光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.01.010

几何设计对球硅太阳电池性能影响的有限元仿真

张家辉[1,2]，刘文柱[1]，吴卓鹏[1]，时　强[1]，刘正新[1,2,3]*

（1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 新能源中心，上海 201800；
2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 中国科学院大学 材料与光电研究中心，北京 100049）

摘　要： 基于 COMSOL 软件的光学模块和半导体模块，从球缺比例、直径、正电极接触面积三个几何设计方面对球硅电池进行了仿真分析；通过对比反向饱和电流密度和理想因子，发现球硅半径越小、球缺比例越小、正电极相对接触面积越大，电池的电学特性越好；分析了不同直径球硅电池的几何特征与其光电参数之间的关联性，发现其与传统平面硅太阳电池存在显著差异。研究结果可为制作高效率低成本柔性球硅太阳电池提供理论指导。

关键词： 球硅太阳电池；几何设计；二极管模型；能量转换效率；COMSOL

中图分类号： TM914　**文章编号：** 1001－5868(2021)01－0057－04

Finite Element Analysis on The Influence of Geometric Design of Spherical Silicon Solar Cells

ZHANG Jiahui[1,2], LIU Wenzhu[1], WU Zhuopeng[1], SHI Qiang[1], LIU Zhengxin[1,2,3]

(1. New Energy Center, Shanghai Institute of Microsystems and Information Technology of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, CHN; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN; 3. Research Center for Materials and Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: Based on the optical and semiconductor modules of COMSOL software, the geometric design of spherical silicon solar cell was simulated from the three parts of diameter, spherical defects and anode area. By comparing the reverse saturation current density and the ideal factor, it is found that the smaller the radius of the spherical silicon, the smaller ball defect ratio, the larger the relative contact area of the positive electrode, and the better the electrical properties. The correlation between the geometrical characteristics and photoelectric parameters of the spherical silicon solar cells with different diameters was analyzed, and it was found that there were significant differences between the cells and the conventional planar silicon solar cells.

Key words: spherical silicon solar cell; geometric design; diode model; energy conversion efficiency; COMSOL

0　引言

球硅电池的概念最早由 Prince 等在 1959 年提出[1]，之后 Takashi 等设计出了多倍聚光反射装置球硅电池[2]，大幅度提升了球硅电池的光电效率，使其性能与传统平面晶硅电池相当，且硅用料更少，成本更低，入射角度响应更好。

近年来包括制绒陷光[3]、减反层[4]、聚光倍数[5]、光吸收特性[6]等方面的理论模拟和实验研究较多，但有关球硅尺寸对电池性能影响的研究很少。根据 Mckee 等的研究[7]，球硅电池的效率会随其直径增大而迅速降低，但同时制作工艺难度也会下降。选择合适的尺寸对于平衡球硅工艺难度和性能意义重大，合理尺寸的球硅电池既要满足轻质和柔性的需求，又要实现高效和稳定的光电性能。

本文利用 COMSOL 软件对相同直径不同球缺比例、相同球缺比例不同直径和不同正电极接触面

收稿日期：2020－07－01.
基金项目：装备预研重点实验室基金项目(6142804010203).
* **通信作者：**刘正新　**E-mail：** z. x. liu@mail. sim. ac. cn

积的球硅电池进行暗态仿真。根据实际球硅尺寸的设计需要，综合分析和优化球硅电池球缺比例、直径和正电极接触面积三者之间的关系。对比分析了不同直径球硅电池的光谱响应、短路电流密度、开路电压、填充因子、能量转换效率等参量，以为设计高效低成本的柔性球硅太阳电池提供有效的理论指导。

1 球硅太阳电池模拟

基于 COMSOL 模拟软件的光学模块和半导体模块，设置球硅电池为 p 型单晶硅衬底，突变结，无 TCO 层和金字塔结构以及表面钝化处理，电极接触为理想欧姆接触。反射装置为 6 倍聚光全反射[2]，实际球硅电池组件为便于组件集成的六角形反射装置，如图 1 所示。

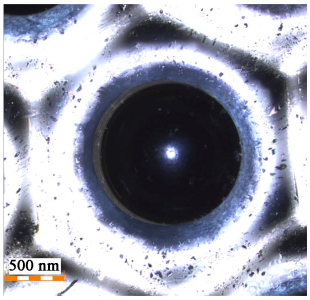


图 1 激光显微镜扫描球硅电池俯视图

1.1 暗态 *I-V* 仿真

在球硅电池模型上加 0～1.0 V 正向偏置电压，对其进行暗态 *I-V* 特性仿真。二极管模型公式为

$$J = J_0[\exp(AV) - 1] \tag{1}$$

式中，J 为电流密度，$A = q/nkT$，q 为电荷量，k 为玻尔兹曼常数，T 为绝对温度，V 为偏置电压；拟合得出相应理想因子 n 和反向饱和电流密度 J_0。

