

基于等效介质原理的宽角超材料 吸波体的理论分析*

吴雨明 丁霄 王任 王秉中†

(电子科技大学应用物理研究所, 成都 610054)

(2019年11月12日收到; 2019年12月18日收到修改稿)

目前, 很少有文章就如何实现宽角度吸波材料进行详细的理论分析和设计指导, 设计宽角度吸波材料仍然是一件很困难的事情. 本文基于等效介质理论对带有反射地板的单层介质超材料吸波体进行较为详细的理论分析. 从基础电磁理论出发, 推导 TE 波 (横电波, 电场方向与入射面垂直的平面电磁波) 和 TM 波 (横磁波, 磁场方向与入射面垂直的平面电磁波) 照射下吸波体的反射系数, 分析实现宽角度吸波效果所需的等效电磁参数, 为宽角度超材料吸波体的设计提供了理论基础. 此外, 论文还理论分析了实现宽带宽角吸波等效电磁参数所要满足的条件, 并做了计算检验. 结果表明, 当介质等效电磁参数按照特殊曲线随频率发生变化时, 理论上能实现宽带宽角的吸波效果.

关键词: 等效介质理论, 宽角度吸波体, 宽带宽角**PACS:** 42.25.Bs, 78.20.Ci, 81.05.Xj**DOI:** 10.7498/aps.69.20191732

1 引言

电磁超材料吸波体指的是能够吸收电磁波的人工电磁超材料. 最早使用的电磁吸波材料是自然界中存在的具有电磁损耗的材料, 例如: 碳粉、铁氧体或多种吸波材料复合而成的材料等, 其往往具有吸收带宽窄、质量重、剖面高等缺点. 例如 Salisbury 屏有着 $1/4\lambda$ 的厚度和极窄的频带^[1]. 在过去 10 余年中, 超材料吸波体的发展十分迅速, 自 2008 年 Landy^[2] 提出完美吸波体后, 许多研究者在拓宽吸波体带宽、降低吸波体剖面、解决吸波体极化敏感度以及相关理论问题上做了很多贡献^[3–14]. 不同的结构会达到不同的设计效果, 超材料吸波体为吸波材料的设计提供了更大的设计自由度. 理想的电磁吸波材料应该具有宽带、宽角、极化不敏感、剖面

低、质量轻等特性. 在自由空间中, 对电磁吸波材料来说, 入射到其表面的电磁波的角度和极化是无法提前预知的, 因此需要其具有很宽的吸收角度和对入射电磁波极化的不敏感度, 以有效吸收未知的入射电磁波. 在已有的研究论文中, 大多数涉及宽角吸波体的论文仍然是设计特殊的结构来达到宽角吸波的目的^[15–20]. 文献^[21–23] 推导了 TM 波 (横磁波, 磁场方向与入射面垂直的平面电磁波) 照射下吸波体的反射系数, 建立了反射系数与等效电磁参数的关系, 通过分析反射系数可以找到实现完美吸波体的等效电磁参数, 设计满足该等效电磁参数的超材料可实现相应的吸波效果^[21–23]. 通过设计特殊结构能够实现相应的等效电磁参数^[24,25], 文献^[21] 设计了一种双面螺旋环的超材料吸波体验证了该理论的正确性. 需要指出的是, 反射系数还与电磁波入射角度和介质厚度有关, 因此, 可以

* 国家自然科学基金 (批准号: 61731005, 61901086)、博士后创新人才支持计划 (批准号: BX20180057)、中国博士后科学基金 (批准号: 2018M640907) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: ZYGX2019J101) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: bwzhang@uestc.edu.cn

进一步分析入射角度、厚度与反射系数和等效电磁参数之间的关系,来指导设计低剖面宽角度吸波材料.另外,前面提到吸波体的极化不敏度也非常重要,入射的任何平面电磁波都可以分解成 TE 波(横电波,电场方向与入射面垂直的平面电磁波)和 TM 波的组合形式,因此对 TE 波照射时的理论分析也是有必要的.

本文基于电磁理论推导出了 TE 波和 TM 波照射下带反射地板的单层介质实现宽角度吸波材料所需要的等效电磁参数.推导结果发现,在该模型下,介质实现低剖面宽角度吸波效果所需要的等效电磁参数主要与等效磁导率有关而与等效介电常数关系甚微,而 TE 波和 TM 波照射下实现宽角度吸波所需要的等效电磁参数也不同.因此,如果要想实现 TE 波和 TM 波不敏感的宽角度吸波体的设计,或许需要构建各向异性超材料,这与常规设计思路有很大不同,常规设计往往为了极化不敏度其结构都是轴对称的.此外,为了找出 TE 波照射下和 TM 波照射下理论上实现宽角度吸收效果的极限角度值,设定所有角度反射系数小于或等于 -10 dB,可以分析反射系数的等效电磁参数和厚度的取值对吸收角度的影响.结果表明,当等效电磁参数和厚度取某些值时,模型会存在理论上能够达到的最大吸收角度,TE 波照射下有效吸收的极限角度为 86.56° ,TM 波照射下有效吸收的吸收角度为 86.56° .另外,理论分析还发现当介质等效电磁参数按照特殊曲线随频率发生变化,理论上能实现宽带宽角的吸波效果.

