

文章编号: 1000-7032(2013)10-1386-06

# 表面微结构辐射器几何结构对发射性能的影响

徐继圆, 左国平, 周剑良\*

(南华大学 核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:** 放射性同位素热光伏系统(RTPV)中表面微结构辐射器几何尺寸是决定其发射性能和系统效率的关键因素之一。本文通过对单个钨微腔宽度、高度以及壁厚对辐射器发射性能影响的探讨,初步得出了其红外辐射出射特点的产生原因,并利用时域有限差分算法(FDTD)对不同几何尺寸微腔的发射性能进行了对比。最后结合 GaSb 量子效率曲线,发现当微腔高度、宽度与壁厚分别为 0.8, 1.8, 0.1  $\mu\text{m}$  时,其发射性能与 GaSb 匹配程度较好。

**关键词:** 辐射器; 几何尺寸; 微腔; 发射性能

中图分类号: TN219

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20133410.1386

## Influence of Physical Dimension of The Microstructural Surface Emitters on Emission Performance

XU Ji-yuan, ZUO Guo-ping, ZHOU Jian-liang\*

(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

\* Corresponding Author, E-mail: 13327341099@189.cn

**Abstract:** The physical dimension of microstructural surface emitters is one of the key factors which determines the emission performance and system efficiency in radioisotope thermophotovoltaic (RT-PV) systems. This paper preliminarily concluded the reasons for the emitters' characteristics of infrared radiation through the exploration of the effects that the width, height and walls' thickness of a single tungsten microcavity played on the radiator's emission performance. Then the finite-difference-time-domain (FDTD) method was utilized to compare the emission performance of microcavities with different sizes. It is found that the emission performance matches well in the GaSb case taking into account of the efficiency curve of GaSb which the width, height and walls' thickness of a single microcavity are set as 0.8, 1.8, 0.1  $\mu\text{m}$ , respectively.

**Key words:** emitter; physical dimension; microcavity; emission performance

## 1 引 言

放射性同位素热光伏(RTPV)系统是红外辐射器利用放射性同位素热源高温而产生的红外辐射与光伏元件作用产生电能的一套装置。在整套

系统中,辐射器效果是决定整套装置性能的关键之一。如何提高辐射器产生的红外辐射与光伏元件量子曲线的匹配程度以及对应波段的发射率是辐射器性能研究的重点。传统的黑体和掺杂镱或钪的稀土辐射器的发射性能主要受热源温度及材

收稿日期: 2013-06-21; 修订日期: 2013-07-12

作者简介: 徐继圆(1989-), 男, 江苏连云港人, 主要从事辐射防护与环境保护的研究。

E-mail: circlexu@126.com

料的影响。在相同的热源温度下, 辐射器的发射性能很难再得到提高<sup>[1-2]</sup>。近年来, 国内外研究机构提出了一种具有表面微结构的辐射器, 并对其光谱性能做了大量的实验研究与现象分析, 发现由于该型辐射器独特的表面几何结构导致其发射的红外辐射波段与多种光伏元件匹配程度较好<sup>[3-6]</sup>, 且相比于稀土辐射器, 对应波段的红外辐射发射率有了很大程度的提高<sup>[7]</sup>。

国内对于微腔发射性能的研究主要集中在光谱分析和算法的讨论上<sup>[8-10]</sup>, 对于光线在微腔中的作用过程以及几何尺寸的影响则研究较少。本文以表面微结构单个微腔作为研究对象, 着重探讨了钨材料微腔几何尺寸对辐射器产生的红外辐射波段的调控作用以及发射率的影响。最后, 根据 GaSb 光伏元件的量子效率曲线, 初步设计了一种在 GaSb 高量子效率波段具有较高发射率的表面微结构辐射器几何结构。

## 2 表面微结构辐射器

表面微结构辐射器是在平板表面设置若干具有周期性排列的网格或圆孔(柱), 如图 1 所示。在直角坐标系中, 整个辐射器表面沿着  $X$  和  $Y$  方向延伸; 在  $Z$  方向, 辐射器高度呈关于  $L$  与  $d$  的周期性分布。若以表面微腔尺寸( $L, d$ )表示微腔的形态特征, 则整个微结构可以表示为  $Z$  关于  $L$  与  $d$  的周期性函数:  $Z = Z(L, d, n)$ ; 其中,  $n$  为表面周期数。

