

高光谱吸收微纳结构表面提高太阳能温差发电性能的研究

伏泊霖, 宋琳, 李旭, 陶海岩*, 宋晓伟*, 林景全

长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022

摘要 采用飞秒激光等离子体丝(飞秒光丝)在金属铝箔表面以不同飞秒光丝扫描速度(5, 15, 25, 35 和 45 mm·s⁻¹)制备了微纳结构表面,并在太阳光能量主要覆盖的光谱范围(330~890 nm)内对其进行了反射率测量,发现飞秒光丝制备的微纳结构表面具有显著的高光谱吸收特性,并且飞秒光丝扫描速度越慢,光谱吸收率越强,5 mm·s⁻¹条件下微纳结构表面光谱吸收率达97%以上。将制备的高光谱吸收微纳结构表面作为温差发电片(TEG)光吸收体,以此为基础构建了考虑太阳光辐照及温差发电模块(即TEG模块:结合微纳结构表面的TEG)散热情况的仿真实验环境并进行发电功率测量。研究结果表明,具有微纳结构的铝表面(5 mm·s⁻¹制备条件下)与抛光铝箔或裸发电片相比,光电转化效率(发电效率)可分别提高43.3和10.7倍。进一步研究了TEG模块的温差发电的过程与机理,将TEG模块的温差发电过程分为光热(光能转化为热能)与热电(热能转化为电能)两个转化过程分析:首先在光热转化过程中,微纳结构表面增强了太阳光吸收效率,为光热转化提供更多的光子能量,实现了其在表面更多的热量沉积,进而在之后的热电转化过程中,更多的热能沉积使得TEG模块的载流子迁移率得到了很大提升,这样在同样的温差(发电片冷热端的温度差值)条件下,微纳结构表面与普通表面相比可以获得更高的热电转化效率。因此,微纳结构表面的高光谱吸收性能使得TEG模块经光热转化后得到的高热能沉积使载流子迁移率得到了提高,进而显著提升了TEG模块发电性能,这是微纳结构表面增强TEG温差发电效率的主要原因。这一机理的揭示,为TEG模块发电性能的进一步优化和提升提供了理论依据,对TEG模块的实际应用具有重要的意义。

关键词 飞秒激光;微纳结构;温差发电

中图分类号: TK514

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)06-1892-06

引言

太阳能是取之不尽用之不竭的绿色能源,利用其进行发电获取清洁能源有望有效解决环境污染、能源危机等问题。在太阳能发电领域,除光伏发电外,还有一项十分具有吸引力的工作就是太阳能光热技术^[1-4]。理论研究已经表明,热电装置的效率可以达到30%^[5],并且用于制造更有效的热电装置的高性能材料也正在不断发展^[6-13],在未来很快会实现高效率热电装置的成功研发。目前,虽然太阳能热电技术的光电转化效率较低^[2],但是具有低成本、免维护、寿命长(15~20年)和极高可靠性等独特优势^[3]。其装置及维护费用仅为光伏太阳能发电的十分之一。热电装置较低的成本及维

护费用可以弥补其低转换效率的不足,这类太阳能电站可以建在乡村和偏远地区的闲置土地^[8],具有广泛的应用价值。

目前对太阳能温差发电的研究已经逐渐开展起来^[14-19],有学者提出一种用于屋顶的太阳能温差发电装置^[14],在屋顶设置了热电转换器件,利用附有透明有机材质保护层的金属板来吸收太阳能的辐射热,产生的电力可以达到基本的家庭用电的要求。当金属材料作为热电装置光吸收体时,尽管金属是热的良导体保证了热量传输的低损耗,但是对太阳光反射率却很高,这使很多光能能量因高反射而被浪费。幸运的是,研究人员近年来已经发展了一种飞秒激光直接制备高光吸收微纳结构表面的技术^[20]。并通过优化实验参数可以进一步同步实现金属表面的高光吸收特性与超疏水自清洁功能的有效结合^[21]。这样有望同时解决金属表面存在的光吸收

收稿日期: 2018-06-13, **修订日期**: 2018-11-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1107402), 国家自然科学基金项目(61605017), 吉林省科技厅项目(20170519018JH, 20180520198JH), 吉林省教育厅项目(JJKH20181104KJ, JJKH20190549KJ), 长春理工大学青年科学基金项目(XQNJJ-2015-01, XJJLG-2016-13)

