

# 光子晶体热辐射器在热光伏系统中的应用

杜盼盼 许 静 李宇杰 陈金宏

(国防科学技术大学材料工程与应用化学系, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 提高热光伏(TPV)系统的光电转换效率是目前热光伏技术的研究重点,提高热辐射器的辐射效率是提高热光伏系统效率的重要途径,而光子晶体结构以其特有的选择性辐射性能成为热光伏系统理想的热辐射器。简述了热光伏系统的工作原理及光子晶体的物理特性,重点介绍了光子晶体热辐射器性能及其在热光伏系统中应用研究的进展情况。

**关键词** 热光伏系统; 热辐射器; 光子晶体; 选择性热辐射

**中图分类号** O799; O432

**OCIS** 250.0250 230. 0230

**文献标识码** A

## Application of Photonic Crystal Thermal Emitters for Thermal Photovoltaic Power Generation

Du Panpan Xu Jing Li Yujie Chen Jinhong

(Department of Material Engineering and Applied Chemistry, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** There is an emerging interest in using thermal photovoltaic (TPV) cells for electric-power generation. Making use of photonic crystal emitters is considered as an effective way for enhancing the optical-to-electric conversion efficiency of TPV power generation. The principle of TPV system and the characteristics of photonic crystal are introduced. The recent status of photonic crystal thermal emitters is mainly presented.

**Key words** thermal photovoltaic power generation; thermal emitter; photonic crystal; selective thermal radiation

## 1 引言

热光伏(TPV)系统是将高温辐射体的红外热辐射通过半导体 p-n 结直接转换成电能的装置。因其具有理论效率高、能量输出密度大、可用热源多、可便携、无机械部件、可靠性高、将热能利用与发电相结合等独特优点<sup>[1~3]</sup>,在民用发电、废热利用、太阳能光电转换系统、空间探测器能源系统等民用、军用及尖端科研领域中具有很大的应用潜力。目前,在热光伏技术研究的众多热点中,如何提高热光伏系统的光电转换效率成为人们关注的重点。研究表明<sup>[2, 4]</sup>,以选择性热辐射器将热源的多波段辐射转化为可被热光伏电池高效利用的窄波辐射,将是提高热光伏系统效率的主要途径之一,而光子晶体独特的物理特性,使其成为理想的选择性热辐射器。本文将对 TPV 系统中热辐射器选择性热辐射原理、光子晶体辐射机理等进行简要叙述,并着重介绍光子晶体热辐射器的研究进展。

## 2 热光伏系统

### 2.1 基本原理

典型的热光伏系统包括热源、热辐射器、光学滤波器(光谱控制器)、热光伏电池(光电转换器件)及热回收器等其他辅助组件。图 1 为热光伏系统的结构示意图<sup>[5]</sup>。

热辐射器吸收热源发出的能量(如太阳能、生物能、化学能等),将其转换成热辐射能后提供给光学滤波

收稿日期: 2009-06-23; 收到修改稿日期: 2009-08-17

作者简介: 杜盼盼(1985—),女,硕士研究生,主要从事三维光子晶体结构制备方面的研究。E-mail: ppgfd@163.com

导师简介: 许 静(1971—),女,博士,副教授,主要从事光电功能材料、纳米材料等方面的研究。

E-mail: xujin503@163.com(通信联系人)

器。光学滤波器的主要作用是实现热辐射器与热光伏电池间的光学匹配。它可以将热辐射器产生的能量低于热光伏电池禁带宽度的光子反射回热辐射器重新利用,从而既提高了热能源的利用效率,又降低了热光伏电池的工作温度。热光伏电池是热光伏系统中实现热辐射能与电能转换的核心部件。当热辐射能传递到热光伏电池表面时,材料吸收大于禁带宽度的光子能量,使内部电子发生跃迁,成为自由电子。新形成的空穴-电子对在半导体 p-n 结内部电势垒的作用下,分别流向 p 区和 n 区,在 p-n 结两侧聚集形成电位差,接通电路后就形成了电流,从而完成了热辐射能向电能的转变。

