

基于光纤温度传感器监测的聚光光伏发电系统

廖天军 林比宏 杨智敏

华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021

摘要 针对聚光型太阳能光伏电池能量转换效率和使用寿命受温度影响较大的问题,基于砷化镓半导体吸收式光纤温度传感器,提出一种对聚光光伏发电系统的温度进行实时监测和控制的方法。数值仿真实验结果表明,当冷却水的流速降低、聚光光伏电池工作温度升高时,半导体的吸收波长增加,光纤温度传感系统检测出来的温度较高,这时可以通过节流阀增加冷却水的流速,提高聚光光伏电池与冷却水之间的传热系数,从而降低聚光光伏电池的温度。该方法对于延长聚光光伏电池的使用寿命和提高太阳能的利用率具有一定的理论指导意义。

关键词 光纤光学;温度传感器;聚光光伏电池

中图分类号 TN212 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.050602

Temperature Monitoring for Concentrated Photovoltaic Power System Based on Optical Fiber Temperature Sensor

Liao Tianjun Lin Bihong Yang Zhimin

College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract For the problem that energy conversion efficiency and lifespan of concentrated photovoltaic solar cells are greatly influenced by temperature, a method of monitoring and controlling the temperature of the concentrated photovoltaic power system based on the GaAs semiconductor absorption optical fiber temperature sensor is proposed. The results of numerical simulation experiment show that when the flow rate of the cooling water is reduced, higher temperature of the concentrated photovoltaic cells could be detected by the optical fiber temperature detection system. Then we can reduce the temperature of the concentrated photovoltaic cells through improving the flow rate of the cooling water. With prolonging the life of concentrator photovoltaic cells and improving the utilization rate of solar energy, the proposed method has a certain theoretical significance.

Key words fiber optics; temperature sensor; concentrated photovoltaic solar cell

OCIS codes 060.2300; 060.2310; 060.2370

1 引言

随着石油、煤、天然气等不可再生能源的消耗及资源的衰竭,人们希望通过对太阳能等新能源的开发利用来解决由于不可再生能源资源枯竭所导致的日益严重的能源危机。光伏(PV)发电是当前利用太阳能的主要方式之一。光伏发电成本较高和转换效率较低等缺点在一定程度上制约了太阳能的应用。聚光光伏电池(CPV)是一种有效降低光伏发电成本和提高太阳能利用率的途径,它将光学技术与新能源结合,使光伏电池的发电量大大增加,同时效率不断得到提高,使用透镜或反射镜面等光学元件,将大面积的阳光会聚到一个极小的面积上,再通过高转换效率的光伏电池直接转换为电能^[1]。CPV的发电效率为10%~30%,其余大部分太阳能则转化成了热能,并使电池温度升高,从而导致发电效率下降。为了有效解决这个问题,一些学者提出了用水或空气将光伏系统产生的热量直接带走并加以利用的光伏热(PV/T)系统。然而流体的流速

收稿日期: 2013-09-09; 收到修改稿日期: 2013-11-14; 网络出版日期: 2014-03-28

基金项目: 福建省自然科学基金(2011J01012)、华侨大学光学工程特色学科建设基金

作者简介: 廖天军(1986—),男,硕士研究生,主要从事太阳能光伏发电与新能源利用技术方面的研究。

E-mail: liaotianjun@hqu.edu.cn

导师简介: 林比宏(1960—),男,教授,硕士生导师,主要从事现代热力学理论与新能源利用方面的研究。

E-mail: bhlin@hqu.edu.cn

对 CPV 的冷却效果具有较大的影响,如果流体的流速较低,而 CPV 温度过高,则对 CPV 的冷却效果不显著,不能达到提高 PV/T 系统发电效率和光伏电池使用寿命的作用。伴随着温度传感技术的发展,光纤温度传感器在现代工业系统和工程技术中有着广泛的应用^[2-6]。半导体吸收式光纤温度传感器是 20 世纪 90 年代发展起来的一种强度调制的传光型光纤传感器,除了具有光纤传感器的一般优点之外,还具有成本低、结构简单、可靠性高等优点,非常适合于输电设备和石油井下等现场的温度监测。本文在文献[7-9]的基础之上,利用半导体吸收式光纤温度传感器的测温原理对 CPV 温度进行实时监测和控制,当测温系统检测出 CPV 工作温度较高时,通过节流阀提高冷却水的流速以达到降低 CPV 工作温度的目的,从而延长聚光光伏电池的寿命和提高太阳能的利用率。