作者简介: 伏泊霖, 1994年生, 长春理工大学理学院硕士研究生 e-mail: bolinfuedu@hotmail.com

* 通讯联系人 e-mail: hytao@cust.edu.cn; songxiaowei@cust.edu.cn

率低下与表面清洁维护的问题。目前,利用自然光(不考虑不同辐照度对发电效率的影响)及不考虑冷端散热的前提下,研究人员初步演示了飞秒激光制备微纳结构表面作为光吸收体增强温差发电功率的效果^[22]。然而,据我们所知,激光制备微纳结构表面提高太阳能驱动温差发电功率的研究还没有深入展开,尤其在辐射照度与热沉的环境仿真方面尚未进行。飞秒激光表面处理技术可以实现远程、快速的^[23]、任意曲面的^[24]功能微纳结构制备。因此,发展飞秒激光制备表面微纳结构在温差发电应用探究具有重要的应用意义,而这一工作目前还未见报道。

本文建立了基于太阳光辐照及温差发电片(thermoelectric generator, TEG)模块散热仿真环境的温差发电功率测量装置。利用飞秒激光在金属铝箔表面制备了多种尺寸微纳结构,并在仿真环境下对太阳能驱动温差发电功率进行了测量,结合光吸收率和表面温度变化从光热转化与热电转化两个主要物理过程分析了发电功率增强机理。

1 实验部分

1.1 样品制备与表征

如图 1 所示,在大气环境下,使用中心波长 800 nm,重复频率 1 kHz,脉冲宽度 50 fs 的飞秒激光(美国 Coherent 公司飞秒激光系统),激光单脉冲能量最大可达 4 mJ。利用焦距 $f=1$ m 聚焦透镜聚焦,飞秒激光经透镜形成了长约 10 cm 的飞秒光丝,如图 1(b)所示,垂直入射样品表面。实验样品为铝箔(30 mm×30 mm×0.2 mm),固定于二维平移台 x - y 面上(德国 PI 平移台, x 轴型号 M-521DD, y 轴型号 M-410CG),样品表面距聚焦透镜 90 cm。采用飞秒激光光栅扫描方法^[24]对样品表面进行微纳结构制备。通过控制 x 方向平移台的移动调节光丝扫描的速度 v ,利用能量衰减器调节入射飞秒激光的脉冲能量 E_p 。样品表面形貌利用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM, 日本电子公司)观测。使用配备积分球的光栅光度计(岛津 UV3600)测量样品表面反射率。

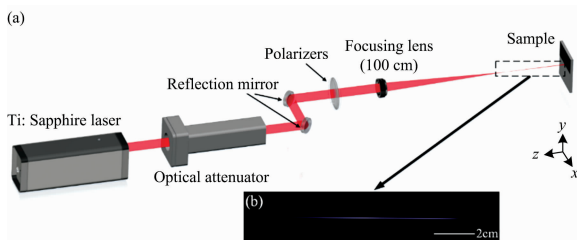


图 1 飞秒激光制备金属微纳结构表面示意图

(a): 光路图; (b): 飞秒光丝图像

Fig. 1 Schematic of processing micro-nano structure metal surface by femtosecond filament

(a): Beam path diagram; (b): Photo of a femtosecond filament in air

1.2 仿真环境建立与数据测量

采用与样品同样表面尺寸的温差发电片(尺寸 30 mm×30 mm×3 mm),利用导热硅脂将吸收体样品(吸收体分为未

处理金属表面与飞秒光丝制备的微纳结构表面)放置并粘附于 TEG 热端组成测试用的太阳能 TEG 模块。为了得到更接近于实际的可靠实验结果,如图 2 所示,建立了基于考虑太阳光辐照环境模拟与 TEG 模块本身散热的仿真环境实验装置。利用氙汞灯光源(CHF-XM-500W, 辐射照度 0~200 000 lx 可调,出光距离为 24 英寸,光斑直径为 3 英寸)来模拟可量化的太阳光辐照,并利用照度计测量辐射照度。利用风冷系统和铝制塔形散热片作为 TEG 模块散热装置,风冷系统由无级可变速风机、风道、黑箱(遮光箱)以及风速计组成(风速设置为自然一级风速 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),本实验装置加入散热装置首先促进了热流在热电材料中的轴向传输,其次风冷的引用更接近于实际应用环境,能做到类环境仿真的效果。风道对风机产生的风进行约束,避免冷风带走 TEG 热端的热量。黑箱用来隔绝太阳能模拟器发出的模拟太阳光,以免光照的热效应对冷端空气加热而导致实验误差增大。通过红外热像仪(品牌 NEC, 型号为 TH9100, 热灵敏度小于 $0.06 \text{ }^\circ\text{C}$)测量光吸收体表面温度,利用植入热沉内的贴片式热电偶探测器测量冷端温度。

