浓度。这种要求必将导致太阳能电池材料价格昂贵。在染料敏化太阳能电池中，染料分子吸收光子产生跃迁的电子，这种处于高能态的电子可以注入到纳米晶半导体氧化物比如  $\text{TiO}_2$  或  $\text{ZnO}$  的导带中。由于材料比表面积大，即使反应过程简单，依旧可以获得相对较大的光电流。氧化的染料分子通过与溶液中氧化还原电对的电子发生转移得以再生。本章对固体染料敏化太阳能电池，即以 p 型半导体材料代替液体电解质也进行了介绍。

### 第四部分 有机材料和碳基太阳能电池

本章对有机材料和富勒烯基太阳能电池的工作原理和研究现状进行了阐述。有机材料太阳能电池因其高产、超薄、可塑性、轻便且成本低而受到广泛的关注。有机材料由于其受激载流子以激子形式存在，激子在界面被分离为电子与空穴，电荷传输伴随着跳跃等方式而不同于无机材料。为了提高太阳能电池的光电转换效率，利用共轭聚合物及小分子有机材料例如酞菁材料的块体异质结太阳能电池的研究已经展开。由于富勒烯基材料经常作为有机太阳能电池材料，因此了解其性能也很重要。同时本章对光合成太阳能电池材料以及固态电池也有所介绍。

### 第五部分 其它纳米结构的太阳能电池

本章对其它半导体纳米结构的太阳能电池进行了综述。除了 ETA（超薄吸收薄膜）太阳能电池是完全由无机半导体材料组成之外，ETA 太阳能电池概念与染料敏化太阳能电池非常相似。量子结构的概念非常重要，在电池中通过应用量子阱和量子点结构可以使电池的光电转换效率有望超过传统 p-n 结太阳能电池的理论极限值。例如通过量子阱的引入可以将吸收光的波长拓宽到长波；通过应用多能带载流子使得量子转换效应大于 1；通过引入中间带量子点等方法，提高电池的光电转换效率。另外，碳纳米管也有望提高聚合物基太阳能电池载流子的传输效率。

## Preface

Our society is based on coal, oil and natural gas, but these fossil fuels will be depleted someday in the future because they are limited. Carbon dioxide is produced in the combustion of fossil fuels and the rapid increase of carbon dioxide concentration has affected the consequence of climate, resulting in the global warming effect. Under these circumstances, interest in photovoltaic (PV) solar cell is increasing rapidly as an alternative and clean energy source.

Photovoltaic solar cells provide clean electrical energy because the solar energy is directly converted into electrical energy without emitting carbon dioxide. The solar energy is not limited, free of charge and distributed uniformly to all human beings. Crystalline silicon solar cell has been extensively studied and used for practical terrestrial applications. However, the expensive material cost and lots of energy necessary for manufacturing have caused high cost and long energy payback time, which have prevented the large spread of PV power generation.

Recently, thin film solar cells using silicon or compound semiconductors have been actively studied instead of the bulk silicon solar cell. But the solar cells are still too expensive to compete with public electricity charge. In 2004 New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan, announced the “PV Roadmap Toward 2030 (PV2030)” in which the target of production cost for PV module is 50 yen/W in 2030. It is expected that the PV power generation can supply approximately 50% of residential electricity consumption (approximately 10% of total electricity consumption) in 2030. But it would be difficult to reach this goal only by the conventional technologies. One important concept to reduce the solar cell cost and to increase the conversion efficiency is to use NANOTECHNOLOGY, i.e., to use the

nanostructured material in solar cell. Nanostructured materials are largely divided into inorganic materials and organic materials. In spite of the common interest and common purpose, two kinds of materials have been discussed in different conferences and different communities until now. There is no book that offers a comprehensive overview of the nanostructured inorganic and organic materials for solar energy conversion.

