

文章编号:1004-4213(2010)12-2234-7

五层对称人工超常材料结构的表面等离子体激元*

张惠芳,赵玉静,陶峰,任海红,王燕,白丽华,戴晔,阎晓娜

(上海大学 理学院 物理系 上海 200444)

摘要:研究了由左手材料、负介电材料、常规介电材料所构成的几种五层对称结构表面等离子体激元的特性. 讨论了表面等离子体激元的存在区域、色散关系、以及 p 和 s 偏振的表面色散曲线枝, 发现表面模的性质强烈依赖于系统的组成材料及其组合方式; 层数越多, 表面色散曲线枝也越多, 处在频率通带的表面极化模态也越多; 在五层结构中有 p 和 s 两种偏振的表面等离子体激元, 在共振时, 可导致 p 波和 s 波强透射. 此外, 通过使用衰减全反射方法, 探讨了激发并观察表面等离子体激元的可能性.

关键词:人工超常材料; 表面等离子体激元; ATR 方法

中图分类号: O441.4

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103912.2234

0 引言

左手材料(Left-Handed Medium, LHM), 即人工超常材料(meta-materials), 其介电常量和磁导率都是负值, 并且在其中传播的平面电磁波的电场矢量、磁场矢量以及波矢量形成左手关系. 其概念由 Veselago 于 1968 年提出, 它具有反常多普勒(Doppler)频移、切伦可夫(Cherenkov)辐射的逆转以及负折射现象等^[1]. 自从 Smith 教授等人根据 Pendry 的理论, 把由细金属线的三维周期结构组成的负介电常量材料^[2-3], 以及周期性排列的非磁性的开口环型谐振器构成的负磁导率材料^[4]组合在一起实现了左手材料^[5]以后, 越来越多的科学家开始关注 LHM 的物理性质及其潜在的应用价值. 目前, 左手材料的设计已经从微波波段发展到光波波段^[6], 材料组成也从金属发展到非金属, 如半导体左手材料^[7]和掺杂左手材料^[8]等, 从而逐步朝着实用化方向发展. 人工超常材料可用于设计新型光电器件^[9-10]、天线和波导, 并在无线通信^[11]、光通信和医疗诊断系统等方面^[12-13]有潜在应用价值.

表面等离子体激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)是沿两个介质的分界面传播的电磁波, 并且在偏离分界面时, 其振幅随距离的增加按指数衰减^[14]. 早在 1909 年 Sommerfeld 就预言了表面等离子体激元的存在^[15], 在地球表面传播的地波就是一例, 其本质上是由电子电荷的集体激发所导

致的^[16]. SPPs 有不少潜在的应用, 如数据存储, 光学振荡, 显微镜以及生物光学等等. 近年来, 各种各样不同界面的表面等离子体激元引起了许多科学家的兴趣, 特别是人工超常材料界面上的 SPPs, 更会有许多潜在的应用价值和意想不到的性质. 比如, 可用来设计新型滤波器等光电器件^[17-18]等.

本文研究由常规介电材料(Dielectric)、左手材料(LHM)、及负介电常量材料(Negative Dielectric Permittivity Material, NDPM)组成的五层对称结构的 SPPs 特性. 讨论了“ABABA”型和“ABCBA”型这两种类型的五层对称结构. 发现不同的结构组合方式其 SPPs 的特性非常不同, 即其存在区域、表面色散曲线枝的数目及频率位置、衰减全反射(Attenuated Total Reflection, ATR)光谱等非常依赖系统的组成材料以及其先后顺序. 由于是多层对称结构, 所以可观察到更多的 p 和 s 偏振的表面极化模态. 并且这些对称的五层结构中有 p 和 s 两种偏振 SPPs, 入射光和 SPPs 耦合, 在共振时, 可导致 p 波和 s 波强透射. 最后, 必须特别指出, 这个研究工作所涉及的所有介质都假定为均匀和各向同性的介质, 即所有研究结论都是建立在有效的介质近似基础上.

1 五层对称人工超常材料系统表面等离子体激元的色散关系

图 1 为五层对称界面系统, 介质 1(ϵ_1, μ_1) 和介质 5(ϵ_5, μ_5) 分别在 $x < -d$ 和 $x > d + d_0$ 的半无限空间内, 介质 2(ϵ_2, μ_2)、介质 3(ϵ_3, μ_3) 和介质 4(ϵ_4, μ_4) 分别在 $-d < x < 0$ 、 $0 < x < d_0$ 和 $d_0 < x < d + d_0$ 的空间内.

* 国家自然科学基金(10974132, 60908006, 60908007)资助
Tel: 021-66132520 Email: hfzhang1967@staff.shu.edu.cn
收稿日期: 2010-04-12 修回日期: 2010-08-23

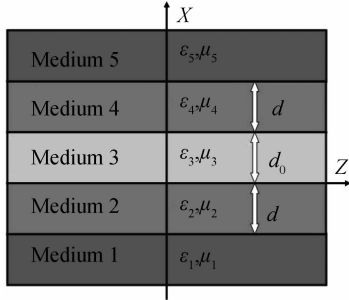


图1 五层对称界面几何图及坐标系

Fig. 1 Geometry of the symmetric five-layered structures and the coordinate system.