对 TEG 模块发电功率的测量,将 TEG 模块作为发电源接入电路中产生的稳定最大输出功率作为模块发电功率 P 。我们将 TEG 模块接入含有负载电阻(负载电阻阻值近似等于电路与模块本身内阻以保证 TEG 输出功率最大)的电路,采用模数转换的方式,利用微程序控制器(microprogrammed control unit, MCU)时钟程序配合 12 位 A/D 芯片(1 mV 精确分辨率)实时记录 TEG 模块正负极电位 U 以及电路中电流 I 的数据,通过测量数据计算模块最大输出功率 $P_{\text{out}} = IU$, P_{out} 随时间稳定后(200 s 辐照后)取平均值为模块发电功率 P 。TEG 模块电功率 P 与其吸收到的仿真太阳光辐射通量 Φ_s 的比值作为发电效率。 $\Phi_s = EA$, 其中 E 与 A 分别表示太阳能辐射照度与辐射在铝箔上的有效面积。

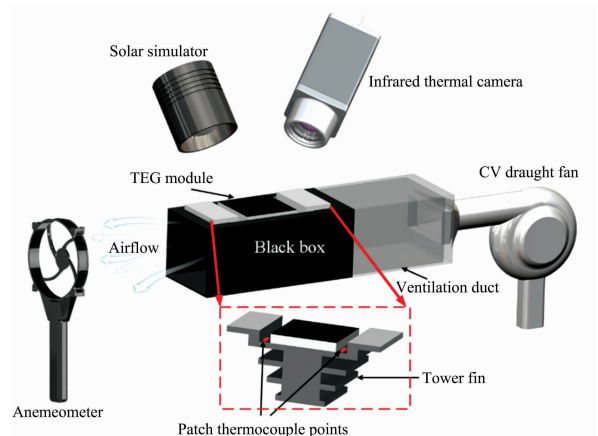


图 2 仿真装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of simulation device

2 结果与讨论

飞秒光丝固定激光能量 $E_p = 3 \text{ mJ}$ 在不同扫描速度制备了铝微纳结构表面,表面微观形貌如图 3 所示,铝箔样品表

面经飞秒激光扫描后形成了柱形微纳复合结构, $v=5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 扫描制备的表面微结构高度和宽度达到最大, 随着扫描速度的增大激光诱导表面形成的微纳米结构随之减小[如图 3(a)–(e)所示], 当 $v=35 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $v=45 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 表面结构尺寸变化不是十分明显。

