

# 纳秒激光熔覆硅纳米薄膜的仿真分析及实验研究

徐龙<sup>1</sup>, 洪娟<sup>1,2</sup>, 汪炜<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016;

<sup>2</sup>盐城工学院机械工程学院, 江苏 盐城 224051

**摘要** 以重掺杂硼的纳米硅浆料为硼源,采用纳秒激光熔覆工艺,在钝化发射极及背接触(PERC)电池背面形成了重掺杂硼的硅熔覆层。通过建立三维瞬态温度场的有限元仿真模型,并利用单因素仿真实验,得到了激光工艺参数对温度场的影响规律,初步确定了各激光工艺参数的合理范围。利用极差分析获得了激光工艺参数与激光熔覆温度场分布的相互作用规律。将激光熔覆工艺兼容到 PERC 电池的制备实验中,结果表明:仿真模型与实验结果较为吻合,电池的平均光电转化效率提升了 0.27%。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 钝化发射极及背接触电池; 背场; 瞬态温度场; 有限元法

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0402008

## Simulation Analysis and Experimental Study on Nanosecond Laser Cladding Silicon Nano Film

Xu Long<sup>1</sup>, Hong Juan<sup>1,2</sup>, Wang Wei<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

<sup>2</sup>College of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng, Jiangsu 224051, China

**Abstract** Nano-silicon slurry with heavily doped boron is used as the source of boron, and nanosecond laser cladding process is used to form a heavily doped boron silicon cladding layer on the back of passivated emitter rear contact (PERC) solar cells. The finite element simulation model of three-dimensional transient temperature field is established. Based on this model and single factor simulation experiments, the influence rules of laser process parameters on temperature field are obtained and reasonable range of laser process parameters is preliminarily determined. Through range analysis, the interaction law between laser processing parameters and temperature field distribution of laser cladding is obtained. Laser cladding process is compatible with PERC solar cells preparation experiment. The experimental results show that the simulation model is consistent with the experimental results, and the average photoelectric conversion efficiency of the solar cell is improved by 0.27%.

**Key words** laser technique; laser cladding; passivated emitter rear contact solar cells; back surface field; transient temperature field; finite element method

**OCIS codes** 140.3390; 160.4236; 160.6000; 350.6050

## 1 引 言

激光熔覆是一种新的表面改性技术<sup>[1]</sup>,该技术一般采用大功率连续激光及毫秒量级的脉冲激光,其特点是作用时间较长、功率较大,被广泛应用于零件加工及修复领域<sup>[2]</sup>。但是,激光的熔化深度、工件

温升、热影响区范围、工件的表面粗糙度等<sup>[3]</sup>限制了该技术在精密零件及一些特殊场合上的应用。而纳秒和皮秒级脉冲激光的熔化深度仅为微米量级,虽然具有较高的瞬时功率,但平均功率比较小,由此造成的工件温升并不显著<sup>[4]</sup>。目前,利用激光熔覆技术进行辅助扩散的研究越来越深入。对于皮秒和飞

收稿日期: 2018-10-23; 修回日期: 2019-01-16; 录用日期: 2019-01-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51475236)、国家自然科学基金青年基金(51805466)、中国博士后科学基金面上资助项目(2018M630553)

\* E-mail: wangwei@nuaa.edu.cn

秒激光而言,其产生的热影响区较小,但是其脉宽比其加工材料中硼元素的热扩散时间短,大部分热量来不及在基体内传播就被带走,无法进行元素的扩散。连续激光虽然可以形成结合性良好的熔覆层,但其形成的熔池热影响区较宽,容易对硅基片造成热损伤。纳秒激光的脉宽时间合适、热影响区相对较小,比较适合用于制备硼掺杂的硅熔覆层。目前,利用纳秒激光在钝化发射极及背接触(PERC)电池背面使用固态及液态硼源进行硼扩散的研究也已相当普遍<sup>[5-7]</sup>,但是传统的硼源都具有一定的毒性,加之硼元素在硅基体内的扩散较慢,扩散的理论研究不够深入等,限制了 PERC 电池背场性能的提升<sup>[8-10]</sup>。因此,开发出一种清洁的硼源,找到一条低成本、高效率制备局部硼铝背场的工艺路线,以实现硼元素的扩散以及降低孔洞的产生,对制备低成本、高转换效率的太阳能电池具有非常大的实际价值。

近些年来,在激光熔覆的仿真研究方面,研究人员主要是采用连续激光或毫秒激光熔覆金属粉末或陶瓷材料<sup>[11-14]</sup>,采用有限元法建立网格单元间的热量传递模型,将激光能量以热流密度的形式加载到熔覆层表面来进行温度场的数值模拟,而对半导体材料的纳秒激光熔覆的数值模拟却鲜有报道,从而制约了激光熔覆技术在半导体领域的应用。为了在 PERC 电池背面形成良好的熔覆层结构,实现硼元素的扩散、打开钝化层以及降低孔洞产生的概率,在洪捐<sup>[15-16]</sup>研究的基础上,本课题组建立了纳秒激光熔覆半导体硅材料的三维瞬态物理模型;利用有限元分析软件求解高斯分布脉冲激光作用下的热传导方程,通过求解方程,获得了各激光熔覆工艺参数的合理范围;通过正交实验仿真,并利用极差分析,获得了各激光工艺参数对熔覆层温度场影响程度的大小顺序,并与激光熔覆实验结果进行对比,验证了仿真模型的可靠性与准确性;最后进行了 PERC 电池的制备实验,结果发现,采用激光在太阳能电池硅基体上熔覆硅纳米浆料进行辅助硼扩散的电池的效率,比利用同等激光参数打开钝化层的 PERC 电池的效率有所提升,验证了激光熔覆技术在制备 PERC 电池局部硼背场上的可行性,为研究 PERC 电池新型背场的制备提供了一定的理论基础。

## 2 纳秒激光熔覆硅薄膜的仿真分析

### 2.1 激光熔覆模型的建立

#### 2.1.1 物理模型的选取

图 1 为纳秒激光熔覆示意图,高能量密度的脉

冲激光作用于纳米硅颗粒与有机载体组成的薄层上,并以恒定的速度移动,高斯光束照射到的部分材料吸收光能,温度达到其熔点后熔化,冷却后即可实现熔覆。如图 2 所示,为了简化计算并保证仿真的精度,取模型一半的一部分进行分析,基体模型尺寸为  $60\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m} \times 80\ \mu\text{m}$ ,熔覆层厚度为  $2\ \mu\text{m}$ ,并做以下几点假设:1)经典的传热理论适用于纳秒激光与半导体材料的相互作用;2)由于纳秒激光的作用时间较短,且产生的熔池深度为微米量级,因此不考虑液态熔池流动对温度场的影响;3)硅材料的固液相变发生在一个区域范围内;4)不考虑材料出现气化之后的情形。

