

# 亚波长电磁波隧穿\*

温 维 佳<sup>†</sup>

(香港科技大学物理学系 九龙清水湾 香港)

**摘 要** 文章介绍一种具有亚波长隧穿特性的电磁波人工复合材料. 这种材料由具有不同特性的层状材料组成一“三明治”多层复合体, 即 ABA 板. 其中夹心板 B 为一完全阻挡电磁波的金属网(具有负介电常数  $-\epsilon$  的金属亚波长网格), 而两夹板 A 可以由具有周期排列的正介电常数( $+\epsilon$ )或负磁导率( $-\mu$ )的单元体构成. 当电磁波入射此“三明治”体时, 特定频率的电磁波会透过而产生透带. 这种具有亚波长隧穿的现象实际上是由夹板上单元体的局域谐振诱导各层间电磁场增强引起的.

**关键词** 亚波长隧穿, 负磁导率, 微波功能材料

## Subwavelength tunneling of electromagnetic waves

WEN Wei-Jia<sup>†</sup>

(Department of Physics, The Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong, China)

**Abstract** We describe an electromagnetic (EM) composite material that possesses subwavelength tunneling characteristics. The sample is constructed as a multilayered "sandwich" i. e., ABA structure. The core plate is a metallic mesh with holes subwavelength in size compared to the incident EM wavelength, while the two outer layers are fabricated with units of periodically arranged positive dielectric permittivity or negative magnetic permeability. Up to 100% transmission of normally incident EM waves has been demonstrated in the microwave regime through such "sandwiches" at certain frequencies, forming so called "passbands". The phenomenon of subwavelength tunneling is caused by the electromagnetic enhancement at and between the interfaces of the different layers, induced by local resonances of the two outer plates.

**Keywords** subwavelength tunneling, negative permeability, microwave functional materials

电磁波在人工结构材料中传播时产生的新颖物理现象最近引起许多研究工作者极大的兴趣. 其中最引人注目的是最近报道的几种电磁波亚波长穿透实验现象以及相关的理论模拟计算. 比如, 一种同时具有负介电常数和负磁导率的被称之为“左手”材料的复合材料<sup>[1, 2]</sup>. 而这种材料的单一介质对电磁波是不具有传播特征的. 另一种材料是由 Ebbesen 等人合作制备的所谓“表面等离子体”诱导的亚波长透明金属膜, 在孔径尺寸比入射波小很多的情况下仍然可以观察到光的透射现象<sup>[3, 4]</sup>. 除此之外, 由 Feby - Perot 机理引起的狭缝电磁波透射增强也有许多报道<sup>[5, 6]</sup>. 这里我们介绍另一种电磁波亚波长

透射, 即所谓的“谐振诱导的亚波长透射”现象<sup>[7-10]</sup>.

如图 1 所示, 这种具有亚波长透射样品实际上是一个类似“三明治”结构的多层复合材料, 亦称为“ABA”结构材料. 夹心 B 板是一金属网, 其网格是由线宽 0.5mm 的金属线组成. 每个网孔面积是  $3.5 \times 3.5 \text{mm}^2$ . 其中夹板 A 板可以由不同种类的人工结构材料构成. 这里我们将介绍三种结构方式, 即分形

\* 本文内容涉及多人合作的结果. 合作人有: 沈平、陈子亭、周雷、侯波、Alex Wong

2005-08-01 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: phwen@ust.hk

结构 (fractal)、H 形结构以及开口金属圈 (split ring) 结构. 其中前两种可以用印刷电路板制备, 第三种则可用金属线绕制而成. 一般来讲, 为了获得足够强的信号, ABA 结构中的 A 板是由多个分形 (H 形或金属圈) 单元有序排列而成. 图 1 是一个具有分形结构单元的实验示意图. 这里分形结构的定义请参阅文献 [7, 11, 12]. 实验使用了两种分形夹板, 称为 A 板. 一种是分形槽 (fractal slits) 结构, 即可在金属膜中用光刻方法制备而成; 另一种是互补结构, 即用金属分形线取代分形槽, 在本文中我们又称此结构为 C 板 [13].

