

聚光型砷化镓太阳能电池芯片栅线占空比研究

王 硕¹, 杨文奕², 李 野¹, 张小宾², 姚洪涛¹

¹长春理工大学物理学院, 吉林 长春

²中山德华芯片技术有限公司, 广东 中山

收稿日期: 2026年8月29日; 录用日期: 2026年9月22日; 发布日期: 2026年9月30日

摘 要

为优化柔性衬底聚光型砷化镓太阳电池的正面电极结构, 本文系统研究了栅线占空比对电池性能的影响机制。采用柔性芯片剥离工艺制备砷化镓太阳电池, 设计了两组线宽(5 μm 、7 μm)与三组间距(200 μm 、300 μm 、400 μm)交叉组合的6种栅线版图, 占空比分别为1.23%、1.64%、1.72%、2.28%、2.44%和3.38%, 在AM0聚光条件下(聚光倍数159.20~263.87倍)测试了电池的电学性能。实验结果表明: 在相同聚光倍数下, 填充因子(FF)随占空比增大而提高, 短路电流(Isc)总体呈降低趋势, 二者呈反向变化关系; 电池转换效率存在最优占空比, 且最优占空比随聚光倍数提高呈增大趋势。当聚光倍数为206.34倍时, 版图A1(栅线宽度5 μm 、间距200 μm 、占空比2.44%)测得整体最高转换效率40.72%。本研究为柔性衬底聚光型砷化镓太阳电池的电极结构优化提供了实验依据。

关键词

聚光光伏, 柔性砷化镓太阳电池, 电极占空比, 栅线优化, 填充因子, 聚光倍数

Research on Optimization of Grid Shadowing Ratio for Concentrator GaAs Solar Cells

Shuo Wang¹, Wenyi Yang², Ye Li¹, Xiaobin Zhang², Hongtao Yao¹

¹School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

²Uni watt Technology Co., Ltd., Zhongshan Guangdong

Received: August 29, 2026; accepted: September 22, 2026; published: September 30, 2026

Abstract

To optimize the front electrode structure of flexible concentrator GaAs solar cells, this paper systematically investigates the influence mechanism of grid line duty cycle on cell performance. GaAs solar cells were fabricated by flexible chip lift-off process, and six grid patterns with two line widths

文章引用: 王硕, 杨文奕, 李野, 张小宾, 姚洪涛. 聚光型砷化镓太阳能电池芯片栅线占空比研究[J]. 材料科学, 2026, 16(10): 25-36. DOI: 10.12677/ms.2026.1610187

(5 μm , 7 μm) and three spacings (200 μm , 300 μm , 400 μm) were designed, with duty cycles of 1.23%, 1.64%, 1.72%, 2.28%, 2.44% and 3.38%, respectively. The electrical properties of the cells were tested under AM0 concentrated illumination with concentration ratios ranging from 159.20 to 263.87 suns. The experimental results show that under the same concentration ratio, the fill factor (FF) increases with the increase of duty cycle, while the short-circuit current (I_{sc}) generally decreases, exhibiting an inverse relationship between the two. The cell conversion efficiency reaches its maximum at an optimal duty cycle, and the optimal duty cycle increases with increasing concentration ratio. When the concentration ratio is 206.34 suns, pattern A1 (line width of 5 μm , spacing of 200 μm , duty cycle of 2.44%) achieves the overall highest conversion efficiency of 40.72%. This study provides experimental guidance for electrode structure optimization of flexible concentrator GaAs solar cells.

Keywords

Concentrator Photovoltaics, Flexible GaAs Solar Cell, Electrode Duty Cycle, Grid Optimization, Fill Factor, Concentration Ratio

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

聚光光伏(CPV)技术通过光学聚光元件将太阳光汇聚至高效太阳电池表面[1], 可有效提高光生载流子密度、提升光电转换效率, 是降低光伏发电成本的重要途径之一[2]。在各类太阳电池中, 砷化镓(GaAs)基多结电池因其禁带宽度匹配合理、可实现对太阳光谱的分段吸收、温度特性好及耐辐照性能强等优势, 始终保持着光电转换效率的领先地位[3]。