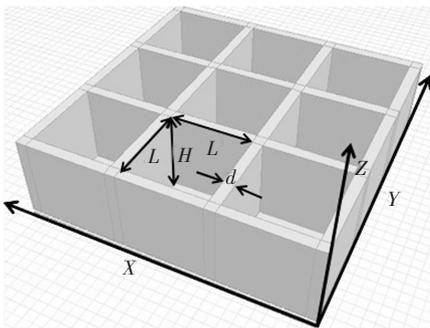


图 1 辐射器表面(网格)示意图

Fig. 1 The schematic diagram of emitter surface (grid)

红外辐射属于电磁波。在微结构辐射器中, 当一束红外辐射从  $Z$  轴负向入射时, 辐射器表面的网格结构可视为一系列的谐振腔。对于导体腔壁, 单个腔内电磁波的电场与磁场任一直角分量满足亥姆霍兹方程, 可得出截止波长与微腔尺寸

的近似关系<sup>[4]</sup>:

$$\lambda = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{l}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{2n+1}{L_z}\right)^2}}, \quad (1)$$

其中,  $L_x, L_y, L_z$  分别为微腔的长、宽、高, 单位为  $\mu\text{m}$ ;  $l, m, n$  为腔面所含的半波数目( $l, m, n$  取  $0, 1, 2, 3, \dots$ ;  $l, m, n$  中, 只有一个可取  $0$ )。红外辐射的产生及其在微腔中的行为均受到微腔材料部分光学参数的影响, 所以辐射器材料也影响其红外辐射发射性能。

整个辐射器在高温条件下工作, 辐射器材料必须有较高的熔点和良好的热稳定性。其次, 光线在出射前会在腔内经过多次反射, 所以所选材料应在光伏元件匹配波段内具有较高的反射率以降低光线在微腔内的损耗。

目前, 主要用两种材料来提高腔壁对应波段的反射: 一种是利用多层折射率不同的半导体材料交替生长, 形成布拉格反射腔壁; 另一种是利用金属的高反射率, 镀膜或者直接采用金属形成金属反射腔壁<sup>[11]</sup>。然而, 布拉格反射腔壁的制作条件要求高, 工艺复杂, 反射波长范围有限, 不适合作为表面微结构腔壁。实际情况下, 红外辐射是由高温下辐射器自身材料产生, 根据基尔霍夫定律, 辐射器材料应有适当的吸收率和较大的反射率。因此, 常选用高熔点且高温下稳定性稍好的单晶钨来作为辐射器材料<sup>[12]</sup>。图 2 给出了不同波长的光由真空入射金属钨界面的反射光谱。

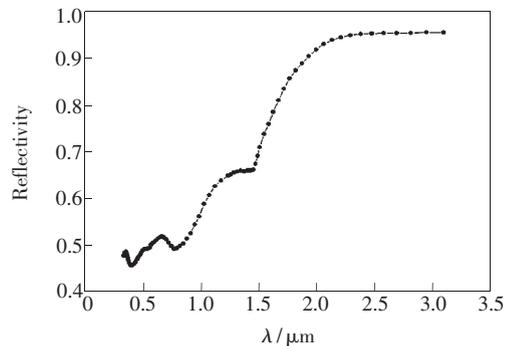


图 2 金属钨的反射光谱

Fig. 2 The reflecting spectrum of tungsten

在图 2 中, 金属钨的反射率从  $0.83 \mu\text{m}$  处开始升高, 在  $1.27 \sim 1.49 \mu\text{m}$  波段变化较小,  $1.49 \mu\text{m}$  以后突然升高。可知在  $0.83 \mu\text{m}$  以后, 钨的反射率比吸收率和透射率高。而在  $1.49 \mu\text{m}$  后, 钨的反射曲线突然升高, 可以推断出小于该波长

的光子将透入腔壁再次被界面反射或进入相邻微腔被二次利用。

### 3 几何因素的影响

在辐射器材料确定的情况下,辐射器的光子发射性能主要受辐射器几何结构的影响。图 3 给出了相同环境条件下的平板钨与表面微结构辐射器的发射率曲线。在图中波段内,表面微结构辐射器的发射率较平板钨辐射器均有一定程度的提高,而在  $1.17 \sim 1.54 \mu\text{m}$  范围内,表面微结构辐射器的发射率提高幅度很大,  $1.54 \mu\text{m}$  后骤减。可知两种辐射器发射性能的差异主要由几何结构引起。

