

复合脉冲激光辐照下三结 GaAs 电池的损伤特性

戚磊, 张蓉竹*

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

摘要 根据傅里叶热传导理论和热应力场理论, 利用 COMSOL 仿真软件和 Matlab 软件构建了复合激光辐照下三结 GaAs 太阳能电池的复合损伤模型, 计算了单毫秒激光和复合脉冲激光辐照下太阳能电池的温度和应力场分布。结果表明, 相比单毫秒激光, 复合激光辐照会产生更大范围的熔化损伤并且伴随出现明显的应力损伤, 损伤面积和深度会随着纳秒脉冲激光能量密度和作用时间延时的增加而增加。能量密度增加到 0.5 J/cm^2 时, 熔化损伤半径增大到 2 mm, 深度增大到 $1.5 \mu\text{m}$; 时间延时增加到 0.5 ms 时, 熔化损伤半径增大到 1.4 mm, 深度增大到 $1 \mu\text{m}$ 。

关键词 激光光学; 激光辐射; 热损伤; 三结 GaAs 电池; 复合脉冲激光

中图分类号 TN249; O432

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0514002

Damage Characteristics of Three-Junction GaAs Cell Under Combined Pulse Laser Irradiation

Qi Lei, Zhang Rongzhu*

College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

Abstract According to the Fourier heat conduction theory and thermal stress field theory, the COMSOL simulation software and Matlab software are used to construct the combined damage model of three-junction GaAs solar cell under combined laser irradiation, and the temperature and stress field distribution of solar cell under single millisecond laser irradiation and combined pulse laser irradiation are calculated. The results show that, compared with single-millisecond laser, the combined laser irradiation can produce a wider melting damage area and obvious stress damage, and the damage area and depth will increase with the increase of energy density and action time delay of nanosecond pulse laser. When the energy density increases to 0.5 J/cm^2 , the radius and the depth of the melting damage spot are risen to 2 mm and $1.5 \mu\text{m}$, respectively. When the time delay increases to 0.5 ms, the radius and the depth are increased to 1.4 mm and $1 \mu\text{m}$, respectively.

Key words laser optics; laser irradiation; thermal damage; three-junction GaAs cell; combined pulse laser

OCIS codes 140.3330; 140.3440; 140.6810

1 引 言

近年来, 三结 GaAs 太阳能电池由于光电转换效率高、抗辐射性能强等优点, 受到了广泛的关注^[1-3]。太阳能电池作为激光无线能量传输中激光能量的接受器件, 进行光电转换时, 不可避免地会产生大量的热量积累, 不仅降低了太阳能电池的输出性能, 温度过高时还会对器件造成不可逆的破坏, 因此研究太阳能电池的激光诱导损伤规律同样是一个研究重点^[4-5]。目前, 太阳能电池激光损伤的研究主要集中在单一的脉冲和连续激光辐照 Si 电池、单结和三结 GaAs 太阳能电池方面, 而复合脉冲激光的

能量集中, 会使材料器件产生更严重的复合损伤^[6-8]。朱荣臻^[9]研究了 1064 nm 纳秒脉冲激光辐照 GaAs/Ge 太阳能电池的损伤特性, 发现电池的损伤最初出现在 GaAs 层与 Ge 基底的交界处, 锗材料的热熔会导致电池失效。钟发成等^[10]对比分析了复合激光和毫秒激光对 Si 材料的损伤, 发现材料表面表现出迥异的损伤形貌, 毫秒激光辐照下材料表面仅出现应力损伤, 而复合激光辐照下还会同时出现热熔损伤。曾交龙等^[11]研究了 1064 nm 的连续和脉冲复合激光对 GaAs 材料的破坏效应, 发现复合激光辐照下连续激光的预热效应会使材料的损伤阈值降低。研究表明, 单一的脉冲或连续激光辐照

收稿日期: 2019-08-08; 修回日期: 2019-09-30; 录用日期: 2019-11-11

* E-mail: zhang_rz@scu.edu.cn

下材料的损伤以单一的热熔或应力损伤为主,并且需要较高的激光能量,而复合脉冲激光辐照时在更低的激光能量密度条件下就能引起材料的严重热学损伤,同时伴随力学损伤。复合激光损伤特性的研究大多聚焦于金属靶材和结构简单的探测器件,而对于结构复杂的三结 GaAs 太阳能电池在复合脉冲激光辐照下的复合损伤特性的分析鲜有报道。

本文基于经典傅里叶热传导理论,利用 COMSOL 仿真软件计算了单毫秒脉冲激光和复合脉冲激光辐照下三结 GaAs 太阳能电池的温度场分布。根据热应力模型和温度场结果,利用 Matlab 软件分析了热应力场分布,对比得到了两种条件下太阳能电池不同的损伤特性。同时,分析了复合脉冲激光不同的时间延时和能量分配对太阳能电池复合损伤(热效应和力学效应)特性的影响。

