

色散效应对聚光多结太阳能电池性能的影响及优化

李欣 林桂江 刘翰辉 陈松岩 刘冠洲

Effect of chromatic aberration on performance of concentrated multi-junction solar cells and their optimization

Li Xin Lin Gui-Jiang Liu Han-Hui Chen Song-Yan Liu Guan-Zhou

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 148801 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.148801

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.148801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于分布式布拉格反射器结构的空三结砷化镓太阳能电池抗辐照研究

[Anti-radiation of space triple-junction solar cell based on distributed Bragg reflector structure](#)

物理学报.2016, 65(10): 108801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.108801>

直接键合的三结太阳能电池研究

[Research on three-junction bonding solar cell](#)

物理学报.2014, 63(17): 178801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.178801>

空间用 GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As(1 eV) 倒装三结太阳能电池研制

[Investigation of inverted metamorphic GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As \(1 eV\) triple junction solar cells for space applications](#)

物理学报.2013, 62(15): 158802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.158802>

碳纳米管掺杂对聚合物聚(2-甲氧基-5-辛氧基)对苯乙炔-PbSe 量子点复合材料性能的影响

[Effect of carbon nanotubes on the properties of polymer MOPPV-PbSe quantum dot composites](#)

物理学报.2013, 62(12): 128801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.128801>

聚对苯乙炔 MOPPV/ZnSe 量子点复合材料太阳能电池性能研究

[Investigation on characteristics of solar cells made of MOPPV/ZnSe quantum dots composite system](#)

物理学报.2013, 62(7): 078802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.078802>

色散效应对聚光多结太阳能电池性能的影响及优化*

李欣¹⁾ 林桂江²⁾ 刘翰辉¹⁾ 陈松岩^{1)†} 刘冠洲¹⁾²⁾

1)(厦门大学物理与机电工程学院, 厦门 361005)

2)(厦门市三安光电科技有限公司, 厦门 361009)

(2017年3月16日收到; 2017年4月27日收到修改稿)

针对色散效应导致聚光多结太阳能电池性能降低的问题, 使用分布式三维等效电路模型计算高倍聚光下 GaInP/GaInAs/Ge 三结太阳能电池的输出特性, 通过分析电池各层的电压分布、暗电流分布以及横向电流分布, 研究了不同电池尺寸下色散效应对电池性能影响的机理. 结果表明: 色散使多结太阳能电池在局部区域的光生电流变得不匹配, 随着电池尺寸的减小, 局部区域之间失配的光生电流能够以横向电流的形式相互补偿, 使电池整体的电流更加匹配, 从而减小色散效应的影响. 当电池芯片尺寸较大 (20 mm × 20 mm) 时, 色散主要降低电池的短路电流密度, 色散光斑下电池的效率仅相当于无色散时的 94%; 当电池芯片尺寸减小到 2 mm × 2 mm 时, 短路电流密度与无色散时相等, 但横向电阻降低了电池的填充因子. 当电池芯片尺寸进一步减小到 0.4 mm × 0.4 mm 时, 色散与无色散光斑下电池的各项性能几乎没有差别, 效率均约为 34.5%, 色散效应的影响可忽略不计.

关键词: 聚光光伏, 多结太阳能电池, 色散, 电流匹配

PACS: 88.40.jp, 88.40.fc, 88.40.hj, 88.40.jm

DOI: 10.7498/aps.66.148801

1 引言

随着社会的发展与人类的进步, 传统能源日益枯竭, 太阳能作为一种清洁的可再生能源, 是未来新能源发展的主要方向之一. 聚光多结太阳能电池作为第三代太阳电池, 因其极高的能量转化效率及较低的生产成本, 受到了广泛的关注^[1]. 目前, 法国的 SOITEC 公司成功制备了 GaInP/GaAs/GaInAsP/GaInAs 四结太阳电池, 在 AM1.5D 光谱 508 倍聚光下效率高达 46.0%, 创造了新的世界纪录^[2]. 美国可再生能源实验室 (NREL) 曾预言, 聚光多结太阳能电池的成本可降至每瓦 0.3 美元, 具有广阔的应用前景^[3]. 但聚光多结太阳能电池在户外的实际应用中遇到了一些问题, 主要原因之一为入射到芯片上的太阳光必须依靠透镜高倍聚光, 聚光后的光斑不均匀, 中心聚光

倍数高, 边缘聚光倍数低, 同时还具有严重的色散效应^[4,5]. 在聚光光伏系统中, 色散效应具体表现为: 各种波长的太阳光依照波长不同在芯片表面聚焦形成大小不同的光斑, 使电池有可能在某一区域短波部分光强较无色散时偏大, 长波部分光强较无色散时偏小, 而在另一区域则相反. 以广泛使用的 GaInP/GaInAs/Ge 三结太阳电池为例, 色散使电池某一区域顶电池的光生电流密度大于中电池, 而在另一区域顶电池的光生电流密度小于中电池. 众所周知, 多结太阳电池各子电池间的电流必须匹配, 色散使电池在局部区域的电流变得不匹配, 从而降低电池效率^[6,7]. 值得庆幸的是, 电池局部区域失配的光生载流子会沿着子电池之间的半导体层向电流匹配情况相反的区域横向运动, 在电池局部区域之间形成横向电流, 使局部电流不匹配的情况有所缓解^[8]. 因此可通过减小失配光生电流或减小对横向电流的阻碍等方法来降低色散效

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 61534005)、国家自然科学基金 (批准号: 61474081) 和国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2013CB632103) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sychen@xmu.edu.cn

应对电池性能的影响. 为此人们做了许多改进, 主要通过对透镜的光学优化以减小失配光生电流, 比如在聚光透镜与芯片之间加入二次聚光器, 使不同波长的光都能均匀地照射在芯片上, 从而提高电池效率^[9,10]; 或是将透镜分割成面积相同的环, 相邻的环焦距不同, 使得某一环上短波聚焦在中心, 而与其相邻的环则将长波聚焦在芯片中心, 相互补偿^[8]. 这些工作虽然大大降低了光斑色散程度, 但不能完全消除色散. 在减小对横向电流的阻碍方面, García 等^[11]通过减小中电池发射区的方块电阻来减小横向电阻, 但电池方块电阻的减小涉及到掺杂浓度以及厚度等关键参数, 减小的幅度有限, 过度减小反而会降低电池性能.

我们注意到, 受横向电阻的影响, 能够通过的横向电流的总量是有限的, 并非所有失配的光生电流都能以横向电流的形式相互补偿, 因此我们提出同时减小透镜及电池尺寸能够减小每个电池芯片中入射光的总量, 从而等比例减小失配光生电流的

大小, 提高横向电流与失配光生电流的比值, 使更多失配的光生电流能够以横向电流的形式相互补偿, 最终使电池整体的电流更加匹配, 从而降低色散的影响.

