

文章编号: 1001-9014(2009)06-0414-04

用于气体传感的一维光子晶体窄带红外发射光源

梁华锋^{1,2}, 赖建军^{* 1,2}, 彭中良^{1,2}, 易仙^{1,2}, 周治平^{3,4}

(1. 武汉光电国家实验室, 武汉 430074 2. 华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉 430074

3. 北京大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871;

4. 美国乔治亚理工学院 电子与计算机工程系, 亚特兰大 美国 30332)

摘要: 基于有限一维光子晶体表面电磁波理论, 以探测 CO_2 为例, 设计了一个中心波长为 $4.23\mu\text{m}$, 发射率大于 99%, 发射谱线半高宽 $\text{FWHM} = 49.9\text{nm}$ 的窄带准相干红外发射光源. 采用传输矩阵方法对这种光源进行了理论分析, 并用时域有限差分 (FDTD) 方法对器件垂直入射时的反射谱和稳态电场分布进行了数值仿真, 仿真光谱特征和理论计算得到的结果吻合, 证明了这种窄带红外发射光源的可行性.

关键词: 窄带红外热发射; 光子晶体; 传输矩阵; 时域有限差分

中图分类号: O432.1 文献标识码: A

NARROW BAND INFRARED EMITTER BASED ON ONE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTALS USED FOR GAS SENSING

LIANG Hua-Feng^{1,2}, LAI Jian-Jun^{* 1,2}, PENG Zhong-Liang^{1,2}, YI Xian^{1,2}, ZHOU Zhi-Ping^{3,4}

(1. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074, China

2. College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

3. State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Peking University, Beijing 100871, China

4. School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta 30332, USA)

Abstract Based on one-dimensional photonic crystals, a narrow band quasi-coherent infrared thermal emitter with the central wavelength corresponding to the infrared absorption peak of CO_2 was designed. Its central wavelength, emissivity and full width at half maximum (FWHM) are $4.23\mu\text{m}$, $> 99\%$ and 49.9nm , respectively. Transfer matrix method (TMM) and finite difference time domain method (FDTD) were used to analyze and simulate this infrared thermal emitter respectively. The results obtained by theory calculations and simulated spectral property are consistent. So the feasibility of this kind of narrow band thermal emitter is verified.

Key words narrowband infrared thermal emitter; photonic crystals; transfer matrix; finite difference time domain (FDTD)

引言

基于红外吸收方法的便携式气体探测器设计里面关键的一项是光源的设计, 为了提高灵敏度和防止不同气体吸收信号之间的干扰, 通常需要窄带光源. 在红外波段, 较好的窄谱光源有中红外 LED 和量子级联激光器^[1], 但是它们量子效率低、功率不高且价格昂贵, 特别是量子级联激光器. 因此传统的

黑体和白炽灯丝等宽谱光源仍然是最常用的红外光源. 采用宽谱红外光源一般需要滤光片来获得窄带光, 如果直接制作窄带红外光源则不需要额外的滤光片, 可以简化系统结构设计, 降低器件成本, 因此有必要研究窄带红外发射光源.

最近研究发现, 通过在热辐射物体表面制作微结构, 可以改变物体的热辐射特性, 使得某些波段辐射增强而其它的波段辐射被抑制, 从而得到窄带准

相干热辐射源^[2]. Yeh^[3]等从理论上发现在禁带区域,有限一维光子晶体的截断表面能在很窄光谱范围内激发表面电磁波.当有限一维光子晶体的截断面镀上金属层后,金属层中的自由电子与外部电磁场共振,这种表面电磁波可以直接由空气中的传播光直接激发而不需要额外的衰减全反射附件(ATR),使得基于这种原理的窄带红外发射光源成为可能^[4].

