

亚波长电磁特异材料的研究

李耀轩, 姚娟, 乐永康

复旦大学, 物理系 200433

摘要

我们通过微波段实验研究了亚波长电磁特异材料对于电磁波的调控, 并由数值模拟加以验证。电磁波在特定的频率形成高反射现象, 这一规律可以由比例定律描述。而且这一现象是由于局域共振场增强形成的, 我们对于这一近场局域效应也进行了测量。局域共振场增强的频率独立于入射角度和金属板的完全重合叠加。对于分形板这种亚波长电磁特异材料可以有很多应用。

关键词 电磁特异材料 高反射 比例定律 局域共振场增强

1 引言

自然界存在的材料的介电常数和磁导率都是正数, 而电磁特异材料 (EM Metamaterial) 可以通过人工加工成一些特定的微结构, 宏观上看表现出可人工任意调控的介电常数和磁导率, 因此他有很多新奇特性, 例如实现完美成像^[1], 偏振反转^[2], 超常透射等^[3]。而我们则在实验上实现了完全光子带隙材料的测量, 及在特定频率会实现高反射率。此前利用布拉格散射机理产生的反射材料线度必须是波长的几倍, 而电磁特异材料的选频具有亚波长的性质。

本文中, 我们将介绍周期性排列的亚波长金属分形结构对于微波段电磁波反射调制^[4,5], 利用自行搭建的微波测量系统, 对已有的分形板进行远场和近场的测量, 并进行计算机模拟研究电磁特异材料特性。

2 选频反射电磁特异材料的模型

本实验中, 在长波极限 (波长远大于微结构尺寸) 条件下, 分形板可以被看作各向异性介质板,

$\epsilon_{xx} = a_x + \sum \frac{b_{xi}}{f_{xi}^2 - f^2}, \epsilon_{yy} = a_y + \sum \frac{b_{yi}}{f_{yi}^2 - f^2}$, 在频率为 f_i 时介电常数将发散, 产生电共振行为, 电磁波被完全反射。如图 1 (左) 为电磁波入射到分形板的模型, 图 1 (b) 为介质板一个单元的结构, 当电场沿 x 方向极化时 ϵ_{xx} 将起作用, 在 f_{xi} 频率发生共振, y 极化时类似。

如图 1 (左) 为电磁波入射到分形板的模型, 图 1 (b) 为介质板一个单元的结构, 当电场沿 x 方向极化时 ϵ_{xx} 将起作用, 在 f_{xi} 频率发生共振, y 极化时类似。

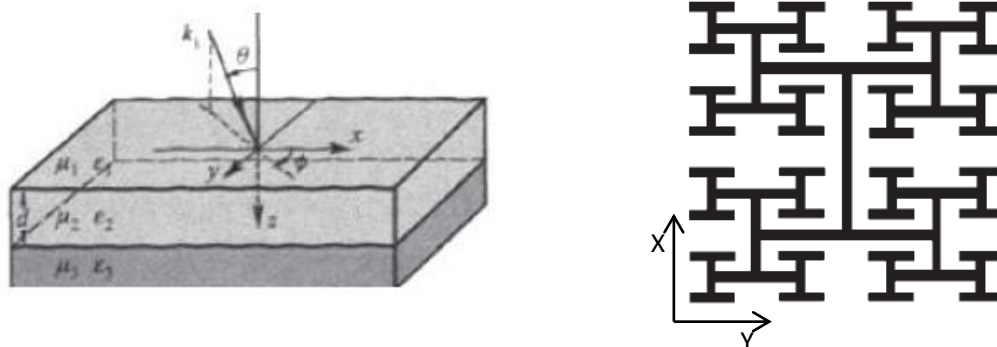


图 1 (左) 电磁波入射到分形板, k 为入射波波矢, 上层为金属棒界面, 下层为介质衬底板。

(右) 六级分形板示意图, 已标定 xy 方向。

3 实验装置设计与搭建

3.1 微波测量仪器

本实验中利用 Agilent E836XC 网络分析仪, 双脊天线喇叭作为微波发射源与接收器, 分形板金属片固定在介质板表面, 整个分形板固定在二维转角平台上。分形板为 3 块, A 板为 4 级, 金属第一级长 16mm, 宽度 1mm, 厚度约 0.03mm, 介质衬底厚度 2mm; B 板为 6 级, 金属第一级长 16mm, 宽度 0.5mm, 衬底厚度约 1mm; C 板

