

现代应用物理学丛书



天津市科协资助出版

# 太阳电池器件物理

[美] Stephen Fonash 著  
张晓丹 刘一鸣 倪 犖 译  
吴春亚 校



科学出版社

天津市科协资助出版

现代应用物理学丛书

# 太阳电池器件物理

[美] Stephen Fonash 著

张晓丹 刘一鸣 倪 犇 译  
吴春亚 校

科学出版社  
北京

图字：01-2016-0921

## 内 容 简 介

纳米材料和纳米结构之应用于太阳电池,为其进一步发展提供了可能。为此原作者在《太阳电池器件物理(原著第2版)》中增添了对纳米结构和纳米材料,如量子点,在太阳电池中应用的阐述,这些研究可以促使太阳电池更富成本低廉及效率提高。本书首先介绍了太阳能电池器件的基础,然后讲述了光伏能量转换的物理机制、太阳电池材料与结构、同质结太阳电池、半导体与半导体异质结电池以及表面势垒太阳电池,乃至近几年发展起来的染料敏化电池与有机电池。此外,作者把理论中的方程式放到了附录当中,以提高本书的易读性。更进一步,作者利用 AMPS 计算机代码进行仿真模拟,验证了太阳电池器件的物理原理,且为新型电池的材料与结构设计提供指导。

本书适合作为高等院校高年级学生、研究生、教师的教材或参考书,也适合作为工作在光伏电池、光电子器件科学与相关技术领域的科研人员、工程技术人员的参考书。

This edition of *Solar Cell Device Physics* by Stephen Fonash is published by arrangement with ELSEVIER INC., a Delaware corporation having its principal place of business at 360 Park Avenue South, New York, NY 10010, USA.

本书英文版 *Solar Cell Device Physics*, 作者 Stephen Fonash, 由 ELSEVIER INC. 出版, 地址 360 Park Avenue South, 纽约, NY 10010, 美国。

### 图书在版编目(CIP)数据

太阳电池器件物理 / (美) 福纳什 (Stephen Fonash) 著; 张晓丹, 刘一鸣, 倪华译. —北京: 科学出版社, 2016.6

(现代应用物理学丛书)

书名原文: Solar Cell Device Physics

ISBN 978-7-03-049334-7

I. ①太… II. ①福…②张…③刘…④倪… III. ①太阳能电池-元器件-物理性质 IV. ①TM914.401

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 150950 号

责任编辑: 钱俊 田轶静 / 责任校对: 彭涛  
责任印制: 张伟 / 封面设计: 楠竹文化

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016年7月第一版 开本: 720×1000 B5

2017年1月第二次印刷 印张: 19 3/4

字数: 360 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 《现代应用物理学丛书》编委会

主 编 沈保根

编 委 (按拼音排序)

曹俊诚	崔 田	崔铁军	杜江峰	高洪钧
顾长志	贾金峰	姜晓明	李发伸	柳卫平
陆 卫	罗先刚	梅良模	彭练矛	沈 健
闻海虎	王秋良	肖国青	杨德仁	张天才
张志东	朱 静	张守著	赵 颖	



# 译者序

Stephen Fonash 是美国宾夕法尼亚州立大学 (Pennsylvania State University) 资深教授兼工程科学主席, 现任宾夕法尼亚州纳米技术教育与应用中心主任, 美国国家科学基金会纳米技术先进技术教育中心主任, 美国电器和电子工程师学会会士与电化学学会会士。Stephen Fonash 教授在太阳电池研发领域有着极为丰富的经验。他的著作《太阳电池器件物理》是太阳电池物理领域的经典之作, 所研发的太阳电池模拟软件 AMPS 目前在全球范围已有超过 800 个课题组在使用。Stephen Fonash 教授拥有 29 项专利, 多数已经授权给工业界, 还是两家公司的创办者之一。

