

左手材料上表面等离子体激元的研究*

Study of Surface Plasmon Polaritons on Left-Handed Material

段国华,许江勇,陈皓天,高英俊**

DUAN Guo-hua, XU Jiang-yong, CHEN Hao-tian, GAO Ying-jun

(广西大学物理科学与工程技术学院,广西南宁 530004)

(College of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China)

摘要:针对存在于半无限左手材料表面上的表面等离子体激元,研究其 p 型极化时的色散关系;通过棱镜耦合得到衰减全反射谱,论证实验上观察表面等离子体激元的可能性;分析各种参数对实验观察 p 极化表面等离子体激元的影响,发现不同的参数对表面等离子体激元与隐失波的共振频率及共振强度均有着不同影响。

关键词:表面等离子体激元 衰减全反射 左手材料 隐失波

中图分类号:O534.1 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2012)01-0053-04

Abstract: The dispersion relations of surface plasmon polaritons which are p-polarized and exist at the interface between a semi-infinite left-handed medium and dielectric are studied. Using the prism coupling mechanism, we obtain the attenuated total reflection spectra, which demonstrates the possibility of SPPs in experimental observation; Then, we focus on the analysis of various parameters on experimental observation of p-polarization SPPs. It is found that different parameter has different effect on resonance frequency and strength between SPPs and evanescent wave.

Key words: surface plasmon polaritons (SPPs), attenuated total reflection (ATR), left-handed material, evanescent wave

左手材料的概念最先是由 Veselago^[1] 提出。因平面电磁波在其中传播时, $E \times H$ 的方向与波矢的方向相反,使它呈现出奇异的电磁特性如:负折射率效应^[1,2]、逆多普勒效应^[3]、完美透镜^[4]等。近年来,利用周期性排列的金属丝^[5]和开口环形谐振器^[6],人们实现了对左手材料的制备^[7],其有效介电常数和有效磁导率在微波频率范围内均为负值。左手材料已经在电磁学、材料学、光学等多个领域内引起了研究者的极大兴趣。

表面等离子体激元(SPPs)^[8,9]是自由电子和光波电磁场当频率相同时因共振而形成的一种集体振

荡态。在普通介质与半无限左手材料的表面上会存在 p、s 两种极化的 SPPs^[8]。关于 s 极化时各种参数对实验观察 SPPs 的影响已在文献[10]中做了报道。而对于 p 极化的情况还未有详细的报道。本文通过衰减全反射技术(ATR)研究讨论 p 极化时实验观察 SPPs 的可行性以及各参数对 ATR 反射谱的影响。

1 研究方法

1.1 结构模型

本文研究 p 极化时左手材料单一界面上的 SPPs,其结构模型如图 1 所示,其中 $z > 0$ 的区域为普通介质,这里取为空气($\epsilon_1 = 1, \mu_1 = 1$); $z < 0$ 的区域为左手材料。左手材料的介电常数^[5]和磁导率^[6]形式如下:

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}, \quad (1)$$

收稿日期:2011-10-31

作者简介:段国华(1986-),男,硕士研究生,主要从事光晶体研究。

* 国家自然科学基金项目(51161003,50661001,50061001)和广西科学基金项目(0832029,0991026,0639004)资助。

** 通讯作者:高英俊,男,教授,主要从事材料微结构设计的研究。

Email:gaoyj@gxu.edu.cn.

$$\mu(\omega) = 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\Gamma\omega}, \quad (2)$$

其中: ω_p 为在 GHz 范围内的等离子体频率, ω_0 为在 GHz 范围内的共振频率. γ, Γ 为阻尼项, F 为一个与几何参数有关的面积比值.

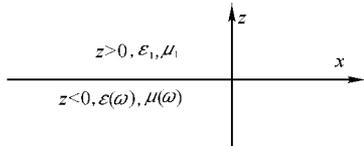


图 1 半无限左手材料上单一界面几何结构

Fig. 1 Geometric structure of single interface on semi-infinite left-handed medium

1.2 色散关系

p 极化时, 在不同区域内, 磁场的形式分别为:

$$z > 0, H^{(1)} = \hat{y}Ae^{k_1x}e^{ihz}, \quad (3)$$

$$z < 0, H^{(2)} = \hat{y}Be^{-k_2x}e^{ihz}, \quad (4)$$

其中, $k_1 = (h^2 - k_0^2\epsilon_1\mu_1)^{1/2}$, $k_2 = (h^2 - k_0^2\epsilon_2\mu_2)^{1/2}$; $k_0^2 = \omega/c$; h 为波矢在界面方向上的分量. \hat{y} 是 y 方向上的单位向量.