为 4 级，金属第一级长 8mm，宽度 0.5mm，衬底厚 1mm，衬底介电常数 5.2。

3.2 搭建调整仪器与测量

网络分析仪选用 1-10GHz 的校准文件，保证这一频段内的准确测量。先固定微波源在距离转角台中心 45cm 处，接收端在 90cm 处，让两个喇叭相对放置开口平行，不放置分形板时直接测量，将结果进行归一化，以此消除背景及实验条件变化的影响。此后将分形板放置在转角平台上后用木板夹紧，并固定转角台，保证分形板与喇叭口平行，即平面波垂直入射。之后可以开始进行测量，在网络分析仪上观测 S11 及 S21 参数的变化。为确定喇叭偏振方向，将 A 板成工字形放置，观测到 S21 曲线有两个谷，因此可以确定喇叭偏振方向垂直于水平面。应当注意，在每次实验条件改变后，都应尽可能的重新拿掉板子进行归一化。

4 实验测量结果与讨论

4.1 四级分形板远场测量结果

将接收端喇叭放置在距离分形板 90cm 处，A 板 x 方向（图 1（右）所示）与喇叭偏振方向一致放置，记录 S21 与透射相位，再将板子 y 方向与偏振方向一致进行一次测量，结果如图 2。

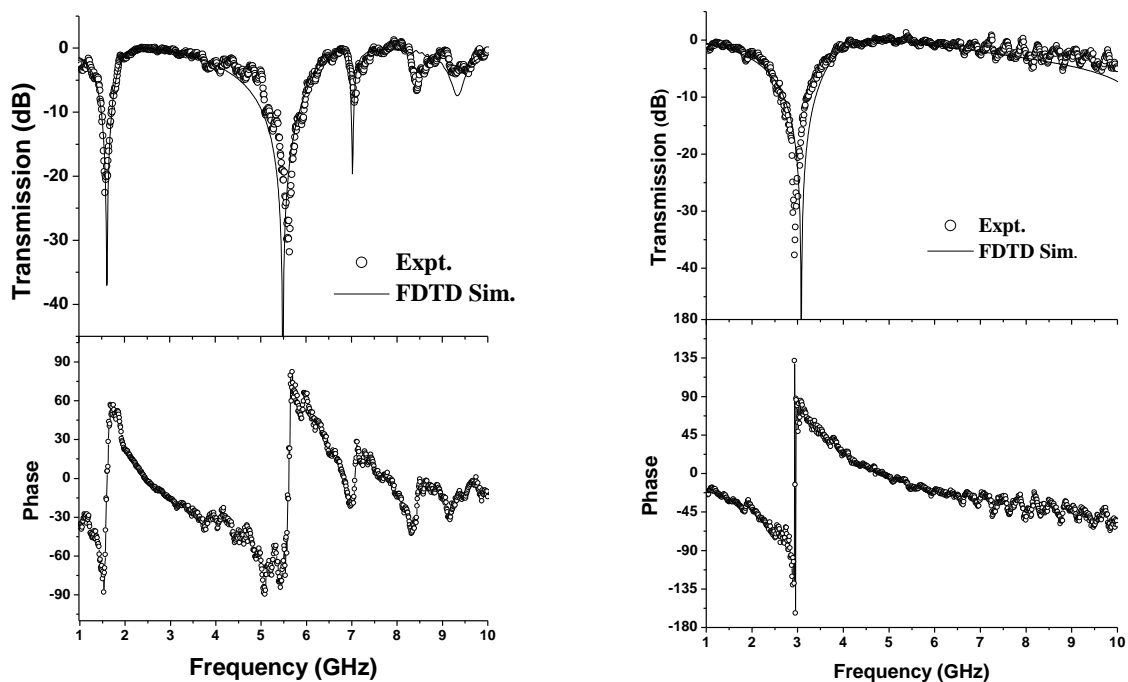


图 2（左）16mm 第一级长度四级分形板，电场 x 方向偏振时透射与相位谱线。

（右）电场 y 方向偏振时透射与相位谱线。圆点为实验点，实线为模拟数据。

