

太赫兹波段金属光子晶体光纤增强拉曼散射现象的研究

邢德胜

(集宁师范学院 计算机系, 内蒙古 集宁 012000)

摘要: 深入探究了金属光子晶体光纤的表面增强拉曼散射现象, 建立了时域有限差分法的平板结构的模型, 利用观察到的超强透射现象得到了发生拉曼散射的理论依据。金属光子晶体在太赫兹波照射下的表面电磁场增强效果的实验中得到: 入射波能量越大, 更易激发产生金属光子晶体的表面等离子体共振, 可以使金属表面的增强效果得到较大增强; 拉曼散射效果在太赫兹波段内十分明显, 吸收光谱效果和荧光效应也相对较小, 能够显著提高灵敏度和分辨率。

关键词: 金属光子晶体光纤; 表面增强拉曼散射; 超强透射; 太赫兹波段; 灵敏度

中图分类号: O657.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0519-04

Research of metallic photonic crystal fiber Raman scattering in the THz wavelength

Xing Desheng

(Department of Computer, Jining Normal College, Jining 012000, China)

Abstract: To further explore enhanced Raman scattering of surface metallic photonic crystal fiber, a model in FDTD of flat structure was built, using observed phenomenon of super-transmissive Raman scattering theory. In the photonic crystal surface of metal terahertz electromagnetic experiments, it is obtained that the greater energy of incident wave, excitation of surface plasmon resonance is more, surface metal can be achieved in the reinforcing effect which is greatly enhanced; Raman scattering effect is obvious by terahertz band, and the effect of the absorption spectrum and fluorescence effects are relatively small, which can significantly improve the sensitivity and resolution.

Key words: metallic photonic crystal fiber; surface-enhanced Raman scattering; super transmission; THz; sensitivity

收稿日期: 2014-06-14; 修订日期: 2014-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(11264028)

作者简介: 邢德胜(1971-), 男, 副教授, 硕士, 主要研究方向为凝聚态理论。Email: xingdesheng1950@163.com

0 引言

20 世纪 80 年代,人们成功的研制了低损耗光纤,自此,光纤传感技术一直受到广泛关注,另一个比较重要的是光纤通信技术,这两个是当前光纤技术的重要研究方向。传统光纤传感器中的优点很多,但是其存在的缺点也是当前学者所面临的重点难题,如耦合损耗较大、温度交叉敏感以及系统稳定不足等等。现在在制作微结构光纤传感器时选择了光子晶体光纤,它不仅继承了传统传感器的全部优点,也对其存在的缺点进行了有效的解决^[1]。该种结构的传感器除了具有无穷单模及灵活方便的特性之外,还具有许多光子晶体特有的优点:无需很大的待测样品就能够测得十分精准的结果^[2];能够对测量过程中的温度交叉进行很好地消除;还可以通过采用有效地手段使其变成干涉仪等等^[3]。这一系列的特性使其能够广泛的应用于物理、化学、生物、环境、军事以及工业等各个领域。虽然光子晶体光纤的制作工艺已经十分成熟,但是尚未出现对影响传感性能的一系列参数的研究^[4]。光子晶体光纤的基本概念在 1992 年首次被提出,通过引入不同的空气孔来实现线缺陷的引进,从而破坏光子晶体包层的周期结构,这就是光子晶体光纤^[5]。1996 年,研究人员制作了第一根折射率引导型的光子晶体光纤,激发了国内外学者的研究兴趣。1998 年, J C Knight 等人又制作出了带隙型的光子晶体光纤,该种光纤的纤芯是在蜂窝型的包层中心新引入的空气孔。随着表面增强拉曼散射(SERS)的日益成熟,研究人员尝试将其应用于光纤传感器,从而研制出基于表面增强拉曼散射(SERS)的光纤传感器,其优点远远多于传统传感器^[6-7]。SERS 增强机制就是以 SPR 理论为主的物理电磁增强机制和以电荷转移原理为主的化学增强机制的共同作用,而物理机制则在该效应中起主要作用,它提供的增强因子能够达到 10^{10} ~ 10^{14} 之高^[8]。基于上述发展背景,对金属光子晶体光纤的表面增强拉曼散射现象进行了详细的探究,建立了时域有限差分法的平板结构的模型,得到光子晶体光纤的拉曼散射效应在太赫兹波段内十分明显,能够显著提高灵敏度和分辨率。