2 理论模型

2.1 样品结构及太阳电池 3D 等效电路

考虑到色散是一个光斑二维分布问题, 利用 SPICE 软件^[12]建立基于分布式电路单元的 3D 等效电路模型^[13,14], 计算高倍聚光下 GaInP/GaInAs/Ge 三结太阳电池的输出特性. 其样品结构示意图及 3D 等效电路如图 1 所示. 图 1 (a) 为电池结构示意图. 上电极图形为栅指状, 图中分别列出了每一层的材料、厚度、掺杂浓度. 由实验测得三结子电池的外量子效率 (EQE) 如图 1 (b) 所示.

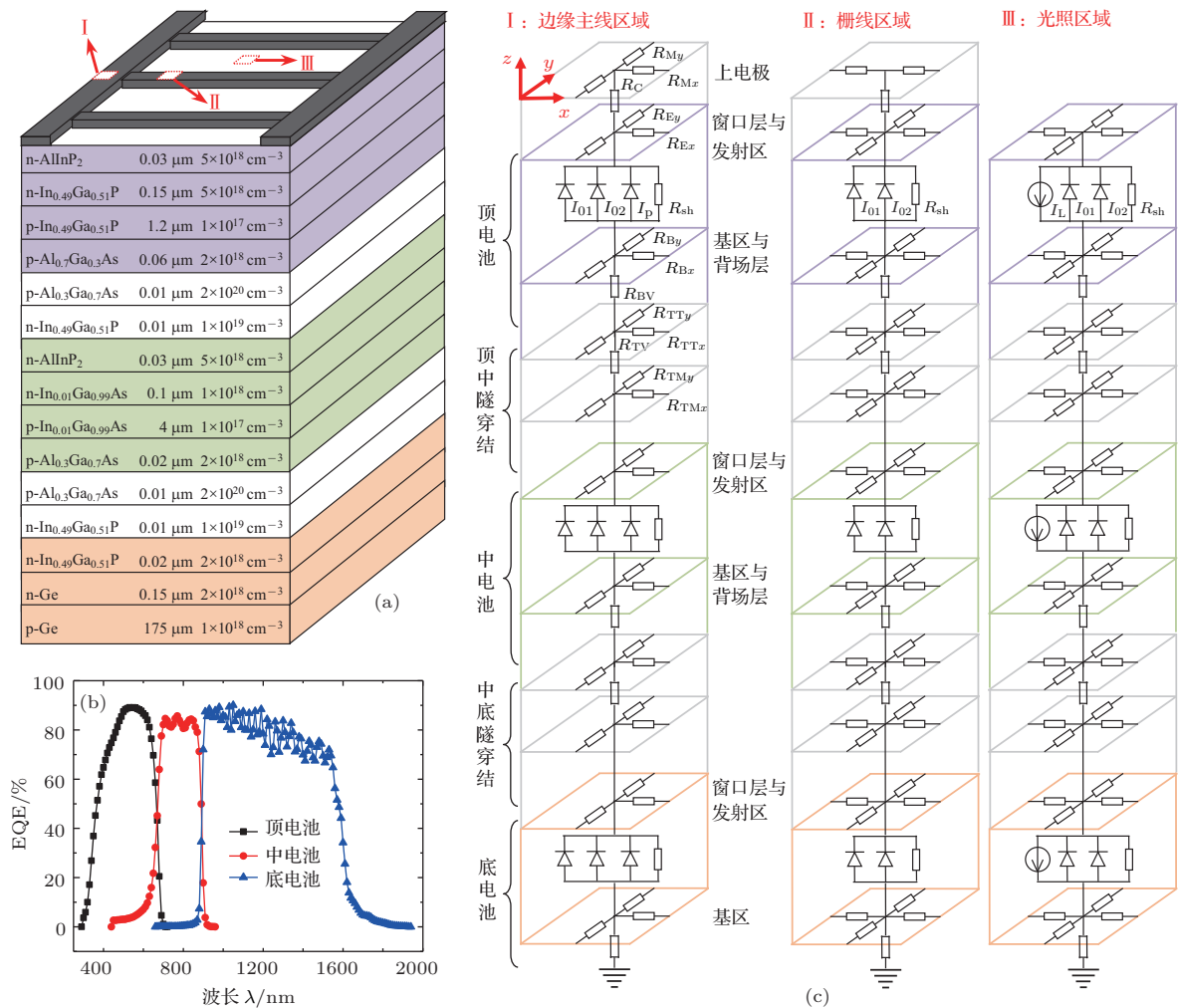


图 1 (网刊彩色) GaInP/GaInAs/Ge 三结太阳电池 (a) 电池结构; (b) 外量子效率; (c) 3D 等效电路

Fig. 1. (color online) GaInP/GaInAs/Ge triple-junction solar cell: (a) Solar cell structure; (b) EQE; (c) 3D equivalent circuit.

我们用有限元法将电池分割成足够小的网格单元, 并将每个小单元都等效为一个3D电路, 最后将每个小单元的3D电路按其在电池中所处的位置拼接起来, 获得整片电池的3D等效电路^[15-18]. 图1(a)中电池表面上I, II, III三处分别为边缘主线区域、栅线区域以及光照区域所在单元, 其3D等效电路分别如图1(c)中I, II, III所示. 每个单元的3D等效电路都包含顶电池、中电池、底电池以及连接它们的隧穿结.

以顶电池为例, 每个子电池都由一个恒流源 I_L 、理想因子分别为1和2的二极管 I_{01} 及 I_{02} 、并联电阻 R_{sh} 以及串联电阻组成, 在边缘区域还需增加一个代表边缘界面处复合的二极管 I_p . 恒流源的电流大小等于子电池的光生电流 I_L , 在覆盖有电极的区域无光照, I_L 大小为0, 在电路图中可删去. 由于是3D模型, 所以串联电阻都包含横向及纵向两部分. 将发射区与窗口层视为一个整体, 其在 x, y 两方向上的横向电阻分别为 R_{Ex} 和 R_{Ey} ; 同理, 将基区与背场层也视为一个整体, 其横向电阻分别为

R_{Bx} 和 R_{By} , 顶电池在纵向上的串联电阻为 R_{BV} . 顶中隧穿结在结两侧的横向电阻分别为 R_{TTx} 与 R_{TTY} 以及 R_{TMx} 与 R_{TMy} , 在纵向上的串联电阻为 R_{TV} ^[19]. 最后, 上电极部分也包含纵向的金属半接触电阻 R_C 以及横向金属传导电阻 R_{Mx} 与 R_{My} .

