

砷化镓太阳电池的电磁脉冲损伤效应*

黄泽康[#] 葛行军^{#†} 张洋[‡] 张鹏 张泽海 周扬 吕家华

(国防科技大学前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

(2025年4月10日收到; 2025年5月9日收到修改稿)

空间无线功率传输技术为实现轨道空间站及星载设备的太阳能供电提供了创新解决方案, 然而其产生的高强度电磁脉冲将对卫星常用的单结砷化镓(GaAs)太阳电池构成潜在威胁. 目前, 强电磁脉冲作用下太阳电池的损伤物理机制尚未得到充分阐明. 本研究通过半导体仿真软件建立了单结砷化镓太阳电池的多物理场耦合模型, 系统研究了电磁脉冲作用下电池的热-电耦合损伤机理. 基于多参数仿真分析, 研究了电压幅值和频率电磁脉冲对单结砷化镓太阳电池的损伤规律, 揭示了电压幅值和频率与烧毁时间的关系, 以及不同频段电磁脉冲作用下的损伤模式差异. 本研究对于深入理解空间太阳电池的电磁损伤机理、指导航天器电源系统的电磁防护设计具有重要的理论意义和工程应用价值.

关键词: 电磁脉冲, 砷化镓, 太阳能电池, 热损伤

PACS: 41.20.Jb, 81.05.Ea, 88.40.H-, 44.05.+e

CSTR: 32037.14.aps.74.20250469

DOI: 10.7498/aps.74.20250469

1 引言

航天太阳能电池作为空间能源系统的核心组件, 其安全稳定运行直接决定着航天器工作任务的可靠性. 传统研究主要聚焦空间高能粒子辐射和静电放电等常规环境应力引发的电池性能退化问题, 已建立较为完善的防护设计体系. 近年来, 随着新型空间能源技术的发展, 特别是太空无线充电站等依赖高功率电磁脉冲进行能量传输的系统投入应用^[1-3]. 电磁脉冲这类非传统电磁辐射对太阳能电池的影响开始引起学术界的高度关注. 然而, 位于同步轨道的太空电站通过电磁脉冲向地球传输能量时, 存在其他卫星意外进入微波波束的风险. 由于太空电站的天线阵列可能长达数千米, 即使不考虑波束的自然发散, 以第一宇宙速度 7.8 km/s

运行的其他卫星也可能在数百毫秒至数秒内误入波束, 从而暴露于电磁波辐照之下. 这些高功率密度或高能量密度的电磁波可能严重干扰太空中其他设备的正常运作造成严重影响, 如太空望远镜、临近空间飞艇上的太阳电池等. 对于太阳电池而言, 虽然强电磁脉冲与高能粒子辐射等都具有瞬时高能特性, 但无线充电系统工作频段的定向微波与粒子辐射在作用机理上存在本质差异, 可能引发新型损伤效应, 对空间设备的供电系统产生影响^[4-6]. 这种新型电磁环境与太阳能电池本征响应特性的耦合作用, 已成为制约空间能源系统电磁安全的关键科学问题.

学者对强电磁脉冲作用下的太阳能电池损伤效应的机理仿真方面已取得系列研究成果. 居培凯^[7]通过数值模拟证实, 在相同电压幅值条件下, 脉冲上升时间越短越易导致电池性能退化. 王瀚翔等^[8,9]

* 中国博士后科学基金(批准号: 2022M723913)和湖南省自然科学基金(批准号: 2023JJ40675)资助的课题.

[#] 同等贡献作者.

[†] 通信作者. E-mail: gexingjun230230@aliyun.com

[‡] 通信作者. E-mail: 16103271g@connect.polyu.hk

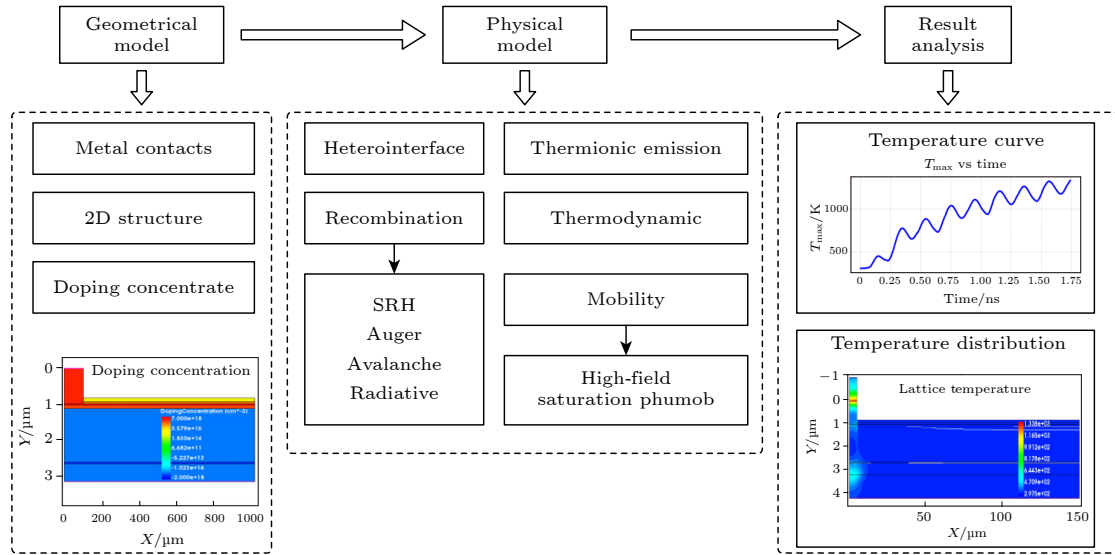


图 1 仿真流程示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the simulation process.

对比了单结砷化镓与多结砷化镓的温升情况, 多结砷化镓电池因更优的散热性能而表现出更强的抗电离击穿能力. 孟祥瑞等^[10,11]系统分析了雪崩击穿与焦耳热机制在电池中的作用特性, 并阐明了电磁参数(重频、脉宽)以及负极几何特征的影响规律. 樊晖煜^[12]针对三结砷化镓电池提出电池会由于尖端效应, 在阴极下方拐角处烧毁. 张好彬^[13]在考虑器件热阻后发现损伤加剧现象. 以上研究均表明太阳能电池在强电磁脉冲环境下有损伤的潜在风险. 然而, 现有研究对损伤物理机制的认识仍不够深入, 亟需建立更完善的损伤物理模型来指导工程实践.