2 理论分析与结果

2.1 理论模型

吸波体模型如图 1 所示,上层是空气层,设为 0 层,下层为介质层,设为 1 层,整个模型在 X 方向和 Y 方向是无限延伸的.假设各向异性介质的相对等效电磁参数为

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{\overline{\varepsilon}}_{r1} = \varepsilon_{r1x}\hat{x}\hat{x} + \varepsilon_{r1y}\hat{y}\hat{y} + \varepsilon_{r1z}\hat{z}\hat{z} \\ \overline{\overline{\mu}}_{r1} = \mu_{r1x}\hat{x}\hat{x} + \mu_{r1y}\hat{y}\hat{y} + \mu_{r1z}\hat{z}\hat{z} \end{array} \right\}.$$

当电磁波从自由空间以 θ 角度入射到介质表面时,根据 TE 波和 TM 波的特性,结合边界条件,可以推导出两种电磁波照射下的反射系数.

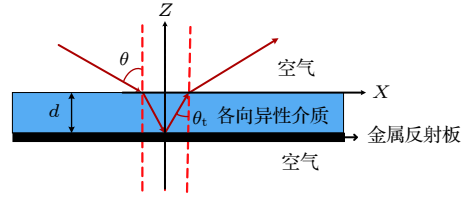


图 1 理论模型

Fig. 1. Theoretical model.

假设电磁场时谐因子为 $e^{j\omega t}$,从麦克斯韦方程组出发,TE 波和 TM 波在空气中和介质中的电场和磁场分别可以表示为

$$\text{TE波:} \begin{cases} E_{ny}(r) = (E_n^+ e^{jk_{nz}z} + E_n^- e^{-jk_{nz}z}) e^{-jk_x x}, \\ H_{nx}(r) = (k_{nz}/\omega\mu_{rnz}\mu_0) (E_n^+ e^{jk_{nz}z} - E_n^- e^{-jk_{nz}z}) e^{-jk_x x}, \\ H_{nz}(r) = (k_x/\omega\mu_{rnz}\mu_0) (E_n^+ e^{jk_{nz}z} + E_n^- e^{-jk_{nz}z}) e^{-jk_x x}, \end{cases} \quad (1a)$$

$$\text{TM波:} \begin{cases} H_{ny}(r) = (H_n^+ e^{jk_{nz}z} + H_n^- e^{-jk_{nz}z}) e^{-jk_x x}, \\ E_{nx}(r) = -(k_{nz}/\omega\varepsilon_{rnz}\varepsilon_0) (H_n^+ e^{jk_{nz}z} - H_n^- e^{-jk_{nz}z}) e^{-jk_x x}, \\ E_{nz}(r) = -(k_x/\omega\varepsilon_{rnz}\varepsilon_0) (H_n^+ e^{jk_{nz}z} + H_n^- e^{-jk_{nz}z}) e^{-jk_x x}, \end{cases} \quad (1b)$$

其中 E_n^- 和 H_n^- 代表在 n 层中朝上传播的电场和磁场; E_n^+ 和 H_n^+ 代表在 n 层中朝下传播的电场和磁场; n 为 0 或 1; 在空气中, $\varepsilon_{r0x} = \varepsilon_{r0z} = 1$, $\mu_{r0x} = \mu_{r0z} = 1$, $k_0^2 = \omega^2\mu_0\varepsilon_0$, $k_{0z} = k_0 \cos\theta$, $k_x = k_0 \sin\theta$. 在各向异性介质中,TE 波和 TM 波的色散关系为

$$\begin{cases} \text{TE波:} \frac{k_x^2}{\varepsilon_{r1y}\mu_{r1z}} + \frac{k_{1z}^2}{\varepsilon_{r1y}\mu_{r1x}} = k_0^2, \\ \text{TM波:} \frac{k_x^2}{\varepsilon_{r1z}\mu_{r1y}} + \frac{k_{1z}^2}{\varepsilon_{r1x}\mu_{r1y}} = k_0^2. \end{cases} \quad (2)$$

结合边界条件,可以得到反射系数表达式:

$$\begin{cases} r_{\text{TE}} = \frac{E_0^-}{E_0^+} = \frac{-k_{1z}\mu_{r0x} + jk_{0z}\mu_{r1x} \tan(k_{1z}d)}{jk_{0z}\mu_{r1x} \tan(k_{1z}d) + k_{1z}\mu_{r0x}}, \\ r_{\text{TM}} = \frac{H_0^-}{H_0^+} = \frac{k_{0z}\varepsilon_{r1x} - jk_{1z}\varepsilon_{r0x} \tan(k_{1z}d)}{k_{0z}\varepsilon_{r1x} + jk_{1z}\varepsilon_{r0x} \tan(k_{1z}d)}. \end{cases} \quad (3)$$

当 $|k_{1z}d| < 0.5$, 做如下近似 $\tan(k_{1z}d) \approx k_{1z}d$, TE 波和 TM 波照射下的反射系数表达式则为

$$\begin{cases} r_{TE} = \frac{-1 + jk_0 \cos \theta \mu_{r1x} d}{1 + jk_0 \cos \theta \mu_{r1x} d}, \\ r_{TM} = \frac{\varepsilon_{r1z} \cos \theta - jk_0 \mu_{r1y} \varepsilon_{r1z} d + jk_0 d \sin^2 \theta}{\varepsilon_{r1z} \cos \theta + jk_0 \mu_{r1y} \varepsilon_{r1z} d - jk_0 d \sin^2 \theta}. \end{cases} \quad (4)$$

2.2 理论分析

在满足前面近似条件的情况下,从(4)式中的可以看出,影响TE波和TM波反射系数的关键参量分别为 μ_{r1x} , d , θ 和 ε_{r1z} , μ_{r1y} , d , θ . 本文后面的分析也都是在满足前面近似条件下进行的.

