

亚波长电磁波在波导中的透射现象研究

实验人：林逸华 合作者：王 娟 指导老师：乐永康
复旦大学物理系 2011 年 6 月 25 日 200433

摘要

本小组通过在波导内放置具有特殊金属花纹结构的透射片，在截止频率范围之下成功观测到了特定频率波段的高透射现象，并且通过计算机模拟手段对这种现象给出了较为合理的解释。此外，本研究中发现工字型花纹的边长与透射频率之间存在线性关系，为波导内的透射选频技术提供了全新的思路。

关键词 电磁学 选频透射 计算机模拟 截止频率 网络分析仪 CST

一. 引言

电动力学理论证明，波导在传播微波的过程中具有一个特定的截止频率，低于该截止频率以下的微波由于很快会在波导中衰减而不能传播。但从 2006 年开始，以复旦大学周磊教授为代表的一批教授发现：若在波导中放入带有特定金属花纹结构的透射片，便能够使得原本在截止频率之下的衰减波经过透射片后电场强度会变大。这种现象便能够使得微波在特定的透射片作用下，能够在截止范围之下透过波导。该现象在能够对攻克低频率段微波选频的难题提供一定的帮助。

然而，由于目前发表的文章中对于该现象的物理解释均采用的是微观的紧束缚近似方法，因此在宏观唯象角度上比较难以理解这种现象的本质原因，导致对透射片上的金属花纹结构的选取方法仅停留在了通过实验检测的角度上。本研究小组通过实验观测和计算机模拟，发现这种“低频率段选频透射”现象是由于金属花纹的“半封闭几何结构”在交变电场下具有放大电场信号的作用，并基于该思想对不同结构的金属花纹进行了计算机透射模拟，均达到了预期的效果。

二. 实验条件与测量方法介绍

本实验采用 Agilent E836XC 网络分析仪为测量仪器（图 1），将信号源（Port 1）和接收源（Port 2）通过同轴转换器对接于波导的两个腔口，实验不同频率下的微波信号发射与接收的观测目的。

实验中我们先后选取长度为 10mm、20mm 和 70mm 的三种波导，分别沿垂直于波导中轴线方向放入不同数量的，带有十字花结构的透射片，同时将信号源的微波扫描频率范围设置在 0~10GHz。

其余相关参数：波导 10mm、20mm、70mm 不等，口径尺寸为长 22.86mm，宽 10.10mm；透射片尺寸为长 22.86mm，宽 10.10mm，厚 1.2mm，磁导率为 2.2，介电常数为 1；镶嵌的十字花结构的材料为铜，整体厚度为 0.2mm，各边宽度均为 0.2mm，最外侧的四个边边长 7.2mm，中心十字区域边长 8.8mm。



图 1 本实验操作平台照片, ①为 Agilent 网络分析仪, ②为信号输入线, ③为信号探测线, ④为波导, 内部可嵌入透射片

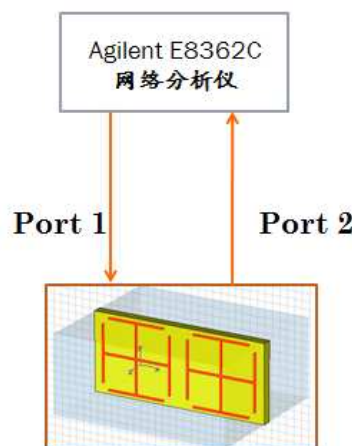


图 2 本实验操作平台示意图, 具有十字花金属纹理的透射片垂直于中轴线塞入波导中, 实验中为固定透射片采用吸收系数十分小的泡沫塑料加以填充。

三. 透射片在波导中产生高透射现象的实验观测

经测量后的结果表明, 放置透射片后的波导在低于截止频率 ($6.5 \times 10^9 \text{GHz}$) 的频率范围内会产生明显的透射现象, 透射效率始终保持在 50%~70% 的范围内。此外, 在波导内放置不同数量的透射片会导致低频段产生不同数量的透射峰, 且透射峰的数量与透射片放置的数量始终保持一致。