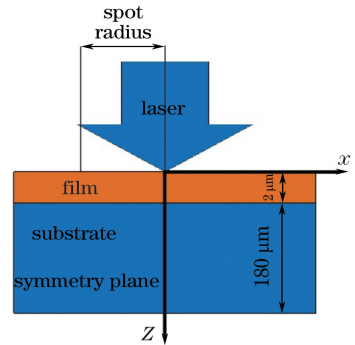


图 1 纳秒激光熔覆示意图

Fig. 1 Schematic of nanosecond laser cladding

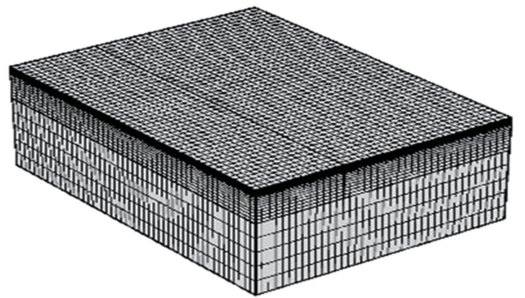


图 2 数值模拟模型

Fig. 2 Numerical simulation model

#### 2.1.2 控制方程及边界条件

纳秒激光作用于硅材料的热传导方程<sup>[17]</sup>为

$$\rho C_L \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_v \quad (1)$$

式中: $C_L$ 为材料的比热容; $\rho$ 为材料的密度; $k$ 为材料热导率; $T$ 为温度场分布函数; $t$ 为传热时间; $Q_v$ 为体积热源或者热沉,这里表示材料相变时吸收或释放的潜热。

仿真过程中设定初始温度为 300 K,上表面为高斯激光热源作用面,上表面的热流密度  $I_0$  为<sup>[18]</sup>

$$I_0 = (1 - R) \frac{4E}{\pi \tau_p \omega_0^2} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \times \exp\left[\frac{-2(x^2 + y^2)}{\omega_0^2}\right] \exp\left[-4 \ln 2 \frac{(t - 3\tau_p)^2}{\tau_p^2}\right], \quad (2)$$

式中： $R$  为材料的反射率； $E$  为单脉冲能量； $\omega_0$  为激光的有效光斑半径； $\tau_p$  为激光的半峰全宽； $x$ 、 $y$  为到激光光斑的距离。其中，移动热源的实现是通过在 COMSOL 软件中利用移动网格设置域材料的速度来实现的。

考虑到材料表面和侧面辐射、对流换热的影响，表面和侧面的热通量  $q_h$  可表示为<sup>[17]</sup>

$$q_h = h_c(T - T_0) + \sigma_b \varepsilon (T^4 - T_0^4), \quad (3)$$

式中： $h_c$  为传热系数，约为  $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ，而对称面的  $h_c = 0$ ，相当于是绝热条件； $\varepsilon$  为发射率； $T_0$  为

表 1 用于数值模拟的基体材料的属性

Table 1 Properties of basis material used in numerical simulation

Material properties	Value
Thermal conductivity <sup>[20-21]</sup> $k / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$1.585 \times 10^5 T^{-1.23}$ (solid); 125 (liquid)
Heat capacity <sup>[20-21]</sup> $c_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$1.978 \times 10^6 + 3.54 \times 10^2 T - 3.68 \times 10^6 T^2$ (solid); 1000 (liquid)
Density <sup>[b]</sup> $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2330 (solid); 2520 (liquid)
Melting point $T_m / \text{K}$	1685
Boiling point $T_v / \text{K}$	3538
Phase transition interval $\Delta T / \text{K}$	50
Reflectivity <sup>[22]</sup> $R$	0.374 (solid); 0.73 (liquid)

## 2.2 单因素仿真实验

### 2.2.1 数值模拟温度场的分析

对激光熔覆温度场进行分析，考虑到纳秒激光系统的波长为 532 nm，脉宽为 150 ns，光斑半径为  $20 \mu\text{m}$ ，采用的激光参数为：激光功率  $P = 22 \text{ W}$ ，扫描速率  $v_s = 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，重复频率  $f = 350 \text{ kHz}$ 。图 3 为  $t = 700 \text{ ns}$  时的温度场分布。由图 3 可知：此时熔覆层表面的最高温度为 2150 K，高于熔覆层材料的熔点 1687 K。高于熔点的部分被认为是液态熔池，由于激光从右向左运动，熔池呈现明显的拖尾现象，熔池形状表现为勺形，与文献[23]的表述相符。此外还可以看到，除了激光作用区域外，基体材料的温度基本保持室温不变，符合纳秒激光熔覆热影响区小的特点。

如图 4 所示，在基体材料上沿  $z$  向每隔  $1 \mu\text{m}$  取 1 个点，这些点的温度随时间的变化规律如图 5 所示。可以看出：在激光作用的初始阶段，基体表面  $z$  1 的温度逐渐升高，并达到最高点；在激光作用的中后期，基体材料向内部的导热大于接收到的激光能量，导致温度曲线开始下降。比较这 5

环境温度； $\sigma_b$  为 Stefan-Boltzmann 常数。

### 2.1.3 材料的物理性能参数

纳秒激光熔覆属于瞬态传热问题，材料的物理性能是数值模拟的前提，不同的温度下，材料的比热容、热导率、对流换热系数和焓不同。仿真中所涉及的基体材料是单晶硅片，熔覆材料为印刷烘干后的硅浆料，由于硅浆料经过  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  以上的温度烘干，有机载体大部分已经挥发，最后形成了一层粘附于硅基体上的硅薄膜，又由于烘干后的硅薄膜仅为  $2 \mu\text{m}$  左右，故在仿真过程中假设熔覆材料硅薄膜是一种由空气和纳米硅颗粒组成的材料。根据相关研究<sup>[19]</sup>，取纳米硅颗粒的热导率为体硅材料的 70%。基体的物理性能参数如表 1 所示，其中某些参数在高温下的取值是采用外推法估算得到的。

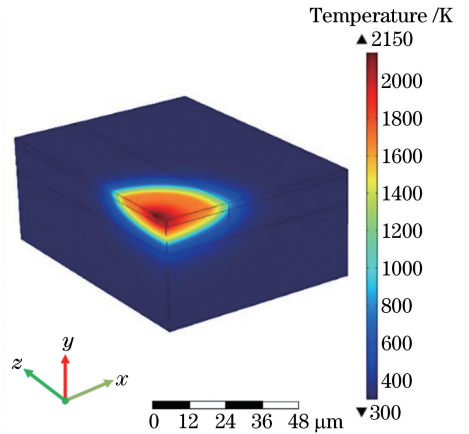


图 3  $t = 700 \text{ ns}$  时三维温度场的分布图

Fig. 3 Distribution map of three-dimensional temperature field when heat transfer time is 700 ns

个点的温度可以发现：最高温度随着离基体表面距离的增大而降低，且呈现一定的滞后性，但最终都趋于一致。这是因为激光光源快速移动，导致激光能量来不及传递到整个基体上，当激光脉冲处在脉间时，基体各部分的温度在热传导的作用下逐渐达到平衡。