1.1.1 相同直径不同球缺比例

在对球硅电池做计算时，大多数研究结论都基于忽略球硅底部的切削面积，这是一种理想化的情况。与平面电池相比，在相同投影面积下，球硅底部的切削会导致实际受光面积减少。利用直径为 200 μm 球硅电池模型，通过切削底部得到不同球缺比例的电池模型，球缺示意图如图 2 所示。

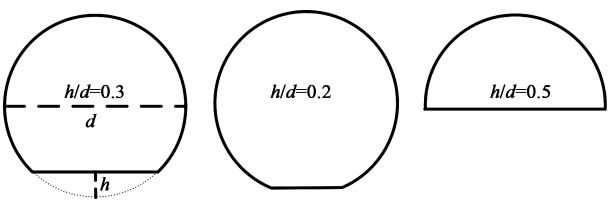


图 2 相同直径不同球缺比较图

图 2 中，h 为球硅被切削的高度，d 为球体直径，定义球缺比 $\rho_{h/d} = h/d$。

1.1.2 相同球缺不同直径

设定四组相同球缺不同直径的球硅电池模型。直径分别为 50，100，200 和 250 μm，球缺比 $\rho_{h/d} = 0.2$。球硅电池模型示意图如图 3 所示。

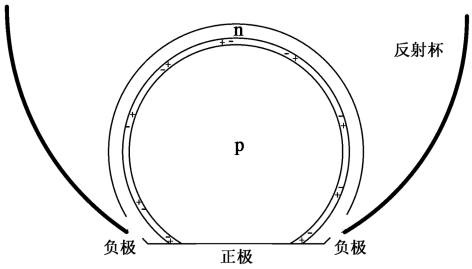
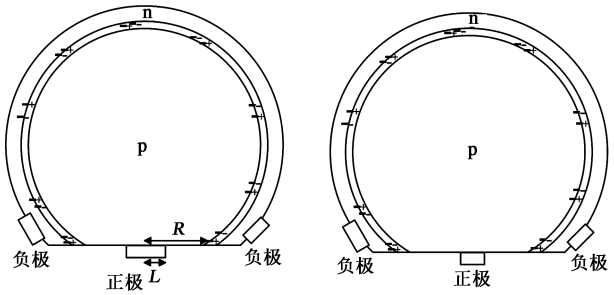


图 3 球硅电池模型示意图

1.1.3 不同正电极接触面积

利用直径为 200 μm，$\rho_{h/d} = 0.2$ 的球硅电池建模，只改变正电极接触面积。电极加正向偏压，对比暗态拟合数据，分析不同正电极接触面积对载流子输运的影响，模型如图 4 所示。其中 L 为与截面 p 型层同心圆的银电极半径，R 为截面 p 型层圆的半径。此处定义 $\rho_{L/R} = L/R$，表示正电极接触面积占比。



(a) $L/R = \frac{1}{3}$ (b) $L/R = \frac{1}{6}$

图 4 直径 200 μm 球硅电池不同正电极接触面积示意图

1.2 光电特性仿真

采用 AM1.5 标准太阳光光源，步长 50 nm，光学模块与半导体模块耦合场，获得不同直径球硅电池的绝对光谱响应数据。对绝对光谱响应积分计算，得到相应尺寸的短路电流密度 J_{sc}。结合暗态拟合数据所得 J_0，通过公式[8]

$$V_{oc} = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{J_{sc}}{J_0} + 1\right) \tag{2}$$

计算得到不同直径球硅电池的开路电压 V_{oc}。

不考虑寄生电阻损失，$U_{oc} = \frac{qV_{oc}}{nkT}$，在 $U_{oc} > 10$

时，可利用以下公式计算填充因子 F_F：

$$F_F=\frac{U_{oc}-\ln(0.72+U_{oc})}{1+U_{oc}} \tag{3}$$

利用式(4)计算电池的能量转化效率：

$$\eta=\frac{J_{sc}V_{oc}F_F}{P_{in}}\times 100\% \tag{4}$$

式中，η 为能量转换效率，P_{in} 为辐照功率。

2　数据分析与讨论

2.1　暗态数值分析

利用二极管模型，分别对 $\rho_{h/d}=0.2$、不同球硅直径，球硅直径为 200 μm、不同 $\rho_{h/d}$，以及不同正电极接触面积的球硅电池的暗态特性进行仿真，得到其理想因子 n 和反向饱和电流密度 J_0，结果如表 1，2，3 所示。

