

# 亚波长分形结构光子带隙研究实验报告

史硕材料物理 08300300057 组号: B4 合作者: 吴瑕玉 实验日期: 2010.12.9-2010.12.23

## [实验目的]

观察单层分形结构材料的透射特性并研究其产生原因，同时研究两层或多层分形结构材料叠加对其透射特性的影响。

## [实验原理]

微波是指频率为 300MHz-300GHz 的电磁波，是无线电波中一个有限频带的简称。

光子带隙材料 (PBG) 可以在特定的频域内反射任意角度入射的电磁波，以此可以像半导体对于电子一样实现对光子的调控。但传统的光子带隙材料利用布拉格散射原理来产生禁带 (forbidden band gap)，为了减小边界效应，材料的厚度和边界尺度必须是波长的几倍。比如，频率为 1GHz 的微波波长为 30cm，波长的几倍就要超过 1m，这显然不实用。选频材料 (FSS) 利用一些金属单元周期性排列来产生对于相应波长电磁波的全反射或者全透射，但这种材料仅仅对于单一频率范围有效。

然而分形结构材料可以突破这些限制，实现以低于波长的尺度来产生多重光子带隙，在微波方面有很广泛的应用。

在理论方面的研究可使用时域有限差分法(FDTD, finite-difference-time-domain)进行模拟。FDTD 算法是 K.S.Yee 于 1966 年提出的、直接对麦克斯韦方程作差分处理、来解决电磁脉冲在电磁介质中传播和反射问题的算法。基本思想是：FDTD 计算域空间节点采用 Yee 元胞的方法，同时电场和磁场节点空间与时间上都采用交错抽样；把整个计算域划分成包括散射体的总场区以及只有反射波的散射场区，这两个区域是以连接边界相连接，最外边是采用特殊的吸收边界，同时在这两个边界之间有个输出边界，用于近、远场转换；在连接边界上采用连接边界条件加入入射波，从而使得入射波限制在总场区域；在吸收边界上采用吸收边界条件，尽量消除反射波在吸收边界上的非物理性反射波。

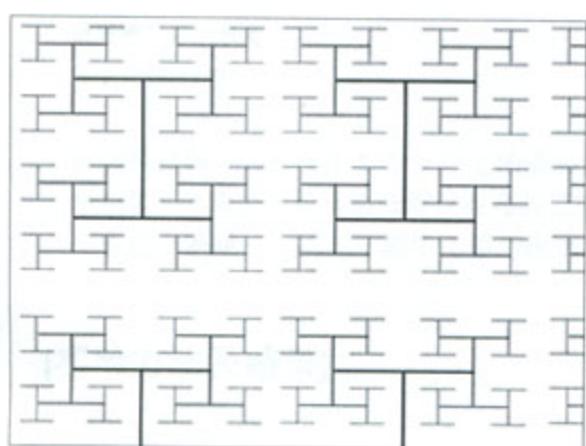


图 1.6 级分形板局部简图

### 1. 分形

数学上，分形是指任意大小的子图形与原图形完全一样的图形。我们研究的结构是一种以线段为基本单位，类似“工”字型的分形，图 1 为 6 级分形板的局部简图。

考虑左上角的重复单元。垂直方向的最长一条为分形的第一级，长度记为  $a$ ，水平方向最长为第二级，长度也为  $a$ ；

垂直方向次长的四根为第三级，长度为  $a/2$ ，依此类推，分形的第  $n$  级有  $2^{n-1}$  根，长度为  $a/2^{\frac{n-1}{2}}$

### 2. 比例定律

比例定律是指某种结构如果尺度扩大一倍，那么相应的频率需要缩小一倍。

## [实验仪器]

实验采用矢量网络分析仪对分形板进行扫频测量其透射系数(S21), 通过做出透射系数-频率的图线来研究分形材料的频率特性。在研究其频率特性形成原因时使用电脑控制探针位移来测量。