根据介质 1、2、3、4、5 的电场和磁场表达式,在界面 $x = -d, x = 0, x = d_0$ 和 $x = d + d_0$ 应用电磁边界理论,可推导出 SPPs 的色散关系为

$$e^{2k_3 d_0} = \frac{\left(\frac{k_1 + k_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}\right)^2 \left(\frac{k_2 - k_3}{\epsilon_2 - \epsilon_3}\right)^2 e^{2k_2 d} + 2\left(\frac{k_1 + k_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}\right)}{\left(\frac{k_1 + k_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}\right)^2 \left(\frac{k_2 + k_3}{\epsilon_2 + \epsilon_3}\right)^2 e^{2k_2 d} + 2\left(\frac{k_1 + k_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}\right)} \cdot \frac{\left(\frac{k_1 - k_2}{\epsilon_1 - \epsilon_2}\right) \left(\frac{k_2 + k_3}{\epsilon_2 + \epsilon_3}\right) \left(\frac{k_2 - k_3}{\epsilon_2 - \epsilon_3}\right) + \left(\frac{k_1 - k_2}{\epsilon_1 - \epsilon_2}\right) \left(\frac{k_2 + k_3}{\epsilon_2 + \epsilon_3}\right) \left(\frac{k_2 - k_3}{\epsilon_2 - \epsilon_3}\right) + \left(\frac{k_2 - k_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}\right) \left(\frac{k_2 + k_3}{\epsilon_2 + \epsilon_3}\right)^2 e^{-2k_2 d}}{\left(\frac{k_2 - k_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}\right)^2 \left(\frac{k_2 - k_3}{\epsilon_2 - \epsilon_3}\right)^2 e^{-2k_2 d}} \quad (1)$$

式中 $k_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$ 分别是介质 1、2、3、4、5 沿 x 方向的衰减常量,其表达式为

$$k_i^2 = h^2 - \epsilon_i \mu_i (\omega/c)^2 \quad (2)$$

式中 h 为沿 z 方向的波矢分量, ϵ_i 和 $\mu_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$ 分别是介质 1、2、3、4、5 的介电常量和磁导率。

如果假定 SPPs 将以 p 偏振和 s 偏振存在,为了满足 SPPs 在 x 方向沿着界面传播,界面两边介质电磁场的振幅必须是背离界面按指数形式衰减。因此 k_i 必须是正实数,这意味着

$$h^2 > \max [\epsilon_1 \mu_1 (\omega/c)^2, \epsilon_2 \mu_2 (\omega/c)^2, \epsilon_3 \mu_3 (\omega/c)^2, \epsilon_4 \mu_4 (\omega/c)^2, \epsilon_5 \mu_5 (\omega/c)^2] \quad (3)$$

同理,关于 s 偏振 (TE 偏振) 情况,根据在界面 $x = -d, x = 0, x = d_0$ 和 $x = d + d_0$ 的电磁边界理论,可推出 SPPs 的色散关系为

$$e^{2k_3 d_0} = \frac{\left(\frac{k_1 + k_2}{\mu_1 + \mu_2}\right)^2 \left(\frac{k_2 - k_3}{\mu_2 - \mu_3}\right)^2 e^{2k_2 d} + 2\left(\frac{k_1 + k_2}{\mu_1 + \mu_2}\right)}{\left(\frac{k_1 + k_2}{\mu_1 + \mu_2}\right)^2 \left(\frac{k_2 + k_3}{\mu_2 + \mu_3}\right)^2 e^{2k_2 d} + 2\left(\frac{k_1 + k_2}{\mu_1 + \mu_2}\right)} \cdot \frac{\left(\frac{k_1 - k_2}{\mu_1 - \mu_2}\right) \left(\frac{k_2 + k_3}{\mu_2 + \mu_3}\right) \left(\frac{k_2 - k_3}{\mu_2 - \mu_3}\right) + \left(\frac{k_1 - k_2}{\mu_1 - \mu_2}\right) \left(\frac{k_2 + k_3}{\mu_2 + \mu_3}\right) \left(\frac{k_2 - k_3}{\mu_2 - \mu_3}\right) + \left(\frac{k_2 - k_1}{\mu_2 - \mu_1}\right) \left(\frac{k_2 + k_3}{\mu_2 + \mu_3}\right)^2 e^{-2k_2 d}}{\left(\frac{k_2 - k_1}{\mu_2 - \mu_1}\right)^2 \left(\frac{k_2 - k_3}{\mu_2 - \mu_3}\right)^2 e^{-2k_2 d}} \quad (4)$$

2 人工超常材料物理特性与频率的关系

在图 1 中,介质分别由 Dielectric、LHM 和 NDPM 这三种材料自由组合而成。

LHM 是由周期性排列细金属线和劈裂环谐振腔组合而成,其相对的介电常量^[2-3,5]和相对的磁导率^[4-5]为

$$\epsilon_{\text{LHM}}(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)} \quad (5)$$

$$\mu_{\text{LHM}}(\omega) = 1 - \frac{F_1 \omega^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\Gamma_1 \omega} \quad (6)$$

式中 ω_p 和 ω_0 是电等离子体频率和磁共振频率, γ 和 Γ_1 分别为电和磁的阻尼系数, F_1 是劈裂环内环面积与晶格面积的比值。

对于细金属线阵列组成的 NDPM 来说,其介电常量为^[2-3,5]

$$\epsilon_{\text{NDPM}}(\omega) = 1 - \frac{\omega_a^2}{\omega(\omega + i\gamma_a)} \quad (7)$$