2 理论模型

2.1 热传导模型

复合激光与三结 GaAs 太阳能电池的相互作用模型如图 1 所示,其中 AR 表示减反膜。太阳能电池主要由顶电池 GaInP₂、中电池 GaAs 和底电池 Ge 按禁带宽度从大到小的顺序迭合组成,分别对 300~670 nm, 500~920 nm, 800~1800 nm 波长范围的光进行吸收,从而实现对不同波段光能的转换, r 方向表示太阳能电池径向方向, z 方向表示太阳能电池轴向方向, a 和 b 分别为太阳能电池的厚度和半径。复合激光由两束具有不同脉冲宽度的脉冲激光组成,垂直于太阳能电池表面沿轴向方向辐射到电池表面。其温度分布情况可以用经典的傅里叶热传导方程来描述,其导热微分方程^[12-13]为

$$\rho_l c_l \frac{\partial}{\partial t} T(r, z, t) = K_l \left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} T(r, z, t) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} T(r, z, t) \right] + Q(r, z, t), \quad (1)$$

式中, $T(r, z, t)$ 为材料中不同位置(r, z)的瞬时温度, ρ_l, c_l 和 K_l 分别为第 l 层材料的密度、比热容和导热系数, Q 为热源项。对于复合激光可以表示为

$$Q(r, z, t) = \left[\frac{E_{ms}}{\tau_{ms}} g_{ms}(t) + \frac{E_{ns}}{\tau_{ns}} g_{ns}(t) \right] \times \exp\left(-2 \frac{r^2}{a_0^2}\right) (1-R)\alpha(T) \exp[-\alpha(T)z],$$

$$g_{ms}(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t \leq \tau_{ms} \\ 0, & t > \tau_{ms} \end{cases},$$

$$g_{ns}(t) = \begin{cases} 1, & t_d \leq t \leq t_d + \tau_{ns} \\ 0, & t < t_d \text{ or } t > t_d + \tau_{ns} \end{cases}, \quad (2)$$

式中, E_{ms}, E_{ns}, g_{ms} 和 g_{ns} 分别为毫秒、纳秒激光的能量密度和作用时间函数, a_0 为入射激光光斑半径, R 和 $\alpha(T)$ 分别为材料对入射激光的反射率和吸收系数, τ_{ms} 和 τ_{ns} 分别为两束激光的脉冲宽度, t_d 为纳秒脉冲激光相对于毫秒脉冲激光作用时刻的延迟时间。

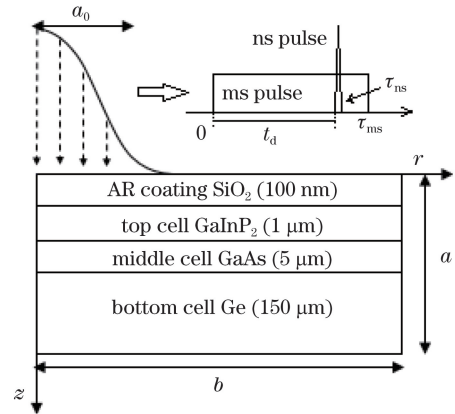


图 1 三结 GaAs 太阳能电池激光辐照模型

Fig. 1 Schematic diagram for three-junction GaAs solar cell under laser irradiation

假定太阳能电池表面绝热,初始温度为常温,则边界条件和初始条件分别为

$$\begin{cases} -K \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = -K \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=a} = 0 \\ -K \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=b} = 0 \\ T(r, z, t) \Big|_{t=0} = 300 \end{cases} \quad (3)$$

根据(1)~(3)式,利用 Crank-Nicolson 差分法求解温度场的有限元模型,可表示为

$$\left(\frac{1}{\Delta t} \mathbf{C} + \frac{1}{2} \mathbf{K} \right) \mathbf{T}_i = \left(\frac{1}{\Delta t} \mathbf{C} + \frac{1}{2} \mathbf{K} \right) \mathbf{T}_{i+\Delta t} + \frac{1}{2} \mathbf{Q}_i + \left(1 - \frac{1}{2} \right) \mathbf{Q}_{i+\Delta t}, \quad (4)$$

式中, $\mathbf{C}, \mathbf{K}, \mathbf{Q}, \mathbf{T}$ 分别为比热容矩阵,热导矩阵,热源矢量和温度矢量, Δt 为时间差分间隔。

2.2 热应力模型

物体的温度变化往往会导致物体的形变进而导致热应力的产生,这种热应力具有一定的破坏力,不能忽略。在求解热应力问题时,要考虑静力学、几何学和物理学三方面的条件来建立方程,然后在边界条件下求解这些方程,进而可解出其热应力分布的

表达式。在不考虑外力时,平衡方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial r} = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

式中, σ_r , σ_z 和 σ_θ 分别为径向、轴向和环向应力分量。

几何方程为

$$\epsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \epsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \epsilon_\theta = \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta}, \quad (6)$$