表 1　直径 200 μm、不同 $\rho_{h/d}$ 电池的 n 和 J_0

$\rho_{h/d}$	n	$J_0/(A\cdot cm^{-2})$
0.2	1.45	4.72×10^{-10}
0.3	1.47	1.02×10^{-9}
0.4	1.5	1.79×10^{-9}
0.5	1.52	2.80×10^{-9}

表 2　$\rho_{h/d}=0.2$、不同直径电池的 n 和 J_0

d/μm	n	$J_0/(A\cdot cm^{-2})$
50	1.21	5.26×10^{-12}
100	1.33	6.69×10^{-11}
200	1.39	1.29×10^{-10}
250	1.43	2.49×10^{-10}

表 3　直径 200 μm、不同 $\rho_{L/R}$ 电池的 n 和 J_0

$\rho_{L/R}$	n	$J_0/(A\cdot cm^{-2})$
1/3	1.40	2.07×10^{-10}
1/5	1.45	4.72×10^{-10}
1/6	1.58	3.38×10^{-9}
1/9	1.7	2.80×10^{-8}

由表 1 可知，$\rho_{h/d}$ 比值越大，理想因子 n 越大，反向饱和电流密度 J_0 也越大，复合电流相比扩散电流比值越大。分析认为复合电流增加，是由于正负电极之间的距离增大引起的载流子复合增多所致。

由表 2 可见，随着球硅直径的增加，理想因子 n 与反向饱和电流密度 J_0 均呈增大趋势。由此可认为球硅直径增大可能是导致电池载流子输运以及 p-n 结工作性能变差的因素之一，具体将在 2.2 节中结合 J_{sc} 和 V_{oc} 的数值模拟展开进一步分析。

由于实际工艺中 n 型层会喷涂 TCO 材料，这增加了实际收集载流子的能力，而负电极需要与实际反射杯尺寸配合。实际 p 型层正电极接触面积只占截面面积的一定比例。p 型层正电极接触面积的相对比例会影响载流子收集能力。

由表 3 可见，随着 $\rho_{L/R}$ 的减小，理想因子 n 和反向饱和电流 J_0 逐渐增大，这符合设想的暗特性趋势。如果半径不变，p 型层正电极的接触面积增大，相当于在球形结构中缩短了载流子被收集的距离，使得复合电流降低。在实际球硅电池中，面积较大的正电极也会增加光的背反射次数，降低透射率。但是面积较大的正电极会使正负电极距离缩短，有短路的风险，而且增加工艺难度。

2.2　光电数值分析

图 5 所示是不同直径球硅电池的 V_{oc} 和 J_{sc} 变化曲线图。可见随着电池直径 d 的增大，短路电流密度 J_{sc} 与开路电压 V_{oc} 的数值都呈下降的趋势。

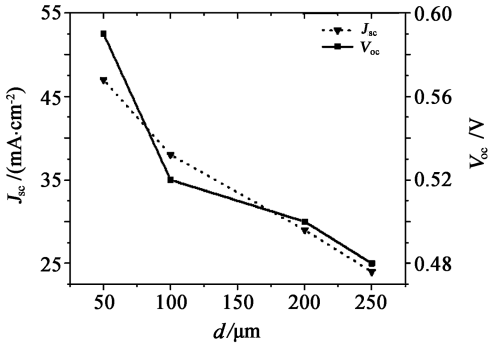


图 5　不同直径球硅电池的 J_{sc} 和 V_{oc} 变化曲线图

根据 Sai 等[9]关于 SHJ 电池厚度对电池性能影响的分析可知，随着电池厚度的增加，J_{sc} 增大，V_{oc} 减少，这符合硅基电池的光吸收规律和载流子复合机制[8]。结合图 5 球硅电池的 J_{sc} 和 V_{oc} 变化趋势发现，随着电池直径的增大，V_{oc} 符合平面电池因厚度增加的变化趋势。但 J_{sc} 随直径增大而降低不符合厚度对于电池的影响趋势，由此可见不应将球硅直径与平面厚度简单地等而视之。

对于 J_{sc} 随直径增大而减少的原因，可通过对比绝对光谱响应和分析光谱吸收情况来解释。图 6 所示为模拟得到的不同直径球硅电池的绝对光谱响应趋势。

由图 6 可知，随着直径的增加，球硅电池对于长波频谱的吸收增加，由于长波光子的穿透能力强，p 层的厚度对于长波的吸收影响更大。这符合厚度增加对于长波段光谱吸收的一般规律；但其余的光谱频段，尤其是直径超过 200 μm 后，在 500～1 000 nm