从图 2 中我们可以看到，实验与 FDTD 模拟符合的相对较好。（左）中模拟的三个峰位置分别为 1.59GHz，5.51GHz，6.95GHz，实验三个峰值为 1.57GHz，5.56GHz，7.03GHz，位置已经非常接近，（右）中峰值模拟为 3.05GHz，实验值为 2.93GHz，也符合的不错。实验与模拟的峰位置还有些许差距，我们进行了几次比较模拟，如图 3 是金属棒不同厚度，不同宽度的对比模拟，可见，金属棒宽度和厚度会对峰位产生较小的频移，而且介质板和金属棒长度的微小不同也会对共振频率带来影响，因此这里的偏差很可能是由于加工过程中误差造成的。

在透射极小的位置，可以看到透射相位有个突变，这说明了共振行为的存在，即介电常数的发散带来相位突变。我们观察在 x 方向偏振时三个透射谷位置的场分布情况（图 3）。从图 3（右上）（左下）图中我们可以很清楚的看到，在 1.57GHz 与 5.56GHz 时第一级和第三级金属棒分别发生电共振，产生很高的场增强。但是 7.03GHz 的峰对应的场分布却并非共振行为，我们分析这是由介质表面周期性排列金属棒的布拉格散射造成的低透射。另外，我们还注意到透射曲线上很多位置都有一些小峰，这些小峰是由于 Fabry-Perot 共振效应产生的，电磁波在介质中往返一次的光程满足波长整数倍时会使得共振透射加强。