本文基于有限一维光子晶体表面电磁波理论,以探测CO₂为例,设计了一个中心波长为 $\lambda_0 = 4.23\mu\text{m}$,发射率大于99%,发射谱线半高宽FWHM = 49.9nm的窄带红外热辐射光源.对这种热辐射光源的能带结构和发射谱特性进行了理论分析,并采用时域有限差分(FDTD)方法进行数值仿真,仿真结果与理论推导的结果相互吻合,证明了这种窄带红外发射光源的可行性.

1 理论分析

这种窄带红外热辐射光源的基本结构如图1所示,它是由有限一维光子晶体和金层构成.这种结构可以采用薄膜光学中的表示方法简单表示为: M(HL)⁴,其中M为金,H和L分别为高低折射率的介质材料.当光谱光入射时,在有些光谱范围内,光子晶体截断层和金属接触面会激发表面波,光能被转化为热能损耗^[5].根据基尔霍夫热辐射定律,如果加热这个物体,这个物体也会发射出与吸收谱完全一样的窄带发射光谱^[6].本文采用传输矩阵方法分析了器件的能带结构和色散关系,计算出这种器件的反射谱,然后根据基尔霍夫热辐射定律间接推导出热辐射特性.

采用传输矩阵的方法可得一维光子晶体色散关系如式(1)所示^[3],其中A和D为传输矩阵的矩阵元,且都是 ω , k_x 和 k_y 的函数, Λ 为光子晶体周期.

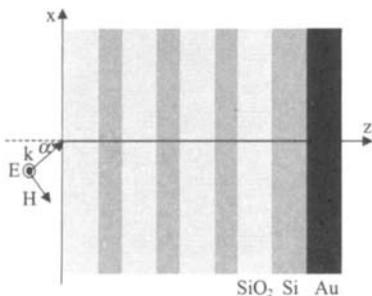


图1 准相干窄带红外发射器结构示意图

Fig 1 Schematic diagram of the quasi-coherent narrowband infrared emitter

$$K(\omega, k_x, k_y) = \left[\frac{1}{\Lambda} \right] \cos^{-1} \left[\frac{1}{2} (A + D) \right], \quad (1)$$

当 $|A + D|/2 < 1$ 时, $\text{Im}(K) = 0$ Bloch波可以在光子晶体中传播,对应的区域为导带.当 $|A + D|/2 > 1$ 时, $\text{Im}(K) \neq 0$ Bloch波在光子晶体成指数衰减,对应的区域为禁带.当 $|A + D|/2 = 1$ 时为导带和禁带的分界.因此根据Bloch波矢 K 与 ω , k_x 和 k_y 的关系,就可以得到一维光子晶体的能带结构图.

本文选用金(Au)、硅(Si)和二氧化硅(SiO₂)设计针对CO₂在4.23 μm 处吸收峰的窄带红外发射光源.设计的结构参数为: $d_{\text{SiO}_2} = 575.3\text{nm}$, $d_{\text{Si}} = 242.9\text{nm}$,金层的厚度为300nm,Si和SiO₂折射率分别为3.42和1.43.图2为s偏振和p偏振下的投影能带结构图.当波长为4.23 μm ,计算的简化角频率的值为0.193.在正入射时,正好落在第一禁带区域.

根据基尔霍夫热辐射定律,窄带红外发射光源的发射谱可以由吸收谱直接得到: $\epsilon_{\lambda 0} = A_{\lambda 0} = 1 - R_{\lambda 0} - T_{\lambda 0}$,由于金层的厚度设计为300nm,所以透过率可以忽略不计,因此发射率即为 $\epsilon_{\lambda 0} = 1 - R_{\lambda 0}$.