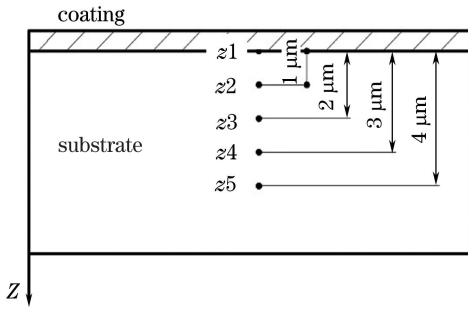


图 4 节点位置示意图

Fig. 4 Sketch map of node position

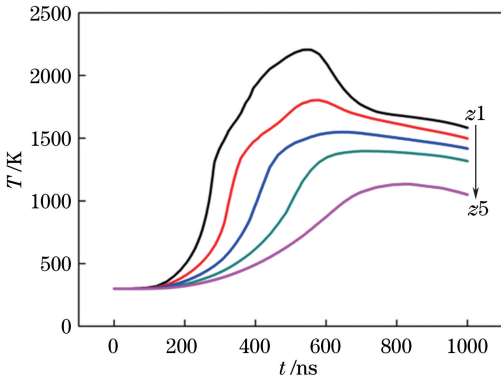


图 5 节点温度随时间的变化

Fig. 5 Variation of node temperature with time

2.2.2 不同激光功率下温度场的仿真研究

当重复频率和扫描速率一定时,激光功率的大小反映了激光输出能量的大小,直接影响着温度场的变化以及激光熔覆层的质量。为了研究激光功率对温度场的影响,在仿真过程中将激光扫描速率固定为  $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,重复频率固定为  $350 \text{ kHz}$ ,其他参数不变,调整激光功率分别为  $10, 14, 18, 22, 26, 28, 30 \text{ W}$ 。图 6 为不同激光功率下  $t=700 \text{ ns}$  时的温度场分布图。由图 6 可知:不同激光功率下的温度场分布大致相似,均表现为峰值温度随激光功率的增加而逐渐升高;光斑中心区域的温度梯度较大,远离光斑中心区域的温度梯度逐渐变小;受激光辐照后的热影响区域较小。

大量文献及本实验结果表明<sup>[24-25]</sup>,对于激光熔覆工艺而言, $h/H$  是影响熔覆层与基体之间结合性能的重要参数, $h$  为基体重熔深度, $H$  为熔池深度,如图 7 所示。一般而言,应保证  $h/H \geq 0.2$ 。理论上, $h/H$  越大,越容易形成结合性良好的熔覆层,但  $h/H$  越大,材料吸收的能量就越多,熔池的温升越大,越容易造成熔覆层材料的气化或熔覆层元素的烧损,同时也会产生过大的热影响区,导致硅基片发生热损伤,不利于电池效率的提升。

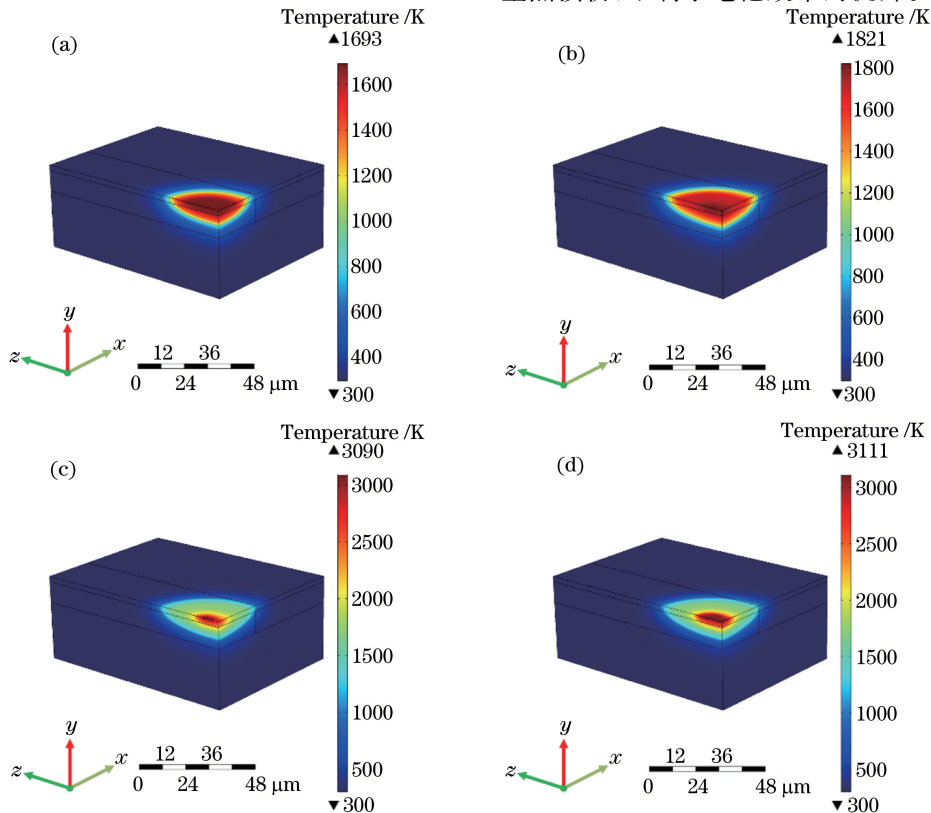


图 6 不同功率下的温度场分布图 ( $t=700 \text{ ns}$ )。 (a)  $P=10 \text{ W}$ ; (b)  $P=18 \text{ W}$ ; (c)  $P=26 \text{ W}$ ; (d)  $P=30 \text{ W}$

Fig. 6 Temperature fields at different powers ( $t=700 \text{ ns}$ ). (a)  $P=10 \text{ W}$ ; (b)  $P=18 \text{ W}$ ; (c)  $P=26 \text{ W}$ ; (d)  $P=30 \text{ W}$

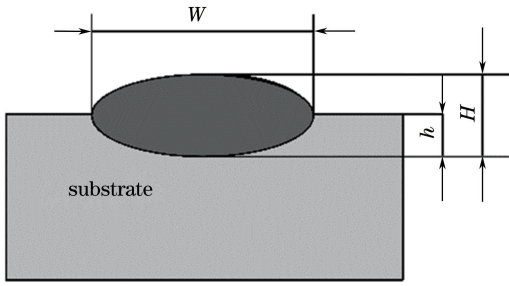


图 7 基体重熔深度与熔池深度示意图  
Fig. 7 Diagram of matrix remelting depth and molten pool depth

图 8 反映了激光功率对熔覆层几何尺寸(重熔深度、熔池深度、熔池半宽、气化深度)的影响。随着激光移动,材料不断吸收激光能量,并将能量通过热传导的方式向宽度方向和深度方向传递,使熔覆层材料和基体材料熔化,形成液态熔池。由图 8 可以发现:增大激光功率,输入材料表层的激光比能增加,熔覆层的宽度和重熔深度都随之增加;同时,激光功率越大,材料的气化效应越显著。因此,在选择激光工艺参数时应注意:若激光功率过小,激光能量不足以使基体材料熔化,不能形成质量较高的熔覆层;若激光功率过大,熔覆层材料气化严重,会导致熔覆层中的硼元素发生一定的损失,不能形成掺杂浓度适中的硼掺杂硅熔覆层;而且,若熔池温度超过了熔覆层材料的沸点,熔池中沸腾的液体会使凝固后的熔覆层中出现大量的孔洞等缺陷,从而严重制约 PERC 电池的效率。

