

晶硅衬底参数对太阳能电池输出特性的影响

李幼真, 陈勇民

(中南大学 物理科学与技术学院, 长沙 410083)

摘要: 利用晶硅电池模拟软件 PC1D 研究晶硅衬底的厚度、少子寿命及掺杂浓度对电池输出特性的影响规律。结果表明: 晶硅衬底的厚度对电池输出特性的影响与其少子的扩散长度有关, 衬底厚度的减小有利于其开路电压的提高, 存在一最佳厚度值使其转换效率、短路电流及填充因子最高; 当少子的扩散长度远大于衬底厚度时, 电池的输出特性几乎与衬底厚度无关; 当衬底少子扩散长度与衬底厚度的比值为 2.5~3.0 时, 电池的转换效率最高; 晶硅衬底的掺杂浓度在 $5 \times 10^{15} \sim 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 之间, 即电阻率在 0.2~3.0 $\Omega \cdot \text{cm}$ 范围内时, 晶硅电池能获得良好的输出特性。

关键词: 晶硅电池; 衬底参数; 转换效率; 输出特性

中图分类号: TM 914.4

文献标志码: A

Influence of crystalline silicon substrate parameters on solar cell output properties

LI You-zhen, CHEN Yong-min

(School of Physics Science and Technology, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The effects of crystalline silicon substrate properties as thickness, minority carrier lifetime and doping density on the solar cell output properties were simulated by PC1D. The results show that the influence of substrate thickness on the output properties is related with the minority carrier diffusion length, the reduce of the thickness can increase the open circuit voltage, there exists a good thickness value that can get better conversion efficiency, short circuit current density and fill factor; when the minority carrier diffusion length is far larger than the substrate thickness, the properties of solar cell almost have no business with the substrate thickness; when the ratio of substrate minority carrier diffusion length to the thickness is 2.5~3.0, the solar cell has the highest conversion efficiency; when the doping density is between $5 \times 10^{15} \sim 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, that is the resistivity is varied between 0.2~3.0 $\Omega \cdot \text{cm}$, the solar cell can get better output properties.

Key words: crystalline silicon solar cell; substrate parameters; conversion efficiency; output properties

随着经济和社会的不断发展, 世界范围内的能源紧张状况不断加剧。光伏电池清洁、无污染、取之不尽, 近年来得到飞速发展^[1]。由于晶硅电池转换效率高, 技术成熟, 目前仍然是市场主体, 对晶硅材料的需求不断增长。对晶硅电池来说, 硅材料的厚度、掺杂情况等参数对其输出特性有很大影响, 而在光伏电池生产过程中, 为了降低成本, 提高光伏转换效率,

需要逐步降低晶硅材料的厚度, 同时提升优化晶硅材料的特征参量^[2-3]; 另一方面, 晶硅材料的质量随着供应商和供应批次的不同而有较大差异, 这会对电池生产质量的控制带来麻烦。目前, 国内大多数企业采用流片的方法来针对不同质量的晶硅衬底修正其生产工艺参数, 这样既浪费硅材料又降低生产效率, 采用软件来探索晶硅衬底的特征参量与晶硅电池输出特性间

基金项目: 湖南省科技计划资助项目(2010JT4038)

收稿日期: 2011-07-26; 修订日期: 2012-02-26

通信作者: 李幼真, 讲师, 博士; 电话: 0731-88836313; E-mail: liyouzhen@csu.edu.cn

的内在联系, 以此为基础来优化生产工艺参数, 并最终实现生产工艺参数的自动化调整有重要的意义。国外学者对衬底质量对电池电学输出特性的影响进行了较多的研究, ROSTRON^[4]得到了与实验数据吻合很好的电池短路电流与少子扩散长度的关系表达式; LOFERSKI^[5]根据 PN 结理论模拟后认为禁带宽度为 1.2~1.6 eV 的半导体材料最有利于提高电池光电转换效率。发达国家正逐步将晶硅电池生产转移至发展中国家, 加强这方面的研究既是迫切需要, 又具有深远的现实意义。本文作者采用 PC1D 软件模拟了晶硅衬底基本参数对电池输出特性的影响, 为实际生产工艺的优化提供理论依据^[6]。