由电磁场连续性边界条件, 可得 SPPs 的色散关系:

$$\frac{k_1}{\epsilon_1} + \frac{k_2}{\epsilon(\omega)} = 0. \quad (5)$$

1.3 衰减全反射技术

衰减全反射(ATR)^[8,10]技术应用广泛, 例如: 金属中等离子体激元的观察^[11,12], 成分含量测定^[13]等. 图 2 为 ART 的几何示意图, 其中平面电磁波以角度 θ 从棱镜(ϵ_m, μ_m)中进行入射. 在棱镜和左手材料之间有一个间隙层, 这里取为空气(ϵ_1, μ_1 , 厚度为 d). 当入射角度 θ 满足 $\sqrt{\epsilon_m} \sin \theta > \sqrt{\epsilon_1}$ 时, 电磁波在棱镜中会发生全反射现象, 以隐失波^[14]的形式在间隙层进行透射, 并在左手材料表面与 SPPs 发生耦合. 关于 ATR 反射谱的计算模拟, 这里运用传输矩阵法^[15]. 它的表达简洁、计算方便, 是研究电磁波在多层介质和一维光子晶体中传播时常用的计算方法之一.

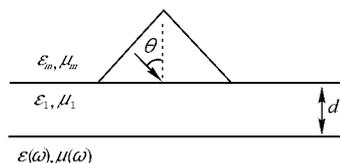


图 2 ATR 实验几何示意

Fig. 2 Geometry of ATR experiment

2 结果与分析

2.1 色散曲线

利用色散关系式(5), 通过以下参数 $\frac{\omega_p}{2\pi} =$

$$10\text{GHz}, \frac{\omega_0}{2\pi} = 4\text{GHz}, \frac{\omega_0}{2\pi} = 4\text{GHz}, F = 0.56, \gamma = 0,$$

$\Gamma = 0$, 可得色散曲线. 其与文献[8]图 2 中的曲线分枝(a)和(c)一致. 这为下方中验证实验观察 SPPs 的可行性提供了基础.

2.2 角度对 ATR 的影响

由图 3 可知:(1)在入射角度一定时, 有 2 个明显的反射吸收峰分别出现在高频区和低频区, 这是因为在棱镜上发生衰减全反射现象, 在沿界面方面上隐失波与 SPPs 的波矢、频率均相同, 二者发生共振耦合, 反射率出现极小值。(2)随着入射角度的增加, 在高、低频区的反射吸收峰的位置明显向高频移动且峰值的大小也发生了变化。(3)入射角度为 45° 时, 对应的 ATR 谱与文献[8]图 4 结果一致. 这从侧面上说明传输矩阵法计算 ATR 谱的正确性。(4)将入射角度分别为 $40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$ 时, SPPs 出现的频率位置在色散曲线上进行标注, 结果发现与文献[8]图 2(a)和(c)分枝上的叉号一致, 它们与色散曲线符合得非常理想, 这从数值计算上验证了实验观察 SPPs 的可行性.

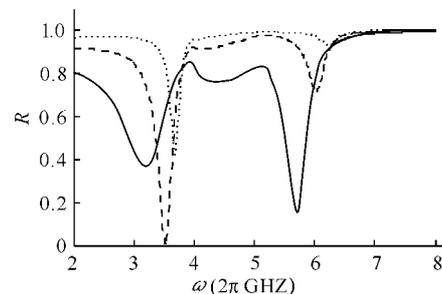


图 3 入射角度对 ATR 光谱的影响

Fig. 3 Influence of incident angle on ATR spectra

—: 40° , ---: 45° ,: 50° ; $\gamma = 0.03\omega_p, \Gamma = 0.03\omega_0, d = 3\text{cm}$.