为进一步明确太阳能电池烧毁的物理机制, 本文基于主流太阳能电池的参数开展仿真建模, 在此基础上考虑电极接触电阻与电极散热的影响. 基于该仿真模型, 详细分析了太阳电池在强电磁脉冲作用下损伤机制, 以及不同电磁脉冲参数如电压幅值、频率对损伤过程的影响, 为太阳电池在复杂电磁环境中的稳定性工作及防护设计提供理论支撑.

2 太阳电池模型搭建

针对单结砷化镓太阳能电池的仿真建模, 本研究采用了多物理场耦合的模型体系: 基于热动力学模型表征高功率密度下的热分布, 考虑 GaAs/GaNp 异质结界面载流子输运, 并考虑热电子发射效应.

载流子复合机制考虑中低场和低温条件下的 Shockley-Read-Hall (SRH) 复合、高温强场区的俄歇复合、高场强下的雪崩倍增、以及光辐射复合. 载流子迁移机制考虑高场强下迁移率饱和, 载流子散射与温度对迁移率的影响^[14,15]. 仿真过程如图 1 所示, 通过迭代求解耦合方程组实现多物理场的计算求解.

为了考虑电极接触处的影响, 接触电阻的电阻率取 $10^{-5} \Omega/\text{cm}^2$ ^[16]. 电极接触处的热阻率设置上, 参考 GaAs 与 Au 界面的接触热导, 此处取 $10^{-4} \text{K}/(\text{W}\cdot\text{cm}^2)$ ^[17], 以描述电极与半导体材料之间的热传导特性.

参考典型的单结砷化镓结构参数设置^[18], 数值模型的单结砷化镓电池结构如图 2 所示, 对应结构参数如表 1 所列. 其中阴极与阳极的接触金属为金, 其厚度取 $1 \mu\text{m}$. 电池右侧上方的盖板为 MgF_2 与 TiO_x 构成的减反射膜.

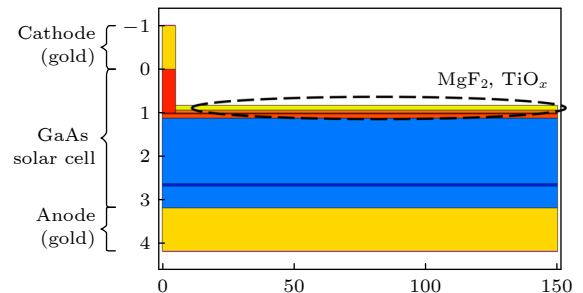


图 2 单结砷化镓结构模型图

Fig. 2. Single-junction GaAs solar cell structure model.

表 1 仿真模型中的太阳能电池基本结构参数设置
Table 1. Structural parameters of the solar cell in the simulation model.

结构	参数设置	结构	参数设置
帽层	1 μm , $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ n型GaAs	基板	1.5 μm , $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ p型GaAs
前表面场	0.03 μm , $7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ n型GaInP	背表面场	0.1 μm , $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ p型GaInP
发射极	0.1 μm , $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ n型GaInP	衬底	0.5 μm , $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ p型GaAs

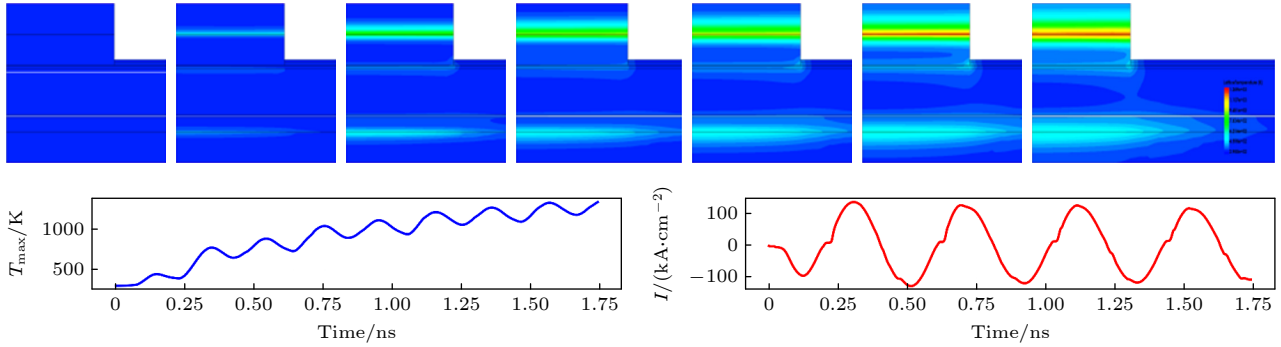


图 3 幅值为 80 V 正弦波输入后, 电池温度分布、最大温度与总电流变化图

Fig. 3. Temperature distribution, maximum temperature, and total current under 80 V sine wave injection.

3 电池温升过程分析

在金属厚度为 1 μm 的电池模型框架下, 本研究选择当前无线传能系统的主流工作频率 2.45 GHz 作为激励条件^[19], 将正弦波信号输入至单结砷化镓电池的阴极. 仿真设置以电池最大晶格温度达金属电极熔点 (1337 K) 或砷化镓材料熔点 (1511 K) 为终止条件. 仿真结果如图 3 和图 4 所示, 电池温度分布呈现出 3 个显著的热聚集区——主要集中在阴极和阳极接触位置, 以及电池的 PN 结位置, 且最大温度表现出正负半周均持续升温的特征. 以下将系统阐述导致这种温升分布的物理机理.

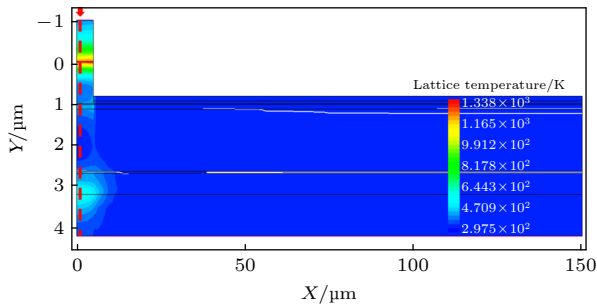


图 4 电池烧毁时刻的温度分布

Fig. 4. Temperature distribution of solar cell at the moment of burnout.