近年来, 柔性砷化镓太阳电池因其重量轻、可弯曲、功率密度高等优势, 在无人机、飞艇、便携式移动电源及空间能源等领域展现出广阔的应用前景。采用外延层剥离(Epitaxial Lift-Off, ELO)技术, 可将砷化镓电池外延层从生长衬底上分离并转移至柔性衬底, 在保持高转换效率的同时实现轻量化, 基于PI或Cu衬底的柔性薄膜砷化镓太阳电池因具备轻质、高比功率和可弯曲特性, 成为未来空间飞行器的重要选择[4][5]。然而, 柔性衬底的引入以及外延层剥离工艺的特殊性, 对电池正面电极的结构设计和制备工艺提出了新的挑战。

对于聚光型太阳电池, 随着聚光倍数的提高, 光生电流密度成倍增加, 串联电阻引起的功率损耗以平方形式增大。电极结构的设计与优化成为提升电池效率的关键, 已有研究围绕栅线参数开展了系统的设计与分析[6][7]。太阳电池的串联电阻 R_s 可分解为背电极接触电阻 r_{bc} 、半导体体电阻 r_B 、正面电极接触电阻 r_{fc} 、正面电极栅线体电阻 r_G 以及电流经外延层横向传导至栅状电极的薄膜电阻 r_L 等分量, 各分量与电极设计的依赖关系可由下述解析关系刻画: (1) r_L 近似与栅线间距 W_s 的平方成正比、与外延层方块电阻成反比, 缩小 W_s 可显著降低 r_L ; (2) r_G 与栅线宽度 W_l 成反比、与栅线材料的体电阻率成正比; (3) r_{bc} 与 r_{fc} 由金属-半导体接触界面的比接触电阻决定, 占空比对二者的直接影响较弱, 但密集栅线带来的局部电流分担效应可降低对单一栅线接触质量的严苛要求; (4) r_B 主要由基区厚度与掺杂浓度决定, 占空比变化对其影响很小。在聚光条件下, 串联电阻引起的总功率损耗近似为 $P_{loss} = I_{ph}^2 \cdot R_s$ (I_{ph} 为光生光电流), 随聚光倍数提升呈平方级增长[8]。其中, 薄膜电阻 r_L 是 R_s 中最主要的组成部分, 降低薄膜电阻的有效途径是缩小电极栅线间距, 但这将增加栅线数量、增大遮光面积, 导致短路电流 I_{sc} 下降[9]。因

此，电极设计需在遮光损失与串联电阻损耗之间寻求最优平衡[6] [7]。

目前关于柔性衬底聚光型砷化镓太阳电池电极占空比优化研究报道较少。本文采用柔性芯片剥离工艺制备砷化镓太阳电池，设计不同占空比的栅线版图，系统研究电极占空比对电池填充因子、短路电流及转换效率的影响规律，为柔性聚光砷化镓太阳电池的电极结构优化提供实验依据。

2. 实验

2.1. 电池制备

本研究选用金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术，在高质量的 GaAs 衬底上精确生长太阳电池外延结构，该工艺凭借其对生长速率与组分的高可控性，为制备高性能 III-V 族化合物电池奠定了坚实基础。随后，利用先进的晶圆级外延层剥离工艺，将生长完成的功能层完整转移至柔性衬底[10]，从而赋予器件优异的机械柔韧性与轻量化特性，拓展了其在可穿戴设备及曲面航天器中的应用场景。在电极制备环节，采用高真空电子束蒸镀工艺构建多层复合电极体系，具体结构为 AuGeNi/Au/Ti/Ag/Au。其中，底部的 AuGeNi/Au 层经快速热退火形成低电阻欧姆接触，有效降低界面势垒；中间 Ag 层作为主体导电层，承担大电流传输任务；Ti 层显著增强金属与半导体界面的粘附力，防止剥离失效；顶层 Au 则提供抗氧化保护。最终制备的电池芯片结构如图 1 所示，规格为 1 cm × 1.2 cm，总电极厚度精确控制在 6.1 μm，兼顾了光学透过率与电学传输效率。



Figure 1. Structure diagram of the triple-junction flexible GaAs solar cell chip

图 1. 三结柔性砷化镓太阳能电池芯片结构示意图

$$r_s = r_{BC} + r_v + r_{FC} + r_G + r_L \tag{1}$$

电池串联电阻 r_s 是太阳电池中电流传输过程中的总电阻，主要包括以下几个部分[7]：背电极接触电阻 r_{BC} ：电池背面电极与半导体材料之间的接触电阻。半导体材料体电阻 r_v ：半导体材料本身的电阻。正面电极接触电阻 r_{FC} ：正面电极与半导体材料之间的接触电阻。正面电极体电阻 r_G ：正面电极材料本身的电阻。薄膜电阻 r_L ：电流在半导体外延层中横向传输至栅状电极时产生的电阻，这是串联电阻的主要组

