

# 復旦大學

B4.  
合作者：史謙

## 实验报告

姓名 吴群玉 专业 电子科学与技术 年级 08 班 08300300106 周四 日期 评阅人

实验记录：

亚波长分形结构光子带隙研究

### 一、实验原理：

微波：频率范围  $300\text{MHz} \sim 300\text{GHz}$ .

光子带隙材料：在特定频率范围内反射任意角度的入射电磁波(EM)

传统光子带隙材料：利用布拉格散射原理来产生禁带(forbidden band gap)，对于微波，材料尺寸要达到  $1\text{m}$  以上数量级。

选频材料(FSS)：利用金属周期单元周期排列产生对应波长的反射或全透射，仅对单一频率有响应，且其反射波长仍受金属尺寸的限制。

分形：数学上，分形指的是任意大小的子结构与原图形完全一样。分形结构的自相似是一种层次化的自相似。

本实验中研究的分形结构是一种“工”字型的分形，如图：

中间纵向的第一根为第一级，长度为  $a$ ，中间横向最长的为第二级，长度为  $a$ ；纵向次长的为第三级，长度为  $\frac{a}{2}$ 。以此类推。

比例定律：所谓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。

分形结构的选频特性，某一级的亚结构只会对于特定的频率产生共振，是比例定律内容的进一步延深。

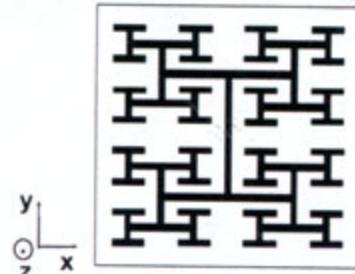


图1. 6级分形板单元结构示意图

# 復旦大學

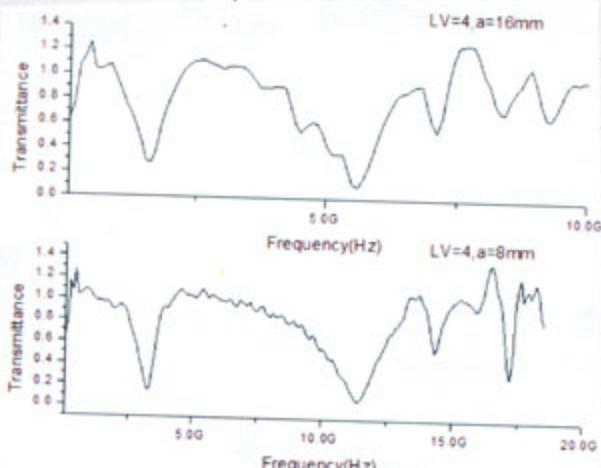
## 实验报告

姓名 \_\_\_\_\_ 专业 \_\_\_\_\_ 年级 \_\_\_\_\_ 班 \_\_\_\_\_ 组 \_\_\_\_\_ 日期 \_\_\_\_\_ 评阅人 \_\_\_\_\_

实验记录：

### 二、实验结果与分析。

#### 1. 比例定律验证：



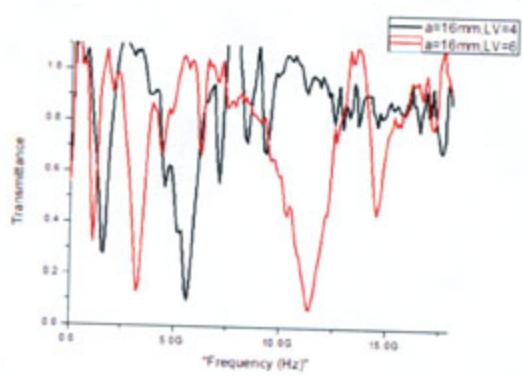
图二：Scaling Law 验证图像

实验中选用的是  $a=16\text{mm}$  的 4 级分形板， $a=8\text{mm}$  的四 4 级分形板的透射特性作比较。

实验前与学长讨论，比例定律中所指的尺寸问题，起初（实验前，包括实验时）我认为比例定律中的尺寸，仅与分形结构中单元、亚结构的长度有关，与其他尺寸无关，但在分

析实测图象时，与预期出现了偏差。如上图 2 所示， $8\text{mm}$  4 级板的响应频率在  $3.2084\text{GHz}$  和  $11.4043\text{GHz}$ ， $16\text{mm}$  4 级板的响应频率在  $1.6092\text{GHz}$  和  $5.6072\text{GHz}$ ，这一图象与比例定律中的尺度扩大一倍，相应频率缩小一倍，刚好吻合。但是我们又用  $16\text{mm}$  4 级板与  $16\text{mm}$  的 6 级板的前两级响应对比，如图 3，其响应频率有明显的偏差。在与搭挡的讨论中，我经

