

国家十一五规划重点图书



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

国家十一五规划重点图书

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

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 Imperial College Press. 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 translation arranged with Imperial College Press, United Kingdom.

著作权合同登记号:图字 09-2009-575

图书在版编目(CIP)数据

太阳能电池物理/(英)纳尔逊(Nelson, J.)著;高扬译. —上海:上海交通大学出版社,2011

(新型太阳能电池译丛. 太阳能实用技术系列)

ISBN 978-7-313-06999-3

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 250533 号

太阳能电池物理

[英]纳尔逊 著

高扬 译

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

昆山市亭林印刷有限责任公司 印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:28 字数:691千字

2011年9月第1版 2011年9月第1次印刷

ISBN 978-7-313-06999-3/TM 定价:68.00元

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有质量问题请与印刷厂质量科联系
联系电话:0512-57751097

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作出回答。

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	cm^2
A_{aperture}	孔径面积	aperture area	cm^2
A_{cavity}	反射腔前表面面积	front surface area of cavity	cm^2
b	光子通量	normal spectral photon flux density	$\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}\text{s}^{-1}$
b_a	环境光子通量	normal spectral photon flux density from ambience	$\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}\text{s}^{-1}$
b_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_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	
$b_{s\text{-STC}}$	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_{Aug}	俄歇复合系数	Auger recombination coefficient	cm^6/s
B_n	电子俘获系数	electron capture coefficient	cm^3/s
B_p	空穴俘获系数	hole capture coefficient	cm^3/s
B_{rad}	辐射复合系数	radiative recombination coefficient	cm^3/s
c	真空光速	speed of light in vacuum	cm/s
cosh	双曲余弦函数	hyperbolic cosine function	
C_n	电子俘获率	electron capture rate	$\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$
C_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	μm
d_1	减反膜厚度	thickness of AR coat	nm
d_{atm}	大气层厚度	depth of atmosphere	km
d_{ins}	绝缘体厚度	thickness of insulator layer	cm
d_{sun}	太阳直径	diameter of sun	km
D_a	双极扩散系数	ambipolar diffusion constant	cm^2/s
D_n	电子扩散系数	electron diffusion constant	cm^2/s
D_{opt}	光学厚度	optical depth	cm
D_p	空穴扩散系数	hole diffusion constant	cm^2/s
E	光子能量	photon energy	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_λ	重组能	reorganization energy	eV
δE	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_{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_{ph}	光子分布函数	photon distribution function	
f_t	陷阱分布函数	trap distribution function	
f_{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
\mathbf{F}	作用力	force	N
\mathbf{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_{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	$\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1} \text{s}^{-1}$
$g_{1\text{D}}$	一维状态密度	density of states in one dimension	$\text{cm}^{-1} \text{eV}^{-1}$
$g_{2\text{D}}$	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_{ext}	外部产生率	external generation rate	$\text{cm}^{-3}\text{eV}^{-1}\text{s}^{-1}$
g_{gb}	晶界陷阱态状态密度	density of trap states on grain boundary	$\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$
g_{if}	联合状态密度	joint density of states	cm^3 或 $\text{cm}^{-3}\text{eV}^{-1}$
g_{in}	内部产生率	internal generation rate	$\text{cm}^{-3}\text{eV}^{-1}\text{s}^{-1}$
g_{ph}	光子状态密度	photon state density	$\text{cm}^{-3}\text{eV}^{-1}$
g_{ph}	光子发射率	photon emission rate per unit volume	$\text{cm}^{-3}\text{eV}^{-1}\text{s}^{-1}$
g_{surf}	表面态状态密度	density of surface states	$\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$
g_{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_{n}	电子产生率	electron generation rate per unit volume	$\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$
G_{n}^{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_{p}	空穴产生率	hole generation rate per unit volume	$\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$
G_{p}^{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_{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_{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_{gen}	光谱产生电流	spectral generation current density	$\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$
j_{n}	光谱电子电流	spectral electron current density	$\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$
j_{net}	净光谱电流	net spectral current density	$\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$
j_{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	μm
$l_{earth-sun}$	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	μm
L_a	双极扩散长度	ambipolar diffusion length	cm
L_i	光程	optical path	μm
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_{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_{vc}	偶极子矩阵元	dipole matrix element	kg · cm/s
n	电子浓度	density of electrons in conduction band	cm^{-3}
n_0	热平衡状态电子浓度	density of electrons in conduction band in thermal equilibrium	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	cm^{-3}
n_{ph}	光子浓度	density of photons	cm^{-3}
n_t	电子陷阱系数	electron trap coefficient	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_{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	cm^{-3}
N_c	电子有效状态密度	effective density of states of electrons in conduction band	cm^{-3}
N_d	施主浓度	density of donor impurity atoms	cm^{-3}
$N_{\text{def}}^{\text{s}}$	缺陷面密度	sheet defect density	cm^{-2}
N_i	背景杂质浓度	density of background impurity atoms	cm^{-3}
N_s	表面陷阱浓度	surface density of trap states	cm^{-2}