2.3 间隙层厚度对 ATR 的影响

由图 4(a)和(b)可知:(1)当入射角度一定时, 随着间隙层厚度的增加, ATR 反射谱中 SPPs 与隐失波的共振强度会出现明显的变化, 而吸收峰出现的位置变化不太明显, 也就是说, 在入射角度一定时, 可对间隙层厚度进行调节使共振强度达到最小以便实现对 SPPs 的更好观测。(2)对于出现在高频区的吸收峰而言, 随着间隙层厚度的增加 SPPs 与隐失波的共振强度呈现出依次减弱的规律变化。(3)对比图 4(a)和(b), 当间隙层厚度一定时可更为直观的观察入射角度对 ATR 反射谱影响.

2.4 阻尼项对 ATR 的影响

已知阻尼项是左手材料各参数的组成部分, 对 SPPs 的实验观察而言, 理论上研究阻尼项对 ATR

反射谱的影响是非常必要的。如图 5 所示,在入射角度为 45° , 间隙介质厚度为 0.03m 时,对三组阻尼项下的 ATR 反射谱进行对比发现,阻尼项并没有影响到反射吸收峰所处的频率位置,而对 SPPs 与隐失波二者间共振强度有所影响,并且在高频区二者间共振强度变化更为显著。

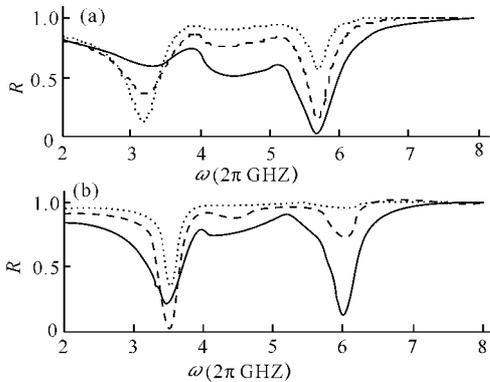


图 4 间隙层的厚度对 ATR 反射谱的影响

Fig. 4 Effect of layer thickness on ATR reflection spectrum

(a) $\theta = 40^\circ$, —: $d = 0.02\text{m}$, ---: $d = 0.03\text{m}$,: $d = 0.04\text{m}$; (b) $\theta = 45^\circ$, —: $d = 0.02\text{m}$, ---: $d = 0.03\text{m}$,: $d = 0.04\text{m}$.

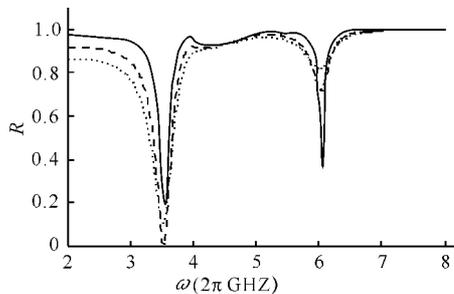


图 5 阻尼项对 ATR 的影响

Fig. 5 Effect of damping on ATR

—: $\gamma = 0.01\omega_p, \Gamma = 0.01\omega_0$, ---: $\gamma = 0.03\omega_p, \Gamma = 0.03\omega_0$,: $\gamma = 0.05\omega_p, \Gamma = 0.05\omega_0$; $\theta = 45^\circ, d = 0.03\text{m}$.

2.5 参数 F 对 ATR 的影响

由图 6 可知,在入射角度、阻尼参数和间隙层厚度确定的情况下,可看出参数 F 的取值对 ATR 有明显的影响。首先是在高、低频区内的两个吸收峰其位置会随着 F 值的增大而分别向更低、更高的频率移动。其次,随着 F 值的增大在高频区的吸收峰对应的共振强度呈显著减小趋势,而低频区的吸收峰则与之相反。这也表明,在对 p 极化时半无限左手材料上 SPPs 实验观察时,选取参数 F 值较小的左手材料较为适合。

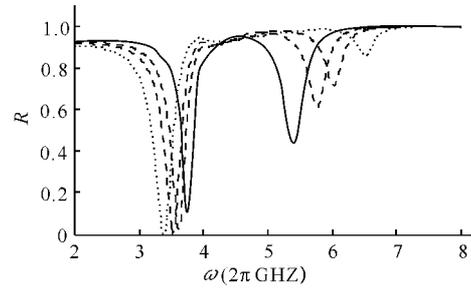


图 6 F 对 ATR 的影响

Fig. 6 Influence of F on ATR

—: $F = 0.2$, ---: $F = 0.4$, -·-·-: $F = 0.56$,: $F = 0.9$; $\theta = 45^\circ, \gamma = 0.03\omega_p, \Gamma = 0.03\omega_0, d = 0.03\text{m}$.