式中, ϵ_r , ϵ_z 和 ϵ_θ 分别为径向、轴向和环向应变分量, u_r , u_z 和 u_θ 分别为径向、轴向和环向位移, θ 为

环向角度。

广义胡克定律为

$$\begin{cases} \epsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)] + \gamma T \\ \epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)] + \gamma T, \\ \epsilon_\theta = \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)] + \gamma T \end{cases}, \quad (7)$$

式中, E , ν 和 γ 分别为杨氏模量,泊松比和热弹性系数。当求解边界条件为自由边界时,可求解得到

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{\gamma E}{1-\nu} \left[\frac{1}{b^2} \int_0^b T(r, z, t) r dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r T(r, z, t) r dr \right] \\ \sigma_z = \frac{\gamma E}{1-\nu} \left[\frac{2}{b^2} \int_0^b T(r, z, t) r dr - T(r, z, t) \right] \\ \sigma_\theta = \frac{\gamma E}{1-\nu} \left[\frac{1}{b^2} \int_0^b T(r, z, t) r dr + \frac{1}{r^2} \int_0^r T(r, z, t) r dr - T(r, z, t) \right] \end{cases}. \quad (8)$$

研究表明,由于材料的压缩强度远高于拉伸强度,应力损伤往往是由环向应力 σ_θ 引起的,因此后文对热应力的分析主要聚焦于环向应力 σ_θ 。

3 分析与讨论

分别利用 COMSOL 仿真软件和 Matlab 软件对比分析了复合激光(脉宽分别为 200 ns 和 1 ms)和毫秒激光(脉宽为 1 ms)辐照下三结 GaAs 太阳能电池的温度和热应力的分布,同时对比了复合脉冲激光的时间延时和不同能量分配对太阳能电池复合损伤(热效应和力学效应)特性的影响。脉冲激光光斑半径 a_0 为 5 mm,光强空间分布为高斯分布,假定激光波长 λ 为 1060 nm,顶电池和中电池对此

波长激光能量的吸收系数极小,假定能量吸收只发生在底电池中,反射系数 R 为 0.1,室温 T_0 。下吸收系数(cm^{-1})^[14]可表示为

$$\alpha(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T_0) \exp(1.096 \times 10^{-3} T - 0.41) = 1.4 \times 10^4 \exp(1.096 \times 10^{-3} T - 0.41). \quad (9)$$

研究表明,波长为 1060 nm、能量密度在 15~21 J/cm² 范围内的脉冲激光辐照时会使材料发生热损伤,因此本文选用 17 J/cm² 的单毫秒脉冲激光作为研究基准^[15]。表 1 列出了计算中使用的太阳能电池各部分材料的热力学参数^[14-17],对比电池的熔化温度,将温度高于底电池熔点的区域假定为三结 GaAs 太阳能电池的熔融损伤区域。

表 1 材料热力学参数^[14-17]

Table 1 Thermodynamic parameters of each layer for three-junction GaAs solar cell^[14-17]

Material	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$K / (\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	ν	$E / (10^{10} \text{ Pa})$	$\gamma / (10^{-6} \text{ K}^{-1})$	Melting point /K	Tensile strength /Pa
SiO ₂	2200	1000	1.7	0.16	8.7	0.5	1980	1.4×10^7
GaInP ₂	4475	370	5	0.33	8.2	5.3	1627	2.5×10^9
GaAs	$5336T - 0.0337T$	$303 + 15 \times (T/300)$	$42.5 \times (300/T)^{1.1}$	0.31	8.59	6.4	940(decomposing) 1510(melting)	2.3×10^9
Ge(solid)	$5343T - 0.066T$	$303 + 0.0613T$	$60 \times (300/T)$	0.26	10.3	5.6	1210(melting)	9.3×10^7
Ge(liquid)	$6137T - 0.46T$	380	$14 + 0.029T$				3100(sublimation)	

不考虑激光辐照下太阳能电池的气化阶段,太阳能电池发生熔融损伤时,材料的等效比热容^[18]可以表示为

$$C_f = C + L_m \frac{\exp[(T - T_m)^2 / \Delta T_m^2]}{\sqrt{\pi} \Delta T_m}, \quad (10)$$

式中, L_m 为材料的熔化潜热,取值为 510 J/g, T_m 为熔化温度, ΔT_m 为熔化温度区间,取值 10 K。

图 2 为纳秒激光作用延时 0.3 ms 时,总激光能量密度相同的单毫秒激光(能量密度为 17 J/cm²)和不同能量分配的复合激光(其中毫秒激光能量密度分别为 16.5,16.6,16.7 J/cm²)辐照下三结 GaAs 太阳能电池最高温度随时间的演化。如图 2(a)所示,在毫秒激光作用下温度稳定上升,0.3 ms 时纳秒脉冲开始作用,由于纳秒脉冲能量的高度集中,温度急剧上升至 1210 K。纳秒脉冲作用结束后温度迅速降低,之后在毫秒脉冲的作用下温度继续