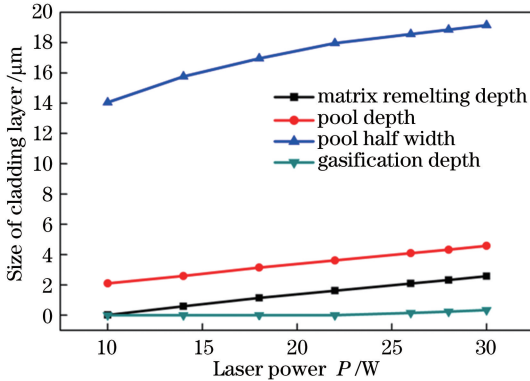


图 8 激光功率对熔覆层几何尺寸的影响  
Fig. 8 Effect of laser power on size of cladding layer

图 9 为不同功率条件下基体重熔深度与熔池深度的比值。从图 8~9 中可以看出:当激光功率为 10 W 时,虽然有熔池产生,但基体材料并没有熔化,熔覆层与基体并没有形成冶金结合,因此并不满足熔覆的条件;当激光功率为 14 W 时,虽然基体和熔覆层材料相互熔合,但  $h/H < 0.2$ ,也不利于形成结

合性良好的硅熔覆层;随着激光功率进一步增大到 30 W 时,  $h/H > 0.5$ ,此时虽然可以形成结合性良好的熔覆层,但过大的热影响区也会造成硅基片的损伤,同时熔池中心的最高温度也已大于熔覆层材料的气化温度,且气化深度达到了  $0.3 \mu\text{m}$ ,占涂覆层材料厚度的  $1/6$ ,此时熔池中沸腾的液体会使凝固后的熔覆层中产生大量的孔洞等缺陷,这会严重影响熔覆层的质量。若继续加大激光功率,将会导致熔覆层中的元素大量烧损,也不利于形成硼掺杂的硅熔覆层。因此,为了使熔覆层与基体形成良好的冶金结合,同时避免显著的气化效应造成的硼元素烧损以及孔洞等缺陷,确定相对合理的功率参数范围为 18~28 W。

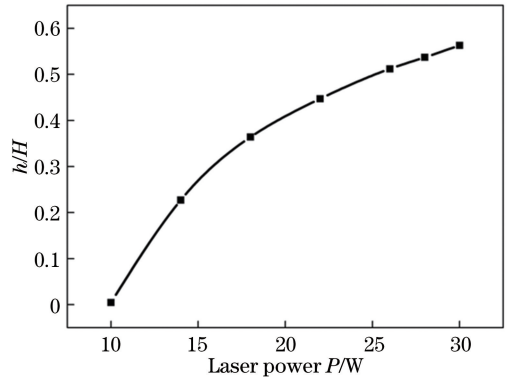


图 9 不同功率下基体重熔深度与熔池深度之比  
Fig. 9 Ratio of matrix remelting depth to melting depth at different powers

### 2.2.3 不同扫描速率下温度差的仿真研究

当重复频率和激光功率一定时,扫描速率的大小反映了激光作用的时间。为了研究扫描速率对温度场的影响,在仿真过程中,将激光功率固定为 20 W,重复频率固定为 350 kHz,其他参数不变。根据激光器实际扫描速率的可调情况,选择扫描速率分别 2,4,6,8,10,12,14,16  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图 10 为  $t = 700 \text{ ns}$  时不同扫描速率下的温度场分布图,可以看出:在其他参数不变的条件下,扫描速率越快,材料被激光辐照的时间越短,温度场峰值越低;随着扫描速率增大,熔池形状发生了改变,当扫描速率较小时,熔池呈现为不规则的椭圆形,随着扫描速率逐渐增大,熔池形状向弓形转变。

图 11 反映了扫描速率对熔覆层几何尺寸(基体重熔深度、熔池半宽、熔池深度、气化深度)的影响,可见:随着扫描速率增大,激光与熔覆层表面的作用时间缩短,表现为材料接收到的激光比能减少,热量通过热传导向宽度和深度方向传递的能量减少,从

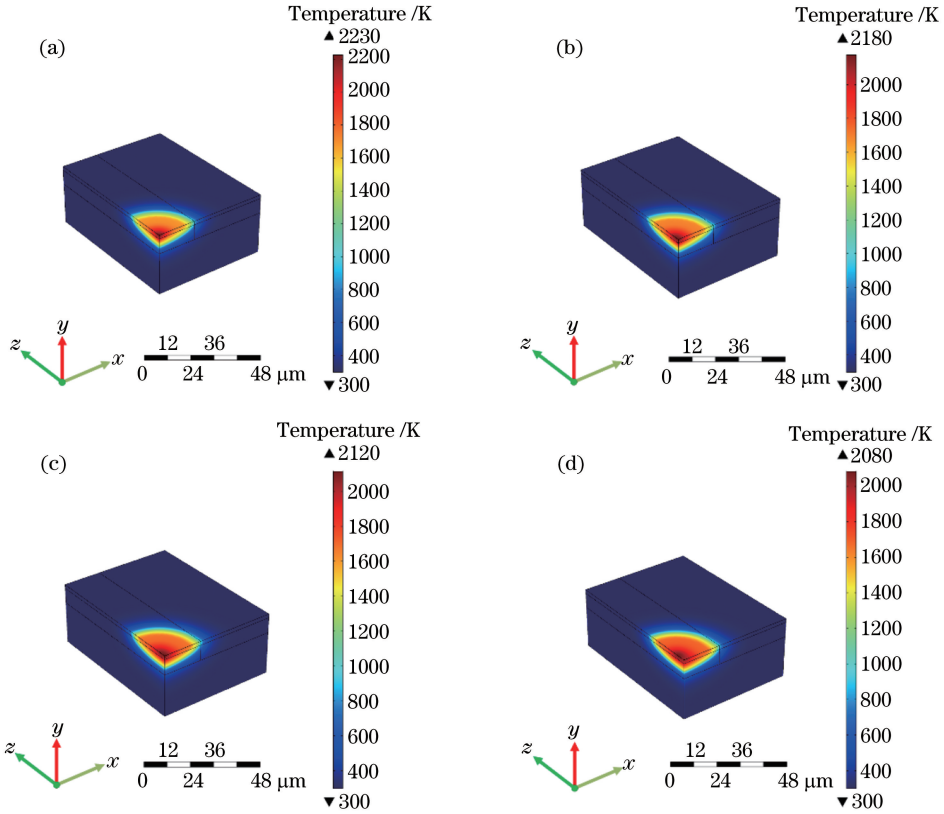


图 10 不同扫描速率下的温度场分布( $t=700$  ns)。(a)  $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (b)  $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (c)  $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (d)  $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 10 Temperature fields at different scanning speeds. (a)  $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (b)  $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (c)  $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (d)  $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