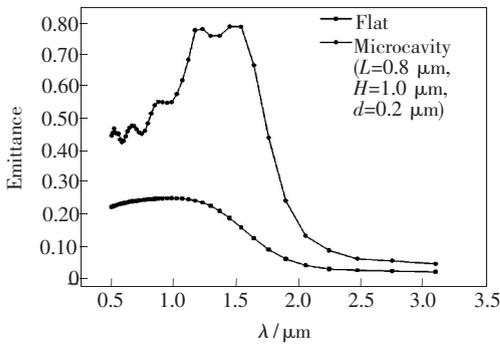


图 3 平板与表面微结构钨辐射器的发射率差别

Fig. 3 The emissivity difference between flat and microstructural tungsten surface emitter

#### 3.1 微腔宽度的影响

考虑光在两个平行腔壁间的往返情况。光波在两个腔壁间不断进行发射和反射,发射波和反射波将在腔内形成多光束干涉。若要增加特定波长光子的出射强度,则需要调节微腔宽度使对应波长的光子在腔内形成相长干涉。发生相长干涉的条件是<sup>[13]</sup>:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2n_0L', \quad (2)$$

其中,  $\Delta\varphi$  表示光波在腔内往返一周时的相位滞后;  $\lambda$  对应光的波长,单位是  $\mu\text{m}$ ;  $n_0$  为腔内介质折射率;  $L'$  为微腔的光学宽度,单位是  $\mu\text{m}$ 。由公式(2)可以得出,只有当微腔宽度与波长匹配时,微腔才可以提供反馈,使之谐振。微腔宽度的取值决定了辐射器能否增加对应波长出射光子的出射强度。

#### 3.2 微腔厚度的影响

光射入腔壁时,将产生吸收、反射和透射。其

中,反射部分可以被微腔利用,放大光的强度;透射部分可以进入相邻微腔,在相邻的微腔中被再次利用。腔壁厚度对腔内光线的影响主要为对不同波长光的吸收而引起反射波长的损耗。

理论与实验均表明,光在材料中的传播遵从指数衰减规律<sup>[14]</sup>。当光在物质的中的传播距离为  $d$  时,光强的变化描述为:

$$I = I_0 e^{-ad'}, \quad (3)$$

其中  $a$  为材料对光的吸收系数,  $a = 4\pi\kappa/\lambda_0$ , 因此可将式(3)转换为:

$$I = I_0 e^{-4\pi\kappa \frac{d}{\lambda_0}}, \quad (4)$$

式中  $\kappa$  为材料的消光系数,  $\lambda_0$  为光在真空中的波长。

图 4 给出了钨的消光系数与波长的变换情况,由此可以得出钨对不同波长光子的吸收系数  $a$ 。由式(4)可知,吸收系数与腔壁厚度无关,适当地减小腔壁厚度可以降低光线在微腔中由腔壁吸收而造成的损耗。

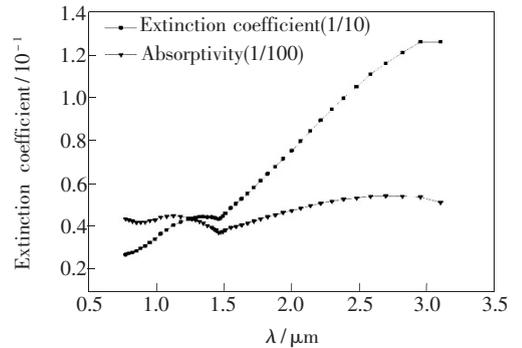


图 4 对应波长钨的消光系数与吸收系数

Fig. 4 The extinction and absorption coefficient of tungsten corresponding to the wavelength

