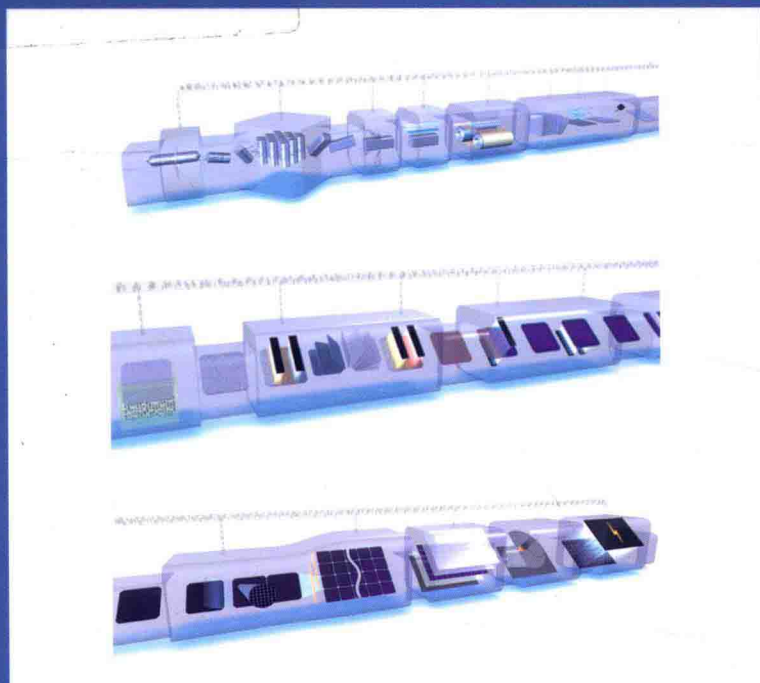


☀ 21世纪新能源·新型太阳能电池译丛



# 太阳能电池物理

## The Physics of Solar Cells

【英】Jenny Nelson 著 高扬 译



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

太阳能电池译丛

# 太阳能电池物理

The Physics of Solar Cells

[英] Jenny Nelson 著

高扬 译



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

## 内容提要

近年来,我国的太阳能产业得到了快速的发展,传统晶体硅太阳能电池的产业规模世界领先,各种新型太阳能电池的研发和产业化不断深入,在校师生和在职工程技术人员对学习太阳能电池理论和技术的热情高涨。在这样的背景下,《太阳能电池物理》试图从半导体物理的基础出发,对太阳能电池作理论层面的讨论。本书涵盖了太阳能电池的基本特性、太阳辐射的定量描述、半导体的理论模型、各种半导体结的特点、p-n结的理论分析、5种常见太阳能电池的原理性能、光学优化方式和高转换效率技术等方面的探讨。《太阳能电池物理》可以作为一本教材或参考书,适合物理系、动力与能源系、材料系、电子工程系、化学系或其他相关专业的本科生、研究生和教师学习研究太阳能电池的物理理论。本书也可以作为太阳能研究机构科学家或太阳能企业工程师的参考资料,为研发或生产各种类型的太阳能电池提供帮助。

*Copyright © 2003 by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd All rights reserved. This book, or parts thereof, may not be reproduced in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or any information storage and retrieval system now known or to be invented, without written permission from the Publisher. Simplified Chinese edition arranged with World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore.*

著作权合同登记号:图字 09-2018-182

## 图书在版编目(CIP)数据

太阳能电池物理 / (英)珍妮尼尔森(Jenny Nelson)著;高扬译. —2版. —上海:上海交通大学出版社,2018  
ISBN 978-7-313-19189-2

I. ①太... II. ①珍... ②高... III. ①太阳能电池 IV. ①TM914.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 054146 号

## 太阳能电池物理

著者:[英]Jenny Nelson

译者:高扬

出版发行:上海交通大学出版社

地址:上海市番禺路 951 号

邮政编码:200030

电话:021-64071208

出版人:谈毅

印制:上海春秋印刷厂

经销:全国新华书店

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:28

字数:691千字

版次:2011年9月第1版 2018年4月第2版

印次:2018年4月第2次印刷

书号:ISBN 978-7-313-19189-2/TM

定价:98.00元

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-33854186

# 前 言

作为新能源产业的重要组成,我国的太阳能产业在 2006~2010 年的“十一五”期间得到了又快又好的发展。自 2007 年,中国超过日本成为全球第一大太阳能电池生产国。2009 年,我国太阳能电池的全球市场占有率将近一半,可以相比我国同样占全球一半产量的手机、笔记本电脑和平板电视等产业。据不完全统计,目前我国有太阳能企业 610 家。相对我国 IT 产业的 46 家上市公司,太阳能产业在较短的发展时间内已经有了 13 家欧美上市公司、9 家香港上市公司和 32 家国内上市公司。这样的产业发展形势应该可以为有志于投身太阳能产业的年轻学子和已经在职的工程技术人员学习太阳能物理带来希望和动力。