2 系统结构

基于光纤温度传感器的聚光光伏系统的结构如图 1 所示。系统由光纤测温系统(OFTS)和聚光 PV/T 系统构成。OFTS 主要包括 LED 红外光源、多模光纤、温度探头、光探测器、前置放大器、模/数(A/D)转换电路和用于数据处理及温度显示的计算机等。PV/T 系统主要包括光伏电池、集热器、电压转换器、节流阀、水泵、冷水源和热水源等。系统的工作原理是:光源发出的红外光经耦合装置进入光纤,接着经过温度探头,探头中的 GaAs 材料对光有吸收作用(其透射率随温度而变化),透射光的光强与温度有关,经输出光纤后,由光探测器检测,前置放大器将检测的信号放大再经数据处理后输出显示。

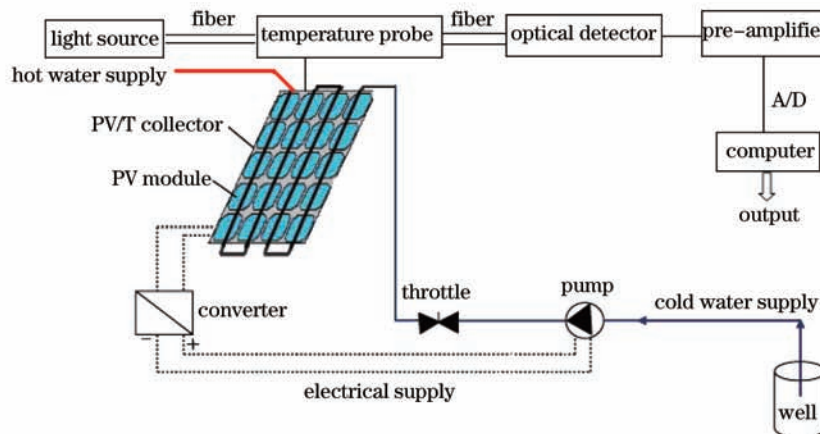


图 1 系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the system

图 2 为温度探头的示意图。温度探头的主体^[7]是一根聚四氟乙烯棒,沿该棒中心打一通孔,使得光纤能够通过,再在该棒的中心开一小孔,使得半导体 GaAs 芯片能置于其中。装入 GaAs 后,给传感头套上热缩管,然后把光纤分别从该棒的两端插入通孔。输入与输出光纤接头采用的是光通信系统中的 FC 型连接器,利用的是套管对中心微孔插针配合的结构。

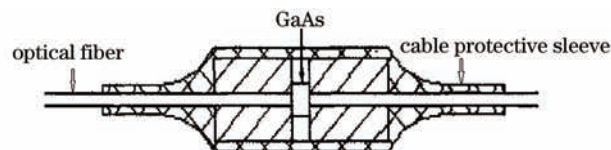


图 2 温度探头示意图

Fig.2 Schematic diagram of the temperature probe

3 半导体吸收式光纤传感器的测温原理

半导体砷化镓材料的吸收光谱随温度变化而变化。近红外光通过半导体砷化镓时,材料会吸收一部分光子能量,当光子能量超过半导体禁带宽度能量 $E_g(T)$ 时,传输光的波长发生变化^[7-9]:

$$\lambda_g(T) = \frac{hc}{E_g(T)}, \quad (1)$$

式中 $\lambda_g(T)$ 为半导体吸收波长, T 为工作温度, h 为普朗克常量, c 为光速, $E_g(T) = E_g(0) - \frac{\gamma T^2}{\beta + T}$ 为砷化镓材料的禁带宽度, $E_g(0)$ 为 0 K 的禁带能量, γ 和 β 为经验常数, 对于 GaAs 半导体材料, $E_g(0) = 1.522$ eV, $\gamma = 5.8 \times 10^{-4}$ eV·K⁻¹, $\beta = 300$ K。当温度升高时, $E_g(T)$ 单调下降, $\lambda_g(T)$ 向长波长方向移动。