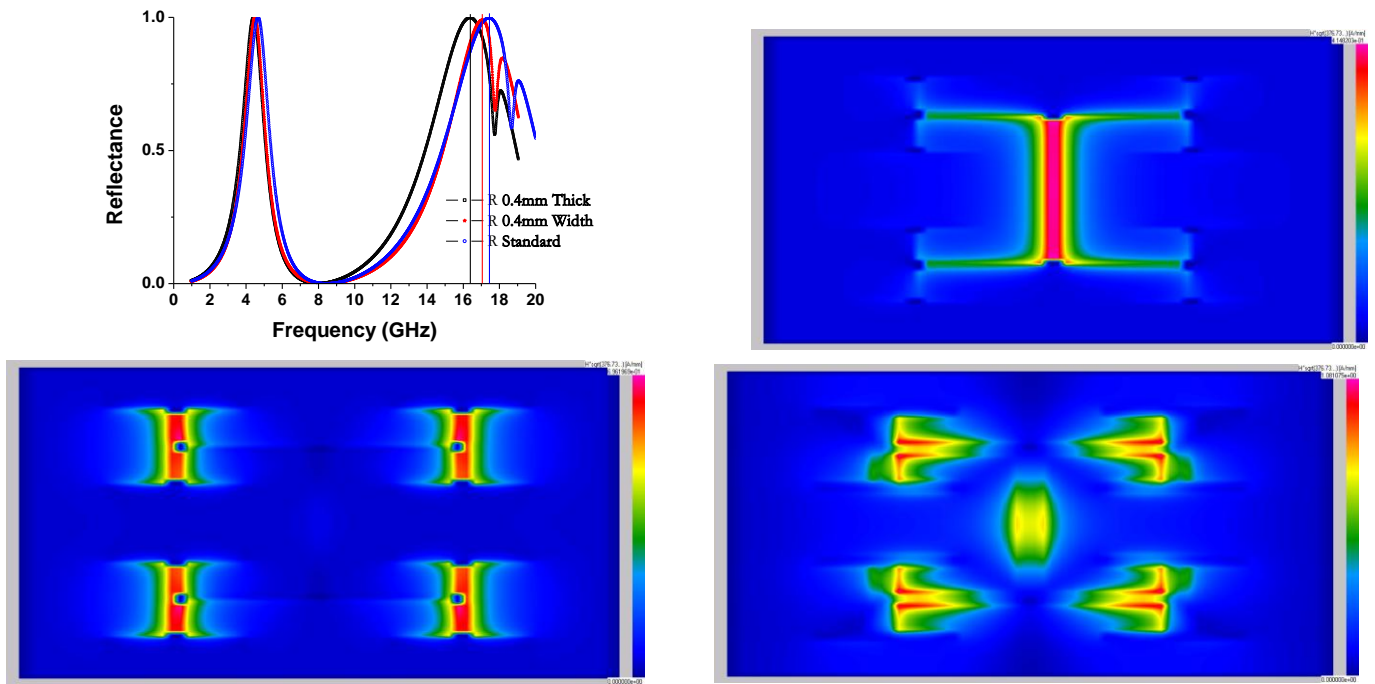


图 3 (左上) 不同厚度和宽度的金属棒的反射谱线。
 (右上) 16mm 四级分形板在 1.57GHz 时金属棒上场分布的 FDTD 模拟结果。
 (左下) 16mm 四级分形板在 5.56GHz 时金属棒上场分布的 FDTD 模拟结果。
 (右下) 16mm 四级分形板在 7.03GHz 时金属棒上场分布的 FDTD 模拟结果。红色到蓝色强度递减。

4.2 多级分形板共振峰规律

将 B 板与 C 板按照 3.1 中同样的实验条件进行测量，结果如图 4 所示。

图中空心圆为 B 板，空心方形为 C 板，实心圆为 A 板，实线为六级分形板的模拟结果。可以很清楚的看到，模拟与实验结果对应的比较好。x 偏振时，B 板的共振位置在 1.13GHz, 3.21GHz, 和 11.3GHz, 而 C 板共振位置 3.20GHz, 和 11.5GHz; y 偏振时，B 板共振 2.11GHz 和 5.81GHz, C 板 6.10GHz。除了 B 板在低频多一个峰外，其他峰相对较好的对应。这正说明四级 8mm C 板的透射谱线是六级 16mm B 板透射谱的一部分，因为 B 板多一级金属棒，故多一级共振峰。可以推断，六级板的场分布也将类似图 3 所示，每个共振峰位置对应沿电场偏振方向的金属棒的局域场增强。

同时我们以 B 板为例，反射峰近似满足准对数线性规律，即 $\log_{10} f_n \approx 0.5 \times (n-1) + \log_2 f_1$ ，其中 f_n 为从低频到高频第 n 个反射峰，级数越高共振频率越低。

比较 A 板与 B 板的共振峰我们发现，A 板的 1.58GHz 和 5.53GHz 共振峰为 B 板的一半，即共振金属棒长度缩短一半，产生共振的波长也应当相应缩小一半，即频率升高一倍。