2.2 热辐射器光谱控制与选择性热辐射器

在热光伏系统中,热辐射器的辐射光谱如图 2 所示,它可由黑体辐射的普朗克公式计算得到。受热光伏电池 p-n 结理论的限制,只有能量高于电池材料禁带宽度的一部分光子可以被吸收进行光电转换,大部分的长波辐射则无法利用。而禁带宽度较低的半导体材料往往又难以获得或成本较高,这就使得热光伏系统的实际转换效率远远低于理论效率<sup>[6]</sup>。

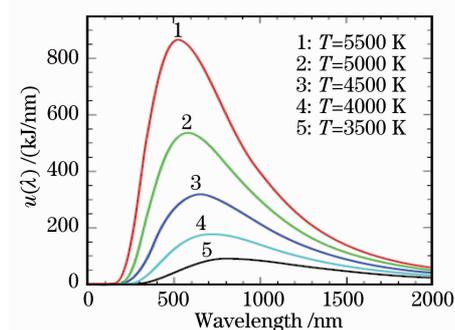


图 2 黑体辐射光谱

Fig. 2 Blackbody radiation spectrum

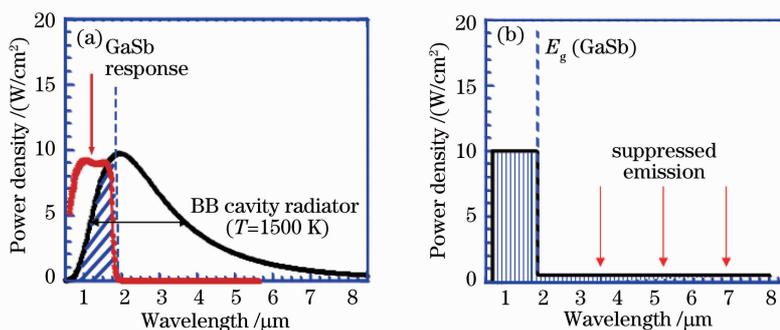


图 3 (a) 1500 K 黑体辐射光谱, (b) 理想热辐射光谱

Fig. 3 (a) Blackbody radiation spectrum at 1500 K, (b) ideal thermal radiation spectrum

以热光伏系统中常用的 GaSb 电池为例。GaSb 电池的禁带宽度约为 0.72 eV,由图 3(a)可以看出,在 1500 K 时,GaSb 电池只能吸收波长小于 1.7  $\mu\text{m}$  的辐射波,而剩余的约 70% 的辐射能量则无法利用。对于 GaSb 电池,如果热辐射器的辐射光谱能够如图 3(b)所示,只有单个辐射波段,在辐射波段以外的辐射几乎为零,那么系统的光电转换效率将显著提高。可见,对热辐射器的辐射光谱进行控制,使其具有理想的选择性辐射特性,是提高热光伏系统转换效率的重要途径。

传统的光谱控制方法依赖于材料的自身属性。实际材料的热辐射特性都具有选择性,材料只强烈地吸收(发射)频率等于其固有振动频率的热辐射波<sup>[7]</sup>。因此,选择具有窄波段辐射特性的材料可以制备选择性热辐射器。目前研究较多的选择性辐射器主要为稀土氧化物,包括镧系元素氧化物、氧化镱、氧化铟、氧化铪等<sup>[2,4]</sup>。近年来,研究人员将目光转向了一种新型的、高效的方法——利用光子晶体实现热辐射光谱控制。

### 3 光子晶体热辐射器的研究进展

光子晶体是一种在微米、亚微米等光波长的量级上折射率呈现周期性变化的介质材料。按照电介质周期性排列结构的不同,光子晶体一般可分为一维、二维和三维光子晶体 3 种类型<sup>[8]</sup>。光子晶体的最根本特征是存在类似于半导体中禁带的“光子频率带隙”。根据固体电子能带理论,晶体内部原子呈周期性排列,库仑