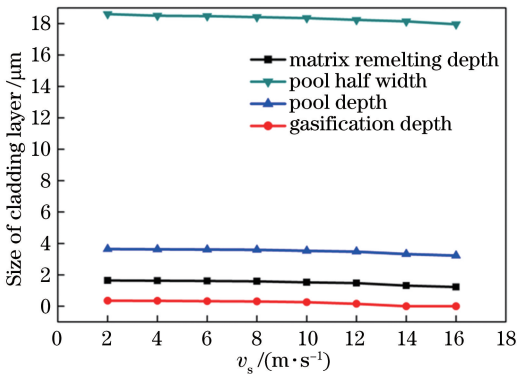


图 11 不同扫描速率下的熔覆层几何尺寸

Fig. 11 Size of cladding layer at different scanning speeds

而使得熔池深度和熔池半宽减小。此外,从图 11 中可以看到,扫描速率对熔覆层几何尺寸的影响并不明显。这是因为在纳秒脉宽的时间尺度内,激光束只移动了较小的一段距离,这对熔覆过程中温度场的影响并不大。进一步分析图 11~12 可以发现:当扫描速率为小于  $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,熔池的最高温度将高于熔覆层材料的气化温度,此时熔池中沸腾的液体不仅会使凝固后的熔覆层中产生大量的孔洞等缺陷,也会导致熔覆层材料中的硼元素发生烧损;当扫描速率增加到  $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,  $h/H=0.38$ ,此时可以形成结合性能良好的熔覆层。在实际生产过程中,

过低的扫描速率会影响电池产线的生产效率。为了保证熔覆质量,同时兼顾生产效率,选择扫描速率范围为  $8\sim 16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

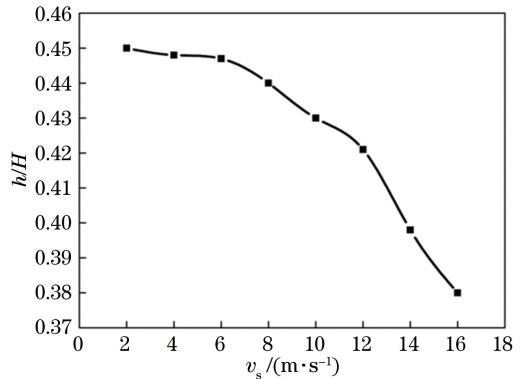


图 12 不同扫描速率下的基体重熔深度与熔池深度之比

Fig. 12 Ratio of matrix remelting depth to melting depth at different scanning speeds

#### 2.2.4 不同重复频率下温度场的仿真研究

当重复频率和激光功率一定时,重复频率的大小影响着脉冲能量的大小。为了研究重复频率对温度场的影响,在仿真过程中,将激光功率固定为  $20\text{ W}$ ,扫描速率固定为  $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,调整重复频率分别为  $200, 250, 300, 350, 400, 450\text{ kHz}$ 。图 13 为不同重复频率下的温度场分布,可见:随着重复频率

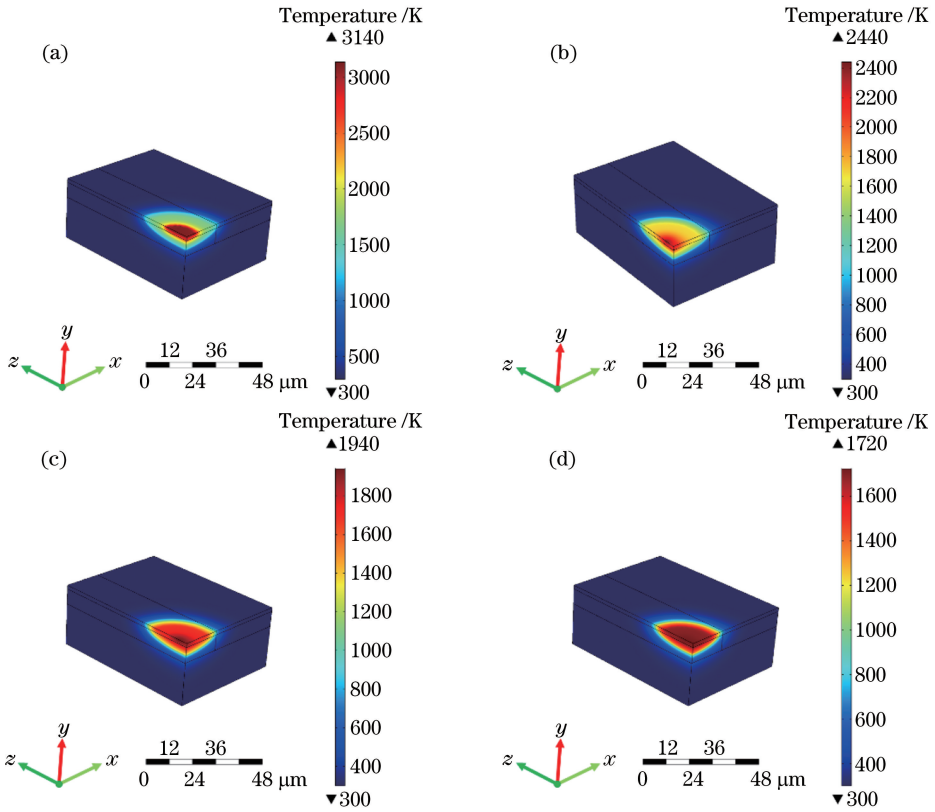


图 13 不同重复频率下的温度场分布图。(a) 200 kHz; (b) 300 kHz; (c) 350 kHz; (d) 400 kHz

Fig. 13 Temperature fields at different repetition rates. (a) 200 kHz; (b) 300 kHz; (c) 350 kHz; (d) 400 kHz

增大,单脉冲能量减少,材料吸收的能量减少,温度场峰值随之减小。

图 14 反映了重复频率对熔覆层几何尺寸的影响。由激光加工的相关公式可知:能量密度为单位脉冲能量与光斑面积之比;单位脉冲能量为平均功率与重复频率之比。在激光功率、扫描速率和光斑直径不变的情况下,能量密度与激光重复频率成反比,即随着重复频率减小,激光输出的能量密度会增大,这就导致在熔覆层表面的熔池宽度增大。当重复频率小于 250 kHz 时,熔池气化深度大于 0,若进

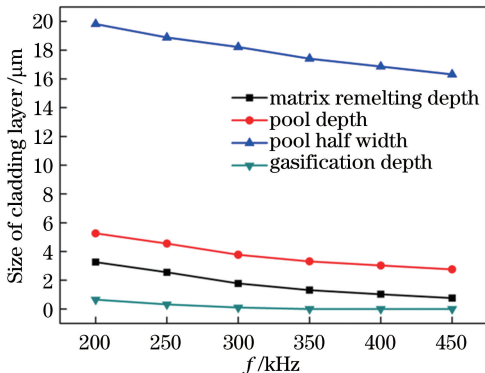


图 14 不同重复频率下的熔覆层几何尺寸

Fig. 14 Size of cladding layer at different repetition rates

一步降低重复频率,就会使熔池的气化速度增加,此时熔池中沸腾的液体不仅会使凝固后的熔覆层中产生大量的孔洞等缺陷,还会造成熔覆层材料的烧损;当重复频率为 450 kHz 时,  $h/H = 0.27$  (如图 15 所示),此时可以形成结合性能良好的熔覆层;若重复频率进一步增大,将会使得熔池深度、基体重熔深度继续下降,不利于形成结合性良好的硅熔覆层。综上所述,为了使熔覆层与基体形成良好的冶金结合,同时避免显著的气化效应影响熔覆质量,认为相对合理的重复频率参数范围为 300~450 kHz。