3 结论

本文研究各种参数对 ATR 谱的影响时发现: (1) 间隙层的厚度和左手材料参数中的阻尼项对隐失波与 SPPs 的共振强度的影响比较明显,而对 SPPs 出现的频率位置影响不明显。(2) 入射角度及左手材料的 F 值,不仅对共振强度有明显影响而且对 SPPs 出现的频率有明显影响。这些结论都将为实验阶段对 SPPs 的观测提供一定的理论指导。

参考文献:

- [1] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4): 509.
- [2] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. Science, 2001, 292: 77-79.
- [3] Chen J, Wang Y, Jia B, et al. Observation of the inverse Doppler effect in negative-index materials at optical frequencies [J]. Nature Photonics, 2011, 5: 239-245.
- [4] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. Physical Review Letters, 2000, 85(18): 3966-3969.
- [5] J B P E A. Low frequency plasmons in thin-wire structures [J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 1998, 10(22): 4785.
- [6] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J]. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [7] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. Phys Rev Lett, 2000, 84(18): 4184-4187.
- [8] Ruppin R. Surface polaritons of a left-handed medium [J]. Physics Letters A, 2000, 277(1): 61-64.
- [9] Maier S A. Plasmonics—fundamentals and applications [G]. New York: Springer, 2007.
- [10] Yan B R, Lu J H, Kong L H, et al. Numerical studies of

surface and bulk modes in attenuated total reflection spectra[J]. Chinese Physics B, 2011, 20(1): 15101.

- [11] Otto A. Excitation by light of ω_+ and ω_- -surface plasma waves in thin metal layers [J]. Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei, 1969, 219(3): 227-233.
- [12] Otto A. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection[J]. Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei, 1968, 216(4): 398-410.

- [13] 朱红祥, 柴欣生, 王双飞, 等. 衰减全反射-紫外/可见光谱技术应用[J]. 化学进展, 2007(Z1): 414-419.
- [14] 梁铨廷. 物理光学[G]. 第3版. 北京: 电子工业出版社, 2008: 401.
- [15] 王玉玲. 一维光子晶体的带隙特性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2007.

(责任编辑: 邓大玉)

(上接第 52 页 Continue from page 52)

参考文献:

- [1] 赵品, 谢辅洲, 孙振国. 材料科学基础教程[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [2] 胡赓祥, 蔡珣, 戎咏华. 材料科学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2006.
- [3] Hu S Y, Chen L Q. Spinodal decomposition in a film with periodically distributed interfacial dislocations[J]. Acta Materialia, 2004, 52: 3069-3074.
- [4] Leonard F, Desai R C. Spinodal decomposition and dislocation lines in thin films and bulk materials[J]. Physical Review B, 1998, 58(13): 8277-8288.
- [5] Seol D J, Hu S Y, Li Y L. Computer simulation of spinodal decomposition in constrained films[J]. Acta Materialia, 2003, 51: 5173-5185.
- [6] Hu S Y, Chen L Q. Diffuse-interface modeling of composition evolution in the presence of structural defects [J]. Computational Materials Science, 2002, 23: 270-282.

- [7] 冯端. 金属物理学. 卷二: 相变[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [8] 高英俊, 张海林, 金星, 等. 相场法研究硬质颗粒钉扎的两相晶粒长大过程[J]. 金属学报, 2009, 45(10): 1190-1198.
- [9] Fan D, Chen L Q. Diffusion-controlled grain growth in two-phase solids[J]. Acta Materialia, 1997, 45: 3297-3310.
- [10] Oono Y, Puri S. Computationally efficient modeling of ordering of quenched phases[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(8): 836-839.
- [11] 田军龙, 高英俊, 罗志荣, 等. 陶瓷颗粒烧结致密化过程中微气孔的扩散与演化[J]. 广西科学, 2010, 17(4): 332-336.
- [12] Caginalp Gunduz, Fife Paul. Phase-field methods for interfacial boundaries [J]. Physical Review B, 1986, 33(11): 7792-7794.

(责任编辑: 邓大玉)