The aim of this book is to overview the nanostructured materials for solar energy conversion covering a wide variety of materials and device types from inorganic materials to organic materials. This book is divided into five parts: fundamentals of nanostructured solar cells, nanostructures in conventional thin film solar cells, dye-sensitized solar cells, organic and carbon based solar cells and other nanostructures. Authors are all specialists in their fields. But I must apologize that the important nanostructured materials are missing in this book because of the limit of my ability. This book was intended for researchers, scientists, engineers, graduate students and undergraduate students, majoring in electrical engineering, chemical engineering, material science, physics, etc., who are interested in the nanostructured solar cells. The content of my chapter is the subject of a graduate course in our department, Department of Environmental Technology and Urban Planning, devoted for the beginner of PV. I strongly hope that you will get some hints for the development of the solar cell from this book and contribute to the progress of PV.

Tetsuo Soga  
*Nagoya, Spring 2006*

## Introduction

**Tetsuo Soga**

*Department of Environmental Technology and Urban Planning  
Nagoya Institute of Technology  
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555, Japan*

Energy conversion in solar cell consists of generation of electron–hole pairs in semiconductors by the absorption of light and separation of electrons and holes by an internal electric field. Charge carriers collected by two electrodes give rise to a photocurrent when the two terminals are connected externally. When a resistance load is connected to the two terminals, the separation of the charge carriers sets up a potential difference.

Most of the solar cells used in the terrestrial applications are bulk-type single- or multi-crystalline silicon solar cells. The typical cell structure is a thin (less than 1  $\mu\text{m}$ ) n-type emitter layer on a thick (about 300  $\mu\text{m}$ ) p-type substrate. Photo-generated electrons and holes diffuse to the space charge region at the interface where they are separated by the internal electric field. The effective charge separation results from long diffusion length of electrons and holes in crystalline silicon. Although it is aimed to reduce the solar cell module manufacturing cost, the drastic reduction of cell cost and increase of the conversion efficiency cannot be expected by using the conventional materials and solar cell structures. Moreover, the shortage of the feedstock of high-purity silicon is predicted in the near future although it depends on off-spec silicon of electronics industry. Therefore, research and development of solar cells with low production cost, high conversion efficiency and low feedstock consumption are required.

An important concept to reach this goal is to use nanostructured materials instead of bulk materials. The motivations to employ nanostructures in solar cells are largely divided into three categories as follows:

1. To improve the performance of conventional solar cells.
2. To obtain relatively high conversion efficiency from low grade (inexpensive) materials with low production cost and low-energy consumption.

3. To obtain a conversion efficiency higher than the theoretical limit of conventional p-n junction solar cell.

This book brings out an overview of the organic and inorganic nanostructured materials for solar energy conversion. The book comprises of five parts as follows:

## **PART I. FUNDAMENTALS OF NANOSTRUCTURED SOLAR CELLS**

The fundamental issues to deal with nanostructured solar cells are described on device modeling, optical and electrical modeling and modeling of refractive index and reflectivity of quantum solar cells. The chapter on basic properties of semiconductor materials and the conventional p-n junction solar cells deals with nanostructured solar cells.

## **PART II. NANOSTRUCTURES IN CONVENTIONAL THIN FILM SOLAR CELLS**

Nanostructures of conventional thin film solar cells such as silicon solar cells, chalcopyrite-based solar cells, CdS-based solar cells and CdTe-based solar cells are described. Amorphous silicon has attracted attention to reduce the manufacturing cost compared with bulk-type crystalline silicon. But there still remains a problem of stability. Recently, microcrystalline thin film silicon solar cells made up of nano-sized crystallites with the material properties between amorphous and bulk have been studied actively. It is expected to obtain very high conversion efficiency (more than 15%) by employing amorphous silicon/microcrystalline silicon tandem solar cells. It also describes that it is possible to improve the performance and reduce the cost of thin film solar cells based on chalcopyrite-based materials, CdS, CdTe and Cu<sub>2</sub>S.