随着太阳电池研究的发展, 各类传统亦或新型的电池不断取得效率的突破。但究其成长速度, 对这类器件的理论认识却尚存不足, 深感普及太阳电池器件物理的基本理论, 责无旁贷。为此, 我们选择 Stephen Fonash 教授再版的 *Solar Cell Device Physics* 一书的电子版 (2011 年) 进行了翻译。纸质的第一版始于 1981 年, 历经近三十年的积淀, 他进行了再版。相信熟读该书, 会对促进太阳电池的研究具有重要意义。

本书的特点是: 以太阳电池能量转换的基本原理为出发点, 分别对太阳电池的材料特性和器件物理基础进行了阐述。探讨了太阳电池的结构、关键材料等在光伏转换过程中的作用机理和影响, 并且重点围绕着同质结的太阳电池和异质结的太阳电池进行了系统的理论分析。最后也讨论了表面势垒和染料敏化新型太阳电池。本书对于光伏领域的研究人员具有非常重要的指导意义。

博士生刘伯飞、王奉友、方家和王烁参与了第四章、第五章的初译; 刘一鸣博士后和丁毅副教授对第四章和第五章、熊绍珍教授对第六章和第七章进行了初校, 全书由吴春亚就语序及词句的统一, 以及物理内涵进行了最终校对。科学出版社的钱俊先生为本书的编辑和出版也贡献颇多。我们向他(她)们表示由衷的感谢。

由于译者水平有限, 书中不免存在不妥和疏漏之处, 恳请广大读者和同行批评指正。

译校者

2016 年 5 月于南开大学电子信息与光学工程学院

# 中文版序言

我十分高兴我的著作——《太阳电池器件物理》(第2版),现在推出了中文版本。我写此书的初衷,是想以言简意赅的方式,诠释太阳电池(以及光电探测器)运行背后所涉及的材料与器件的物理原理。我很欣慰此书已经被全世界的大学师生和工业界研究者们采纳,用以实现这个目标。

太阳电池的工作机理十分复杂,它的准费米能级、光生载流子产生与复合、陷阱俘获、静电势、漂移扩散等现象全部发生在一个“黑箱”当中,而此“黑箱”的电极处又具有例如热电子发射、隧穿效应等界面现象。为了引导读者理解其中丰富的物理内涵,《太阳电池器件物理》独特地采用了 AMPS 计算机程序作为教学工具。该 AMPS 程序是由我在宾夕法尼亚州立大学的团队研发,并应用在了本书的所有器件物理章节当中,以帮助读者领会。AMPS 软件与《太阳电池器件物理》一书皆已发行,是理解与设计太阳电池结构的有力工具。

在众多对我太阳电池研究和教学作出贡献的研究生和访问学者当中,很多人来自中国。他们当中包括侯靖亚博士、纪立明博士,二人皆为博士后,还有朱虹博士与一位在读博士生。在这群人中还有刘一鸣博士,我与他的愉快互动已经进行了多年。曾对《太阳电池器件物理》作出过贡献的他们,现在能够通过母语看到自己的影响,这是一件多么美妙的事情。

Stephen J. Fonash

2016年1月

## Preface to the Chinese Language Edition

I am very pleased to have my book *Solar Cell Device Physics*, 2<sup>nd</sup> edition, now available in the Chinese language. I wrote the book with the goal of explaining clearly and concisely the material and device physics principles behind solar cell, and by inference, photodetector operation. I am delighted that the book is considered by students, faculty, and industry researchers around the world to have met that goal.

Solar cell operation can be complex with its quasi-Fermi levels, photogeneration, recombination, trapping, electrostatics, drift, and diffusion all taking place in a “box” with interface phenomenon such as thermionic emission and tunneling at its contacts. To guide the reader in understanding this rich physics *Solar Cell Device Physics* is unique in its incorporation of the AMPS computer code as a teaching tool. This AMPS transport code, developed by my group at Penn State, is integrated into all the device physics chapters to enhance comprehension. Both AMPS and *Solar Cell Device Physics* are offered as tools for understanding and designing solar cell structures.