2.2 入射光斑

为使模拟中使用的光斑更加接近户外的真实光斑, 使用TracePro软件模拟了AM1.5D标准太阳光经菲涅耳透镜1090倍聚光及二次光学元件匀光后, 入射到电池芯片上的光斑的二维分布, 并将其作为本文计算中使用的光斑数据. 菲涅耳透镜的孔径设为 $330\text{ mm} \times 330\text{ mm}$, 焦距为 530 mm , 齿高为 0.35 mm , 材料为SOG(silicon on glass), 硅胶折射率为1.41, 玻璃折射率为1.52, 电池芯片大小为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$. 获得的光斑分布如图2所示. 其中图2(a)为入射光斑光子流密度的二维分布, 光斑中间光强大, 边缘光强小, 为非均匀光斑. 为方便比较, 我们利用图1(b)中的EQE计算得到无栅

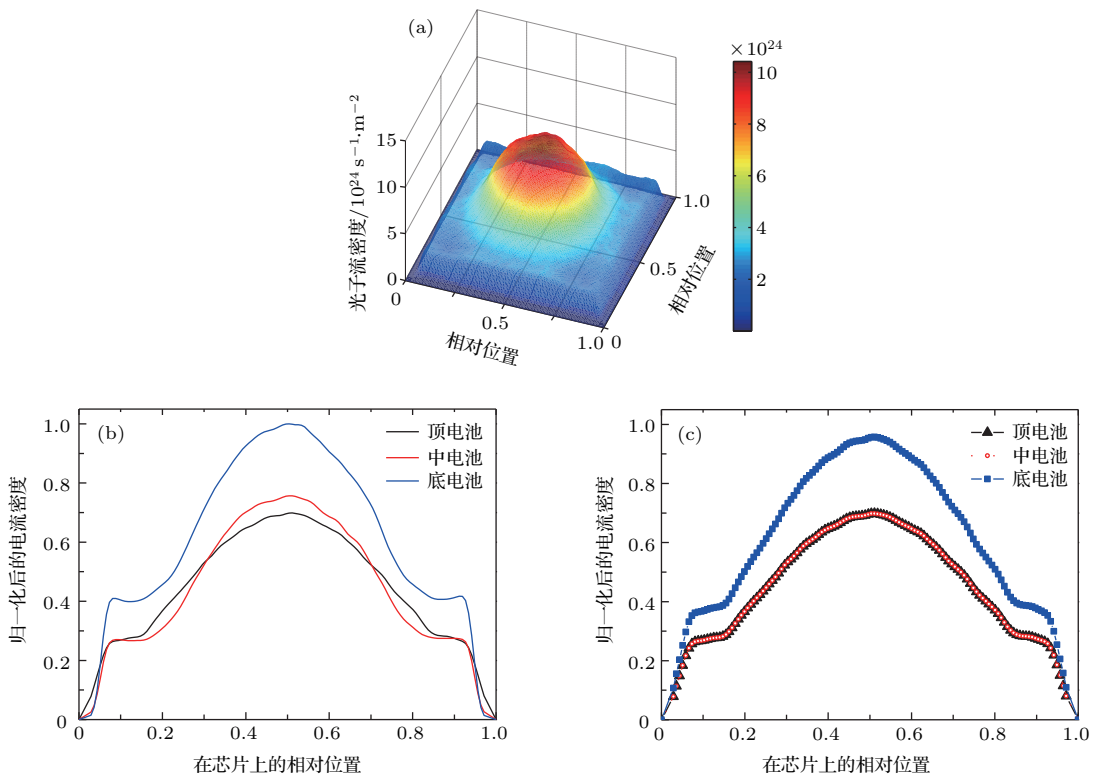


图2 (网刊彩色) 光斑分布图 (a) 色散光斑光子流密度二维分布; (b) 色散光斑光生电流密度一维分布; (c) 无色散光斑光生电流密度一维分布

Fig. 2. (color online) Light spot distribution: (a) The two-dimensional distribution of photon flux density with chromatic aberration; (b) the one-dimensional distribution of photocurrent density with chromatic aberration; (c) the one-dimensional distribution of photocurrent density without chromatic aberration.

线遮挡时各子电池光生电流密度的一维分布,并作归一化处理,结果如图2(b)所示,其中横坐标为电池芯片上的相对位置.从图中可以看出,顶中两结子电池的光生电流整体是匹配的,但由于色散效应的影响,在电池中心,中电池的光生电流密度比顶电池高约10%,而在边缘区域则相反.保持入射至各子电池光照区域的光子总数不变,改变中电池及底电池的光斑分布,使其分布形貌与顶电池的光斑保持一致,从而人为引入一种非均匀但无色散的光斑.无栅线遮挡时各子电池的光生电流密度归一化后一维分布如图2(c)所示,从图中可看出无色散光斑中间光强大,边缘光强小,仍为非均匀光斑,但由于不存在色散,在不同位置上,各子电池的光生电流比值始终保持不变.由于底电池的光生电流比顶电池及中电池都大得多,电池整体的短路电流不受其限制,在以下分析中均不考虑底电池.此外在本文计算中,当改变电池芯片的大小时,菲涅耳透镜的孔径、焦距、齿高、二次光学元件以及透镜与芯片之间的距离也随之发生等比例的放大或缩小,导致入射光斑的大小也随之等比例改变,光生电流密度在芯片上的分布始终如图2(b)和图2(c)所示.

3 结果与讨论

3.1 电流密度-电压(J - V)特性曲线

为研究不同尺寸下色散效应对电池性能的影响,设计了边长为0.4—10 mm的一系列大小不同的电池,并保持其栅线宽度均为6 μm ,栅线间距均为100 μm ,同时保持入射光斑也随芯片大小等比例变化.分别计算色散及无色散两种光斑下电池的 J - V 曲线,结果如图3所示.其中图3(a)和图3(b)分别为色散及无色散光斑下的 J - V 曲线.为方便比较,我们将 J - V 曲线中的参数提取出来,如图3(c)—图3(f)所示,分别为两种光斑下不同尺寸电池的短路电流(J_{sc})、开路电压(V_{oc})、填充因子(F)及效率(η)的对比.最后将色散光斑下电池各参数的数值分别除以无色散时相应的值,进行归一化处理,以百分比的形式表示,结果如图3(g)所示.

比较图3(c)—图3(g)可知,电池在芯片尺寸较大(20 mm \times 20 mm)时,色散光斑下电池的短路电流密度为11.59 A/cm^2 ,较无色散时的12.29 A/cm^2 有明显降低,仅相当于后者的94%.随着电池芯片尺寸的减小,无色散光斑下电池短路电流密度几乎没有变化,而色散光斑下电池的短路

电流密度不断增大,逐渐趋近于无色散时 J_{sc} 的数值.当电池芯片尺寸小于2 mm \times 2 mm时,二者几乎没有差别,色散效应对 J_{sc} 的影响可忽略不计.

比较图3(d)和图3(g)可知,随着电池芯片尺寸的减小,两种光斑下电池的开路电压差别不大,色散对 V_{oc} 几乎没有影响.

比较图3(e)—图3(g)可知,当电池芯片尺寸为20 mm \times 20 mm时,两种光斑下电池填充因子几乎没有差别,约为68%.随着电池芯片尺寸的逐渐减小,电极图形也随之缩小,电极部分相应的串联电阻逐渐降低,两种光斑下电池的填充因子均逐渐增大,但色散光斑下电池的填充因子较无色散时增加得慢.当电池芯片尺寸缩小到2 mm \times 2 mm时,色散与无色散光斑下填充因子的差别达到最大,前者仅相当于后者的96.6%.当电池芯片尺寸进一步减小时,电极对填充因子的影响可忽略不计,无色散光斑下填充因子变化不大,色散光斑下填充因子的数值不断增加,逐渐趋近于无色散时的填充因子.当电池芯片尺寸为0.4 mm \times 0.4 mm时,二者在数值上几乎没有差别,约为84%,色散效应对填充因子的影响可忽略不计.