#### 3.3 微腔高度的影响

光线在微腔中的路径近似如图 5 所示,光波在微腔中由于不断的反射与透射、在腔壁中反射不完全、材料的非激活吸收等原因形成损耗。因此,在反射角为  $\theta$  时,往返了  $m$  次以后的光强为:

$$I_m = I_0 (e^{-2\delta})^m = I_0 e^{-2\delta m}, \quad (5)$$

根据图 5,可得出往返次数与微腔长度及高度的关系:

$$m = \frac{H - H'}{2L' \cdot \tan\theta}, \quad (6)$$

联立式(5)、(6)即为:

$$I_m = I_0 e^{-\delta \frac{H-H'}{L' \cdot \tan\theta}}, \quad (7)$$

引入增益<sup>[13]</sup>,最终可得出射光强为:

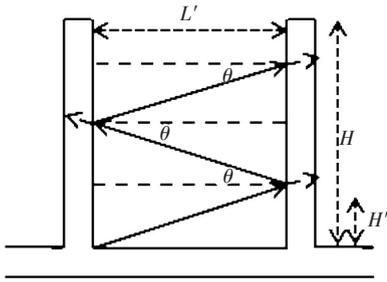


图 5 光线在微腔中反射示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the light reflecting in microcavity

$$I_m(H) = I_0 e^{(g-\delta) \frac{H-H'}{L' \cdot \tan\theta}}, \quad (8)$$

式中  $I_0$  为原始光强,  $g$  为增益项;  $\delta$  为损耗项,  $H$ 、 $H'$ 、 $L'$  分别为微腔高度、腔壁光线出射点距腔底距离以及微腔宽度,  $\theta$  为反射角。微腔的增益和损耗与微腔的材料及外界温度环境有关, 与微腔的几何尺寸无关。由公式 (8) 可知, 在  $g$  和  $\theta$  确定的情况下, 微腔的高度与宽度一样影响着微腔的出射光线强度。然而, 光在微腔中传输并不断增强时, 增益系数却不断下降。当增益与损耗相等时, 光强便不再增加。

### 4 数值计算

为了研究微腔尺寸对发射性能的影响, 我们采用了文献 [8] 中修正后的时域有限差分法 (FDTD), 仿真计算了不同的微腔宽度、壁厚与高度对微腔发射率的影响, 计算温度条件为常温。在仿真中采用  $0.5 \sim 3 \mu\text{m}$  平面波作为光源, 计算步长  $\Delta x = \Delta y = 250 \text{ nm}$ , 时间取  $\Delta t = \frac{\Delta x}{2c}$ , 在  $X$  与  $Y$  方向采用周期边界, 计算了  $3 \times 3$  的表面微结构网格, 得到了如图 6 所示结果。

图 6(a) 中, 微腔宽度的增加引起了腔内谐振波长变大。而通过平板铯的发射率曲线, 很容易理解谐振波长的变化导致峰值衰减的原因。图 6(b) 反映了在微腔高度与宽度相同时, 微腔壁厚对微腔发射率的影响。可见, 由于厚度增加, 材料对光线损耗的影响逐渐增加, 导致微腔的峰值逐渐降低; 另外, 厚度增加同样引起了发射率曲线峰值波长增大。这种现象可以解释为光入射腔壁、透过第一个界面、再穿过腔壁透过第二个界面进入相邻微腔的过程中, 光在腔壁中的振幅会发生衰减, 导致相位变化而引起微腔的发射率峰值波长增加。图 6(c) 给出了微腔宽度与腔壁厚度确定时, 不同微腔高度对其发射率的影响曲线。在