于明确，尺度指的是三维的长度均扩大如  $16\text{mm}$  4 级板对应各级次的线长，线宽以及板厚均为  $8\text{mm}$  4 级板的 2 倍，而  $16\text{mm}$  4 级板与  $8\text{mm}$  4 级板的线宽与板厚是相同的。



图三： $16\text{mm}$  4 级， $16\text{mm}$  6 级对比

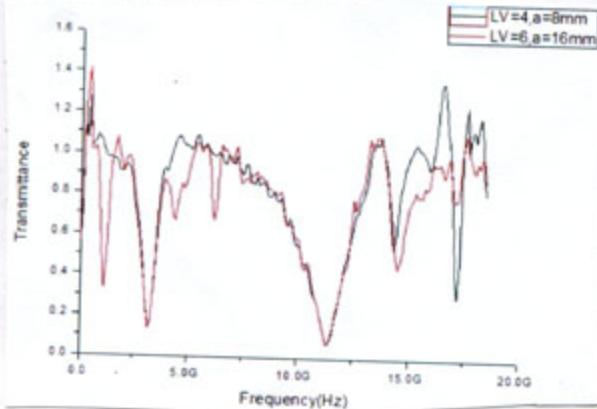
# 復旦大學

## 实验报告

姓名 \_\_\_\_\_ 专业 \_\_\_\_\_ 年级 \_\_\_\_\_ 班 \_\_\_\_\_ 组 \_\_\_\_\_ 日期 \_\_\_\_\_ 评阅人 \_\_\_\_\_

实验记录:

### 2. 分形结构的频率选择特性的研究.



如图4. 在低频区域,  $L_6$  比  $L_4$  多一个响应频率, 而在高频率部分, 二者图象吻合的刚妙. 由此可分析, 多出一个响应频率的原因是因为  $L_6$  比  $L_4$  多出了  $a=16\text{ mm}$  的第1、2级, 而多出的一个响应频率恰是在第1、2级上响应产生的.

图4: 8mm4级与16mm6级透射率对比

### 3. 单板旋转90°透射率测量及对应相位变化的测量.

#### 3.1 单板旋转90°透射率测量 (以R表示旋转90°后)

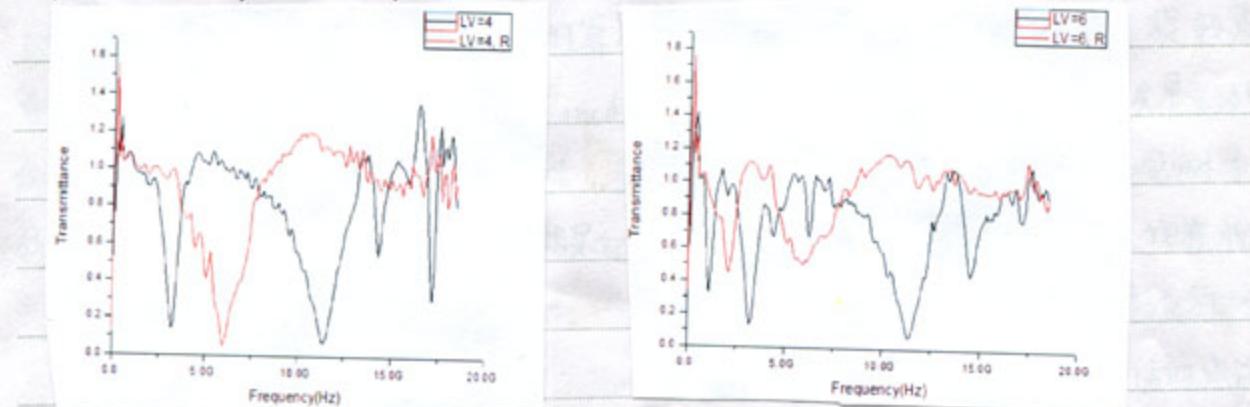


图5. 8mm 4级与正向, 16mm 6级正向与反向对比.