比较图3(f)和图3(g)可知,考虑菲涅耳透镜及二次光学元件约20%的反射率后,当电池芯片尺寸为20 mm \times 20 mm时,色散与无色散光斑下电池效率分别为25.8%及27.5%,前者相当于后者的93.8%.随着电池芯片尺寸的减小,两种光斑下电池的效率均有不同幅度的提高,色散光斑下效率的提高比无色散时稍快,逐渐趋近于无色散光斑下电池的效率.当电池芯片尺寸小于2 mm \times 2 mm时,无色散光斑下电池的效率没有明显变化,而色散光斑下电池的效率仍随电池芯片尺寸的减小而增大,色散效应对效率的影响逐渐减弱.当电池芯片尺寸为0.4 mm \times 0.4 mm时,二者在数值上几乎没有差别,约为34.5%,色散效应对效率的影响可忽略不计.

3.2 电势分布

为研究色散效应对电池性能的影响机理,计算不同尺寸的电池在色散及无色散光斑下短路时的电势分布.过芯片中心作平行于栅电极且垂直于芯片表面的截面,截面上电池各层的电势分布如图4所示.其中图4(a)—图4(c)表示尺寸分别为20 mm \times 20 mm, 2 mm \times 2 mm及0.4 mm \times 0.4 mm

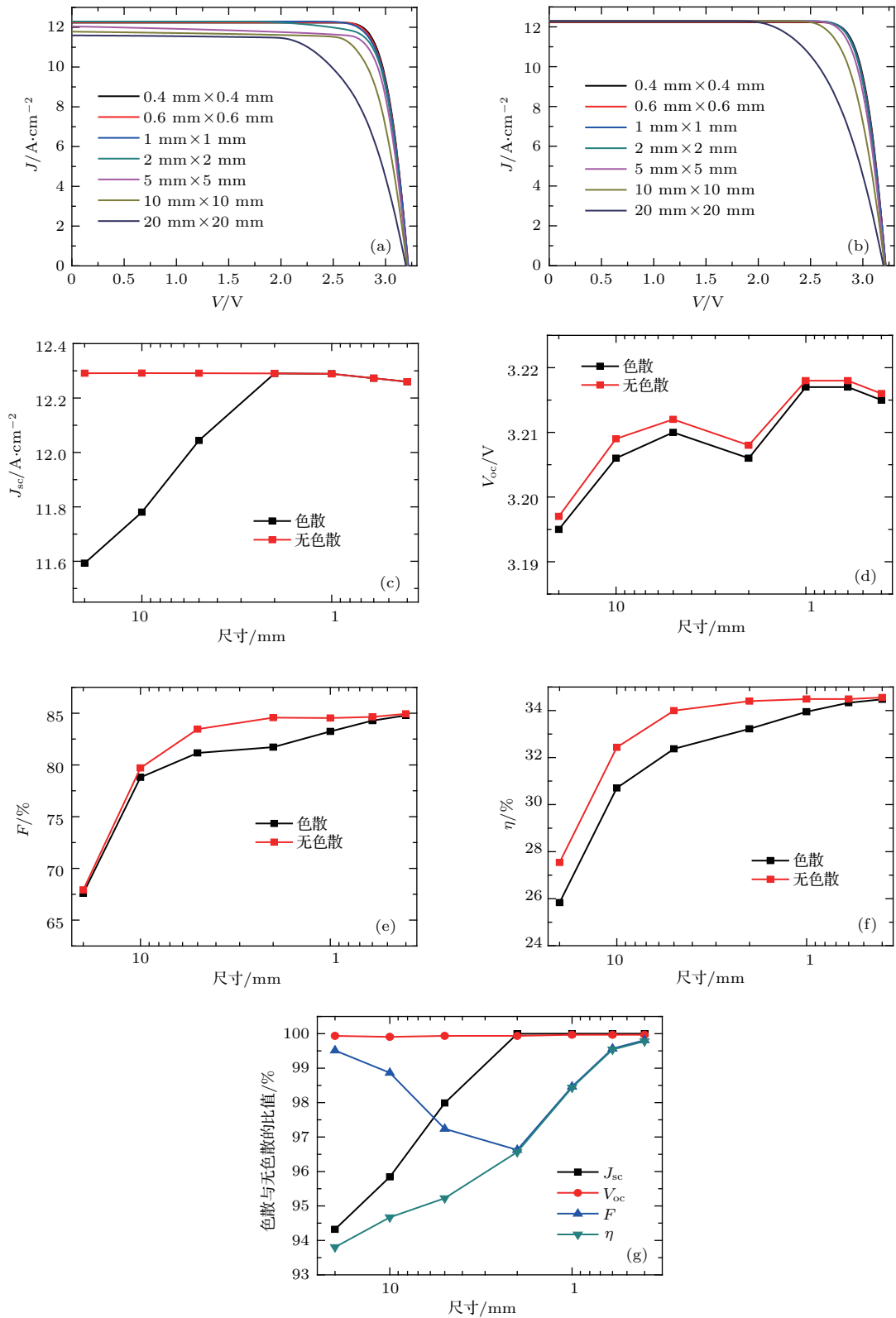


图3 色散及无色散光斑下不同尺寸电池的 $J-V$ 曲线及性能参数 (a) 色散时的 $J-V$ 曲线; (b) 无色散时的 $J-V$ 曲线; (c) 短路电流密度; (d) 开路电压; (e) 填充因子; (f) 效率; (g) 色散光斑下各性能参数与无色散时的比值;

Fig. 3. $J-V$ curves and performance parameters of the solar cells of different sizes with and without chromatic aberration: (a) The $J-V$ curves with chromatic aberration; (b) the $J-V$ curves without chromatic aberration; (c) short-circuit current density; (d) open-circuit voltage; (e) fill factor; (f) efficiency; (g) the ratio of the performance parameters between chromatic aberration and non-chromatic aberration.

的电池各层的电势分布. 从图中可以看到, 短路时光照下多结太阳能电池两端的电压为零, 但各子电池两端的电压并不为零. 这是因为多结太阳能电池中电流处处相等, 电池的短路电流受光生电流最小的子电池限制, 而各子电池的光生电流不可能绝对相等, 在光生电流较大的子电池中, 失配的光生载流子聚集在子电池的两端, 使子电池处于正偏状态,

而光生电流较小的子电池则处于反偏状态.