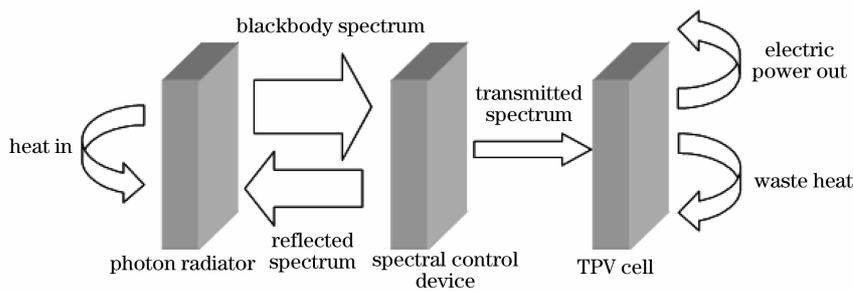


图 1 热光伏系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of TPV conversion components

场叠加产生周期性势场,当电子在其中运动时受到周期性势场的布拉格散射而形成能带结构,带与带之间有带隙称为禁带,能量落在禁带中的电子波不能传播。与此相仿,当电磁波在周期性电介质结构材料中传播时,由于受到调制而形成能带结构——光子能带结构,其带隙即为光子带隙。

在自由空间中,处于激发态的原子有向基态跃迁的自然倾向,同时以光子的形式释放出能量,这就是原子的自发辐射,自发辐射的几率与光子所在频率的态的数目成正比。而在光子晶体结构中,由于光子禁带(PBG)的存在,原子的自发辐射表现出独特的性能<sup>[9]</sup>。当光子晶体中原子自发辐射的光频率正好落在光子禁带中时,由于该频率光子的态的数目为零,因此自发辐射几率为零,自发辐射被抑制。同理,通过人为地破坏光子晶体的周期性结构,如加入杂质等,光子禁带中就会出现品质因子非常高的杂质态,具有很大的态密度,这样便可以实现自发辐射的增强。

### 3.1 一维光子晶体

在光子晶体的3种基本结构中,一维光子晶体的结构最为简单,也易于加工实现。研究表明,选取合适的介质材料形成的一维光子晶体结构,能够在一个方向上有效地控制热辐射光谱反射、透射特性。刘广平等<sup>[10]</sup>设计了一维W-SiO<sub>2</sub>光子晶体结构,结构采用了(LH)<sub>10</sub>L的排列形式。其中L为SiO<sub>2</sub>介质层,厚度为0.22 μm,H为W金属层,厚度为0.01 μm。采用传输矩阵法计算了一维W-SiO<sub>2</sub>光子晶体结构的光谱特性如图4(b)所示。吸收特性以1.8 μm为阈值分界点,1.8~3.5 μm波段内的吸收小于0.1,大于3.5 μm后吸收呈现振荡分布,小于1.8 μm的波段内,晶体结构对热辐射能量的吸收主要集中在0.9~1.8 μm。由于这种结构的辐射能量光子主要集中在小于1.8 μm的波段内,可很好地与GaSb电池匹配使用。

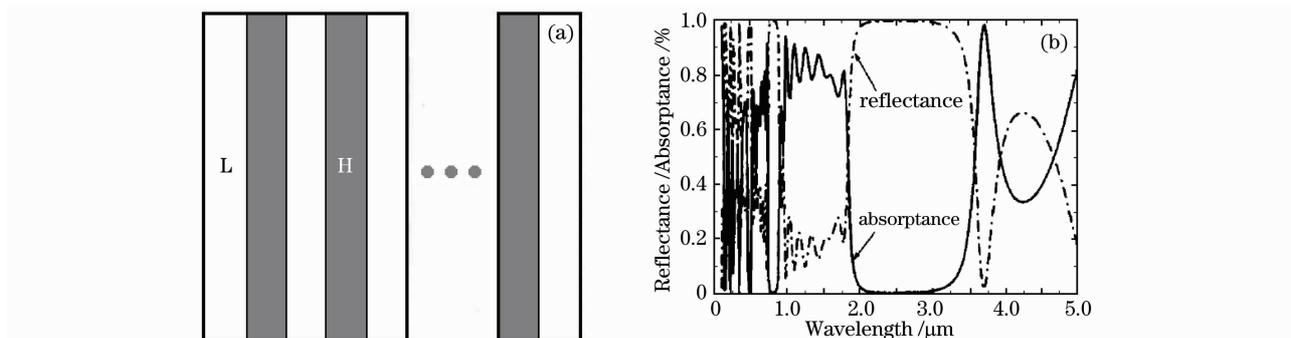


图4 W-SiO<sub>2</sub>光子晶体结构示意图(a)及其光谱特性(b)