如图5所示, 分形板是各向异性材料. X方向与Y方向的带隙互补. 即X方向的全透频率范围在Y方向对应的是全反射. 针对这一特点, 分形结构材料可以作为某些特定频率微波的偏振片.

#### 3.2 相位变化测量.

# 復旦大學

姓名 \_\_\_\_\_

实验记录:

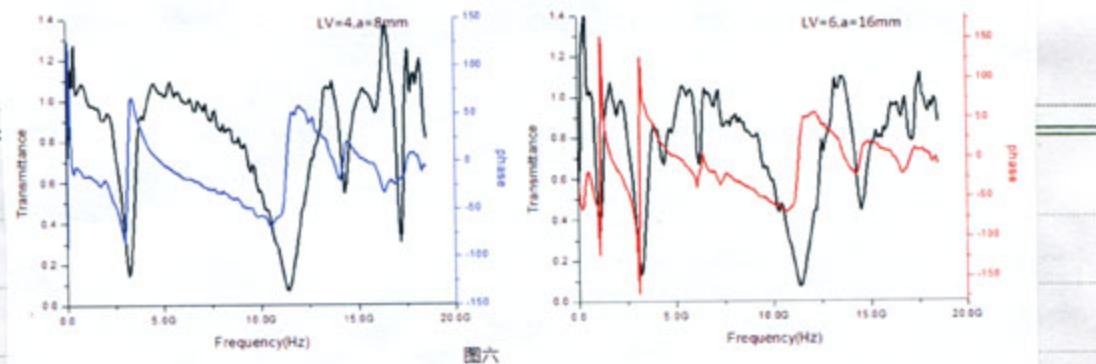


图6. 相位变化图

如图6所示，在每个共振响应频率处，即透射率最低的位置，都会发生π的相位突变。电磁场在分形板的亚结构金属线上激起了电流。当被激的电流达到最大值时，相应的电磁波发生全反射，即透射率达到最低。此时该频率的电磁波与该亚结构的金属线发生共振，其相位发生π的突变，预示了共振现象的发生，同时为我们解释多重带隙产生原因指明了方向。

#### 4. 分形结构的“绝对禁带”

因实验条件的限制，我们原本打算研究不同分形板正向与~~反向~~旋转90°后透射的结果。但后来用相近的16mm 6级板与8mm 4级板增加优势，先是6级正向，4级旋90°，叠加，观测透射特性。然后将两板同时旋转90°，再次观测透射特性。如图7为~~该~~两次实验结果的对比图象。叠加后，两次图象均在相

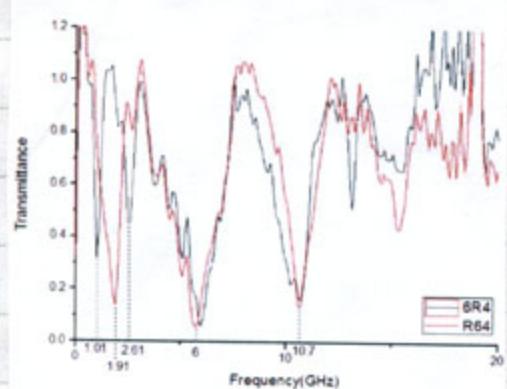


图7 绝对禁带示意图

6级正向 4级正向与4级旋向6  
级正向对比

近位置有2个带隙出现，任意极化方向的电磁波均可分解为x方向与y方向电磁波的叠加。由此可得出，垂直叠加的相同分形结构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”。但研究有限，以后仍对不同角度旋转叠加进行研究，以验证其“绝对禁带”特性。

# 復旦大學

## 实验报告

姓名 \_\_\_\_\_ 专业 \_\_\_\_\_ 年级 \_\_\_\_\_ 班 \_\_\_\_\_ 组 \_\_\_\_\_ 日期 \_\_\_\_\_ 评阅人 \_\_\_\_\_

实验记录:

5. 对于局域信号的探针测量。(多带隙产生原因的深入探究)

