光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.008

菲涅耳透镜下多结电池表面局部高辐射功率对短路电流的影响

江景祥，舒碧芬*，梁齐兵，黄　妍，崔高峻，喻祖康

（中山大学 太阳能系统研究所 广东省光伏技术重点实验室，广州 510006）

摘　要： 为探索以菲涅耳透镜为聚光器的聚光光伏模组中，多结电池中心局部高辐射功率对短路电流的影响，测量菲涅耳透镜的高亮度光斑直径，并据此分别测试室内不同局部光照面积下和户外不同尺寸透镜下的 GaInP/GaInAs/Ge 三结电池的短路电流，利用电路网络模型分析实验结果。结果表明，短路电流与局部聚光的面积无关；小尺寸菲涅耳透镜聚焦下，沿光轴电流与辐射功率同步变化；透镜尺寸增大到一定程度，电池中心局部承受过高辐射功率，电流受峰值隧穿电流限制，宏观体现为焦平面处短路电流下降。电池放置在焦平面两侧，均可缓解局部高辐射功率，短路电流最高提升 8.0%。

关键词： 聚光光伏模组；菲涅耳透镜；多结电池；局部高辐射功率；短路电流；峰值隧穿电流

中图分类号： TM615　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0494－06

Influence of Local High Radiation on Short-circuit Current of Multi-junction Solar Cell under Fresnel Lens

JIANG Jingxiang, SHU Bifen, LIANG Qibing, HUANG Yan, CUI Gaojun, YU Zukang

(Institute for Solar Energy Systems, Sun Yat-sen University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Photovoltaic Technology, Guangzhou 510006, CHN)

Abstract: In order to explore the influence of local high radiation on short－circuit current of multi-junction solar cell in concentrated photovoltaic module with Fresnel lens as the concentrator, the diameters of the high bright spot of Fresnel lens were measured so as to measure the short-circuit current of the GaInP/GaInAs/Ge triple-junction solar cell with different sizes of lens under different local illumination areas. And the experimental results were analyzed by using circuit network model. The results show that the short-circuit current is independent of the area of bright spot, and the current along the optical axis changes synchronously with radiation when the small size Fresnel lens is focused. When the size of lens increases to a certain extent, high radiation presents inthe center of solar cell, and the current is limited by peak tunneling current, which is reflected as the decrease of short-circuit current at the focal plane. Putting the solar cell on both sides of the focal plane canalleviatethe local high radiation, and the short-circuit current can be increased by 8.0%.

Key words: concentrated photovoltaic module; Fresnel lens; multi-junction solar cells; local high radiation; short circuit current; tunneling current

收稿日期：2020－03－15.

基金项目：国家自然科学基金项目(U1707603)；广东省自然科学基金重点项目(2014A030311050).

* **通信作者：**舒碧芬

E-mail: shubifen@163.com

0　引言

聚光光伏(Concentrated Photovoltaics，CPV)是光伏发电的主要形式之一，它利用聚光器件将太阳光会聚到面积较小的电池表面，可分为线聚光和点聚光[1-2]。菲涅耳透镜是点聚光技术中主流的聚光器，可使 CPV 模组具有较高的聚光倍数(300～1 000 倍)。菲涅耳透镜聚焦光斑的能量分布形貌为高斯分布[3-5]，中心区域呈现局部高辐射功率，因而聚光模组里多结电池中间区域往往承受远高于电池边缘的光强[6-7]。

聚光光伏模组多采用以Ⅲ-Ⅴ族半导体材料为基础的多结太阳电池。常见的 GaInP/GaInAs/Ge 三结电池由 GaInP 顶电池、GaInAs 中电池、Ge 底电池串联而成。为避免子电池直接串联导致子电池反偏、开路电压抵消等现象[8]，需要在子电池之间插入半导体隧穿结，以构造电流通道，实现低阻连接。理想情况下，隧穿结需具备足够高的峰值隧穿电流密度 J_{peak}，以保证短路电流全部纵向通过隧穿结[9-10]。通常多结电池的短路电流密度 J_{sc} 与辐射功率呈线性关系，但辐射功率增大到一定程度，会出现 $J_{sc}>J_{peak}$ 的情况，此时过剩的电流转变为横向电流和热能，反而降低电池的性能[11-13]。在菲涅耳透镜聚焦下，多结电池表面不可避免出现局部高辐射功率，影响电池的短路电流。此外，电池与透镜的距离不同，聚焦光斑局部高辐射功率的面积和强度不同，同样会对短路电流造成影响。因此，研究菲涅耳透镜聚焦下，沿光轴方向多结电池表面局部高辐射功率对短路电流的影响，对电池的制备、模组光学系统的设计有重要意义。