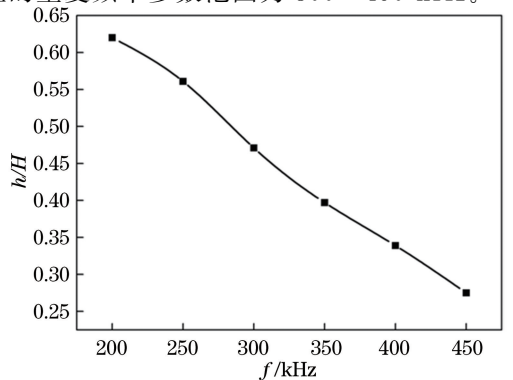


图 15 不同重复频率下的基体重熔深度与熔池深度之比

Fig. 15 Ratio of matrix remelting depth to melting depth at different repetition rates

### 3 基于工艺参数的正交实验

根据上节单因素仿真实验初步确定的合理的工艺参数范围,设计三因素三水平正交实验,进一步研究激光工艺参数对熔覆过程中温度场的影响,实验中的工艺参数如表 2 所示。将基体重熔深度与熔池深度之比  $h/H$  作为所采用的激光工艺参数是否合理的重要判据。

表 2 工艺参数影响因素的水平值

Table 2 Horizontal value of technological parameter influence factors

No.	Laser power /W	Scanning speed / ( $m \cdot s^{-1}$ )	Repetition rate /kHz	$h/H$
1	20	10	400	0.385
2	20	12	300	0.432
3	20	14	350	0.422
4	24	10	300	0.531
5	24	12	350	0.495
6	24	14	400	0.446
7	28	10	350	0.530
8	28	12	400	0.502
9	28	14	300	0.551

通过仿真计算得到了 9 组正交实验的  $h/H$ ,如表 2 所示。对该正交实验中的各因素进行极差分析,所得数据如表 3 所示。由极差分析可得:激光工艺参数对熔覆过程中熔覆层温度场的影响程度从大到小的顺序依次是激光功率、重复频率、扫描速率。

表 3 极差分析结果

Table 3 Range analysis

Factor	$h/H$			Range
	Level 1	Level 2	Level 3	
Laser power /W	0.413	0.491	0.528	0.115
Scanning speed /( $m \cdot s^{-1}$ )	0.482	0.476	0.473	0.009
Repetition rate /kHz	0.505	0.482	0.444	0.061

表 5 不同实验组下熔覆层深度与宽度的测量值与仿真值

Table 5 Measured and simulated depth and width of cladding layer in different experimental groups

Sample	Experimental group 1		Experimental group 2		Experimental group 3	
	Depth / $\mu m$	Width / $\mu m$	Depth / $\mu m$	Width / $\mu m$	Depth / $\mu m$	Width / $\mu m$
Measured value (average)	4.31	18.52	4.10	22.13	3.58	21.76
Simulation value	4.526	20.218	4.450	25.440	3.963	25.137

### 5 纳秒激光熔覆工艺对 PERC 电池性能参数的影响

相对于传统的 PERC 电池,采用纳秒激光硅熔

### 4 纳秒激光熔覆硅薄膜的实验结果

由于激光熔覆过程中熔覆层和基体温度的实时测量较为困难,所以可以基于熔覆层横截面的宽度、高度来验证模型的有效性和可靠性。激光熔覆实验工艺参数如表 4 所示。实验选取经过预处理(清洗→制绒→正面磷扩散→背面抛光后镀膜)后的硅片作为基片,其尺寸为  $156 \text{ mm} \times 156 \text{ mm} \times 180 \mu m$ ,电阻率为  $1 \sim 3 \Omega \cdot \text{cm}$ 。实验用硅纳米浆料由质量分数为 10% 的硼掺杂硅纳米颗粒(直径约为 30 nm,硼元素掺杂量约为  $4.5 \times 10^{19} \text{ atom} \cdot \text{cm}^{-3}$ )和质量分数为 90% 的有机载体混合而成。Hong 等<sup>[26]</sup>已对该配方的硅浆料在硅基片表面的印刷及热扩散性能进行了详细研究。

表 4 激光熔覆实验工艺参数

Table 4 Laser cladding process parameters

Experience group	Laser power /W	Scanning speed /( $m \cdot s^{-1}$ )	Repetition rate /kHz
1	28	10	350
2	28	14	300
3	24	12	350

通过考察熔覆层的几何尺寸对数值模拟结果进行验证。为了保证测量精度,实验过程中熔覆层几何尺寸均测量 5 次,取中间三次测量值的平均值与模拟结果进行对比。由表 5 可知,不同工艺参数下得到的熔池深度、宽度的实验结果与模拟结果都能较好地吻合,可以为激光熔覆过程分析和工艺参数的选择提供有效的支持。所选样品的熔覆层宽度和深度的平均误差分别为 12% 和 7.6%。误差产生的原因主要包括:1)仿真所选的材料的热物性参数与其实际的热物性参数有一定差异;2)所选边界条件、初始条件与实际情况可能存在一些差异;3)有限元分析软件中的网格划分、步长设置会对求解精度造成一定影响。

覆结构工艺路线制备的 PERC 电池在原有工艺的基础上仅增加了两步工序,即丝网印刷硅浆料和激光熔覆硅浆料,其余步骤与传统 PERC 电池工艺路线完全相同,而且新的工艺路线未增加新设备。为



了研究纳秒激光熔覆工艺参数对 PERC 电池性能参数的影响,根据上文得到的合理的激光参数范围,选择激光参数 ( $P = 28 \text{ W}$ ,  $v_s = 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $f = 300 \text{ kHz}$ )进行熔覆实验。

参照组(BSL-PERC)电池采用 PERC 电池的常

规工艺生产,实验组(SY-PERC)电池在普通 PERC 电池工艺的基础上采用纳秒激光熔覆工艺实现硼扩散,最后和铝浆共同烧结形成局部硼铝背场。制备 BSL-PERC 电池和 SY-PERC 电池的工艺路线方案如图 16 所示。