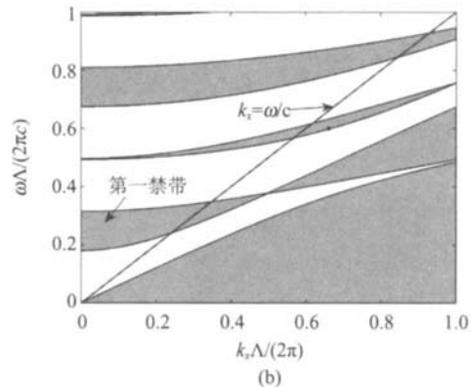
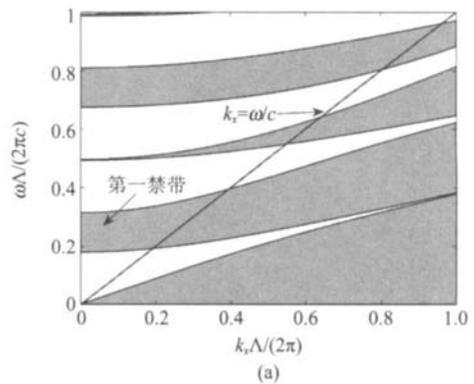


图2 光子晶体投影能带结构图 (a)s偏振 (b)p偏振

Fig 2 Band structure diagram of the photonic crystals (a) s polarization (b) p polarization

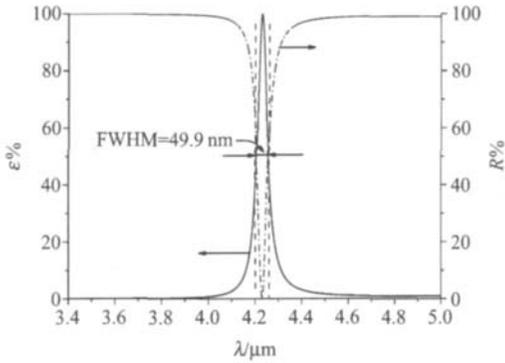


图 3 正方向的反射和发射率

Fig 3 Reflectance and emittance curves at normal incidence

反射率和发射率曲线如图 3 所示. 从图中可以看出, 在中心波长 $4.23\mu\text{m}$ 处, 正向发射率大于 99%.

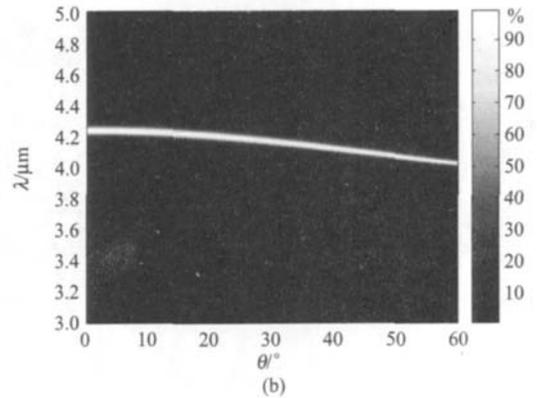
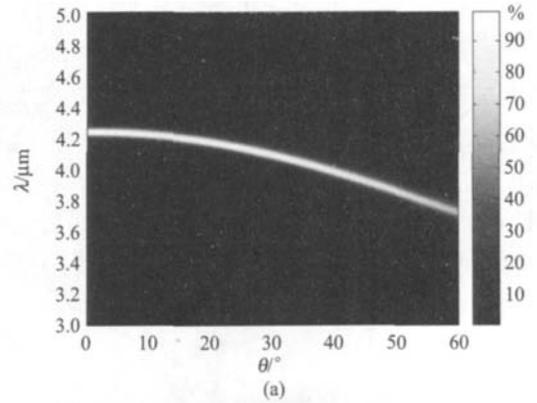
图 4 为光源不同偏振时的谱-方向发射率等高线图. 从图中可以看出在垂直方向这两种偏振状态的发射率是相同的, 随着角度的增加, 这两种偏振状态差异增大, p 偏振的曲线要比 s 偏振的更加弯曲, 说明随着角度的增加, 发射中心波长位置移动的比较. 此外从图中也可以看出发射率随角度增加而变低.