本文首先研究沿光轴焦平面附近的聚焦光斑，测量光斑局部高辐射功率区域的直径；利用室内多结电池测试平台，根据前述直径测量实验，测试不同局部光照面积下三结电池的短路电流；再利用不同尺寸的透镜进行户外实际工况的实验，测量沿光轴的短路电流；最后通过三结电池三维电路网络模型，分析实验现象和解释局部高辐射功率对电流的影响机理，提出电流提升方案。

1　实验测量

1.1　沿光轴聚焦光斑的直径变化

实验设备包括室内平行光源、可调支架、菲涅耳透镜、受光板等，透镜直径选用 80，100 和 120 mm 三种不同尺寸，焦距为 100 mm。光线垂直入射菲涅耳透镜，经聚焦后在受光板表面形成光斑，利用可调支架调整菲涅耳透镜与受光板之间的距离，测量 −4～4 mm 光轴方向(焦平面处光轴位置 $Z=0$ mm)聚焦光斑的直径变化。

图 1 表示菲涅耳透镜聚焦后形成的光斑，可观察到光斑并非均匀分布，按亮度可将光斑分为内外圈，内圈区域亮度明显更高，表明光斑呈现局部高辐射功率，符合菲涅耳透镜聚焦光斑的能量分布形貌为高斯分布的特点。当受光板位于不同的光轴位置时，光斑能量分布形貌随之变化，测量光斑内圈直径的变化，表 1 为典型光轴位置的内圈直径 D，实验中观察到最小光斑的光轴位置约在 1 mm 处。对于本实验最大的透镜(直径 120 mm)，光斑内圈最大直径约 3.5 mm。

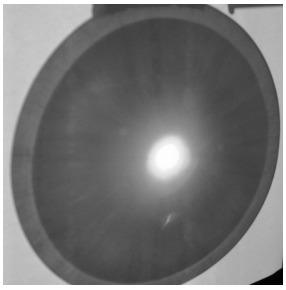


图 1　菲涅耳透镜的光斑示意图

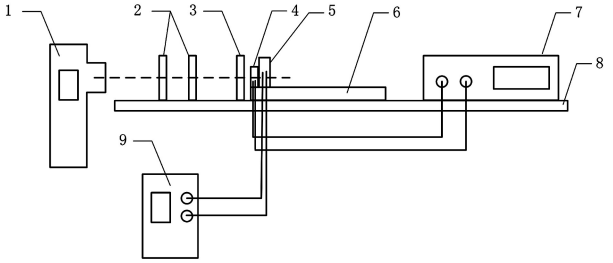
表 1　不同光轴位置的光斑内圈直径

光轴位置	不同尺寸透镜的内圈直径 D/mm		
Z/mm	直径 80 mm	直径 100 mm	直径 120 mm
−4.0	2.5	3.0	3.5
−2.0	1.5	2.0	2.5
0.0	1.0	1.5	2.0
2.0	1.5	2.0	2.5
4.0	2.5	3.0	3.5

1.2　室内局部光照下短路电流测试

菲涅耳透镜聚焦光斑呈高斯分布，实际模组中三结电池中心区域承受局部高辐射功率，可用局部光照的实验手段来模拟透镜聚焦，进而测试光电性能。测试平台如图 2 所示。将其按功能分为三部分：第一部分为光学系统，功能为提供所需的光照，出射均匀性良好的光斑，并调整光斑的直径、光轴位置等；第二、三部分为温度控制系统和测试系统。实验采用尺寸为 5 mm×5 mm 的 GaInP/GaInAs/Ge 三结电池，利用中心开有正方形孔洞的硅片实现局部光照。按照 1.1 节的结论，光斑内圈直径最大约 3.5 mm，本实验选用的开孔边长为 2，2.5，3 和

3.5 mm。实验时硅片置于电池正前方，电池表面接受光照的面积与硅片孔洞一致，以达到局部光照的效果。



1. 稳态氙灯太阳模拟光源；2. 透镜组；3. 中心开孔的硅片；4. 三结电池；5. 水冷散热器；6. 可调位移台；7. 数字源表；8. 光学减震平台；9. 水冷机