1 模型及软件

研究采用工业生产中常见的 n+pp+ 电池结构, 如图 1 所示。模拟太阳光(AM1.5G) 从电池右侧射入, 依次经过 n+层、p 层和 p+层, 其中 n+层和 p+层外侧分别为电池的正电极和背电极。PC1D 软件是研究晶硅电池物理特性的重要软件, 但国内对其研究和应用不多, 其仿真模型是在稳态条件下结合电池的边界条件, 以求解泊松方程、电流密度方程和连续性方程为基础得到的, 同时考虑光吸收系数, 载流子输运特性等因素, 通过求解由 3 个完全耦合的非线性基本方程组成的方程组, 得到少数载流子在一维空间中的输运过程, 进而得到太阳电池的输出特性, PC1D 软件介绍及其物理模型可参阅文献[6-7]。

模拟时设定光源能量密度为 0.1 W/cm², 工作温度为 27 °C, 电池面积为 10 cm², 其表面的织构高度为 0.2 μm, 前表面反射为 10%, 电池内部背表面的反射为朗伯散射, 各层材料的其他仿真参数见表 1, 其余参数均采用软件中的默认值。本文作者主要模拟了晶

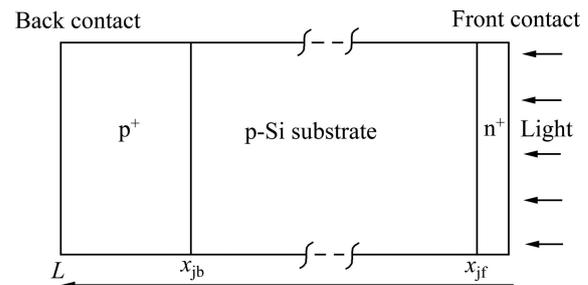


图 1 晶硅电池结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of crystalline silicon solar cell structure

硅衬底的性质如厚度、少子寿命及掺杂浓度对电池输出特性的影响。

n+pp+ 结构为重掺杂电池, 重掺杂会使半导体材料的禁带变窄, 从而影响器件性能, 但其影响的本质原因还不清楚, 对其影响规律的认识也不统一, 本文作者采用根据实验数据所得到的经验模型, 考虑了重掺杂对材料的本征载流子浓度、价带和导带宽度的影响, 其影响关系参见相关文献[8-9], 进而考虑了重掺杂对器件性能的影响。

2 仿真结果与分析

2.1 晶硅厚度对其输出性能的影响

晶硅衬底厚度的减小将降低光生载流子的数目, 从而降低转换效率; 而同时光生载流子在被 PN 结收集前的输运距离变短^[10-11], 这将有利于光生载流子的收集, 使转换效率提高。因此, 在研究晶硅衬底厚度对电池输出特性影响时, 还要同时考虑光生载流子的扩散长度对其性能的影响。在此, 考虑了如下两种情况: 1) 少子扩散长度远大于晶硅衬底厚度; 2) 少子

表 1 晶硅电池输出特性基本仿真参数

Table 1 Some parameters values and models adopted in simulations

Material	Band gap/ eV	Electron affinity, χ /eV	Relative dielectric permittivity	Doping profile	Trap level/ eV	Shallow accepter density, N_d /cm ⁻³	Minority carrier lifetime/ μ s	Layer thickness / μ m
Emitter junction (n ⁺ -Si layer)	1.12	4.5	11.9	Gaussian	$E_i+0.514$	0	20	0.5
Substrate (p-Si layer)	1.12	4.5	11.9	Uniform	E_i	1.0×10^{14} – 1.0×10^{18}	5–50	10–400
Al-BSF (p ⁺ -Si layer)	1.12	4.5	11.9	Uniform	$E_i-0.503$	2.0×10^{18}	20	10