这种类型的窄带红外发射光源的发射特性与一维光子晶体和金层接触面上的表面波有很大关系. 表面波的产生和强度受光子晶体的周期数影响很大, 而且有最优的周期使得器件的发射率和谱线宽度达到最优值. 图 5 为不同周期时的发射率和光源中的相对电场强度分布. 从图 5(a) 中可以看出: 随着周期数增加, 发射谱宽变窄, 而发射率先增大后减小, 周期数为 4 时发射率最高. 综合考虑, 周期 4 为最优周期数, 这也是在前面设计中选取周期为 4 的原因. 从图 5(b) 中可以看出相对电场强度变化规律与发射率的变化规律一致, 而电场强弱直接反映表面波的强弱, 由此可以看出表面波的强度越强, 金层吸收的能量越多, 发射率越高.

2 数值仿真

为了验证上述理论分析的准确性和更加深刻地理解这种窄带发射的物理机制, 这里采用时域有限差分 (FDTD) 仿真窄带发射光源的光谱特性和稳态电场分布情况. 图 6 为 FDTD 计算得到的这种结构的反射率曲线, 和图 3 比较可以看出, 采用 FDTD 仿真的结果和用传输矩阵计算得到的结果吻合, 因此证明了这种设计的可行性.

图 7 中的 (a) 和 (b) 分别为光源在反射率最小

图 4 谱-方向发射率等高线图 (a) p 偏振 (b) s 偏振Fig 4 Spectral-directional emittance contour plot (a) p polarization (b) s polarization

和最大时的稳态电场分布, 下面的曲线表示相对电场强度的变化. 从光与物质相互作用的角度, 光能量的损耗是由于物质的介电常数虚部引起的. 在我们的模型中, 介质材料 Si 和 SiO_2 均被认为是透明材料, 介电常数虚部为零, 只有金的介电常数虚部不为零, 因此能量的损耗肯定是在金层里面发生的, 从稳态电场分布图 7(a) 和图 7(b) 中充分验证了这样的猜想. 在图 7(a) 中, 电场最大值的位置出现在和金层接触的位置附近, 而且出现谐振现象, 电场强度大幅增加, 光能量的损耗也增加; 而图 7(b) 则正好相反, 光能量在没有达到金层之前几乎全部都反射出去, 所以光能量损耗很小.

3 结论

本文基于一维光子晶体表面电磁波理论, 设计了一种类型的窄带红外发射光源. 针对便携式气体探测器件的需要, 以探测 CO_2 为例, 设计了一个中心波长为 $\lambda_0 = 4.23\mu\text{m}$, 发射率大于 99%, 发射谱线半高宽 $\text{FWHM} = 49.9\text{nm}$ 的窄带红外发射光源. 对一维光子晶体的能带结构, 光源的发射谱特性和发射谱与周期数的关系进行了理论分析, 并采用时域有

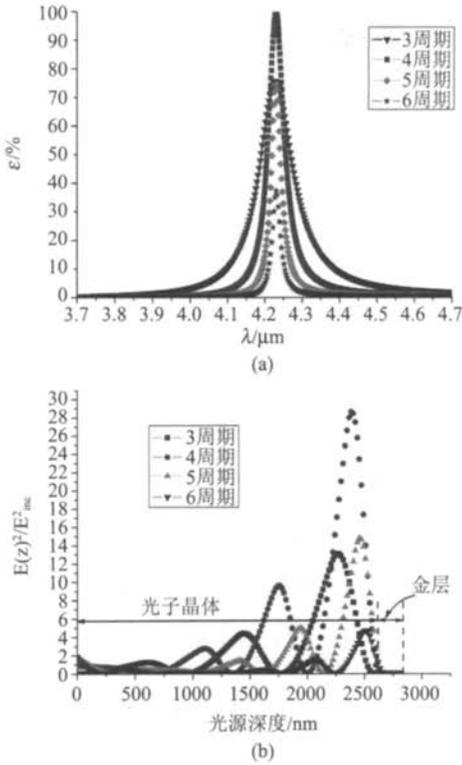


图5 (a)不同周期下光源垂直方向的发射谱(b)光源中的相对电场强度
Fig.5 (a) Normal emittance curves at different periods (b) the relative electric field intensity