成部分。

薄膜电阻 r_L 的大小与电极栅线的间距和宽度密切相关。减小栅线间距可以缩短电流的横向传输路径，从而降低薄膜电阻，但必须同时减小栅线宽度以避免增加电极遮光面积。因此，在优化电极设计时，需要综合考虑栅线宽度、间距和占空比，以实现电池效率的最大化。

2.2. 栅线版图设计

本研究为系统性探讨聚光型砷化镓太阳能电池芯片中栅线占空比对电池性能的影响机制，设计并构建了六组具有梯度化占空比参数的栅线结构。具体而言，通过组合不同线宽与线间距参数，构建了两组线宽参数(5 μm /7 μm)与三组线间距参数(200 μm /300 μm /400 μm)的交叉实验矩阵，由此形成的占空比分别为 5/205 (2.44%)、5/305 (1.64%)、5/405 (1.23%)、7/207 (3.38%)、7/307 (2.28%)和 7/407 (1.72%)。为确保实验对比的科学性，所有结构均采用相同的栅线厚度参数，使用 F_s 代表占空比，实验设计如表 1 所示。

Table 1. Experimental design of grid line duty ratio

表 1. 栅线占空比实验设计分组

实验设计	电极厚度(μm)	栅线宽度(μm)	栅线间距(μm)	占空比 F_s (%)
A1	6.1	5	200	2.44
A2	6.1	5	300	1.64
A3	6.1	5	400	1.23
B1	6.1	7	200	3.38
B2	6.1	7	300	2.28
B3	6.1	7	400	1.72

2.3. 性能测试

电池的电学性能测试在 AM0 聚光条件下进行[11]，聚光倍数分别设置为 159.20 倍、175.90 倍、190.88 倍、206.34 倍、236.57 倍和 263.87 倍，采用太阳模拟器作为光源，通过调节光源与电池之间的距离实现不同聚光倍数。测试参数包括短路电流(I_{sc})、开路电压(V_{oc})、最大功率(PM)、填充因子(FF)、最大功率点电压(V_m)和电流(I_m)等。

聚光倍数是由聚光设备与单倍 AM0 测试设备对标得到如表 2 所示，具体是采用规格为 1 cm $\times$ 1.2 cm 的电池分别在聚光设备和单倍 AM0 设备测试电流，聚光倍数等于聚光下电流除以单倍 AM0 设备下电流。聚光设备调整了 Z 轴设置距离，该距离为光源到电池的距离，设置数值越大光源距离电池越近，可以视为增加聚光倍数，0~50 mm 为设备物理调节窗口。表 2 中数据为相同电池在不同条件下测试 3 次的均值，单倍下对比的为同一颗电池，所以表 2 中的单倍电流数据一致。

Table 2. Conversion of the concentration ratio of the concentrator equipment

表 2. 聚光设备聚光倍数换算

聚光设备 Z 轴设置距离 (mm)	聚光设备测试电流 I_{sc} 聚光(mA)	单倍 AM0 设备测试电流 I_{sc} 单倍(mA)	聚光倍数 C
0	2680.34	16.84	159.20
10	2961.59	16.84	175.90
20	3214.19	16.84	190.88

续表

30	3471.61	16.84	206.34
40	3983.07	16.84	236.57
50	4442.71	16.84	263.87

$$C = I_{sc_{\text{聚光}}} / I_{sc_{\text{单倍}}}$$

(2)

3. 结果与讨论

3.1. 栅线占空比对填充因子的影响

图 2 所示为 159.20 聚光倍数下电池填充因子(FF)随栅线占空比的变化关系。从图中可以看出，在同一聚光倍数下，填充因子随占空比的增大而提高。以栅线 5 μm 为例，占空比从 1.23% (5/405)提高至 2.44% (5/205)时，FF 均值从 75.43%提高至约 87.36%。这一趋势与文献报道一致[6] [7]，占空比增大意味着栅线间距减小，电流横向传输路径缩短，薄膜电阻降低，从而减少了串联电阻性损耗。