为了进一步明确模型反射系数与相关参数的关系,改变单一变量并保持其余参数变量不变的情况下,可以根据(4)式得到反射系数与角度的关系曲线. 这里设置反射系数 $R = 10 \lg |r|^2$. TE波的情况如下,将 μ_{r1x} 的实部设置为0,仅改变其磁导率虚部,厚度为 $d = 1/150\lambda$. 同理, TM波情况下,假设 $\varepsilon_{r1z} = 1$, μ_{r1y} 实部设置为0,变化虚部. 当磁导率的虚部不同时,反射系数与入射角度的关系如图2所示. 可以看出,当虚部较小时,在各个角度吸收都很差,但存在一个吸收效果最佳角度. 当TE波照射时,随着虚部变大,最佳吸收角度会朝着大角度方向偏移,同时,小角度吸收效果变差;当TM波照射时,随着虚部变大,最佳吸收角度会朝着小角度方向偏移,同时,小角度吸收效果变好,当虚部变得更大时,最佳吸收角度降到 0° ,但此时整体吸收效果较差. 从图2可以看出,在入射波分别为TE波和TM波的情况下,都存在某些磁导率使反射系数在宽角度范围内保持在 -10 dB以下,其中,当磁导率为 $0-j50$ 时,对TE波的吸收角度

最宽,为 83° ;当磁导率为 $0-j10$ 时,对TM波的吸收角度最宽,为 84° . 也就是说,在TE波和TM波入射的情况下最佳磁导率是不同的. 这点提醒我们,设计宽角度吸波超材料时,采用各向异性结构或许更容易实现该目标.

为了分析 μ_{r1x} 和 μ_{r1y} 的实部与反射系数的关系,将 μ_{r1x} 虚部设置为 $-j50$, μ_{r1y} 设置为 $-j10$,厚度同样为 $d = 1/150\lambda$. 当磁导率的实部不同时,反射系数与入射角度的关系如图3所示. 可以看出,TE波照射时,随着 μ_{r1x} 实部逐渐变大,最佳吸收的角度基本不发生变化,但是最佳吸收角度处的反射系数逐渐变小,当实部增大到一定程度时,最佳吸收角度发生偏移,整体吸收效果迅速恶化;而TM波照射时,在 μ_{r1y} 实部大于1的条件下,变化趋势与TE波一致,但在 μ_{r1y} 实部为1时最佳角度处凹陷最深. 从图中可以看出,在入射波分别为TE波和TM波的情况下, μ_{r1x} 和 μ_{r1y} 的实部较小时整体吸收效果都较好,TE波的整体吸收效果最好时 μ_{r1x} 实部为0, TM波的整体吸收效果最好时 μ_{r1y} 实部为1. 实际构建磁导率实部为0的超材料十分困难,故后续分析 μ_{r1x} 和 μ_{r1y} 的实部均取值为1.

根据前面的分析,在入射波分别为TE波和TM波的情况下,将 μ_{r1x} 取值为 $1-j50$, μ_{r1y} 取值为 $1-j10$,反射系数在厚度为 $d = 1/150\lambda$ 时在宽角度范围内保持在 -10 dB以下. 保持上述磁导率取值不变,当介质的厚度不同时,反射系数与入射角度的关系如图4所示. 当TE波照射时,随着厚度的降低,最佳吸收角度往小角度偏移,在宽角度范

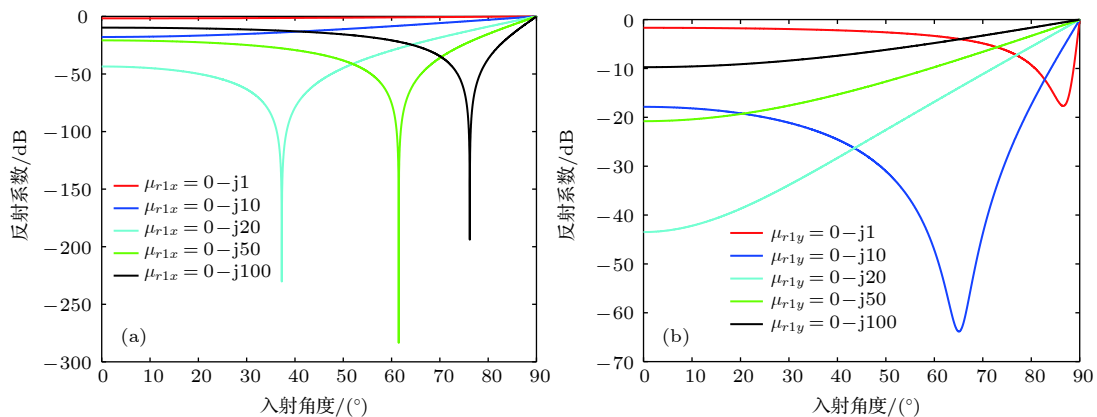


图2 超材料的反射系数随入射角度和材料电磁参数取值的变化 (a) TE波; (b) TM波

Fig. 2. The reflection coefficient of metamaterial varies with the angle of incidence and the value of the electromagnetic parameters of the material: (a) TE wave; (b) TM wave.