Fig. 4 Schematic diagram (a) and radiation spectra (b) of W-SiO<sub>2</sub> photonic crystal

### 3.2 二维光子晶体

在光子晶体应用于TPV系统热辐射器的研究工作中,研究较早也较成熟的是以表面微结构为代表的二维光子晶体。Hitoshi Sai等<sup>[11]</sup>利用平版印刷方法及Si各向异性刻蚀技术,在Si表面制得了结构周期分别为1.5 μm和2 μm的倒棱锥微腔,如图5所示,棱锥底部长1.6 μm,深1.1 μm。

由图6可以看出,刻有微腔的Si与平板Si相比,在短波方向的辐射本领增强,对应于周期Λ为2 μm与1.5 μm的微腔,分别在2.2 μm与1.7 μm处出现辐射峰,这说明通过调整周期性结构尺寸可以对辐射峰的

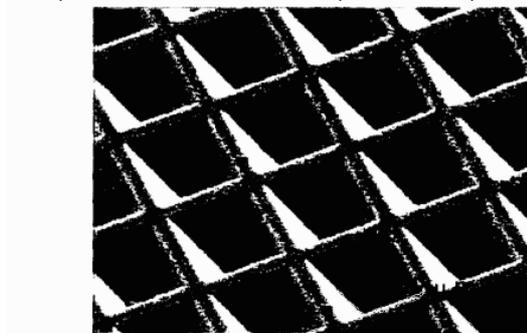


图5 Si表面倒棱锥微腔

Fig. 5 Reverse-pyramid cavities on Si surface

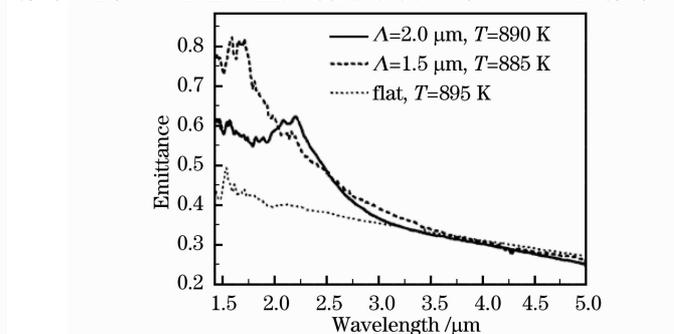


图6 刻蚀Si与平板Si的辐射度

Fig. 6 Emittance spectrum of microstructured and flat Si

位置进行调节。由于 InGaAsSb 电池的禁带宽度为  $2.3 \mu\text{m}$ , GaSb 电池的禁带宽度为  $1.7 \mu\text{m}$ , 因此, 带有周期为  $2 \mu\text{m}$  和  $1.5 \mu\text{m}$  微腔的 Si 辐射器可分别与 InGaAsSb 和 GaSb 配合使用。定义光伏电池可用能量与热辐射器辐射总能量之比为热辐射器的辐射效率 (SEF), 则与介电常数  $\epsilon = 0.9$  的灰体辐射相比, 选择性 Si 辐射器对 InGaAsSb, GaSb 电池的辐射效率要分别高出  $16\% \sim 20\%$ ,  $5\% \sim 14\%$ 。

此外, 该研究小组又利用原子束刻蚀的方法在 W 表面得到周期结构为  $1 \mu\text{m}$  的矩形微槽<sup>[12]</sup>, 微槽边长为  $0.8 \mu\text{m}$ , 深  $0.7 \mu\text{m}$ , 如图 7(a) 所示。与平板 W 相比, 选择性辐射器对 GaSb 电池可响应波段 ( $0 \sim 1.7 \mu\text{m}$ ) 的反射降低, 则对该波段的吸收及辐射将相应增加, 如图 7(b) 所示。

