

新型人工微结构电磁材料中损耗的利与弊^{*}

孟恒芳 王 权 刘艳红

(山西大同大学 山西 大同 037000)

(收稿日期:2016-03-15)

摘 要:本文主要介绍了新型人工微结构材料中损耗对材料性能的影响. 随着生产工艺和制备技术的提升,使新型人工微结构电磁材料获得了特殊的研究地位和研究价值. 通常人工微结构材料的制备原材料都是取自于金属材料,而对于金属材料,损耗是不可避免的. 那么损耗对微结构材料性能的影响成为人们关注的热点. 通过研究材料电磁损耗的物理机制得出损耗虽然对电磁材料的应用带来负面效应,但是在特殊材料结构中损耗反而是有益的. 将分析过程及结果渗透到本科物理学专业《电动力学》的实践课中,不仅拓宽了学生的知识面,而且提升了学生的创新能力.

关键词:人工微结构材料 电磁损耗 电磁性能

新型人工微结构电磁材料是一种人造材料,在很长时间内吸引了科学家和学者们的注意. 近来,通过对各种媒质和材料的生产工艺和制备技术的研究和发展,使微结构电磁材料获得了特殊的研究地位和研究价值,例如:亚波长金属阵列的光学传输特性增强,光学微结构或纳米结构尺度的操作、检测和成像等领域都属于这个研究范畴.

新型人工微结构电磁材料是人们根据电磁学理论的计算所构造出来的,具有非常规电磁属性的人造媒质或材料. 由于它通常是由多种自然物质(如电介质和金属)按照特定的规则组合而成,所以也有学者把它称为复合材料. 通常微结构电磁材料的制备原材料都是取自于金属材料,而对于金属材料,损耗是不可避免的. 那么损耗对特异材料性能的影响是怎样的呢? 大量的研究工作证明,损耗已经限制了特异材料很多方面的应用^[1,2],同时由于损耗的不可避免性,人们对如何减小损耗也做了很多工

作^[3]. 例如在结构中加入增益材料以后,结构的透射率得到了提高,但是却使其结构的负折射性质消失;文献^[4]中通过减小损耗材料的尺度即将银膜被分成了多份后与介质形成金属-介质周期性结构后,银膜的透射率得到了很大的提高,但是付出的代价却是银膜由整块分成了小块,等等. 而还有课题组已经证实只有存在实质性的损耗才能实现负折射现象^[5]. 因此研究损耗对材料性能的影响对于描述和评估材料的电磁特性及应用有着非常重要的意义.

本文主要从人工微结电磁材料损耗的物理机制分析损耗对电磁材料性能的影响. 将分析过程及结果引入到本科物理学专业《电动力学》的实践课中,不仅拓宽了学生的知识面,而且提升了学生的创新能力.

1 电磁损耗机制

电磁损耗是普遍存在的现象,随着电磁波各频

^{*} 山西省高等学校大学生创业训练项目,项目编号:2014354

通讯作者:刘艳红(1979-),女,博士,副教授,主要从事凝聚态物理教学与科研工作.

段在太空探测、海洋海底探测、地下遥感等领域的广泛应用,电磁波在损耗介质内部及其界面的传播行为已成为基础和应用研究热点.电磁波在介质界面会产生反射和折射,斯奈尔定律和菲涅尔定律是两个相应的基本定律,由经典电动力学我们知道,介质中的麦克斯韦方程为

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

采用国际单位制,可以得到电磁场对材料介质作用的关系式,即本构关系(或者物质方程).对于均匀、各向同性电磁材料的本构关系为

$$\begin{cases} \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \end{cases} \quad (2)$$

从以上本构关系式中可以看到,介电常数(ϵ)、磁导率(μ)和电导率(σ)是描述物质电磁性质的基本物理量,决定着电磁波在物质中的传播.当电磁波通过损耗媒质时,在电场作用下电荷质点会发生相互位移,使得正负电荷中心分离,形成许多电偶极子,此过程即为极化.在发生极化的过程中,电磁能量以热的形式损耗掉即产生损耗.对于损耗媒质介电常数是复数

$$\epsilon = \epsilon_R - i \frac{\sigma}{\omega} \quad (3)$$

式中传播常数为复数形式

$$k = \alpha + i\beta$$

其中

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon_R}{2} \left\{ \left[1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - 1 \right\}}$$

为衰减常数,它的存在引起了常量振幅的减小,即电磁能量的损耗.

2 损耗对电磁材料性能的影响

以人工微结构电磁材料中的单负材料为例,对于损耗电单负媒质采用 Drude 模型描述介电常数

$$\begin{cases} \epsilon = 1 - \frac{\omega_{ep}^2}{\omega^2 + i\omega\gamma_e} \\ \mu = a \end{cases} \quad (3)$$

其中 ω_{ep} 表示电等离子体频率, γ_e 表示单负材料的耗散系数, ω 为圆频率, a 为正实数.所以介电常数是复数形式,设为 $\epsilon = \epsilon_R + i\epsilon_I$, 实部 ϵ_R 和虚部 ϵ_I 分别为

$$\begin{cases} \epsilon_R = 1 - \frac{\omega_{ep}^2}{\omega^2 + \gamma_e^2} \\ \epsilon_I = \frac{\omega_{ep}^2 \gamma_e}{\omega^3 + \omega \gamma_e^2} \end{cases} \quad (4)$$

电荷不能像导体那样通过处于电场中的电介质,但在电场作用下电荷质点会发生相互位移,使得正负电荷中心分离,形成许多电偶极子,此过程即为极化.在发生极化的过程中,产生热形式的电损耗和电磁辐射损耗.