## **PART III. DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS**

The principle and the current status of dye-sensitized solar cells are described. In the conventional p-n junction solar cells, only the electrons and holes that can diffuse to the space charge region can be collected as a current. In order to get a long diffusion length, the purity of semiconductors should be increased and the defect concentration should be decreased, resulting in the expensive solar cell materials. In a dye-sensitized solar cell, a photon absorbed

by a dye molecule gives rise to electron injection into the conduction band of nanocrystalline oxide semiconductors such as  $\text{TiO}_2$  or  $\text{ZnO}$ . Because of the high surface area, relatively high photocurrent can be obtained in spite of the simple process. The dye is regenerated by electron transfer from a redox species in solution. A chapter on solid-state dye-sensitized solar cells in which the liquid electrolyte is replaced by p-type semiconductor is also dealt with.

#### **PART IV. ORGANIC- AND CARBON-BASED SOLAR CELLS**

The principle and the current status of organic solar cell and fullerene-based solar cell are described. Organic solar cells are attractive as solar cell materials because of high throughput manufacture process, ultra-thin film, flexible, lightweight and inexpensive. Organic materials differ from inorganic materials since the excited carriers exist as excitons, excitons are separated into electrons and holes at the interface, charge carrier transport is followed by hopping, etc. In order to increase the efficiency bulk, heterojunction solar cells using conjugated polymers and small molecule organic materials such as phthalocyanine have been investigated. It is important to understand the properties of fullerenes because it is often used as an organic solar cell. The photosynthetic materials are also studied as solar cell materials and a solid state cell is demonstrated.

#### **PART V. OTHER NANOSTRUCTURES**

Solar cells using other semiconductor nanostructures are overviewed. The concept of ETA (extremely thin absorber) is similar to that of dye-sensitized solar cells except that the ETA solar cell is completely made up of inorganic semiconductors. The concept of quantum structures is very important because there is a possibility to achieve the conversion efficiency higher than the theoretical limit of conventional p-n junction solar cells by employing quantum well or quantum dot structures. The idea is to extend the optical absorption to longer wavelengths by quantum wells, to use the carrier multiplication which produces the quantum efficiency exceeding unity, to use intermediate bands made of quantum dots, etc. It is also expected that single wall carbon nanotubes can improve the transport properties of polymer-based solar cells.

# 目 录

序言.....	v
介绍 .....	vii

## 第一部分 纳米结构太阳能电池的基本原理

第一章 太阳能电池的基本原理.....	3
<i>Tetsuo Soga</i>	
第二章 纳米太阳能电池的器件模型 .....	45
<i>M. Burgelman, B. Minnaert and C. Grasso</i>	
第三章 纳米太阳能电池的光学和电学模型 .....	81
<i>Akira Usami</i>	
第四章 量子阱太阳能电池折射率和反射率的数学模拟.....	105
<i>Francis K. Rault</i>	

## 第二部分 传统薄膜太阳能电池的纳米结构

第五章 无定形硅和微晶硅薄膜太阳能电池.....	131
<i>R. E. I. Schropp</i>	
第六章 基于纳米 CdS, CIS, CdTe 和 Cu <sub>2</sub> S 的薄膜太阳能电池 .....	167
<i>Vijay P. Singh, R. S. Singh and Karen E. Sampson</i>	

## 第三部分 染料敏化太阳能电池

第七章 TiO <sub>2</sub> 基染料敏化太阳能电池 .....	193
<i>Shogo Mori and Shozo Yanagida</i>	
第八章 染料敏化纳米结构 ZnO 电极在太阳能电池中的应用 .....	227
<i>Gerrit Boschloo, Tomas Edvinsson and Anders Hagfeldt</i>	
第九章 固体染料敏化太阳能电池.....	255
<i>Akira Fujishima and Xin-Tong Zhang</i>	

## 第四部分 有机材料和碳基太阳能电池

第十章 聚合物太阳能电池中纳米结构及纳米形貌设计.....	277
<i>H. Hoppe and N. S. Sariciftci</i>	
第十一章 纳米结构有机块体异质结太阳能电池.....	319
<i>Yoshinori Nishikitani, Soichi Uchida and Takaya Kubo</i>	