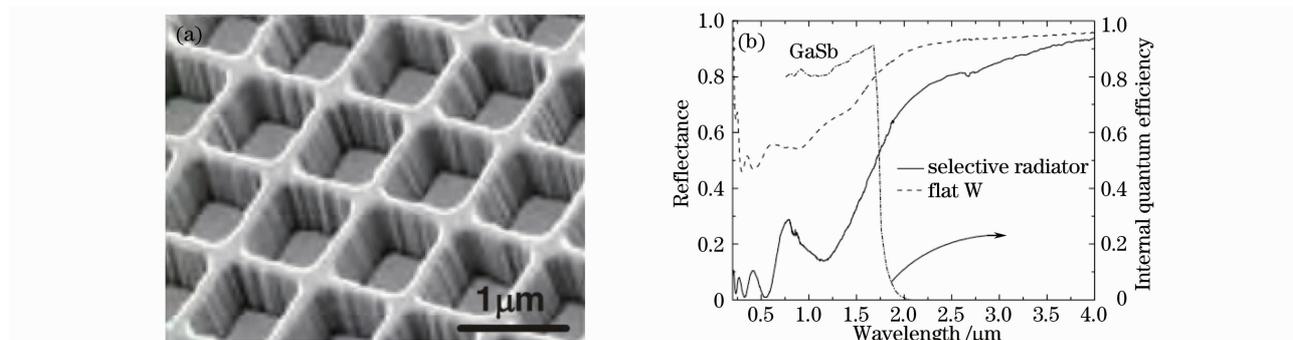


图 7 (a) W 表面微槽, (b) 选择性辐射器与平板 W 的反射光谱

Fig. 7 (a) Microstructure on W surface, (b) reflectance spectrum of W selective emitter and flat

M. U. Pralle 等<sup>[13]</sup> 等针对现有的红外发生器辐射效率低的状况, 在 Si 片表面刻蚀得到周期分别为  $2.0, 3.0$  和  $4.0 \mu\text{m}$ , 深为  $5.0 \mu\text{m}$  的孔洞, 同时在 Si 片表面还覆盖了  $0.15 \mu\text{m}$  厚的金层。图 8 分别为 3 种结构的辐射光谱。可以看出, 与黑体辐射相比, 波长在禁带区域内的能量辐射率很大 (约为  $90\%$ ), 而波长在禁带外的能量辐射则大大降低。M. Laroche 等<sup>[14]</sup> 计算得出了图 9(a) 所示结构的辐射光谱。无限长的 Ge 棒按照棋盘形堆叠 9 层, 结构周期  $a$  为  $0.95 \mu\text{m}$ , 填充率为  $0.5$ , 木条高  $0.475 \mu\text{m}$ 。计算结果显示, 这种 Ge 二

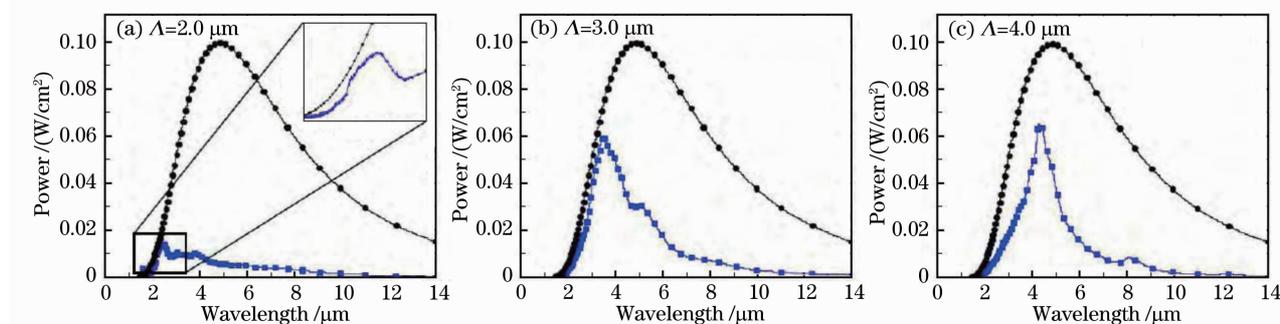


图 8  $325 \text{ }^\circ\text{C}$  黑体与刻蚀 Si 片的辐射光谱

Fig. 8 Radiation spectra of blackbody and patterned Si wafers at  $325 \text{ }^\circ\text{C}$