1 金属光子晶体平板的超强透射现象

1.1 建模设计

在建模过程中选择厚度为 320 nm 金属金作为基底,在基底金属板上设计长宽为 $675 \text{ nm} \times 150 \text{ nm}$,晶格常数为 750 nm 的空气孔阵列的金属光子晶体结构。在参数设计中,单位细分度(Length Unit)设定为 5 nm,依据稳定性条件 (Time Unit) $<$ Length Unit/($C \times 2$)能够得到时间步长小于 $8.3333 \times 10^{-18} \text{ s}$,这样得到,Z 轴方向匹配层的层数设计为 32,介电常数为 1。实验过程中,所选光源的波长 $\lambda = 1.51 \mu\text{m}$,对应频率为 $1.9868 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。

1.2 特性结果

得到结果如图 1 所示。

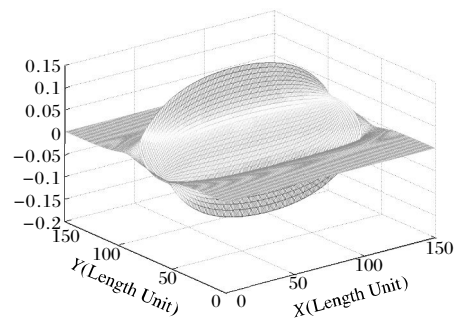
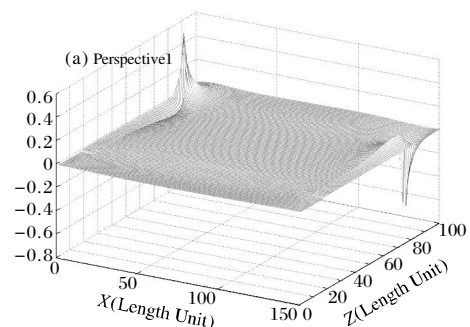