扩散长度与晶硅衬底厚度相当。图 2 所示为 p 型硅衬底厚度在 10~400 μm 之间变化时电池输出特性的变化曲线, p 型硅衬底的掺杂浓度 N_B 为 $9.14 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 电阻率约为 $1.6 \Omega \cdot \text{cm}$, 其中少子扩散长度 L_{base} 分别设为 5 mm 和 210 μm 。

由图 2(a)可知, 少子扩散长度为 5 mm 时, 其转换效率随衬底厚度增大而缓慢提高, 扩散长度为 210 μm 时, 转换效率则随之缓慢降低; 图 2(b)表明, 当少子的扩散长度较大时, 电池的开路电压几乎与电池衬底厚度无关, 扩散长度较小时, 则由于随着衬底厚度的增加, 相当于少子寿命降低, 从而引起反向饱和电流的增大, 导致电池的开路电压降低; 由图 2(c)可知, 当少子扩散长度远大于衬底厚度时, 由于长波被吸收而产生的光生载流子也被 PN 结收集, 所以表现为电池的短路电流随衬底厚度的增加而呈上升趋势, 少子扩散长度较小时则呈下降趋势; 研究证明, 串、并联电阻和日照强度对填充因子的影响很大^[12], 模拟时的

日照强度为标准强度, 因此不用考虑其影响, 串联电阻越小, 并联电阻越大, 填充因子就越大, 而图 2(d)中填充因子总体上是呈下降趋势, 这与电池的体电阻增大有关, 当衬底厚度小于一定值后, 由于不能有效地吸收入射光, 导致填充因子急剧下降。

2.2 少子寿命对输出特性的影响

少子寿命与光生载流子的复合率直接相关。图 3 所示为 p 型晶硅衬底厚度分别为 20、200 和 400 μm 时少子寿命对晶硅电池输出特性的影响规律, 仿真时衬底的掺杂浓度设为 $9.14 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。从图 3 可知, 衬底厚度为 20 μm 的晶硅电池的输出特性最稳定。这是由于此时的少子扩散长度远大于衬底厚度, 此时少子短路电流仅跟电池的厚度相关。电池的光电转换效率随少子寿命的变化从根本上取决于电池的短路电流和反向饱和电流随少子寿命的变化, 当少子的扩散长度远大于衬底厚度时, 电池的转化效率随少子寿命的