图 2 室内聚光光伏光电测试平台

实验结果如图 3 所示，本文采用局部聚光倍数 C 来描述电池表面接收的光能，将其定义为电池接收的辐照度（光辐射功率/孔洞面积）与标准辐照度（10^3 W/m^2）的比值。调整太阳模拟光源的功率，来保证不同光照面积通过相同的辐射功率，实验采用 8 个梯度的辐射功率。实验结果表明，辐射功率一定时，不同局部聚光倍数下短路电流基本相同，电流之间差别不超过 1.35%，可认为短路电流与局部光照的面积无关，只受辐射功率的影响。本实验局部聚光倍数 C 的最大值为 813，因此在聚光倍数为 813 倍以内，此三结电池的短路电流与辐射功率成正比。

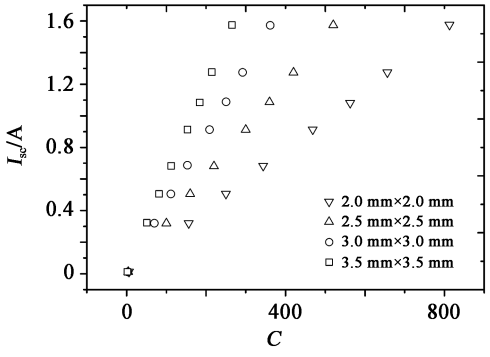


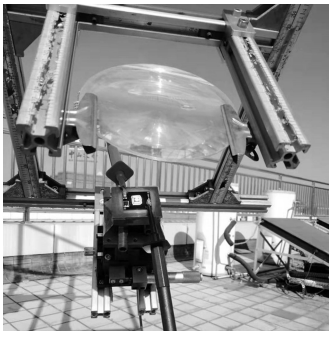
图 3 不同局部光照面积的短路电流随局部聚光倍数的变化

1.3 户外菲涅耳透镜下短路电流测试

利用图 4 所示的实验设备，进行户外菲涅耳透镜下沿光轴的三结电池短路电流测量。图 4(a)为双轴太阳跟踪器，工作平面时刻正对太阳，图 4(b)所示的实验设备固定在太阳跟踪器上，菲涅耳透镜位于三结电池正上方，通过三轴位移台调整三结电池与菲涅耳透镜的距离。分别使用直径为 60，80，100 和 120 mm 的透镜和尺寸为 5 mm×5 mm 的三结电池，测试的光轴范围在−4.0～4.0 mm，步长取 0.5 mm，辐照度为 750～800 W/m^2，环境温度为 24～25 ℃。



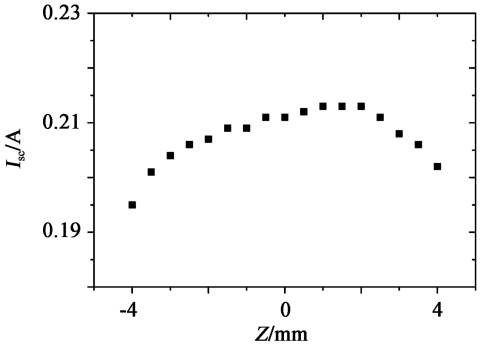
(a) 双轴太阳跟踪器



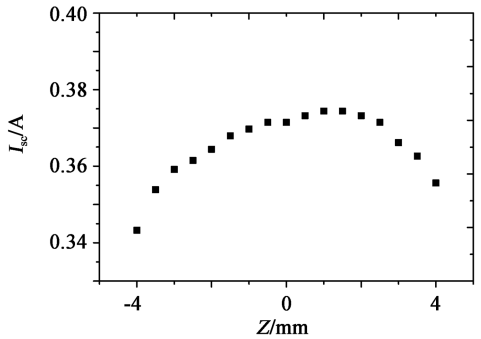
(b) 安装在双轴跟踪器上的实验设备

图 4 实验设备

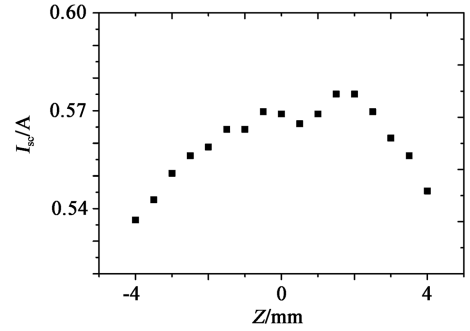
图 5 为不同尺寸的菲涅耳透镜下三结电池短路电流沿光轴的变化，数据为多次实验平均值。从图 5 可见，当透镜直径为 60，80 mm 时，短路电流先增大再减少，焦平面附近区域电流最大，这是由于远离焦平面的位置光斑直径大于电池面积，电池表面辐射功率低。但透镜直径为 100，120 mm 时，焦平面附近的短路电流存在极小值，焦平面两侧有极大值。100 mm 透镜下的焦平面处的短路电流相比两侧极大值分别下降 0.1%和 1.1%，120 mm 透镜下的电流下降幅度更大，分别下降 3.7%和 8.0%。