考虑到栅线外侧拐点区域同样存在温升现象, 本文选取图 4 中电池在 $X = 0.1 \mu\text{m}$ 位置处的横截面 (如图中标注的红色箭头指向的虚线位置) 进

行分析. 观察电池在该截面处的温度分布情况, 如图 5(a) 所示. 其中垂直于 Y 轴的曲面截线依次表示阴极接触线、前表面场区域、PN 结区域、背表面场区域以及阳极接触线. 在图 5(a) 显示出电池的温升在阴极接触区域最为显著. 同时, 阳极接触区与 PN 结区域也呈现明显的温升现象. 下文将针对电极接触位置 (阴极接触与阳极接触), 以及电池 PN 结位置的温升物理机制进行分析.

3.1 电极接触温升的机理分析

电极接触区域的温升现象与电极接触电阻率密切相关. 从图 5(b) 电势分布图可以观察到, 在信号施加初期阶段, 基区承担了大部分电势降落; 然而, 半个周期后, 位于电极位置 (0 μm 和 3.1 μm 处) 的电势显著下降. 由于电流在电池内部具有连续性, 电势梯度较大的电极接触区域将表现出更为显著的焦耳热效应. 通过电势分布对比分析发现, 阴极与阳极之间电势梯度存在一定差异. 具体而言, 阴极采用栅线导电结构, 其有效导电面积较小; 而阳极采用背板导电方式, 导电面积较大. 在相同电阻率条件下, 阴极区域的电流密度明显高于其他区域, 这导致电池在阴极处产生更为显著的温升现象.

3.2 电池内部温升的机理分析

电池内部 PN 结附近的温升区域可以通过电导率进行分析. 通过求电导率 σ :

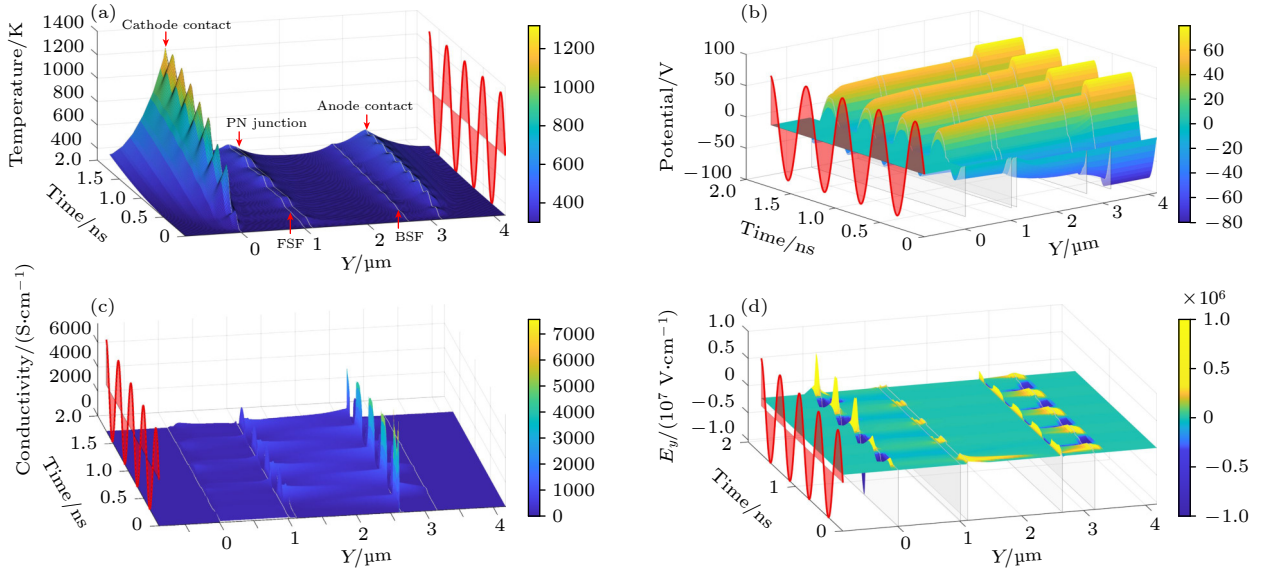


图 5 温升过程中的电池截面物理量变化过程 (a) 温度; (b) 电势; (c) 电导率; (d) 电场强度

Fig. 5. Changes in physical quantities of the cell cross-section during the temperature rise process: (a) Temperature; (b) electric potential; (c) conductivity; (d) electric field strength.

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p), \quad (1)$$

其中, q 为电子电荷量 1.9×10^{-19} C, μ_n 与 μ_p 分别为电子和空穴的迁移率, n 与 p 表示电子与空穴的密度. 通过计算获得的电池截线处电导率变化如图 5(c) 所示. 分析结果表明, 除表面场附近因异质结的存在导致局部载流子浓度显著增加 (对应区域电导率高达 6000 S/cm) 外, 雪崩击穿效应引起的载流子浓度上升也使电池帽层与基区局部电导率提升至约 1000 S/cm. 这一现象导致电池内部电场强度降低, 从而使电势差主要分布在电极接触区域. 此外, 在温度低于 GaAs 材料的本征激发温度 (约 1000 K) 时, 随着温度升高, 杂质散射效应增强, 导致载流子迁移率下降. 同时, 电极区域产生的焦耳热通过热扩散过程进一步加剧了电极附近的电导率降低, 从而形成更大的电势差和电场强度, 进一步促进电极接触区域的温升. 这一机制可以解释图 5(c), (d) 中观察到的电极附近电导率降低与电场强度增大的现象.

电池 PN 结附近的温升现象与雪崩击穿效应密切相关. 如图 5(a) 所示, 该区域的温升主要发生在电池反偏状态, 即输入脉冲的正半周. 在反偏击穿条件下, 电势主要降落在发射区和基区之间. 由于基区掺杂浓度较低 (p 型, 10^{17} cm $^{-3}$), 其耗尽区较发射结更宽, 且电导率较低, 因此电场强度在发射区更为集中. 由此可知, 在反偏状态下, 电池内部的温升主要集中在更靠近发射结的前表面场附

近. 此外, 由于尖端效应导致前表面场拐角处附近电流密度增大, 从而该区域的温升更为显著. 这一现象与文献 [9,11] 的仿真结果具有一致性, 进一步验证了仿真模型的合理性.