式中 ω_a 和 γ_a 分别为电等离子体频率和电阻尼系数。其磁导率是 $\mu_{\text{NDPM}} = 1.0$ 。

设 Dielectric 的介电常量为 $\epsilon_D = 1.0$, 磁导率为 $\mu_D = 1.0$ 。

对于在式(5)~(7)中的参量,如未特别说明,一般采用 $\omega_p = 10.0$ GHz, $\omega_0 = 4.0$ GHz, $F_1 = 0.56$, $\omega_a = 6.0$ GHz, $h_0 d = 0.5$ (其中 $h_0 = \omega_0/c$), 角频率为除以 2π 的值,它们和实验结果非常接近^[3]。为便于描述,用 $\text{Re}[\]$ 来描述一个物理参量的实部。在讨论 SPPs 的存在区域和色散关系时,将忽略式(5)~(7)中的阻尼项。通过讨论发现, LHM 和 NDPM 的物理性质都非常依赖于频率。

对于 LHM,由式(5)和(6)可知其物理性质与频率的关系如表 1。

表 1 LHM 的物理性质与频率的关系

Table 1 The relation between physical property of LHM and frequency

$\omega > 10.0$ GHz	$\epsilon_{\text{LHM}} > 0,$ $\mu_{\text{LHM}} > 0$	Dielectric
6.0 GHz $< \omega < 10.0$ GHz	$\epsilon_{\text{LHM}} < 0,$ $\mu_{\text{LHM}} > 0$	Metal
4.0 GHz $< \omega < 6.0$ GHz	$\epsilon_{\text{LHM}} < 0,$ $\mu_{\text{LHM}} < 0$	LHM
$\omega < 4.0$ GHz	$\epsilon_{\text{LHM}} < 0,$ $\mu_{\text{LHM}} > 0$	Metal

对于 NDPM,由式(7)可知它的物理性质与频率的关系如表 2。

表 2 NDPM 的物理性质与频率的关系

Table 2 The relation between physical property of NDPM and frequency

$\omega > 6.0 \text{ GHz}$	$\epsilon_{\text{NDPM}} > 0,$ $\mu_{\text{NDPM}} > 0$	Dielectric
$\omega < 6.0 \text{ GHz}$	$\epsilon_{\text{NDPM}} < 0,$ $\mu_{\text{NDPM}} > 0$	Metal

3 探测与观察表面等离子体激元的 ATR 光谱

由于体波和 SPPs 的波矢不匹配,无法直接用平面电磁波来激发 SPPs. 现在广泛使用一种基于 ATR 机制上的棱镜耦合方法,棱镜的折射率足够高是必需的条件. 对于五层对称界面系统,如图 2,棱镜放置于介质 1 的下方,其介电常量、磁导率分别为 $\epsilon_m=3.0, \mu_m=1.0$,从而组成一个六层介质结构. 其中介质 0 和介质 5 被认为是半无限介质,而介质 1、2、3、4 的厚度分别为 a, d, d_0, d . p 偏振情况下,整个六层结构的复振幅反射率为

$$R_5 = \frac{r_{01} + R_4 e^{-2k_1 a}}{1 + r_{01} R_4 e^{-2k_1 a}} \quad (8)$$

式中 R_4 为四层结构的复振幅反射率:

$$R_4 = \frac{r_{12} + R_3 e^{-2k_2 d_0}}{1 + r_{12} R_3 e^{-2k_2 d_0}} \quad (9)$$

$$R_3 = \frac{r_{23} + R_2 e^{-2k_3 d}}{1 + r_{23} R_2 e^{-2k_3 d}} \quad (10)$$

$$R_2 = \frac{r_{34} + r_{45} e^{-2k_2 d_0}}{1 + r_{34} R_{45} e^{-2k_2 d_0}} \quad (11)$$

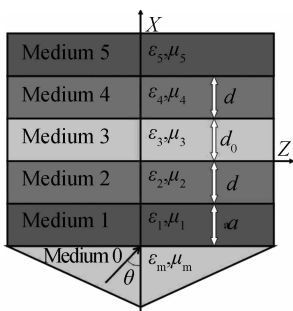


图 2 激发和探测 SPPs 的结构图(ATR 方法)

Fig. 2 Configuration for exciting and observing SPPs

在 $j-k$ 界面,若波从介质 j 射入介质 k ,则其菲涅耳系数的表达式为

$$r_{jk} = \frac{\epsilon_k k_j - \epsilon_j k_k}{\epsilon_k k_j + \epsilon_j k_k} \quad (12)$$

式中, k_j 是在介质 j 中 x 方向的衰减常量. 等式(8)显示当它的分母为零时,其解是共振的,并对应于一个 SPP 模式. 对于 s 偏振情况,倘若在上面相关的表达式中用 μ 和 ϵ 来代替 ϵ 和 μ ,就可得到所有的表达式.