太阳能电池的功能是发电,而太阳能电池物理是一门关于电流和电压的艺术。不论读者学习、研究、生产的是传统晶体硅太阳能电池,还是各种新型太阳能电池,都需要对太阳能电池物理有充分的认识 and 了解。一些对太阳能电池感兴趣的学生读者或刚入行的工程技术人员心中不免有一个疑问:“既然转换效率是太阳能电池最重要的性能参数,那么怎样才能提高转换效率呢?”《太阳能电池物理》试图在一定的程度上对这样的疑问做出回答。

第 1 章定义了太阳能电池的特性参数和伏安特性曲线。第 2 章用光子到电子的转换描述了太阳能电池。第 3 章和第 4 章分别给出了以载流子为基础的半导体理论和载流子浓度的变化规律。第 5 章定性地介绍了不同类型的半导体结。第 6 章为 p-n 结构建了详细的理论模型。第 7 章~第 10 章分别讨论了晶体硅太阳能电池、砷化镓太阳能电池、非晶硅薄膜太阳能电池、铜铟镓硒薄膜太阳能电池和碲化镉薄膜太阳能电池。第 11 章的光学优化可以提高不同类型太阳能电池的转换效率。第 12 章提出了一些新颖的高转换效率技术。

附录 1 为本书需要的物理常数,仅供参考。附录 2 为习题和相应的解答,对《太阳能电池物理》重点阐述的概念给出了各种实际情况,读者可以通过习题对这些重点概念有更好的理解。附录 3 和附录 4 对 Roth & Rau 公司和 Samilab 公司设备的介绍有助于学生读者将理论知识和实际产业情况相结合。英汉索引和汉英索引可以作为小型的太阳能电池词典,供读者查阅使用。找到了相应名词概念后,通过列举的章节,可以较全面地理解需要查询的概念。

《太阳能电池物理》的特色在于将成熟的半导体物理理论应用于太阳能电池的设计,共 370 个参数和 730 个公式,通过较详细的理论推导,阐述了各种太阳能电池的特性。公式推导是一种基本功,建议学生读者阅读完相关章节后,对这一章中一连串的公式进行从头到尾的推导。可以从书中得到有益的提示,更重要的是挑战自己对公式的理解。这种称之为“推书”的训练能够使读者对太阳能电池物理有更扎实的理解、记忆和掌握。除了“推书”,“量纲分析”也是一种学习理论推导必备的技巧。对较复杂的公式,将等号两边各物理量的单位分解为更基本的量纲后,进行约减,如果得到等号两边的约减结果是一致的,可以确认公式推导是正确的。还可以对物理量进行“量纲分析”,从而更好地理解其物理意义。目录后的参数符号表

列举了本书中出现的物理量单位,可以对“量纲分析”有一定帮助。商业化 MathCAD 软件可以解决很多数学问题,理论推导得出的公式通过 MathCAD 能够直接地转化为一目了然的曲线,这对物理问题的理论分析非常有帮助。

一个世纪以前,一群名垂史册的物理学家创立了量子力学,成为太阳能电池物理的基础。半个世纪以来,太阳能电池这门科学技术经过各国科学家和工程师的研究开发,得到了长足的发展。今天,我们学习太阳能电池物理,既是为了自己的职业发展需要,也是为了子孙后代有一个绿色的地球。