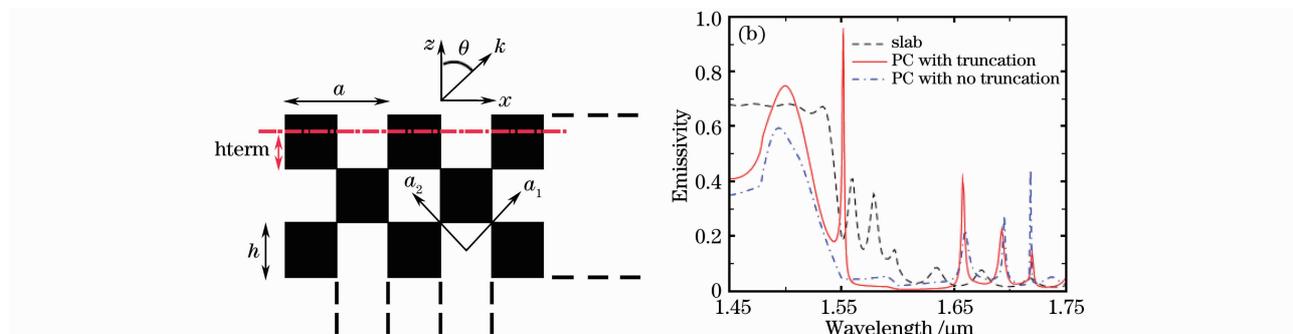


图 9 (a) 二维 Ge 光子晶体结构, (b) 3 种不同结构的辐射光谱

Fig. 9 (a) Two-dimension Ge photonic crystal, (b) emissivity of three types of structure

维结构在  $1.55\sim 1.65\ \mu\text{m}$  出现带隙,禁带内辐射小于 0.05。图 9(b)中实线对应着最上层 Ge 条高度降至  $0.1635\ \mu\text{m}$  时结构的辐射光谱,结构在垂直方向上的周期性被破坏,导致在  $1.55\ \mu\text{m}$  波长处的辐射显著增强。

### 3.3 三维光子晶体

最早研究三维光子晶体的热辐射性能,并首次提出其在热光伏系统中作为选择性热辐射器应用的是 Sandia 国家实验室的 Shawn-Yu Lin 等<sup>[15,16]</sup>。研究人员以刻有微槽的 Si 片为模板,通过层层叠加的方法得到 W 三维堆结构光子晶体,如图 10(a)所示。W 条宽  $0.5\ \mu\text{m}$ ,高  $0.75\ \mu\text{m}$ ,条间距为  $1.5\ \mu\text{m}$ 。经过理论计算,该结构在大于  $3\ \mu\text{m}$  的波段吸收很小,出现完全方向的光子带隙。在光子禁带之外有两个吸收峰,其中  $2.5\ \mu\text{m}$  处吸收约为 40%, $1.5\sim 1.9\ \mu\text{m}$  波段吸收高达 80%。图 10(b)为实测的 W 堆结构的辐射能量密度谱,在  $1190\sim 1535\ \text{K}$  的工作温度下,该结构在 GaSb 电池禁带内波段的辐射接近黑体辐射,在禁带外的辐射则迅速降低。定义热光伏系统的光电转换效率为输出电能密度与辐射能量密度之比,则与黑体、 $\text{Er}_2\text{O}_3$  (常用的选择性辐射材料)及带有表面微结构的 W 辐射器相比,W 三维光子晶体具有高的转换效率(27%~33%),且受温度影响不大。经过进一步计算<sup>[17]</sup>,如果与理想滤波器及 GaSb 电池配合使用,在  $1535\ \text{K}$  的工作温度下,热光伏系统的电能输出密度能够达到  $7.77\ \text{W}/\text{cm}^2$ ,光电转换效率达到 47.58%。