以下为实验仪器照片



放置板子后的状态

图 2. 实验仪器

在实验过程中, 发现在  $17\text{GHz}$  以上的高频范围内, 毛刺多为相似的位置且在某一位置有远超过 1 的透射率出现, 可能为矢量网络分析仪在高频范围内不稳定; 除此之外, 在低频处,  $10\text{MHz}$  附近的图线不稳定, 一直在不断跳动, 因此实验中主要考虑  $1\text{GHz}-17\text{GHz}$  范围内的透射特性。

## [实验方法及结果]

### 1. 验证比例定律

实验室有一块  $a=8\text{mm}$  的 4 级分形板, 以及一块  $a=16\text{mm}$  的 4 级分形板, 后者的图形线宽以及板的厚

度也都是前者的两倍，构成尺度扩大一倍的关系。图 3 为 8mm4 级分形板在 0-20GHz 的透射特性，在 3.208GHz 以及 11.404GHz 处有两个明显的带隙；图 4 为 16mm4 级分形板在 0-10GHz 的透射特性，在 1.609GHz 以及 1.627GHz 处有两个明显的带隙，对比发现 16mm 的 4 级分形板在 0-7.5GHz 的透射特性曲线与 8mm 的 4 级分形板在 0-15GHz 的曲线基本吻合，即为比例定律。

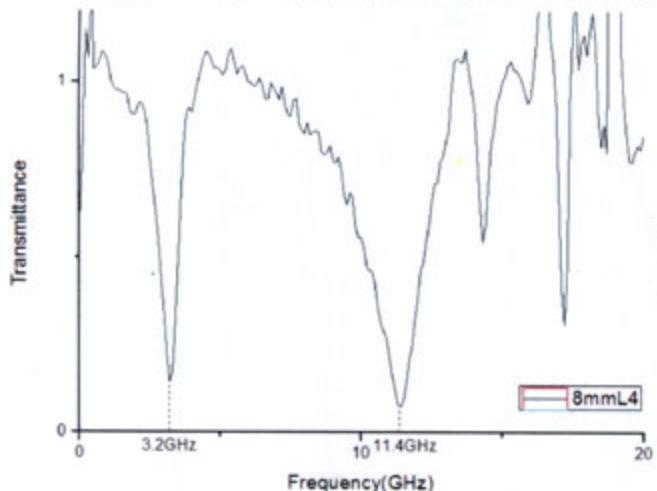


图 3.8mm4 级分形板在 0-20GHz 的透射特性

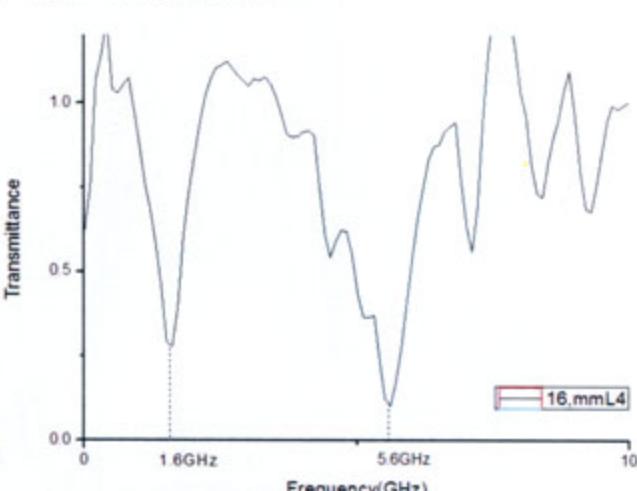


图 4. 16mm4 级分形板在 0-10GHz 的透射特性

## 2. 观察不同级分形板的透射特性以及对多重带隙产生原因的研究

若是 8mm4 级板、16mm6 级板、8mm4 级板与 8mm6 级板叠加以及 8mm4 级板、16mm6 级板和 16mm4 级板三层叠加透射特性一同比较，如图 8 所示：