稳定上升。如图 2(b)所示,由于太阳能电池发生熔融损伤时吸收大量热量,最高温度演化曲线在 1210 K 时保持明显的平坦,表明随着纳秒脉冲激光能量密度的增加最高温度维持时间增加,当纳秒脉冲激光能量密度增加到 0.5 J/cm²时,最高温度维持时间增大到 0.003 ms。如图 2(c)所示,在总激光能量密度相同的条件下,复合激光作用结束时的最高温度随着毫秒脉冲激光能量密度的减小而减小,当毫秒脉冲激光能量密度减小到 16.7 J/cm²时,最高温度只能达到 1193 K,低于底电池的熔化温度,说明复合激光辐照时毫秒激光不会使电池出现热熔损伤,主要表现为预热效应使电池温度缓慢上升。最高温度演化曲线的变化表明复合激光辐照下产生的熔化损伤主要发生在纳秒脉冲作用期间。因此,对复合激光辐照下太阳能电池的损伤分析主要聚焦于纳秒脉冲作用结束时刻。

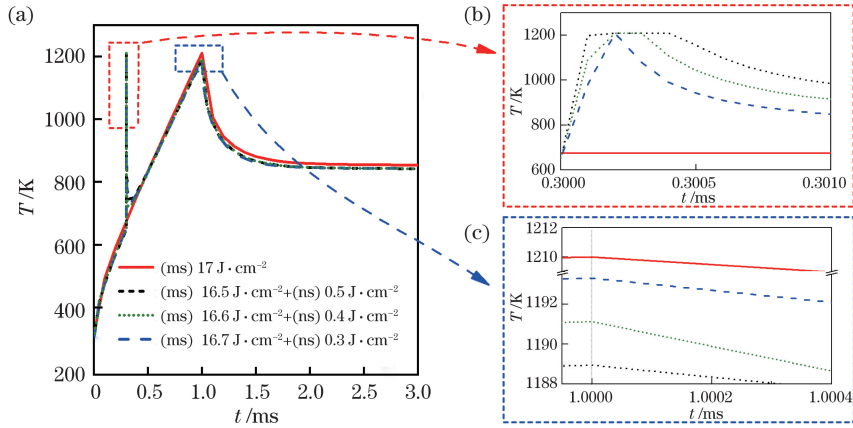


图 2 纳秒激光作用延时 0.3 ms 时,激光辐照下太阳能电池最高温度随时间的变化。

(a)整体曲线图; (b)(c)局部放大

Fig. 2 Maximum temperature of solar cell as a function of time when action time delay of nanosecond laser is 0.3 ms.

(a) Whole curves; (b)(c) partial enlarged details

图 3 为单毫秒激光作用结束时刻和复合激光中纳秒脉冲作用结束时刻三结 GaAs 太阳能电池温度场的空间分布。图 3(a)是底电池上表面温度场的径向分布。太阳能电池温度场在径向上呈现明显的高斯分布,由于激光能量的直接吸收,最高温度出现在光斑中心点。在能量密度为 17 J/cm²的毫秒脉冲激光单脉冲辐照结束时,辐照中心的温度达到底电池熔点 1210 K,太阳能电池出现熔化损伤。在复合激光纳秒脉冲作用结束时温度分布曲线在 1210 K 时保持明显的平坦,主要是因为纳秒脉冲的能量更加集中,底电池发生熔化时吸收热量使温度保持在 1210 K。熔化的面积随着纳秒脉冲激光能

量密度的增加而逐渐增大,当纳秒脉冲激光能量密度增加到 0.5 J/cm²时,底电池上表面的熔化损伤半径增大到 2 mm。图 3(b)是太阳能电池中心轴($r=0$)上的温度场的轴向分布。在单毫秒激光作用下由于热传导效应,温度在靠近热源的位置基本保持一致并随着深度的增加逐渐降低。在复合激光纳秒脉冲作用结束时由于纳秒脉冲能量的集中,极短时间内热传导作用不明显,最高温度位于能量直接吸收部位,沿扩散方向急剧降低。插图清晰地表明:随着纳秒脉冲激光能量密度的增加,产生熔化损伤的深度逐渐增大,当纳秒脉冲激光能量密度增加到 0.5 J/cm²时,熔化损伤深度增大到 1.5 μ m。