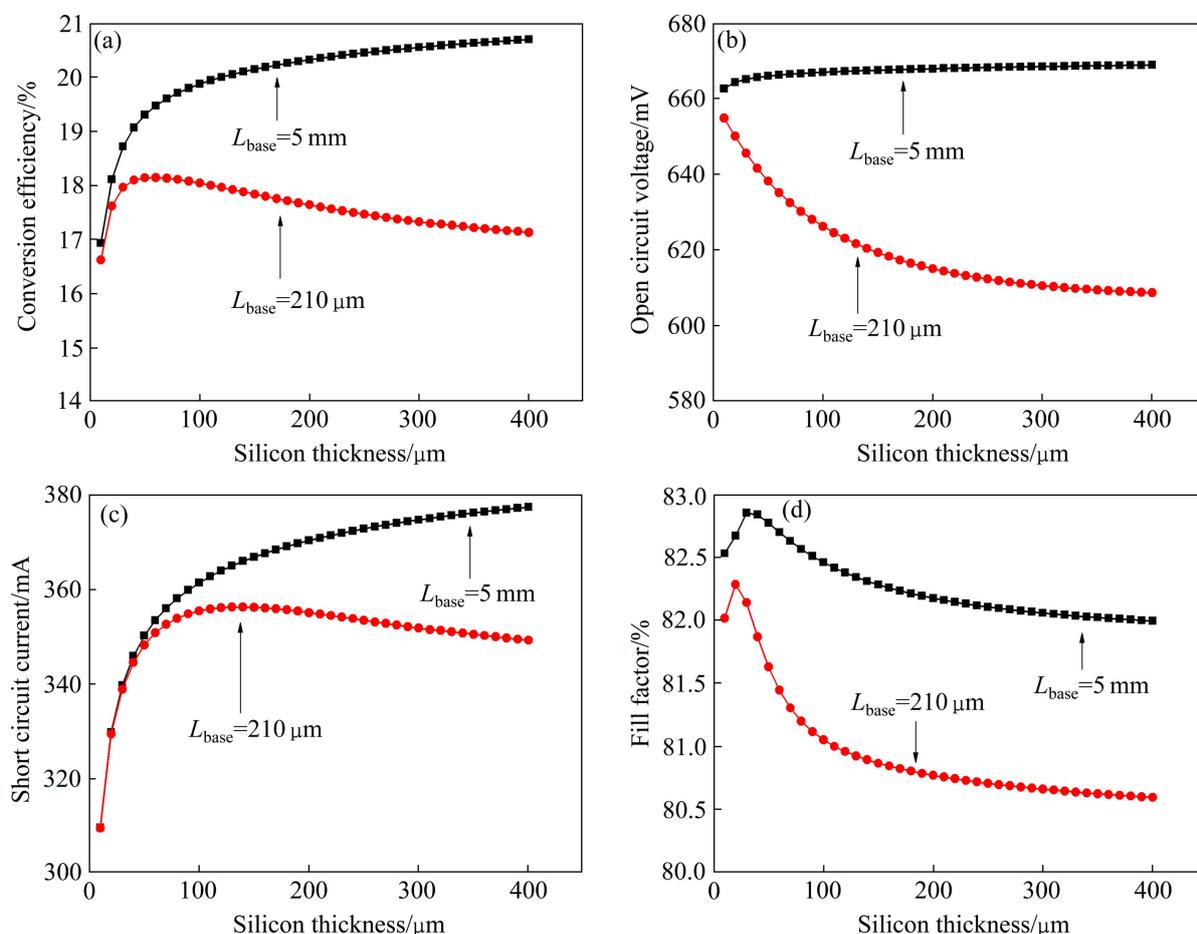


图 2 不同扩散长度时衬底厚度对晶硅电池输出特性的影响

Fig. 2 Effects of various substrate thickness on solar cell properties with different diffusion lengths: (a) Conversion efficiency; (b) Open circuit voltage; (c) Short circuit current; (d) Fill factor