波段光吸收下降严重，这是 J_{sc} 随直径增大反而减小的重要原因之一。由于反射杯的设定一致，聚光放大倍数不随直径变化，考虑主要是由球硅自身的球形结构造成。由光生载流子收集几率公式[8]：

$$f_c = \exp\left(\frac{-x}{L_e}\right) \tag{5}$$

式中，f_c 为载流子被收集几率，x 为载流子产生的相对位置，L_e 为扩散长度。

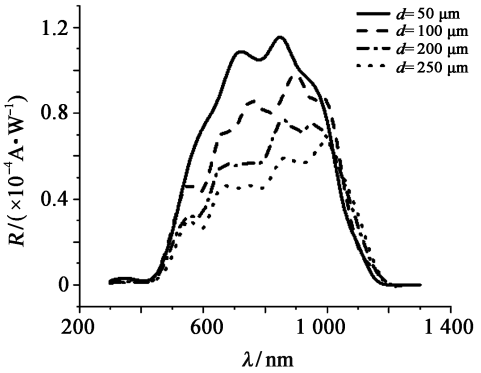


图 6 不同直径球硅电池的绝对光谱响应

该模型是单晶硅模型，迁移率与少子寿命为定值，扩散长度在球体内为定值；结合式(5)，收集几率只与载流子产生位置有关，在此球形结构中，随着球硅直径的增大，整体的 p-n 结与电极的距离增大，载流子输运距离增加。由式(5)可知，不同位置产生的载流子被收集的几率不同，也即对短路电流的贡献大小不同。可推断越是靠近电极处的 p-n 结，所产生的载流子对短路电流的贡献越大。球硅电池的这种正负电极的特殊构造，决定了相对穿透性差的波段激发的载流子被收集的几率比穿透性强的波段要低，也即波长越长载流子产生的位置对 p-n 结位置的依赖越小。长波段光谱响应如图 7 所示。

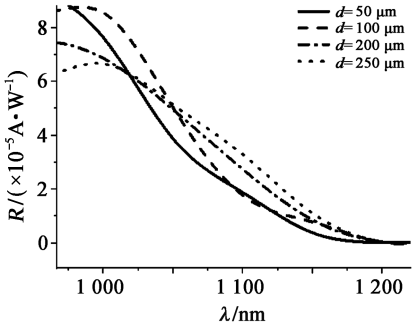


图 7 不同直径球硅电池的局部绝对光谱响应对比

直径 100 μm 对比直径 50 μm 长波吸收增加的波段在 980～1 200 nm，而直径 200 μm 对比直径 100 μm 增益的波段降低为 1 050～1 200 nm，具有明显红移趋势。更长的波段激发出的载流子被收集受到了大尺寸造成的影响。

表 4 为不同直径电池的填充因子和能量转换效率。由表可知，随着直径的增大，电池的填充因子和效率都呈下降趋势(由于设定无 TCO 层，随着直径的增大加剧了这一趋势)。

表 4 不同直径电池的 F_F 和 η

d/μm	F_F	η/%
50	0.80	22.2
100	0.77	17.0
200	0.75	10.9
250	0.74	8.5

这符合 Mckee 等对于球硅电池随着直径增大，效率大幅度降低趋势的表述[7]。在实际球硅晶体生产中尺寸越大其单晶率越低，球形越差，少子寿命越低，这被认为是球硅电池性能变差的主要原因之一。在有限元仿真中，仅将球硅几何尺寸作为唯一变量，发现球硅电池随直径增加效率依然迅速降低，这说明其特殊的几何结构与平面硅太阳电池的影响相比也具有显著不同。

3 结论

本文通过 COMSOL 软件有限元仿真的方法，通过分析不同球缺、直径、正电极接触面积的球硅电池暗态数据，提取理想因子 n 和反向饱和电流密度 J_0，得出随着球硅直径的增加，n 与 J_0 均呈增大趋势；随着球缺 $\rho_{h/d}$ 的增加，n 与 J_0 均呈增大趋势；随着正极电极接触面积的增加，n 与 J_0 均呈增大趋势。

对于不同直径的球硅电池，随着电池直径的增大，J_{sc} 和 V_{oc} 均降低。对于 J_{sc} 的变化趋势，从光谱响应的角度进行分析解释，证明主要是由球硅电池的球形结构使得不同位置 p-n 结对载流子收集几率不同造成的。随直径增大 F_F 和 η 均降低，这符合球硅电池随着直径增大，效率大幅度降低的趋势。