上述三项规律可以概括为比例定律 (Scaling Law)，以此我们可以推断更高级或尺寸更短的分形板的共振峰位置。

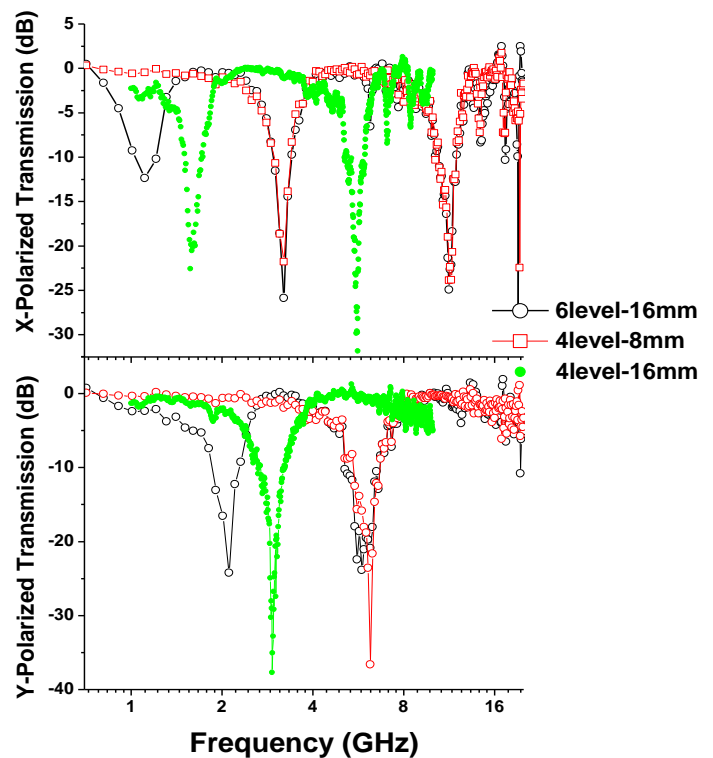


图 4 电场在 x 和 y 方向偏振时 6 级 16mm (圆圈) 4 级 8mm (方形) 4 级 16mm (圆点) 以及 FDTD 模拟 (实线) 的透射谱

4.3 金属棒近场效应测量

由 3.1 部分的模拟我们已经得到结论，高反射峰是由于相应金属棒电共振导致的。我们用小探针进行近场测量。测量对 A 板进行，发射喇叭放置在距离板 50cm 位置。进行测量前，先将探针放置于待测金属棒的中心位置，拿掉板子进行网络分析仪的归一化，然后放上板子，在小范围内移动探针，这时由于探针空间位置改变的影响将都在归一化过程中被消除。

如图 5 所示为探针距离金属棒距离与场强度的关系，距离由 d1 到 d4 逐渐增加。可见探针距离金属棒越近探测效率越高。由于近场测量容易后到噪声干扰，我们将板子有金属的一面背对发射喇叭，将小探针直接靠在金属棒上测量，这样小探针可以避免喇叭直接照射的干扰，又很近的贴住金属棒提高探测效率。我们在探针头上封上一层绝缘胶带，防止探针靠在金属上可能与金属中的局域电流发生短路。

我们首先测量分形板一级金属棒的近场增强效应。从一级棒下端到上端，间隔一定距离测量一次场增强，共测量六个点。我们将每个采样点测量数据中位于 1.56GHz 的数据取出（因为