3.3 电池温升对电池输出特性的影响分析

综合分析表明, 在考虑电极接触电阻效应的情况下, 太阳能电池的温度升高主要集中在电极接触区域和 PN 结附近区域. 其物理机制可解释为: 当电池在高偏压下发生电击穿时, 产生的大电流通过电极接触区域将引起显著的焦耳热效应, 这种热效应尤其在电流密度较高的阴极栅线接触位置表现最为显著. 除栅线接触处外, 温度升高现象还在以下区域被观察到: 1) 阳极接触位置, 由于大电流通过时产生的电阻热效应; 2) PN 结拐角附近, 该区域的高电场可能导致雪崩击穿, 增强载流子倍增效应, 从而进一步加剧局部温升. 以上效应会通过改变电池的等效串联电阻和并联电阻, 对电池输出特性的潜在影响. 太阳能电池的电压电流特性满足如下关系 [18]:

$$I = I_{SC0} - I_{01} \left[e^{q(V+IR_s)/kT} - 1 \right] - I_{02} \left[e^{q(V+IR_s)/2kT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}, \quad (2)$$

其中, I 表示流过电池的电流, I_{SC0} 表示不考虑寄生电阻时的短路电流, V 表示电池两端的电压.

k 为玻尔兹曼常量, T 表示电池温度. I_{01} 与 I_{02} 表示电池少子的扩散电流、耗尽区的复合电流. R_s 表示等效串联电阻, 对应表征电池本身的体电阻、电池电极处的接触电阻与栅线之间横向电流对应的电阻的影响. 由于电磁脉冲注入时栅线外侧区域不存在明显的温升, 此处可以忽略横向电流对应的串联电阻的变化. 而当注入时间增长, 电池热区热量扩散到电池内部后, 可能会引入晶格缺陷而引起电池体电阻的升高, 进而造成等效串联电阻的增大而降低电池的最大输出功率. R_{sh} 表示并联电阻, 表征了PN结由于晶格缺陷等因素引起的漏电流的影响. 当串联电阻足够小时, 把(2)式等号右边第二、第三项合并为系数为 I_0 的指数项, 则并联电阻对输出特性的影响可近似满足以下关系式:

$$\frac{V_{OC}}{R_{sh}} = I_{SC'} - I_0 \left(e^{qV_{OC}/n_0kT} - 1 \right). \quad (3)$$

其中 V_{OC} 为电池开路电压, $I_{SC'}$ 为电池的短路电流, n_0 为电池的理想因子. 分析(3)式, 随着热扩散的进行, 热量的积聚会导致PN结等关键区域产生晶格缺陷, 从而增大漏电流并降低 R_{sh} . 这些变化将导致电池性能发生不可逆退化, 包括开路电压降低和最大输出功率下降, 从而影响太阳能电池在太空的正常运行.

4 不同微波参数的影响

上述仿真结果表明, 在高电压微波作用下, 太阳电池的温升效应主要集中分布在电极接触区和PN结拐点附近. 微波参数(如电场强度与频率特性)对电池的热损伤分布及失效时间起决定性作用. 因此, 下文将重点探讨微波电压与频率对电池温升及烧毁过程的影响规律.

4.1 电压幅值对电池温升的影响

将输入信号的频率固定为 2.45 GHz, 并在 50—200 V 范围内以 10 V 为步长调节电压幅值进行仿真, 以探究不同电压幅值下太阳能电池烧毁物理机制的演变规律. 部分电压下的电流与温升波形结果如图6所示. 当注入电压超过 70 V 时, 电池局部会在数个周期内迅速升温并达到熔点, 从而导致烧毁现象的发生. 值得注意的是, 在较低电压激励下 (<70 V), 可观察到电流幅值缓慢衰减, 同时温升速率显著降低. 这一现象可以通过 GaAs 材料在高温下的迁移率下降特性来解释, 如图7所示.

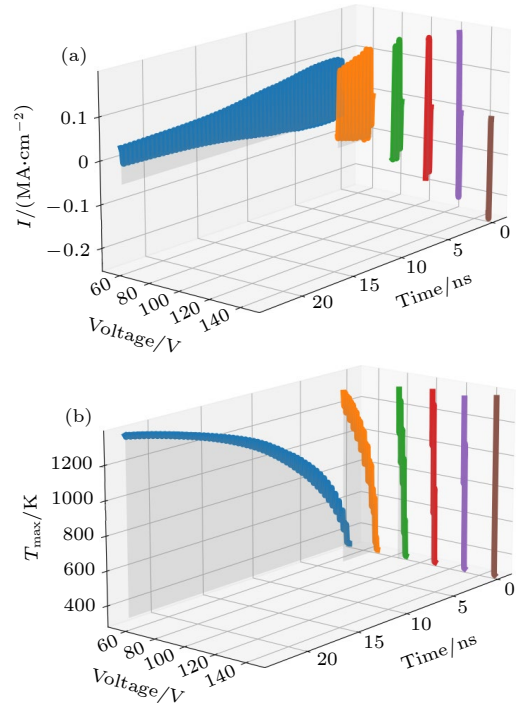


图6 不同电压下的电流、最大温度随时间变化的曲线对比 (a) 电流曲线; (b) 最大温度曲线

Fig. 6. Comparison of current and maximum temperature changes over time at different voltages: (a) Current curves; (b) maximum temperature curves.

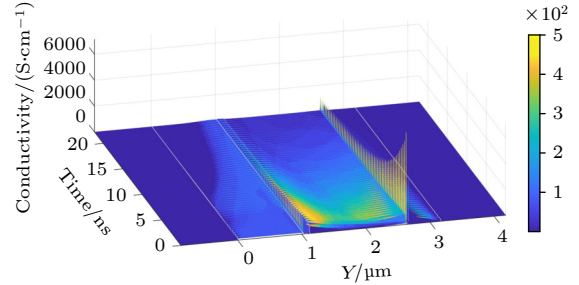


图7 注入 50 V 正弦波时, $X = 0.1 \mu\text{m}$ 截线处的电导率变化

Fig. 7. Dynamics of conductivity along the cutline at $X = 0.1 \mu\text{m}$ under 50 V sine wave injection.