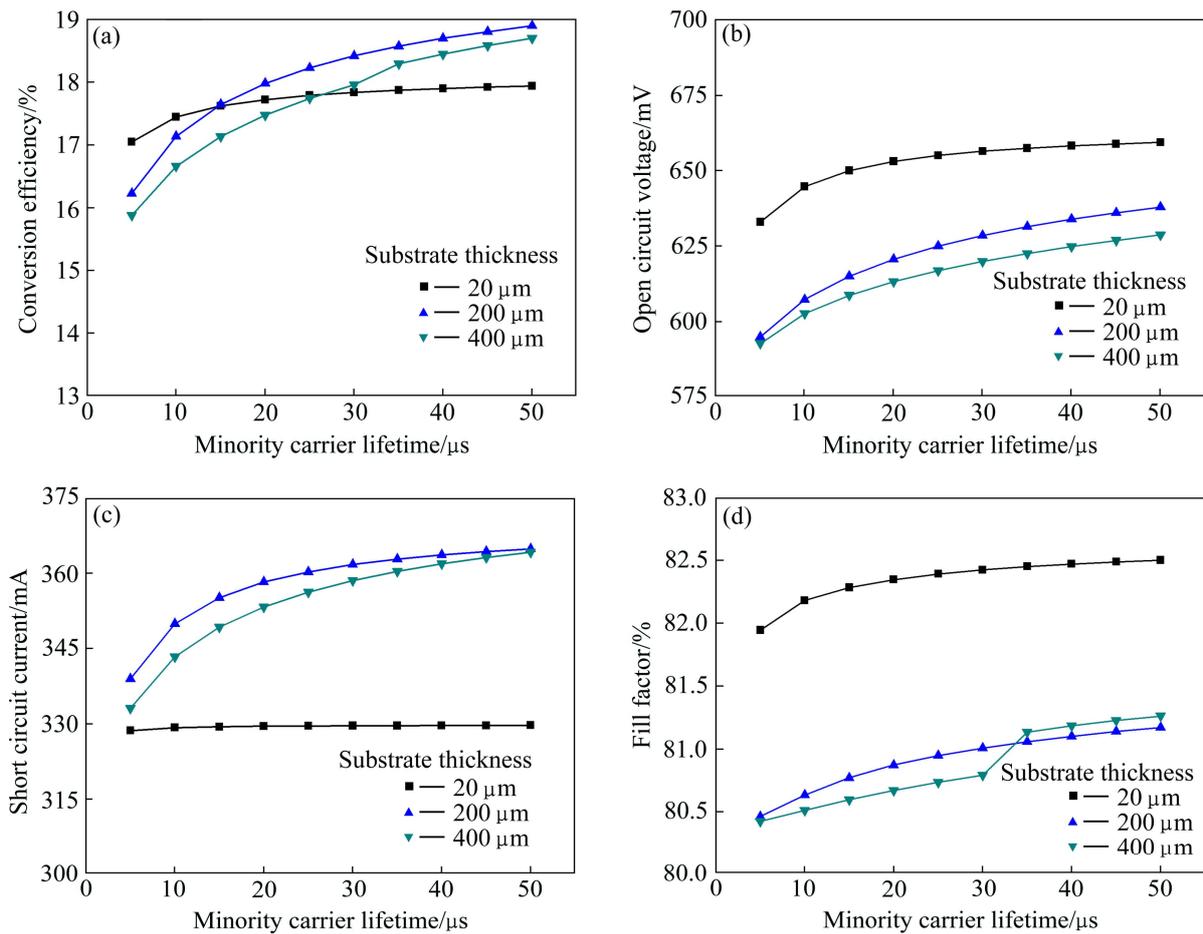


图3 不同衬底厚度时衬底的少数寿命对电池输出特性的影响

Fig. 3 Influence of substrate minority carrier lifetime on solar cell's properties with different substrate thicknesses: (a) Conversion efficiency; (b) Open circuit voltage; (c) Short circuit current; (d) Fill factor

变化很小,而当衬底厚度较大时,输出特性随少数寿命的增大开始时快速增大,而后缓慢增加,因此在衬底厚度一定时,提高少数寿命可提高电池的输出性能。

为进一步研究衬底中少数寿命与衬底厚度对电池性能的综合影响,进一步研究了衬底少数扩散长度与衬底厚度的比值对晶硅电池输出特性的影响规律(见图4)。

由图4(a)可知,当少数扩散长度在120~380 μm 范围内变化,衬底的少数扩散长度与其厚度的比值为3左右时,电池的转换效率最高;图4(b)表明电池的开路电压随电池厚度减少而升高;从图4(c)可知,当衬底的少数扩散长度与其厚度的比值为2左右时,电池的短路电流最大;而图4(d)显示电池的填充因子总体上随电池的厚度呈下降趋势。

2.3 掺杂浓度对晶硅电池输出特性的影响

图5所示为当晶硅衬底的厚度为180 μm 、少数体

寿命分别为20和50 μs 时,衬底掺杂浓度对电池输出特性的影响规律,仿真过程中始终保持发射结的结深不变,以便比较衬底掺杂浓度对电池输出特性的影响。

由图5(a)和(b)可见,电池的转换效率和开路电压均随掺杂浓度的增加而升高,在掺杂浓度达到 10^{17}cm^{-3} 左右时,转换效率达到峰值,继续提高掺杂浓度,转换效率开始降低,开路电压也趋于稳定。