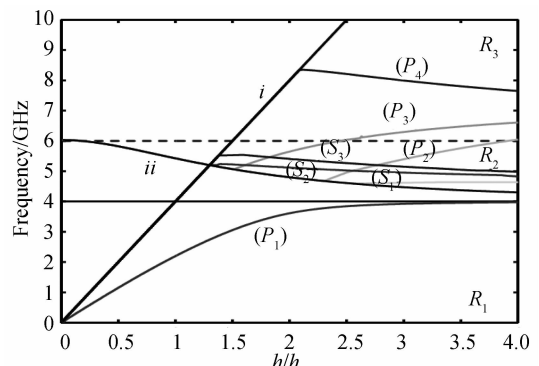
4 “ABABA”型结构五层系统的表面等离子体激元特性

所谓“ABABA”型结构,即介质 1、3 与 5 均为相同介质($\epsilon_1 = \epsilon_3 = \epsilon_5, \mu_1 = \mu_3 = \mu_5$),而介质 2 与 4 为另一种介质($\epsilon_2 = \epsilon_4 \neq \epsilon_1, \mu_2 = \mu_4 \neq \mu_1$). 本文选择两种典型的界面结构 Dielectric/LHM/Dielectric/LHM/Dielectric、LHM/Dielectric/LHM/Dielectric/LHM 进行详细地研究.

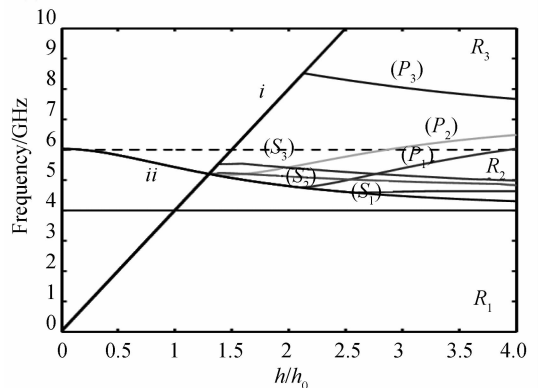
4. 1 Dielectric/LHM/Dielectric/LHM/Dielectric 结构表面等离子体激元的性质

假定介质 1、3 与 5 为 Dielectric,介质 2 与 4 为 LHM. 在平面(h, ω)上观察 SPPs 的存在区域和色散关系. 如图 3(a),直线 i 和曲线 ii 分别对应等式 $h = (\epsilon_1 \mu_1)^{1/2} (\omega/c)$ 和 $h = (\epsilon_2 \mu_2)^{1/2} (\omega/c)$. 其中 ϵ_1 和 μ_1 为 1.0, ϵ_2 和 μ_2 的值由方程(5)~(6)给出.

根据图 3(a),有三个不同的频率区域能够观察到 SPPs: 当 $\omega < 4.0 \text{ GHz}$ 时, R_1 区域由直线 i 的右侧和直线 $\omega = \omega_0$ 围成,对应于 Dielectric/Metal/Dielectric/Metal/Dielectric 界面结构; 当 $4.0 \text{ GHz} < \omega < 6.0 \text{ GHz}$ 时, R_2 区域由直线 i 、曲线 ii 和直线 $\omega = (1 - F_1)^{-1/2} \omega_0$ 三者围成,对应于 Dielectric/LHM/Dielectric /LHM/Dielectric 界面; 当



(a) The Dielectric/LHM/Dielectric/LHM/Dielectric structure



(b) The LHM/Dielectric/LHM/Dielectric/LHM structure

图 3 两个“ABABA”型结构五层系统 SPPs 的存在区域和色散曲线

Fig. 3 Existence regions and dispersion relation curves of SPPs in two “ABABA” five-layered structures

6.0 GHz $< \omega < 10.0$ GHz 时, R_3 区域由直线 i 的右侧和 $\omega = (1 - F_1)^{-1/2} \omega_0$ 的上方围成, 对应界面 Dielectric/Metal/Dielectric/Metal/Dielectric. 通过求式(1)和(4), 得到四枝 p 偏振色散曲线枝 P_1, P_2, P_3, P_4 和三枝 s 偏振色散曲线枝 S_1, S_2, S_3 , 如图 3(a). P_1 落在低频区域 R_1 中; P_2 和 P_3 一部分在区域 R_2 中, 一部分在区域 R_3 中; P_4 完全落在高频区域 R_3 中; S_1, S_2 和 S_3 均完全落在区域 R_2 中.

4.2 LHM/Dielectric/LHM/Dielectric/LHM 结构表面等离子体激元的性质

图 1 中, 设介质 1, 3 和 5 为 LHM, 介质 2 和 4 为 Dielectric. 图 3(b) 所示为其 SPPs 存在区域和色散关系曲线.

根据 SPPs 的存在条件, 在图 3(b) 中, 发现只有 R_1, R_2 和 R_3 这三个区域有可能存在 SPPs. 区域 R_1 由直线 i 的右侧和直线 $\omega = \omega_0$ 组成, 且 $\omega < 4.0$ GHz; 区域 R_2 由直线 i , 曲线 ii 和直线 $\omega = (1 - F_1)^{-1/2} \omega_0$ 组成, 且 4.0 GHz $< \omega < 6.0$ GHz; 区域 R_3 由直线 i 右侧和直线 $\omega = (1 - F_1)^{-1/2} \omega_0$ 上方组成, 且 6.0 GHz $< \omega < 10.0$ GHz. 这三个区域 R_1, R_2 和 R_3 分别对应于三种界面结构: Metal/Dielectric/Metal/Dielectric/Metal, LHM/Dielectric/LHM/Dielectric/LHM 和 Metal/Dielectric/Metal/Dielectric/Metal. 通过求解式(1)和(4), 得到 P_1, P_2, P_3 三条 p 偏振色散曲线枝以及 S_1, S_2, S_3 三条 s 偏振色散曲线枝. 其中 P_1 和 P_2 一部分落在区域 R_2 中, 一部分落在区域 R_3 ; P_3 完全落在区域 R_3 ; S_1, S_2, S_3 均完全落在区域 R_2 中.