高扬  
2010年8月

## 参数符号表

符号	中文名称	英文名称	单位
$A$	太阳能电池面积	solar cell area	$\text{cm}^2$
$A_{\text{aperture}}$	孔径面积	aperture area	$\text{cm}^2$
$A_{\text{cavity}}$	反射腔前表面面积	front surface area of cavity	$\text{cm}^2$
$b$	光子通量	normal spectral photon flux density	$\text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1} \text{s}^{-1}$
$b_{\text{n}}$	环境光子通量	normal spectral photon flux density from ambience	$\text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1} \text{s}^{-1}$
$b_{\text{e}}$	自发辐射光子通量	normal spectral photon flux density of spontaneous emission	$\text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1} \text{s}^{-1}$
$b_{\text{s}}$	太阳光子通量	normal spectral photon flux density from sun to earth	$\text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1} \text{s}^{-1}$
	入射光强	incident light intensity	
$b_{\text{s-STC}}$	STC 太阳光子通量	STC normal spectral photon flux density from sun to earth	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{nm}^{-1}$
$B_{\text{Aug}}$	俄歇复合系数	Auger recombination coefficient	$\text{cm}^6/\text{s}$
$B_{\text{n}}$	电子俘获系数	electron capture coefficient	$\text{cm}^3/\text{s}$
$B_{\text{p}}$	空穴俘获系数	hole capture coefficient	$\text{cm}^3/\text{s}$
$B_{\text{rad}}$	辐射复合系数	radiative recombination coefficient	$\text{cm}^3/\text{s}$
$c$	真空光速	speed of light in vacuum	$\text{cm}/\text{s}$
$\cosh$	双曲余弦函数	hyperbolic cosine function	
$C_{\text{n}}$	电子俘获率	electron capture rate	$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
$C_{\text{p}}$	空穴俘获率	hole capture rate	$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
$d$	周期性晶粒尺寸	periodic grain size	$\mu\text{m}$
$d_1$	减反膜厚度	thickness of AR coat	$\text{nm}$
$d_{\text{atm}}$	大气层厚度	depth of atmosphere	$\text{km}$
$d_{\text{ins}}$	绝缘体厚度	thickness of insulator layer	$\text{cm}$
$d_{\text{sun}}$	太阳直径	diameter of sun	$\text{km}$
$D_{\text{a}}$	双极扩散系数	ambipolar diffusion constant	$\text{cm}^2/\text{s}$
$D_{\text{n}}$	电子扩散系数	electron diffusion constant	$\text{cm}^2/\text{s}$
$D_{\text{opt}}$	光学厚度	optical depth	$\text{cm}$
$D_{\text{p}}$	空穴扩散系数	hole diffusion constant	$\text{cm}^2/\text{s}$
$E$	光子能量	photon energy	$\text{eV}$

$E_a$	受主能级	acceptor energy level	eV
$E_B$	势垒高度	barrier height	eV
$E_c$	导带底	energy of conduction band edge	eV
	激发态	excited state	
$E_d$	施主能级	donor energy level	eV
$E_{ex}$	激子结合能	binding energy of exciton	eV
$E_f$	末态能级	final state energy level	eV
$E_F$	费米能级	Fermi energy level	eV
$E_F^n$	电子费米能级	electron Fermi energy level	eV
$E_F^p$	空穴费米能级	hole Fermi energy level	eV
$E_g$	带隙	band gap	eV
$E_g^b$	底电池带隙	bottom cell band gap	eV
$E_g^i$	中带隙	intermediate band gap	eV
$E_g^t$	顶电池带隙	top cell band gap	eV
$E_g^u$	上带隙	upper band gap	eV
$E_i$	本征能级	intrinsic energy level	eV
$E_i$	初态能级	initial state energy level	eV
$E_k$	动能	kinetic energy	eV
$E_m$	局域态能级	localized state energy level	eV
$E_{max}$	最大能量	maximum energy	eV
$E_{min}$	最小能量	minimum energy	eV
$E_n$	施主电离能	donor ionization energy	eV
$E_n$	电子动能	kinetic energy of electron	eV
$E_p$	受主电离能	acceptor ionization energy	eV
$E_p$	声子能量	energy of phonon	eV
$E_p$	空穴动能	kinetic energy of hole	eV
$E_{out}$	输出能级差	contact energy separation of output	eV
$E_{Ox}$	氧化态平均能级	mean energy of oxidized state	eV
$E_{redox}$	氧化还原电势	redox potential	eV
$E_{redox}^0$	电解质标准氧化还原电势	standard redox potential of the electrolyte	eV
$E_{Red}$	还原态平均能级	mean energy of reduced state	eV
$E_t$	陷阱能级	energy of trap state	eV
$E_v$	价带顶	energy of valence band edge	eV
	基态	ground state	
$E_{vac}$	真空能级	vacuum energy level	eV
$E_w$	窗口层带隙	band gap of window layer	eV

参数符号表

$E_\lambda$	重组能	reorganization energy	eV
$\delta E$	光谱范围	spectrum range	eV 或 nm
$f$	分布函数	distribution function	
$ f\rangle$	末态	final state	
$f_0$	费米-狄拉克分布函数	Fermi-Dirac distribution function	
$f_{\text{abs}}$	吸收比例	absorbed fraction	%
$f_c$	电子分布函数	distribution function of electrons in conduction band	
$f_f$	末态分布函数	final state distribution function	
$f_i$	初态分布函数	initial state distribution function	
$f_{\text{ph}}$	光子分布函数	photon distribution function	
$f_t$	陷阱分布函数	trap distribution function	
$f_{\text{trans}}$	透射比例	transmitted fraction	%
$f_v$	空穴分布函数	distribution function of holes in valence band	
$f_A$	非对称分布函数	asymmetric distribution function	
$f_{\text{B-E}}$	玻色-爱因斯坦分布	Bose-Einstein distribution	
$F$	电场强度 内建电场	electric field built-in electric field	V/cm
$F$	作用力	force	N
$F_0$	振幅矢量	amplitude vector	V/cm
$F_a$	环境几何因子	geometrical factor from ambience	
$F_e$	自发辐射几何因子	geometrical factor of spontaneous emission	
$FF$	填充因子	fill factor	%
$F_{\text{point}}$	点几何因子	geometrical factor from a point	
$F_s$	太阳几何因子	geometrical factor from sun to earth	
$F_X$	聚光几何因子	concentration geometrical factor	
$g$	状态密度	density of states	纲量一或 $\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1}$
$g$	光谱产生率	spectral generation rate	$\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1} \text{s}^{-1}$
$g_{1D}$	一维状态密度	density of states in one dimension	$\text{cm}^{-1} \text{eV}^{-1}$
$g_{2D}$	二维状态密度	density of states in two dimension	$\text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$
$g_c$	电子状态密度	density of states of electrons in conduction band	$\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1}$