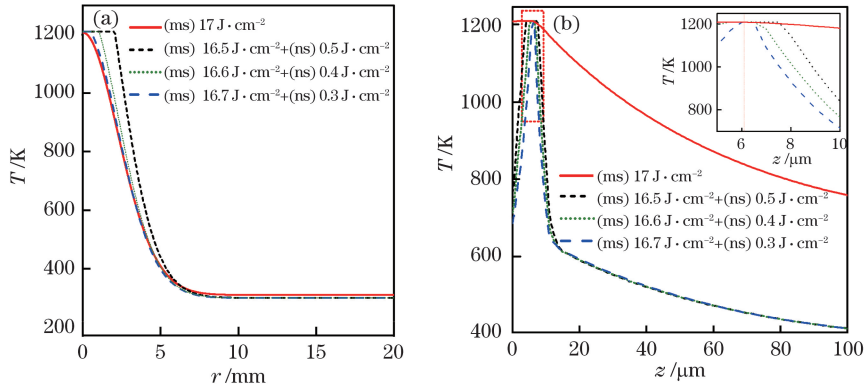


图 3 纳秒激光作用延时 0.3 ms 时,太阳能电池温度场的空间分布。

(a)径向分布;(b)轴向分布,插图为局部细节

Fig. 3 Spatial distribution of temperature of solar cell when action time delay of nanosecond laser is 0.3 ms.

(a) Radial distribution; (b) axial distribution and inset is partial detail

为进一步分析三结 GaAs 太阳能电池的温度应力损伤的演化过程,对单毫秒激光和不同能量分配的复合激光辐照下三结 GaAs 太阳能电池的热应力场进行了对比分析。图 4(a)和图 4(b)分别是纳秒激光作用前底电池上表面的环向应力 σ_θ 的径向分布和轴向分布。纳秒激光作用前,辐照区域内环向应力表现为压应力,最大压应力位于光斑中心位置,在激光光斑边界附近压应力转换为拉应力,并随着

r 增大到最大值后逐渐减小。此时,最大环向拉应力随着毫秒激光能量密度的减小而减小,当毫秒激光能量密度为 16.7 J/cm^2 时最大环向拉应力为 $4.1 \times 10^7 \text{ Pa}$,低于底电池的抗拉伸强度,表明毫秒脉冲在辐照过程中仅表现出对电池的预热效应,并不会导致电池出现应力损伤。图 4(c)和图 4(d)分别是不同能量分配的纳秒激光作用后底电池上表面的环向应力 σ_θ 的径向分布和轴向分布。在复合激光

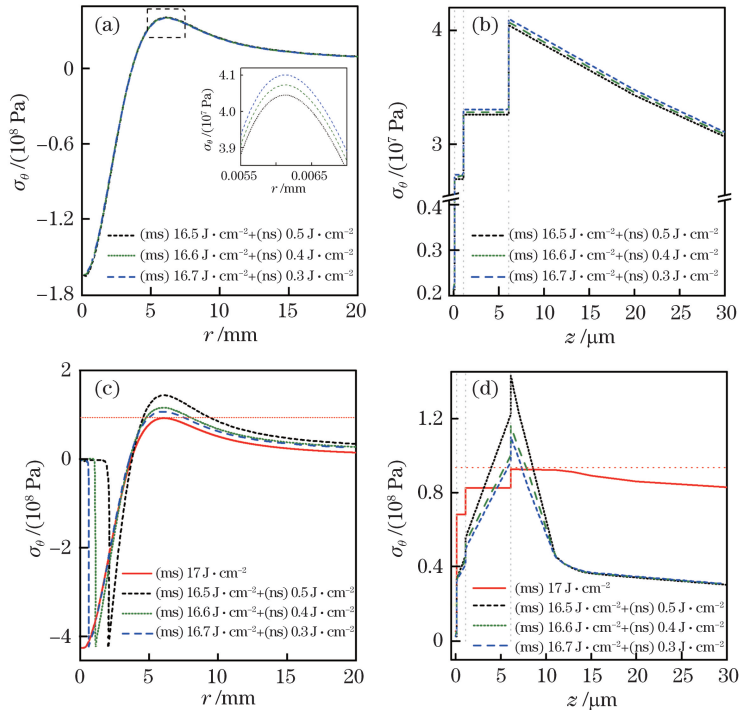


图 4 环向应力场的空间分布。纳秒激光作用前的(a)轴向分布和(b)径向分布;

纳秒激光作用延时 0.3 ms 时的(c)轴向分布和(d)径向分布

Fig. 4 Spatial distribution of hoop stress. (a) Radial and (b) axial distributions before nanosecond laser irradiation;

(c) radial and (d) axial distributions after nanosecond laser irradiation at delay time of 0.3 ms

作用下,辐照中心出现零应力区域并随着纳秒脉冲激光能量密度的增加而逐渐扩大,主要是由于辐照中心发生熔化损伤应力得到释放。对比图 3(a)温度梯度随纳秒脉冲激光能量密度的增加而增大,因此最大拉应力值随纳秒脉冲激光能量密度的增加而增大,当纳秒脉冲激光能量密度增加到 0.3 J/cm^2 时,最大拉应力值为 $10.7 \times 10^7 \text{ Pa}$,明显高于底电池的抗拉伸强度,太阳能电池发生应力损伤。在纳秒激光作用下由于极短的辐照时间里纳秒激光能量高度集中,电池局部温度迅速升高导致电池出现严重的熔融损伤和应力损伤。图 4(d)中最大环向拉应力的轴向分布规律与轴向的温度场分布基本一致,不同太阳能电池间应力的突变是由于各层材料热力学参数存在差异,在底电池中随着纳秒脉冲激光能量密度的增加产生应力损伤的深度同样逐渐增大。