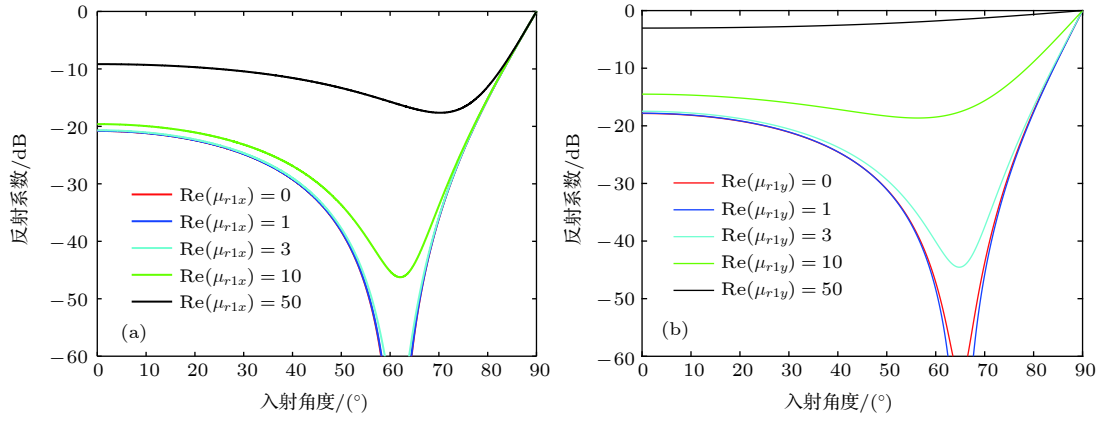


图 3 超材料的反射系数随入射角度和材料电磁参数取值的变化 (a) TE 波; (b) TM 波

Fig. 3. The reflection coefficient of metamaterial varies with the angle of incidence and the value of the electromagnetic parameters of the material: (a) TE wave; (b) TM wave.

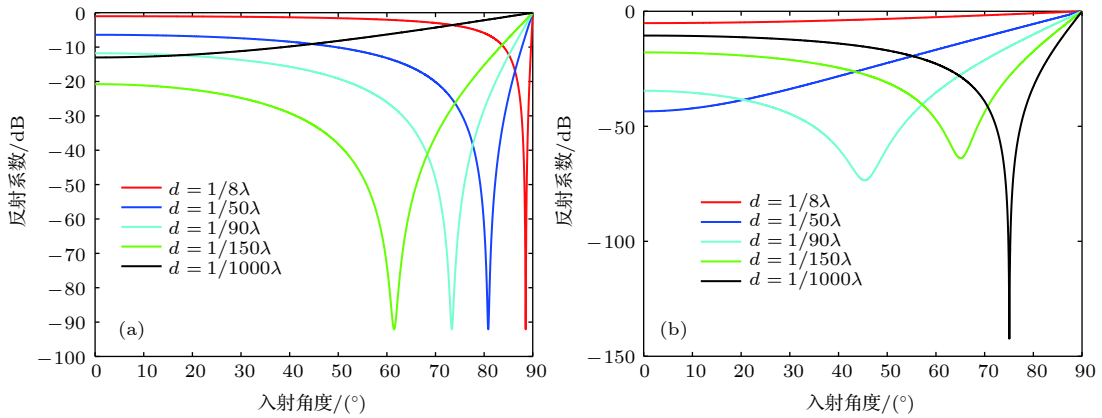


图 4 超材料的反射系数随入射角度和厚度的变化 (a) TE 波; (b) TM 波

Fig. 4. The reflection coefficient of metamaterial varies with incident angle and thickness: (a) TE wave; (b) TM wave.

围内的吸收效果都变好; 当 TM 波照射时, 随着厚度的降低, 吸收最佳角度往大角度偏移, 在宽角度范围内的吸收效果都变差. TE 波和 TM 波吸收效果随厚度的变化趋势正好相反. 也就是说, 只能在某个折中的厚度下才能同时对 TE 波和 TM 波较宽角度的吸波效果.

此外, TM 波照射下 ϵ_{r1z} 对反射系数也有影响. 将 μ_{r1y} 取值为 $1-j10$, 厚度为 $d = 1/150\lambda$. 保持磁导率和厚度不变, 当改变 ϵ_{r1z} 时, 反射系数与入射角度的关系如图 5 所示. 随着 ϵ_{r1z} 逐渐增大, 吸收角度逐渐变宽; 当 ϵ_{r1z} 增大到 1 时, 与前面分析一致, 出现最佳吸收角度, 吸收角度达到最宽; 当 ϵ_{r1z} 大于 1 时, 吸收角度基本不再发生变化, 只是最佳吸收角度处的反射系数变小, 对其他角度的吸收率影响也较小. 从图中可以看出, 当 ϵ_{r1z} 取值为 1 时, 最佳角度处反射系数最小. 当 ϵ_{r1z} 取值为 0 时, 反

射系数为 -1. 故而在分析磁导率和厚度对反射曲线的影响时都将 ϵ_{r1z} 设置为 1.