Among the many graduate students and visiting scholars who have contributed to my solar cell research and teaching approach, a number have been from China. These include Dr. Jingya Hou and Dr. Liming Ji, both post-doctoral scholars, and Dr. Hong Zhu, a Ph. D. student while at Penn State. Also in this group is Dr. Yiming Liu. I have had the pleasure of interacting with him now for several years. It is very appropriate that these people who made contributions to *Solar Cell Device Physics* now can see the impact of their influence in their native language.

Stephen J. Fonash  
Jan, 2016

# 原书序言

如同《太阳电池器件物理》的第一版，本书着重关注的是光伏器件当中的材料、结构与器件物理机制。自从第一版发行以来，光伏领域产生了许多新的事物，比如出现了激子电池与纳米技术。捕获这些前沿进展的精华，使写作变得不仅有趣而且富有挑战，其结果就是《太阳电池器件物理》这本书几乎又重写了一遍。对于所有的太阳电池进展，新版在全书中贯穿了一个统一的方针。例如，此统一方针强调了所有的太阳电池，无论基于产生激子的光吸收还是基于直接产生电子-空穴对的光吸收，都需要具有一个打破自由电子、空穴对称性的结构。此对称性破缺是太阳电池能够产生电力的根本要求。本书的观点认为，此对称性破缺的产生，可以缘于内建静电场，或者态密度分布（能级位置、数量或兼具二者）空间变化而导致的有效场。静电场是经典pn结硅太阳电池所使用的方法，而有效场则是例如染料敏化电池所采用的方法。

为了解并探索器件物理机制，本版同时运用了解析方法与数值方法分析各种太阳电池结构。解析分析的诸多细节放在了附录当中，从而使方程的推导不会妨碍物理思路的展开。数值分析则使用了作者课题组研发并被广泛使用的软件AMPS。在本书中，AMPS用在了引言部分以促进理解光伏作用的机理。它也用在专门讲述不同电池类型的章节，以详细考察从无机pn结电池到有机异质结和染料敏化电池的所有类型的太阳电池。计算机仿真给出了电池的暗态与亮态电流电压曲线，然而更重要的是，它“撬开”了电池的内部构造，从而可以细致地考察当前工作状态下的电流分量、电场和复合等相关信息。此书中讨论的各种示例可以通过访问AMPS网站([www.ampsmodeling.org](http://www.ampsmodeling.org))获得。希望读者可以更加细致地分析这些数值模拟案例，并且有可能将他们用作进一步探索器件物理的工具。

需要注明的是，作者习惯的一些特定表达方式也潜入了本书中。比如，许多著作使用 $q$ 作为基本电子电量，而此书则使用符号 $e$ 来代替。还有随机热能的度量 $kT$ ，书中每处使用的单位都是电子伏特(eV，室温下为0.026 eV)。这意味着在其他书中写成 $e^{qV/kT}$ 的项，在此书中则为 $e^{V/kT}$ ，其中 $V$ 的单位为V， $kT$ 的单位为电eV。这也意味着，诸如与空穴扩散系数 $D_p$ 与迁移率 $\mu_p$ 有关的爱因斯坦关系式，在本书中写成 $D_p = kT\mu_p$ 。

随着可替代能源重要性的持续增长，光伏也会继续快速地发展。本书不旨在综述我们目前取得的成就或进展如何，尽管这些内容在器件章节会简要涉及。本书的目的是传授基础理论知识，使读者能够跟上此令人兴奋领域的不断发展，并为之作出相应的贡献。



# 致 谢

本书第一版源于作者给宾夕法尼亚州立大学研究生讲授的太阳电池课程。它很大程度上受益于参加过此课程的许多学生的意见。我们课题组的所有学生与博士后也在不同程度上对本书作出了贡献。其中 Joseph Cuiffi 博士对本书的数值模拟部分提供了极大的帮助。