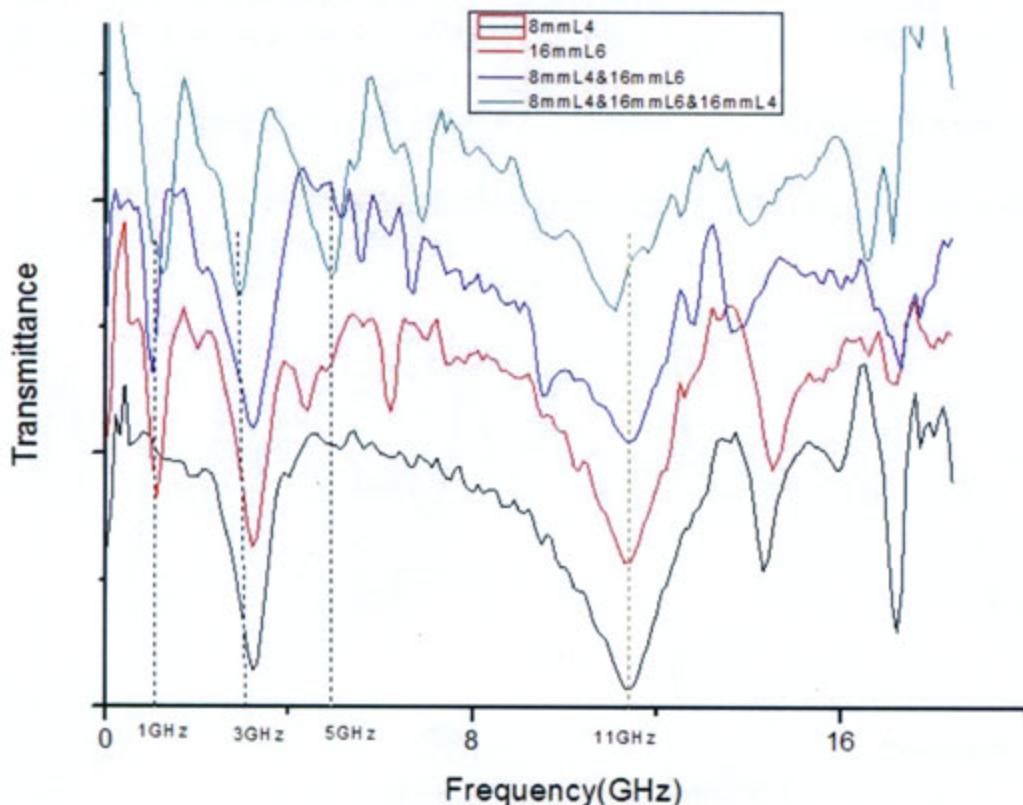


图 8(a). 8mm4 级板，16mm6 级板，两者叠加以及加上 16mm4 级板三块叠加的透射特性比较[平移后对比]