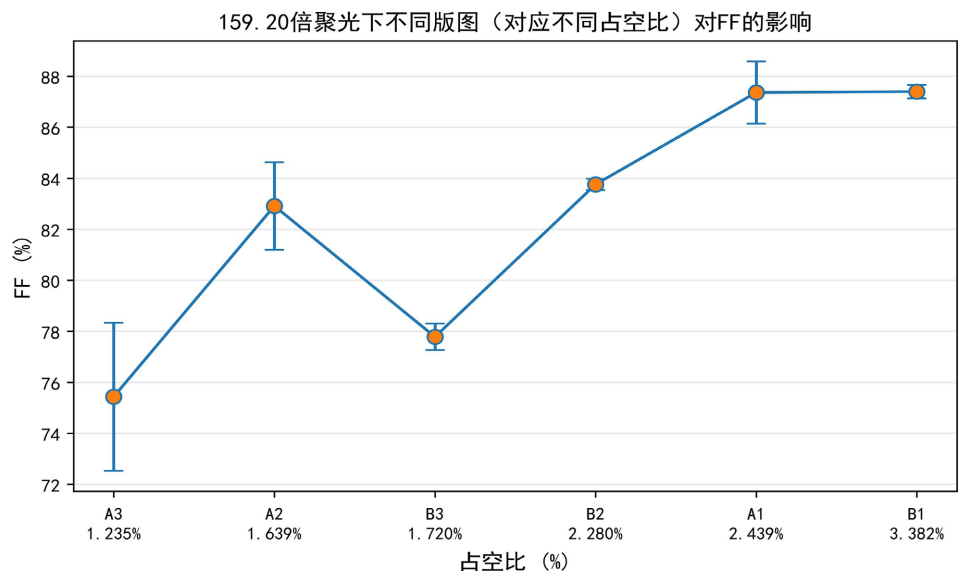


Figure 2. Effect of different layouts (corresponding to different duty ratios) on fill factor (FF) under 159.20× concentration (mean ± SD of 5 samples)

图 2. 159.20 倍下不同版图(对应不同占空比)对 FF 的影响(5 样本均值 ± 标准差)

Table 3. Summary of fill factor (FF) under different concentration ratios

表 3. 不同聚光倍数下 FF 汇总

聚光倍数 C	版图	FF 均值(%)
159.20	A1	87.36
	A2	82.91
	A3	75.43
	B1	87.40
	B2	83.76
	B3	77.78

续表

175.90	A1	86.99
	A2	81.96
	A3	73.48
	B1	87.16
	B2	83.09
	B3	76.70
190.88	A1	86.86
	A2	81.27
	A3	72.09
	B1	86.95
	B2	82.32
	B3	75.35
206.34	A1	86.36
	A2	80.23
	A3	70.15
	B1	86.84
	B2	81.56
	B3	73.86
236.57	A1	86.01
	A2	78.14
	A3	68.19
	B1	86.15
	B2	80.34
	B3	72.14
263.87	A1	85.42
	A2	76.09
	A3	62.16
	B1	85.59
	B2	78.46
	B3	69.21

表 3 整理了 159.20 倍、175.90 倍、190.88 倍、206.34 倍、236.57 倍和 263.87 倍下不同版图的 FF 均值，可以看出栅线 5 μm 和 7 μm 都随着栅线间距的缩短填充因子递增，在相同栅线间距下 7 μm 的填充因子要优于 5 μm 栅线宽度，主要是占空比有所提升。值得注意的是，FF 随占空比的增大并非线性增长，而是呈现饱和趋势。当占空比从 1.23%增至 2.44%时，FF 提升幅度较大；而从 2.44%增至 3.38%时，FF 的提升幅度明显减小。这是由于填充因子反映的是电池串联电阻性损耗[12]，其与电流的平方成正比，随着占空比增大，电阻性损耗的降低幅度逐渐减弱。

3.2. 占空比对短路电流的影响

图3所示为聚光倍数159.20下电池短路电流(I_{sc})随电极占空比的变化关系。结合表4汇总结果表明,在同一聚光倍数下,短路电流随占空比的增大而减小。以159.2倍聚光为例,占空比从1.23% (5/405)提高至2.44% (5/205)时, I_{sc} 均值从2.79A降至约2.69A。这是因为占空比增大意味着栅线遮光面积增加,有效受光面积减小,光生电流的收集效率下降。但是在190.88倍、206.34倍和236.57倍条件下数据呈现出一定的波动性, I_{sc} 与占空比之间并非严格的单调线性关系,可能是在聚光条件下光斑在芯片表面的分布不完全均匀,对于栅线间距较大的版图,若光斑集中在远离栅线的区域,载流子横向输运距离增加,复合几率增大,实际收集到的电流可能低于预期。电极结构的设计与优化成为提升电池效率的关键,已有研究围绕栅线参数开展了系统的设计与分析[13]。