图 1 金属光子晶体平板的投射现象

Fig.1 Metallic photonic crystal slab projection phenomenon

转换不同的电磁面继续分析得到如图 2 所示结果。

由以上特性可知设计的金属光子晶体平板结构具有明显的超强透射现象,发生了等离子共振现象,这为这一结构的太赫兹波段 SERS 增强的实现提供了理论依据。



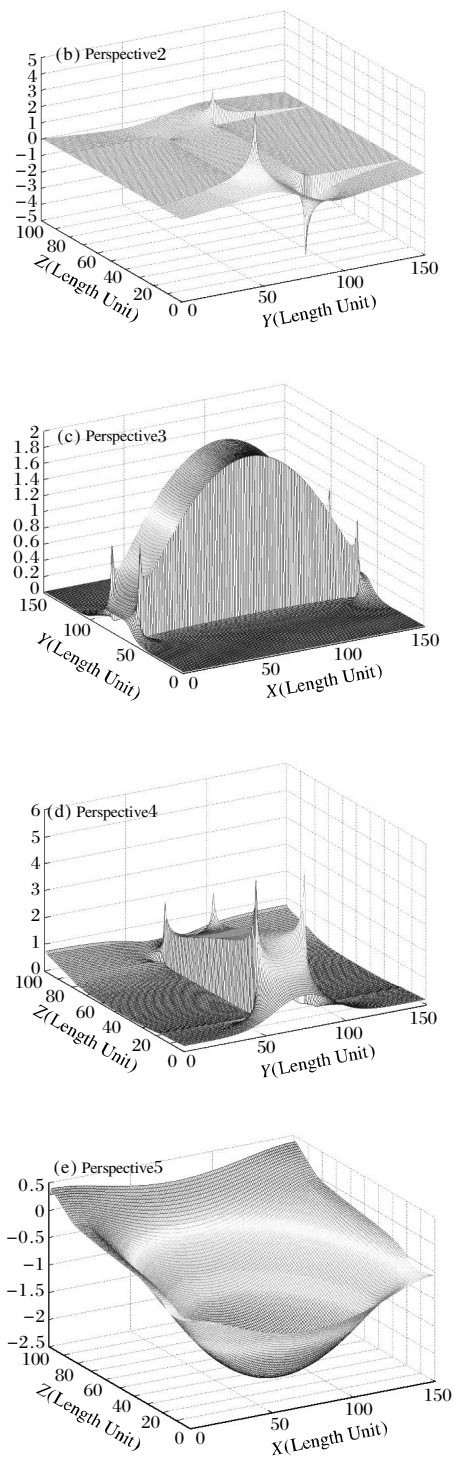


图 2 不同视角的透射结果

Fig.2 Transmission results from different perspectives

2 金属光子晶体平板结构的太赫兹波段 SERS 增强现象

这里所建立的模型选择 FDTD 方法进行数值计

算及分析, 这是由于经典电磁理论并不适合进行复杂金属纳米的近场增强情况的求解, 所以对于金属光子晶体在太赫兹波照射下的表面电磁场增强效果选用了 FDTD 方法进行了求解。

2.1 FDTD 计算设计

接下来对上述金属光子晶体平板结构进行进一步 MATLAB 仿真实验。图 3 给出了计算区域的结构分布, 从外到内分别为: 理想导体边界、PML 区域、金属光子晶体平板结构色散区域和最里层的主计算区域。

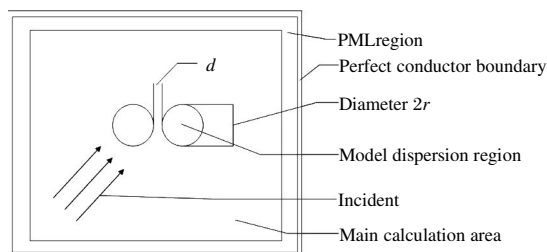


图 3 计算区域结构分布图

Fig.3 Calculating regional structure maps

对图 3 中的四个区域进行参数设置, 完成之后在对其进行 FDTD 数值计算, 然后再用 MATLAB 语言进行编程。

由于色散介质中的电磁波传输情况特殊, 所以当入射波是太赫兹波的情况下, 进行 FDTD 数值计算过程中应该对金属光子晶体是色散介质进行考虑。表 1 给出了色散介质中金属光子晶体的部分参数设置。

表 1 金属光子晶体电场增强计算参数表

Tab.1 Calculated parameter table of metallic photonic crystal electric field enhancement

Parameter	Value	Parameter	Value
Material	Au	σ conductivity	4.10×10^7 S/m
Plasma frequency	1.37225×10^{16} rad/s	Mesh size	$0.5 \text{ nm} \times 0.5 \text{ nm}$
Collision frequency	0.40527×10^{14} Hz	Excitation wavelength	1–10 THz
Relative permittivity	9.012	Electric field strength	1 V/m
Diameter	20 nm	Polarization direction of the electric field	Wave vector parallel to the center wire
Surrounding medium	vacuum		

在整个计算区域中,需要将主计算区域设定为真空环境,表 1 中已经给出了金属光子晶体色散区域的全部参数。与此同时,将空间网格设定为 200×200 , 空间步长设定为 $dx=0.5 \text{ nm}$, 时间步长设定为 $dt=dx/(2*cc)$, 其中 cc 是光速, 设定了 8 层完美匹配层。进行 FDTD 的计算过程中, 选择了 TM 波作为入射波使用, 其入射波矢平行于 x 轴。