同时也很感谢 Lisa Daub, Darlene Fink 以及 Kristen Robinson 所作的努力。他们在图表和参考文献方面提供了出色的协助。Travis Benanti 博士, Wook Jun Nam 博士, Amy Brunner 以及 Zac Gray 在校阅到制图的许多事情上作出了重要贡献。所有这些人以及其他很多人的帮助, 使得本书得以顺利完成。在我的妻子 Joyce 的鼓励与支持下, 本书得以出版。

# 符号列表

符号	描述 (单位)
$\alpha$	吸收系数 ( $\text{nm}^{-1}, \text{cm}^{-1}$ )
$\beta_1$	n 型准中性区长度与空穴扩散长度之比的无量纲参数
$\beta_2$	n 型准中性区长度与吸收长度之比的无量纲参数
$\beta_3$	受光表面空穴复合速率与 n 区空穴扩散-复合速率之比的无量纲参数
$\beta_4$	直至 p 型准中性区开始位置的光吸收层厚度与吸收长度之比的无量纲参数
$\beta_5$	p 型准中性区长度与电子扩散长度之比的无量纲参数
$\beta_6$	p 型准中性区长度与吸收长度之比的无量纲参数
$\beta_7$	背表面电子复合速率与电子扩散-复合速率之比的无量纲参数
$\gamma$	带间复合强度系数( $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
$\Delta$	界面偶极子导致的能量转移大小(eV)
$\Delta$	DSSC 中的染料分子层厚度(nm)
$\Delta$	多晶材料的晶粒大小(nm)
$\Delta_C$	异质结两材料间的导带边失调值(eV)
$\Delta_V$	异质结两材料间的价带边失调值(eV)
$\Phi_0(\lambda)$	以波长为变量、每单位带宽所含的光子数目 ( $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{带宽}^{-1}$ , 带宽以 nm 为单位)
$\Phi_B$	M-S 或 M-I-S 结构的肖特基势垒高度(eV)
$\Phi_{BI}$	M-I-S 结构中位于半导体表面的 n 型材料 $E_C$ 与 $E_F$ 能量之差或 p 型材料 $E_F$ 与 $E_V$ 能量之差(eV)
$\Phi_C$	计入了反射和吸收影响的材料入射光通量 ( $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{带宽}^{-1}$ , 此处带宽以 nm 为单位)
$\Phi_W$	材料的功函数(eV)
$\Phi_{WM}$	金属的功函数(eV)
$\Phi_{Wn}$	n 型半导体的功函数(eV)
$\Phi_{Wp}$	p 型半导体的功函数(eV)
$\varepsilon$	介电常数(F/cm)