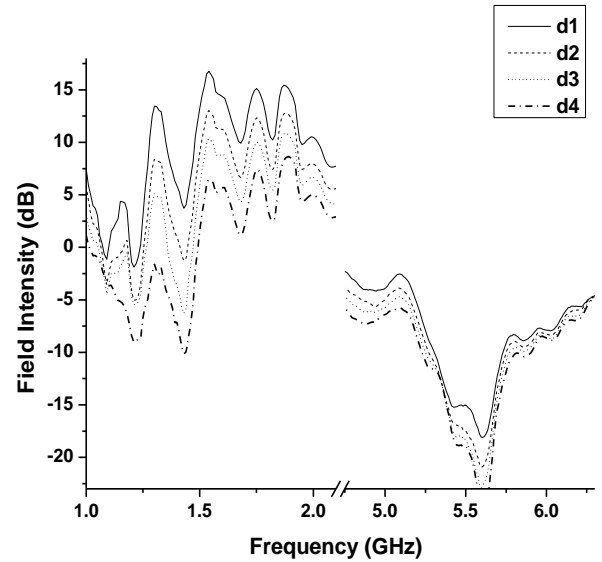


图 5 探针探测强度与离开板面距离的关系

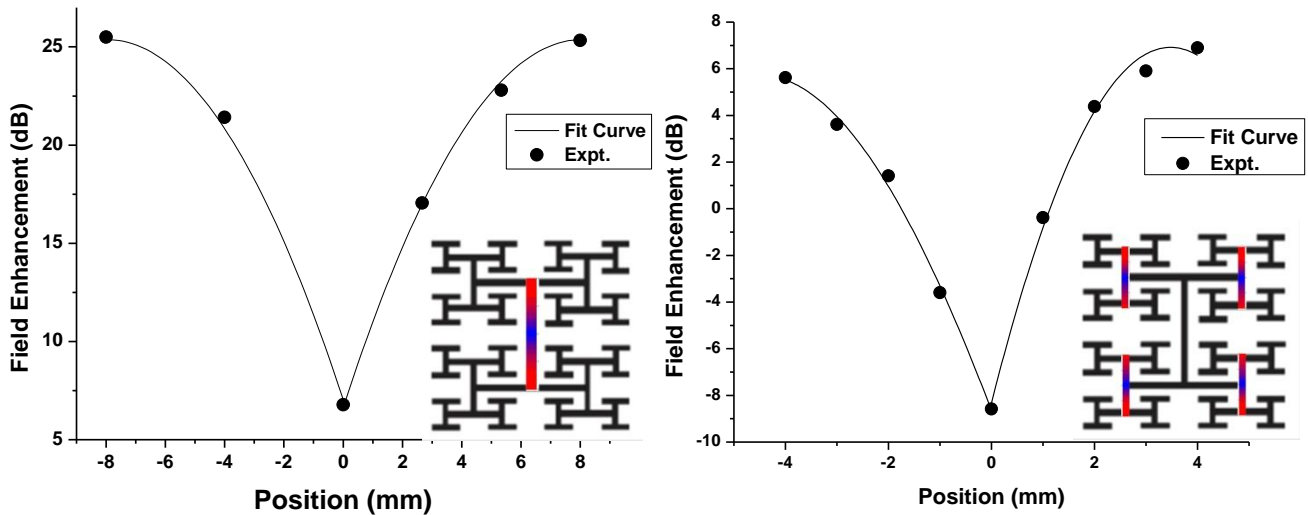


图 6（左）1.56GHz 时一级金属棒上场增强与位置的关系，
（右）5.61GHz 时三级金属棒上场增强与位置的关系，实线为拟合曲线，红色到蓝色强度递减。

1.56GHz 对应第一级棒的共振局域场增强），以采样点在金属棒上的位置为横坐标（棒中心为零点），做近场增强与金属棒上位置的关系。同样，我们对三级金属棒进行测量，在 5.61GHz 取九个测量点，如图 6（左）（右）。图中圆点为采样点数据，实线为拟合的曲线，示意图上为拟合数据在金属棒上场的相对强度，红色最强蓝色最弱。从图线上我们可以看出，金属棒上的场增强为正弦型，是电场在金属棒中形成了简谐振荡，金属棒中点为场振荡的节点。对比图 3 中的模拟结果，三级棒对应的较好，一级棒中心点模拟中没有显示为节点，而实验测量为正弦型。