综上，设计球硅电池时，相对较小的球硅单体性能优越，且更满足球硅电池柔性质轻的需求；球缺小，正电极相对接触面积越大对电池性能提高越有利。应考虑这三方面存在的制约关系以及工艺水平，以便在实际电池制作中找到最优性能方案。

(下转第 115 页)

制研究[D]. 长沙：中南大学，2006.
Zhou Junfeng. Error analysis and precision control of laser detection of high precision thin plate and strip crown[D]. Changsha: Central South University, 2006.
[7] 敖世奇. 基于模态分析的激光板厚测量仪移动框架结构优化研究[D]. 长沙：中南大学，2005.
Ao Shiqi. Study on the structure optimization of laser plate thickness meter moving frame based on modal analysis[D]. Changsha: Central South University, 2005.
[8] Kramer W. Gauge for measuring the thickness of an unsupported web: United State, 5,210,593[P]. 1993-5-11.
[9] 郭　媛，王　娜. 基于CCD的激光非接触式钢板测厚方法研究[J]. 仪表技术与传感器，2014(12)：68-70.
Guo Yuan, Wang Na. Study on laser non-contact thickness measurement method for cold-roll steel sheets based on linear CCD[J]. Instrument Technique and Sensor, 2014(12): 68-70.
[10] 关淑玲，张　材，谭建平. 铝薄板激光测厚数据预处理[J]. 机电一体化，2004，10(5)：21-23.
Guan Shuling, Zhang Cai, Tan Jianping. Data pretreatment of laser thickness measurement on thin aluminum strip [J]. Mechatronics, 2004, 10(5): 21-23.
[11] 关淑玲. 基于小波分析的铝薄板激光测厚系统数据处理研究[D]. 长沙：中南大学，2004.
Guan Shuling. Research on data processing of aluminum sheet thickness measuring system based on wavelet analysis[D]. Changsha: Central South University, 2004.
[12] 吴雪芬，陈　功，朱锡芳. 基于小波和RLS的锂电池激光在线测厚[J]. 通信技术，2012，45(7)：90-93.
Wu Xuefen, Chen Gong, Zhu Xifang. Coating thickness measurement by laser for wavelet and RLS-based lithium battery[J]. Commun. Technol., 2012, 45(7): 90-93.

作者简介：

宋华雄(1997－)，男，硕士生，主要从事锂离子电池检测技术研究；

张　云(1981－)，男，教授，博士生导师，主要从事高分子材料的加工理论与方法、高分子材料加工过程的数值模拟研究及高分子材料智能成形装备的研发。

(上接第 60 页)

参考文献：

[1] Prince M B. Photovoltaic conversion 2. large area solar cells [C]// 14th Annu. Proc. Power Sources Conf., 1960: 26-27.
[2] Minemoto T, Murozono M, Yamaguchi Y, et al. Design strategy and development of spherical silicon solar cell with semi-concentration reflector system [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2006, 90(18/19): 3009-3013.
[3] Hayashi Shota, Minemoto Takashi, Takakura Hideyuki, et al. Influence of texture feature size on spherical silicon solar cells[J]. Rare Metal, 2006, 25(z1): 115-120.
[4] Mizuta T, Ikuta T, Minemoto T, et al. An optimum design of antireflection coating for spherical silicon solar cells[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2006, 90(1): 46-56.
[5] Minemoto T, Ikuta T, Takakura H, et al. Antireflective coating design of spherical silicon solar cell with reflector cup by ray-tracing simulation[J]. Jap. J. of Appl. Phys., 2005, 44(12): 8345-8350.
[6] Shikawa H, Furuno T, Kambe S, et al. Analysis of fundamental light receiving characteristics of spherical solar cells[J]. Electronics and Communications in Japan, 2008, 91(6): 34-46.
[7] Mckee W R. Development of the spherical silicon solar cell [J]. IEEE Trans. on Components Hybrids and Manufacturing Technol., 1983, 5(4): 336-341.
[8] Green M A. Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1981.
[9] Sai H, Oku T, Sato Y, et al. Potential of very thin and high-efficiency silicon heterojunction solar cells[J]. Progress in Photovoltaics Research & Applications, 2019, 27(12): 1-7.

作者简介：

张家辉(1994－)，男，山东省人，硕士研究生，研究方向为球硅太阳电池制作和仿真模拟；

刘正新(1967－)，男，湖北人，博士，研究员，主要从事太阳电池和微能源技术研究和器件开发。