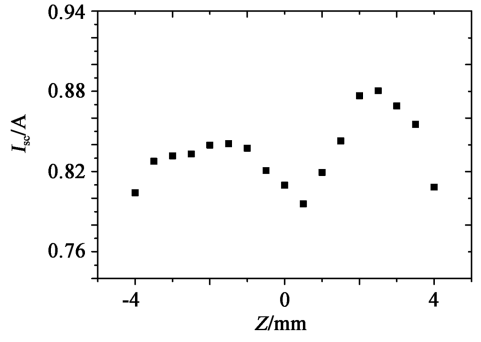
(a) 直径 60 mm



(b)　直径 80 mm



(c)　直径 100 mm



(d)　直径 120 mm

图 5　不同直径菲涅耳透镜下短路电流沿光轴位置的变化

对比 1.2 和 1.3 节的实验，在菲涅耳透镜聚焦下，透镜尺寸较小时，短路电流与辐射功率保持正相关关系，这与局部光照实验结论一致；但随着聚光倍数增大到一定程度，电池表面承受过高的局部辐射功率，短路电流的增长受到限制，宏观上体现为焦平面处的短路电流有所下降，而在焦平面两侧存在电流极大值。

2　理论分析

采用三结电池三维电路网络模型，对 1.2 节、1.3 节中短路电流实验结果进行分析，研究实验现象背后的机理。

2.1　三结电池三维电路网络模型

在聚光光伏模组中，三结电池承受非均匀光照，本文采用三结电池三维电路网络模型，此模型已被证实能很好地表征三结电池在非均匀光照和非均匀温度场的输出特性[14-15]。模型考虑更精细的电池物理结构，把三结电池整体分割为小电池阵列，小电池之间用横向电阻连接，每个小电池的光电特性根据表面的光照情况独立计算，输出特性相互独立。当电池阵列划分的网格足够精细时，模型能很好地匹配局部光照的情况。各子电池的 I-V 关系式如下：

$$\begin{cases} J_{\mathrm{t}} = J_{\mathrm{Lt}} - J_{0\mathrm{t}1}\left(\exp\dfrac{qV_{\mathrm{t}}}{kT}-1\right) - J_{0\mathrm{t}2}\left(\exp\dfrac{qV_{\mathrm{t}}}{2kT}-1\right) \\ J_{\mathrm{m}} = J_{\mathrm{Lm}} - J_{0\mathrm{m}1}\left(\exp\dfrac{qV_{\mathrm{m}}}{kT}-1\right) - J_{0\mathrm{m}2}\left(\exp\dfrac{qV_{\mathrm{m}}}{2kT}-1\right) \\ J_{\mathrm{b}} = J_{\mathrm{Lb}} - J_{0\mathrm{b}1}\left(\exp\dfrac{qV_{\mathrm{b}}}{kT}-1\right) - J_{0\mathrm{b}2}\left(\exp\dfrac{qV_{\mathrm{b}}}{2kT}-1\right) \end{cases} \tag{1}$$

式中，J_{t}，J_{m}，J_{b} 分别代表 GaInP，GaInAs，Ge 子电池的短路电流密度；J_{Lt}，J_{Lm}，J_{Lb} 分别代表各子电池的光生电流密度；$J_{0\mathrm{t}1}$，$J_{0\mathrm{t}2}$，$J_{0\mathrm{m}1}$，$J_{0\mathrm{m}2}$，$J_{0\mathrm{b}1}$，$J_{0\mathrm{b}2}$ 分别代表反向饱和电流密度；V_{t}，V_{m}，V_{b} 分别代表各子电池两端电压。