4.4 分形板透射绝对禁带

采用与 3.1 实验相同的实验条件，保证分形板垂直于水平面，但是在水平面内转动一个角度以改变入射角，测量远场的透射特性，如图 7（左）为入射角分别为 0 度到 60 度在第一个反射峰附近的透射谱。（右）为在 1.57GHz 反射峰处透射与角度的关系。可以看出随着入射角的增加，反射率减小，但是我们注意到，在 1.57GHz 的电共振位置，反射依然很强，这说明在 1.57GHz 处形成光子绝对禁带，即反射峰位置不随入射角变化，而且反射率也都较高，在 -14dB 以下。而且随着角度增大，反射峰宽度增加，即光子绝对禁带宽度增加。

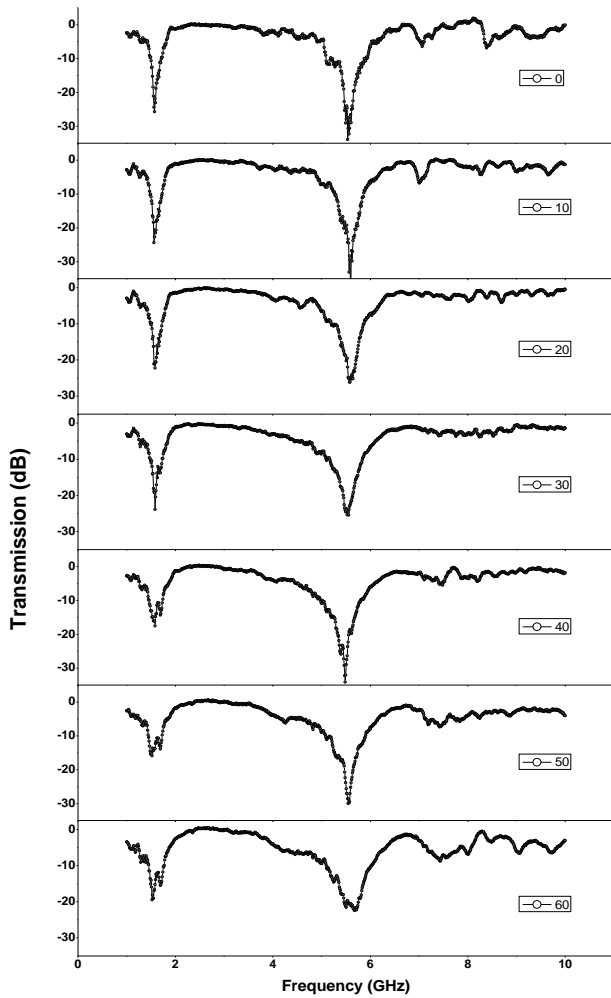


图7 (左) 16mm 四级分形板不同入射角入射时的透射谱线, (右) 在 1.56GHz 处透射率与入射角的关系

当我们将两块分形板叠加在一起的时候测量其透射率, 当叠加 B 板 (16mm-6 级) 与 C 板 (8mm-4 级) 时, 如图 8 (左) 中实线, 我们发现其反射峰位置变化较小, 而且同时反射谷的深度显著增加。但是将 AB 板或 AC 板叠加时没有这种现象, 而且谷变浅, 如图 8 (右)。我们还应注意到, 图 8 (左) 中的数据是 C 板的四级分形金属棒与 B 板六级金属棒的 3-6 级部分重合时测得的, 如果不重合时如图 8 (左) 中的圆点所示, 反射谷深度有明显上升, 而且位置有了明显移动。我们可以认为, 当尺寸相同的分形金属完全重合叠加时可以加宽透射近代, 而且我们可以更明确高反射是由于局域场增强造成, 完全重合叠加可以增强局域场增强的效应。