$g_{\text{ext}}$	外部产生率	external generation rate	$\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1} \text{s}^{-1}$
$g_{\text{gb}}$	晶界陷阱态状态密度	density of trap states on grain boundary	$\text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$
$g_{\text{if}}$	联合状态密度	joint density of states	$\text{cm}^3$ 或 $\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1}$
$g_{\text{in}}$	内部产生率	internal generation rate	$\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1} \text{s}^{-1}$
$g_{\text{ph}}$	光子状态密度	photon state density	$\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1}$
$g_{\text{ph}}$	光子发射率	photon emission rate per unit volume	$\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1} \text{s}^{-1}$
$g_{\text{surf}}$	表面态状态密度	density of surface states	$\text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$
$g_{\text{v}}$	空穴状态密度	density of states of holes in valence band	$\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1}$
$G$	产生率	generation rate per unit volume	$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
$G$	吉布斯自由能	Gibbs free energy	eV
$G_{\text{n}}$	电子产生率	electron generation rate per unit volume	$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
$G_{\text{n}}^{\text{th}}$	电子热产生率	electron thermal generation rate	$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
$G_{\text{n}}^{\text{total}}$	电子总产生率	electron total generation rate	$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
$G_{\text{p}}$	空穴产生率	hole generation rate per unit volume	$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
$G_{\text{p}}^{\text{th}}$	空穴热产生率	hole thermal generation rate	$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
$G_{\text{p}}^{\text{total}}$	空穴总产生率	hole total generation rate	$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
$h$	普朗克常数	Plank constant	$\text{eV} \cdot \text{s}$
$H$	单位阶跃函数	unit step function	
$\mathbf{H}$	磁场强度	magnetic field density	A/cm
$\hat{H}$	哈密顿算符	Hamiltonian	eV
$\hat{H}'$	微扰能量	perturbation energy	eV
$ i\rangle$	初态	initial state	
$I$	光谱辐照度	spectral irradiance	$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$
$I$	电流	current	A
$j_{\text{abs}}$	受激吸收光谱电流	spectral current density of stimulated absorption	$\text{A} \cdot \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$
$j_{\text{abs\_net}}$	受激吸收净光谱电流	net spectral current density of stimulated absorption	$\text{A} \cdot \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$
$j_{\text{e}}$	自发辐射光谱电流	spectral current density of spontaneous emission	$\text{A} \cdot \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$
$j_{\text{e\_net}}$	自发辐射净光谱电流	net spectral current density of spontaneous emission	$\text{A} \cdot \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$
$j_{\text{gen}}$	光谱产生电流	spectral generation current density	$\text{A} \cdot \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$
$j_{\text{n}}$	光谱电子电流	spectral electron current density	$\text{A} \cdot \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$
$j_{\text{net}}$	净光谱电流	net spectral current density	$\text{A} \cdot \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$
$j_{\text{p}}$	光谱空穴电流	spectral hole current density	$\text{A} \cdot \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$