透射率 T 与吸收系数 α 之间的关系可表示为^[7-9]

$$\tau(T) = \frac{(1-R)^2 \exp(-\alpha x)}{1-R^2 \exp(-2\alpha x)}, \quad (2)$$

式中 $\alpha(T) = H[h\nu - E_g(T)]^{\frac{1}{2}}$ ($h\nu > E_g$, H 为常数), $R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}\right)^2$ 为反射系数, x 为砷化镓材料的厚度, n_1 和 n_2 为界面两侧的折射率。

由(2)式可知, 由于禁带宽度随温度增加而单调下降, 因此半导体材料吸收的波长会随温度的增加向长波长方向移动^[9], 如图 3(a)所示。若光源的谱线分布不变, 其中心波长为 λ_0 , 强度也保持不变, 当吸收波长 λ_g 与 λ_0 重合时, 透射率最大。当温度升高时, 由于半导体材料吸收的谱线向长波方向移动, 因而透射的光强减小, 这一变化由光电检测器检测并转换成电信号。

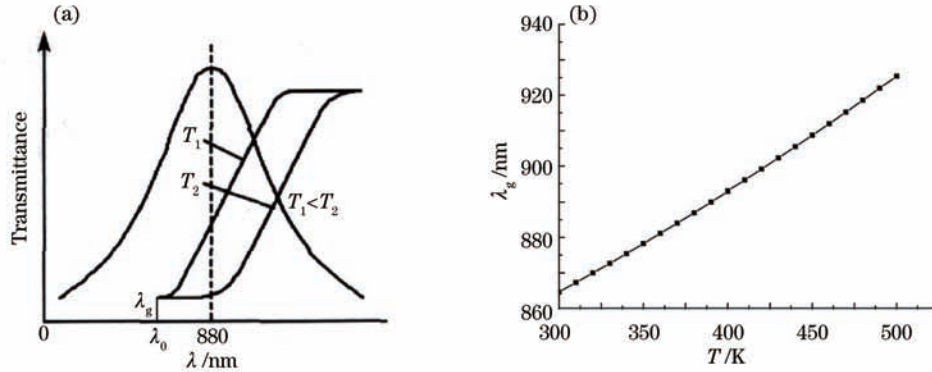


图3 砷化镓的吸收波长与温度的关系曲线

Fig.3 GaAs absorption wavelength varying with temperature

利用(1),(2)式绘制出砷化镓的吸收波长随温度变化的关系曲线, 如图 3(b)所示。从图 3(b)可以看出砷化镓的吸收波长与温度成线性关系变化。

4 PV/T 系统的性能特性

单位时间输入 PV/T 系统的能量为^[10]

$$E_{PV} = A_{PV} [C_g G \eta_0 - \varepsilon_{PV} \sigma (T_{PV}^4 - T_0^4) - h_a (T_{PV} - T)], \quad (3)$$

式中 $\eta_0 = 0.95$ 为光学效率, $C_g = 5$ 为聚光器的聚光率, $\varepsilon_{PV} = 0.8$ 为 PV 板表面热发射率, T_{PV} 为 PV 板温度, A_{PV} 为 PV 板的面积, $h_a = 5$ W·m⁻²·K⁻¹ 为空气自然传热系数, $G = 800$ W·m⁻² 为太阳辐射强度。

单位时间被冷却水和空气带走的热量表示为^[10]

$$Q_{cool} = h_{cool} A_{PV} (T_{PV} - T_0), \quad (4)$$

式中 $h_{cool} = h_a + h_b = 95$ W·m⁻²·K⁻¹ 为 CPV 与流体(空气和水)之间总的传热系数, h_b 为 CPV 与冷却水之间的传热系数。 h_b 受冷却水流速的影响, 流速越大, h_b 越大, 降温效果越好, PV/T 系统的太阳能利用率也就越高。