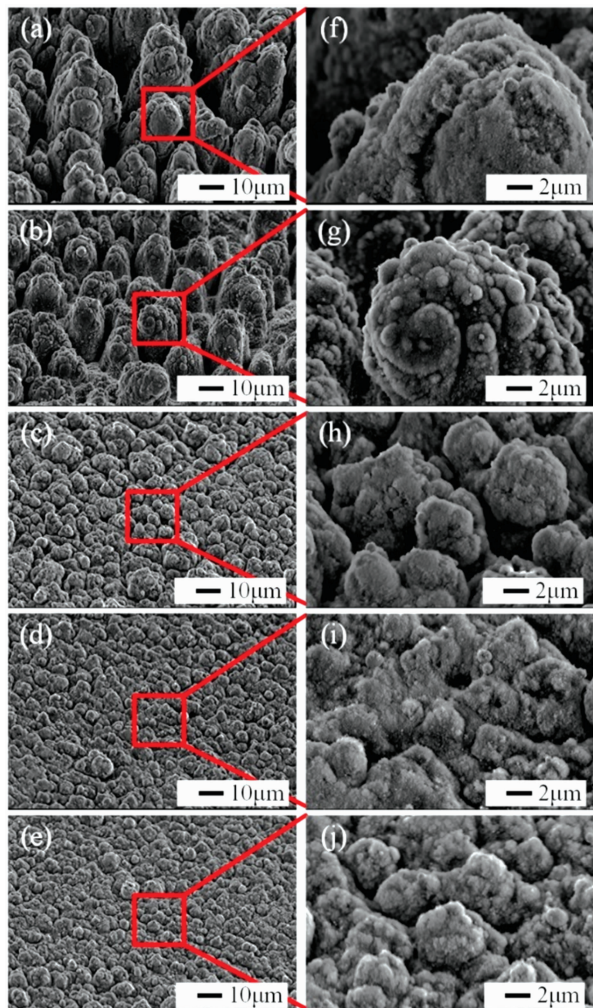


图 3 飞秒激光扫描制备微纳米结构的铝箔样品 SEM 形貌图

(a): $E_p=3 \text{ mJ}$, $v=5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (b): $E_p=3 \text{ mJ}$, $v=15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$;
(c): $E_p=3 \text{ mJ}$, $v=25 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (d): $E_p=3 \text{ mJ}$, $v=35 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$;
(e): $E_p=3 \text{ mJ}$, $v=45 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$;

(f)–(j) 对应是 (a)–(e) 高倍率图像

Fig. 3 SEM morphology of black aluminum foil samples with different surface micro-nano structures processed by femtosecond laser filament scanning

(a): $E_p=3 \text{ mJ}$, $v=5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (b): $E_p=3 \text{ mJ}$, $v=15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$;
(c): $E_p=3 \text{ mJ}$, $v=25 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; (d): $E_p=3 \text{ mJ}$, $v=35 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$;
(e): $E_p=3 \text{ mJ}$, $v=45 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$;

The images from (f) to (j) are the enlarged views of (a)–(e)

应用以上飞秒激光制备的微纳结构表面, 将其(附加抛光铝箔进行对比)与 TEG 粘接做成太阳能 TEG 模块, 进一步研究这种模块的发电功率。首先研究了模拟太阳光辐照度

对微纳结构表面 TEG 模块发电功率的影响。选取表面微结构尺度最小的样品[如图 3(e), 制备扫描参数为 $E_p=3 \text{ mJ}$, $v=45 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$]为例构造 TEG 模块, 进行不同模拟辐照度下的 TEG 模块发电功率测量。实验结果如图 4(a)所示, 对于单一辐照度条件, 随着测量时间的增加 TEG 模块在辐照初期输出功率会快速提升(0~200 s), 之后趋于平稳(200~1200 s)。这种辐照初期的变化趋势是由 TEG 模块光热转化存在的驰豫导致的, 我们将 200 s 后的输出功率平均值作为测量所得的发电功率 P 。对比不同辐照度输出功率曲线发现, 随着辐照度的升高发电功率也随之升高, 这是因为越高的辐照度意味着微纳结构表面吸收体单位面积吸收到光能量越大, 会导致光能转化的热能在 TEG 热端的沉积增多, 进而提高了热、冷端温差而增加了发电功率。然而在通常条件下, 太阳光的辐照度一般为 100 000 lx(夏天阳光直射地面), 有效提高在 100 000 lx 下的发电功率更为重要。因此以 100 000 lx 作为仿真辐照条件, 进行了太阳能吸收体表面形貌对发电功率影响的研究。研究结果如图 4(b)所示, 随着扫描速度的降低(对应图 3 中随着微纳结构尺寸增加)发电功率逐渐提高, 最高可达到 18.26 mW。飞秒激光处理得到的微纳结构表面发电功率为未处理金属铝和原表面的 43.3(抛光铝箔 TEG 模块)和 10.7(裸 TEG 模块)倍。从不同光纤扫描速度制备的微纳结构表面发电功率变化趋势可以发现微结构尺寸越大越有利于 TEG 模块的发电功率提升。