如图 4(a) 所示, 当电池芯片尺寸较大时 (20 mm × 20 mm), 两种光斑下电池各层的电势分布有明显差别. 无色散光斑下, 电流基本匹配, 但无法达到理想情况下的绝对匹配, 顶电池略微限流 0.04%, 因此短路时顶电池 n 型发射区的电势高于 p 型基区, 处于反偏状态, 中电池 n 型发射区的

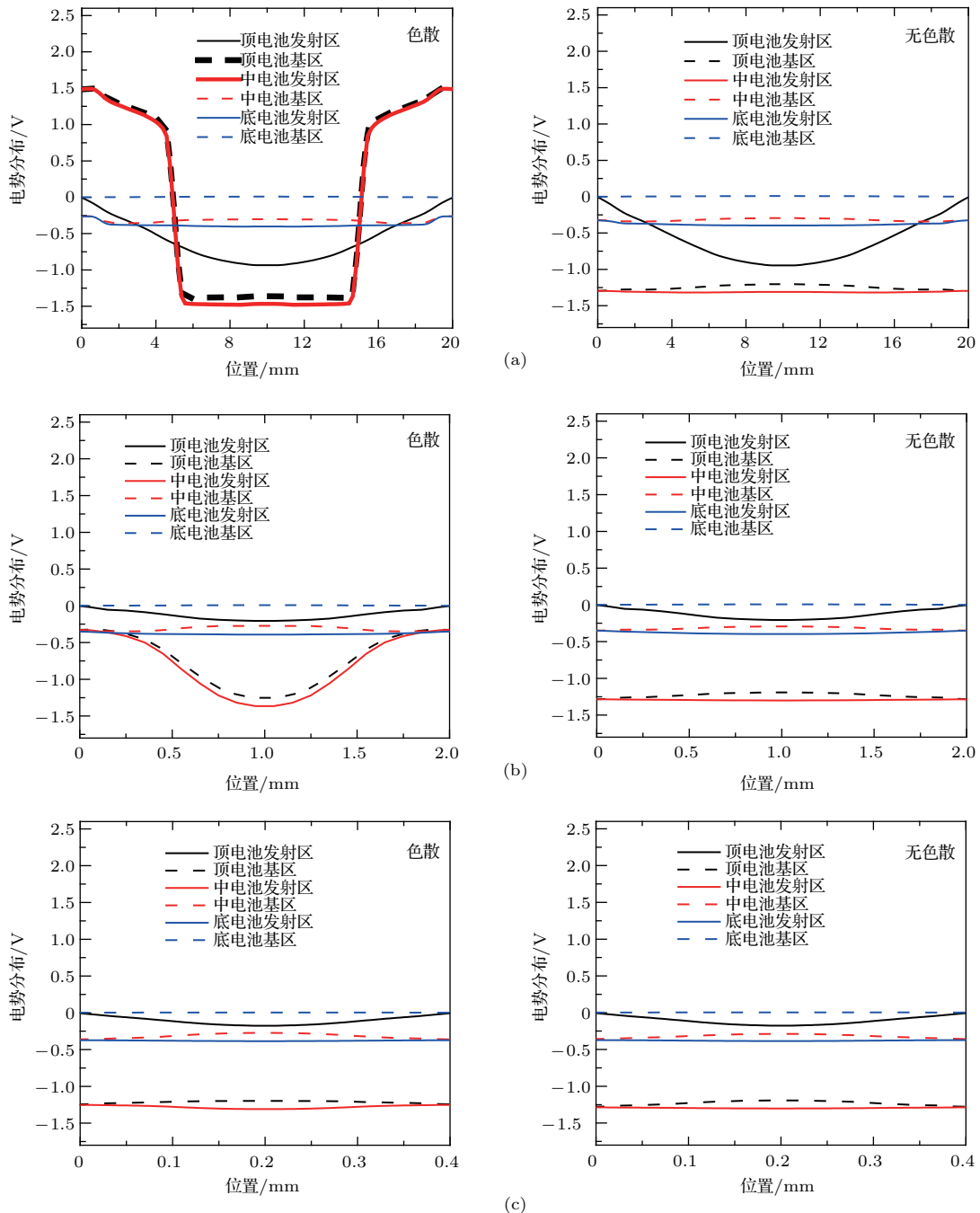


图 4 (网刊彩色) 色散及无色散光斑下不同尺寸的电池短路时各层的电势分布 (a) 20 mm × 20 mm; (b) 2 mm × 2 mm; (c) 0.4 mm × 0.4 mm

Fig. 4. (color online) Distribution of electric potential in each layer of the cells with different sizes in case cells become short-circuited with and without chromatic aberration: (a) 20 mm × 20 mm; (b) 2 mm × 2 mm; (c) 0.4 mm × 0.4 mm.

电势低于p型基区,处于正偏状态.而在色散光斑下,在电池中心区域顶电池为反偏,中电池为正偏;在电池边缘则相反,顶电池为正偏,中电池为反偏.实际电流匹配情况为中心区域顶电池限流(以下简称“顶限”),边缘区域中电池限流(以下简称“中限”).这与图2(c)中光生电流的匹配情况一致.因此当电池芯片尺寸较大时(20 mm × 20 mm),色散使电池局部区域的电流极不匹配,影响十分显著.

当电池芯片尺寸减小到2 mm × 2 mm时,如图4(b)所示,两种光斑下,电势分布的差别明显减小.色散光斑下,顶电池始终为反偏,中电池在中心区域为正偏,在边缘区域偏压约等于0.虽然在色散光斑下光生电流为中心区域顶限,边缘区域中限,但电池实际电流匹配情况为所有区域均顶限,这与无色散时相同,色散效应的影响明显减弱.

当芯片尺寸减小到0.4 mm × 0.4 mm时,如图4(c)所示,无色散光斑下,电池电势分布与2 mm × 2 mm时基本相同;色散光斑下,电池各层的电势分布与无色散时几乎没有差别,色散效应的影响可忽略不计.

3.3 横向电流及暗电流分布

以图4(a)中较大尺寸的电池为例,在本文采用的色散光斑下,短路时中心区域过剩的失配光生载流子不断聚集在中电池两端,而在边缘区域则聚集在顶电池两端,这使顶电池基区及中电池发射区均在边缘与中心区域之间形成一个横向的电势差.在边缘区域,顶电池基区中过剩的光生空穴将沿着顶电池基区及中电池发射区之间的半导体层从电池边缘流向中心;在中心区域,中电池发射区中过剩的光生电子由电池中心流向边缘,形成由电池边缘流向中心的横向电流,从而缓解局部区域的电流失配.另一方面,色散光斑下,电池中心区域的中电池为正偏,边缘区域的顶电池为正偏,过剩的失配光生载流子还将以暗电流的形式进行复合.