参数符号表

$j_{sc}$	光谱短路电流	spectral short circuit current density	$A \cdot cm^{-2} eV^{-1}$
$j_{scr}$	光谱空间电荷区电流	spectral space charge region current density	$A \cdot cm^{-2} eV^{-1}$
$J$	电流密度或电流	current density	$A/cm^2$
$J$	净电流	net current density	$A/cm^2$
$J_0$	反向饱和电流	reverse saturation current density	$A/cm^2$
$J_{dark}$	暗电流	dark current density	$A/cm^2$
$J_{diff}$	扩散电流	diffusion current density	$A/cm^2$
$J_{diff}^0$	反向饱和扩散电流	reverse saturation diffusion current density	$A/cm^2$
$J_{drift}$	漂移电流	drift current density	$A/cm^2$
$J_{gb}$	晶界复合电流	grain boundary recombination current density	$A/cm^2$
$J_{gen}$	产生电流	generation current density	$A/cm^2$
$J_{sc}$	短路电流	short circuit current density	$A/cm^2$
$J_{scr}$	空间电荷区电流	space charge region current density	$A/cm^2$
$J_{scr}^0$	反向饱和空间电荷区电流	reverse saturation space charge region current density	$A/cm^2$
$J_m$	最佳工作电流	optimum current density	$A/cm^2$
$J_m$	局域态电流	localized state current density	$A/cm^2$
$J_n$	电子电流	electron current density	$A/cm^2$
$J_p$	空穴电流	hole current density	$A/cm^2$
$J_{ph}$	光生电流	photocurrent density	$A/cm^2$
$J_{rad}$	辐射电流	radiative current density	$A/cm^2$
$J_{rad}^0$	反向饱和辐射电流	reverse saturation radiative current density	$A/cm^2$
$J_{rec}$	复合电流	recombination current density	$A/cm^2$
$J_{sh}$	分流电流	shunt current density	$A/cm^2$
$k$	波矢	wave vector	$cm^{-1}$
$k_B$	玻尔兹曼常数	Boltzmann constant	$eV/K$
$k_c$	导带底波矢	wave vector of conduction band edge	$cm^{-1}$
$k_f$	末态波矢	wave vector of final state	$cm^{-1}$
$k_i$	初态波矢	wave vector of initial state	$cm^{-1}$
$k_p$	声子波矢	wave vector of phonon	$cm^{-1}$
$k_v$	价带顶波矢	wave vector of valence band edge	$cm^{-1}$
$K$	倒格子	reciprocal lattice	$cm^{-1}$
$l$	长度坐标	length coordinate	$\mu m$
$l_{earth-sun}$	地球-太阳距离	distance from earth to sun	km
$L$	L 函数	L function	$W/cm^2$

$L$	晶界耗尽宽度	grain boundary depletion width	$\mu\text{m}$
$L_a$	双极扩散长度	ambipolar diffusion length	cm
$L_i$	光程	optical path	$\mu\text{m}$
$L_i$	i 型层漂移长度	i layer drift length	cm
$L_n$	电子扩散长度	electron diffusion length	cm
$L_{\text{opt}}$	光程长	optical path length	cm
$L_p$	空穴扩散长度	hole diffusion length	cm
$m$	理想因子	ideality factor	
$m_0$	电子静止质量	electron rest mass	kg
$m^*$	有效质量	effective mass	kg
$m_c^*$	电子有效质量	effective mass of electron in conduction band	kg
$m_v^*$	空穴有效质量	effective mass of hole in valence band	kg
$M_{\text{vc}}$	偶极子矩阵元	dipole matrix element	$\text{kg} \cdot \text{cm}/\text{s}$
$n$	电子浓度	density of electrons in conduction band	$\text{cm}^{-3}$
$n_0$	热平衡状态电子浓度	density of electrons in conduction band in thermal equilibrium	$\text{cm}^{-3}$
$n_0$	空气折射率	refractive index of air	
$n_1$	减反膜折射率	refractive index of one layer AR coat	
$\bar{n}_1$	减反膜复折射率	complex refractive index of AR coat	
$n_2$	第二层减反膜折射率	refractive index of the second layer AR coat	
$n_i$	本征载流子浓度	intrinsic carrier density	$\text{cm}^{-3}$
$n_{\text{ph}}$	光子浓度	density of photons	$\text{cm}^{-3}$
$n_t$	电子陷阱系数	electron trap coefficient	$\text{cm}^{-3}$
$n_s$	半导体折射率	refractive index of semiconductor	
$\bar{n}_s$	半导体复折射率	complex refractive index of semiconductor	
$n_{\text{AM}}$	大气质量指数	air mass index	
$N$	粒子数	particle number	
$N$	N 函数	N function	$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
$N_a$	受主浓度	density of acceptor impurity atoms	$\text{cm}^{-3}$
$N_c$	电子有效状态密度	effective density of states of electrons in conduction band	$\text{cm}^{-3}$
$N_d$	施主浓度	density of donor impurity atoms	$\text{cm}^{-3}$
$N_{\text{def}}^{\text{s}}$	缺陷面密度	sheet defect density	$\text{cm}^{-2}$
$N_i$	背景杂质浓度	density of background impurity atoms	$\text{cm}^{-3}$
$N_s$	表面陷阱浓度	surface density of trap states	$\text{cm}^{-2}$