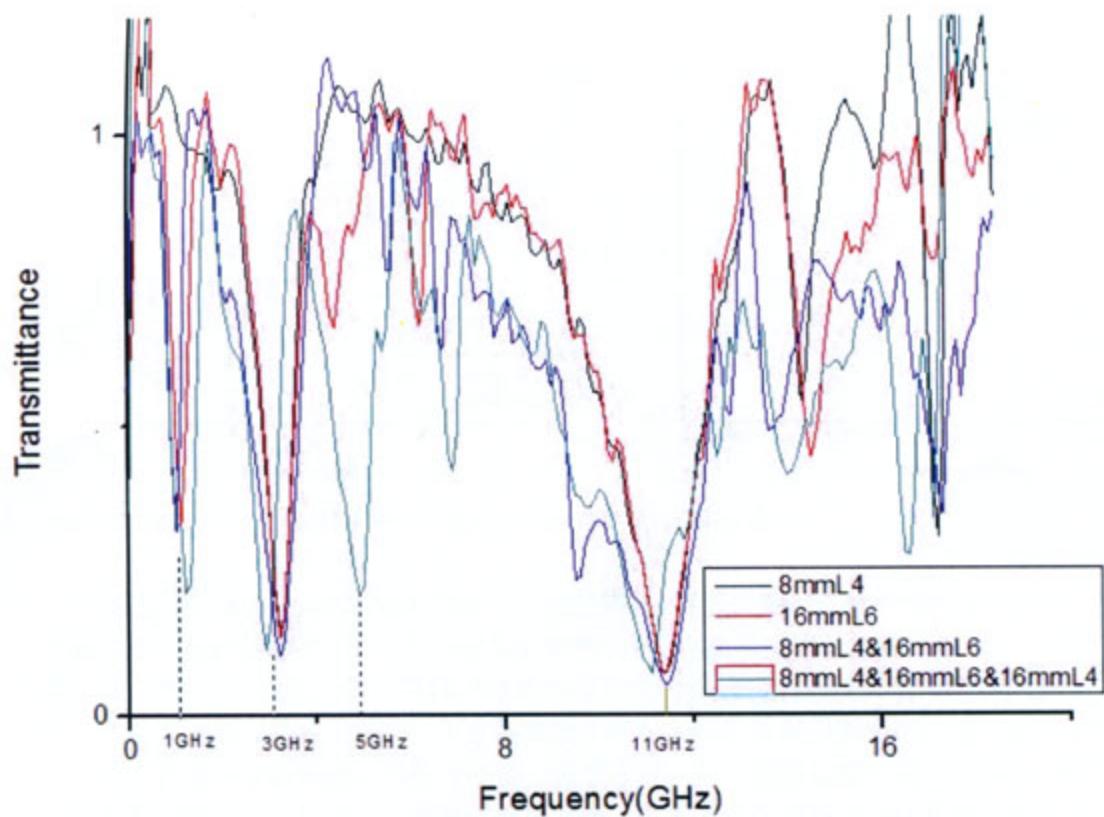


图 8(b). 8mm4 级板, 16mm6 级板, 两者叠加以及加上 16mm4 级板三块叠加的透射特性比较[峰位对比]

8mm4 级板和 16mm6 级板的差异只在于 6 级板  $a=16\text{mm}$  的第一级和第二级, 通过观察对比图也可以发现只有在低频区域 6 级板多了一个带隙, 其余部分都基本吻合, 可见低频区域的带隙对应于 6 级板的第一和第二级, 这一结果也和比例定律相关联。

可以确定, 16mm 的级次对应的带隙频率为 1.1095GHz, 对应的波长为 270.4mm。

为了进一步研究分形板产生特殊透射特性的原因, 我们使用探针测量了 16mm4 级分形结构每一级中心点的透射特性, 如图 9-图 11 所示:

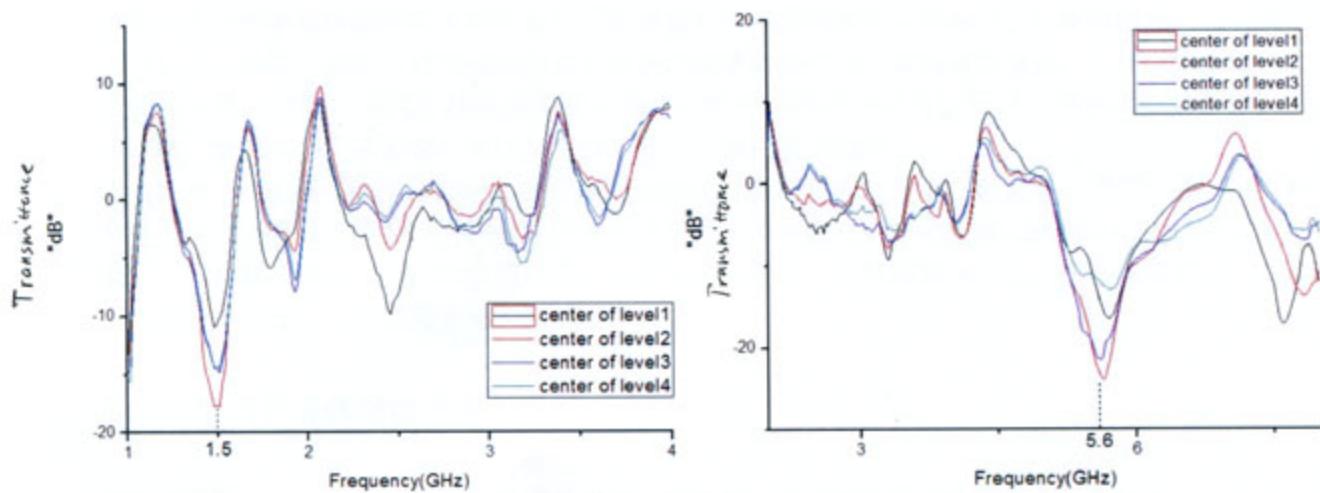


图 9. 1-4GHz 范围内各级中心透射特性图 10. 2-8GHz 范围内各级中心透射特性

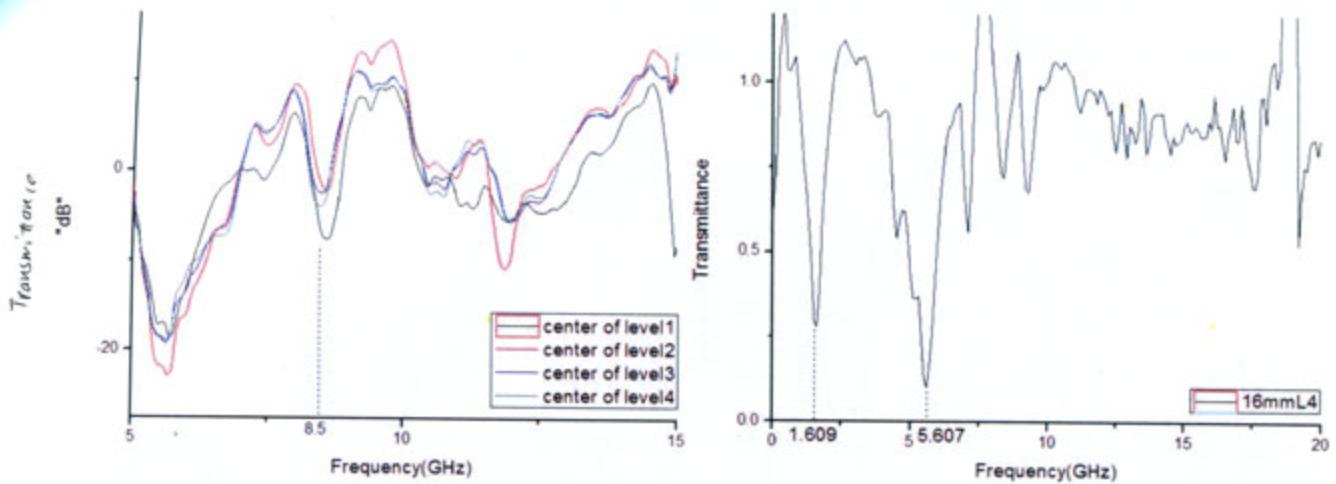


图 11. 5-15GHz 范围内各级中心透射特性图 12. 16mm4 级分形板平均透射特性

结合图像看，图 12 为 16mm4 级分形板平均透射特性，寻找带隙对应频率值得 1.609GHz, 以及 5.607GHz 处有极小值。图 9 主要研究第一个带隙与结构的关系，在波形上明显体现出第一级中点时透射率最大，到第二级时最小，而到第三级与第四级时则均居中间，这一变化说明第一个带隙与 16mm 的级次相关，而具体关联的原理还不是很清楚，在查阅文献了解相关知识后我们猜想也许是因为两条第二级产生了振幅相同但相差为  $\pi$  的响应，当探针在第一级中点时，第一级的长度与第二级相当，响应也很强，因此透射系数很高；当探针位于一条第二级中点时，因为另一条的响应与这条相位差为  $\pi$ ，因而产生抵消，响应强度降低，因此透射系数明显降低，而到了第三与第四级中点时，因为探针主要位于第二级的一端附近，因而变化并不大，且三条主要响应互相叠加既不是最小也不是最大，所以带隙底的值也位于第一级带隙底和第二级带隙底之间。

