

基于金属/介质/金属光栅的窄带红外发射/吸收结构设计

赖建军^{1,2} 梁华锋² 王彬² 翟小锋²

(¹武汉光电国家实验室光电材料与微纳制造研究部, 湖北 武汉 430074)
(²华中科技大学光电科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 设计了一种用于窄带红外发射光源和窄带探测器的金属/介质/金属光栅的红外发射/吸收结构。采用有限差分时分域(FDTD)方法,模拟了一维 Ag/Si₃N₄/Ag 光栅的反射谱。模拟结果表明,此结构对于 TE 模和 TM 模都支持很窄的中红外发射/吸收峰,在很宽的角度范围内发射/吸收中心波长处的发射率可以达到 98% 以上。此结构的独特发射/吸收特性来自于介质中波导模和金属表面等离子体模的激发。

关键词 探测器;窄带红外发射/吸收;有限差分时分域方法;光栅;波导模;表面等离极化激元

中图分类号 TN21 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.060402

Narrow-Band Infrared Emission/Absorption Structure Based on Metal-Dielectric-Metal Grating

Lai Jianjun^{1,2} Liang Huafeng² Wang Bin² Zhai Xiaofeng²

¹ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan, Hubei 430074, China

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

Abstract A metal-dielectric-metal grating infrared emission/absorption structure is designed for narrow-band infrared emitters or detectors in application of spectral imaging sensors and biomaterial absorption spectroscopy. By using finite difference time domain (FDTD) method, reflection spectrum of the one dimensional Ag/Si₃N₄/Ag grating structure is simulated. The results show that very narrow mid-infrared emission/absorption peak is generated in this structure for both TE and TM polarizations and emittance above 98% at the central frequencies can be achieved for both polarizations over a broad emission direction. The origin of this performance is believed to come from the excitation of waveguide mode and surface plasmon mode in this structure.

Key words detectors; narrow-band infrared emission/absorption; finite difference time domain method; grating; waveguide mode; surface plasmon polariton

OCIS codes 040.3060; 230.5298; 230.6080; 130.3120

1 引言

利用表面微结构调制红外发射和吸收是近年发展起来的新技术。通过在物体表面制作微结构可以改变物体发射或吸收光谱特征,使得某些波段的发射或吸收增强而其他的波段发射或吸收被抑制,可用于构建选择性红外发射体和高相干性红外源^[1,2]。已有文献报道的表面微结构方法有光子晶体^[3]、简单表面光栅激发表面电磁波^[4]、真空谐振腔^[5]、金属亚波长结构^[6]以及金属/介质/金属(MIM)结构^[7]等,此外,还有具有负折射率的人工结构材料^[8,9]。这种在光谱和方向上具有选择性的红外辐射发射或吸收结构及其红外器件不仅可用于微型红外分析系统和高光谱红外探测,而且在能量转换系统,例如气体传感^[10]、热光伏电池^[11]等方

收稿日期: 2010-08-23; 收到修改稿日期: 2011-01-10; 网络出版日期: 2011-05-01

基金项目: 国家 863 计划(2007AA03Z309)资助课题。

作者简介: 赖建军(1968—),男,副教授,主要从事红外传感器和微光机电系统等方面的研究。

E-mail: jjlai@mail.hust.edu.cn

面也有着重要的应用。

本文提出一种产生窄带红外发射/吸收新结构,与文献[7]中的结构相比,不同之处在于:底层金属膜之上的两层采用金属/介质双层光栅代替金属光栅介质平板波导双层结构,且介质层厚,使之支持波导模。采用有限差分时域(FDTD)方法模拟新结构正入射时的反射谱特性,进而获得发射谱或吸收谱,同时考察在宽角度入射范围内反射谱的变化规律。

2 理论模型

基于一维金属/介质/金属光栅的红外发射/吸收结构及 TE、TM 偏振模的定义如图 1 所示。该结构主要包括三层,底层是连续的 Ag 层,上面两层为 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ag}$ 双层光栅结构。与文献[7]中的不同,本结构的中介质层不仅非连续,而且较厚,不仅可以支持表面等离子体模存在,亦能允许传统的导波模式存在。底层 Ag 的厚度设计为 200 nm,这比中红外光的趋肤深度要大许多,所以支撑结构的背景辐射可以被完全阻挡住,同时有利于简化对发射率或吸收率的计算。结构参数有周期 Λ ,光栅宽度 w 和各层的厚度分别用 h_m 、 h_d 、 h_s 表示,其值分别为 $\Lambda=1.8\ \mu\text{m}$, $w=1.1\ \mu\text{m}$, $h_m=100\ \text{nm}$, $h_d=1.1\ \mu\text{m}$, $h_s=200\ \text{nm}$ 。