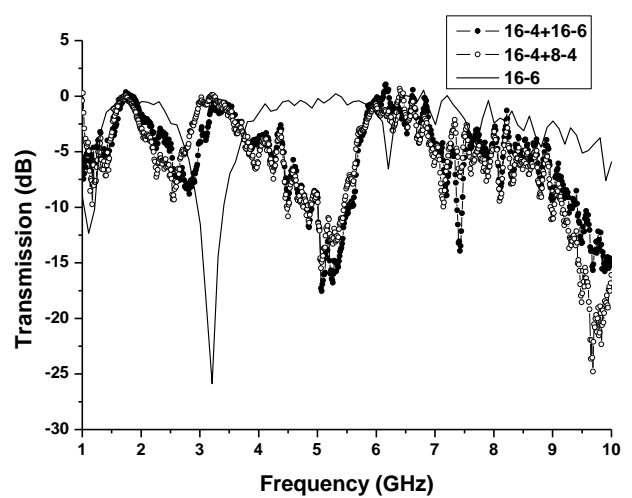
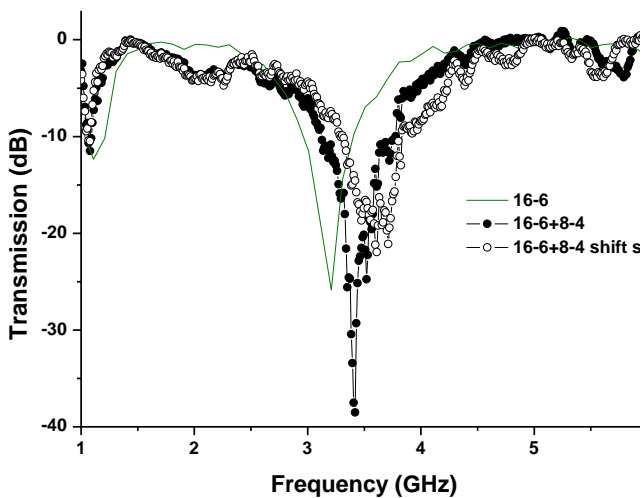


图8 (左) 16mm 六级分形板与 8mm 四级分形板叠加时透射谱线

(右) 16mm 六级与 16mm 四级叠加及 16mm 四级与 8mm 四级板叠加透射谱, 实线为单层 16mm 六级板。

5 结论

我们通过微波实验，研究了金属分形板这一亚波长电磁特异介质对于电磁波传播特性的影响，并且用 FDTD 方法进行了模拟对比。我们发现金属分形板在特定的频率可以对入射电磁波产生高反射，并且通过不同长度不同级次的分形板透射谱线归纳出了比例定律，藉此可以推断更高级和不同长度分形的高反射频率。我们又通过近场效应测量，确定了这一高反射现象是由于局域场增强造成的。最后我们研究了共振现象对于电磁波入射角度和板叠加的关系。

参考文献

- [1] Nicholas Fang et al, Ultrasound Metamaterials with Negative Modulus, Nat. Mater. 1644
- [2] Jiaming Hao et al, Manipulating Electromagnetic Wave Polarizations by Anisotropic Metamaterials, Phys. Rev. Lett. 99 063908
- [3] Lei Zhou et al, Electromagnetic Wave Tunneling Through Negative-Permittivity Media with High Magnetic Fields, Phys. Rev. Lett. 94 243905
- [4] Lei Zhou et al, Theoretical studies on the transmission and reflection properties of metallic planar fractals, J. Phys. D 37, 368-373
- [5] Weijia Wen et al, Subwavelength Photonic Band Gaps from Planar Fractals, Phys. Rev. Lett. 89 223901

Experimental Study on Subwavelength Metamaterial

Yaoxuan Li, Juan Yao, Yongkang Le
Phys. Dept. Fudan Univ. 200433

Abstract

We systematically studied on subwavelength metamaterials controlling electromagnetic wave, through both experiment in microwave frequency regime and numerical simulation. The metallic planar fractal could lead to high reflection at specific frequencies for electromagnetic wave. This phenomenon can be described as scaling law. We ensure this phenomenon is governed by local resonance field enhancement, by a series of near field measurement. And the resonant frequencies is independent on incident angles and stacked layers.

Key words Metamaterial High reflection Scaling law Local resonance field enhancement