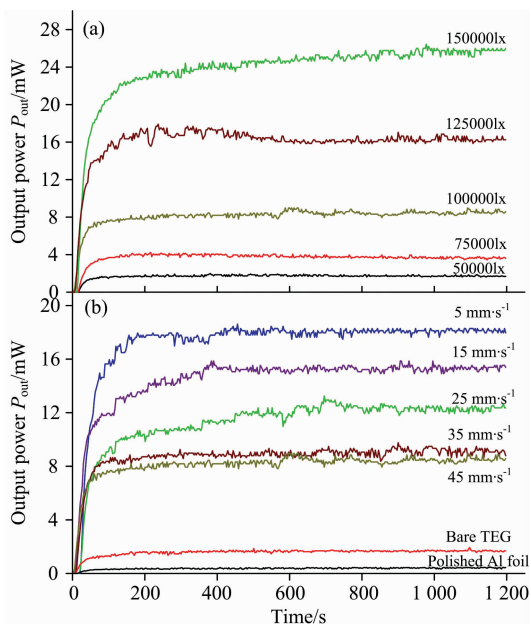


图 4 输出功率随时间的变化曲线

(a): $E_p=3 \text{ mJ}$, $v=45 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 不同模拟辐射照度 ($E=50\ 000$, 75 000, 100 000, 125 000, 150 000 lx); (b): $E_p=3 \text{ mJ}$, 不同扫描速度 ($v=5, 15, 25, 35, 45 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$), $E=100\ 000 \text{ lx}$

Fig. 4 Curve of output power via time

(a): $E_p=3 \text{ mJ}$, $v=45 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, different simulation radiance ($E=50\ 000$, 75 000, 100 000, 125 000, 150 000 lx); (b): $E_p=3 \text{ mJ}$, samples under different scan speed ($v=5, 15, 25, 35, 45 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$), $E=100\ 000 \text{ lx}$

从理论上分析, TEG 热端上加入微纳结构样品组成 TEG 模块可以提高 TEG 的温差发电性能。忽略汤普森效应, 假设 TEG 模块的热电敏性稳定, 不考虑接触效应, 太阳能发电片效率的数值可以用式(1)表示^[22]

$$\eta = \frac{q_h}{\Phi_s} \frac{q_h - q_c}{q_h} = \frac{q_h - q_c}{\Phi_s} = K(\Delta T)^2 \quad (1)$$

式(1)中, q_h 与 q_c 分别表示在热层与冷层处通过的净热流, q_h/Φ_s 是 TEG 模块的光吸收项, $(q_h - q_c)/q_h$ 可以理解为模块的热利用项。式(1)中引入的 K 是热电因子, 不同条件(固定 TEG 模块和辐照度)下的热电因子可以表现裸 TEG 或 TEG 模块热电过程的热电敏性。热电敏性可以体现固定温差下的发电性能。因此, 基于以上理论分析, TEG 模块发电简单地可以分为光热与热电转化两个阶段。首先从光热转化过程分析。对于金属材料吸收体, 金属有良好的导热性能, 因此光热转化主要由吸收体表面光吸收特性所决定。金属材料的吸光特性与自由电子、带间跃迁以及表面效应有关。金属的高反射率特性便是由自由电子与带间跃迁主导的, 导致了很高的自然光波段的反射率。忽略自由电子与带间跃迁的影响, 吸收体表面结构尺度的变化即表面效应的改变可以有效改善金属表面吸光性能。我们对实验用样品表面进行了 UVA 波段至近红外波段(和太阳能模拟光的波段一致)的反射率测量。测量结果如图 5 所示, 可以看到在 320~890 nm 波段内, 抛光铝的反射率最高, 裸 TEG 次之, 而光纤制备铝箔表面普遍具有较低的反射率, 并且随着光纤扫描速度的减小[随着微纳结构尺度的增大, 如图 3(a)~(e)所示], 吸收光会在结构内部发生多重反射与等离子体共振吸收增强, 反射率也随着逐渐减小, 因此光吸收特性随之增强^[24]。显然微纳结构表面为光热转化过程提供更多的光能输入, 这使得发电功率能够得到相应的提升。更大尺度的微结构表面 TEG 模块相比较小尺度微结构表面 TEG 模块或裸 TEG 更有利于吸光, 吸收的更多光子数意味着光热转换量会增加, 结合图 4(b)的发电结果, 可以看出微结构尺度越大, 其表面 TEG 模块产生的发电功率越高。