记子电池的吸收光谱区间为$[a,b]$，每个电池的光生电流密度 J_{L} 必须独立计算，表达式如式(2)：

$$J_{\mathrm{L}} = \int_a^b E(\lambda)S(\lambda)\mathrm{d}\lambda \tag{2}$$

式中，$S(\lambda)$为不同波长下对应的光谱响应值，$E(\lambda)$为不同波长下的太阳辐照度。在模拟计算中，光谱响应值 $S(\lambda)$利用外量子效率 $\eta_{\mathrm{ex}}(\lambda)$来换算[16]：

$$S(\lambda) = \frac{\eta_{\mathrm{ex}}(\lambda)\cdot\lambda\cdot q}{h\cdot c} \tag{3}$$

式中，$\eta_{\mathrm{ex}}(\lambda)$为外量子效率，同样与波长相关；$h$，$c$，$q$ 分别为普朗克常数、光速、电子电量。

考虑到三结电池中间区域可能承受极高的辐射功率，当短路电流过高时，隧穿结不再呈现电阻特性。为更好地反映分割后各个小电池的电流输出特性，子电池之间的隧穿结并不简单地用定值电阻代替，而是根据隧穿结的三种基本工作电流(隧穿电流、过剩电流和热扩散电流)进行模拟[17-18]。隧穿电流是能通过隧穿结并能纵向传导的短路电流，过剩电流为无法通过隧穿结而进行横向运输的电流，热扩散电流则代表电导率低的热扩散过程，三者之和存在峰值，即为峰值隧穿电流密度。

2.2　三结电池短路电流模拟分析

按照前述 1.2 节的实验条件，利用三结电池电

路网络模型，模拟不同局部光照面积下的短路电流，如图 6 所示。对比前述实验测量值可知，模拟值能很好地匹配实验结果，电路网络模型在局部聚光的条件下能很好地反映三结电池的输出特性。从模拟和实验数据可知，在局部聚光倍数 813 倍以内，短路电流与局部光照面积无关，与电池表面的辐射功率保持线性相关。

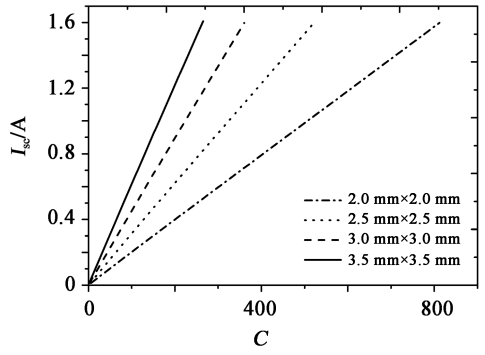
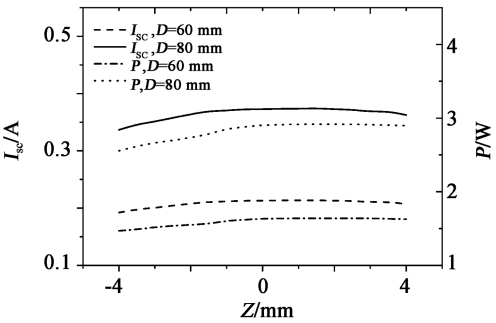
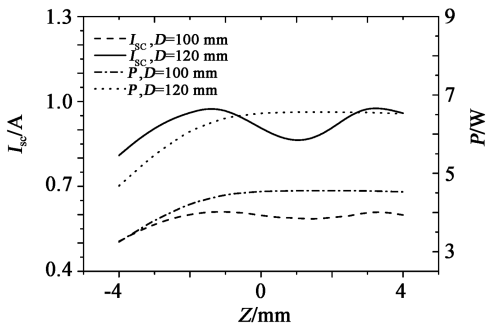


图 6 不同局部聚光面积下短路电流模拟值

利用电路网络模型模拟前述 1.3 节的户外实验，同时分析沿光轴电池表面的辐射功率，如图 7 所示，模拟结果同样与实验结果相吻合。透镜直径为 60 和 80 mm 时，短路电流与辐射功率同步变化；透镜直径为 100 和 120 mm 时，焦平面附近的辐射功率不能被充分转化为短路电流，直径 120 mm 的透镜下降幅度更大，焦平面两侧有短路电流极大值。



(a) 透镜直径为 60 和 80 mm



(b) 透镜直径为 100 和 120 mm

图 7 不同直径菲涅耳透镜下短路电流和辐射功率模拟值

进一步分析菲涅耳透镜下三结电池内部机理，发现当聚光倍数提升到一定程度，电池表面局部强光照会影响短路电流。此时短路电流除了受辐射功率的影响，还受峰值隧穿电流的影响。当各个子电池的电流均小于峰值隧穿电流时，电池内部电流的纵向运输受到限制，电流将无法全部通过隧穿结。

