

微波偏振片的制作和性能表征

周和心 谢景福

指导老师：张新夷 乐永康

摘要 本文作者通过理论分析与软件模拟，设计了适用于微波的金属栅网结构的偏振片，并利用木板、电线等常见材料制作完成了该偏振片。网络分析仪的测试结果显示，对于频率在 1 到 10GHz 范围内的微波，该偏振片的偏振调控性能良好，能产生较好的线偏振微波。

关键词 微波 线偏振 金属栅网 网络分析仪

1 引言

微波是指频率在 0.3GHz 到 300GHz 之间的电磁波，其在当今社会的生活、生产的众多方面有着广泛的应用。近年来，人们对于各向异性的电磁特异介质 (meta-material) 的研究有了突破性的进展，这使得人们能够通过设计制作特定的特异介质来改变电磁波的性质，比如偏振性。本实验以电磁理论为基础，设计制作了能够调控微波偏振性的金属栅网偏振片，并用网络分析仪和双脊天线喇叭对偏振片的性能进行了测试，得到了不错的结果。

2 实验原理

研究表明，对于微波，最好的偏振片是金属栅网^[1-2]，这种金属栅网由等直径的圆柱形金属线等间距排列而成，金属线的直径和间距都远小于微波的波长。理想的金属栅网由理想导体构成，并且分布在无穷大的平面内。金属栅网参见下图。

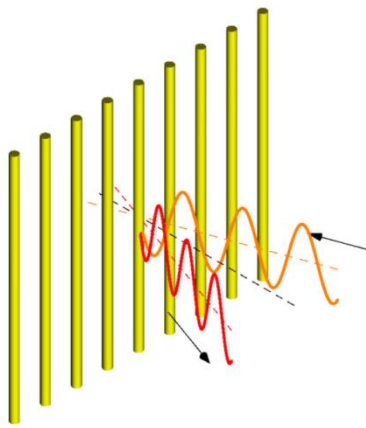


图 1, TE 波入射

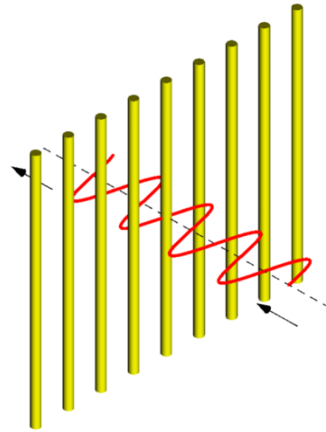


图 2, TM 波入射

2.1 定性分析

金属栅网的起偏作用是它的介质分布的各向异性造成的^[3-4]。考虑垂直于金属栅网平面入射的电磁波，当电矢量方向与金属线平行时 (TE波，图1)，其磁场矢量在通过金属线的时候会产生感应电流，从而产生新的电场，在透射区，新电场的大小与入射波电场大小相等，方向相反，电场叠加为零。当入射波的电场矢量方向与金属线垂直时 (TM波，图2)，由于金属栅网每个柱体的线度很小，任何沿导体横截面移动的电荷将在其两侧累积，迅速产生足够大的反向电场阻止电流的产生，从而使得垂直于金属线的电场矢量可几乎不受任何影响地直接

通过金属栅网。对于一般情况下入射的电磁波，其电场矢量可以分解为平行于金属线的分量 E_{\parallel} 和垂直于金属线的 E_{\perp} ，前者几乎透不过栅网，后者几乎全部透过，于是可以实现偏振片的效果。由此不难知道，若要使TE波的透射率低，则金属线的间距要尽量小，即金属线分布周期要尽量小；若要使TM波的透射率高，则金属线的直径要尽量小。要达到好的偏振效果，就要同时使TE波的透射率低和TM波的透射率高，所以，对金属栅网的要求是，金属线尽量细，而且尽量密集。

2.2 定量分析

可以通过矢量耦合波理论^[5-7]对电磁波入射到金属栅网上的结果做定量的计算。我们通过查阅文献得到不同频率的 TE 波和 TM 波的透射率随金属线分布周期和金属线直径的变化情况，情况如图 3、图 4 所示^[8]。