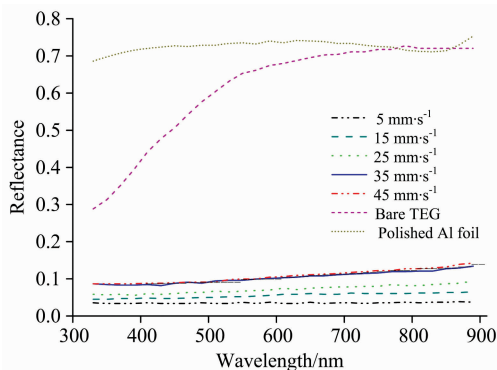


图 5 裸 TEG、抛光铝箔和光纤制备的铝箔表面的反射率曲线(波长区间 330~890 nm)

Fig. 5 The reflectances of a bare TEG, untreated Al foil surface, and the laser-treated Al surface in the wavelength range of 330~890 nm

在光热分析的基础上进一步对 TEG 模块的热电转化物理过程进行分析。表 1 包含了裸 TEG 与 TEG 模块的温度和发电性能数据, 可以看到, 不同辐照度下裸 TEG 与 TEG 模块($E_p=3 \text{ mJ}$, $v=45 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$), 以及固定辐照度(100 000 lx)不同表面微纳结构形貌条件 TEG 模块, 随着温差的变大发电功率逐渐得到提升。然而, 我们发现微纳结构表面 TEG 模块发电功率与效率均远高于裸 TEG, 并且小的温差变化(同辐照度条件下裸 TEG 与微纳结构表面 TEG 模块相比)可以导致高的发电效率。热电因子 K 可表征裸 TEG 与 TEG 模块各自的热电敏性(即: 温差与发电功率关系)。对于裸 TEG 模块, K 正比于贝塞克系数^[22]; 对于 TEG 模块可将微纳结构吸收体与 TEG 组合看做一个整体。可以看到 TEG 模块的热电因子有着显著提升, K 值均在 $2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$ 以上, 相比较裸发电片提高了 10 倍以上。较高的热电因子 K 意味着较小的温差便可带来更高的发电效率, 进而在热电过程中高 K 值对应 TEG 模块发电效率的提升。这也是微纳结构表面 TEG 模块较小的温差可以产生更高发电效率的原因。

从理论上进一步分析热电转换过程, 微纳结构表面 TEG 模块吸收模拟太阳光辐照后, 热电过程中的热能转化包括两部分: 一部分热能提供热端积累以便形成冷热端温差梯度产生电势差, 另一部分热能用于提高载流子迁移率进而提升电荷积累速率。在低热能沉积情况下, 热能转化被直接用于产生电势差, 但是由于温差的提升是有限的, 电势差带来的电荷转移量较少, 这时发电效率较低。当模块内有高热能沉积时, 保证产生较高电势差的情况下, 模块半导体内部高热流密度使得载流子迁移率显著提升, 电荷快速且大量的积累导致发电效率提升。在我们的实验中, 可以看到微纳结构表面 TEG 模块热能沉积导致部分热能可以传导至 TEG 模块的冷端, 实验测得的冷端温度高于裸 TEG(如表 1 所示, 随着辐照度的增加裸 TEG 冷端温度基本维持在 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 而微纳结构表面 TEG 模块冷端温度逐渐升高且均高于裸 TEG 冷端), 这说明微纳结构表面 TEG 模块相对于裸 TEG 具有高热能沉积的特点。微纳结构表面 TEG 模块强的光吸收机理会使得模块存在高的热能沉积, 很大一部分热能提高了半导体内部载流子的迁移率, 因而较裸 TEG 产生了发电效率的显著提升。表 1 中 100 000 lx 辐照度下不同微纳结构表面(不同光纤扫描速度)TEG 模块同裸 TEG 的温差发电结果相比同样印证了理论分析的高热能沉积带来的发电性能提升的特点。微纳结构主要靠迁移率提升提供温差发电效率, 对比裸 TEG, 微纳结构表面 TEG 模块更有利于产生高的热能积累, 更易提高内部半导体载流子的迁移率, 更有效的提升发电性能。表 1 中热电因子 K 的数值可以表征微纳结构表面 TEG 模块高热能沉积带来的热电转化程度, 微纳结构表面 TEG 模块热电因子数值普遍高于裸 TEG, 热电转化程度越高, 可以产生更高的发电效率。这与理论分析光纤制备微纳结构表面高热能沉积带来发电功率提升的结果相符。这同样意味着, 在低辐照度下如果 TEG 模块具有更高的 K 值, 有望获得可观的发电性能提升。