此外, 透射片之间的距离也会对实验观测的透射峰间距产生明显影响, 透射片之间的距离越大, 产生的透射频率之间的差值也会越大。

以上现象所对应的高透射频率均与计算机模拟的结果保持较好的一致性, 为下一步计算机模拟打下了良好的实验验证基础。

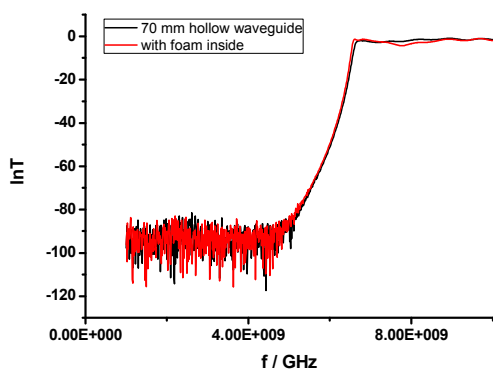


图 3 放置一片工字花结构的透射片所测得的实验透射谱线与计算机模拟的对比图像, 可以发现两者的透射峰位非常近似 (实验值 3.73GHz, 理论值 3.77GHz, 两者相对误差 1.06%)

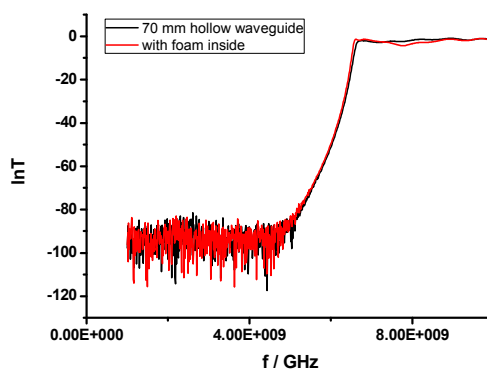


图 4 不等间距放置四片工字花结构的透射片所测得的实验透射谱线与计算机模拟的对比图像, 两者的峰位频率同样高度近似且一一对应。注意到当透射片不等间距时, 透射峰位间的间距也变得不同。

四. 透射片在低于截止频率段产生高透射现象的理论分析

引言中曾提及, 目前现有的理论无法对“放置透射片产生低频高透射现象”给出一个宏观上的物理模型图像, 而本实验小组以时域有限差分为计算机模拟方法, 并采用 CST STUDIO

SUITE 2008 分析软件对该现象成功地做出了宏观性质上的解释。

模拟条件：波导四个侧壁采用 PEC 结构，其余参数均与实际试验过程等同（详细参数请参考第二部分）

在不放置透射片的空波导中，根据电动力学理论，当微波频率低于截止频率时微波在波导中呈现出衰减波的传播模式。这一点在下图的能流模拟结果中可明显看出：电场从界面 2 射入波导后明显向波导两个侧壁偏移，而沿波导中心轴方向的能流线的密度越来越小，说明低于截止频率下的微波入射到波导后沿中心方向透射的能量迅速衰减直至消失，因此该频率段的微波无法被输出端所探测到。

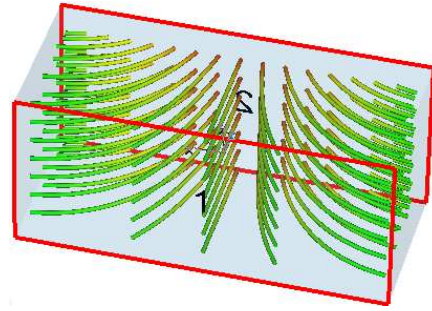


图 5 20mm 空波导腔在计算机模拟下的能流分布结果

当我们采用先前提到的十字花结构作为透射片的金属花纹时（见下图），我们可以明显看到能流从原先的向腔壁两侧散射变成了向中心汇聚的结构，而汇聚点经过精确分析后确定为图 6-1 所示的十字花模型靠近中心的四个缺口处（图 2 和图 3 红色圆圈所示，相同序号圆圈一一对应）