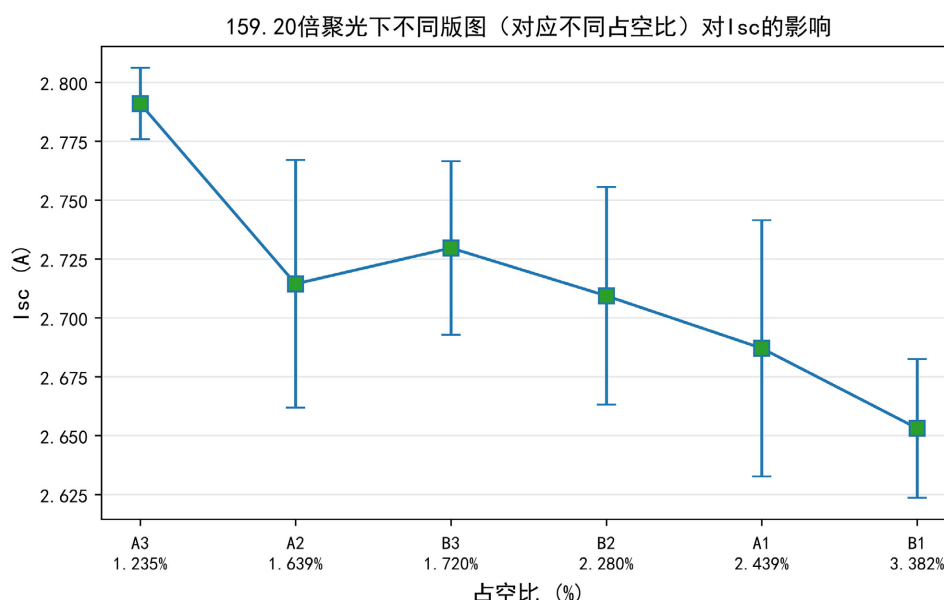


Figure 3. Effect of different layouts (corresponding to different duty ratios) on short-circuit current (I_{sc}) under 159.20 $\times$ concentration (mean $\pm$ SD of 5 samples)

图3. 159.20倍下不同版图(对应不同占空比)对短路电流(I_{sc})的影响(5样本均值 $\pm$ 标准差)

Table 4. Summary of short-circuit current (I_{sc}) under different concentration ratios

表4. 不同聚光倍数下短路电流(I_{sc})汇总

聚光倍数 C	版图	I_{sc} (A)
159.20	A1	2.69
	A2	2.71
	A3	2.79
	B1	2.65
	B2	2.71
	B3	2.73
175.90	A1	2.96
	A2	3.04

续表

	A3	3.04
	B1	2.96
	B2	2.99
	B3	3.01
190.88	A1	3.28
	A2	3.30
	A3	3.28
	B1	3.22
	B2	3.29
	B3	3.29
206.34	A1	3.61
	A2	3.65
	A3	3.61
	B1	3.50
	B2	3.58
	B3	3.61
236.57	A1	4.03
	A2	4.10
	A3	4.02
	B1	3.99
	B2	4.03
	B3	3.99
263.87	A1	4.45
	A2	4.50
	A3	4.62
	B1	4.47
	B2	4.54
	B3	4.55

开路电压(Voc)随占空比的变化不明显,基本维持在 3.41~3.45 V 范围内。根据理想二极管模型 $V_{oc} = (nkT/q) \cdot \ln(I_{sc}/I_0 + 1)$ [9], Voc 由半导体材料的禁带宽度(决定暗电流 I_0)和光生电流 I_{sc} 共同决定;在电池材料、聚光倍数与结温固定的情况下,占空比(即遮光面积)的变化对 I_{sc} 的影响在对数尺度下被显著压缩,因而对 Voc 的影响极为有限,可认为 Voc 基本不随占空比变化。

3.3. 电池效率的优化

图 4 所示为不同聚光倍数下电池转换效率随电极占空比的变化关系。由于填充因子随占空比增大而提高,短路电流随占空比增大而降低,二者对效率的影响相反,因此存在最优占空比使电池效率最大化。