参数符号表

$N_t$	陷阱浓度	density of trap states	$\text{cm}^{-3}$
$N_v$	空穴有效状态密度	effective density of states of holes in valence band	$\text{cm}^{-3}$
$[Ox]$	氧化态相对浓度	relative concentration of oxidized species	%
$p$	空穴浓度	density of holes in valence band	$\text{cm}^{-3}$
$\mathbf{p}$	动量	momentum	$\text{kg} \cdot \text{cm}/\text{s}$
$\hat{p}$	动量算符	momentum operator	$\text{kg} \cdot \text{cm}/\text{s}$
$p_0$	热平衡状态空穴浓度	density of holes in valence band in thermal equilibrium	$\text{cm}^{-3}$
$p_t$	空穴陷阱系数	hole trap coefficient	$\text{cm}^{-3}$
$P$	功率密度或功率辐照度	power density irradiance	$\text{W}/\text{cm}^2$
$P_m$	最大功率	maximum power density	$\text{W}/\text{cm}^2$
$P_{\max}$	最大输出功率	maximum output power density	$\text{W}/\text{cm}^2$
$P_s$	太阳辐照度	irradiance from sun to earth	$\text{W}/\text{cm}^2$
$P_{\text{sun\_surf}}$	太阳表面辐照度	irradiance on sun surface	$\text{W}/\text{cm}^2$
$q$	电子电量	elementary charge	C
$Q_s$	表面电荷密度	surface charge density	$\text{C}/\text{cm}^2$
$Q_{\text{ins}}$	绝缘体表面电荷密度	surface charge density of insulator	$\text{C}/\text{cm}^2$
$Q_{\text{gb}}$	晶界电荷面密度	sheet charge density on grain boundary	$\text{C}/\text{cm}^2$
$QE$	量子效率	quantum efficiency	%
$r$	空间位置	position in space	cm
$r$	跃迁率	transition rate per unit volume	$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
$r_{\text{abs}}$	吸收跃迁率	absorption transition rate	$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
$r_e$	自发辐射跃迁率	spontaneous emission transition rate	$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
$R$	反射率	reflectivity	%
$R$	负载电阻	load resistance	$\Omega$
$\mathbf{R}$	正格子	direct lattice	cm
$R_c$	比接触电阻	specific contact resistance	$\Omega \cdot \text{cm}^2$
$R_m$	最佳负载电阻	optimum load	$\Omega$
$R_n$	电子发射率	electron release rate	$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
$R_p$	p 偏振光反射率	reflectivity of p-polarized light	%
$R_p$	空穴发射率	hole release rate	$\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$
$R_s$	s 偏振光反射率	reflectivity of s-polarized light	%
$R_s$	串联电阻	series resistance	$\Omega$
$R_{\text{sh}}$	分流电阻	shunt resistance	$\Omega$

$R_{\square}$	方块电阻	sheet resistance	$\Omega/\square$ 或 $\Omega/\text{sq}$
[Red]	还原态相对浓度	relative concentration of reduced species	%
$\sinh$	双曲正弦函数	hyperbolic sine function	
$S_{\text{sb}}$	晶界复合速度	grain boundary recombination velocity	cm/s
$S_{\text{n}}$	电子表面复合速度	electron surface recombination velocity	cm/s
$S_{\text{n}}$	电子动能通量	electron kinetic energy flux	eV/cm <sup>2</sup>
$S_{\text{p}}$	空穴表面复合速度	hole surface recombination velocity	cm/s
$t$	时间	time	s
$T$	温度	temperature	K
$T_0$	特征温度	characteristic temperature	K
$T_{\text{a}}$	环境温度	ambient temperature	K
$T_{\text{c}}$	电池温度	cell temperature	K
$T_{\text{h}}$	热载流子温度	temperature of hot carrier	K
$T_{\text{n}}$	电子有效温度	effective temperature of electron in conduction band	K
$T_{\text{p}}$	空穴有效温度	effective temperature of hole in valence band	K
$T_{\text{s}}$	太阳温度	temperature of sun	K
$u$	布洛赫波包	Bloch wave packet	
$u_{\text{ph}}$	光子吸收率	photon absorption rate per unit volume	cm <sup>-3</sup> eV <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
$u_{\text{rad}}$	光谱辐射复合率	spectral radiative recombination rate	cm <sup>-3</sup> eV <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
$U$	复合率	recombination rate per unit volume	cm <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup>
$U_{\text{Aug}}$	俄歇复合率	Auger recombination rate	cm <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup>
$U_{\text{gb}}$	晶界复合率	grain boundary recombination rate per unit volume	cm <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup>
$U_{\text{gb}}\delta x$	晶界复合通量	grain boundary recombination flux	cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
$U_{\text{n}}$	电子复合率	electron recombination rate per unit volume	cm <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup>
$U_{\text{n}}^{\text{th}}$	电子热复合率	electron thermal recombination rate	cm <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup>
$U_{\text{n}}^{\text{total}}$	电子总复合率	electron total recombination rate	cm <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup>
$U_{\text{p}}$	空穴复合率	hole recombination rate per unit volume	cm <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup>
$U_{\text{p}}^{\text{th}}$	空穴热复合率	hole thermal recombination rate	cm <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup>
$U_{\text{p}}^{\text{total}}$	空穴总复合率	hole total recombination rate	cm <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup>
$U_{\text{rad}}$	辐射复合率	radiative recombination rate	cm <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup>
$U_{\text{rad}}^{\text{total}}$	总辐射复合率	total radiative recombination rate	cm <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup>
$U_{\text{s}}$	表面复合率	surface recombination rate	cm <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup>
$U_{\text{trap}}$	陷阱复合率	trap recombination rate	cm <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup>