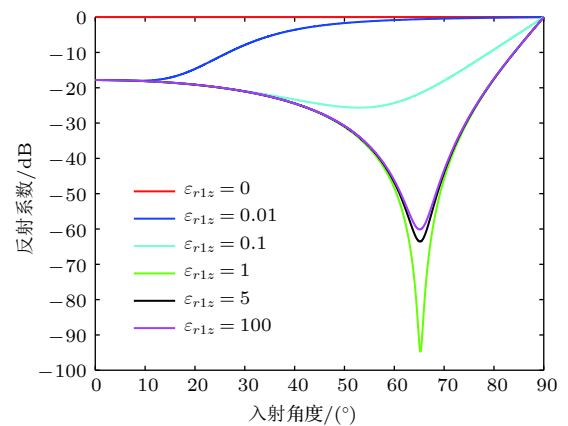


图 5 TM 波照射下超材料的反射系数随入射角度和 z 方向介电常数的关系

Fig. 5. The relationship among the reflection coefficient of metamaterials and incident angle and the dielectric constant of z direction under TM wave irradiation.

从前面的分析结果来看, 影响 TE 波和 TM 波照射时宽角度吸收情况的等效电磁参数主要是 μ_{r1x} , μ_{r1y} 的虚部以及厚度 d , 其余参数的对宽角度吸收情况影响较小, 故而后续分析中其余等效电磁参数均设置为 1, 例如 $\varepsilon_{r1z} = 1$, $\mu_{r1x} = 1 - j\mu''_{r1x}$, $\mu_{r1y} = 1 - j\mu''_{r1y}$. 为了找出 TE 波和 TM 波照射下理论上能实现宽角度吸收效果的极限角度值, 首先设定所有角度反射系数小于或等于 -10 dB, 分析反射系数中磁导率的虚部和厚度的取值对吸收角度的影响. 在保证所有角度反射系数小于 -10 dB 的情况下, 此时可以得到一组数据图, 如图 6 所示, 横轴为磁导率的虚部, 纵轴为厚度, 颜色柱为最大的吸收角度值. TE 波照射下, 在 d 为 0.012λ 、磁导率 $\mu_{r1x} = 1 - j54$ 时, 最大吸收角度为 86.56° . 图中没有标出具体数值, 但实际上编写的 Matlab 程序可以为我们提供实现宽角度吸波的厚度和磁导率虚部的具体数值. 最大吸收角度的相关参数值会因为取值的采样率的问题而有所变化, 但是最宽吸收角度值变化微小. 从图 6 可以看出最大吸收角度与 d 和磁导率的取值关系趋势, 大致呈现一种反比例函数的关系.

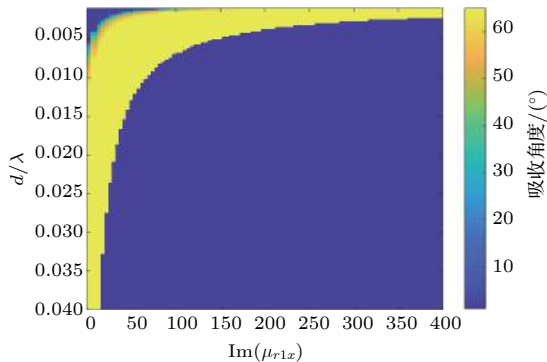


图 6 超材料吸波体的吸收角度与介质厚度和 μ_{r1x} 虚部的关系
 Fig. 6. The relationship among the absorbing angle of the metamaterial absorber and the substrate thickness and imaginary part of μ_{r1x} .

同样地, TM 波照射下, 在 d 为 0.003λ 、磁导率 $\mu_{r1y} = 1 - j13$ 时, 最大吸收角度为 86.56° . 从该结果中可以看出 TE 波和 TM 波照射下所能实现的最宽吸收角度相同, 都能实现接近掠入射的最佳吸收效果. 从理论分析的结果来看, 如果要实现具有极宽角度的吸波材料, 可以使用各向异性的结构实现相对应的大角度的磁导率. 这与我们常规思维略有不同, 此前几乎所有的超材料吸波体为了解决

极化敏感度问题, 其设计的结构都是轴对称的, 但是他们并未考虑大角度入射的问题. 但是, 这并不是说只有各向异性结构才能实现宽角度吸波, 从图 6 和图 7 中可以看出, 当 x 和 y 方向上的磁导率相同时在某些厚度下也能实现宽角度吸波.

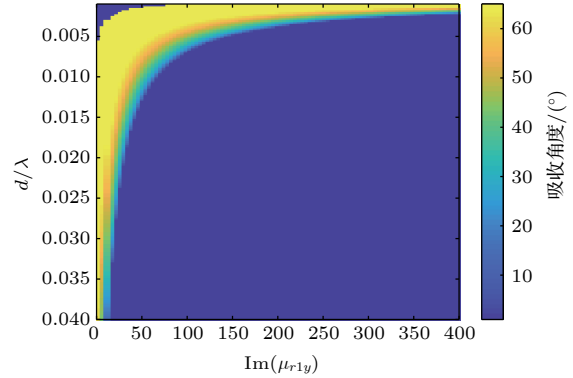


图 7 超材料吸波体吸收角度与介质厚度和 μ_{r1y} 虚部的关系
 Fig. 7. The relationship among the absorbing angle of the metamaterial absorber and the substrate thickness and imaginary part of μ_{r1y} .