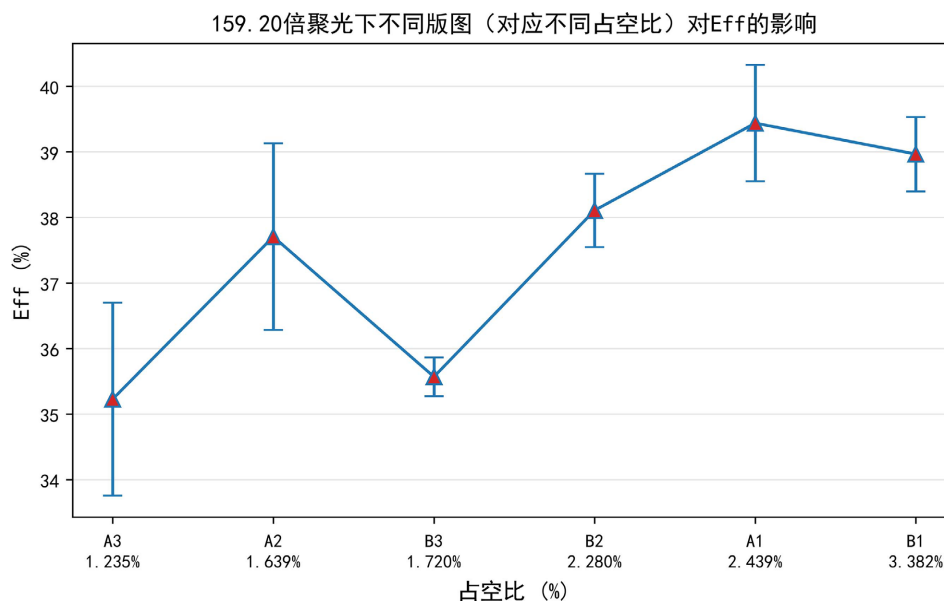


Figure 4. Effect of different layouts (corresponding to different duty ratios) on efficiency (Eff) under 159.20 $\times$ concentration (mean $\pm$ SD of 5 samples)

图 4. 159.20 倍下不同版图(对应不同占空比)对效率(Eff)的影响(5 样本均值 $\pm$ 标准差)

Table 5. Summary of efficiency (Eff) under different concentration ratios

表 5. 不同聚光倍数下效率 EFF 汇总

聚光倍数 C	版图	EFF (%)
159.20	A1	39.44%
	A2	37.71%
	A3	35.23%
	B1	38.97%
	B2	38.11%
	B3	35.57%
175.90	A1	39.21%
	A2	37.89%
	A3	33.93%
	B1	39.33%
	B2	37.78%
	B3	35.13%
190.88	A1	40.10%
	A2	37.67%
	A3	33.11%
	B1	39.46%
	B2	38.06%
	B3	34.80%

续表

206.34	A1	40.72%
	A2	38.09%
	A3	32.86%
	B1	39.67%
	B2	38.10%
	B3	34.76%
236.57	A1	39.63%
	A2	36.43%
	A3	31.15%
	B1	39.31%
	B2	36.89%
	B3	32.72%
263.87	A1	39.02%
	A2	35.03%
	A3	29.23%
	B1	39.31%
	B2	36.53%
	B3	32.19%

如表 5 实验结果表明, 5/7 μm 栅线均随着栅线间距加大, 电池效率呈现下降趋势。在不同聚光倍数下, 最优效率有所不同, 当聚光倍数为 159.20 倍时, 版图 A1 占空比约为 2.44% (5/205) 获得最高效率, 约为 39.44%; 当聚光倍数为 175.90 倍时, 版图 B1 占空比约为 3.38% (7/207) 获得最高效率, 最高效率约为 39.33%; 当聚光倍数为 190.88 倍时, 版图 A1 占空比约为 2.44% (5/205) 获得最高效率, 最高效率约为 40.10%; 当聚光倍数为 206.34 倍时, 版图 A1 占空比约为 2.44% (5/205) 获得最高效率, 最高效率约为 40.72%; 当聚光倍数为 236.57 倍时, 版图 A1 占空比约为 2.44% (5/205) 获得最高效率, 最高效率约为 39.63%; 当聚光倍数进一步提高至 263.9 倍时, 版图 B1 占空比约为 3.38% (7/207) 获得最高效率, 最高效率约为 39.31%。不同聚光倍数下最优占空比与最佳效率的关系如图 5 所示, 整体最高效率为 206.34 倍时版图 A1 测得的 40.72%。