相比于底部隧穿结，通常三结电池顶部隧穿结的峰值隧穿电流密度更低[19]，模拟计算中三结电池的顶部峰值隧穿电流密度按文献[8]取 150 A/cm^2。在直径为 60 和 80 mm 透镜下，各子电池的电流小于峰值隧穿电流，因而三结电池的短路电流变化与辐射功率的变化基本一致，局部高辐射功率不影响短路电流。但在直径为 100 和 120 mm 透镜下，电池中心局部辐射功率过高，短路电流受限。

以直径为 120 mm 的菲涅耳透镜为例，几何聚光比（透镜面积与电池面积之比）为 452 倍，当电池位于焦平面（$Z=0$ mm）时，光斑直径为 3.9 mm，整个光斑的聚光比（透镜面积与光斑面积之比）为 947 倍。而且光斑能量分布形貌为高斯分布，光斑中心局部聚光倍数最高可达 18 800 倍。电池中心局部 0.31 mm^2 的区域短路电流密度 J_{sc} 大于峰值隧穿电流密度 J_{peak}，该区域只有部分光能转化为电流，存在短路电流损失。定义损耗短路电流密度 J_{loss} 为各子电池电流 J_t，J_m，J_b 的最小值与 J_{peak} 的差，计算 $-4\sim4$ mm 光轴区域的三结电池短路电流和损耗短路电流（如图 8），在 $-1\sim3$ mm 的光轴区间两者存在负相关关系。计算三结电池短路电流和损耗短路电流之和，得出两者之和在焦平面附近电流较为平坦，类似直径为 60 和 80 mm 的菲涅耳透镜下短路电流曲线形貌。此外，三结电池放置在稍远离焦平面的光轴位置，J_{loss} 的降低使得短路电流得以优化，在焦平面两侧出现极大值，最多可提升 8.0%。

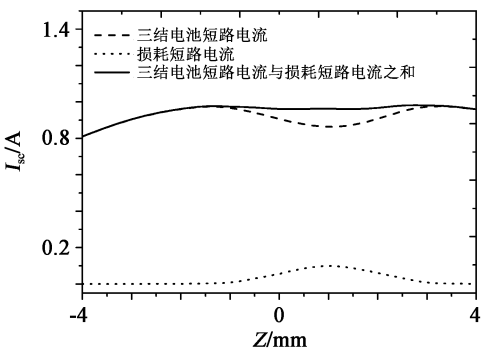


图 8 三结电池短路电流与损耗短路电流的关系

因此在实际工况下，局部高辐射功率不影响短路电流的前提是 $J_{sc}<J_{peak}$。菲涅耳透镜聚焦下的光斑呈显著的高斯分布，当聚光倍数增长到一定程度，在隧穿结的影响下出现短路电流损耗，宏观上表现为焦平面附近三结电池短路电流下降。通过改变电池所在的光轴位置，能有效降低短路电流损耗，从而提升电池的短路电流。

3　结论

考虑聚光光伏模组中多结电池表面存在局部高辐射功率，首先从实验上研究在菲涅耳透镜下，焦平面附近高亮度的内圈光斑直径；然后根据内圈光斑直径，在室内太阳光源下测试局部光照的三结电池短路电流；继而进行户外实际工况的实验，通过数值模拟分析电池内部机理。结果表明，在一定辐射功率下，短路电流与局部光照的面积无关，只与辐射功率有关；户外实际工况中，透镜尺寸较小时，沿光轴短路电流与辐射功率同步变化；但当透镜尺寸增大到一定程度，在焦平面附近存在短路电流极小值。这是由于聚光倍数上升到一定程度时，电池中心局部区域承受极高的辐射功率，局部区域短路电流密度 J_{sc} 受峰值隧穿电流密度 J_{peak} 的限制，造成电池整体短路电流损失。改变菲涅耳透镜和三结电池的距离，可缓解局部高辐射功率，相比焦平面处短路电流可提升 8.0%。

目前商用的聚光模组，尤其是高倍聚光模组的设计和产业化应用，为降低成本大多采用 500 或 1 000 倍的聚光倍数，多结电池中心局部区域可能承受过高辐射功率，输出电流受峰值隧穿电流限制。因此在聚光模组的设计中，需要考虑三结电池峰值隧穿电流和聚光倍数的平衡，可通过增大半导体掺杂浓度、适当降低隧穿结厚度等手段来提高峰值隧穿电流，或采用本文提出的优化三结电池的光轴位置的方法，从而优化模组工作性能。

参考文献：

[1] Luque A L, Viacheslav A. Concentrator Photovoltaics[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 7.