图 6 和图 7 展示了 TE 波和 TM 波下磁导率、厚度和吸收角度的关系, 黄色区域是吸收角度较大的区域, 因此可以根据吸波材料的设计需求来选择相应的厚度和磁导率. 例如若需要吸波材料具有宽的吸收角度同时要求有较低剖面, 可以选取厚度较小时对应的磁导率. 图中宽角度吸收的区域是连续的, 邻近磁导率和厚度的吸波材料的吸收角度相差无几, 这为实际吸波材料的设计提供了一定的弹性, 并不会因为实际设计的吸波材料的等效磁导率出现误差而导致预计吸波效果不一致.

2.3 宽带化的理论分析

前面的分析是在窄频带的情况下进行的, 那么宽带宽角度吸波材料的磁导率应该满足什么关系, 也是一个值得研究的问题. 实际上, 在设计具体的吸波材料的时候, 介质实际厚度在物理上是固定值, 其与频率没有关系, 但电尺寸厚度与频率关系为 $d = (d' \cdot f)/c$, 其中 d' 是介质实际厚度, 可见电尺寸厚度与频率成正比, 即频率越高电尺寸厚度越厚. 图 6 和图 7 的纵轴其实可以替换成频率, 如此就可以推测, 当介质的磁导率虚部随频率变化的曲线落在两幅图中的黄色区域, 理论上就可以实现宽带宽角度吸波. 为了检验该结论, 从前面得到的数

据中, 提取一条落在黄色区域的磁导率虚部与频率的关系曲线. 这里设定介质的实际厚度为 3 mm, 即 $d = 0.01f$, 频率 f 单位为 GHz, 当 TE 波照射时, 选取磁导率虚部和频率关系为 $f = -0.1\mu''_{r1x} + 3.7$, 所得到的反射系数与频率的关系为如图 8 所示, 图中红蓝青绿黑曲线分别代表 $0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 80^\circ$ 入射角度下的反射系数, 在 0.8—2.1 GHz 频段内反射系数都在 -10 dB 以下. 当 TM 波照射时, 选取的磁导率虚部和频率的关系式为 $f = -0.1\mu''_{r1y} + 1.7$, 所得到的反射系数与频率的关系如图 9 所示, 图中红蓝青绿黑曲线分别代表 $0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 80^\circ$ 入射角度下的反射系数, 在 0.3—1.4 GHz 频段内反射系数都在 -10 dB 以下. 由此可见, 满足特定情况的磁性色散材料是可以实现宽带宽角吸波效果的. 而且 TE 波和 TM 波满足的色散曲线可以不同. 如果要在同频段内实现宽带宽角吸波并且对 TE 波和 TM 波不敏感, 所需要的

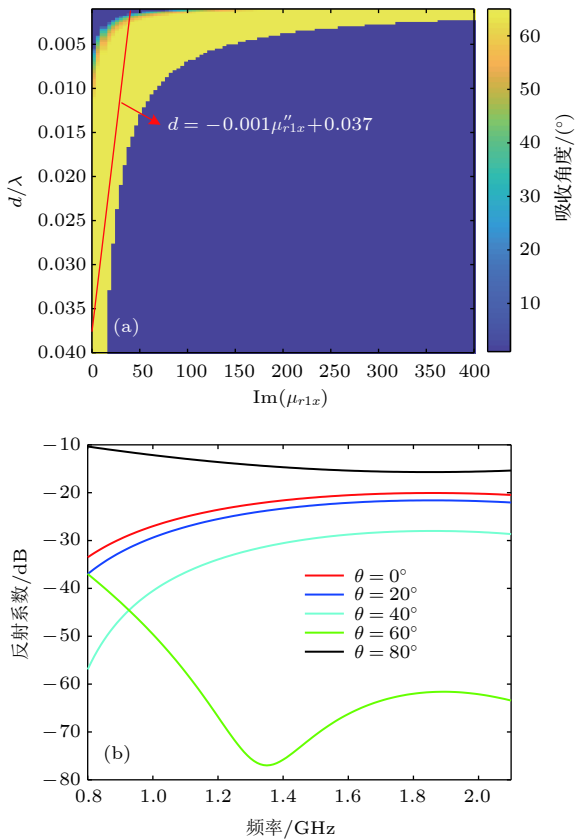


图 8 TE 波 (a) 实现宽带化 μ_{r1x} 虚部和 d 的关系; (b) 带地板色散介质的反射系数随入射角度和频率的变化
Fig. 8. TE wave: (a) The relationship between imaginary part of μ_{r1x} and d for achieving broadband; (b) reflection properties of dispersive media backed with ground vary with incidence angle and frequency.

色散关系曲线也可以由编写的 Matlab 程序获得的数据中得到. 此外, 需要特别说明的是介质色散关系曲线只要落在图 7 和图 8 的黄色区域内理论上就能实现宽带宽角吸波, 并不仅限于前面所选取的线性关系.