通过分析 Dielectric/LHM/Dielectric/LHM/Dielectric 和 LHM/Dielectric/LHM/Dielectric/LHM 这两种组合的“ABABA”型界面结构 SPPs 的存在区域及色散关系, 可以发现: 在低频区域, 两者有着明显的不同, 对于界面结构 Dielectric/LHM/Dielectric/LHM/Dielectric, 观察到一条 p 偏振色散曲线枝, 而对于界面结构 LHM/Dielectric/LHM/Dielectric/LHM, 在低频区域观察不到任何 p 偏振色散曲线枝; 在中频和低频区域, 其 p 偏振色散曲线和 s 偏振色散曲线的数目完全相同, 所处的频率也仅有一些细微的偏移.

需要说明的是, 这两个五层对称系统有四个相同的 Dielectric/LHM 界面, 理论上最多应该有 12 条色散曲线枝(各层的厚度不同, 成对的色散曲线枝有可能兼并). 但由于计算软件和模拟计算的局限性, 本文中所得到的色散曲线枝不全.

4.3 探测与观察“ABABA”型结构表面等离子体激元的 ATR 光谱

通过数值模拟, 即求解复振幅反射率式(8), 可获得“ABABA”型界面系统的 ATR 光谱. 选择阻尼参量为 $\gamma = 0.03\omega_p, \gamma_a = 0.03\omega_a, \Gamma_1 = 0.03\omega_0$. 只要阻尼非常小, 阻尼参量数值的选择对 ATR 光谱峰值的位置几乎没有影响. 取介质 1 的厚度 $a = 5$ mm, 入射角 $\theta = 45^\circ$.

p 偏振情况下, ATR 光谱如图 4(a), 关于 Dielectric/LHM/Dielectric/LHM/Dielectric 界面结构, 如图中实线所示, 可观察到五个共振吸收峰, 其中峰 B 为体吸收峰, 这里不作详细讨论. 另外四个吸收峰的峰值位置分别是 3.56 GHz, 4.58 GHz, 6.70 GHz 和 8.24 GHz. 刚好对应于图 3(a) 中的色散曲线枝 P_1, P_2, P_3 和 P_4 . 图中虚线对应 LHM/Dielectric/LHM/Dielectric/LHM 界面结构, 可观察到三个峰, 其峰值位置分别为 5.18 GHz, 7.05 GHz, 8.85 GHz, 完全对应于图 3(b) 中的色散曲线枝 P_1, P_2, P_3 . s 偏振情况, ATR 光谱如图 4(b), 对于 Dielectric/LHM/Dielectric/LHM/Dielectric 界面结构, 如图中实线, 这里观察到三个共振吸收峰, 分别位于 4.33 GHz, 5.08 GHz, 5.75 GHz, 它们对应于图 3(a) 中的色散曲线枝 S_1, S_2, S_3 . 另有一个体吸收峰 B, 在此不作讨论. 界面结构 LHM/Dielectric/

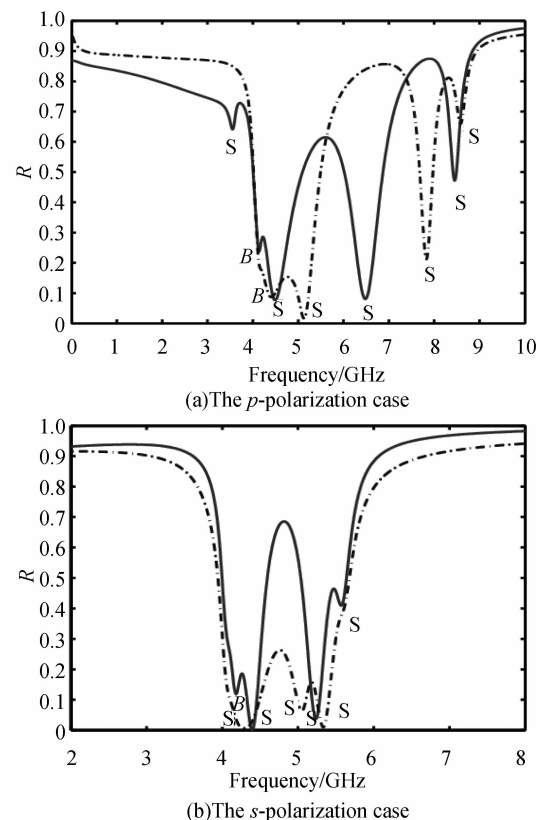


图 4 “ABABA”型结构 ATR 光谱
Fig. 4 The ATR spectra for exciting and observing SPPs for the ‘ABABA’ structures

LHM/Dielectric/LHM 的 ATR 光谱为图中虚线所示,同样能观察到三个共振吸收峰,其峰值位置分别为 4.35 GHz, 5.28 GHz, 5.65 GHz, 对应于图 3(b) 中的色散曲线枝 S_1, S_2, S_3 .