[2] Zhu L, Boehm R F, Wang Y, et al. Water immersion cooling of PV cells in a high concentration system[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95(2): 538-545.

[3] Guiqiang L, Qingdong X. Effect of non-uniform illumination and temperature distribution on concentrating solar cell-A review[J]. Energy, 2018, 144: 1110-1136.

[4] Yaling H, Kun W, Yu Q, et al. Review of the solar flux distribution in concentrated solar power: Non-uniform features, challenges, and solutions[J]. Appl. Thermal Engin., 2019, 149: 448-474.

[5] Garcia I, Rey-Stolle I, Galiana B, et al. A 32.6% efficient lattice-matched dual-junction solar cell working at 1 000 suns [J]. Appl. Phys. Lett., 2009, 94(3): 053509.1-053509.3.

[6] Bunthof L A A, Haverkamp E J, Van d W D, et al. Influence of laterally split spectral illumination on multi-junction CPV solar cell performance[J]. Solar Energy, 2018, 170: 86-94.

[7] Herrero R, Victoria M, Dominguez C, et al. Concentration photovoltaic optical system irradiance distribution measurements and its effect on multijunction solar cells[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2012, 20(4): 423-430.

[8] 宋明辉. 聚光多结太阳能电池的设计、制备及可靠性研究[D]. 武汉：华中科技大学，2012.
Song Minghui. Design, fabrication and reliability study of concentrator multi-junction solar cells[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.

[9] Paquette B, Devita M, Turala A, et al. Optimization of p-doping in AlGaAs grown by CBE using TMA for AlGaAs/GaAs tunnel junctions[J]. J. of Crystal Growth, 2013, 374(374): 1-4.

[10] Dimroth F, Beckert R, Meusel M, et al. Metamorphic $Ga_yIn_{1-y}P/Ga_{1-x}In_xAs$ tandem solar cells for space and for terrestrial concentrator applications at $C>1\ 000$ suns[J]. Progress in Photovoltaics Research and Applications, 2001, 9(3): 165-178.

[11] 蔡建九，单智发，张　永，等. 高倍聚光 GaInP/InGaAs/Ge 三结太阳电池研究[J]. 半导体技术，2013，38(4)：241-247.
Cai Jianjiu, Shan Zhifa, Zhang Yong, et al. Research of GaInP/InGaAs/Ge triple junction solar cells for high concentrating photovoltaics[J]. Semiconductor Technology, 2013, 38(4): 241-247.

[12] Guter W, Bett A W. IV-characterization of devices consisting of solar cells and tunnel diodes[C]// Proc. of Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference, 2006: 749-752.

[13] Espinet P, Garcia I, Rey-Stolle I, et al. Extended description of tunnel junctions for distributed modeling of concentrator multi-junction solar cells[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95(9): 2693-2697.

[14] Steiner M, Guter W. A validated spice network simulation study on improving tunnel diodes by introducing lateral conduction layers[J]. Progress in Photovoltaics Research and Applications, 2012, 20(3): 274-283.

[15] Galiana B, Algora C, Rey-Stolle I, et al. A 3-d model for concentrator solar cells based on distributed circuit units[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2005, 52(12): 2552-2558.

（下转第 504 页）

4 总结

本文设计的半导体激光驱动电路以STM32F103RG系列ARM芯片作为主控芯片，实现了半导体激光器温度调谐，其中温度调谐范围为0～50 ℃，波长调谐范围为5 nm，在温度改变过程中激光器的输出光功率能够保持稳定。通过嵌入式程序能够调整激光器的温度变化范围和输出光功率稳定值。同时，通过引入0点启动程序，减少了因激光器上电时的冲击电流而产生的损坏，可有效延长激光器的工作寿命。实验证明，本设计电路正确有效，能够保证激光器长时间稳定地工作。

参考文献：

[1] 孙 安，陈嘉琳，李国扬，等. 基于高频微波技术的分布式光纤传感器布里渊散射信号检测[J]. 中国激光，2007，34(4)：503-506.
Sun An，Chen Jialin，Li Guoyang，et al. Detection of spontaneous Brillouin backscattered power in distributed optical fiber sensor system based on high frequency microwave technology[J]. Chinese J. of Lasers，2007，34(4)：503-506.