由图5(c)可知,电池的短路电流随掺杂浓度的增大而减小,这一方面是由于掺杂浓度的提高将使少数寿命和电阻率降低,另一方面又使耗尽区变窄,这都将导致电池的反向饱和电流增大^[11],从而使短路电流降低;而图5(d)则表明电池的填充因子则总体上随着掺杂浓度的提高呈上升趋势,这是由于掺杂浓度的提高降低了电池的串联电阻。综合来看,衬底的掺杂浓度在 $5 \times 10^{15} \sim 1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 之间时,亦即在电阻率为0.2~3.0 $\Omega\cdot\text{cm}$ 之间的晶硅衬底上制备的电池具有较好

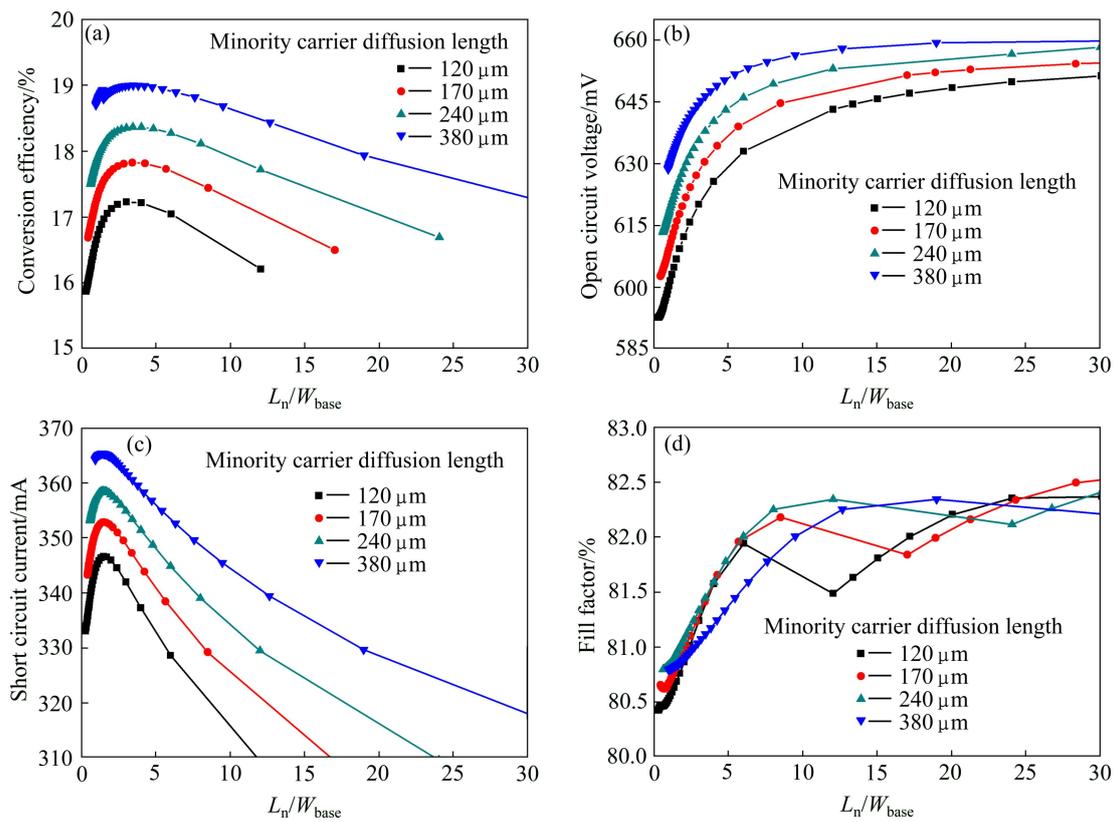


图 4 衬底少子扩散长度与衬底厚度的比值对电池输出特性的影响

Fig. 4 Effect of ratio of minority carrier diffusion length to substrate thickness on solar cell's properties: (a) Conversion efficiency; (b) Open circuit voltage; (c) Short circuit current; (d) Fill factor