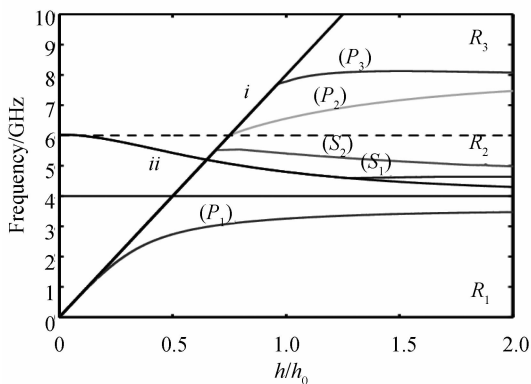
5 “ABCBA”型结构五层系统的表面等离子体激元特性

“ABCBA”型结构,即介质 1 和 5 为相同的物质 ($\epsilon_1 = \epsilon_5, \mu_1 = \mu_5$), 介质 2 和 4 为另一种相同的物质 ($\epsilon_2 = \epsilon_4, \mu_2 = \mu_4$), 介质 3 与介质 1, 2, 4, 5 不同. 本文分析: Dielectric/NDPM/LHM/NDPM/Dielectric 和 NDPM/Dielectric/LHM/Dielectric/NDPM 两种界面结构 SPPs 的性质.

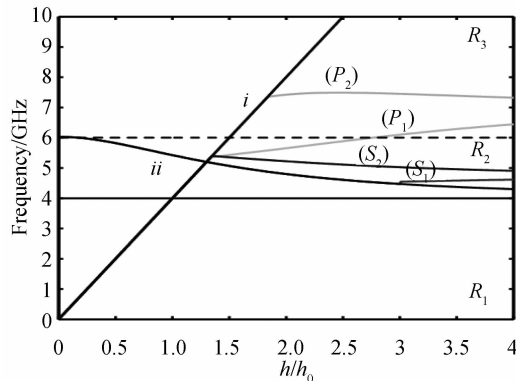
5.1 Dielectric/NDPM/LHM/NDPM/Dielectric 结构表面等离子体激元的性质

假定介质 1 和 5 为 Dielectric, 介质 2 和 4 为 NDPM, 介质 3 为 LHM. 图 5(a) 所示的是界面结构 Dielectric/NDPM/LHM/NDPM/Dielectric 在平面 (h, ω) 上 SPPs 的存在区域和色散关系曲线. 图中, 曲线 i 和 ii 分别对应 $h = (\epsilon_1 \mu_1)^{1/2} (\omega/c)$ 和 $h = (\epsilon_3 \mu_3)^{1/2} (\omega/c)$. ϵ_1, ϵ_3 和 μ_3 取值由方程 (7, 5, 6) 给出, μ_1 为 1.0.

从图 5(a) 中, 可看出区域 R_1, R_2 和 R_3 中有可



(a) The Dielectric/NDPM/LHM/NDPM/Dielectric structures



(b) The NDPM/Dielectric/LHM/Dielectric/NDPM structures

图 5 两个“ABCBA”型五层系统 SPPs 的存在区域和色散曲线
Fig. 5 Existence regions and dispersion relation curves of SPPs in two “ABCBA” five-layered structures

能存在 SPPs. R_1 为直线 $\omega = 4.0$ GHz 下方的区域, 对应的五层界面结构为 Dielectric/Metal/Metal/Metal/Dielectric; R_2 位于 $4.0 \text{ GHz} < \omega < 6.0 \text{ GHz}$ 范围内, 由直线 i , 曲线 ii 以及直线 $\omega = (1 - F_1)^{-1/2} \omega_0$ 所围成的区域, 对应界面结构 Dielectric/Metal/LHM/Metal/Dielectric; R_3 位于 $6.0 \text{ GHz} < \omega < 10.0 \text{ GHz}$ 范围内, 由直线 i 和 $\omega = (1 - F_1)^{-1/2} \omega_0$ 所围成的区域, 对应界面结构 Dielectric/Metal/Metal/Metal/Dielectric. 通过求解式 (1)、(5) 和 (7), 得到 P_1, P_2 和 P_3 三条 p 偏振色散曲线枝; 通过式 (4) 和 (6), 得到 S_1 和 S_2 两条 s 偏振色散曲线枝. 其中 P_1 位于低频区域 R_1 ; P_2 和 P_3 完全位于高频区域 R_3 ; S_1 和 S_2 完全落于区域 R_2 中.

5.2 NDPM/Dielectric/LHM/Dielectric/NDPM 结构表面等离子体激元的性质

假定介质 1, 2, 3, 4 和 5 分别对应 NDPM, Dielectric, LHM, Dielectric 和 NDPM. 在平面 (h, ω) 上观察 SPPs 的存在区域和色散关系. 如图 5(b), 直线 i 和曲线 ii 分别对应等式 $h = (\epsilon_2 \mu_2)^{1/2} (\omega/c)$ 和 $h = (\epsilon_3 \mu_3)^{1/2} (\omega/c)$. 式中 ϵ_2 和 μ_2 均为 1.0, ϵ_3 和 μ_3 取值由式 (5)、(6) 给出.

根据 SPPs 的存在条件, 图 5(b) 中只有 R_1, R_2, R_3 这三个区域有可能存在 SPPs. 当 $\omega < 4.0$ GHz 时, R_1 为直线 i 的右侧和直线 $\omega = \omega_0$ 下方所围成的区域; 当 $4.0 \text{ GHz} < \omega < 6.0 \text{ GHz}$ 时, R_2 由直线 i , 曲线 ii 和直线 $\omega = (1 - F_1)^{-1/2} \omega_0$ 围成; 当 $6.0 \text{ GHz} < \omega < 10.0 \text{ GHz}$ 时, R_3 由直线 (i) 的右侧和 $\omega = (1 - F_1)^{-1/2} \omega_0$ 的上方所围成. 这三个区域 R_1, R_2 和 R_3 分别对应于界面结构: Metal/Dielectric/Metal/Dielectric/Metal, Metal/Dielectric/LHM/Dielectric/Metal 和 Metal/Dielectric/Metal/Dielectric/Metal.