图 10 则主要研究第二个带隙与结构的关系。从图上可以看出在第二级中点与第三级中点带隙值均很小。与图 9 的分析类似，可以看作两条第二级两端的第三级以及 8 条第四级每两条一组都产生了振幅相同但相差为  $\pi$  的响应，因此在第三级中点时第四级的作用正好抵消。虽然第三级仍有响应，但同组的第三级仍有相差为  $\pi$  的响应，透射强度相对于正好完全抵消的第二级只是略有增强。在探针位于第一级中点以及第四级中点时产生较大带隙值的原因还不能清楚地解释，目前的猜想是两条第四级的响应是关于第一级的中垂线对称的，即靠近第一级中垂线的四条第四级是振幅相同相位也相同的响应，而远离第一级中垂线的四条第四级是与另四条振幅相同但相差为  $\pi$  的响应。在第四级中点时因为下方的重复单元最靠上方的第四级响应与这一条是同振幅同相位的，所以响应增强；第一级中点因为靠近第一级中垂线的四条第四级都是同振幅同相位的响应，所以透射系数比第二级和第三级中点高出许多。这一猜想需要更多实验的验证，这些工作可以留在将来进行。

图 11 则为较高频率范围各点透射特性曲线的比较。当初我们对四级分形板高频范围内的透射特性非常感兴趣，还假设了是否四级板有四级也代表了较高频率会有更多的带隙，然而这张对比结果无法对我们的假设提供支持。结合之前的讨论，也许 4 级分形板在较高频率是不会有更多的带隙的。具体这一假设是否成立，仍需要更多的实验来验证。

### 3. 对分形结构的透射特性的深入观察：

我们继续单块分形材料的透射特性进行更深入的观察。考虑到分形结构材料在 X 方向和 Y 方向的构造是不同的，我们也测量了旋转 90° 后的分形结构材料的透射特性。

为了记录简便，将第一级垂直地面的方向记为正向，不作标记；将第一级与地面平行的方向记为垂直向，在最后加上 R 以作区分。

在喇叭极化方向不改变的前提下，将分形材料的方向改变  $90^\circ$  即相当于将电磁波的极化方向旋转  $90^\circ$ 。在得到改变极化方向后的透射特性后，我们与旋转前的结果相比较，得到了图 5 和图 6。