表 1 不同 TEG 模块的发电与温度数据(包含裸 TEG)

Table 1 Power generation and temperature data of different kinds of TEG module (Contains the bare TEG)

TEG 模块		辐射照度 /lx	温度/°C			发电性能		热电因子 $K/10^{-5} \text{°C}^{-2}$
样品	$v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$		热端	冷端	ΔT	P/mW	$\eta/\%$	
裸 TEG		50 000	36.1	27.2	8.9	0.33	0.04	0.52
		75 000	44.1	29.0	15.1	0.76	0.06	0.28
		100 000	49.3	29.8	19.5	1.68	0.11	0.28
		125 000	53.9	31.1	22.8	2.81	0.14	0.27
		150 000	53.8	30.1	23.7	3.44	0.14	0.26
光纤扫描	45	50 000	33.6	27.5	6.1	1.74	0.22	
		75 000	37.1	29.5	7.6	3.69	0.31	5.35
		100 000	42.5	32.3	10.2	8.61	0.54	5.20
		125 000	50.1	33.2	16.9	16.25	0.82	2.86
		150 000	56.9	34.3	22.6	25.94	1.09	2.13
光纤扫描	45		42.5	32.3	10.2	8.61	0.54	
	35		46.7	35.5	11.2	9.05	0.57	4.53
	25	100 000	51.5	36.9	14.6	12.40	0.78	3.66
	15		55.6	37.0	18.6	15.45	0.97	2.81
	5		59.5	37.5	22.0	18.26	1.15	2.37

3 结 论

首先构建出了一种结合太阳光辐照模拟与 TEG 模块散热的环境仿真装置,其中风冷与铝制塔形散热片的引入提高了模块的冷端散热效率与内部热能流动,装置同时引入辐照度、风速、电流、电压、温度的数据监测与采集系统,这为研究 TEG 模块的发电性能提供了实验基础。我们利用飞秒光纤制备出不同结构尺度的多尺寸(微米及纳米尺寸)复合结构表面铝箔,随着激光辐照量的增加(减小光纤扫描速度)微结构尺度逐渐增加。实验得到光纤制备微纳结构表面 TEG 模块发电功率及效率显著提升的结果,发电功率提高 10.7~

43.3 倍(比较抛光铝箔 TEG 模块与裸 TEG)。从 TEG 模块发电过程出发分析了其发电性能提升的原因。在光热转化中,形成多尺寸复合结构更有利于电磁波的吸收,为模块提供更多的热能沉积。在进一步的热电转化过程中,不同于裸 TEG,微纳结构表面 TEG 模块光热转化的部分热能为微纳结构表面 TEG 模块内部半导体提供高的载流子迁移率,进而导致 TEG 模块发电功率提升。相对于裸 TEG 而言,具有强吸光机理的光纤制备微纳结构表面 TEG 模块克服了低光能吸收的限制,提升了 TEG 模块的光热转化量,并且能更显著的提高载流子迁移率,促进了发电性能的提升,因此在未来热电器件应用方面具有更广泛的适用性。

References

- [1] Kandpal T C, Singhal A K, Mathur S S. *Energy Conversion & Management*, 1983, 23(2): 103.
- [2] Disalvo F J. *Science*, 1999, 285(5428): 703.
- [3] Amatya R, Ram R J. *Journal of Electronic Materials*, 2010, 39(9): 1735.
- [4] Champier D. *Energy Conversion & Management*, 2017, 140: 167.
- [5] Hochbaum A I, Chen R, Delgado R D, et al. *Nature*, 2008, 451: 163.
- [6] Gibson E A, Hagfeldt A. *Solar Energy Materials*. In *Energy Materials*. Edited by Bruce D W. John Wiley & Sons, Ltd., 2011. 95.
- [7] Hochbaum A I, Chen R, Delgado R D, et al. *Cheminform*, 2008, 39: 163.
- [8] Xie M, Gruen D M. *Journal of Physical Chemistry B*, 2010, 114(45): 14339.
- [9] Liu Huili, Shi Xun, Xu Fangfang, et al. *Nature Materials*, 2012, 11(5): 422.
- [10] Koumoto K, Funahashi R, Guilmeau E, et al. *Journal of the American Ceramic Society*, 2013, 96(1): 1.
- [11] Davidow J. *Journal of Electronic Materials*, 2013, 42(7): 1542.
- [12] Liu C J, Lai H C, Chen L R, et al. *Journal of Electronic Materials*, 2013, 42(7): 1550.
- [13] Bera C, Jacob S, Opahle I, et al. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2014, 16(37): 19894.
- [14] Maneewan S, Khedari J, Zeghamati B, et al. *Fuel & Energy Abstracts*, 2004, 45(5): 340.
- [15] Venkatasubramanian R, Siivola E, Colpitts T, et al. *Nature*, 2001, 413(6856): 597.
- [16] Naito H, Kohsaka Y, Cooke D, et al. *Solar Energy*, 1996, 58(4): 191.
- [17] Omer S A, Infield D G. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 1998, 53(1-2): 67.