图 5 为不同时间延时的复合激光(毫秒脉冲能

量密度为 16.7 J/cm^2 ,纳秒脉冲能量密度为 0.3 J/cm^2)和单毫秒激光(毫秒脉冲能量密度为 17 J/cm^2)辐照下太阳能电池最高温度随时间的演化。如图 5(a)所示,在纳秒脉冲作用时,温度急剧上升至 1210 K 。如图 5(b)所示,最高温度演化曲线在 1210 K 时保持明显的平坦,表明随着纳秒脉冲时间延时的增加最高温度维持时间增加,当时间延时增加到 0.5 ms 时,最高温度维持时间增大到 0.001 ms 。如图 5(c)所示,复合激光作用结束时的最高温度均低于毫秒激光辐照,说明复合激光辐照时毫秒激光不会使电池出现热熔损伤,主要表现为预热效应,从而使电池温度缓慢上升。由于纳秒激光作用延时增大时,纳秒激光所产生的温升热扩散时间较短,因此最高温度随着纳秒脉冲时间延时的增大而增大,当纳秒脉冲时间延时增大到 0.5 ms 时,最高温度为 1194 K 。

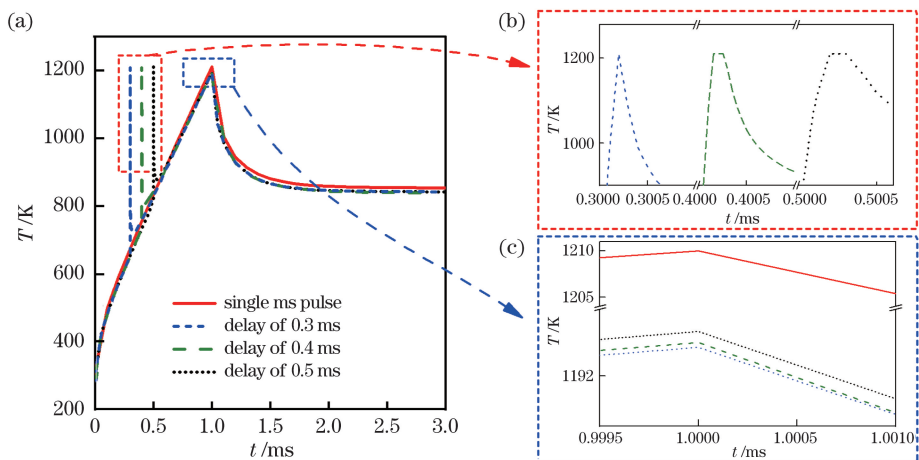


图 5 不同时间延时下太阳能电池最高温度随时间的演化。(a)整体曲线图;(b)(c)局部细节图

Fig. 5 Maximum temperature of solar cell as a function of time with different delay time.

(a) Whole curves; (b)(c) partial details

图 6 为不同时间延时的复合激光和单毫秒激光辐照下太阳能电池温度场的空间分布。图 6(a)是底电池上表面温度场的径向分布,呈现明显的高斯分布。在单毫秒脉冲激光辐照结束时,辐照中心的温度达到底电池熔点 1210 K ,太阳能电池出现熔化损伤。在复合激光纳秒脉冲作用下,底电池发生熔化时吸收潜热使温度在一定范围内保持为 1210 K 。熔化的面积随着纳秒脉冲作用时间延时的增加而逐渐增大,当时间延时增加到 0.5 ms 时,底电池上表面的熔化损伤半径增大到 1.4 mm 。图 6(b)是太阳能电池中心轴($r=0$)上的温度场的轴向分布。在复合激光纳秒脉冲作用时最高温度

位于能量直接吸收部位,并沿着扩散方向急剧降低。图 6(b)插图清晰地表明:随着纳秒脉冲激光作用时间延时的增加,产生熔化损伤的深度逐渐增大,当时间延时增加到 0.5 ms 时,熔化损伤深度增大到 $1 \mu\text{m}$ 。

图 7 是单毫秒激光和不同时间延时的复合激光作用下热应力场的空间分布。图 7(a)和图 7(b)分别为纳秒激光作用前环向应力 σ_θ 的径向和轴向分布。由于毫秒脉冲在辐照过程中表现为对电池的预热效应,作用时间延时的增加反映了毫秒激光作用时间的增加,因此最大环向拉应力随着作用时间延时的增加而增加。当时间延时为 0.5 ms