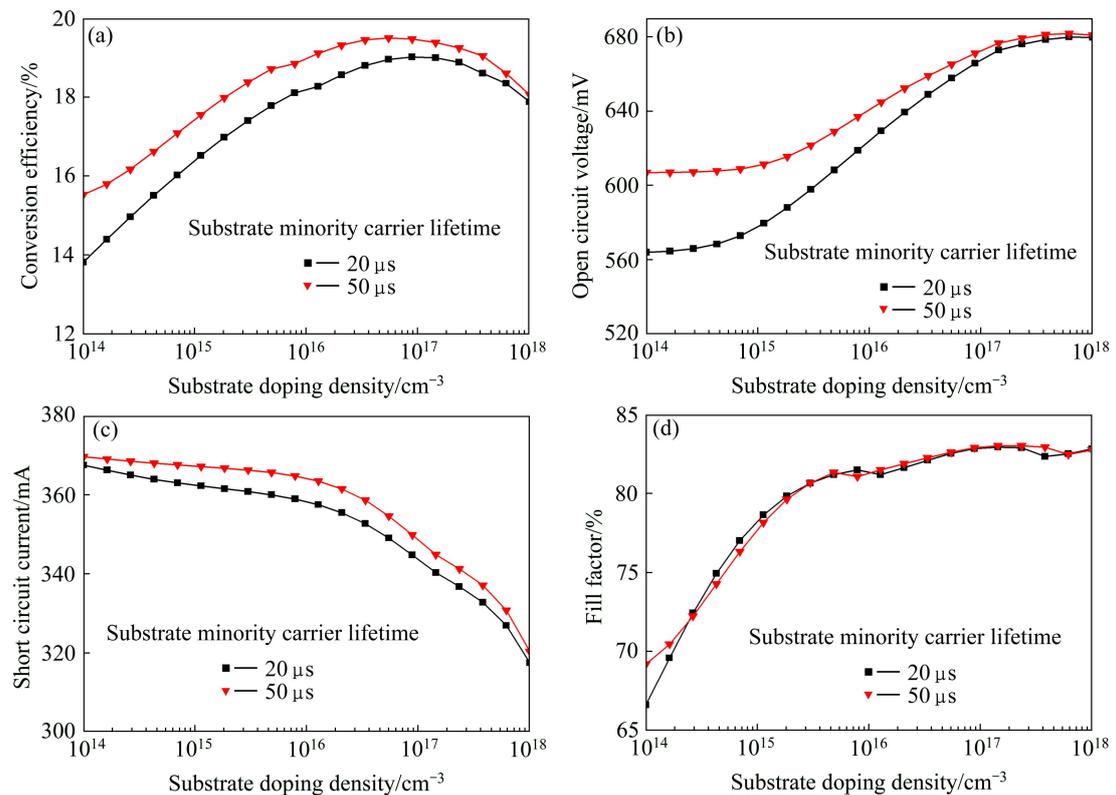


图 5 不同少子寿命时衬底掺杂浓度对单晶硅太阳能电池输出特性的影响

Fig. 5 Effect of substrate doping density on solar cell's properties with different minority carrier lifetimes: (a) Conversion efficiency; (b) Open circuit voltage; (c) Short circuit current; (d) Fill factor

的输出性能。

3 结论

1) 晶硅衬底的厚度对电池输出特性的影响与其少子的扩散长度有关。减小衬底厚度可提高其开路电压,而对于转换效率、短路电流和填充因子来说,则均有一最佳的衬底厚度值使之达到最高;当少子的扩散长度远大于衬底厚度时,电池的输出特性与衬底厚度几乎无关。

2) 电池的输出性能随衬底少子寿命的提高而相应提高。当少子寿命增大到其扩散长度与衬底厚度相当时,最佳的衬底厚度由少子寿命决定;当少子扩散长度与衬底厚度的比值为 2.5~3.0 时,电池的转换效率最高;当比值为 2.0~2.5 时,电池的短路电流最高。