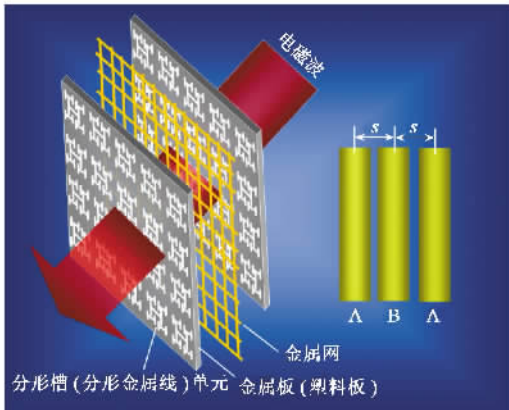


图 1 实验“三明治”样品结构示意图

图 2 (a) 是分别对实验样品 A、B 以及 ABA 结构在频率为 1—10GHz 范围的透射率实验结果. 自由空间的透射率被归一化为 1. 从实验曲线可以看出, 微波是无法穿透具有分形槽单元的金属板 A, 但对某些特定的频率, 微波又可以 100% 地透过. 值得注意的是, 此金属板分形槽最长的开口是 1cm, 而最低的透过频率为 1.1GHz (波长 > 20cm). 这说明此分形结构具有亚波长穿透特性. 我们在文献 [11] 中提到, 这种透射实际上是由于分形槽单元在入射电磁波作用下的谐振引起的. 另外, 由于金属网 B 的网格孔径远比波长小, 故在所测量的频率范围内对微波起阻挡作用, 仅在高频下约有透过. 令人惊讶的是, 当 ABA 组成一个类似“三明治”的结构, 即组成 ABA 复合结构时, 情况就大相径庭了, 从图可以看到, 此时有几处明显的透带出现. 而这些透带的位置分别位于 A 板透带的右边, 并且随频率的增加, 透射强度逐渐减小, 而频带宽度随之增加. 如果在上述结构中用 C 取代 A 板, 我们可以观察到两个显著的区别, 一是对 C 板而言, 除了几个特定的频率外, 其他频率都能透过, 而形成所谓的“禁带”; 二是 CBC 结构的透

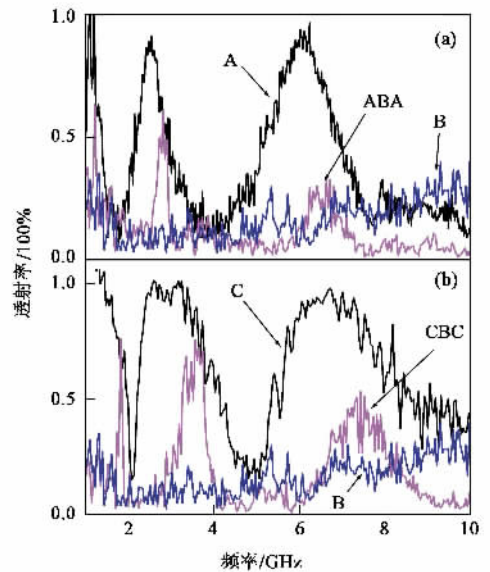


图 2 分形槽 A、金属分形线 C、金属网 B 以及由它们分别组成的“三明治”样品在微波正入射下的透射曲线

带位置都位于 C 板“禁带”的左边 [见图 2 (b)].