PV/T 系统的能量平衡方程表示为^[10]

$$E_{PV} = P_{PV} + Q_{cool} = n_p I_L V - n_p I_{rs} V \left[\exp\left(\frac{q(IR_s + V)}{kT_{PV} A n_s}\right) - 1 \right] + h_{cool} A_{PV} (T_{PV} - T_0), \quad (5)$$

式中 P_{PV} 为 CPV 的输出功率, A 为二极管理想因子^[11], R_s 为太阳能电池的串联内阻, k 为玻尔兹曼常数, V 为光伏电池输出电压, I 为光伏电池输出电流, n_p 为太阳能电池并联个数, n_s 为太阳能电池串联个数,

$I_L = \frac{G}{G_r} [C_g I_{SCR} + k_i (T_{PV} - T_0)]$ 为光生电流^[11], $I_{rs} = C_g I_{rr} \left[\frac{T_{PV}}{T_r} \right]^3 \exp \left[\frac{\phi}{kA} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_{PV}} \right) \right]$ 为二极管逆向饱和电流^[11], I_{SCR} 为太阳能电池短路电流, k_i 为电流温度系数, ϕ 为硅跨越带隙所需能量, $G_r = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $T_r = 300 \text{ K}$ 分别为参考辐射强度和参考温度, I_{rr} 为在参考辐射强度和参考温度下的参考电流。

本文选用西门子 SP75 型光伏电池, 其主要性能参数如下: 最大功率 $P_{\max} = 75 \text{ W}$; 短路电流 $I_{SCR} = 4.8 \text{ A}$; 开路电压 $V_{oc} = 21.7 \text{ V}$; $\phi = 1.12 \text{ eV}$; $n_p = 36$; $n_s = 1$; 二极管理想因子 $A = 1.5$; 短路电流温度系数 $k_i = 2.06 \text{ mA}/^\circ\text{C}$; 饱和电流 $I_s = 7.77 \mu\text{A}$; 电池面积 $A_{PV} = 0.6324 \text{ m}^2$ 。

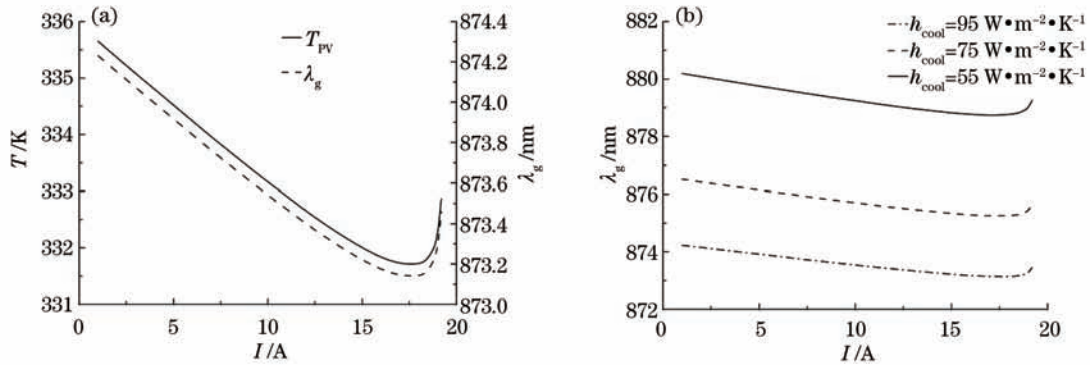


图4 GaAs吸收波长和CPV温度随CPV电流变化的关系曲线

Fig.4 Absorption wavelength of GaAs and CPV temperature varying with the CPV current