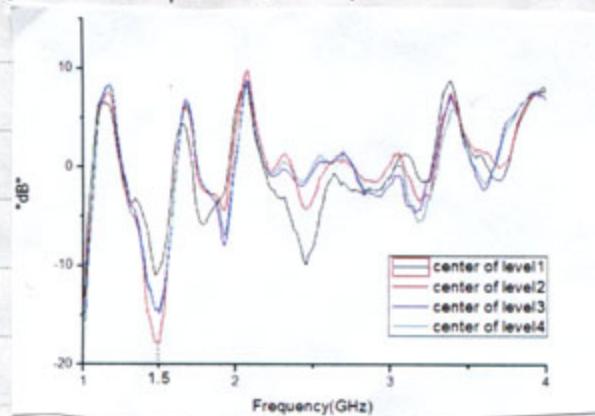


图8 1~4GHz

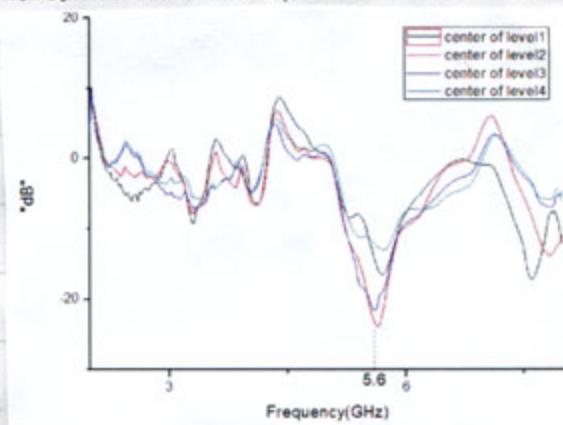


图9 2~8GHz

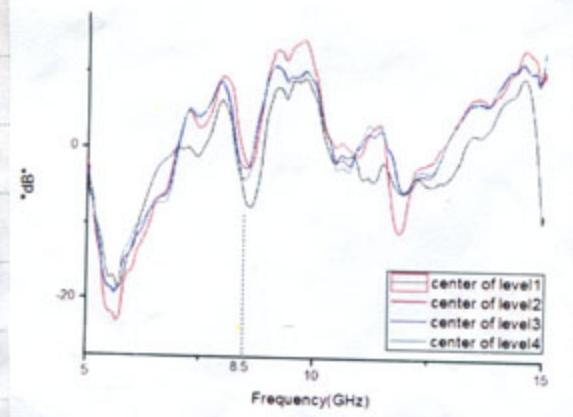


图10. 5~15GHz

由图实验选择16mm 4级板用探针进行局域信号的探针测试。由图可知，16mm 4级板的响应频率为1.6GHz与5.6GHz左右，以下对这两个频率附近的图象作主要分析。

图8主要为对第一个带隙的研究，在图中明显看到第一级中点时透射率最大，到第二级中点透射率最小，而探测到的第三、四级中点时，其透射率居于中间位置。在仔细研读周老师的论文后，我们猜想是因为两条第二级线产生了振幅相同，但相位差为π的响应。当探针在第一级中点时，第一级的长度与第二级的一半，响应很强，透射系数很高；当探针位于第二级中点时，因为两条的响应与这条相位差为π，互相抵消，响应强度减弱，透射率降低。而位于第三、四级中点时，探针位于第二级的一侧，因而变化不大，两条放深加浅不是最大，也不是最小，故透射率居中。

# 復旦大學

## 实验报告

姓名 \_\_\_\_\_ 专业 \_\_\_\_\_ 年级 \_\_\_\_\_ 班 \_\_\_\_\_ 组 \_\_\_\_\_ 日期 \_\_\_\_\_ 评阅人 \_\_\_\_\_

### 实验记录:

图9为第二个带隙的局部探测结果。图中第二级中点与第三级中点的带隙均很小。对于与图8现象出现不同，我们对其提出如下猜想：与上述分析类似，在第三级中点时，第四级作用完全取消，虽然第三级仍有响应，但同组的第三级仍有相位差的响应。透射强度相对于第二级略有增强。两条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两条第四级是振幅相同相位也相同的响应，而远离的是与之相位差的响应。第四级中点因为靠近其他源响应一致，所以响应增强。第一级中点因为靠近与之的两条第四级响应相同的透射强度高出二、三级中点的响应，对此猜想，需要更多的实验验证。