为了理解上述 ABA 和 CBC 结构的微波的穿透机制, 我们设计了最简单的“H”型结构. 由于“H”型不具有高阶分形级, 故其只能观察到单一的“透带”或“禁带”, 这对于了解“三明治”结构材料的透射情况有很大的帮助. 图 3 为具有“H”单元结构的 A 和 C 板的测试结果. 测试结构清楚地表明, 具有“H”型分形结构的 A 板在频率 4.2GHz 处有一个 100% 的透带, 而 C 板在 4.2GHz 频率处有一禁带发生. 当组成 ABA 或 CBC“三明治”复合结构时, 两种情况均有透带. 与前面多级分形结构一样, ABA 结构的透带出现在 A 板导带的右边, 而 CBC 结构的导带位于 C 板禁带的左边. 与此同时, 我们对此实验结果进行了数字模拟计算, 在模拟中金属膜作为良导体, 适合金属/空气界面条件. 其结果如图中实线所示. 可以看到, 模拟结果与实验结果十分吻合. 我们发现, CBC 结构的透带实际上是由于在电磁场作用下, 电场分量在“H”金属线引起了局域电磁共振, 从而增强了 CB 或 BC 界面的电磁场强度. 这种电磁共振增强的结果使位于 C 板“禁带”左边电磁波隧穿. 相反地, 对于 ABA 结构而言, 由于 A 板是 C 板的反演图案, 根据 Babinet 原理 [12], 其金属板的“H”型槽中会激发所谓的“磁共振”, 从而引起“透带”出现. 由于 A 板“磁共振”的作用, 当组合成 ABA 结构时, 即可观察导局域“磁共振”引发的电磁波隧穿. 而这种隧穿的“透带”位于 A 板“透带”的右边.

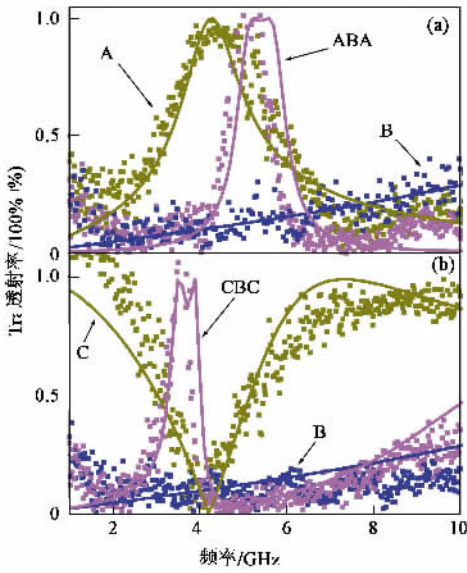


图3 H槽及H金属线以及由它们分别组成的“三明治”样品在微波正入射下的透射曲线(其中点和实线分别代表实验和理论模拟结果)

从图3实验和数字模拟结果可以看到,“电共振”(金属线结构)的“禁带”与“磁共振”(空心槽)板引起的“三明治”结构材料的电磁波隧穿的“透带”位置特点归于其夹板A和C的性质.是否可以制备一种“三明治”结构达到同时观察到“磁共振”和“电共振”引起的双共振隧穿效应呢?答案是肯定的<sup>[14]</sup>.

如图4的插图所示为具有双共振隧穿效应的“三明治”结构样品的示意图.其中共振板以周期排列的开口方形环代替上面的A或C分形单元.由于方形环是在图示极化的电磁场作用下其交变磁场穿过环而引起诱导交变电磁场.由于谐振板上单元环周期排列结构而导致各单元诱导电磁场之间的耦合,从而使得某些特定频率的电磁场无法通过而形成“禁带”.这些“禁带”有不同的物理特征,一般来讲,低频“禁带”是由“磁共振”引起,此“禁带”的位置对开口环之间周期(即环与环之间的相对位置)不十分敏感,是由“单元环”的特性决定(比如与环的大小,形状有关).而高频所观察到的“禁带”对周期常数非常敏感<sup>[14,15]</sup>.实验和模拟计算都发现,如果改变“周期常数”,其高频禁带的位置会随频率的改变而移动.图4中红线所示为具有“开口环”排列的谐振板在对入射电磁场的频率响应曲线.如上所示,低频“禁带”3.3GHz是由磁共振引起,而高频出现的“禁带”10.3GHz是由电共振引起.当将两块

相同的“开口环”结构共振板与一金属网组成一个“三明治”结构时,可以观察到两个明显的“透带”,如图中蓝线所示.其中低频“透带”位于磁共振板中低频“禁带”的右边,而高频“透带”出现在共振板“禁带”的左边.另外,我们还观察到,当共振板与金属网之间的距离s增加时,磁共振引起的透穿会消失,而电共振透穿的相对透射率会随之减小.