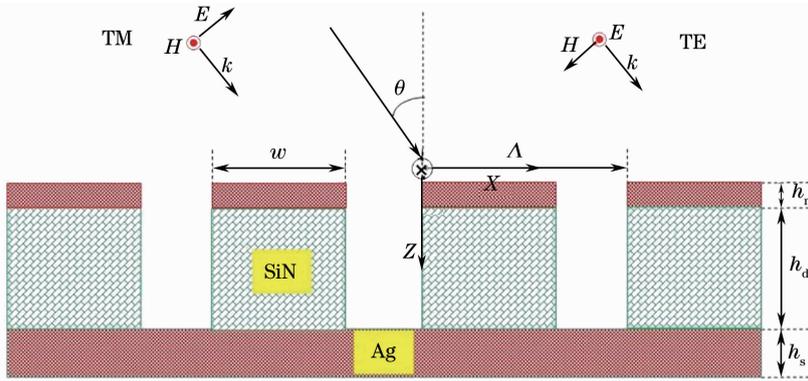


图 1 一维 Ag/ Si_3N_4 /Ag 异质光栅结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Ag/ Si_3N_4 /Ag grating structure

为了研究这种红外结构的发射或吸收性能,采用间接的方法。首先用 FDTD 方法计算出这个结构的反射谱,然后用基尔霍夫定律推导出发射谱或吸收谱。由于底部 Ag 层比较厚,透射率可以忽略不计,所以发射率和吸收率可以直接从反射率推出 $\epsilon_{\lambda,\theta} = A_{\lambda,\theta} = 1 - R_{\lambda,\theta}$ 。

在 FDTD 仿真中,Ag 的介电常数可以用 Lorentz-Drude(LD) 模型来描述,它经常用来描述金属的光学性质^[12]。Drude 模型用来描述带内跃迁效应,而 Lorentz 模型用来描述带间效应,LD 模型的表达式为

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_D(\omega) + \epsilon_L(\omega) = 1 - \frac{\omega_D^2}{\omega(\omega - i\gamma_0)} + \sum_{j=1}^k \frac{\Delta\epsilon_j}{\omega_j^2 - \omega^2 + i\omega\gamma_j}, \quad (1)$$

式中 ω_D^2 为等离子体频率、 $\Delta\epsilon_j$ 为谐振子的强度、 ω_j 为谐振频率、 γ_j 为衰减常数。在此用 5 个谐振项来拟合文献[12]中的实验数据,拟合的结果非常好,如图 2 所示,其中孤立点为实验数据,曲线采用 LD 模型进行拟合。用 LD 模型来描述 Ag 的光学常数的另一个很重要的原因是它可以采用辅助差分方程的方法,这在 FDTD 中很容易实现^[13]。对于介质材料 Si_3N_4 认为是没有损耗和色散的材料,折射率为 2.05。