为此我们计算了短路时不同尺寸电池横向电流及暗电流的变化,结果如图5所示.其中图5(a)—图5(c)表示芯片尺寸分别为20 mm × 20 mm, 2 mm × 2 mm及0.4 mm × 0.4 mm的电池在径向上的横向电流分布.在中心及边缘区域的交界处,横向电流的大小达到峰值,色散光斑下横向电流较无色散时大得多,且随着电池尺寸的减小而减小.图5(d)—图5(f)表示芯片尺寸分别为20 mm × 20 mm, 2 mm × 2 mm及0.4 mm × 0.4 mm

的电池短路时的一维暗电流密度分布.电池芯片尺寸较大时(20 mm × 20 mm),无色散光斑下的暗电流比色散时小得多,可忽略不计.色散光斑下,由于电池局部区域的电流极不匹配,即便处于短路状态,暗电流密度依然非常大,在中心区域暗电流主要由中电池产生,暗电流密度高达450 A/m,而在边缘区域暗电流主要由顶电池产生,暗电流密度也高达300 A/m.随着电池尺寸的减小,色散光斑下的暗电流密度也随之减小.当电池芯片尺寸为2 mm × 2 mm时,色散光斑下电池在局部区域的电流基本匹配,整体电流匹配情况为顶电池略微限流0.02%,因此无论色散还是无色散时暗电流主要由中电池产生,顶电池的暗电流与之相比小到可以忽略不计.当电池芯片尺寸减小到0.4 mm × 0.4 mm时,暗电流密度进一步减小,色散与无色散两种光斑下,电池暗电流分布的差别明显减小.

为进一步研究色散的影响,我们将色散光斑下电池整体的暗电流以及中心与边缘区域交界处的横向电流减去无色散时相应的值,获得由色散导致的额外的暗电流及横向电流,并与色散导致的失配光生电流进行比较,结果如图5(g)所示.

当电池芯片尺寸较大时(20 mm × 20 mm),色散导致的失配光生电流大小为3.3 A,横向电流为0.4 A,色散导致的额外的暗电流为2.8 A,失配光生电流中以横向电流运输的比例为12%.随着电池尺寸的减小,失配光生电流也等比例减小,暗电流减小得较快,横向电流减小得较慢并逐渐趋近于失配光生电流的值,失配光生电流中以横向电流运输的比例逐渐增加.当电池芯片尺寸减小到2 mm × 2 mm时,失配光生电流大小为32.66 mA,横向电流为32.65 mA,色散导致的额外的暗电流为5.7 μA,失配光生电流中以横向电流运输的比例为99.98%;当电池芯片尺寸进一步减小到0.4 mm × 0.4 mm时,色散导致的额外的暗电流减小到7.4 nA,失配光生电流中以横向电流运输的比例提高到99.999%.

这是因为短路时,产生的失配光生载流子一部分以横向电流的形式运输,另一部分以暗电流的形式复合,三者达到动态平衡.色散导致的失配的光生电流可表示为

$$\Delta I_L = I_H + I_D, \quad (1)$$

式中 I_H 为边缘与中心区域间的横向电流, I_D 为色散导致的额外的暗电流. I_H 的大小与顶电池基区

及中电池发射区在两区域间的横向电势差成正比, 与两区域间的横向等效电阻成反比. 参考图 4(a), 在电池整体光生电流绝对匹配的理想条件下, 色散光斑下 I_H 可近似表示为

$$I_H \propto \frac{\Delta V_{t,B}}{R_{t,B}} + \frac{\Delta V_{m,E}}{R_{m,E}} \propto \frac{V_{t,edge} + V_{m,center}}{R_H}, \quad (2)$$

式中 $\Delta V_{t,B}$, $R_{t,B}$ 分别为顶电池基区在两区域间横向的电势差及等效横向电阻, $\Delta V_{m,E}$, $R_{m,E}$ 分别为

中电池发射区在两区域间横向的电势差及等效横向电阻, $V_{t,edge}$ 为边缘区域顶电池两端的电势差, $V_{m,center}$ 为中心区域中电池两端的电势差, R_H 为两区域间的等效横向电阻. 在电池某一层中, 内半径为 r_a 、外半径为 r_b 的圆环在径向上的横向电阻 R_{ab} 可表示为

$$R_{ab} = \int_{r_a}^{r_b} \frac{R_{sheet}}{2\pi r} dr = \frac{R_{sheet}}{2\pi} \ln \frac{r_b}{r_a}, \quad (3)$$