对图8中不同电压条件下烧毁瞬间的温度场分布进行对比分析, 结果显示, 随着电压的降低, 烧毁时间延长, 热扩散效应显著增强. 这导致阳极热区与前表面场热区之间的温度梯度逐渐减小, 最终实现更均匀的温度分布. 此外, 由于金属电极良好的导热性能, 在长脉宽微波信号的作用下, 阳极金属区域表现出更显著的大面积温升现象. 这一现象揭示了电极接触金属区域存在较高的烧毁风险. 针对该类脉宽范围的影响, 可基于传热学理论建立定量评估模型. 根据一维非稳态导热理论分析^[20],

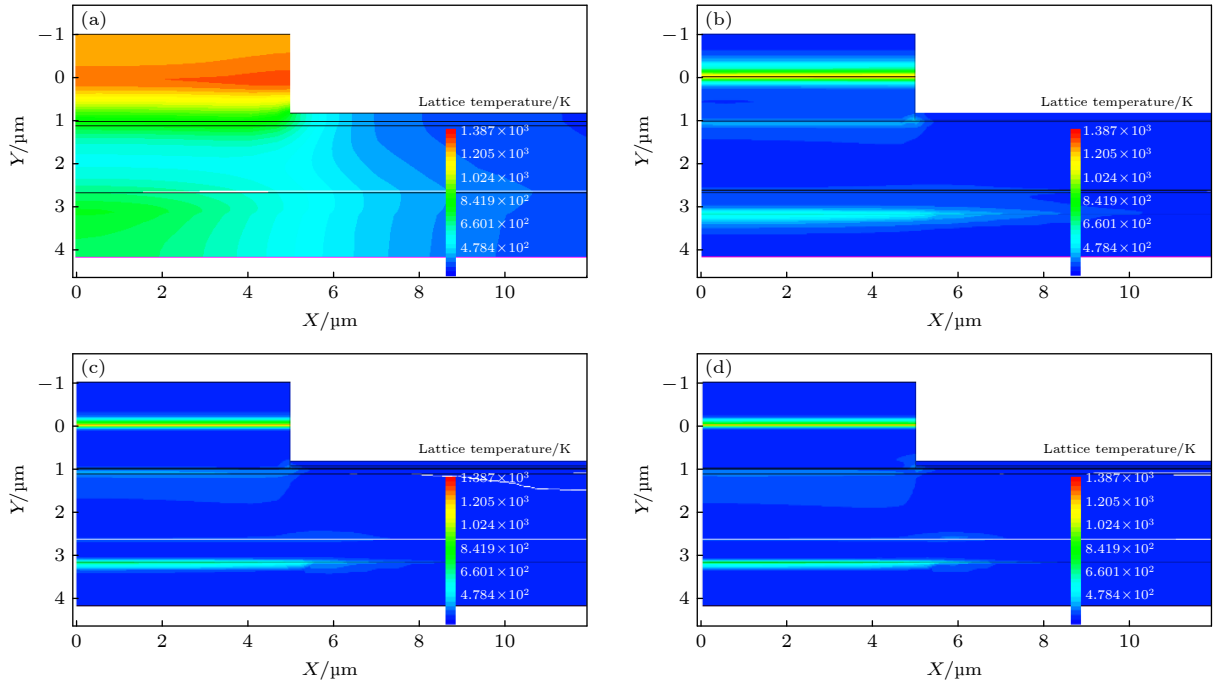


图 8 不同电压下烧毁时刻的温度分布对比 (a) 50 V; (b) 100 V; (c) 150 V; (d) 200 V

Fig. 8. Temperature distribution at the moment of burnout under variable voltages: (a) 50 V; (b) 100 V; (c) 150 V; (d) 200 V.

存在热传导的惰性时间:

$$\tau = \frac{X^2}{16\alpha}, \quad (4)$$

其中 X 表示器件某点到热源的距离, α 是表示材料的热扩散系数, 对于砷化镓材料为 $0.44 \text{ cm}^2/\text{s}$. 当导热时间小于 τ 时, X 位置处的温升效应可忽略不计. 图 9 所示为弛豫时间与传热距离的定量关系曲线. 计算结果表明, 对于相邻栅线的最小距离 X 约为 $500 \text{ }\mu\text{m}$, 对应 τ 约为 0.35 ms . 对于电池两电极间的纵向距离 X 约为 $3 \text{ }\mu\text{m}$, 对应 τ 约为 13 ns . 温度场的均匀化需要至少 0.35 ms 的弛豫时间; 而在纵向维度上, 温度分布仅需 13 ns 即可达到准平衡状态. 这种热传导特性的差异导致了不同的热失效风险分布: 在纵向维度上, 极短的热弛豫时间使得电极间区域温度迅速升高, 形成显著的热积累效应, 因而存在较高的烧毁风险; 相比之下, 横向维度上较长的热弛豫时间使得栅线间区域能

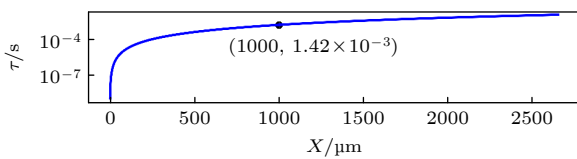


图 9 弛豫时间与热传导距离的关系

Fig. 9. Relationship between relaxation time and heat conduction distance.

够有效延缓温升过程, 从而显著降低了热失效风险. 此外, 通过实验数据拟合发现^[21], 电池的烧毁时长 t_w (单位为 s) 与外加电压 U (单位为 V) 呈幂函数关系:

$$t_w = 10.7U^{-5.12}. \quad (5)$$

拟合曲线结果如图 10 所示, 该规律可为器件热可靠性评估提供定量预测依据.