参数符号表

N_t	陷阱浓度	density of trap states	cm^{-3}
N_v	空穴有效状态密度	effective density of states of holes in valence band	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	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	cm^{-3}
p_t	空穴陷阱系数	hole trap coefficient	cm^{-3}
P	功率密度或功率辐照度	power density irradiance	W/cm^2
P_m	最大功率	maximum power density	W/cm^2
P_{\max}	最大输出功率	maximum output power density	W/cm^2
P_s	太阳辐照度	irradiance from sun to earth	W/cm^2
$P_{\text{sun_surf}}$	太阳表面辐照度	irradiance on sun surface	W/cm^2
q	电子电量	elementary charge	C
Q_s	表面电荷密度	surface charge density	C/cm^2
Q_{ins}	绝缘体表面电荷密度	surface charge density of insulator	C/cm^2
Q_{gb}	晶界电荷面密度	sheet charge density on grain boundary	C/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_{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	Ω
\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	Ω
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	Ω
R_{sh}	分流电阻	shunt resistance	Ω

R_{\square}	方块电阻	sheet resistance	Ω/\square 或 Ω/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_{sb}	晶界复合速度	grain boundary recombination velocity	cm/s
S_{n}	电子表面复合速度	electron surface recombination velocity	cm/s
S_{n}	电子动能通量	electron kinetic energy flux	eV/cm ²
S_{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_{a}	环境温度	ambient temperature	K
T_{c}	电池温度	cell temperature	K
T_{h}	热载流子温度	temperature of hot carrier	K
T_{n}	电子有效温度	effective temperature of electron in conduction band	K
T_{p}	空穴有效温度	effective temperature of hole in valence band	K
T_{s}	太阳温度	temperature of sun	K
u	布洛赫波包	Bloch wave packet	
u_{ph}	光子吸收率	photon absorption rate per unit volume	cm ⁻³ eV ⁻¹ s ⁻¹
u_{rad}	光谱辐射复合率	spectral radiative recombination rate	cm ⁻³ eV ⁻¹ s ⁻¹
U	复合率	recombination rate per unit volume	cm ⁻³ s ⁻¹
U_{Aug}	俄歇复合率	Auger recombination rate	cm ⁻³ s ⁻¹
U_{gb}	晶界复合率	grain boundary recombination rate per unit volume	cm ⁻³ s ⁻¹
$U_{\text{gb}}\delta x$	晶界复合通量	grain boundary recombination flux	cm ⁻² s ⁻¹
U_{n}	电子复合率	electron recombination rate per unit volume	cm ⁻³ s ⁻¹
U_{n}^{th}	电子热复合率	electron thermal recombination rate	cm ⁻³ s ⁻¹
$U_{\text{n}}^{\text{total}}$	电子总复合率	electron total recombination rate	cm ⁻³ s ⁻¹
U_{p}	空穴复合率	hole recombination rate per unit volume	cm ⁻³ s ⁻¹
U_{p}^{th}	空穴热复合率	hole thermal recombination rate	cm ⁻³ s ⁻¹
$U_{\text{p}}^{\text{total}}$	空穴总复合率	hole total recombination rate	cm ⁻³ s ⁻¹
U_{rad}	辐射复合率	radiative recombination rate	cm ⁻³ s ⁻¹
$U_{\text{rad}}^{\text{total}}$	总辐射复合率	total radiative recombination rate	cm ⁻³ s ⁻¹
U_{s}	表面复合率	surface recombination rate	cm ⁻³ s ⁻¹
U_{trap}	陷阱复合率	trap recombination rate	cm ⁻³ s ⁻¹

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 ³
W_{rec}	复合动能密度	kinetic energy density increased by recombination	eV/cm ³
W_{relax}	弛豫动能密度	kinetic energy density decreased by relaxation	eV/cm ³
x	组分	fraction	
X	聚光系数	concentration factor	
α	吸收系数	absorption coefficient	cm ⁻¹
α	吸收率	absorptivity	%
α_{p+}	发射声子吸收系数	absorption coefficient for phonon emission	cm ⁻¹
α_{p-}	吸收声子吸收系数	absorption coefficient for phonon absorption	cm ⁻¹
β	光子角通量	spectral photon flux density per unit solid angle	cm ⁻² eV ⁻¹ s ⁻¹ sr ⁻¹
β_a	环境光子角通量	spectral photon flux density per unit solid angle from ambience	cm ⁻² eV ⁻¹ s ⁻¹ sr ⁻¹