如图 5(b), 通过求解式 (1)、(5) 和 (7), 得到 P_1 和 P_2 两条 p 偏振色散曲线枝; 通过方程 (4) 和 (6), 得到 S_1 和 S_2 两条 s 偏振色散曲线枝. 其中 P_1 一部分在区域 R_2 , 其余部分在区域 R_3 ; 而 P_2 完全落在高频区域 R_3 中; S_1 和 S_2 则完全落于区域 R_2 中.

将 Dielectric/NDPM/LHM/NDPM/Dielectric 和 NDPM/Dielectric/LHM/Dielectric/NDPM 这两种“ABCBA”型结构进行比较. 发现在高频区域, 两种结构都能够激发两条 p 偏振色散曲线枝, 在中频区域, 都能够激发两条 s 偏振色散曲线枝; 但是, 在低频区域, 两者有着明显的差别, 对于 Dielectric/NDPM/LHM/NDPM/Dielectric 界面结构, 我们依然能够观察到一条 p 偏振色散曲线枝, 而对于 NDPM/Dielectric/LHM/Dielectric/NDPM 界面结构, 低频区域则完全观察不到 SPPs. 这种现象与

“ABABA”型结构进行比较所得结果有类似之处,但 SPPs 极化模态却明显减少了。

5.3 探测与观察“ABCBA”型结构表面等离子体激元的 ATR 光谱

对于“ABCBA”型界面结构, p 偏振情况的 ATR 光谱如图 6(a), 对于 Dielectric/NDPM/LHM/NDPM/Dielectric 界面结构, 如图中实线所示, 可观察到四个共振吸收峰, 其中三个标记为 S, 频率位置分别是 2.96 GHz, 6.29 GHz 和 8.38 GHz, 正好对应图 5(a) 中的 p 偏振色散曲线枝 P_1 , P_2 和 P_3 , 而剩下的一个标记为 B, 为体吸收峰; 对于 NDPM/Dielectric/LHM/Dielectric/NDPM 界面结构, 如图中虚线所示, 仅能够观察到三个共振吸收峰, 其中两个标记为 S, 分别位于频率 5.63 GHz 和 7.79 GHz, 正好对应图 5(b) 中的 p 偏振色散曲线枝 P_1 和 P_2 , 而剩下的一个标记为 B, 仍为体吸收峰。s 偏振情况的 ATR 光谱如图 6(b), 对于界面结构 Dielectric/NDPM/LHM/NDPM/Dielectric, 如图中实线所示, 观察到两个共振吸收峰 S, 峰值位置分别为 4.28 GHz 和 5.62 GHz, 对应于图 5(a) 中的 s 偏振色散曲线枝 S_1, S_2 ; 对于界面结构 NDPM/Dielectric/LHM/Dielectric/NDPM, 其 ATR 光谱如图中虚线所示, 同样得到了两个吸收峰 S 位于 4.20 GHz 和 5.48 GHz, 对应图 5(b) 中的 s 偏振色散

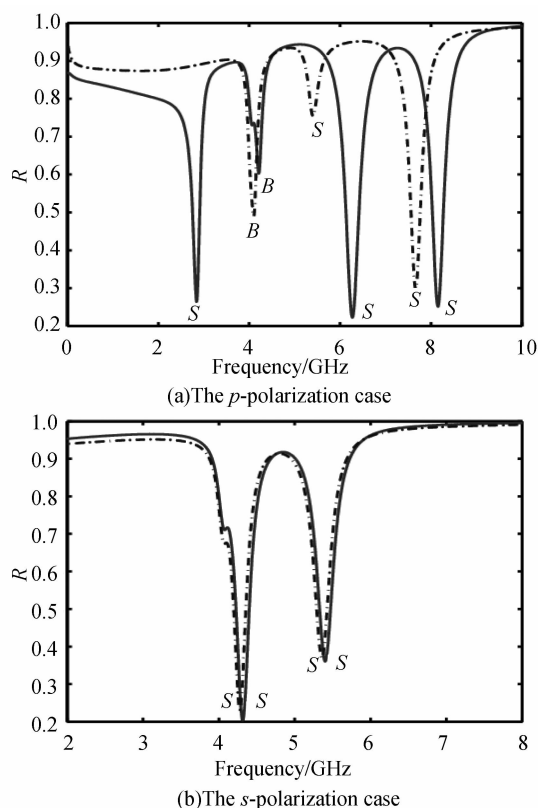


图 6 “ABCBA”型结构 ATR 光谱图
Fig. 6 The ATR spectra for exciting and observing SPPs for the ‘ABCBA’ structures

曲线枝 S_1 和 S_2 。

6 结论

本文主要研究了两种不同类型的五层对称系统的 SPPs, 分别为“ABABA”型和“ABCBA”型, 并详细讨论四种不同的组合方式 Dielectric/LHM/Dielectric/LHM/Dielectric, LHM/Dielectric/LHM/Dielectric/LHM, Dielectric/NDPM/LHM/NDPM/Dielectric 和 NDPM/Dielectric/LHM/NDPM/Dielectric. 发现不同的结构组合方式, SPPs 的色散关系曲线枝的数目和频率位置有着明显的区别; 非常依赖于五层系统的组成材料及其组合顺序。因此, 可以通过选择合适的界面系统来控制 SPPs 的性质。同时, 还发现层数越多, 表面色散曲线枝也越多, 处在频率通带的表面极化模态也越多。这些对称的五层结构中有 p 和 s 两种偏振 SPPs, 入射光和 SPPs 耦合, 在共振时, 可导致 p 波和 s 波强透射。总之, 多层左手材料结构的表面等离子体激元在亚波长光学、纳米光子学、以及表面波传感器等方面有潜在的应用价值。