利用(1)、(4)、(5)式绘制出砷化镓的吸收波长和光伏电池温度随光伏电池电流变化的关系曲线,如图4所示。从图4(a)可以看出砷化镓的吸收波长和温度随光伏电池的电流变化情况基本一致,均随光伏电池电流的增加先减小而后增加。当CPV的工作电流较小时,处于高温工作状态,砷化镓的吸收波长较长,OFTS检测出的温度较高,这时,可以提高冷却水的流速来达到降低CPV工作温度的目的。从图4(b)可以看出冷却水的流速降低,传热系数 h_{cool} 相应减小,CPV温度升高,OFTS检测出的温度较高,这时,必须提高冷却水的流速来降低CPV的工作温度。

5 结 论

提出一种基于半导体吸收式光纤传感器对聚光光伏电池的温度进行实时监测和控制的方法,对系统进行了数值仿真实验,得到一些有益的结论。所提出的方法还可扩展至其他温度检测场合。

参 考 文 献

- 1 Anja Royne, Christopher J Dey, David R Mills. Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2005, 86(4): 451-483.
- 2 Xia Juan, Sui Chenghua, Liu Yuling, *et al.*. Reflective optic temperature sensors based on temperature-dependent optical properties of ZnO film [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(2): 0205003.
夏 娟, 隋成华, 刘玉玲, 等. 基于 ZnO 薄膜光学温变特性的反射式光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2011, 38(2): 0205003.
- 3 Wu Tiesheng, Wang Li, Wang Zhe, *et al.*. A photonic crystal fiber temperature sensor based on sagnac interferometer structure [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 1114002.
伍铁生, 王 丽, 王 哲, 等. 一种 Sagnac 干涉仪结构的光子晶体光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1114002.
- 4 Yu Xiangdong, Zhang Zaixuan, Zhu Haizhong, *et al.*. A temperature compensating circuit for distributed optical fiber raman temperature sensor [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(6): 1440-1443.
余向东, 张在宣, 祝海忠, 等. 一种应用于分布式光纤拉曼温度传感器的温度补偿电路[J]. *中国激光*, 2010, 37(6): 1440-1443.
- 5 Liao Guozhen, Zhang Jun, Cai Xiang, *et al.*. All-fiber temperature sensor based on grapheme [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706004.
廖国珍, 张 军, 蔡 祥, 等. 基于石墨烯的全光纤温度传感器的研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706004.
- 6 Li Hongbing, Jin Yanyun, Fang Jinghui, *et al.*. Temperature sensing of photonic crystal fiber filled with liquid via SBS

- [J]. *Laster & Optoelectronic Progress*, 2012, 49(12): 120602.
李红兵, 金艳云, 方靖淮, 等. 基于SBS的填充液体的光子晶体光纤温度传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(12): 120602.
- 7 Xu Zhongbao, Ye Hunian, Ye Mei. Semiconductor absorption fiber-optic temperature sensor [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2004, 25(1): 62-64.
许忠保, 叶虎年, 叶梅. 半导体吸收式光纤温度传感器[J]. *半导体光电*, 2004, 25(1): 62-64.
- 8 Zhao Yong, Rong Ming. Fiber-optic temperature sensors based on semiconductor absorption [J]. *J Optoelectronics · Laster*, 2003, 14(2): 140-142.
赵勇, 荣明. 基于半导体吸收原理的光纤温度传感器研究[J]. *光电子·激光*, 2003, 14(2): 140-142.
- 9 Zhang Ying, Wang Hairong, Jiang Zhuangde. Temperature fiber sensor based on semiconductor IR absorption [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2007, 29(4): 389-391.
张英, 王海容, 蒋庄德. 半导体吸收式光纤温度传感器的研究[J]. *压电与声光*, 2007, 29(4): 389-391.
- 10 Xing Ju, Zhifeng Wang, Gilles Flamant, *et al.*. Numerical analysis and optimization of a spectrum splitting concentration photovoltaic thermoelectric hybrid system [J]. *Solar Energy*, 2012, 86(6): 1941-1954.
- 11 Yu J G, Jung Y S, Choi J Y, *et al.*. A novel two-mode MPPT control algorithm based on comparative study of existing algorithms [J]. *Solar Energy*, 2004, 76(4): 455-463.