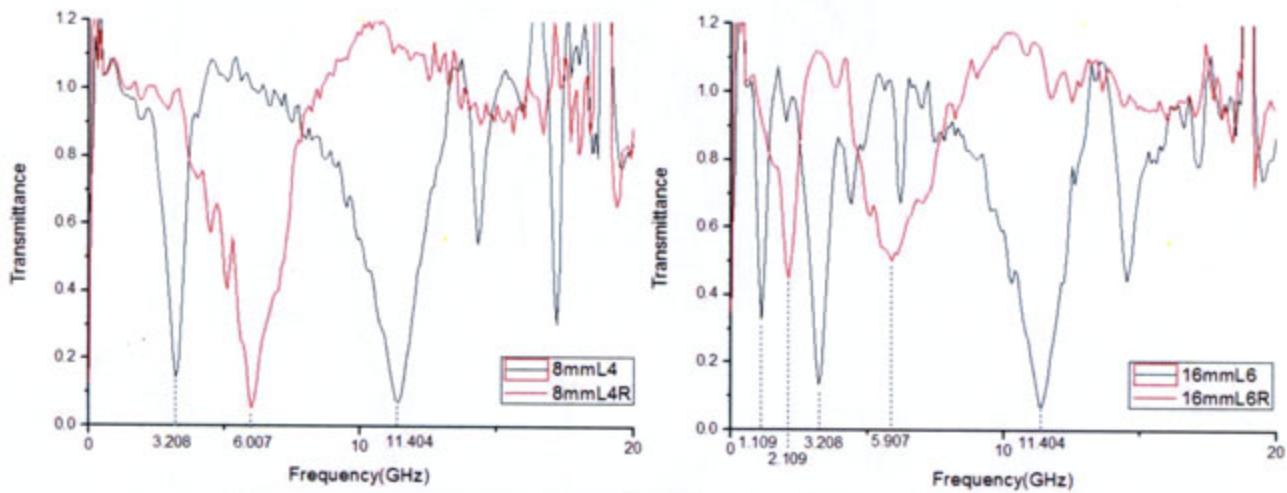


图 5. 8mm4 级分形板正向与垂直向比较 图 6. 16mm6 级分形板正向与垂直向比较

图 5 中 8mm4 级分形板在 3.208GHz 以及 11.404GHz 出现带隙，在旋转后，带隙的数量有两个变成了一个，带隙的位置为 6.007GHz；同样地，16mm6 级分形板在 1.109GHz，3.208GHz 以及 11.404GHz 处出现了三个带隙，而在旋转之后，带隙数量变为两个并且带隙的位置变为 2.109GHz 以及 5.907GHz 处。4 级分形板的“工”字型结构在 X 方向和 Y 方向的长度是相同的，只是条数与排列方式不同。可以将垂直向的 4 级分形结构看成两个正向的 3 级分形结构互相联系。分形结构材料的各向异性可能是因为级数的变化，但仍需要验证。今后可以尝试测量 3 级分形板的透射特性，再加以对比寻找其中联系。结合之前关于多重带隙形成原因的讨论，若假设均成立，在垂直向放置分形板时，第一级是不会产生带隙的。对比垂直向的测量结果，带隙的数量是非常吻合的。然而带隙的位置为何会偏移，我们还无法解释，需要更多的实验来验证。

除此之外，因为在正向透射系数峰值的地方，垂直向透射系数为带隙值；在正向透射系数带隙值的地方，垂直向透射系数为峰值，我们便对相同但互相之间转了  $90^\circ$  角的分形板叠加后的透射特性进行观察。

然而因为实验条件限制，我们只有三块不一样的分形板。考虑到 8mm4 级板与 16mm6 级板在四级板的整个部分都是重叠的，可以通过分析互相垂直叠加的 8mm4 级板和 16mm6 级板两个方向的透射特性研究来观察低级别的分形结构垂直叠加时的带隙变化，结果如图 7 所示：

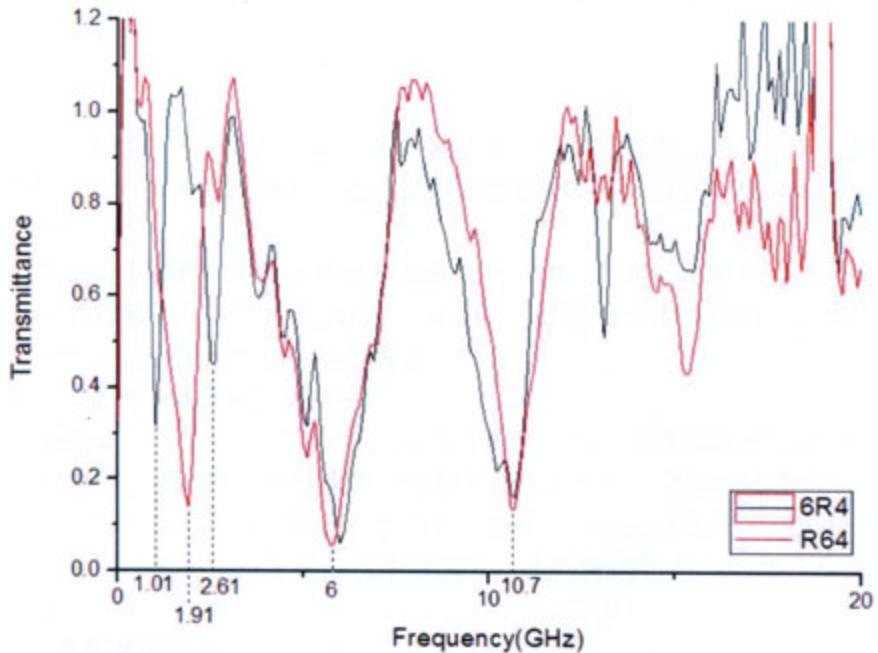


图 7. 16mm6 级板正向叠加 8mm4 级板以及将两块板同时旋转 90° 后透射特性曲线比较

可以看到在垂直叠加后 4 级正向和垂直向的 2 个带隙都出现，并且在旋转后并无明显变化。然而，任意极化方向的微波均可分解为极化方向为 X 方向和 Y 方向的微波的叠加，因此垂直叠加的相同分形结构板将有不随入射波极化方向改变而改变的透射特性，即绝对禁带。实验中我们只验证了 0° 和 90° 两个方向，今后可在实验中研究分形板旋转 30°、45°、60° 等角度的透射特性，对分形板的绝对禁带性质加以验证。