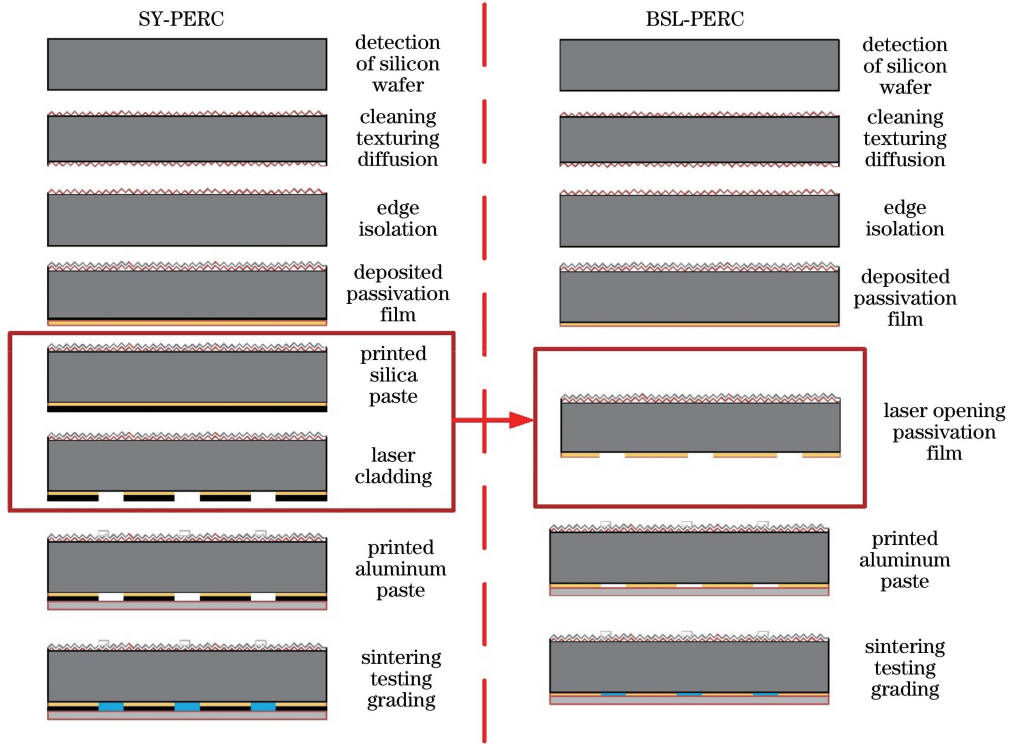


图 16 制备实验组电池和参照组电池的工艺方案

Fig. 16 Process programs of SY-PERC cell and BSL-PERC cell

图 17 为硅浆料在硅基体上印刷并烘干后的硅片实物图,可以看到:硅浆料致密地覆盖在硅片表面,烘干后,浆料中的有机载体挥发,形成了一层粘附在硅基体上的薄膜。图 18 为激光熔覆后实验组硅片的表面形貌,可以看到熔覆区域边界清晰,激光熔覆区域与未加工区域能明显区分。图 19 为对照组电池采用与实验组相同的激光工艺参数在电池硅基体上打开钝化膜后的表面形貌。

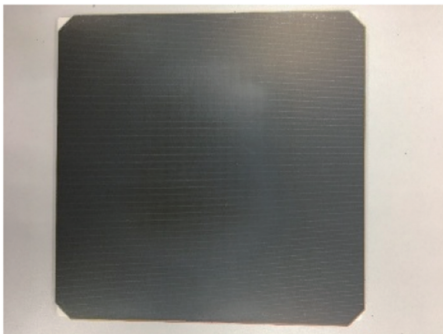


图 17 硅浆料在硅基体上印刷并烘干后的硅片实物图

Fig. 17 Silicon wafer after printing silicon paste and drying

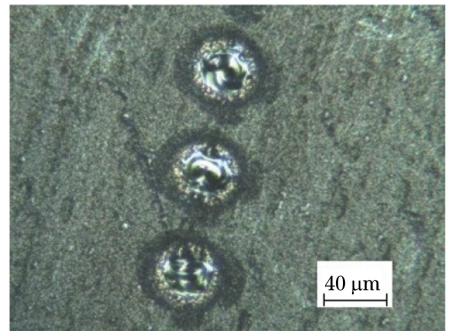


图 18 激光熔覆后实验组硅片的表面形貌

Fig. 18 Surface topography of experimental wafer after laser cladding process

同一产线上制备的实验组电池与对照组电池的各项电学性能参数如表 6 所示,可见:与参照组电池相比,实验组电池的开路电压( $V_{oc}$ )略有提升,填充因子(FF)提升了 0.21%,串联电阻( $R_s$ )明显降低,电池平均效率( $E_m$ )提升了 0.27%。效率提升的主要原因是传统的 PERC 电池背场开槽后,在与铝浆料烧结过程中容易形成孔洞,而实验组电池印刷在

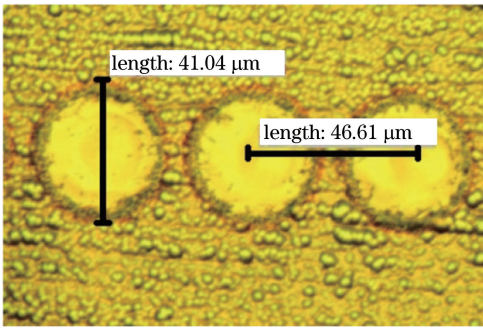


图 19 硅基体打开钝化膜后的表面形貌

Fig. 19 Surface topography of silicon substrate after laser opening passivation layer

其上的硅浆料经熔覆后可以在烧结过程中补充硅元素,从而降低了孔洞的产生。此外,激光熔覆制备的局部硼背场在降低接触电阻及表面复合方面的作用大于普通 PERC 电池的局部铝背场。由此可见:一方面,重掺杂硼的硅浆料在激光熔覆过程中可以减少背场孔洞的产生,使填充因子增大;另一方面,通过激光熔覆制备的硼背场降低了电池的串联电阻,使电池的效率得以提升。

表 6 参照组电池和实验组电池的电气性能参数

Table 6 Electrical performance parameters of BSL-PERC and SY-PERC cells

Cell group	$V_{oc}/V$	FF / %	$E_m/\%$	$R_s/(\Omega \cdot m^{-2})$
SY-PERC	0.6679	80.58	21.56	0.0019
BSL-PERC	0.6639	80.41	21.50	0.0023

## 6 结 论

通过建立在太阳能电池硅基体上的激光熔覆硅纳米薄膜的三维有限元模型,对不同激光参数下的温度场分布进行了数值模拟和实验分析,并得出以下结论:1)在激光作用过程中,熔池的温升和尺寸随着激光功率的增大而增大,随着扫描速率和重复频率的增加而减小,通过分析数值模拟的结果为后续利用激光熔覆进行电池实验确定了较为合适的激光工艺参数范围;2)利用正交实验仿真和极差分析得到了各工艺参数对温度场的影响程度,激光功率对温度场的影响最大,其次为重复频率,扫描速率的影响最小;3)将纳秒激光熔覆工艺应用到 PERC 电池产线中进行电池实验后发现,使用纳秒激光熔覆工艺制备的电池的平均效率可达到 21.56%,略优于正常产线上生产的电池的效率。