4.2 频率对电池温升的影响

保持输入电池阴极端的微波幅值为 80 V 不变, 通过 10 MHz — 10 GHz 对数扫频 (15 个采样点) 的仿真, 获得了如图 10 所示的温升特性与电流响应曲线, 以及图 11 所示的烧毁时长与微波频率的对应关系.

如图 10(b) 所示, 不同频率下电池烧毁过程呈现出两阶段特征. 在低频段 ($<300 \text{ MHz}$), 烧毁时长随频率升高显著缩短; 而在高频段 ($>1 \text{ GHz}$), 烧毁时长则表现为缓和缩短趋势, 烧毁时长轻微缩短; 其间 300 MHz — 1 GHz 过渡区则呈现非单调波动特性. 这种频率响应特性主要归因于电池的金属接触电阻发热特性. 低频区 ($<300 \text{ MHz}$) 由于电周期较长, 烧毁主要发生在单个周期的上升沿阶段, 电压变化率随频率提升而增大, 导致电池更容

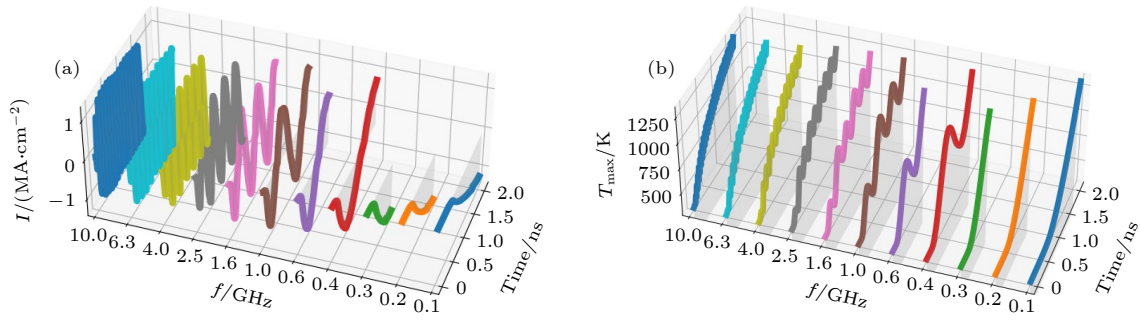


图 10 不同频率下的电流与最大温升曲线 (a) 电流曲线; (b) 最大温度曲线

Fig. 10. Comparison of current and maximum temperature changes over time under varied frequency conditions: (a) Current curves; (b) maximum temperature curves.

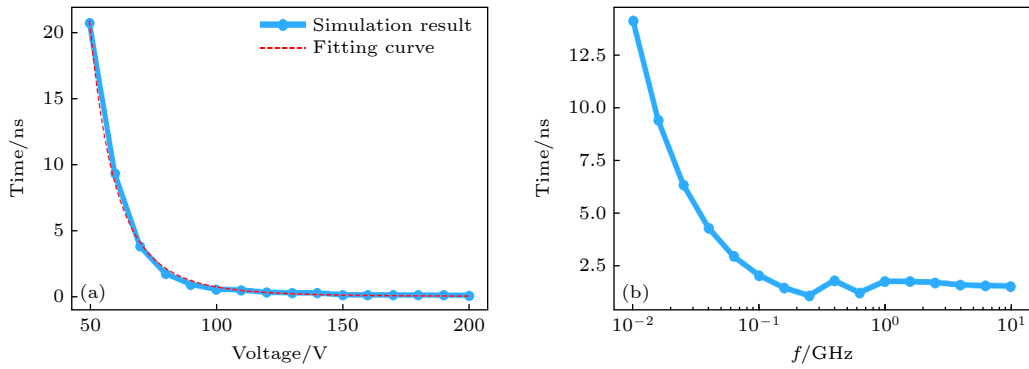


图 11 烧毁时长与微波参数的关系 (a) 电压; (b) 频率

Fig. 11. Relationship between burnout duration and microwave parameters: (a) Voltage; (b) frequency.

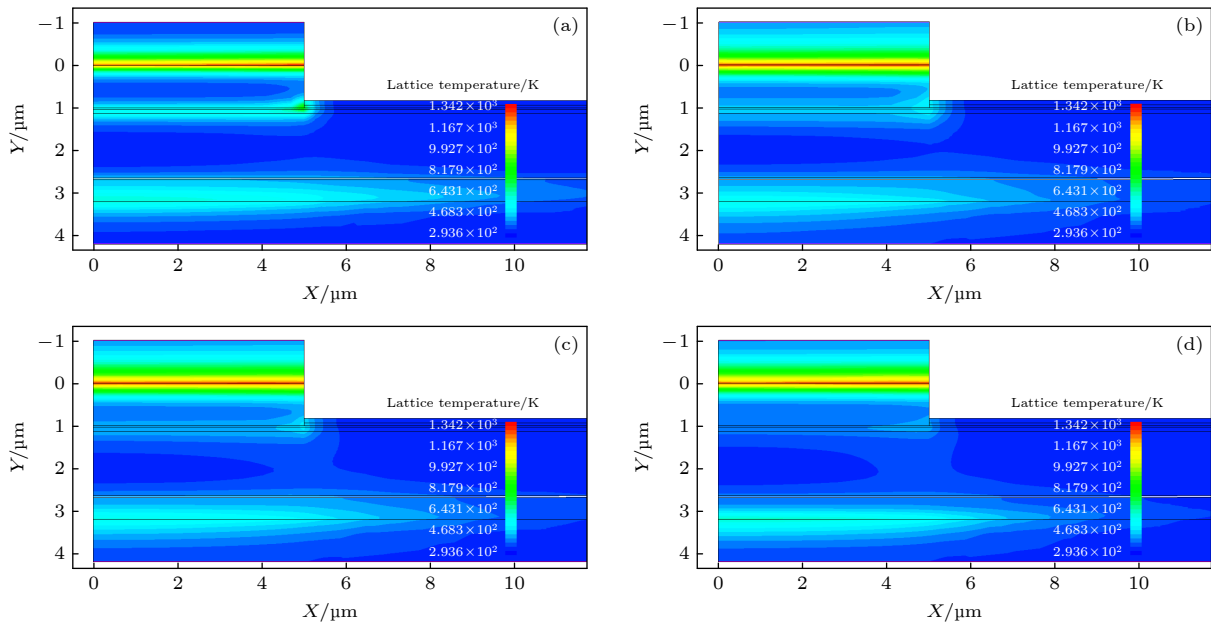


图 12 不同频率下的烧毁时刻温度分布 (a) 0.10 GHz; (b) 0.40 GHz; (c) 1.58 GHz; (d) 6.31 GHz

Fig. 12. Temperature distribution at the moment of burnout under variable frequencies: (a) 0.10 GHz; (b) 0.40 GHz; (c) 1.58 GHz; (d) 6.31 GHz.