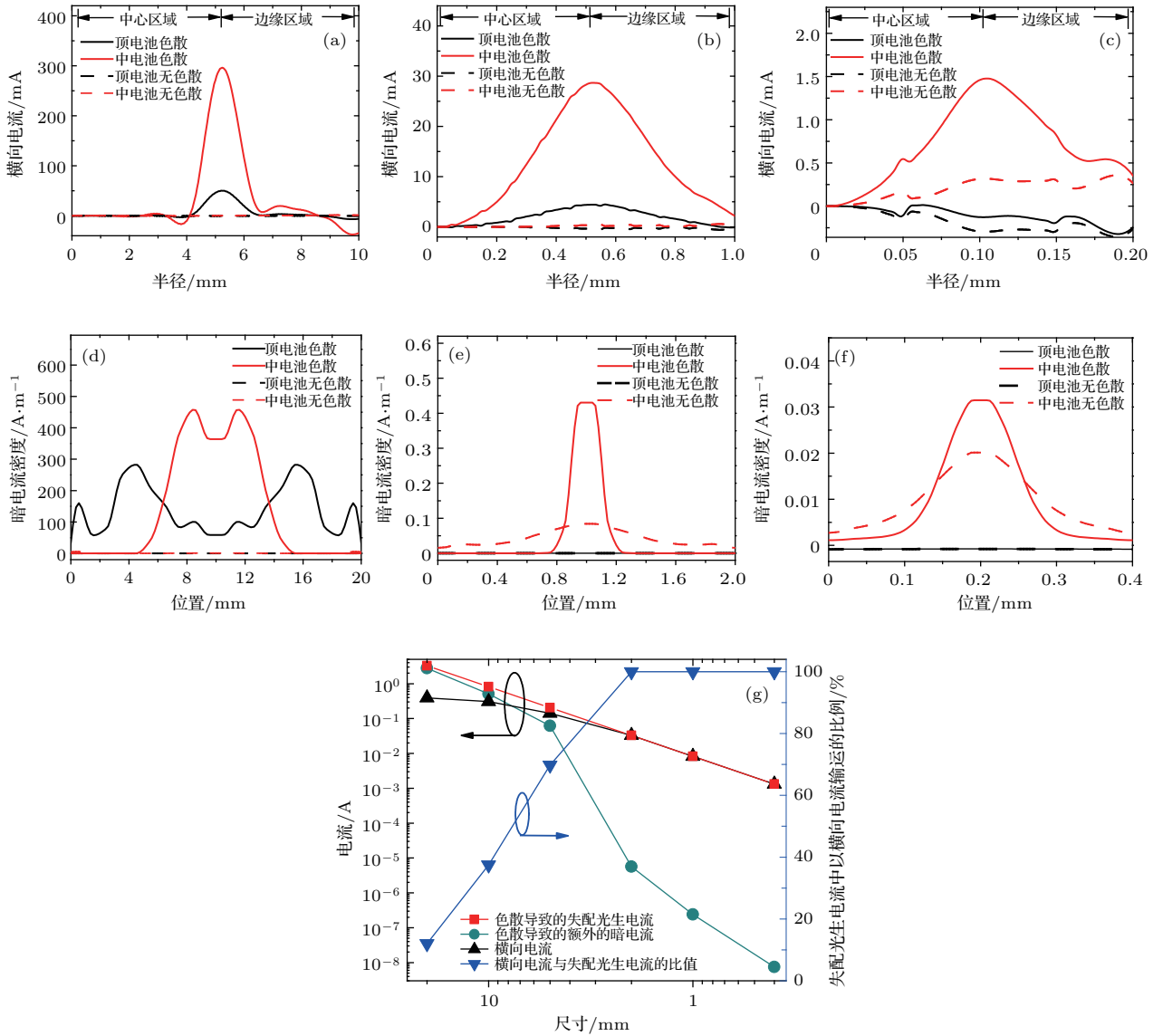


图5 (网刊彩色) 色散及无色散光斑下不同尺寸电池短路时的横向电流及暗电流分布 (a) 20 mm × 20 mm时的横向电流; (b) 2 mm × 2 mm时的横向电流; (c) 0.4 mm × 0.4 mm时的横向电流; (d) 20 mm × 20 mm时的暗电流密度; (e) 2 mm × 2 mm时的暗电流密度; (f) 0.4 mm × 0.4 mm时的暗电流密度; (g) 色散导致的失配光生电流、暗电流及横向电流的比较

Fig. 5. (color online) Distribution of transverse current and dark current for cells with different sizes in case cells become short-circuited with and without chromatic aberration: (a) The transverse current of cell with size of 20 mm × 20 mm; (b) the transverse current of cell with size of 2 mm × 2 mm; (c) the transverse current of cell with size of 0.4 mm × 0.4 mm; (d) the dark current of cell with size of 20 mm × 20 mm; (e) the dark current of cell with size of 2 mm × 2 mm; (f) the dark current of cell with size of 0.4 mm × 0.4 mm; (g) comparison of mismatched photo-generated photocurrent, dark current and transverse current caused by chromatic aberration.

式中 R_{sheet} 为电池中某一半导体层的方块电阻. 由 (3) 式可以推出, R_{ab} 仅与其所在的位置及方块电阻有关, 若将电池与菲涅耳透镜的尺寸等比例地放大或缩小, r_a 与 r_b 的比值以及 R_{sheet} 将保持不变, 横向电阻 R_{ab} 也保持不变. 因此对于不同尺寸的电池, 两区域间的等效横向电阻 R_{H} 相等, 横向电流的大小与 $V_{\text{t,edge}}$ 及 $V_{\text{m,center}}$ 呈线性关系.

短路时, 在电池整体光生电流绝对匹配的理想条件下, 无色散光斑下暗电流约等于 0, 因此色散光斑下由色散导致的额外的暗电流可近似表示为 [18,20,21]

$$I_{\text{D}} \propto A_{\text{edge}} \cdot J_{0\text{t}} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{\text{t,edge}} \cdot q}{k_{\text{B}}T}\right) - 1 \right] \\ \propto A_{\text{center}} \cdot J_{0\text{m}} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{\text{m,center}} \cdot q}{k_{\text{B}}T}\right) - 1 \right], \quad (4)$$

式中 A_{edge} , A_{center} 分别为边缘及中心区域的面积, $J_{0\text{t}}$, $J_{0\text{m}}$ 分别为顶电池及中电池的反向饱和电流密度, q 为电子电量, k_{B} 为玻尔兹曼常数, T 为温度. 从 (4) 式可得暗电流的大小与电池的尺寸成正比, 与 $V_{\text{t,edge}}$ 及 $V_{\text{m,center}}$ 呈指数关系. 由 (1), (2), (4) 式可推导得出, 当电池尺寸减小时, 色散导致的失配光生电流等比例减小, 横向电流随着 $V_{\text{t,edge}}$ 与 $V_{\text{m,center}}$ 线性减小, 而暗电流不但随着尺寸线性减小, 还会随着 $V_{\text{t,edge}}$ 与 $V_{\text{m,center}}$ 以指数的形式更快地减小. 反之, 当电池尺寸增大时, 横向电流随着 $V_{\text{t,edge}}$ 与 $V_{\text{m,center}}$ 线性增大, 而暗电流以指数的形式更快地增大.

因此当电池芯片尺寸较大时 (20 mm×20 mm), 失配的光生电流较大, 横向电流与暗电流都较大, 但横向电流远小于暗电流, 仅有 12% 的失配光生载流子能以横向电流的形式相互补偿, 剩余载流子都以暗电流的形式复合, 使电池在局部区域处于电流极不匹配的状态, 从而降低输出的短路电流密度, 同时使填充因子被动增加; 随着电池尺寸逐渐减小, 失配光生电流也逐渐减小, 横向电流也随之逐渐减小, 色散导致的暗电流以指数的形式更快地减小, 失配光生电流中以横向电流运输的比例逐渐增加, 电池整体电流不匹配的状态有所缓解, 短路电流密度逐渐增加. 当电池芯片尺寸减小到 2 mm×2 mm 时, 横向电流远大于暗电流, 99.98% 的失配光生载流子都能以横向电流的形式相互补偿, 虽然电池的光生电流在局部区域失配, 但电池整体仍处于电流匹配状态, 输出的短路电流密度与无色散时相等, 但横向电阻增大了电池的串联

电阻, 降低了电池的填充因子. 当电池尺寸进一步减小时, 失配的光生电流很小, 横向串联电阻的阻值保持恒定, 小电流下串联电阻的影响逐渐减弱, 电池的填充因子逐渐增大, 趋近于无色散光斑下填充因子的数值. 当电池芯片尺寸进一步减小到 0.4 mm×0.4 mm 时, 色散效应的影响几乎可以忽略不计.

4 结 论

减小电池尺寸确实有利于减小色散效应对电池性能的影响, 使电流更加匹配, 提高电池效率. 当电池芯片尺寸很大时 (20 mm×20 mm), 只有 12% 的失配光生载流子能通过子电池之间的横向电阻由电池边缘流向中心, 剩余载流子以暗电流的形式损失, 电池整体处于电流不匹配的状态, 色散效应的影响主要表现为短路电流密度的降低, 色散时的效率仅相当于无色散时的 94%. 随着电池尺寸逐渐减小, 失配光生电流也逐渐减小, 横向电流也随之逐渐减小, 色散导致的额外的暗电流以指数的形式更快地减小, 失配光生电流中以横向电流运输的比例逐渐增加, 电池整体电流不匹配的状态有所缓解, 短路电流密度逐渐增加. 当电池芯片尺寸减小到 2 mm×2 mm 时, 99.98% 的失配光生载流子都能以横向电流的形式相互补偿, 短路电流密度与无色散时相等, 但由于横向串联电阻的作用, 色散效应的影响主要表现为填充因子的降低. 当电池尺寸进一步减小时, 失配的光生电流很小, 横向串联电阻的影响逐渐减弱, 电池填充因子的数值逐渐趋近于无色散光斑下的数值. 当电池芯片大小减小到 0.4 mm×0.4 mm 时, 色散与无色散光斑下电池的各项性能几乎没有差别, 效率均约为 34.5%, 色散效应的影响可忽略不计.