- [18] Bell L E. *Science*, 2008, 321: 1457.
- [19] He W, Zhang G, Zhang X, et al. *Applied Energy*, 2015, 143: 1.
- [20] Hwang T Y, Vorobyev A Y, Guo C. *Applied Physics A*, 2012, 108(2): 299.
- [21] Tao H Y, Song X W, Hao Z Q, et al. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(6): 061402.
- [22] Hwang T Y, Vorobyev A Y, Guo C. *Optics Express*, 2011, 19(S4): A824.
- [23] Zhan X P, Xu H L, Li C H, et al. *Optics Letters*, 2017, 42(3): 510.
- [24] Tao H, Lin J, Hao Z, et al. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(20): 1673.

Enhanced Performance of Solar-Driven Thermoelectric Generator with High Spectral Absorption Micro-Nano Structure Surfaces

FU Bo-lin, SONG Lin, LI Xu, TAO Hai-yan*, SONG Xiao-wei*, LIN Jing-quan

School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China

Abstract Metal aluminum foil surface with micro-nano composite structure using femtosecond laser plasma filament (femtosecond filament) under different femtosecond filament scanning speed (5, 15, 25, 35, 45 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$) was prepared. In addition, the reflectivity measurements were carried out in the spectrum of sunlight energy mainly covered within the range (330~890 nm), and the result indicated that surface with micro-nano structure induced by femtosecond filament has significant high spectral absorption characteristic. The slower the femtosecond filament scanning speed, the stronger the absorptivity. Micro-nano structure surface absorption is even more than 97% under the condition of 5 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$. The prepared micro-nano structure surfaces with high spectral absorption are used as light absorbers of thermoelectric generator (TEG), on this basis, the simulation environment was established considering sunlight irradiation and heat dissipation of thermoelectric generator module (TEG module; combination of micro-nano structure metal surface with the TEG), and conducting power generation measurement. The results show that the photoelectric conversion efficiency (power generation efficiency) of aluminum surface with micro-nano structure (5 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ preparation condition) can be increased by 43.3 times and 10.7 times respectively compared with polished aluminum foil or bare TEG. The generation process and mechanism of TEG module are further studied, the thermoelectric power generation process of TEG module is divided into two transformation processes to analyze: photothermal transformation process (optical energy converted into heat energy) and thermoelectric transformation process (heat energy converted into electricity): First in the photothermal conversion process, the presence of the micro-nano structure surface enhances the efficiency of sunlight absorption, to provide more photonic energy for photothermal conversion, implements the more heat deposition at the surface, and then in the subsequent thermoelectric transformation process, the carrier mobility of TEG module has been greatly improved by more heat deposition. Thus the micro-nano structure surface compared with the general surface can gain higher thermoelectric conversion efficiency under the condition of the same temperature difference (Temperature difference between hot and cold junctions of TEG module). Therefore, micro-nano structure on the surface of high spectral absorption performance makes TEG module to obtain high heat deposition after the photothermal conversion, bringing about promotion of the carrier mobility, and then increasing the TEG module power performance significantly, which is the main reason to significantly improve the power generation performance of TEG module. The discovery of this mechanism provides theoretical basis for further optimization and improvement of TEG module's power generation performance, which is of great significance to the practical application of TEG module with micro-nano structural surface.

Keywords Femtosecond laser; Micro-nano structure; Thermoelectric generation

(Received Jun. 13, 2018; accepted Nov. 29, 2018)

* Corresponding authors