上述结果表明: 在相同栅线宽度条件下, 缩短栅线间距即增加占空比可以提升效率。其原因在于, 聚光倍数越高, 光生电流密度越大, 串联电阻引起的功率损耗越显著, 因此需要通过增大占空比(即缩小栅线间距)来更有效地降低薄膜电阻; 但占空比的增大会带来更多的遮光损失, 因此需要在二者之间寻找最优平衡点。

4. 结论

采用柔性芯片剥离工艺成功制备了砷化镓聚光太阳电池, 通过设计两组线宽(5 μm 、7 μm)与三组间距(200 μm 、300 μm 、400 μm)交叉组合的 6 种梯度化占空比栅线版图(占空比分别为 1.23%、1.64%、1.72%、2.28%、2.44%和 3.38%), 系统建立了电极占空比与电池电学性能之间的对应关系, 为柔性聚光电池的电极结构设计提供了系统的实验数据支撑。

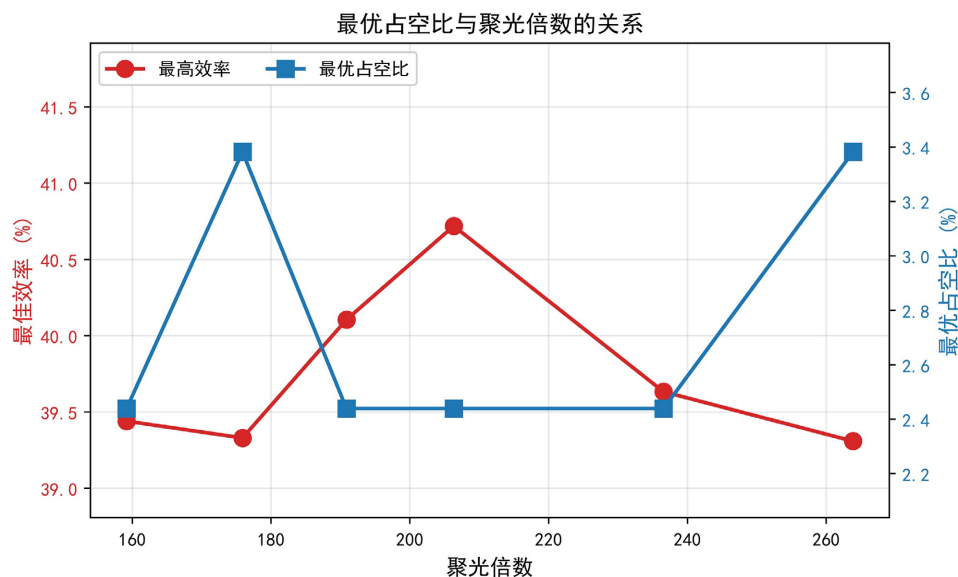


Figure 5. Relationship between the optimal duty ratio and the maximum efficiency under different concentration ratios

图 5. 不同聚光倍数下最优占空比与最佳效率的关系

栅线占空比对填充因子和短路电流具有相反的调控效果。在相同聚光倍数下,填充因子(FF)随占空比增大而显著提高,以 159.20 倍聚光为例,占空比从 1.23% (A3)增大至 2.44% (A1)时,FF 均值从 75.43% 提高至 87.36%,提升幅度约 11.9 个百分点;而短路电流(I_{sc})随占空比增大总体呈降低趋势,同期 I_{sc} 从 2.79 A 降至 2.69 A,降幅约 3.6%。二者呈典型的反向变化关系,构成效率优化的基本矛盾。开路电压(V_{oc})随占空比变化基本保持恒定(3.41~3.45 V 范围内),与基于二极管方程 $V_{oc} = (nkT/q) \cdot \ln(I_{sc}/I_0 + 1)$ 的理论预期一致:在电池材料与聚光条件固定时, V_{oc} 主要由禁带宽度决定的暗电流 I_0 主导,对占空比不敏感。然而,本研究观测到的 V_{oc} 波动幅度约为 0.04 V,其细微差异可能源于样品批次离散性、聚光条件下电池结温波动及测试接触电阻变化等多重因素;受限于样本量(每条件 $n = 5$),该范围内 V_{oc} 的精确机理尚不能完全确认,建议后续研究中扩大样本量并结合暗电流 I-V 测试与量子效率表征加以进一步验证。