$\eta$	器件能量转换效率 (%)
$\lambda$	光子或声子的波长(nm)
$\mu_{Gi}$	位于定域隙态上的载流子的迁移率( $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ )
$\mu_n$	电子迁移率( $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ )
$\mu_p$	空穴迁移率( $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ )
$\nu$	电磁辐射频率(Hz)
$\zeta$	电场强度(V/cm)
$\zeta_0$	热平衡时的电场强度(V/cm)
$\zeta_n'$	电子有效力场(V/cm)
$\zeta_p'$	空穴有效力场(V/cm)
$\rho$	电荷密度( $\text{C}/\text{cm}^3$ )
$\sigma_n$	定域态对电子的俘获截面( $\text{cm}^2$ )
$\sigma_p$	定域态对空穴的俘获截面( $\text{cm}^2$ )
$\tau_E$	激子寿命(s)
$\tau_n$	p 型材料电子寿命(以 $\tau_n^R, \tau_n^L, \tau_n^A$ 指代)(s)
$\tau_n^A$	p 型材料电子俄歇寿命(s)
$\tau_n^L$	p 型材料电子 S-R-H 复合寿命(s)
$\tau_n^R$	p 型材料电子辐射复合寿命(s)
$\tau_p$	n 型材料空穴寿命(以 $\tau_p^R, \tau_p^L, \tau_p^A$ 指代)(s)
$\tau_p^A$	n 型材料空穴的俄歇寿命(s)
$\tau_p^L$	n 型材料空穴的 S-R-H 复合寿命(s)
$\tau_p^R$	n 型材料空穴的辐射复合寿命(s)
$\chi$	电子亲和势(eV)
$a$	晶格常数(nm)
$A_{\text{abs}}$	吸收率
$A^*$	有效理查德森常数(对自由电子为 $120\text{A}/(\text{cm}^2\cdot\text{K}^2)$ ( $\text{A}/(\text{cm}^2\cdot\text{K}^2)$ )
$A_{1A}^A$	图 2.18 (a) 中所示俄歇复合速率常数( $\text{cm}^6/\text{s}$ )
$A_{1B}^A$	图 2.18 (b) 中所示的俄歇复合速率常数( $\text{cm}^6/\text{s}$ )
$A_{1C}^A$	图 2.18 (c) 中所示的俄歇跃迁速率常数( $\text{cm}^6/\text{s}$ )
$A_{1D}^A$	图 2.18 (d) 中所示的俄歇跃迁速率常数( $\text{cm}^6/\text{s}$ )
$A_{1E}^A$	图 2.18 (e) 中所示的俄歇跃迁速率常数( $\text{cm}^6/\text{s}$ )
$A_{1F}^A$	图 2.18 (f) 中所示的俄歇跃迁速率常数( $\text{cm}^6/\text{s}$ )
$A_{2A}^A$	对应图 2.18 (a) 的俄歇产生速率常数( $\text{s}^{-1}$ )
$A_{2B}^A$	对应图 2.18 (b) 的俄歇产生速率常数( $\text{s}^{-1}$ )

$A_C$	聚光电池中收集光子的太阳电池面积( $\text{cm}^2$ 或 $\text{m}^2$ )
$A_C$	用于态密度模型 $g_{\text{sc}}(E) = A_C(E - E_C)^{1/2}$ ( $\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{3/2}$ )
$A_S$	聚光电池中产生电流的太阳电池面积( $\text{cm}^2$ 或 $\text{m}^2$ )
$A_V$	用于态密度模型公式 $g_{\text{c}}\nu(E) = A_V(E_V - E)^{1/2}$ ( $\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{3/2}$ )中的前因子
$c$	光速( $2.998 \times 10^{17}$ nm/s)
$d$	表示器件中的距离或位置(cm,nm)
$D_E$	激子扩散系数( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
$D_n$	电子扩散系数或扩散率( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
$D_n^T$	电子热扩散(Soret)系数( $\text{cm}^2/(\text{K} \cdot \text{s})$ )
$D_p$	空穴扩散系数或扩散率( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
$D_p^T$	空穴热扩散(Soret)系数( $\text{cm}^2/(\text{K} \cdot \text{s})$ )
$e$	电子电量( $1.6 \times 10^{-19}$ C)
$E$	电子、光子或声子的能量(eV)
$E_C$	导带边能级, 有机半导体中通常称为 LUMO(eV)
$E_{\text{Fn}}$	随空间变化的电子准费米能级(eV)
$E_{\text{Fp}}$	随空间变化的空穴准费米能级(eV)
$E_{\text{gm}}$	迁移率带隙(eV)
$E_G$	禁带宽度(eV)
$E_{\text{pn}}$	声子能量(eV)
$E_{\text{pt}}$	光子能量(eV)
$E_0$	Franz-Keldysh 效应模型中的能量系数, 用 $E_0 = \frac{3}{2}(m^*)^{-1/3} (e\hbar\zeta)^{2/3} \times 6.25 \times 10^{18}$ 表示, 其中 $m^*, \hbar, \zeta$ 使用 MKS 单位(eV)
$E_V$	价带边能级, 有机半导体中通常称为 HOMO(eV)
$E_{\text{VL}}$	真空能级(eV)
$F_e$	电子的总作用力 $F_e = -e[\xi - (d\chi/dx) - kT_n(d \ln N_c/dx)]$ [计算时所有项使用 MKS 单位。来源于电场和电子有效电场](N)
$F_h$	空穴的总作用力 $F_h = e\{\xi - [d(\chi + E)/dx] + kT_p(d \ln N_v/dx)\}$ [计算时所有项使用 MKS 单位。来源于电场和空穴有效电场](N)
$g_A^A$	图 2.18 (a) 中所示俄歇过程的载流子热产生率( $\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ )
$g_B^A$	图 2.18 (b) 中所示俄歇过程的载流子热产生率( $\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ )
$g(E)$	单位体积的能态密度( $\text{eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$ )