参考文献

- [1] Chen N F, Bai Y M 2007 *Physics* **36** 862 (in Chinese) [陈诺夫, 白一鸣 2007 物理 **36** 862]
- [2] Green M A, Emery K, Hishikawa Y, Warta W, Dunlop E D 2015 *Prog. Photovoltaics* **23** 1
- [3] Cotal H L, Lillington D R, Ermer J H, King R R, Karam N H, Kurtz S R, Friedman D J, Olson J M, Ward J S, Duda A, Emery K A, Moriarty T 2000 *Proceeding of the 28th Photovoltaic Specialist Conference Anchorage, America, September 15–22, 2000* p955

- [4] Baig H, Heasman K C, Mallick T K 2012 *Renew. Sust. Energ. Rev.* **16** 5890
- [5] Liang Q B, Shu B F, Sun L J, Zhang Q Z, Chen M B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 168801 (in Chinese) [梁齐兵, 舒碧芬, 孙丽娟, 张奇淄, 陈明彪 2014 物理学报 **63** 168801]
- [6] Kurtz S R, O'Neill M J 1996 *Proceeding of the 25th Photovoltaic Specialist Conference* Washington, America, May 13–17, p361
- [7] Cotal H, Sherif R 2005 *Proceedings of the 31st Photovoltaic Specialist Conference* Florida, America, January 3–7, p747
- [8] James L W 1994 *IEEE First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* Hawaii, America, December 5–9, p1799
- [9] Espinet-González P, Mohedano R, García I, Zamora P, Reystolle I, Benitez P, Algora C, Cvetkovic A, Hernández M, Chaves J, Miñano J C, Li Y 2012 *AIP Conf. Proc.* **1477** 81
- [10] Araki K, Kondo M, Uozumi H, Yamaguchi M 2003 *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* Orah, Japan, May 11–18, p853
- [11] García I, Espinet-González P, Rey-Stolle I, Algora C 2011 *IEEE J. Photovolt.* **1** 219
- [12] Nagel L, Pederson D 2013 <https://infoscience.epfl.ch/record/209244/files/4-13-page16.pdf> (2013-1-16) [2017-01-03]
- [13] Galiana B, Algora C, Rey-Stolle I, Vara I G 2005 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **52** 2552
- [14] Galiana B, Algora C, Rey-Stolle I 2006 *Sol. Energ. Mat. Sol. C* **90** 2589
- [15] Garcia I, Espinet-González P, Rey-Stolle I, Barrigón E, Algora C 2011 *AIP Conf. Proc.* **1407** 13
- [16] García I, Algora C, Rey-Stolle I, Galiana B 2008 *Proceedings of the 33rd Photovoltaic Specialist Conference* San Diego, America, May 11–16, p1
- [17] Espinet P, García I, Rey-Stolle I, Algora C, Baudrit M 2010 *AIP Conf. Proc.* **1277** 24
- [18] Lian R H, Liang Q B, Shu B F, Fan C, Wu X L, Guo Y, Wang J, Yang Q C 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 148801 (in Chinese) [连榕海, 梁齐兵, 舒碧芬, 范畴, 吴小龙, 郭银, 汪婧, 杨晴川 2016 物理学报 **65** 148801]
- [19] Ota Y, Nishioka K 2011 *AIP Conf. Proc.* **1407** 281
- [20] Xiong S Z, Zhu M F 2009 *Basic and Application of Solar Cells* (Beijing: Science Press) pp95–97 (in Chinese) [熊绍珍, 朱美芳 2009 太阳能电池基础与应用 (北京: 科学出版社) 第95—97页]
- [21] Shen W Z, Wu C Y 1980 *J. Appl. Phys.* **51** 466

Effect of chromatic aberration on performance of concentrated multi-junction solar cells and their optimization*

Li Xin¹⁾ Lin Gui-Jiang²⁾ Liu Han-Hui¹⁾ Chen Song-Yan^{1)†} Liu Guan-Zhou¹⁾²⁾

1) (School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

2) (Xiamen San'an Optoelectronics Co., Ltd., Xiamen 361009, China)

(Received 16 March 2017; revised manuscript received 27 April 2017)

Abstract

In order to investigate the influence of the chromatic aberration on the performance of multi-junction solar cells, the performance of the triple-junction GaInP/GaInAs/Ge solar cell under high concentration condition is investigated by a three-dimensional (3D) model based on distributed circuit units. Moreover, the effects of chromatic aberration on the performance of solar cells with different sizes are studied by analyzing the distributions of the voltage, the dark current and the transverse current in each layer. It is indicated that the photo-generated current is mismatched in local region of multi-junction solar cell, which is caused by chromatic aberration. However, the mismatched photo-generated current can be compensated for by the form of transverse current, and the current can be better matched when the size of solar cell is reduced. When the size of solar cell is as big as $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$, the mismatched photo-generated current is large, so are the transverse current and the dark current. But the transverse current is far less than the dark current, only 12% of the mismatched photo-generated carriers can flow from the edge to the center of the cell through the transverse resistance between the sub-cells, the rest of the photo-generated carriers are lost in the form of dark current, and the cell is in a state of current mismatching. Finally, the chromatic aberration gives rise to a reduction in the short-circuit current density, and the efficiency is only 94% as high as that of non-chromatic aberration. When the size of the cell decreases, the mismatched photo-generated current and the transverse current also decrease gradually, but the dark current caused by the chromatic aberration exponentially decreases more quickly, and the ratio of the transverse current to the mismatched photo-generated current increases gradually. Therefore, the overall state of the current mismatching is alleviated, and the short-circuit current density is increased gradually. Moreover, when the size of solar cell is $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, the transverse current is much larger than the dark current, 99.98% of the mismatched photo-generated carriers can be compensated for in the form of transverse current. Although the photo-generated current of the cell is mismatched in local region, the overall is still in the state of current matching. The short-circuit current densities with and without chromatic aberration are equal, but the filling factor is reduced due to the transverse resistor. When the size of cell is further reduced, the mismatched photo-generated current is very small, and the influence of the transverse series resistance decreases gradually. Therefore, the value of the filling factor gradually approaches to the value without chromatic aberration. Furthermore, the performance of solar cell with and without chromatic aberration is nearly the same when the size of solar cell is as small as $0.4\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$. The efficiencies are both about 34.5% and the effects of chromatic aberration can be ignored.

Keywords: concentrated photovoltaics, multi-junction solar cell, chromatic aberration, current matching

PACS: 88.40.jp, 88.40.fc, 88.40.hj, 88.40.jm

DOI: 10.7498/aps.66.148801

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61534005), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61474081), and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2013CB632103).

† Corresponding author. E-mail: sychen@xmu.edu.cn