电池转换效率随占空比的变化存在最优值。全部测试范围内,整体最高转换效率于 206.34 倍聚光、版图 A1 (栅线宽度 5 μm 、间距 200 μm 、占空比 2.44%)测得,为 40.72%。实验结果表明,在一定聚光倍数范围内(159.20~206.34 倍),占空比 2.44% 的版图 A1 均表现出最优或接近最优的效率(39.44%~40.72%),显示出该占空比在中等聚光条件下的普适性;但当聚光倍数提高至 263.87 倍时,最优占空比增大至 3.38% (版图 B1,效率 39.31%),表明更高聚光倍数下需进一步增大占空比以抑制串联电阻损耗。随着聚光倍数提高,最优占空比呈增大趋势,体现了遮光损失与串联电阻损耗之间平衡点的动态迁移规律。

本研究系统揭示了柔性衬底聚光型砷化镓太阳能电池电极占空比对电池性能的影响规律,明确了不同聚光倍数下最优占空比的选取原则,为柔性聚光砷化镓太阳能电池的电极结构工程设计提供了定量化的实验依据和优化方向,对提升柔性聚光电池的光电转换效率具有重要的工程指导意义。

参考文献

- [1] 余烨琳, 汪涛. 新能源光伏发电技术的应用研究[J]. 光源与照明, 2025(2): 118-120.
- [2] Cotal, H., Fetzer, C., Boisvert, J., Kinsey, G., King, R., Hebert, P., *et al.* (2009) III-V Multijunction Solar Cells for Concentrating Photovoltaics. *Energy & Environmental Science*, 2, 174-192. <https://doi.org/10.1039/b809257e>
- [3] King, R.R., Law, D.C., Edmondson, K.M., Fetzer, C.M., Kinsey, G.S., Yoon, H., *et al.* (2007) 40% Efficient Metamorphic

- GaInP/GaInAs/Ge Multijunction Solar Cells. *Applied Physics Letters*, **90**, Article 183516. <https://doi.org/10.1063/1.2734507>
- [4] 尚妍欣, 屈雯洁, 任学宁, 等. 航天先进电源材料与技术研究进展[J]. 空天防御, 2024, 7(6): 12-28+37.
- [5] Yoon, J., Jo, S., Chun, I.S., Jung, I., Kim, H., Meitl, M., *et al.* (2010) GaAs Photovoltaics and Optoelectronics Using Releasable Multilayer Epitaxial Assemblies. *Nature*, **465**, 329-333. <https://doi.org/10.1038/nature09054>
- [6] 付蕊, 涂洁磊. 聚光型三结砷化镓太阳电池的栅线设计[J]. 半导体光电, 2011, 32(6): 828-832.
- [7] 熊伟平, 林桂江, 刘冠洲, 等. 聚光多结太阳电池电极优化设计[J]. 太阳能学报, 2015, 36(7): 1786-1790.
- [8] Wolf, M. and Rauschenbach, H. (1963) Series Resistance Effects on Solar Cell Measurements. *Advanced Energy Conversion*, **3**, 455-479. [https://doi.org/10.1016/0365-1789\(63\)90063-8](https://doi.org/10.1016/0365-1789(63)90063-8)
- [9] Nishioka, K., Takamoto, T., Agui, T., Kaneiwa, M., Uraoka, Y. and Fuyuki, T. (2006) Evaluation of InGaP/InGaAs/Ge Triple-Junction Solar Cell and Optimization of Solar Cell's Structure Focusing on Series Resistance for High-Efficiency Concentrator Photovoltaic Systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **90**, 1308-1321. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.08.003>
- [10] 肖梦. 柔性III-V族多结太阳电池制备及相关材料的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2018.
- [11] 王宇. 多氙灯光源太阳模拟器光学系统设计[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2024.
- [12] Green, M.A. (2016) Accurate Expressions for Solar Cell Fill Factors Including Series and Shunt Resistances. *Applied Physics Letters*, **108**, Article 081111. <https://doi.org/10.1063/1.4942660>
- [13] 梁齐兵, 舒碧芬, 孙丽娟, 等. 三结太阳电池在非均匀光照下光斑强度和覆盖比率的优化研究[J]. 物理学报, 2014, 63(16): 450-456.