图10为高频频区透射特性，因未知16mm4极板的高频特性，无法进一步分析研究。

### 6. 分形板叠层加透射特性分析

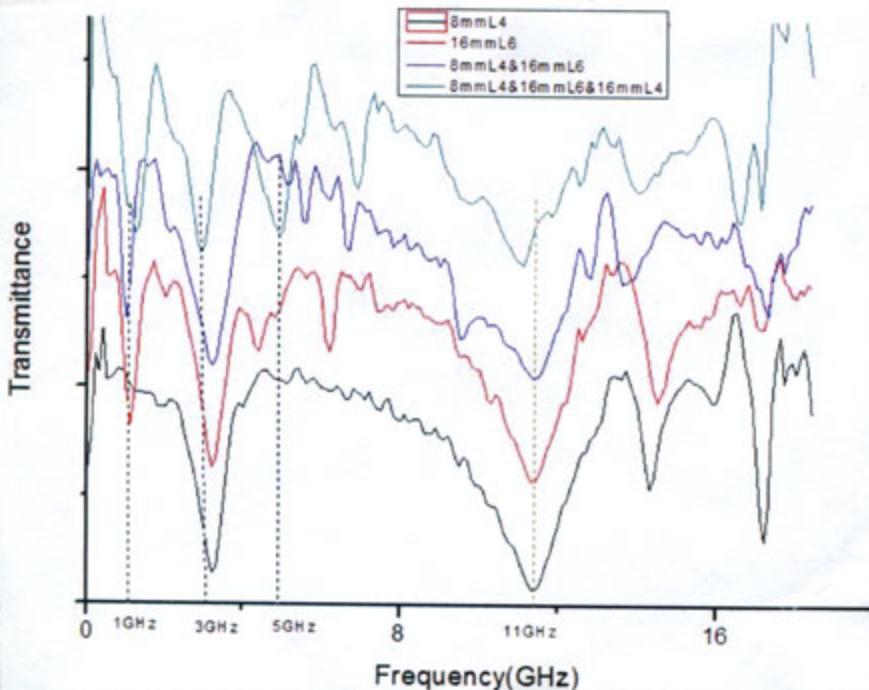


图11. 8mm 4极，16mm 6极，8mm 4极与16mm 6极叠加，  
3层极板叠加 透射特性对比。

由周老师的文章了解在多层分形板叠加时，会使带隙变宽。由于实验条件的限制，我们对相似的分形板进行叠加测试。比较发现，四极板的两个谷位置偏移。两层叠加时带隙变宽，而三层叠加时，带隙又略有变窄。由于变量过多，实验条件的限制，我们无法确定其原因是否是因为叠

# 復旦大學

## 实验报告

姓名\_\_\_\_\_ 专业\_\_\_\_\_ 年级\_\_\_\_\_ 班\_\_\_\_\_ 组\_\_\_\_\_ 日期\_\_\_\_\_ 评阅人\_\_\_\_\_

实验记录：

加后可单纯认为只是板材料变厚，但是加厚只考虑是变厚，其频率因应平行，而不是带宽变宽。而层叠加带隙变宽是不是因为又加上 $m$  16mm 的 4 层板，带宽与厚度而造成的。与“增加带隙变宽”不相违背，需要进一步探究。

### 三、实验总结

我们在实验中实测验证了比例定律并分析了单板多带隙的产生原因，但实验中存在很多问题，会影响分析结果。

1. 分形板太少，对于增加效果的观察分析，可能因素太多，不利于确切分析。

2. 由微波 → 电磁波 → 光，由光的干涉现象猜想，且某因其选择特性与光的干涉特性在某种程度上相近，其响应会不会也存在“倍波长”或“倍频率”相响应的特点，故高频特性研究很重要，而实验中高频率图象很混乱，无法判定其价值，不可以草率得下结论！

3. 探针大小的影响，实验中我们仅用了一支探针测量，而响应中是否也包括电磁波与探针的响应，其响应程度如何，是否 8GHz 处出现的透射降低与探针有关，需要进一步实验证实。

4. 由于本次实验我们只测量了一次，而没有多次测量其中可能会含有仪器或者其他人为因素的影响。

80. 乐。