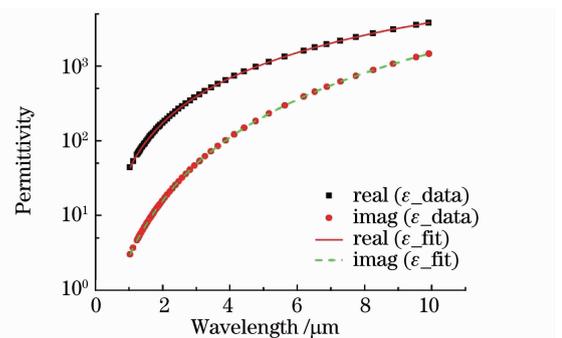


图 2 Ag 的介电函数

Fig. 2 Permittivity of silver used in the simulation

3 结果与讨论

3.1 发射谱分布

仿真得到的这种结构法线方向上不同偏振模式下的发射率曲线如图 3 所示,其中的插图为两种偏振模

式在中心频率处的稳态电场分布。两种偏振模的中心频率分别为 $f_{o,TE}=70.517$ THz 和 $f_{o,TM}=81.915$ THz, 分别对应于二氧化碳和氯化氢的红外特征吸收峰。TE 和 TM 偏振模的谱宽分别为 $\Delta f_{TE}\approx 0.58$ THz 和 $\Delta f_{TM}\approx 0.9$ THz, 转换为波长单位时为 $\Delta\lambda_{TE}\approx 35$ nm 和 $\Delta\lambda_{TM}\approx 40$ nm。两种偏振模下的品质因子(定义为 $Q = \lambda_o/\Delta\lambda$) 分别为 $Q_{TE} = 4257$ nm/35 nm = 121.6 和 $Q_{TM} = 3665$ nm/40 nm = 91.6。这种结构的谱宽比已经报道的类似结构要窄很多, 而且也特别适用于作为气体探测的光源或探测器使用, 因为不同气体之间探测信号的串扰可以得到很好的消除^[14]。

可以从仿真得到的电场分布对窄谱宽结果作出比较直观的解释。从图 3 中分别对应于 TE 和 TM 偏振模的电场分布图可以看出入射光场在波导中激发出了一些基模。对于 TE 偏振模, 光场被很好地限制在了介质波导中, 电场的强度增大到了 64 倍, 所以吸收介质 Ag 可以很好的吸收入射光场能量, 反射谱会出现在一个很低的窄带吸收峰。对于 TM 偏振模, 光场一部分被限制在介质波导中, 一部分在波导之间的空气隙当中, 同时也很明显的观察到了谐振。此外, 对 TM 模而言, 在顶层 Ag 的边沿, 电场强度被增大了许多, 这是由于激发了局域的表面等离子体谐振。因为 Ag 没有负的磁导率, 所以表面波只能通过 TM 偏振激发。

为了确定这种结构的发射峰位置与波导所支持的模式对应, 必须计算出这种结构对不同偏振所支持的基模。由于这个结构相对比较复杂, 解析表达式的推导会比较困难。受到采用 FDTD 方法计算光子晶体能带结构方法的启发, 采用 FDTD 方法来计算波导所支持的模式^[14]。一个点电偶极子光源放在介质波导的中心, 一条观察线放置在光栅的上方用来记录向外传播的波, 也即这个结构的模式和外面光场的耦合。计算得到的基模场分布和观察线所记录的向外传输的光透射率曲线如图 4 所示。基模的电场分布和图 3 中的由入射光激发的场分布一致, 而且由观察线记录的光透射率的峰值和图 3 的发射率中心波长位置一致。所以这种窄带发射光源的发射特性和这种结构支持的模式相关, 发射光源的中心波长应该与所支持的模式相对应。

发射谱的中心波长可以通过改变结构参数来改变。通过一系列的仿真实验, 发现介质波导的宽度对 TM 偏振的中心波长改变效果明显, 而介质波导的高度对 TE 偏振的中心波长移动更有效。周期对器件的发射特性也会有影响, 必须选择合适的周期来得到想要的发射特性。经验准则是所需要的中心波长越长, 对于相同的介质波导的宽度、周期也要变大。顶层 Ag 的厚度对于发射率也会有一定的影响, 太厚的 Ag 层会导致发射率的值变小。

对于采用其他不同的金属类似结构也进行了仿真。采用 Au 的结构得到的发射谱和采用 Ag 时类似, 发射率大小和谱宽均相差不大。但是对于采用 W 的结构发射谱会比较宽, 这是因为 W 在这个光谱范围的吸收要比 Au 和 Ag 大一些。这可以从品质因子的另一种定义中得到解释。谐振子的品质因子也可以定义为^[15]

$$Q = \omega_0 W_t / P_t, \quad (2)$$

式中 ω_0 为角频率, W_t 和 P_t 分别为谐振子中储存的能量和谐振子的能量损耗。当谐振子能量损耗增大, 品质因子将会降低。因为 W 的损耗要大些, 所以它的品质因子会变小, 表现在发射谱上就是发射谱会变宽。