第十二章 光合成材料及结构在太阳能电池中的应用.....	335
<i>J. K. Mapel and M. A. Baldo</i>	
第十三章 富勒烯基薄膜光电材料.....	359
<i>E. A. Katz</i>	

### 第五部分 其它纳米结构

第十四章 纳米结构化的 ETA 太阳能电池 .....	447
<i>Claude Lévy-Clément</i>	
第十五章 量子结构太阳能电池.....	485
<i>A. J. Nozik</i>	
第十六章 量子阱太阳能电池及量子点集中器.....	517
<i>K. W. J. Barnham, I. Ballard, A. Bessière, A. J. Chatten, J. P. Connolly, N. J. Ekins-Daukes, D. C. Johnson, M. C. Lynch, M. Mazzer, T. N. D. Tibbits, G. Hill, J. S. Roberts and M. A. Malik</i>	
第十七章 基于纳米技术的中间带太阳能电池.....	539
<i>A. Martí, C. R. Stanley and A. Luque</i>	
第十八章 纳米结构光电材料的制备与表征.....	567
<i>Ryne P. Raffaele</i>	
索引.....	595

(郭敏 译 蔡生民 校)

## Table of Contents

<i>Preface</i> .....	v
<i>Introduction</i> .....	vii
<b>PART I. FUNDAMENTALS OF NANOSTRUCTURED SOLAR CELLS</b>	
Chapter 1 Fundamentals of Solar Cell .....	3
<i>Tetsuo Soga</i>	
Chapter 2 Device Modeling of Nano-Structured Solar Cells .....	45
<i>M. Burgelman, B. Minnaert and C. Grasso</i>	
Chapter 3 Optical and Electrical Modeling of Nanocrystalline Solar Cells .....	81
<i>Akira Usami</i>	
Chapter 4 Mathematical Modelling of the Refractive Index and Reflectivity of the Quantum Well Solar Cell .....	105
<i>Francis K. Rault</i>	
<b>PART II. NANOSTRUCTURES IN CONVENTIONAL THIN FILM SOLAR CELLS</b>	
Chapter 5 Amorphous (Protocrystalline) and Microcrystalline Thin Film Silicon Solar Cells .....	131
<i>R.E.I. Schropp</i>	
Chapter 6 Thin-Film Solar Cells Based on Nanostructured CdS, CIS, CdTe and Cu <sub>2</sub> S .....	167
<i>Vijay P. Singh, R.S. Singh and Karen E. Sampson</i>	

**PART III. DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS**

Chapter 7 TiO <sub>2</sub> -Based Dye-Sensitized Solar Cell .....	193
<i>Shogo Mori and Shozo Yanagida</i>	
Chapter 8 Dye-Sensitized Nanostructured ZnO Electrodes for Solar Cell Applications .....	227
<i>Gerrit Boschloo, Tomas Edvinsson and Anders Hagfeldt</i>	
Chapter 9 Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells .....	255
<i>Akira Fujishima and Xin-Tong Zhang</i>	

**PART IV. ORGANIC- AND CARBON-BASED SOLAR CELLS**

Chapter 10 Nanostructure and Nanomorphology Engineering in Polymer Solar Cells .....	277
<i>H. Hoppe and N.S. Sariciftci</i>	
Chapter 11 Nanostructured Organic Bulk Heterojunction Solar Cells .....	319
<i>Yoshinori Nishikitani, Soichi Uchida and Takaya Kubo</i>	
Chapter 12 The Application of Photosynthetic Materials and Architectures to Solar Cells .....	335
<i>J.K. Mapel and M.A. Baldo</i>	
Chapter 13 Fullerene Thin Films as Photovoltaic Material .....	359
<i>E.A. Katz</i>	

**PART V. OTHER NANOSTRUCTURES**

Chapter 14 Nanostructured ETA-Solar Cells .....	447
<i>Claude Lévy-Clément</i>	
Chapter 15 Quantum Structured Solar Cells .....	485
<i>A.J. Nozik</i>	