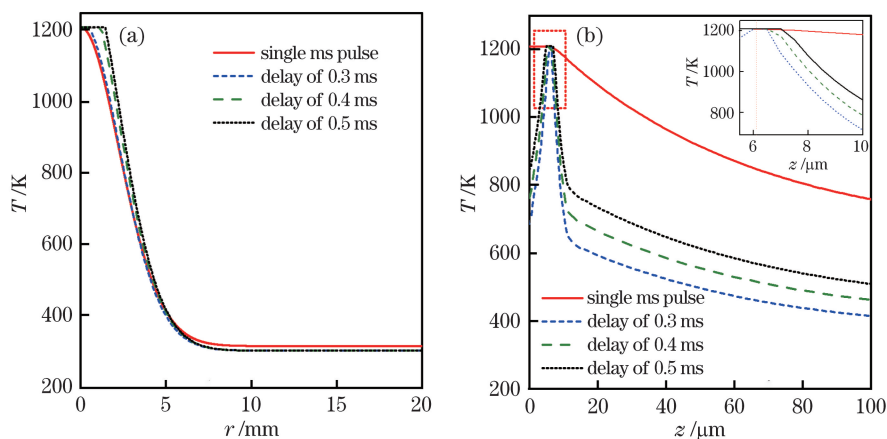


图 6 不同时间延时下温度场的空间分布。(a)径向分布;(b)轴向分布,插图为局部细节

Fig. 6 Spatial distribution of temperature with different delay time. (a) Radial distribution; (b) axial distribution and inset is partial detail

时最大环向拉应力为 5.85×10^7 Pa, 低于底电池的抗拉伸强度, 表明此时复合激光中的毫秒激光辐照并不会导致电池出现应力损伤。图 7(c) 和图 7(d) 分别是不同时间延时的纳秒激光作用后底电池上表面的环向应力 σ_θ 的径向分布和轴向分布。单毫秒脉冲作用结束时最大环向拉应力为 9.18×10^7 Pa, 低于底电池的抗拉伸强度, 表明太

阳能电池并没有发生应力损伤。在复合激光作用下, 辐照中心的太阳能电池发生熔化损伤, 应力得到释放, 出现零应力值区域。由于图 7(c) 中温度梯度会随纳秒脉冲激光作用时间延时的增加而增大, 因此最大拉应力值随时间延时的增加而增大, 当时间延时为 0.5 ms 时, 最大拉应力值为 14.3×10^7 Pa, 明显高于底电池的抗拉伸强度, 太阳能电

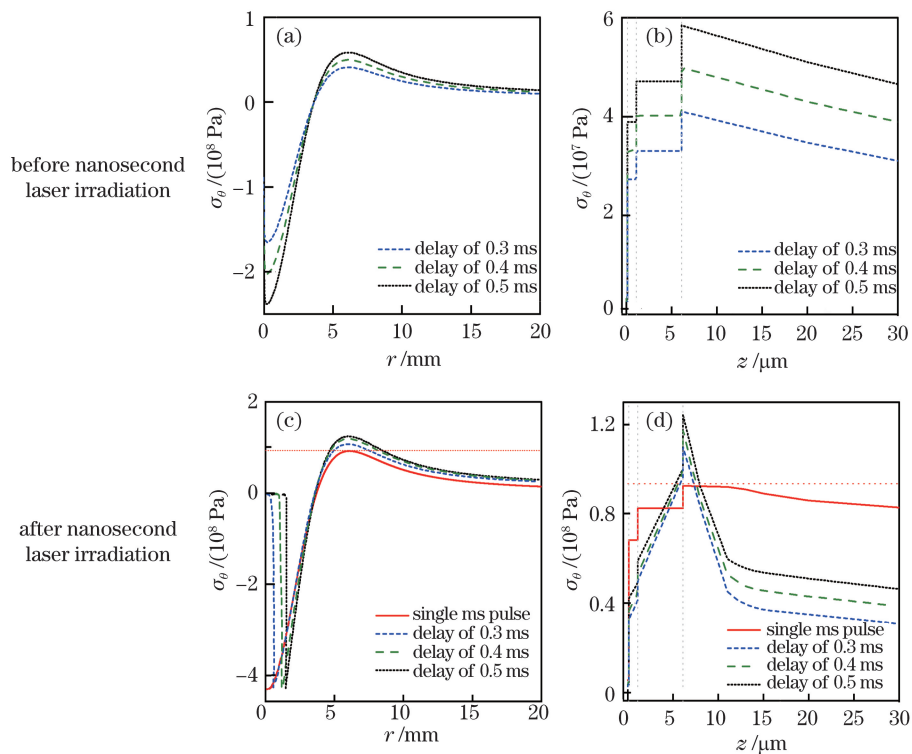


图 7 不同时间延时下环向应力场的空间分布。(a)(c)轴向分布;(b)(d)径向分布

Fig. 7 Spatial distribution of hoop stress with different delay time. (a)(c) Radial distributions; (b)(d) axial distributions