参数符号表

$v$	速度	velocity	cm/s
$V$	电压	voltage	V
	外加电压	external voltage	
$V_{bi}$	内建电压	built-in voltage	V
$V_{int}$	界面电势	interface potential	V
$V_j$	结电压	junction voltage	V
$V_H$	赫姆霍兹层电势	potential of Helmholtz layer	V
$V_m$	最佳工作电压	optimum voltage	V
$V_m^b$	底电池最佳电压	optimum voltage of bottom cell	V
$V_m^t$	顶电池最佳电压	optimum voltage of top cell	V
$V_{max}$	最大输出电压	maximum output voltage	V
$V_{sh}$	分流电压	shunt voltage	V
$V_{oc}$	开路电压	open circuit voltage	V
$V_{ph}$	光生电压	photovoltage	V
$w$	太阳能电池厚度	width of solar cell	cm
$w_n$	n 型耗尽宽度	n type depletion width	cm
$w_p$	p 型耗尽宽度	p type depletion width	cm
$w_{scr}$	耗尽宽度	depletion width	cm
$W_{gen}$	光学产生动能密度	kinetic energy density increased by optical generation	eV/cm <sup>3</sup>
$W_{rec}$	复合动能密度	kinetic energy density increased by recombination	eV/cm <sup>3</sup>
$W_{relax}$	弛豫动能密度	kinetic energy density decreased by relaxation	eV/cm <sup>3</sup>
$x$	组分	fraction	
$X$	聚光系数	concentration factor	
$\alpha$	吸收系数	absorption coefficient	cm <sup>-1</sup>
$\alpha$	吸收率	absorptivity	%
$\alpha_{p+}$	发射声子吸收系数	absorption coefficient for phonon emission	cm <sup>-1</sup>
$\alpha_{p-}$	吸收声子吸收系数	absorption coefficient for phonon absorption	cm <sup>-1</sup>
$\beta$	光子角通量	spectral photon flux density per unit solid angle	cm <sup>-2</sup> eV <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> sr <sup>-1</sup>
$\beta_a$	环境光子角通量	spectral photon flux density per unit solid angle from ambience	cm <sup>-2</sup> eV <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> sr <sup>-1</sup>

$\beta_c$	自发辐射光子角通量	spectral photon flux density per unit solid angle of spontaneous emission	$\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$
$\beta_s$	太阳光子角通量	spectral photon flux density per unit solid angle from sun	$\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$
$\Delta\beta$	光子循环通量	photon recycling flux density	$\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$
$\gamma$	地球-太阳仰角	elevation from earth to sun	( $^\circ$ )
$\gamma$	反射角	angle of reflection	( $^\circ$ )
$\gamma$	$\gamma$ 系数	gamma coefficient	
$\gamma_n$	电子 $\gamma$ 系数	electron gamma coefficient	$\text{cm}^{-3}$
$\gamma_p$	空穴 $\gamma$ 系数	hole gamma coefficient	$\text{cm}^{-3}$
$\delta$	单位脉冲函数	unit impulse function	
$\delta_1$	减反膜相移	phase shift in AR coat	
$\epsilon$	辐射率	emissivity	%
$\epsilon$	光子发射系数	photon emission coefficient	$\text{cm}^{-1}$
$\epsilon_0$	真空介电常数	vacuum permittivity	F/cm
$\epsilon_e$	电解质介电常数	electrolyte permittivity	F/cm
$\epsilon_m$	金属介电常数	metal permittivity	F/cm
$\epsilon_s$	半导体介电常数	semiconductor permittivity	F/cm
$\zeta_n$	电子 $\zeta$ 系数	electron zeta coefficient	$\text{cm}^{-3}$
$\zeta_p$	空穴 $\zeta$ 系数	hole zeta coefficient	$\text{cm}^{-3}$
$\eta$	转换效率	efficiency	%
$\eta_c$	收集率	collection probability by contact	%
$\eta_{\text{diss}}$	分离量子效率	quantum efficiency for dissociation	%
$\theta_0$	入射角	incident angle	( $^\circ$ )
$\theta_1$	减反膜入射角	incident angle of AR coat	( $^\circ$ )
$\theta_c$	临界角	critical angle	( $^\circ$ )
$\theta_p$	抛物面半角	half angle of paraboloid	( $^\circ$ )
$\theta_s$	折射角	angle of refraction	( $^\circ$ )
$\theta_s$	太阳半角	half angle of sun	( $^\circ$ )
$\theta_{\text{tilt}}$	倾角	tilted angle	( $^\circ$ )
$\theta_X$	聚光半角	half angle of concentration	( $^\circ$ )
$\iota$	$\iota$ 系数	iota coefficient	
$\kappa_1$	减反膜消光系数	extinction coefficient of AR coat	
$\kappa_s$	半导体消光系数	extinction coefficient of semiconductor	
$\lambda$	波长	wavelength	nm
$\lambda_0$	最佳波长	optimum wavelength	nm
$\mu^*$	约化有效质量	reduced effective mass	kg