$g_c^C(E)$	单位体积的导带态密度( $\text{eV}^{-1}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
$g_c^V(E)$	单位体积的价带态密度( $\text{eV}^{-1}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
$g_{\text{ph}}(E)$	声子态密度( $\text{eV}^{-1}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
$g_{\text{th}}^R$	单位时间单位体积由于带间跃迁的导带电子和价带空穴的热产生率( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$G(\lambda, x)$	过程 3~5(图 2.11)中单位时间单位体积材料单位带宽的吸收次数( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ )
$G'$	激子产生速率( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$G_n''$	代表任何电子的产生速率( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$G_p''$	代表任何空穴的产生速率( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$G_{\text{ph}}^n(\lambda, x)$	单位时间单位体积材料、单位带宽的自由电子产生率( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ )
$G_{\text{ph}}^p(\lambda, x)$	单位时间单位体积材料、单位带宽的自由空穴产生率( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ )
$G_{\text{ph}}(\lambda, x)$	单位时间单位体积材料、单位带宽的自由载流子产生率( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ )[当 $G_{\text{ph}}^n(\lambda, x) = G_{\text{ph}}^p(\lambda, x)$ 时使用]
$h$	普朗克常量( $4.14 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$ )
$\hbar$	普朗克常量除以 $2\pi$ ( $1.32 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$ )
$I(\lambda)$	入射到器件上的光通量( $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$I$	器件产生的电流(A)
$I$	单位界面上激子分离速率( $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$I(x)$	穿越材料的光密度(以单位面积单位带宽的光子数计)( $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ )
$I_0$	入射光密度(单位面积单位带宽的光子数)( $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ )
$J$	电流密度: 从器件终端流出的电流密度( $\text{A}/\text{cm}^2$ )
$J_0$	多步隧穿模型的前指数项 $J_{\text{MS}} = -J_0 e^{BT} e^{AV}$ ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )
$J_{\text{DK}}$	暗态电流密度 ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )
$J_{\text{FE}}$	源自结区场发射的界面电流密度 ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )
$J_1$	界面复合电流模型中的前因子 (参见 $J_1(e^{V/n_s kT} - 1)$ ) ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )
$J_{\text{IR}}$	源自缺陷辅助界面复合的界面电流密度 (特别是异质结界面复合损失的电流密度) ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )
$J_{\text{mp}}$	最大功率点时的电流密度( $\text{A}/\text{cm}^2$ )
$J_{\text{MS}}$	结区源自多步隧穿的电流密度( $\text{A}/\text{cm}^2$ )
$J_n$	传统电子(导带)电流密度 ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )
$J_{\text{OB}}$	界面处越过能量势垒的电流密度 ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )

$J_p$	传统空穴（价带）电流密度 ( $A/cm^2$ )
$J_{SB}$	光态下背电极复合损失的电流密度 ( $A/cm^2$ )
$J_{SB}^D$	暗态下背电极复合损失的电流密度 ( $A/cm^2$ )
$J_{sc}$	短路电流密度 ( $A/cm^2$ )
$J_{SCR}$	空间电荷复合电流密度模型中的前因子 (参见 $J_{SCR}(e^{V/N_{SCR}kT} - 1)$ ) ( $A/cm^2$ )
$J_{ST}$	光态下顶电极复合损失的电流密度 ( $A/cm^2$ )
$J_{ST}^D$	暗态下顶电极复合损失的电流密度 ( $A/cm^2$ )
$k$	玻尔兹曼常量( $8.7 \times 10^{-5} eV/K$ )
$\mathbf{k}$	光子、声子和电子的波矢( $nm^{-1}$ )
$k_{  }$	与结面平行的波矢分量( $nm^{-1}$ )
$L_{ABS}$	吸收长度(本书中定义为可吸收 85%入射光所需的材料厚度) ( $\mu m, nm$ )
$L_C$	光生载流子的收集长度 ( $\mu m, nm$ )
$L_E^{Diff}$	激子扩散长度 (nm)
$L_n$	电子扩散长度 ( $\mu m, nm$ )
$L_n^{Drift}$	电子漂移长度 (nm)
$L_p$	空穴扩散长度 ( $\mu m, nm$ )
$L_p^{Drift}$	空穴漂移长度 (nm)
LUMO	最低未被占据分子轨道(能级)(eV)
$m^*$	电子有效质量(kg)
$n$	单位体积导带自由电子数( $cm^{-3}$ )
$n$	二极管理想（或品质）因子
$n_0$	热平衡态单位体积导带自由电子数( $cm^{-3}$ )
$n_i$	本征载流子浓度( $cm^{-3}$ )
$n_1$	界面复合模型 ( $J_1(e^{V/n_1kT} - 1)$ ) 中的二极管理想（或品质）因子
$n_1$	由公式 $n_1 = N_C e^{-(E_C - E_T)/kT}$ 定义，其中 $E_T$ 为参与 S-R-H 复合中的 隙态能级位置( $cm^{-3}$ )
$n_{p0}$	热平衡时 p 型材料的电子数 ( $cm^{-3}$ )
$n_{SCR}$	空间电荷复合模型 ( $J_{SCR}(e^{V/N_{SCR}kT} - 1)$ ) 中的二极管理想（或品质）因子
$n_T$	单位体积被电子占据的，位于某个能级 $E$ 的受主态数目 ( $cm^{-3}$ )
$\tilde{n}_T$	单位体积被电子占据的，位于某个能级 $E$ 的能态数目 ( $cm^{-3}$ )
$N_A$	受主掺杂密度( $cm^{-3}$ )