在 PERC 电池产线上采用纳秒激光熔覆工艺可以在一定程度上提升电池的性能,为高效率、低成本 PERC 电池的研究提供了一种新思路,同时为后

续进一步研究熔覆过程中合理的浆料组分和激光工艺参数,提供了理论和实验基础。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Y F, Xiao L J, Liu M X, *et al.* Research progress of laser cladding amorphous coatings [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(7): 070002.  
王彦芳,肖丽君,刘明星,等.激光熔覆制备非晶复合涂层的研究进展[J].激光与光电子学进展,2014,51(7): 070002.
- [2] Zhai J H, Liu Z J, Zhang Y, *et al.* Laser cladding repair of inner cylinder piston rods [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 111411.  
翟建华,刘志杰,张勇,等.内缸活塞杆的激光熔覆修复[J].激光与光电子学进展,2017,54(11): 111411.
- [3] Zhang Y B, Bin R, Lang D M. Calculation for nano-second pulsed laser cladding temperature field and analysis of thin film removal mechanism [J]. Applied Laser, 2012, 32(6): 464-468.  
张永彬,宾韧,郎定木.纳秒脉冲激光熔覆温度场计算及薄膜飞溅机制分析[J].应用激光,2012,32(6): 464-468.
- [4] Yu Y S, You L B, Liang X, *et al.* Progress of excimer lasers technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(9): 2253-2270.  
余吟山,游利兵,梁勳,等.准分子激光技术发展[J].中国激光,2010,37(9): 2253-2270.
- [5] Kluska S, Granek F. High-efficiency silicon solar cells with boron local back surface fields formed by laser chemical processing [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 32(9): 1257-1259.
- [6] Das A, Kim D S, Nakayashiki K, *et al.* Boron diffusion with boric acid for high efficiency silicon solar cells [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2010, 157(6): H684-H687.
- [7] Vinodkumar M, Korot K, Limbachiya C, *et al.* Screening-corrected electron impact total and ionization cross sections for boron trifluoride (BF<sub>3</sub>) and boron trichloride (BCl<sub>3</sub>) [J]. Journal of Physics B, 2008, 41(24): 245202.
- [8] Su S C, Wang T, Han Y Z, *et al.* p<sup>+</sup>/n<sup>+</sup> emitter of the crystalline silicon solar cell fabricated with solid diffusion source deposited by HWCVD method [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2016, 45(11): 2591-2595.  
宿世超,王涛,韩宇哲,等.热丝 CVD 法沉积固态扩散源制备晶硅太阳能电池 p<sup>+</sup>/n<sup>+</sup>发射极研究[J].人工晶体学报,2016,45(11): 2591-2595.

- [9] Li H B, Dong J B, Liu R Z, *et al.* A boron diffusion process for crystalline silicon solar cells with back junction and back contact: CN201310617109.5 [P]. 2014-03-19.  
李海波, 董经兵, 刘仁中, 等. 一种背结背接触晶体硅太阳能电池的硼扩散工艺: CN201310617109.5 [P]. 2014-03-19.
- [10] Yang N N, Shen H L, Jiang Y, *et al.* Influence of SiO<sub>2</sub> nanosphere on the performance of p<sup>+</sup> layer formed by B diffusion from boric acid solution [J]. *Materials Review*, 2017, 31(12): 11-14.  
杨楠楠, 沈鸿烈, 蒋晔, 等. 二氧化硅纳米球对硼酸源扩散形成 p<sup>+</sup> 硅层性能的影响 [J]. *材料导报*, 2017, 31(12): 11-14.
- [11] Liu K, Liu Y X, Niu J J, *et al.* Simulation of temperature field distribution finite element during laser cladding TiCN coatings on titanium alloy [J]. *Laser Journal*, 2016(8): 27-32.  
刘奎, 刘雅璇, 牛钧杰, 等. 钛合金表面激光熔覆 TiCN 涂层及其温度场有限元模拟 [J]. *激光杂志*, 2016(8): 27-32.
- [12] Liu J, Luo K Y, Jing X, *et al.* Simulation and analysis of the temperature field in laser cladding 316L stainless steel [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(s1): s103002.  
刘娟, 罗开玉, 景祥, 等. 激光熔覆 316L 不锈钢温度场模拟与分析 [J]. *中国激光*, 2015, 42(s1): s103002.
- [13] Liu H, Yu G, He X L, *et al.* Three-dimensional numerical simulation of transient temperature field and coating geometry in powder feeding laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(12): 1203007.  
刘昊, 虞钢, 何秀丽, 等. 送粉式激光熔覆中瞬态温度场与几何形貌的三维数值模拟 [J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1203007.
- [14] Gong X Y, Gao S Y, Xian S Y, *et al.* Warp deformation in single-track laser cladding based on temperature characteristics [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 101410.  
宫新勇, 高士友, 咸士玉, 等. 基于温度特征的单道激光熔覆翘曲变形 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 101410.
- [15] Hong J. Preparation of boron doped silicon nano paste and its fundamental research for application in back surface field of high-efficiency silicon solar cells [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016: 49-55.  
洪捐. 硼掺杂硅纳米浆料制备及其在高效晶硅太阳能电池背场中的应用基础研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016: 49-55.
- [16] Hong J, Xuan R W, Huang H B, *et al.* B-doped nano-Si-paste by picosecond laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0902006.  
洪捐, 宣容卫, 黄海冰, 等. 皮秒激光熔覆硼掺杂硅纳米浆料的实验研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0902006.
- [17] Bahrami A, Helenbrook B T, Valentine D T, *et al.* Fluid flow and mixing in linear GTA welding of dissimilar ferrous alloys [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 93: 729-741.
- [18] Sun P, Li M, Yang Q X, *et al.* Numerical simulation of the accumulative photo-thermal effect in silicon under illumination with sequential laser pulses [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2018, 16(1): 158-163.  
孙鹏, 李沫, 杨庆鑫, 等. 硅在脉冲激光作用下温度积累效应的数值模拟 [J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2018, 16(1): 158-163.
- [19] Chari V D, Sharma D V S G K, Prasad P S R, *et al.* Dependence of thermal conductivity in micro to nano silica [J]. *Bulletin of Materials Science*, 2013, 36(4): 517-520.
- [20] Li Z M, Nie J S, Hu Y Z, *et al.* Heat accumulation effects on the ablation of silicon with high frequency femtosecond laser [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(4): 410-415.  
李志明, 聂劲松, 胡瑜泽, 等. 高频飞秒激光对硅材料烧蚀的热积累效应 [J]. *激光与红外*, 2017, 47(4): 410-415.
- [21] Zhao K F, Cheng G G, Zhang Z Q, *et al.* Numerical simulation of solidification process of molten silicon in horizontal tube [J]. *Hot Working Technology*, 2017, 46(9): 93-96.  
赵凯峰, 程广贵, 张忠强, 等. 熔融硅在水平管道凝固过程的数值分析 [J]. *热加工工艺*, 2017, 46(9): 93-96.
- [22] Shen Z H, Ni X W, Lu J. Theoretical calculation for thermal effect of the semiconductors induced by the laser pulse [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 1998, 9(4): 344-346.  
沈中华, 倪晓武, 陆建. 激光对半导体材料热作用的理论计算 [J]. *光电子 • 激光*, 1998, 9(4): 344-346.
- [23] Yu T B, Sun J Y, Wang H, *et al.* Parameter selection of laser cladding TC11 titanium alloy simulated by temperature field [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(3): 284-290.  
于天彪, 孙佳钰, 王航, 等. 温度场模拟激光熔覆 TC11 钛合金工艺参数的选择 [J]. *激光与红外*, 2017, 47(3): 284-290.
- [24] Tao C H. Basic experiment and simulation on laser cladding forming of metal powder [D]. Dalian: Dalian

- University of Technology, 2008: 29-30.  
陶春华. 金属粉末激光熔覆成型的基础实验与模拟 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008: 29-30.
- [25] Zhang Q M, Liu W J, Yang S, *et al.* Analysis model of dilution and related factor in process of powder feeding laser cladding [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2002, 14(1): 11-15.
- 张庆茂, 刘文今, 杨森, 等. 送粉式激光熔覆稀释率的分析模型及其影响因素[J]. 钢铁研究学报, 2002, 14(1): 11-15.
- [26] Hong J, Wang W, Shi B, *et al.* Screen-printed Si paste for localized B doping in a back surface field [J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 36(1): 8-10.