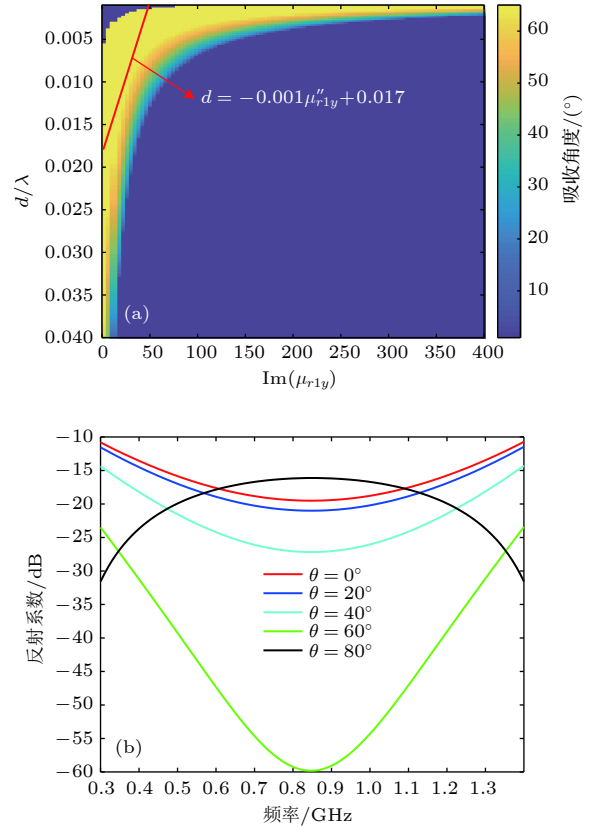


图 9 TM 波 (a) 实现宽带化 μ_{r1y} 虚部和 d 的关系; (b) 带地板色散介质的反射性能随入射角度和频率的变化
Fig. 9. TM wave: (a) The relationship between imaginary part of μ_{r1y} and d for achieving broadband; (b) reflection properties of dispersive media backed with ground vary with angle of incidence and frequency.

3 讨论

宽角度极化不敏感吸波材料 (无论宽带还是窄带) 的设计一直都是吸波材料设计的难点. 在目前吸波材料的设计中, 为解决极化不敏感的问题, 其结构都具有轴对称性的特点, 吸波材料的吸收角度更依赖于经验调试然后得到较为理想的结果, 但都没有逼近本文的理论极限值. 其根本原因是 TE 波和 TM 波在斜入射情况下电场和磁场不再具有对称性, 对称的结构也就难以对非对称的电磁场产生同样的响应. 尤其在大角度入射下, 对称结构的吸波体对两种极化波的响应的差异性就更加明显.

4 结 论

推导了 TE 波和 TM 波照射下带有反射地板的单层介质的反射系数, 详细分析了介质的等效电磁参数和厚度对反射系数的影响, 并得出实现宽角吸波体所需要的等效电磁参数和介质厚度的取值. TE 波照射下吸收角度的理论极限值为 86.56° , TM 波照射下吸收角度的极限值为 86.56° . 从结果中可以看出, 如果要实现具有对 TE 波和 TM 波不敏感的超宽角度的吸波材料的设计, 其等效电磁参数取值在 x 和 y 方向上是不同的, 因此需构建各向异性的超材料才能达到设计的目的. 此外, 前面的分析都是在窄带情况下进行的, 如果要实现宽带宽角的吸波效果, 所需的等效电磁参数则与窄带情况不同. 文中宽角吸波材料的宽带化的理论分析结果说明, 在介质的等效电磁参数随频率变化具有某种关系 (不唯一) 的情况下, 理论上能实现宽带宽角的吸波材料. 设计人员可以根据设计需求在图 6 和图 7 的数据中选取相应的厚度和磁导率来达到相应的设计目的. 本文的理论分析结果为实现窄带、宽带超宽角度的吸波材料提供了理论基础; 虽然是基于等效介质理论, 并未与实际结构构建关联, 但确实为宽角吸波体的设计提供了理论指引.