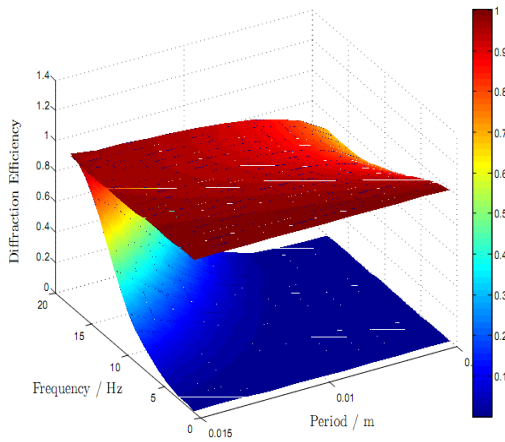


图 3，透射率随金属线分布周期的变化
(TM 波在上，TE 波在下)

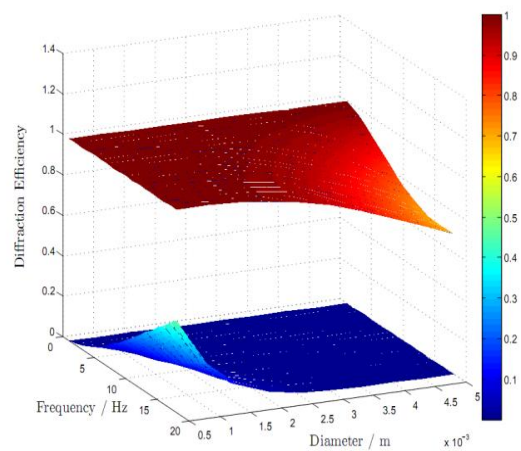


图 4，透射率随金属线直径的变化 (TM 波在上，TE 波在下)

由上图分析可知当金属线分布周期变大时 TE 波的透射率会变大，当金属线直径变大时 TM 波的透射率会变小，这与之前的定性分析一致。不过，如果金属线分布周期太小，TM 波的透射率就会变小；如果金属线直径太小，TE 波的透射率就会变大。而好的偏振片要求 TM 波的透射率尽量大并且 TE 波的透射率尽量小，所以，在设计制作偏振片时也不能一味的减小金属线分布周期和直径。通过定量计算结果，并考虑到加工的可行性，我们最终选择了金属线直径为 0.5mm，金属线分布周期为 1.1mm 的金属栅网。另外，我们把用于测量的微波频率范围定为 1 至 10GHz。

2.3 COMSOL 软件模拟

COMSOL 是一款大型数值模拟软件，广泛运用于科学研究和工程计算，拥有很好的计算性能，能够实现高度精确的数值模拟。我们用 COMSOL 软件模拟了电磁波打到金属栅网上的情况^[9]。我们建立的模型是，让频率为 1GHz（对应波长为 0.3m），功率为 1W 的电磁波在矩形波导中传播，矩形波导的中央设有金属栅网，组成金属栅网的金属圆柱体的直径以及它们的间距都远小于入射电磁波的波长（金属圆柱体的直径为 0.02m，轴线间距为 0.04m），分别在入射波的电矢量垂直于金属圆柱轴线和平行于金属圆柱轴线两种情况下，模拟了电磁波的传播图像，如图 5、图 6 所示。由图 5 和图 6 可以清楚地看到，当入射波的电矢量垂直于金属圆柱轴线（TM 波）时，电磁波可以顺利地穿过金属栅网；而当入射波的电矢量平行于金属圆柱轴线（TE 波）时，电磁波几乎不能穿过金属栅网，这与之前的理论分析是一致的。