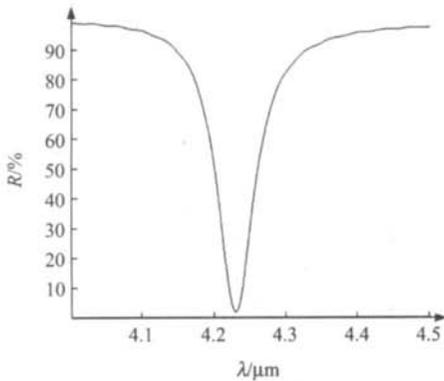


图6 FDTD 仿真得到的正入射时的反射曲线
Fig.6 Reflectance curve at normal incidence obtained by FDTD

限差分方法进行数值仿真, 数值仿真的结果和理论分析的结果吻合, 因此验证了这种设计的可行性. 此外, 通过 FDTD 方法对稳态电场分布仿真, 对产生这种窄带发射的物理机制有了更加直观的认识.

该窄带红外发射光源的设计方法非常灵活, 通

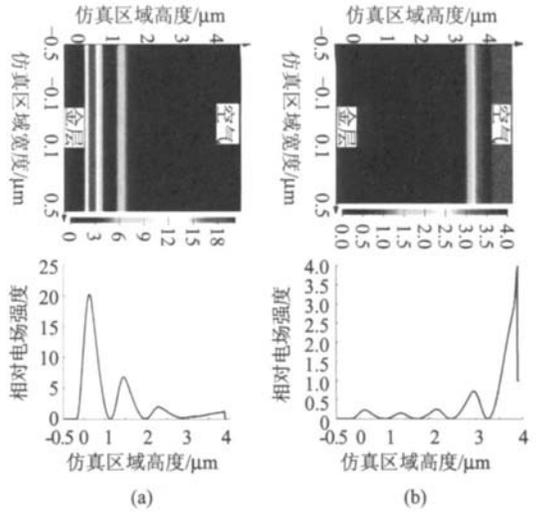


图7 不同反射率时的稳态电场分布 (a)反射率最小 (b)反射率最大
Fig.7 Steady electrical field distribution at different reflectance (a) minimum (b) maximum

过设计不同的光子晶体结构和优化设计可以方便地把中心波长移到别的位置, 这样大大增加了这类器件的应用范围, 弥补了激光器受材料限制而覆盖谱段有限的缺点. 这种窄带准单色光源在单色性要求不高、强度不需要很大的场合, 有望作为激光光源的补充, 成为一种在很宽谱段范围可调的窄带光源, 从而得到广泛的应用.

REFERENCES

[1] Joly L, Robert C, Parvite B, et al. Development of a spectrometer using a continuous wave distributed feedback quantum cascade laser operating at room temperature for the simultaneous analysis of N₂O and CH₄ in the Earth's atmosphere[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(39): 1206—1214.
 [2] Greflet J J, Caminati R, Joulain K, et al. Coherent emission of light by thermal sources[J]. *Nature*, 2002, **416**: 61—64.
 [3] Yeh P, Yariv A, Hong C S. Electromagnetic propagation in periodic stratified media. I. General theory[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(4): 423—438.
 [4] Gaspar Amenta J A, Vilfa F. Photonic surface-wave excitation: photonic crystal—metal interface[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003 **20**(11): 2349—2354.
 [5] Lee B J, Zhang Z M. Design and fabrication of planar multilayer structures with coherent thermal emission characteristics[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, **100**(6): 063529.
 [6] Siegel R, Howell J R. *Thermal Radiation Heat Transfer*[M] 4th ed. Taylor & Francis, New York, 2002, 215—219.