3) 当晶硅衬底掺杂浓度小于 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时,电池的短路电流随掺杂浓度的提高而下降,而其他输出特性均随掺杂浓度的增大而提高,当掺杂浓度在 $5 \times 10^{15} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 之间,即电阻率在 $0.2 \sim 3.0 \ \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内变化时,晶硅电池可获得良好的输出特性。

REFERENCES

- [1] 赵玉文, 王斯成, 王文静, 励旭东, 刘祖明, 邱第明, 宋 爽. 中国光伏产业发展研究报告(2006—2007)[R]. 北京: 国家发展与改革委员会/全球环境基金/世界银行, 2008: 16—22.
ZHAO Yu-wen, WANG Si-cheng, WANG Wen-jing, LI Xu-dong, LIU Zu-ming, QIU Di-ming, SONG Shuang. 2006—2007 China PV industry development report[R]. Beijing: NDRC/GEF/WB, 2008: 16—22.
- [2] 廖 华, 林理彬, 刘祖明, 陈庭金. 多晶硅薄膜太阳能电池厚度和晶粒尺寸对其性能的影响[J]. 太阳能学报, 2003, 24(2): 264—268.
LIAO Hua, LIN Li-bin, LIU Zu-ming, CHEN Ting-jin. Polycrystalline silicon thin film solar cells[J]. Journal of Solar Energy, 2003, 24(2): 264—268.
- [3] 王长贵, 王斯成. 太阳能光伏发电实用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 35—40.
WANG Chang-gui, WANG Si-cheng. Solar photovoltaic power

- generation technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 35—40.
- [4] ROSTRON R W. Short circuit current in silicon solar cells-dependence on cell parameters[J]. IEEE Transaction on Electron Device, 1972, 19(9): 1024—1028.
- [5] LOFFERSKI J J. Theoretical considerations governing the choice of the optimum semiconductor for photovoltaic solar energy conversion[J]. Journal of Applied Physics, 1956, 27(7): 777—784.
- [6] 王景霄, 杜永超, 刘春明. 太阳能电池模拟软件—PC1D[C]//中国太阳能学会学术年会论文集. 上海: 上海交通大学出版社, 2003: 41—43.
WANG Jing-xiao, DU Yong-chao, LIU Chun-ming. The simulation software for solar cells—PC1D[C]//The academic annual meeting proceedings of China Solar Association. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2003: 41—43.
- [7] CLUGSTON D A, BASORE P A. PC1D version 5: 32-bit solar cell modeling on personal computers[C]//Proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Anaheim, California, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1997: 207—210.
- [8] BASORE P A, CLUGSTON D A. User manual for PC1D version 5.9[R]. Sydney, Australia: University of New South Wales, 2003: 18—24.
- [9] KLAASSEN D B M, SLOTOBOOM J W, DEGRAAFF H C. Unified apparent bandgap narrow in n-and p-type Si[J]. Solid State Electronics, 1992, 35(2): 125—129.
- [10] MCINTOSH K R, CUDZINOVIC M J, SMITH D D. The choice of silicon wafer for the production of low-cost rear contact solar cells[C]//Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Osaka, Japan: Concentration Banking Information Inc., 2003(2): 971—974.
- [11] ZHOU J C, CHEN Y M, LI L, LI F, ZHAO B X. A study on the key factors affecting the electronic properties of monocrystalline silicon solar cells[J]. Optoelectronics Letters, 2009, 5(6): 422—426.
- [12] 周继承, 李 斐, 陈勇民. 铝背场对单晶硅太阳能电池输出特性的影响[J]. 半导体光电, 2009, 19(7): 1278—1283.
ZHOU Ji-cheng, LI Fei, CHEN Yong-min. Influence of Al-BSF on electrical properties of monocrystalline silicon solar cells[J]. Semi-Conductor Optoelectronics, 2009, 19(7): 1278—1283.

(编辑 龙怀中)