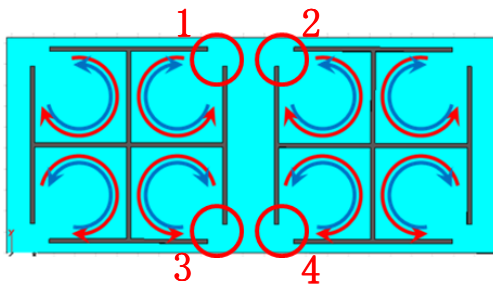


图 6-1

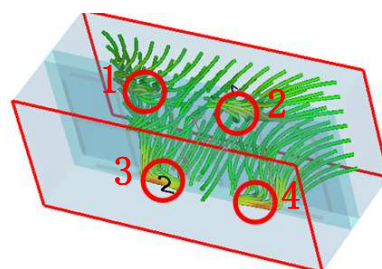


图 6-2

图 6-1 工字花纹理结构内部的震荡电流方向示意图，可以发现电流在四个半封闭结构中均作顺/逆时针震荡；图 6-2 20mm 波导腔内放置工字花纹理结构透射片后的能流分布结果，可发现能流从图 5 的发散结构转变为朝圆圈所示的四个点集结的模式，且四个标注序号的集结点与图 6-1 的标注点一一对应。

容易看出，每一个工字型花纹可划分为四个区域，每一个区域为一个近似为正方形，但在角上有一个开口的形状，我们将这种形状称之为“半封闭结构”。若对金属花纹内部的电流结构进行分析，可观测到：当交变的微波电场输入波导后，波导内的金属花纹上的电流会产生有规则的往返流动，若我们以半封闭结构作为分析单位，经观察得到金属内部的电流会呈现在“红色箭头所示的环形电流”和“蓝色箭头所示的环形电流”之间的交替变化现象。

进一步研究后发现，对于具有不同金属花纹结构的透射片，在具有半封闭图像结构的区域均会产生交变的环形电流。与此对应的是，在能流分析图像中，这些半封闭图形缺口处均产生了能流汇聚的现象。（参考组图 7，图中标示类型与组图 6 中一致）

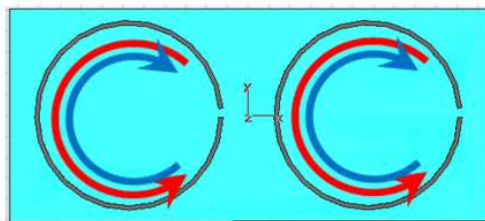


图 7-1 C 字型纹理结构内部的震荡电流方向示意图

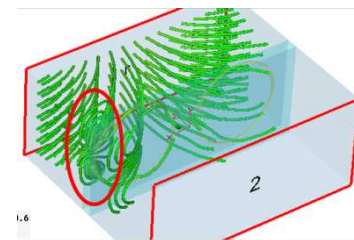


图 7-2 40mm 波导腔内放置 C 字型花纹理结构透射片后的能流分布结果

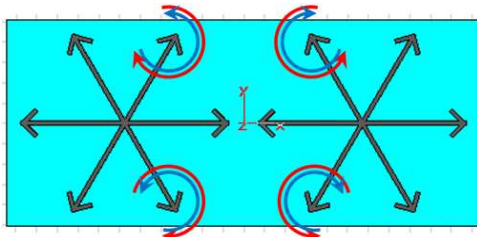


图 7-3 六角箭头纹理结构内部的震荡电流方向示意图

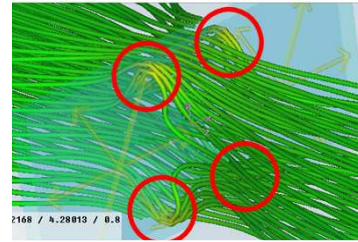


图 7-4 50mm 波导腔内放置六角箭头纹理结构透射片后的能流分布结果

经过上述研究分析得出，微波电场在经过透射片时的物理机制如下：金属花纹结构可以看作是多个半封闭电容器的组合，当交变微波通过透射片时，半封闭金属花纹内部会产生顺时针/逆时针交替变化的电流结构，这种交变的电流根据麦克斯韦方程会首先产生磁场，然后磁场再激发出交变的电场。由于半封闭结构的金属花纹产生的电场集聚在了金属花纹的缺口处，这种高度的集聚性会使得电场在缺口处得以集中放大，因此与透过透射片之前的能流相互耦合，形成了能流集聚的结构。