易发生击穿而加速烧毁. 过渡区 (0.3—1 GHz) 则因周期缩短引发能量累积模式转变. 随着电周期缩短, 单个周期内的焦耳热积累已不足以产生足够的

温升. 在此机制下, 电压波形在达到峰值后呈现周期性衰减, 导致最高温区域经历“加热-冷却”的动态过程, 从而延长了热失效时间阈值. 这种单周

期主导到多周期累积的转变机制, 导致了失效时间-频率特性的非单调波动现象. 当频率提升至 1 GHz 以上时, 电池的烧毁过程进入多周期模式, 功率的交流分量影响逐渐减小. 在此区间内, 烧毁时间随频率变化表现为缓和的递减趋势.

不同频率下烧毁时刻电池的温度分布如图 12 所示. 可以看出, 不同频率下电池烧毁区域始终存在 3 个主要热区: 阴极拐角附近以及电池的两个电极接触区域. 总体而言, 随着频率升高, 前表面场和阴极拐角处的发热有所减小, 而电极附近的发热则显著加剧. 这种热区转移现象的原因可能与高频条件下电池 PN 结的结电容效应增强有关. 在高频下, 结电容效应更加明显, 这可能导致 PN 结因雪崩击穿积累的热量减小, 从而使热区向电极接触区域转移.

综合上述结果, 微波参数对太阳电池的损伤效应主要表现为: 随着脉冲电压降低, 电池因热量扩散及内阻随温度升高而增大, 其烧毁时间显著延长; 当频率高于 1 GHz 时, 烧毁时间随频率升高呈轻微下降趋势, 且高频效应导致雪崩击穿减弱, 导致电极附近温升更为显著.

5 结 论

本研究基于多物理场耦合数值模拟方法, 系统揭示了强电磁脉冲环境下单结砷化镓太阳电池的损伤机理. 研究首先建立了包含电极接触电阻和热扩散效应的电池模型, 系统分析了典型无线充电频率 2.45 GHz 电磁脉冲作用下的瞬态热-电耦合过程. 研究表明, 电极接触区域的接触电阻会导致电池在阴极栅线处产生显著温升, 而雪崩击穿效应则在 PN 结区诱发轻微温升. 此外, 对宽参数范围 (电压 50—200 V, 频率 0.01—10 GHz) 的电磁脉冲仿真分析, 进一步揭示了以下规律: 电压幅值的增加会显著缩短电池的烧毁时长, 且烧毁时间与电压幅值之间呈现出明显的幂律关系; 在高频 (>1 GHz) 电磁场作用下, 电极区域的热损伤成为主导因素. 本研究建立的多物理场耦合数值仿真模型, 不仅阐明了空间太阳电池在多物理场耦合作用下的失效机制, 也为星载能源系统在强电磁环境下的高可靠运行提供了理论支撑.

参考文献

- [1] Liu Y, Cheng W, Sun B, Wang W 2016 *Space Electron. Techn.* **13** 44 (in Chinese) [刘岩, 程伟, 孙桦, 王玮 2016 *空间电子技术* **13** 44]
- [2] Yang Y, Zhang Y Q, Duan B Y, Wang D X, Li X 2016 *Acta Astronaut.* **121** 51
- [3] Li J, Dong S W, Li Y, Wang Y, Chen W W 2021 *Space Electron. Techn.* **15** 8 (in Chinese) [李军, 董士伟, 李洋, 王颖, 陈伟伟 2021 *空间电子技术* **15** 8]
- [4] Yan Y Y 2019 *M. S. Thesis* (Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics) (in Chinese) [颜媛媛 2019 硕士学位论文 (南京: 南京航空航天大学)]
- [5] Barthel A, Sato S, Sayre L, Li J, Nakamura T, Ohshima T, Imaizumi M, Hirst L C 2024 *J. Appl. Phys.* **135** 224505
- [6] Rahman T, Mansur A, Hossain L M, Rahman M, Ashique R, Houran M, Elavarasan R, Hossain E 2023 *Energies* **16** 3706
- [7] Ju P K 2017 *M. S. Thesis* (Nanjing: Nanjing University of Science and Technology) (in Chinese) [居培凯 2017 硕士学位论文 (南京: 南京理工大学)]
- [8] Wang H X 2022 *M. S. Thesis* (Xian: Xidian University) (in Chinese) [王瀚翔 2022 硕士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [9] Wang H X, Chai C C, Liu Y Q, Wu H, Zhang W, Li F X, Yang Y T 2021 *Ieice Electron. Expr.* **18** 20210020
- [10] Meng X Y 2023 *M. S. Thesis* (Xian: Xidian University) (in Chinese) [孟祥瑞 2023 硕士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [11] Meng X R, Chai C, Li F, Sun Y, Yang Y 2022 *J. Semicond.* **43** 112701
- [12] Fan Y H 2022 *M. S. Thesis* (Xian: Xidian University) (in Chinese) [樊晖煜 2022 硕士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [13] Zhang H B 2024 *M. S. Thesis* (Xian: Xidian University) (in Chinese) [张好彬 2024 硕士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [14] He J, Xia J B (eds.) 2017 *Semiconductor Science and Technology* (2nd Ed.) (Beijing: Science Press) p110 (in Chinese) [何杰, 夏建白 主编 2017 半导体科学与技术 (第 2 版) (北京: 科学出版社) 第 110 页]
- [15] Liu E K, Zhu B S, Luo J S 2017 *Semiconductor Physics* (7th Ed.) (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p712 (in Chinese) [刘恩科, 朱秉升, 罗晋生 编 2017 半导体物理学 (第 7 版) (北京: 电子工业出版社) 第 712 页]
- [16] Ürmös A, Farkas Z, Dobos L, Nagy S, Nemcsics Á 2018 *Acta Polytech. Hung.* **15** 99
- [17] Chen X Y 2012 *Ph. D. Dissertation* (Taoyuan: Chung Yuan Christian University) (in Chinese) [陈信佑 2012 博士学位论文 (桃园: 中原大学)]
- [18] Zhang C F, Zhang J C, Ma X H, Feng Q 2015 *Semiconductor Photovoltaic Devices* (Xian: Xidian University Press) p102 (in Chinese) [张春福, 张进成, 马晓华, 冯倩 编 2015 半导体光伏器件 (西安: 西安电子科技大学出版社) 第 102 页]
- [19] SPS: Solar Power Satellite, Sasaki Susumu <https://spacedream.sakura.ne.jp/SPS20.pdf> [2024-7]
- [20] Tao W Q 2019 *Heat Transfer* (5th Ed.) (Beijing: Higher Education Press) p118 (in Chinese) [陶文铨 2019 传热学 (第五版) (北京: 高等教育出版社) 第 118 页]
- [21] Wunsch D C, Bell R R 1968 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **15** 244