2.2 结果分析

图 4 所绘制的图线是金属光子晶体随入射频率和间距的变化曲线, 入射波频率和间距的不同会导致其电磁增强因子的变化。

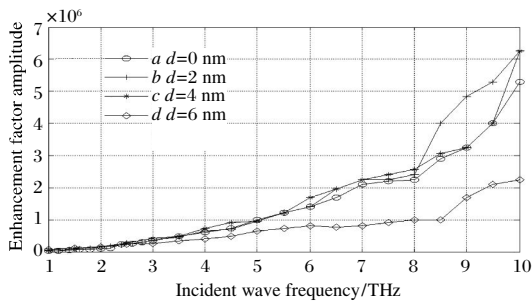


图 4 电磁增强因子随入射频率和间距的变化曲线

Fig.4 Enhancement factor with the incident frequency electromagnetic and particle spacing curve

从图 4 中能够看出: 入射波频率范围处于 1 THz (5×10^4) 和 10 THz (6.2×10^6) 之间时, 其增强效果呈现出逐渐增加的趋势, 这可以充分说明入射波能量越大, 就越容易激发产生金属光子晶体的表面等离子体共振, 使得金属表面的增强效果得到较大的增强。上图中的四条曲线体现了金属光子晶体间距的区别导致其增强效果的不同, 在 a 、 b 、 c 三条曲线中, 电磁增强效果最小的那条曲线是金属光子晶体间距为 0 的情况。从总体上看, 增强作用随着其间距的不断增大而不断加强, 同时也促进了近场的电磁增强因子。然而曲线 d 的增强效果远远小于另外三条曲线, 这又说明间距增大到直径的数量级之后, 很大程度上减弱了其电磁增强效果, 这是由于间的相互作用使得模型发生了转变, 成为了单模型。四条曲线充分证明了间具有的相互作用, 也可以说在一定线程内, “热点”效应促进了电磁增强的效果, 宏观上则是证明了粗糙度对光谱增强效果的影响。

虽然最大的电磁增强因子在太赫兹波段值有 4~6 个量级, 相对来说较小。然而, 拉曼散射效果在

太赫兹波段内十分明显, 同时吸收光谱效果和荧光效应也相对较小, 这样会导致一些检测过程中的灵敏度和分辨率出现异常增高, 这种优势是十分有必要的。所以这种增强效果在实际应用中具有相当高的利用价值。

3 结论

文中通过建立的 FDTD 模型, 为拉曼散射的数值计算提供了理论依据。设计实验得出: 入射波能量越大, 可以更高效率的产生金属光子晶体的表面等离子体共振; 结构的拉曼散射效果在太赫兹波段内十分明显, 能够显著提高灵敏度和分辨率。上述的研究结果对于光子晶体光纤传感的改进应用具有一定理论和实际意义。

参考文献:

- [1] Travers J C, Chang W, Nold J, et al. Ultrafast nonlinear optics in gas-filled hollow-core photonic crystal fibers [J]. *JOSA B*, 2011, 28(12): A11-A26.
- [2] Hooper L E, Mosley P J, Muir A C, et al. Coherent supercontinuum generation in photonic crystal fiber with all-normal group velocity dispersion [J]. *Optics Express*, 2011, 19(6): 4902-4907.
- [3] Cruz S M A, Cardoso A J M. Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors by the extend Park's vector approach [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2001, 10(5): 1227-1233.
- [4] Johnson S G, Povinelli M L. Roughness losses and volume-current methods in photonic-crystal waveguides [J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2005, 81(2-3): 283-293.
- [5] Al-Jabr A. A simple FDTD algorithm for simulating EM-wave propagation in general dispersive anisotropic material [J]. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions*, 2013, 61(3): 1321-1326.
- [6] Eun Y, Bang H. Cooperative control of multiple unmanned aerial vehicles using the potential field theory [J]. *Journal of Aircraft*, 2006(6): 1805-1813.
- [7] Niu H P, Zhang Y H, Zhang X N. Active vibration control of beam using electro-magnetic constrained layer damping [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2008, 32(2): 115-124.
- [8] Niu H P, Xie S L, Zhang X N. Hybrid vibration control of a circular cylindrical shell using electromagnetic constrained layer damping treatment [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2009, 15(9): 1397-1422.