考虑电磁波穿过一个单层损耗型负介电常数材料,周围是空气,材料的折射率为 n , 厚度为 d . 由于介电常数是复数所以材料的折射率也是复数,其中实部 n_R 和虚部 n_I 与 ϵ 和 μ 之间满足如下关系

$$\begin{cases} n_R = \left[\frac{1}{2} \mu (\sqrt{(\epsilon_R)^2 + (\epsilon_I)^2} + \epsilon_R) \right]^{\frac{1}{2}} \\ n_I = \left[\frac{1}{2} \mu (\sqrt{(\epsilon_R)^2 + (\epsilon_I)^2} - \epsilon_R) \right]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (5)$$

我们定量地对负介电常数材料的透射性质做了分析.图 1 给出了电磁波通过单层损耗型负介电常数材料时的透射率、反射率和吸收率随着耗散系数 γ_e 的变化.图中的实线、虚线和点线分别为透射率、反射率和吸收率的变化曲线.由实线的变化可以看到,随着耗散系数 γ_e 的增大,透射率呈现出了非单调的变化过程,这个结果与损耗型介电材料中透射率随着耗散系数的增大而单调减小的结果截然不同.

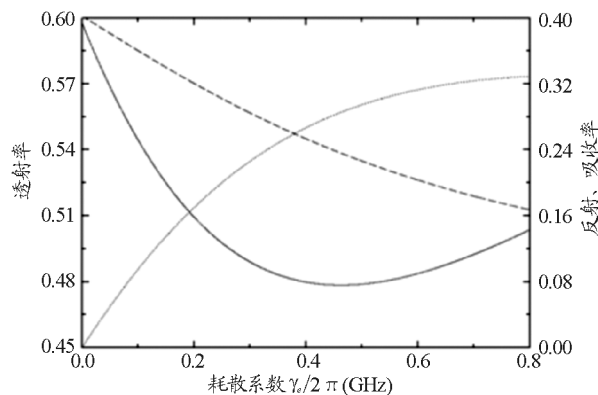


图1 单层损耗型电单负材料的透射率、反射率和吸收率随着耗散系数的变化曲线。

影响损耗型材料的透射特性的两个主要因素是：一个是有多少电磁波能量进入了材料，即材料的反射率，反射率降低，则透射率有可能增高；另一个是进入材料的电磁波能量有多少被吸收掉了，即材料的吸收率，吸收率降低，则透射率会增高。对于电单负材料，由于其折射率为纯虚数而导致很高的反射率。因此，对于电单负材料，反射率的变化将对透射特性有很大的影响。随着耗散系数的增大，损耗型单负特异材料的透射在某些频率段是增高的，即增大损耗反而增大了材料透射特性。

3 总结

本文以损耗型电单负材料为例研究了损耗系数对材料透射性的影响，研究表明，损耗的存在不一定只是降低材料的透射性，在某些特殊人工微结构材料中随着其耗散系数的增加透射系数反而是增加的，这一点正是损耗有利的一面。因此损耗对材料电磁性能的影响是既有弊的时候，也有利的时候。

参考文献

- 1 S. Zhang, W. Fan, B. K. Minhas, et al, Magnetic nano-structures exhibiting a negative permeability. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 94, 037402
- 2 A. N. Grigorenko, A. K. Geim, H. F. Gleeson, et al, Nano-fabricated media with negative permeability at visible frequencies. *nature*, 2005, 438, 335
- 3 M. I. Stockman, Criterion for Negative Refraction with Low Optical Losses from a Fundamental Principle of Causality. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 98, 177404
- 4 M. J. Bloemer, M. Scalora, Transmissive properties of Ag/MgF₂ photonic band gaps. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 72, 1676
- 5 M. Stockman, Criterion for negative refraction with low optical losses from a fundamental principle of causality. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 98, 177404

Advantages and Disadvantages of the Loss in New Microstructure Electromagnetic Materials

Meng Hengfang Wang Quan Liu Yanhong

(Datong University, Datong, Shanxi 037009)

Abstract: This paper discussed the loss effect to material electromagnetic properties in new microstructure materials. As production processes and technology are rising, people set an status and the value of the study to microstructure materials. Usually, the main raw material is metal, but the loss is impossible to metal. The effect of loss to materials performance has become the hot topic. This led us to the conclusion that the loss can bring about not only negative effects but also positive effects. Seeping analysis to electrodynamics practical lessons has both widened students' range of knowledge, and promoted student's aptitude of creation.

Key words: microstructure material; electromagnetic loss; materials performance