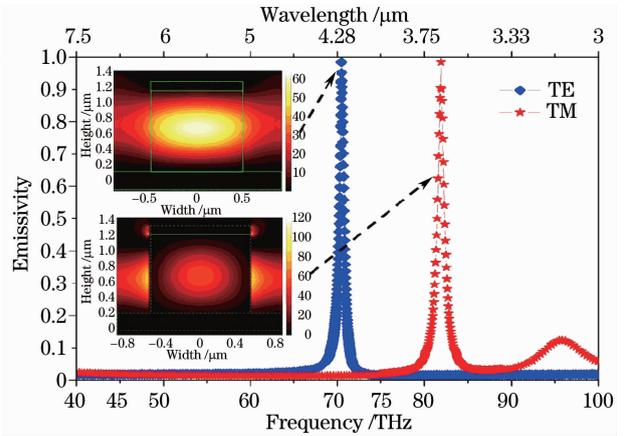


图 3 两种偏振模式下的法向发射率曲线

Fig. 3 Normal emissivity for TE and TM polarizations

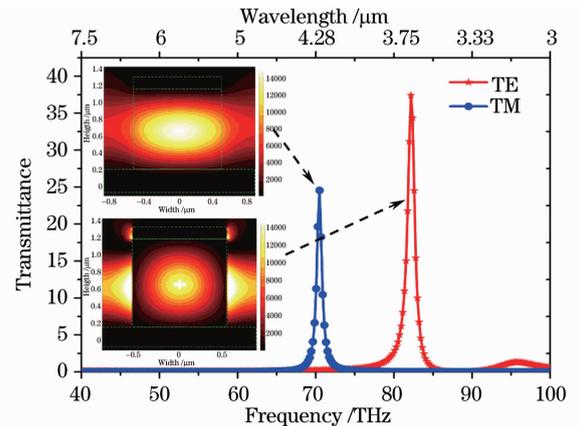


图 4 电偶极子激励下得到的透射率曲线以及对应峰值处的模场分布

Fig. 4 Transmittance and mode field distribution of two fundamental modes of TE and TM polarizations

3.2 发射谱角度分布

为了更加深入地研究这种窄带红外发射光源的性能,模拟了它的角度相关的发射特性。图5为两种不同的偏振模在不同的角度下的发射特性,最大角度延伸至 50° 。随着角度的增加,发射谱的中心波长和峰值基本没有太大的改变。对于TE偏振模而言,发射谱随着角度的增加只有很小的改变,但是对TM偏振模而言,发射谱的谱宽增大了很多。

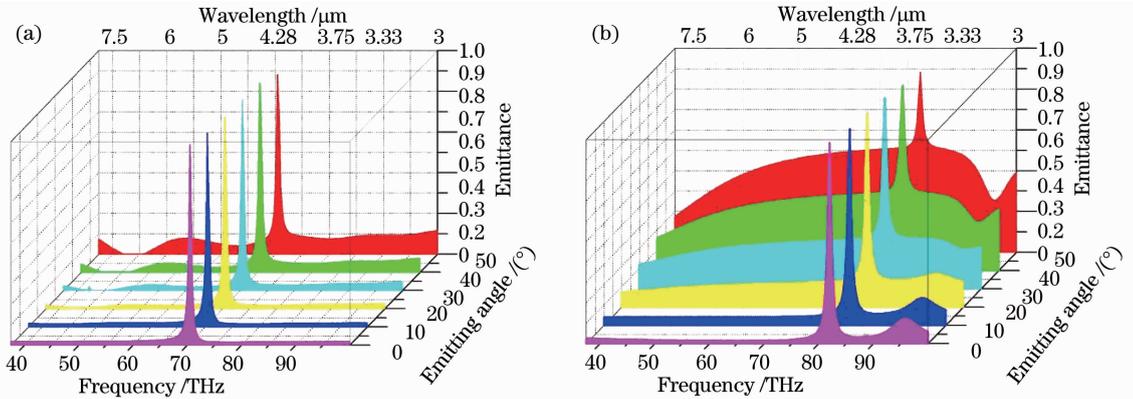


图5 不同偏振下不同角度的发射率曲线。(a)TE,(b)TM

Fig. 5 Angular dependence emittance for TE (a) and TM (b) polarization

这种不同的偏振条件下发射谱角分布存在的差异可以由一维光栅介质波导所支持的基模来解释。从图3中的基模场分布可以看出,对于TE模而言,光场被很好的限制在了介质光波导中,不同光波导之间的相互耦合很小,所以角度的增加并不能对光发射性能有太大的影响。对于TM偏振模而言,波导对光场的限制能力比较小,有很大一部分场分布在介质光波导之间的空气隙之间。所以随着发射角度增大,相邻波导之间耦合效应增强而导致发射谱出现展宽。