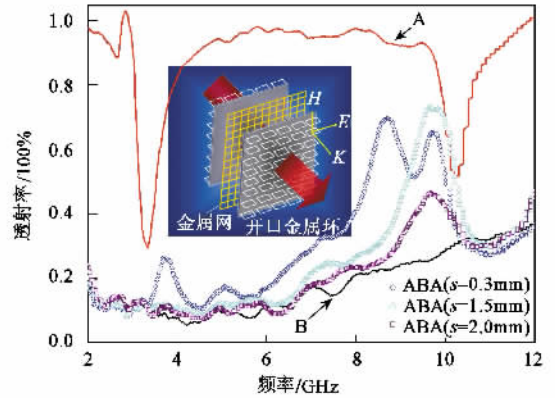


图4 开口金属环,金属网以及“三明治”样品在微波正入射下的透射曲线

经过分析,我们发现,实际上“三明治”人工微波材料的透穿效应是由于在电磁波作用下局域谐振诱导板与板(A与B或C与B)之间的电磁场增强引起的.作为例子,我们在图五中示意性的画出了在透射峰频率处磁场强度在“三明治”结构中的分布.对称的ABA结构允许两种可能的隧穿共振,一种场分布是奇对称的,一种场分布是偶对称的,分别对应于图五中的两条曲线.我们可以看到,两种分布下磁场在板与板之间都有一个强烈的提高.一个界面上高的感应磁场激励出金属网另一侧的磁场,继而重新辐射出去,导致了观察到的亚波长电磁隧穿.在不同材料参数的板之间激发出很强的感应磁场是此类“三明治”结构发生完美透射时典型的特征.

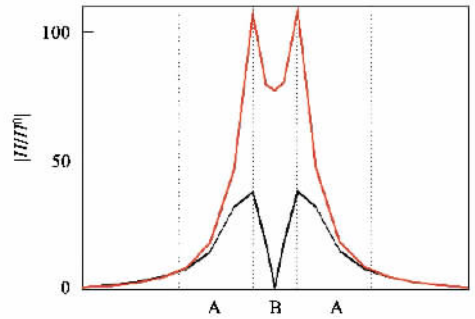


图5 “三明治”结构中层板间的磁场分布曲线

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1996 , 76 : 4773
- [ 2 ] Smith D R , Padilla W J , Vier D C *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2000 , 84 : 4184
- [ 3 ] Ebbesen T W , Lezec H J , Ghaemi H F *et al.* Nature ( London ) , 1998 , 391 : 667
- [ 4 ] Thio T , Pellerin K M , Linke R A *et al.* Opt. Lett. , 2001 , 24 : 256
- [ 5 ] Takakura Y. Phys. Rev. Lett. , 2001 , 86 : 5601
- [ 6 ] Went H E , Hibbins A P , Sambles J R *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2000 , 77 : 2789
- [ 7 ] Wen W , Zhou L , Li J *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2002 , 89 : 223901
- [ 8 ] Zhou L , Wen W , Chan C T *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2005 , 94 : 243905
- [ 9 ] Wen W , Yang Z , Xu G *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2003 , 83 : 2106
- [ 10 ] Hou B , Xu G , Wen W. J. Appl. Phys. , 2004 , 95 : 3231
- [ 11 ] Wen W , Zhou L , Hou B *et al.* Phys. Rev. B , 2005 , 72 : 153406
- [ 12 ] 温维佳 沈平. 物理 2004 , 33 : 106 [ Wen W , Sheng P. Wuli ( Physics ) , 2004 , 33 : 106 ( in Chinese ) ]
- [ 13 ] Wen H , Hou B , Leng Y *et al.* Opt. Express , 2005 , 13 : 7005
- [ 14 ] Hou B , Wen H , Leng Y *et al.* Appl. Phys. Lett. , to appear
- [ 15 ] Qi Y , Hou B , Wen W. J. Phys. D : Appl. Phys. , 2005 , 38 : 590