[2] 陈学岗，万 雄，朱泉水. LD温度控制系统在光纤磁场传感器中的应用[J]. 传感器技术，2004，23(3)：51-53.
Chen Xuegang，Wan Xiong，Zhu Quanshui. Application of LD temperature control system in optical fiber magnetic field sensors[J]. Transducer and Microsystem Technologies，2004，23(3)：51-53.

[3] 崔春艳，胡新宁，赵尚武，等. 一种光纤传感器光源驱动电路的设计[J]. 传感器与微系统，2007，26(9)：98-100.
Cui Chunyan，Hu Xinning，Zhao Shangwu，et al. Design of driving circuit for fiber-optic sensor light source[J]. Transducer and Microsystem Technologies，2007，26(9)：98-100.

[4] STMicroelectronics Corporation. STM32F103xx Datasheet [H]. ST Microelectronics Corporation，2015.

[5] Chen C. Evaluation of resistance-temperature calibration equations for NTC thermistors[J]. Measurement，2009，42(7)：1103-1111.

[6] 李金义，杜振辉. 利用热敏电阻精确测量DFB激光器动态结温度[J]. 仪器仪表学报，2012，33(9)：2088-2093.
Li Jinyi，Du Zhenhu. High precision dynamic junction temperature estimation for DFB laser using thermistor[J]. Chinese J. of Scientific Instrument，2012，33(9)：2088-2093.

[7] 邱选兵，李 宁，孙冬远，等. 小型化高稳定半导体激光驱动电路研究[J]. 激光与红外，2018，48(4)：469-475.
Qiu Xuanbing，Li Ning，Sun Dongyuan，et al. Research on driving circuit for miniaturized high stable semiconductor laser [J]. Laser & Infrared，2018，48(4)：469-475.

[8] Chen K，Lin G T. Optimization of multiple-module thermoelectric coolers using artificial-intelligence techniques [J]. Inter. J. of Energy Research，2002，26(14)：1269-1283.

[9] 伏燕军，邹文栋，肖慧荣，等. 半导体激光器驱动电路的光功率控制的研究[J]. 红外与激光工程，2005，34(5)：626-630.
Fu Yanjun，Zou Wendong，Xiao Huirong，et al. Optic power control of LD drive circuit[J]. Infrared and Laser Engin.，2005，34(5)：626-630.

[10] 李成仁，宋昌烈，李淑凤，等. 半导体激光器输出波长随工作电流变化的实验研究[J]. 红外与激光工程，2003，32(2)：144-147.
Li Chengren，Song Changlie，Li Shufeng，et al. Experimental investigation of the change of semiconductor laser output wavelength corresponding to operation current[J]. Infrared and Laser Engin.，2003，32(2)：144-147.

[11] 梁 迅，姚 琼. 高稳定高集成度半导体激光光源驱动器[J]. 半导体光电，2007，28(3)：427-429.
Liang Xun，Yao Qiong. High stability and highly integrated laser diode driver[J]. Semiconductor Optoelectronics，2007，28(3)：427-429.

作者简介：

柯文雄(1994—)，男，福建人，硕士，主要研究方向为光纤传感系统；

江 毅(1967—)，男，博士，教授，主要研究方向为光纤传感器。

(上接第499页)

[16] Chander S，Purohit A，Nehra A，et al. A study on spectral response and external quantum efficiency of mono-crystalline silicon solar cell [J]. Inter. J. of Renewable Energy Research，2014，5(1)：41-44.

[17] Bett A W，Baur C，Dimroth F，et al. FLATCON/spl trade/-modules：technology and characterisation[C]// Proc. World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion. IEEE，2003，1：634-637.

[18] 陈 帅，杨瑞霞，吴亚美. Ⅲ-Ⅴ多结太阳电池隧道结模型的研究进展[J]. 微纳电子技术，2015，52(9)：6-14.
Chen Shuai，Yang Ruixia，Wu Yamei. Research process of tunnel junction models in Ⅲ-Ⅴ multi-junction solar cells[J]. Micronanoelectronic Technology，2015，52(9)：6-14.

[19] Steiner M，Guter W，Peharz G，et al. A validated SPICE network simulation study on improving tunnel diodes by introducing lateral conduction layers [J]. Progress in Photovol. Research and Appl.，2012，20(3)：274-283.

作者简介：

江景祥(1994—)，男，广东江门人，硕士生，研究方向为聚光光伏技术；

舒碧芬(1966—)，女，博士，教授，主要从事太阳能利用、节能技术，以及纳米能源材料方面的研究。