4 结 论

设计了一种基于一维Ag/Si₃N₄/Ag光栅的宽角度窄带红外发射或吸收结构,由于采用了较厚的介质层,它除了可以支持等离子体模式之外还可以支持一般的波导模式,对应于不同频率的TM模和TE模。由于TE模和TM模分离,因此如果与滤光片结合使用可以实现双波长工作,这在有些领域比较有用,比如用于气体探测,用一个光源可以同时探测两种不同的气体,或者可以通过设计将TM模和TE模调到比较接近的时候,一种模式用于探测,另一种模式用于参考。

参 考 文 献

- 1 M. U. Pralle, N. Moelders, M. P. McNeal *et al.*. Photonic crystal enhanced narrow-band infrared emitters[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(25): 4685~4687
- 2 J. J. Greffet, R. Carminati, K. Joulain *et al.*. Coherent emission of light by thermal sources[J]. *Nature*, 2002, **416**(6876): 61~64
- 3 D. L. C. Chan, M. Soljčić. Thermal emission and design in 2D-periodic metallic photonic crystal slabs[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(19): 8785~8796
- 4 K. Ikeda, H. T. Miyazaki, T. Kasaya *et al.*. Controlled thermal emission of polarized infrared waves from arrayed plasmon nanocavities[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(2): 021117
- 5 H. Liang, J. Lai, Z. Zhou. Ultra-narrowband infrared thermal emitter based on Fabry-Perot-like vacuum resonance cavity [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2009, **11**(10): 105001
- 6 G. Biener, A. Niv, V. Kleiner *et al.*. Metallic subwavelength structures for a broadband infrared absorption control[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(8): 994~996
- 7 Y. T. Chang, Y. T. Wu, J. H. Lee *et al.*. Emission properties of Ag/dielectric/Ag plasmonic thermal emitter with different lattice type, hole shape, and dielectric material[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(21): 213102
- 8 Yan Lingling, Zhang Liwei, Cai Hongxin *et al.*. Optical properties of the new MOLED containing negative refractive index

- dielectric layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1800~1803
- 闫玲玲, 张利伟, 蔡红新 等. 含负折射率介质的新型微腔器件光学性能研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1800~1803
- 9 Wang Zhenyong, Zhou Jun, Zhang Lingfen *et al.*. Field distribution of guided modes and surface guided modes in rectangular waveguides with left-handed materials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1558~1564
- 王振永, 周 骏, 张玲芬 等. 左手介质矩形波导导模和表面模的场分布[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1558~1564
- 10 Liang Huafeng, Lai Jianjun, Peng Zhongliang *et al.*. One-dimensional photonic crystals narrow band infrared emission light source for gas sensing[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, **28**(6): 414~417
- 梁华锋, 赖建军, 彭中良 等. 用于气体传感的一维光子晶体窄带红外发射光源[J]. *红外与毫米波学报*, 2009, **28**(6): 414~417
- 11 P. Nagpal, S. E. Han, A. Stein. Efficient low-temperature thermophotovoltaic emitters from metallic photonic crystals [J]. *Nano. Lett.*, 2008, **8**(10): 3238~3243
- 12 E. D. Palik. Handbook of Optical Constants of Solids[M]. New York: Academic Press, 1985
- 13 W. H. P. Pernice, F. P. Payne, D. F. G. Gallagher. An FDTD method for the simulation of dispersive metallic structures[J]. *Opt. Quantum Electron.*, 2006, **38**: 843~856
- 14 M. Diem, T. Koschny, C. M. Soukoulis. Wide-angle perfect absorber/thermal emitter in the terahertz regime[J]. *Phys. Rev. B*, 2009, **79**(3): 033101
- 15 I. Celanovic, D. Perreault, J. Kassakian. Resonant-cavity enhanced thermal emission[J]. *Phys. Rev. B*, 2005, **72**(7): 075127