在较长的波导中，由于仅靠一个透射片加强后的电场可能还是会在波导中全部消逝而无法探测到，因此若每隔一定间距（这个间距要保证电场经放大后直至到达下一个透射片前未完全消逝，一般取 10mm 以内即可）放置一块透射片，就可以依照上述的原理使微波电场在透射片与波导的交替变化间形成电场“增益——衰减——再增益”的循环模式，直到最后电场被出射口所探测得到。

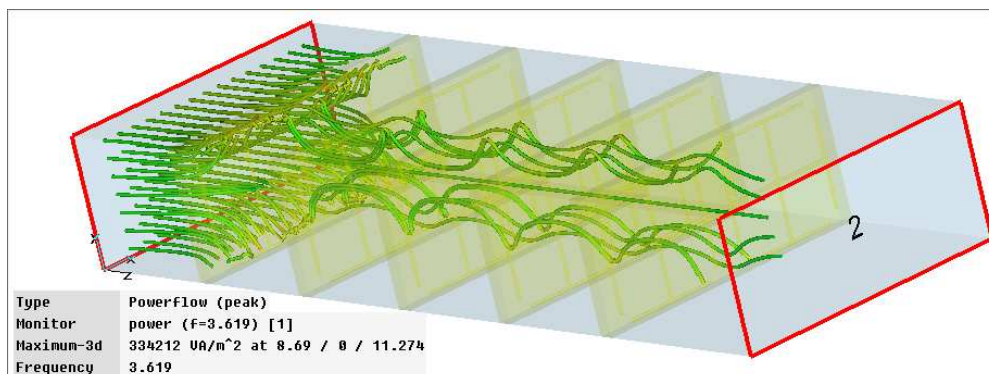


图 8 70mm 波导腔内等间距放置 5 片十字花纹理结构透射片后的能流分布结果。可以发现能流在每一个十字花图形角上的缺口处产生增益（红色圆圈所示），因此能流将会依次通过这些增益点，直至传出腔外被探测器接收到。

五. 透射片对高透射峰频率选择的影响分析

根据上述的结论，我们需要进一步去了解带有不同金属花纹的透射片的透射峰位不同的原因。从先前的模型中我们易推知，改变透射峰位的因素只可能是以下几种：金属花纹的宽度，透射片的放置位置，以及金属花纹的几何结构（透射片去除掉金属花纹的部分经模拟证明不会对透射现象造成明显影响）。

通过下面的表 1 和表 2 可以看出，无论是改变透射片距离入口处的位置，还是将花纹宽度增宽或减薄，都不会对计算机模拟的透射峰位结果造成明显影响（模拟过程中将波导长度设置为 50mm，其余条件不变）。

表 1 透射片处于不同位置时的透射峰频率表

透射片距入射口位置(mm)	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0
透射峰频率(GHz)	4.02	4.03	4.02	4.03	4.02	4.02	4.02

表 2 放置不同条纹宽度的十字花结构透射片下的透射峰频率表

金属条纹宽度(mm)	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
透射峰频率(GHz)	4.04	4.03	4.03	4.03	4.03	4.02	4.02