Electromagnetic pulse damage effects on gallium arsenide solar cells*

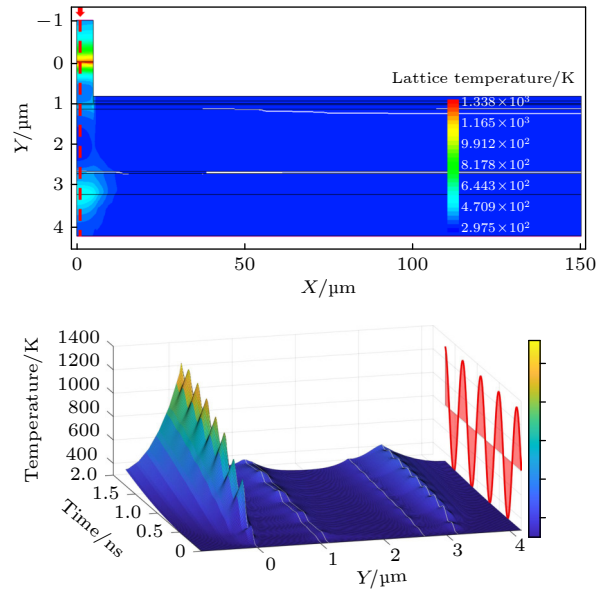
HUANG Zekang[#] GE Xingjun^{#†} ZHANG Yang[‡] ZHANG Peng
ZHANG Zehai ZHOU Yang LV Jiahua

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 10 April 2025; revised manuscript received 9 May 2025)

Abstract

The technology of space-based wireless power transfer presents a potential solution for supplying energy to spacecraft. However, this method transmits energy through high-power electromagnetic pulses, which may pose a potential threat to gallium arsenide (GaAs) solar cells. Currently, the damage mechanisms affecting solar cells in these conditions remain unclear. To solve this issue, the thermo-electrical coupled damage mechanism of single-junction GaAs solar cells is investigated using a comprehensive multiphysics simulation model in this work. The damage characteristics of the solar cells under varying voltage and frequency inputs are simulated and analyzed. Furthermore, the relationship between burnout time and both input voltage and frequency are investigated, and the differences in damage mechanisms observed at different frequencies are elucidated. The results indicate that due to high current density and contact resistance, burnout mainly occurs at the cathode electrode contacts. Additionally, the PN junction and the anode contact experience significant temperature elevations, which is more likely to affect the cell performance. By deepening our understanding of how high-power electromagnetic pulses damage space solar cells, this study will provide support for designing electromagnetic protection systems for spacecraft power architectures.



Keywords: electromagnetic pulses, gallium arsenide, solar cells, thermal damage

PACS: 41.20.Jb, 81.05.Ea, 88.40.H-, 44.05.+e

DOI: 10.7498/aps.74.20250469

CSTR: 32037.14.aps.74.20250469

* Project supported by the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2022M723913) and the Natural Science Foundation of Hunan Province, China (Grant No. 2023JJ40675).

[#] These authors contributed equally.

[†] Corresponding author. E-mail: gexingjun230230@aliyun.com

[‡] Corresponding author. E-mail: 16103271g@connect.polyu.hk



砷化镓太阳电池的电磁脉冲损伤效应

黄泽康 葛行军 张洋 张鹏 张泽海 周扬 吕家华

Electromagnetic pulse damage effects on gallium arsenide solar cells

HUANG Zekang GE Xingjun ZHANG Yang ZHANG Peng ZHANG Zehai ZHOU Yang LV Jiahua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 154101 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250469

CSTR: 32037.14.aps.74.20250469

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250469>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于大气环境下全无机钙钛矿薄膜及碳基太阳能电池的组分调控和添加剂工程

Component control and additive engineering of all-inorganic perovskite films and carbon-based solar cells under ambient air environment

物理学报. 2024, 73(23): 238101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241439>

AlGaIn合金的原子层沉积及其在量子点敏化太阳能电池的应用

Atomic layer deposition of AlGaIn alloy and its application in quantum dot sensitized solar cells

物理学报. 2023, 72(13): 137701 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230113>

CH₃NH₃多聚体的形成对有机-无机杂化钙钛矿太阳能电池性能的影响

Effects of CH₃NH₃ polymer formation on performance of organic-inorganic hybrid perovskite solar cell

物理学报. 2021, 70(16): 168801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210353>

质子辐照CH₃NH₃PbI₃基钙钛矿太阳能电池的损伤效应

Proton irradiation induced damage effects in CH₃NH₃PbI₃-based perovskite solar cells

物理学报. 2023, 72(13): 138802 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222100>

基于SnO₂:DPEPO混合电子传输层的钙钛矿太阳能电池性能研究

Performance of perovskite solar cells based on SnO₂:DPEPO hybrid electron transport layer

物理学报. 2024, 73(19): 198401 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240827>

钙钛矿基三结叠层太阳电池的研究进展

Research progress of perovskite-based triple-junction tandem solar cells

物理学报. 2024, 73(24): 248802 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241187>