## · 物理新闻和动态 ·

## 地球内核的运动

地球的内核是固态的铁和镍组成的半径约 1280km 的高密度球 , 外面由 2210km 厚的液态金属外核包围着 . 再外面是熔岩组成的地幔 , 厚约 2850km . 最外层的地壳厚度不到 100km . 一般认为地球的磁场是由外核与地幔的旋转产生的 .

像电磁波一样 , 地震产生的震波在两种不同的介质的边界处会发生折射 . 因此 , 通过探测地震在地球的另一面产生的震波可能抽取关于地球内部情况的信息 . 美国的几位学者对在同一地点但不同时间发生的一对地震所产生的震波进行了比较 . 他们研究了在南大西洋的 South Sandwich 岛发生的 18 对地震所产生的震波 , 在阿拉斯加及其附近的 58 个地震观测站进行了探测 . 在这些地震对之间的最大时间间隔是 35 年 . 每一次地震产生一个称为 " 波形 " 的特征信号 .

他们发现 , 当震波不通过地球内核时 , 成对地震产生的两个震波的波形是相同的 . 但是如果震波通过了内核 , 并且两次地震相隔 4 年以上 , 那么两个波形是不同的 . 这意味着在这期间震波所通过的路径上一定发生了某种变化 .

研究人员说 : " 这清楚地表明 , 内核在相对地幔和地壳移动 . " 他们下一个目标是建立一个更好的关于地球内核的模型和更详细地探究内核的转动情况 ( 有关论文发表在 Science , 2005 , 309 : 1357 上 ) .

( 树华 编译自 Physics web news 25 August 2005 )

## 追踪多孔介质内流体的流动

美国加州大学伯克利分校的 Lawrence 国家实验室的 J. Granwehr 和 Yi - Qiao Song 两位科学家最近用核磁共振成像 ( MRI ) 测试仪完成了对多孔介质内流体流动状态的追踪观察 . MRI 的重要性就在于它能对软物质 ( 如生物组织 ) 或潮湿的硬物质 ( 如岩石微粒 ) 的表层下的结构进行观察 . 现在科学家们在 MRI 上创造了一种新的模式 , 可以用来观察流体是如何在多孔介质内部进行流动的 . 这个方法特别适用于石油勘探 , 因为在石油开采中在某些固定位置监测流体在这些不透明的、天然或人造的结构内的流动过程是非常重要的 .

为了达到这个目的 , 研究组在原有的 MRI 上安置了两个分离的感应线圈 . 通常的 MRI 是用感应线圈的感应磁场来扰动样品内原子核的取向 , 随后用同一个感应线圈来接收由靶核反射回来的无线电波以确定靶核所处位置的信息 . 伯克利研究组是将一个感应线圈放在样品的周围 , 并结合磁场梯度能有选择性地扰动处于样品内某一小区域的流体核 , 再让第二个感应线圈安置于样品的出口处来探测突然出现的物质 . 这样第一个线圈可用来确定在某一时刻下某些特定核的位置 , 而第二个线圈可用来记录下受到扰动的核飞离样品的时间 . 在确定了多孔介质内任意部分流体的位置与速度后 , 科学家们就不难得到流体在介质内的流动与演化 . 同时还可调整测试的压力与时间分辨率 , 前者的可调范围为几毫巴到 1 巴 , 后者是从十几微秒到毫秒的范围 .

( 云中客 摘自 Physics News Update , 5 August 2005 )