参考文献

- [1] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values ϵ and μ [J]. *Sov Phys Usp*, 1968, **10**(4):509-514.
- [2] PENDRY J B, HOLDEN A J, STEWART W J, *et al.* Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures [J]. *Phys Rev Lett*, 1996, **76**(25):4773-4776.
- [3] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, *et al.* Low frequency plasmons in thin-wire structures [J]. *J Phys Condens Matter*, 1998, **10**:4785-4809.
- [4] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, *et al.* Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1999, **47**(11):2075-2084.
- [5] 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.
- [6] TIAN Xiu-lao, ZHANG Wei. Analysis of optical waves total refraction in the left-handed materials [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12):2299-2302.
田秀劳, 张炜. 光波在左手材料中全折射的理论分析[J]. *光子学报*, 2007, **36**(12):2299-2302.
- [7] YEN T J, PADILLA W J, FANG N, *et al.* Terahertz magnetic response from artificial materials [J]. *Science*, 2004, **303**(5663):1494-1496.
- [8] LINDEN S, ENKRICH C, WEGENER M, *et al.* Magnetic response of metamaterials at 100 terahertz [J]. *Science*, 2004, **306**:1351-1353.
- [9] MARQUÉS R, BAENA J D, MARTEL J, *et al.* Novel small resonant electromagnetic particles for metamaterial and filter design [C]. Proceeding of the International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, ICEAA, 2003, Torino (Italy). Organized by IEEE and URSI.
- [10] MARQUÉS R, MARTEL J, MESA F, *et al.* Left-handed-media simulation and transmission of EM waves in subwavelength split-ring-resonator-loaded metallic

- waveguides [J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **89** (18): 183901-183904.
- [11] MARTEL J, MARQUÉS R, BAENA J D, *et al.* Application of Modified Split-Ring Resonators to the Design of Small Microstrip and CPW Filters [C]. in Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2003), Hawaii, USA, 2003; 194.
- [12] ALÙ A, SALANDRINO A, ENGHETA N. Negative effective permeability and left-handed materials at optical frequencies [J]. *Opt Express*, 2006, **14**(4): 1557-1567.
- [13] ZHOU J, KOSCHNY Th, KAFESAKI M, *et al.* Saturation of the Magnetic Response of Split-Ring Resonators at Optical Frequencies [J]. *Phys Rev Lett*, 2005, **95** (22): 223902-223905.
- [14] PARIMI P V, LU W T, VODO P, *et al.* Negative refraction and left-handed electromagnetism in microwave photonic crystals [J]. *Phys Rev Lett*, 2004, **92**(12): 127401-127404.
- [15] SOMMERFELD A. Über die ausbreitung der wellen in der drahtlosen telegraphie [J]. *Ann Physik*, 1909, **28**, 665-736.
- [16] RAETHER H. Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings [M]. Berlin & New York: Springer-Verlag, 1988; 4-37.
- [17] CAO Di, ZHANG Hui-fang, TAO Feng. Theoretical study on properties of surface plasmon polaritons at interfaces of metamaterials with three-layered asymmetric structures [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1601-1610.
曹迪, 张惠芳, 陶峰. 三层不对称人工超常材料界面表面电磁波的理论研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1601-1610.
- [18] TAO Feng, ZHANG Hui-fang, YANG Xi-hua, *et al.* Surface plasmon polaritons of the metamaterial four-layered structures [J]. *JOSA B*, 2009, **26**(1): 50-59.

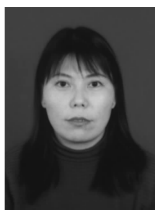
Surface Plasmon Polaritons of the Metamaterial Symmetric Five-layered Structures

ZHANG Hui-fang, ZHAO Yu-jing, TAO Feng, REN Hai-hong,
WANG Yan, BAI Li-hua, DAI Ye, YAN Xiao-na

(Department of Physics, College of Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The surface plasmon polaritons (SPPs) properties of symmetric five-layered structures composed of three kinds of materials; left-handed material (LHM), negative dielectric permittivity material (NDPM), and dielectric are investigated. The existence regions, dispersion relations, and excitation of the p and s polarized SPPs in several types of symmetric five-layered structures are studied in detail. It is shown that the properties of SPPs in different frequency regions are strongly dependent on the composite materials and their sequencing of the symmetric five-layered structures. It is also found that more layers lead to more surface dispersion branches, and more surface polarization modes in pass-band frequency. The intensified transmission can be realized when p and s polarized SPPs resonance. The possibility of exciting and observing SPPs by Attenuated Total Reflection (ATR) technique is also discussed.

Key words: Meta-materials; Surface plasmon polaritons; Attenuated Total Reflection (ATR) spectrum



ZHANG Hui-fang was born in 1967, and received the Ph. D. degree from Jilin University in 2003. Now she works at Shanghai University, and her research interests focus on quantum optics, nonlinear optics and meta-materials.