$N_A^-$	单位体积电离的掺杂受主数目( $\text{cm}^{-3}$ )
$N_C$	导带有效状态密度( $\text{cm}^{-3}$ )
$N_D$	施主掺杂密度( $\text{cm}^{-3}$ )
$N_D^+$	单位体积电离的掺杂施主数目( $\text{cm}^{-3}$ )
$N_I$	界面处位于某能级 $E$ 处的缺陷态密度( $\text{cm}^{-3}$ )
$N_T$	位于某能级 $E$ 处的隙态密度( $\text{cm}^{-3}$ )
$N_{TA}$	位于某能级 $E$ 的受主型隙态密度( $\text{cm}^{-3}$ 或 $\text{cm}^{-3}\cdot\text{eV}^{-1}$ )
$N_{TD}$	位于某能级 $E$ 的施主型隙态密度( $\text{cm}^{-3}$ 或 $\text{cm}^{-3}\cdot\text{eV}^{-1}$ )
$N_V$	价带有效态密度
$p$	单位体积价带自由空穴数( $\text{cm}^{-3}$ )
$p_0$	热平衡时单位体积价带自由空穴数( $\text{cm}^{-3}$ )
$p_D$	DSSC 中光生染料分子空穴数( $\text{cm}^{-3}$ )
$p_{n0}$	热平衡时 n 型材料中价带内的自由空穴数 ( $\text{cm}^{-3}$ )
$p_1$	由公式 $p_1 = N_V e^{-(E_T - E_V)/kT}$ 定义, 其中 $E_T$ 为参与 S-R-H 复合的能态位置( $\text{cm}^{-3}$ )
$p_T$	单位体积内位于能级 $E$ 处未被电子占据的施主态数目( $\text{cm}^{-3}$ )
$\tilde{p}_T$	单位体积内位于能级 $E$ 处未被电子占据的能级数目 ( $\text{cm}^{-3}$ )
$P_E$	单位体积激子数( $\text{cm}^{-3}$ )
$P_{IN}$	给定光谱 $\Phi_0(\lambda)$ 入射到电池上的单位面积功率。可由对 $\Phi_0(\lambda)$ 整个光谱进行积分得到( $\text{W}/\text{cm}^2$ )
$P_{OUT}$	光照时电池单位面积的输出功率( $\text{W}/\text{cm}^2$ )
$r_A^A$	通过图 2.18 路径 a 的俄歇复合速率( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$r_B^A$	通过图 2.18 路径 b 的俄歇复合速率( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$r_C^A$	通过图 2.18 路径 c 的俄歇跃迁速率( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$r_D^A$	通过图 2.18 路径 d 的俄歇跃迁速率( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$r_E^A$	通过图 2.18 路径 e 的俄歇跃迁速率( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$r_F^A$	通过图 2.18 路径 f 的俄歇跃迁速率( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$R(\lambda)$	反射的光子流( $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$R^{AA}$	图 2.18 路径 a 的俄歇过程的净复合率( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$R^{AB}$	图 2.18 路径 b 的俄歇过程的净复合率( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$R^L$	净 S-R-H 复合速率( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$R^R$	净辐射复合速率( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$S_n$	电子对泽贝克 (Seebeck) 系数的贡献, 也称为热电动势( $\text{eV}/\text{K}$ )

$S_n$	电子表面复合速度(cm/s)
$S_p$	空穴对泽贝克系数的贡献, 也称为热电动势 (eV/K)
$S_p$	空穴表面复合速度(cm/s)
$T$	绝对温度(K)
$T$	透射的光子流( $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$T_n$	随空间变化的电子有效温度(K)
$T_p$	随空间变化的空穴有效温度(K)
$v$	电子或空穴的热运动速度(cm/s)
$V$	电压; 端电压(V)
$V_{Bi}$	内建电势(eV)
$V_{mp}$	最大功率点的器件电压
$V_n$	在某点 $x$ 处导带底与电子准费米能级之差(eV)
$V_{oc}$	开路电压(V)
$V_p$	在某点 $x$ 处空穴准费米能级与价带顶之差(eV)
$V_{TEB}$	异质结导带的有效总电子势垒(eV)
$V_{THB}$	异质结价带的有效总空穴势垒(eV)
$W$	载流子在带隙定域态之间跳跃的激活能(eV)
$W$	空间电荷区宽度( $\mu\text{m}, \text{nm}$ )
$x$	泛指在器件内或层中的位置(cm, nm)



## 缩写词列表

ALD	原子层沉积
AM	大气质量
AR	减反
a-Si:H	氢化非晶硅
AZO	掺铝氧化锌
BCC	体心立方(晶格)
BHJ	体异质结
CB	导带
CM	载流子倍增
DSSC	染料敏化太阳电池
DSSSC	固态染料敏化太阳电池
EBL	电子阻挡层
EPC	电化学光伏电池
EQE	外量子效率(通常以百分比表示)
ETL	电子传输层
FCC	面心立方(晶格)
$FF$	填充因子, 恒等于 $(J_{mp}V_{mp}/J_{sc}V_{oc})$ (是 $J-V$ 曲线中最大功率点矩形的量度, 因此小于等于 1)
HBL	空穴阻挡层
HJ	异质结
HTL	空穴传输层
IB	中间带
IQE	内量子效率(通常以百分比表示)
ITO	铟锡氧化物
mc	多晶
MEG	多重激子激发效应
M-I-S	金属-绝缘层-半导体
MOCVD	金属有机化学气相沉积
M-S	金属-半导体