β_e	自发辐射光子角通量	spectral photon flux density per unit solid angle of spontaneous emission	$\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$
β_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	$\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$
γ	地球-太阳仰角	elevation from earth to sun	($^\circ$)
γ	反射角	angle of reflection	($^\circ$)
γ	γ 系数	gamma coefficient	
γ_n	电子 γ 系数	electron gamma coefficient	cm^{-3}
γ_p	空穴 γ 系数	hole gamma coefficient	cm^{-3}
δ	单位脉冲函数	unit impulse function	
δ_1	减反膜相移	phase shift in AR coat	
ϵ	辐射率	emissivity	%
ϵ	光子发射系数	photon emission coefficient	cm^{-1}
ϵ_0	真空介电常数	vacuum permittivity	F/cm
ϵ_e	电解质介电常数	electrolyte permittivity	F/cm
ϵ_m	金属介电常数	metal permittivity	F/cm
ϵ_s	半导体介电常数	semiconductor permittivity	F/cm
ζ_n	电子 ζ 系数	electron zeta coefficient	cm^{-3}
ζ_p	空穴 ζ 系数	hole zeta coefficient	cm^{-3}
η	转换效率	efficiency	%
η_c	收集率	collection probability by contact	%
η_{diss}	分离量子效率	quantum efficiency for dissociation	%
θ_0	入射角	incident angle	($^\circ$)
θ_1	减反膜入射角	incident angle of AR coat	($^\circ$)
θ_c	临界角	critical angle	($^\circ$)
θ_p	抛物面半角	half angle of paraboloid	($^\circ$)
θ_s	折射角	angle of refraction	($^\circ$)
θ_s	太阳半角	half angle of sun	($^\circ$)
θ_{ilt}	倾角	tilted angle	($^\circ$)
θ_X	聚光半角	half angle of concentration	($^\circ$)
ι	ι 系数	iota coefficient	
κ_1	减反膜消光系数	extinction coefficient of AR coat	
κ_s	半导体消光系数	extinction coefficient of semiconductor	
λ	波长	wavelength	nm
λ_0	最佳波长	optimum wavelength	nm
μ^*	约化有效质量	reduced effective mass	kg

参数符号表

μ_c	导带化学势	chemical potential energy of conduction band	eV
μ_c^i	中导带化学势	chemical potential energy of intermediate conduction band	eV
μ_{cv}	电子-空穴对热平衡化学势	chemical potential energy of electron-hole pair in equilibrium	eV
μ_c^u	上导带化学势	chemical potential energy of upper conduction band	eV
μ_h	热载流子化学势	chemical potential of hot carrier	eV
μ_n	电子迁移率	mobility of electron	$\text{cm}^2 \text{s}^{-1} \text{V}^{-1}$
μ_{out}	输出化学势	chemical potential of output	eV
μ_p	空穴迁移率	mobility of hole	$\text{cm}^2 \text{s}^{-1} \text{V}^{-1}$
μ_v	价带化学势	chemical potential energy of valence band	eV
$\Delta\mu$	化学势差	chemical potential difference	eV
ν_n	电子 ν 系数	electron nu coefficient	
ν_p	空穴 ν 系数	hole nu coefficient	
ξ_n	电子 ξ 系数	electron xi coefficient	
ξ_p	空穴 ξ 系数	hole xi coefficient	
ρ	电阻率	resistivity	$\Omega \cdot \text{cm}$
ρ	电荷密度	charge density	C/cm^3
ρ_{fixed}	固定电荷密度	fixed charge density	C/cm^3
σ	电导率	conductivity	S/cm 或 $\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$
σ_n	电子俘获截面	electron capture cross section	cm^2
σ_p	空穴俘获截面	hole capture cross section	cm^2
σ_S	斯忒藩-玻尔兹曼常数	Stefan - Boltzmann constant	$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \text{K}^{-4}$
τ	寿命	lifetime	s
τ_a	双极载流子寿命	ambipolar carrier lifetime	s
τ_{Aug}	俄歇少子寿命	Auger minority carrier lifetime	s
τ_c	俘获寿命	capture lifetime	s
τ_{gb}	晶界少子寿命	grain boundary minority carrier lifetime	s
τ_n	电子寿命	electron lifetime	s
τ_p	空穴寿命	hole lifetime	s
τ_r	发射寿命	release lifetime	s
τ_{rad}	辐射少子寿命	radiative minority carrier lifetime	s

$\tau_{\text{trap}}^{\text{n}}$	电子陷阱寿命	electron trap lifetime	s
$\tau_{\text{trap}}^{\text{p}}$	空穴陷阱寿命	hole trap lifetime	s
ν_{n}	电子 ν 系数	electron upsilon coefficient	cm^{-3}
ν_{p}	空穴 ν 系数	hole upsilon coefficient	cm^{-3}
ϕ	电势	electric potential	V
ϕ_0	中性能级	neutrality level	eV
χ	电子亲合势	electron affinity	eV
ψ	波函数	wave function	
ψ_{e}	电子波函数	wave function of electron	
ψ_{ex}	激子波函数	wave function of exciton	
ψ_{h}	空穴波函数	wave function of hole	
ω	角频率	angle frequency	s^{-1}
ω_{n}	电子 ω 系数	electron omega coefficient	
ω_{p}	空穴 ω 系数	hole omega coefficient	
ω_{p}	声子角频率	angle frequency of phonon	s^{-1}
A	A 系数	alpha coefficient	cm^2/kg
Δ	费米能级下移	Fermi energy level downshifting	eV
Φ	功函数	work function	eV
Φ_{e}	电解质功函数	work function of the electrolyte	eV
Φ_{m}	金属功函数	work function of metal	eV
Φ_{n}	n 型半导体功函数	work function of n-type semiconductor	eV
Φ_{p}	p 型半导体功函数	work function of p-type semiconductor	eV
Φ_{ref}	参考功函数	work function of the reference	eV