参数符号表

$\mu_c$	导带化学势	chemical potential energy of conduction band	eV
$\mu_c^i$	中导带化学势	chemical potential energy of intermediate conduction band	eV
$\mu_{ev}$	电子-空穴对热平衡化学势	chemical potential energy of electron-hole pair in equilibrium	eV
$\mu_c^u$	上导带化学势	chemical potential energy of upper conduction band	eV
$\mu_{th}$	热载流子化学势	chemical potential of hot carrier	eV
$\mu_n$	电子迁移率	mobility of electron	$\text{cm}^2 \text{s}^{-1} \text{V}^{-1}$
$\mu_{out}$	输出化学势	chemical potential of output	eV
$\mu_p$	空穴迁移率	mobility of hole	$\text{cm}^2 \text{s}^{-1} \text{V}^{-1}$
$\mu_v$	价带化学势	chemical potential energy of valence band	eV
$\Delta\mu$	化学势差	chemical potential difference	eV
$\nu_n$	电子 $\nu$ 系数	electron nu coefficient	
$\nu_p$	空穴 $\nu$ 系数	hole nu coefficient	
$\xi_n$	电子 $\xi$ 系数	electron xi coefficient	
$\xi_p$	空穴 $\xi$ 系数	hole xi coefficient	
$\rho$	电阻率	resistivity	$\Omega \cdot \text{cm}$
$\rho$	电荷密度	charge density	$\text{C}/\text{cm}^3$
$\rho_{fixed}$	固定电荷密度	fixed charge density	$\text{C}/\text{cm}^3$
$\sigma$	电导率	conductivity	S/cm 或 $\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$
$\sigma_n$	电子俘获截面	electron capture cross section	$\text{cm}^2$
$\sigma_p$	空穴俘获截面	hole capture cross section	$\text{cm}^2$
$\sigma_S$	斯忒藩-玻尔兹曼常数	Stefan - Boltzmann constant	$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \text{K}^{-4}$
$\tau$	寿命	lifetime	s
$\tau_a$	双极载流子寿命	ambipolar carrier lifetime	s
$\tau_{Aug}$	俄歇少子寿命	Auger minority carrier lifetime	s
$\tau_c$	俘获寿命	capture lifetime	s
$\tau_{gb}$	晶界少子寿命	grain boundary minority carrier lifetime	s
$\tau_n$	电子寿命	electron lifetime	s
$\tau_p$	空穴寿命	hole lifetime	s
$\tau_r$	发射寿命	release lifetime	s
$\tau_{rad}$	辐射少子寿命	radiative minority carrier lifetime	s



$\tau_{\text{trap}}^n$	电子陷阱寿命	electron trap lifetime	s
$\tau_{\text{trap}}^p$	空穴陷阱寿命	hole trap lifetime	s
$\nu_n$	电子 $\nu$ 系数	electron upsilon coefficient	$\text{cm}^{-3}$
$\nu_p$	空穴 $\nu$ 系数	hole upsilon coefficient	$\text{cm}^{-3}$
$\phi$	电势	electric potential	V
$\phi_0$	中性能级	neutrality level	eV
$\chi$	电子亲合势	electron affinity	eV
$\psi$	波函数	wave function	
$\psi_e$	电子波函数	wave function of electron	
$\psi_{\text{ex}}$	激子波函数	wave function of exciton	
$\psi_h$	空穴波函数	wave function of hole	
$\omega$	角频率	angle frequency	$\text{s}^{-1}$
$\omega_n$	电子 $\omega$ 系数	electron omega coefficient	
$\omega_p$	空穴 $\omega$ 系数	hole omega coefficient	
$\omega_p$	声子角频率	angle frequency of phonon	$\text{s}^{-1}$
$A$	A 系数	alpha coefficient	$\text{cm}^2/\text{kg}$
$\Delta$	费米能级下移	Fermi energy level downshifting	eV
$\Phi$	功函数	work function	eV
$\Phi_e$	电解质功函数	work function of the electrolyte	eV
$\Phi_m$	金属功函数	work function of metal	eV
$\Phi_n$	n 型半导体功函数	work function of n-type semiconductor	eV
$\Phi_p$	p 型半导体功函数	work function of p-type semiconductor	eV
$\Phi_{\text{ref}}$	参考功函数	work function of the reference	eV