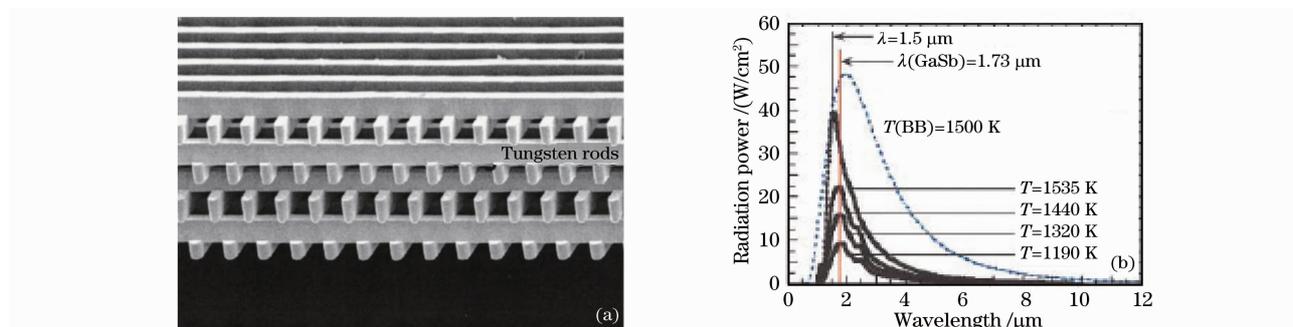


图 10 (a) W 三维光子晶体, (b) W 光子晶体辐射能量密度

Fig. 10 (a) 3D tungsten photonic crystal, (b) measured photonic-crystal emission power of tungsten photonic crystal

此外,David L. C. Chan 等<sup>[18~22]</sup>分别选择不同材料设计了三维光子晶体结构,并对其热辐射性能进行了理论计算。三维光子晶体具有与热光伏电池相匹配的辐射性能,且能够形成全向带隙,因此其设计与制备将成为热光伏系统选择性热辐射器的重要研究方向。

## 4 展 望

随着热光伏技术在越来越多的领域中展现了巨大的应用潜力,提高热光伏系统的光电转换效率也成为了研究的重点。在提高热辐射器的辐射效率方面,光子晶体结构以其特有的辐射性能成为理想的选择。近年来,人们在光子晶体热辐射性能的研究方面做了大量的工作,取得了显著进展。接下来研究工作的重点将主要在 3 个方面:

1) 理论计算方法的突破。虽然现有的光子晶体的理论研究方法很多,但是在色散介质及复杂结构计算方面的能力还很欠缺。研究设计新的理论计算方法对于光子晶体结构的设计及性能计算具有重要的指导意义。

2) 新的制备技术的开发。光子晶体结构的复杂性及加工困难的特点制约了它的实际应用,因此现在大部分的研究还处在理论计算的状态。开发简易、廉价的新的制备技术对于实现光子晶体构件化具有重要意义。

3) 可用温度范围的增大。热光伏系统的可用热源种类很多,为了适应不同热源的工作特点及不同的工作环境,需要增大热辐射器的可用温度范围。这就要求构件材料的可用温度范围广泛,且结构的辐射性能具有稳定性,受温度变化的影响要小。

目前,光子晶体热辐射性能及其在热光伏系统中的应用研究尚处在基础阶段,随着热光伏技术及光子晶体结构研究的不断深入,二者的结合运用必将付诸实现,并为热光伏系统效率的提高开辟重要途径。

## 参 考 文 献

- 1 Mao Shu. Study on infrared selective characteristic of the optical filter in TPV system[D]. Nanjing: Nanjing University of