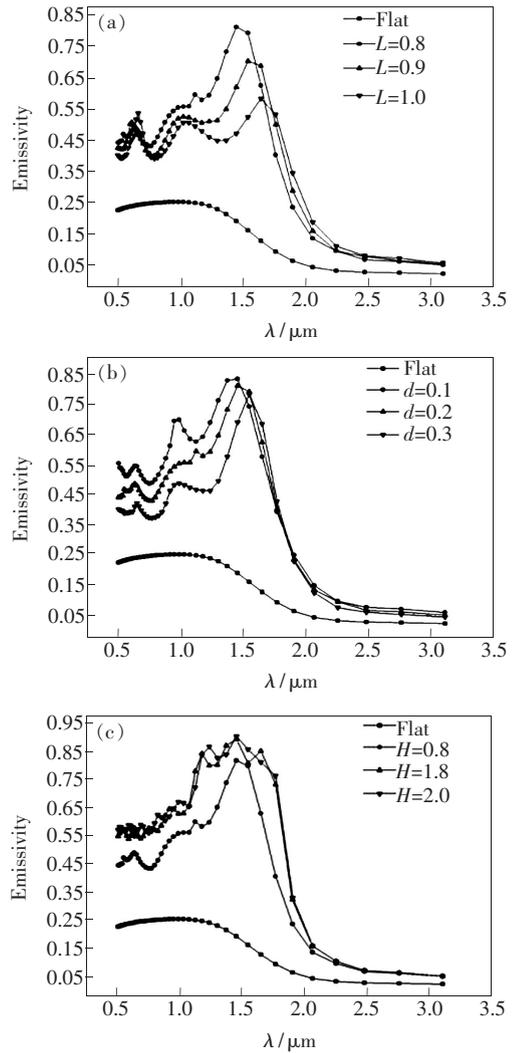


图 6 不同几何参数微腔的发射率对比。(a) 微腔宽度对发射率的影响,  $d = 0.2, H = 0.8$ ; (b) 腔壁厚度对发射率的影响,  $L = 0.8, H = 0.8$ ; (c) 微腔高度对发射率的影响,  $L = 0.8, d = 0.2$ 。

Fig. 6 The comparison of the microcavity's emissivity with respect of different parameters. (a) The impact of different width on emissivity,  $d = 0.2, H = 0.8$ . (b) The impact of different walls' thickness on emissivity,  $L = 0.8, H = 0.8$ . (c) The impact of different height on emissivity,  $L = 0.8, d = 0.2$ .

微腔高度大于宽度时, 微腔高度增加, 发现波长为  $L + 2d$  的光子发射峰值愈发明显。由于微腔对出射光强的增益作用, 高度为  $0.8 \mu\text{m}$  的微腔发射率峰值较高度为  $1.8 \mu\text{m}$  时明显较小; 而在微腔高度为  $2.0 \mu\text{m}$  时的发射峰与高度为  $1.8 \mu\text{m}$  时的差别微小。可以近似认为, 当高度为  $1.8 \mu\text{m}$  时, 微腔出射光线强度近乎饱和, 即增益项与损耗项几乎相等。图 6 分别反映了微腔的宽度、壁厚

以及高度对微腔发射性能的影响,可见在外环境条件与微腔材料确定情况下,表面微结构的发射性能受几何尺寸影响较大。

根据微腔宽、高以及壁厚对其性能的影响分析以及图 6 所示数据,可根据系统拟采用的光伏元件对微腔几何结构进行设计。针对 GaSb 光伏元件,取微腔的宽度、壁厚、高度分别为  $0.8, 0.1, 1.8 \mu\text{m}$ , 计算得出发射率曲线如图 7 所示,微腔发射率峰值波段出现在  $1.02 \sim 1.64 \mu\text{m}$  处。GaSb 光伏元件的测试结果表明,其量子曲线主要集中在  $0.5 \sim 1.8 \mu\text{m}$  处,在  $0.95 \sim 1.5 \mu\text{m}$  波段效率较高<sup>[15]</sup>。可见该结构与 GaSb 的量子效率曲线匹配较好。图 7 中最大发射率出现在  $1.37 \mu\text{m}$  处,约为 0.93;在  $1.02 \sim 1.64 \mu\text{m}$  波段内,平均发

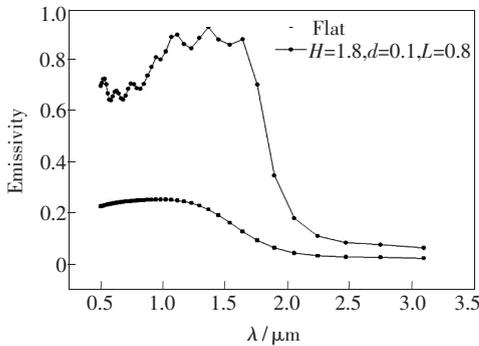


图 7 设计结果给出的发射率曲线

Fig.7 The emissivity curve of the design result

射率为 0.86。

## 5 结 论

以钨材料的表面微结构辐射器单个微腔为研究对象,讨论了微腔高度  $H$ 、宽度  $L$  以及壁厚  $d$  对其发射性能的影响,并借助时域有限差分法进行了计算与验证。结果表明:

(1) 根据微腔反射率曲线调整微腔宽度和壁厚可以调节微腔发射光子的峰值波长;

(2) 当微腔高度大于宽度时,波长为  $L + 2d$  处的首个峰值将逐渐明显;继续增加微腔高度,波长为  $L + 2d \sim 2L$  范围的发射率将增加至定值;

(3) 微腔出射光线的强度与微腔高度有关,受微腔材料与腔壁厚度影响,为了获得较好光线出射强度,应调节腔高使光强的增益项与损耗项相等以获得微腔对光线增益的饱和。

本文对微腔发射率的仿真计算未涉及高温条件下温度对微腔材料钨产生的影响。但是由文献 [16] 可知,在温度升高时,钨的折射率以及消光系数的变化将导致钨的反射率与常温条件下相比存在小范围波动,导致材料发射率改变。另外,材料不同波长的折射率与温度有关,在获知材料的折射率温度系数后,应对微腔尺寸进行小范围调整。

## 参 考 文 献:

- [1] Geng X. Feasibility Analysis of TPV Technology During Re-entry Process and Preparation of Selective Emitter [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011 (in Chinese).
- [2] Yang G. The Spectral Control Properties of Representative Microstructure and Their Application [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011 (in Chinese).
- [3] Heinzel A, Boerner V, Gombert A, et al. Microstructured tungsten surfaces as selective emitters [J]. *AIP Conf. Proc.*, 1999, 460:191-196.
- [4] Maruyama S, Kashiwa T, Yugami H, et al. Thermal radiation from two-dimensionally confined modes in microcavities [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 79(9):1393-1395.
- [5] Sai H, Kanamori Y, Yugami H. Tuning of the thermal radiation spectrum in the near-infrared region by metallic surface microstructures [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2005(15):243-249.
- [6] Celanovic I, Jovanovic N, Kassakian J. Two-dimensional tungsten photonic crystals as selective thermal emitters [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92(19):193101-1-3.
- [7] Lin S Y, Moreno J, Fleming J G. Three-dimensional photonic-crystal emitter for thermal photovoltaic power generation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83(2):380-382.
- [8] Liu G P, Han Y G, Li Q, et al. Theoretical method for simulating thermal spectral properties of microstructured surface [J]. *J. Eng. Thermophys.* (工程热物理论), 2009, 30(1):111-114 (in Chinese).
- [9] Liu G P. Thermal Radiation Spectral Control Properties of Microstructure and Their Application [D]. Nanjing: Nanjing

University of Science & Technology, 2008 (in Chinese).

- [10] Liu R S. Study on The Preparation and Properties of Rare-earth Photonic-crystal Emitter [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008 (in Chinese).
- [11] Ma F Y, Su J P, Guo M T. Study on the angular dependence of metal mirror microcavities [J]. *J. Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 2010, 21(7):974-977 (in Chinese).
- [12] Yugami H, Sasa H, Yamaguchi M. Thermophotovoltaic systems for civilian and industrial applications in Japan [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2003, 18(5):S239-S246.
- [13] Zhou B K, Gao Y Z, Chen C R, *et al.* *Laser Principle* [M]. 5th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2004 (in Chinese).
- [14] Fang R C. *Solid State Spectroscopy* [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2003:1-10 (in Chinese).
- [15] Fraas L M, Samaras J E, Huang H X, *et al.* TPV generators using the radiant tube burner configuration [J]. *Proc. 17th European PV Solar Energy Conf.* (Munich, Germany, 22-6 Oct), 2001.
- [16] Sai H, Kamikawa T, Kanamori Y, *et al.* Thermophotovoltaic generation with microstructured tungsten selective emitters [J]. *AIP Conf. Proc.*, 2004(738):206-214.

## 《发光学报》网上在线投稿通知

由于学报发展的需要,《发光学报》网站已经建成开通,欢迎广大作者浏览我们的网页并提出宝贵意见,共同建好这个为广大作者和读者进行交流以及展示作者相关科研成果的平台。《发光学报》网页上建有网上在线投稿平台,我们只接收网上在线投稿,欢迎大家使用。如有问题,请与我们联系:

E-mail: fgxbt@126.com, Tel: (0431)86176862,84613407

《发光学报》网址: <http://www.fgxb.org>

《发光学报》编辑部