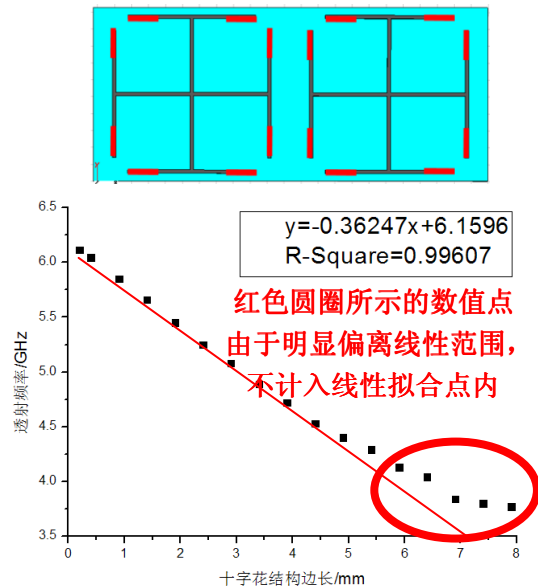
但是金属花纹的结构对于高透射峰频率的影响则十分显著。这一点可以通过表 3 和表 4 的实验结果可以明显看出。值得注意的是，通过表 4 的结果我们看到，随着十字花模型边长的减弱（图表 1 中左上角所示，其中红色区域为裁剪掉的金属条纹区域），高透射峰位逐渐增大，且在边长为 0~5.5mm 范围内，透射峰位与边长之间存在非常好的线性关系（边长 5.5mm 以外的范围偏离线性的原因是由于外侧的相邻边靠得十分近，从而相邻金属边对彼此的内部电流产生了相互的影响）。该现象给我们的启示是可以将其用在“选频技术”上：若是在实际运用中只要对不同尺寸的工字花结构计算出边长与透射峰位的线性关系式，即可通过改变金属边边长较为容易地达到想要得到的透射频率。

表 3 放置不同金属花纹结构的透射片下的透射峰频率表

金属花纹结构	十字花结构	C 形结构	六角箭头结构
透射峰频率(GHz)	4.03	5.77	9.82

图表 1 不同边长的十字花结构透射片下的透射峰频率表即拟合图像

十字花结构边长 (mm)	透射峰频率 (GHz)	十字花结构边长 (mm)	透射峰频率 (GHz)
7.9	3.77	3.4	4.88
7.4	3.80	2.9	5.08
6.9	3.84	2.4	5.25
6.4	4.04	1.9	5.45
5.9	4.13	1.4	5.66
5.4	4.29	0.9	5.85
4.9	4.40	0.4	6.04
4.4	4.53	0.2	6.11
3.9	4.72		



六. 总结与致谢

通过实验观测和计算机模拟两种途径，我们成功发现了放置带有金属花纹的透射片能够使微波在截止频率之下通过波导传输的现象，并且用模拟结果证明了这种现象是由于半封闭结构的金属电流往返震荡产生了放大电场，从而使得原本在波导中衰减的微波能够在电场增益的条件下透过波导；此外，不同的金属花纹结构对应着不同的透射频率，而十字花金属结构的边长大小与透射频率间存在着良好的线性关系，并可由此现象运用于选频技术领域。

最后，感谢我的搭档王娟同学在整个学期的近代物理实验中对我的大力帮助与支持，感谢乐永康老师不厌其烦地为我们解答问题以及提供材料。同时也要特别致谢物理系孙午炯学长对整个实验以及网络分析仪的使用介绍，以及周磊教授在物理系学术年会上对该课题的研究思路的分享。

七. 参考文献

1. L.Zhou et al, Effective-medium models and experiments for extraordinary transmission in metamaterial-loaded waveguides, Applied Physics Letters, 92,041122 (2006)
2. L.Zhou et.al, All-dimensional subwavelength cavities made with metamaterials, Applied Physics Letters, 89,104101 (2006)
3. 《近代物理实验》 作者: 戴道宣 戴乐山 高等教育出版社 2006 年 7 月

Research on coupling effects of metamaterial on sub-wavelength transmission in waveguide

Yihua Lin, Juan Wang, Yongkang Le
Phys. Dept. Fudan Univ. June 25th (2011), 200433

Abstract

Our group managed to observe the high-level transmission character in wave-guide, with the specified frequency which is below the cut-off frequency. This electromagnetic phenomena was illustrated and interpreted by the means of using numeral simulation software CST STUDIO SUITE 2008. Moreover, it is found out that the transmission frequency has a linear relationship with the side length of cross-splited structure in transmission pieces. This discovery has given us a new idea in the field of frequency-controlling transmission techniques.

Keywords Electromagnetics Frequency-controlling transmission Cut-off frequency
Computer numeral simulation Agilent E836XC CST STUDIO SUITE 2008