#### 4. 多层分形板同向叠加的性质

在翻阅相关文献的过程中，我们发现 1、2 或 4 层相同的分形板在同向叠加的时候会使带隙变宽。由于实验条件的限制，我们只能选择相近的分形板互相叠加，重点观察重叠部分的带隙变化。实验结果非常微妙。

如图 8，我们将 8mm4 级板、16mm6 级板、8mm4 级板与 8mm6 级板叠加以及 8mm4 级板、16mm6 级板和 16mm4 级板三层叠加透射特性一同比较，发现两层板叠加的图像中 6 级板的第一个带隙仍旧在，四级板的两个带隙有细微的偏移，带隙变宽；然而三层板叠加后，带隙很明显地变窄了。

三层板叠加后的状况为：8mm4 级板部分为窄线两层，16mm6 级板的一二级部分为一窄一宽两层（16mm4 级板的线宽也是另两块板的两倍），这样的差异为何能造成带隙变窄我们还不清楚。是因为线宽变宽还是因为叠加方式？

在之后的实验中，我们还想了解叠加会对透射特性造成怎样的影响。这一内容的研究我们还没有找到合适的方式。除此之外，各种不同叠加方式对透射特性的影响也需要更多的实验来比较，这些都将留到后续的实验中解决。

## [实验总结]

关于分形板多重带隙产生的原因，我们做了一些相关的实验，但对其中原理的验证还并不严格。目前我们只有一个模糊的概念，还有很多问题需要解决。在之后的实验中，我们应该处理以下几个问题：

### 1)喇叭的极化方向

实验室使用的喇叭并未标出明确的极化方向，而喇叭的极化方向与研究各级次响应时一个很重要的影响因素。在今后的实验中，我们应当借助微波偏振片等工具来研究喇叭的具体极化方向，这也会对我们进行绝对禁带研究有很大帮助。

### 2)每一级次的具体电流方向

在查阅文献时，我们了解到先前进行关于带隙产生原因的研究时曾经模拟过电流密度分布。如果能在实验中固定频率并测量某一频率下分形板各级次电势差或者电流，那么我们就能对各级次响应有了更进一步的了解。然而，事实上，这是我们在实验进行中遇到的一个很大的问题，今后应该将重点放在对电流分布研究方法的突破上，进行相关的理论计算并找到合适的方法解决电流的测量问题。

### 3)分形板高频特性

关于级别较低的分形板在较高频率范围内的透射特性的测量一直没有得到合适的结果，初步怀疑为杂音过重。若能够改善实验条件(在调用校准文件时，我们看到很多凌晨保存的校准文件，那我们是否可以选在凌晨进行实验以排除更多的干扰？)，杂音是否会减小？这些都需要实际操作来验证。

### 4)各测量工具本身的影响

因为实验时间有限，我们没有多次重复来确定测量工具本身对测量结果的影响，其中一个例子就是更换探针测量时，我们没有使用多种探针比较结果，也没有计算三维位移控制仪器中大量的金属部件对测量结果的影响，这些都应在后续实验中确定。

### 5)各种级次分形板的差异

因为四级六级板都是偶数级，我们对奇数级的板特性非常好奇。奇数级板第一级和最后一级是平行的，是否意味着垂直向的特性与正向对比与偶数级板不同？奇数级板与低一级的偶数级板特性比较会有怎样的不同？是带隙对应峰还是位置不变？或许研究了奇数级板的特性能够在一定程度上帮助我们理解垂直向带隙对应频率偏移的问题，这些都将留待后续试验研究

## [实验感想]

这次实验虽然做了很多东西，但我认为这次实验提出的问题远比已解决的问题要多。虽然我们目前对分形板的性质和这些性质产生的原因大致有了了解，但完全算不上了解了分形板。今后我希望能有机会完全地弄清楚分形结构材料这些特性是怎么回事。虽然前路充满未知，看起来并不轻松，我仍想试着走走看。

认真 86.  
我会认真阅读后和你们讨论！