- Science and Technology, 2007
- 茹 妹. 热光伏转换中光学滤波器红外选择特性研究[D]. 南京:南京理工大学, 2007
- 2 Chen Xue, Xuan Yimin. Principle and progress on thermophotovoltaic technology[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, **27**(4): 353~358
- 陈 雪, 宣益民. 热光伏技术基本原理与研究进展[J]. 半导体光电, 2006, **27**(4): 353~358
- 3 Fang Silin, Yu Shuwen, Liu Weifeng *et al.*. Recent development of TPV based on III-V group semiconductor materials[J]. *Semiconductor Technology*, 2008, **33**(8): 649~653
- 方思麟, 于书文, 刘维峰 等. 基于 III-V 族半导体材料的热光伏电池研究进展[J]. 半导体技术, 2008, **33**(8): 649~653
- 4 Qiao Zaixiang, Chen Wenjun, Du Shaomei. Recent development of thermophotovoltaic technologies[J]. *Chinese J. Power Sources*, 2005, **29**(1): 57~61
- 乔在祥, 陈文俊, 杜邵梅. 热光伏技术的研究进展[J]. 电源技术, 2005, **29**(1): 57~61
- 5 D. M. de Poy, P. M. Fourspring, P. F. Baldasaro *et al.*. Thermophotovoltaic spectral control[C]. 2nd International Energy Conversion Engineering Conference, Providence, Rhode Island, 2004. 16~19
- 6 Tian Xiaofei, Yang Haiyang, Zhou Hui. Discussion on optical-to-electricity conversion efficiency of PV power generation[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2008, (22): 115
- 田晓飞, 杨海洋, 周 慧. 光伏发电中光电转换效率问题的探讨[J]. 科技创新导报, 2008, (22): 115
- 7 Wu Yonghong, Xia Dehong. The selective heat radiative mechanism of materials[J]. *Metallurgy Energy Source*, 2003, **22**(6): 15~18
- 吴永红, 夏德宏. 材料的选热性热辐射机理[J]. 冶金能源, 2003, **22**(6): 15~18
- 8 John D. Joannopoulos, Robert D. Meade, Joshua N. Winn. Photonic Crystals-Molding the Flow of Light[M]. Princeton: Princeton University Press, 1995
- 9 Chen Kai, Sheng Qiuqin, Han Jun *et al.*. Study on photonic crystal and its application[J]. *Optoelectronic Technology*, 2003, **23**(1): 16~23
- 陈 凯, 盛秋琴, 韩 军 等. 光子晶体及其应用研究[J]. 光电子技术, 2003, **23**(1): 16~23
- 10 Liu Guangping, Xuan Yimin, Han Yuge *et al.*. Thermal radiation spectral control by one-dimensional metallodielectric photonic crystal[J]. *J. Engineering Thermophysics*, 2007, **28**(3): 475~477
- 刘广平, 宣益民, 韩玉阁 等. 一维光子晶体热辐射光谱控制模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2007, **28**(3): 475~477
- 11 Hitoshi Sai, Hiroo Yugami, Yasuhiro Akiyama *et al.*. Surface microstructured selective emitters for TPV systems[C]. Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE, 2000. 1016~1019
- 12 Hitoshi Sai, Hiroo Yugami, Yasuhiro Akiyama *et al.*. Spectrally selective radiators and absorbers with periodic microstructured surface for high temperature applications[J]. *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, 2003, **7**(2): 101~115
- 13 M. U. Pralle, N. Moelder, M. P. McNeal *et al.*. Photonic crystal enhanced narrow-band infrared emitters[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(25): 4685
- 14 M. Laroche, R. Carminati, J.-J. Greffet. Coherent thermal antenna using a photonic crystal slab[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(12): 123903
- 15 J. G. Fleming, S. Y. Lin, I. El-kady *et al.*. All-metallic 3D photonic crystals with a large infrared band gap[J]. *Nature*, 2002, **417**(6884): 52~55
- 16 S. Y. Lin, J. Moreno, J. G. Fleming. A 3D photonic-crystal emitter for thermal photovoltaic generation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(2): 380
- 17 Timothy A. Walsh, Shawn-Yu Lin. Power density and efficiency of thermophotovoltaic energy conversion using a photonic-crystal emitter and a 2-D metal-grid filter[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2008, **55**(5): 1101~1108
- 18 David L. C. Chan, Marin Soljačić, J. D. Joannopoulos. Direct calculation of thermal emission for three-dimensionally periodic photonic crystal slabs[J]. *Phys. Rev. E*, 2006, **74**(3): 036615
- 19 Vassilios Yannopoulos. Thermal emission from three-dimensional arrays of gold nanoparticles[J]. *Phys. Rev. B*, 2006, **73**(11): 113108
- 20 Jeffrey Chi, Wai Lee, C. T. Chan. Circularly polarized thermal radiation from layer-by-layer photonic crystal structures[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(5): 051912
- 21 I. El-Kady, G. B. Farfan, R. Rammohan *et al.*. Photonic crystal high-efficiency multispectral thermal emitters[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(15): 153501
- 22 Hao Xin, Wu Ziran, Abram Young *et al.*. THz thermal radiation enhancement using an electromagnetic crystal[J]. *IEEE Trans. Antennas & Propag.*, 2008, **56**(9): 2970~2980