参考文献

- [1] Fante R L, McCormack M T 1988 *IEEE Trans. Antenna. Propag.* **36** 1443
- [2] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [3] Wang B X, Zhai X, Wang G Z, Huang W Q, Wang L L 2015 *IEEE Photonics J.* **7** 4600108
- [4] Ding F, Cui X, Ge C, Jin Y, He S L 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 103506
- [5] Lin X Q, Mei P, Zhang P C, Chen Z Z D, Fan Y 2016 *IEEE Trans. Antenna. Propag.* **64** 4910
- [6] Hao J P, Lheurette E, Burgnies L, Okada E, Lippens D 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 081102
- [7] Deng T W, Li Z W, Chen Z N 2017 *IEEE Trans. Antenna. Propag.* **65** 5886
- [8] Shang Y P, Shen Z X, Xiao S Q 2013 *IEEE Trans. Antenna. Propag.* **61** 6022
- [9] Rozanov K N 2000 *IEEE Trans. Antenna. Propag.* **48** 1230
- [10] Chen H T 2012 *Opt. Express* **20** 7165
- [11] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Xu Z, Lin B Q, Zhou H, Bai P, Gu W, Peng W D, Ma H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 087802 (in Chinese) [顾超, 屈绍波, 裴志斌, 徐卓, 林宝勤, 周航, 柏鹏, 顾巍, 彭卫东, 马华 2011 物理学报 **60** 087802]
- [12] Chen Y Z, Nie Y, Gong R Z, Wang X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 044103 (in Chinese) [程用志, 聂彦, 龚荣洲, 王鲜 2013 物理学报 **62** 044103]
- [13] Xiong Y J, Wang Y, Wang Q, Wang C Q, Huang X Z, Zhang F, Zhou D 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 084202 (in Chinese) [熊益军, 王岩, 王强, 王春齐, 黄小忠, 张芬, 周丁 2018 物理学报 **67** 084202]
- [14] Li Y H, Deng L W, Luo H, He L H, He J, Xu Y C, Huang S X 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 095201 (in Chinese) [李宇涵, 邓联文, 罗衡, 贺龙辉, 贺君, 徐运超, 黄生祥 2019 物理学报 **68** 095201]
- [15] Tao H, Bingham C M, Strikwerda A C, Pilon D, Shrekenhamer D, Landy N I, Fan K, Zhang X, Padilla, Averitt 2008 *Phys. Rev. B* **78** 241103
- [16] Wang B N, Koschny T, Soukoulis Costa M 2009 *Phys. Rev. B* **80** 033108
- [17] Lee D, Hwang J G, Lim D, Hara T, Lim S 2016 *Sci. Rep.* **6** 27155
- [18] Nguyen T T, Lim S 2017 *Sci. Rep.* **7** 3204
- [19] Lim D, Lee D, Lim S 2016 *Sci. Rep.* **6** 39686
- [20] Wang J Y, Yang R C, Tian J P, Chen X W, Zhang W M 2018 *IEEE Antenna. Wireless Propag. Lett.* **17** 1242
- [21] Jin Y, Xiao S S, Mortensen N A, He S L 2011 *Opt. Express* **19** 11114
- [22] Feng S M, Halterman K 2012 *Phys. Rev. B* **86** 165103
- [23] Zhong S M, He S L 2013 *Sci. Rep.* **3** 2083
- [24] Chen W C, Bingham C M, Mak K M, Caira N W, Padilla W J 2012 *Phys. Rev. B* **85** 201104
- [25] Li C L, Guo J, Zhang P, Yu Q Q, Ma W T, Miao X G, Zhao Z Y, Luan L 2014 *Chin. Phys. Lett.* **31** 077801

Theoretical analysis of wide-angle metamaterial absorbers based on equivalent medium theory^{*}

Wu Yu-Ming Ding Xiao Wang Ren Wang Bing-Zhong[†]

(*Institute of Applied Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*)

(Received 12 November 2019; revised manuscript received 18 December 2019)

Abstract

In the past decade, most of researchers have been devoted to broadening the bandwidth of absorber. There are few researches on how to achieve wide-angle absorbing materials by detailed theoretical analysis and design guidance. It is still difficult to design wide-angle absorbers. In this paper, based on the equivalent medium theory, the reflectivity of the metamaterial absorber with a single-layered medium backed with metal reflector is analyzed in detail. Starting from the basic electromagnetic theory, the reflection coefficient of the absorber under transverse electric (TE) plane wave and transverse magnetic (TM) plan wave irradiation are derived. And the equivalent electromagnetic parameters of realizing the wide-angle absorbing effect are analyzed, which provide a theoretical basis for designing the wide-angle metamaterial absorber. The theoretical analysis results show that the equivalent electromagnetic parameters required for the medium to achieve low-profile and wide-angle absorbing effect are mainly related to the equivalent permeability and have little relationship with the equivalent permittivity. Moreover, the equivalent electromagnetic parameter value for achieving ultra-wide-angle absorber under TE wave and that under TM wave irradiation are different from each other. In other words, the anisotropic metamaterial with appropriate equivalent permeability has the potential to be used to design the ultra-wide-angle absorbers which are not sensitive to TE waves nor TM waves. In addition, in order to find the theoretically achievable widest absorbing angle value under TE wave and TM wave irradiation, the reflection coefficients at all angles must be less than or equal to -10 dB to obtain the relationship among the equivalent electromagnetic parameters, thickness and angle. The results show that the theoretically achievable widest absorbing angle value is 86.56° under TE wave and TM wave irradiation. The designer can choose the corresponding thickness and permeability from the data obtained from the analysis according to the design requirements. The narrow-band absorbers have limited applications. Therefore, in this paper we also theoretically analyze the values of the equivalent electromagnetic parameters for achieving wide-band and wide-angle absorbing materials, and make theoretical verification. The results show that the wide-band and wide-angle absorber can be achieved theoretically, while the equivalent electromagnetic parameters of the medium vary with frequency as some special curves indicate. Although this method is based on the equivalent medium theory and has no direct relationship with the actual structure, it does provide theoretical guidance for designing the wide-angle absorbers.

Keywords: equivalent medium theory, wide angle absorbers, broadband and wide-angle

PACS: 42.25.Bs, 78.20.Ci, 81.05.Xj

DOI: 10.7498/aps.69.20191732

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61731005, 61901086), the Postdoctoral Innovation Talents Support Program, China (Grant No. BX20180057), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2018M640907), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. ZYGX2019J101).

[†] Corresponding author. E-mail: bwang@uestc.edu.cn