池发生应力损伤。图 7(d)表明在底电池中随着纳秒脉冲时间延时的增加,产生应力损伤的深度同样逐渐增大。

4 结 论

基于经典的热传导理论和热应力分析模型,分析了复合激光和单毫秒激光辐照下三结 GaAs 太阳能电池的温度场和热应力场的分布,同时分析了复合脉冲激光之间的时间延时和不同能量分配对太阳能电池复合损伤(热效应和力学效应)特性的影响。结果表明,在总能量密度不变条件下单毫秒激光作用太阳能电池仅仅出现熔化损伤,而复合激光辐照将会产生更大的范围的熔化损伤并且伴随明显的应力损伤;同时,损伤面积和深度会随着纳秒脉冲激光能量密度和作用时间延时的增加而增加,能量密度增加到 0.5 J/cm^2 时,熔化损伤半径增大到 2 mm 、深度增大到 $1.5 \mu\text{m}$;时间延时增加到 0.5 ms 时,熔化损伤半径增大到 1.4 mm 、深度增大到 $1 \mu\text{m}$ 。

参 考 文 献

- [1] Xiang X B, Du W H, Chang X L, et al. The study on high efficient $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ solar cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2001, 68(1): 97-103.
- [2] Segev G, Mittelman G, Kribus A. Equivalent circuit models for triple-junction concentrator solar cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2012, 98: 57-65.
- [3] Gauffier A, David J P, Gilard O. Analytical model for multi-junction solar cells prediction in space environment[J]. *Microelectronics Reliability*, 2008, 48(8/9): 1494-1499.
- [4] Lindroos J, Savin H. Review of light-induced degradation in crystalline silicon solar cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, 147: 115-126.
- [5] Hong H F, Wei J, Chiang M H, et al. Degradation mechanism of III-V triple junction solar cells analyzed using step stress tests[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 284/285/286/287: 281-286.
- [6] Xiao J, He H X, Xia H J. Stress simulation of aluminum alloy irradiated by long pulsed laser and continuous wave laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8): 0803009.
肖婧, 何衡湘, 夏惠军. 长脉冲与连续激光联合作用下铝合金的应力场仿真[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0803009.
- [7] Lü X, Pan Y X, Jia Z C, et al. Surface damage induced by a combined millisecond and nanosecond laser[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(17): 5060-5067.
- [8] Lü X, Pan Y X, Jia Z C, et al. Laser-induced damage threshold of silicon under combined millisecond and nanosecond laser irradiation[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121(11): 113102.
- [9] Zhu R Z. Researches on the irradiation effects of single junction GaAs/Ge and monocrystalline silicon solar cells under laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
朱荣臻. 单结 GaAs/Ge、单晶硅太阳能电池的激光辐照效应研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2014.
- [10] Zhong F C, Lü X M, Li J G, et al. Numerical analysis of thermal effect of the combined laser on single crystal silicon[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(5): 637-643.
钟发成, 吕雪明, 李佳桂, 等. 组合激光对单晶硅热作用的数值分析[J]. *激光技术*, 2017, 41(5): 637-643.
- [11] Zeng J L, Lu Q S, Shu B H, et al. Combined damage effect of GaAs irradiated by $1.06 \mu\text{m}$ CW and pulse laser[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 1998, 10(2): 217-220.
曾交龙, 陆启生, 舒柏宏, 等. $1.06 \mu\text{m}$ 连续与脉冲激光对 GaAs 材料的联合破坏效应[J]. *强激光与粒子束*, 1998, 10(2): 217-220.
- [12] Du L F, Zhu X B, Zhang R Z. The thermal-stress accumulation in anti-reflective coatings with multi-pulse laser irradiation[J]. *Optics Communications*, 2015, 350: 263-269.
- [13] Xu J, Chen L X, You X H, et al. Thermal stress damage of thin-film components induced by surface impurities[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0614003.
徐娇, 陈丽霞, 游兴海, 等. 表面杂质诱导薄膜元件的热应力损伤[J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0614003.
- [14] Meyer J R, Kruer M R, Bartoli F J. Optical heating in semiconductors: laser damage in Ge, Si, InSb, and GaAs[J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(10): 5513-5522.
- [15] Jiang N, Niu Y X, Zhang S L, et al. Numerical simulation of thermal shock effect on germanium induced by out-of-band pulsed-laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 481-484.
姜楠, 牛燕雄, 张书练, 等. 波段外脉冲激光对锗材料热冲击效应的数值研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(3): 481-484.
- [16] Jian S R, Sung T H, Huang J C, et al. Deformation behaviors of InP pillars under uniaxial compression[J].

- Applied Physics Letters, 2012, 101(15): 151905.
- [17] Wood R F, White C W, Young R T. Semiconductors and semimetals [M]. Pulsed laser processing of semiconductors. USA: Academic Press, 1986, 23.
- [18] Jia Z C, Zhang T Z, Zhu H Z, et al. Stress damage process of silicon wafer under millisecond laser irradiation[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(1): 011404.