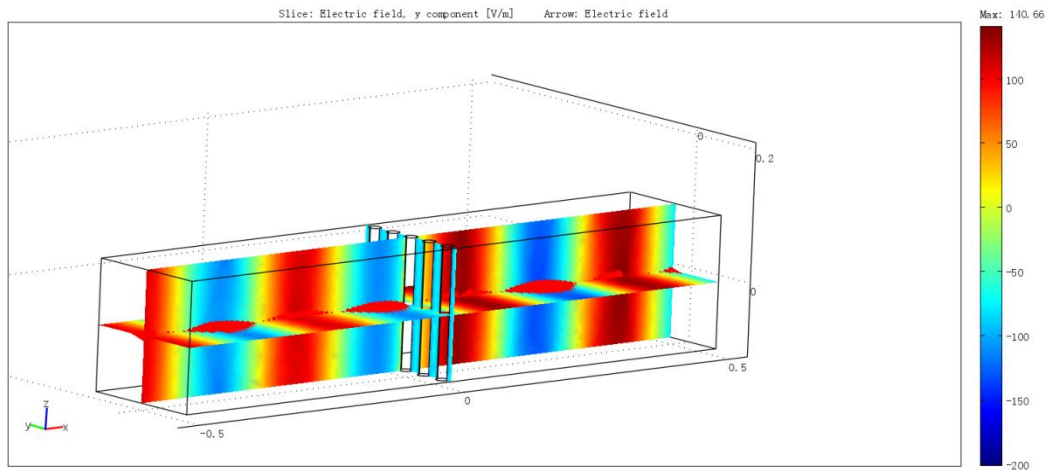


图 5 电矢量与圆柱轴线垂直的情况

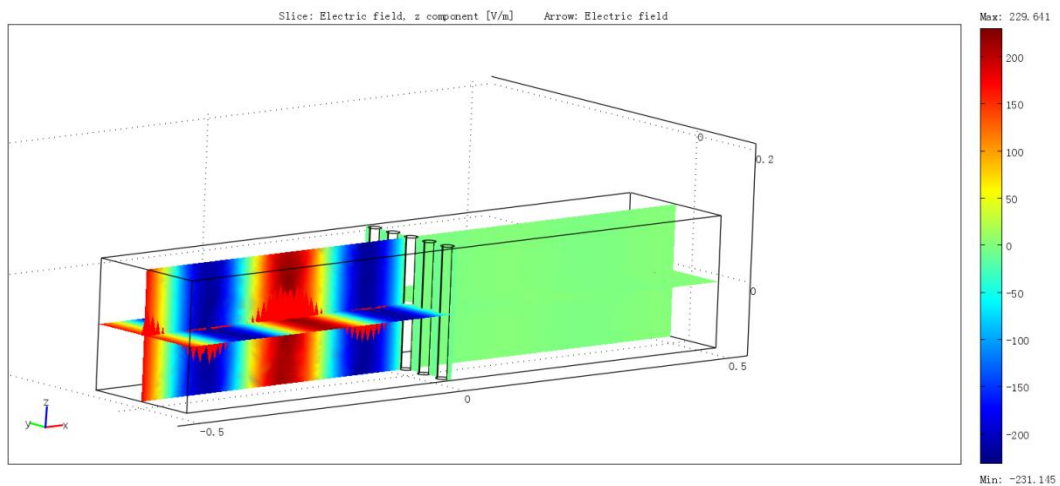


图 6 电矢量与圆柱轴线平行的情况

3 实验设备

网络分析仪、双脊天线喇叭、电线、木板、胶水、pcb 板、塑料板、剪刀、卷尺

4 网络分析仪的使用

网络分析仪在本实验中用来检测微波信号，它的基本操作步骤为：

a) 定标

定标通过网分的 Cal 按键来完成，但是由于定标的步骤比较繁琐，而且定标配件非常昂贵，对于特定的实验只要调用相应的定标文件就可以了。具体的步骤是，Cal → manage Cal → Cal set → 选择相应定标文件就可以了。本实验所选的定标文件是 waveguidetest1-10G5dbm2010-10-27，我们用于测量的微波的频率范围是 1 至 10GHz。

b) 取平均

先点 Avg，再点 Average On，然后将 Average factor 设为 20。

c) 归一化

把网络分析仪的两个端口与两个喇叭连接。显示屏上会默认地显示 S_{11} （1 端口输出，1 端口接收的信号）的图像，而我们需要观测的是 S_{21} （1 端口输出，2 端口接收的信号）的图像。点 Trace，再点 New trace，勾选 S_{21} ，再点 Delete Trace，将 S_{11} 的图像删掉。然后点 Memory，再点 Normalize 进行归一化（注：每次改变喇叭的位置后都要进行归一化）。

d) 测量保存数据

点击 Format，可以选择不同的测量参数，选择 Log Mag 可以使纵坐标显示声级，选择 Lin Mag 可以使纵坐标显示微波的透射率，横坐标始终是频率，显示不同频率的波的情况。当图像比较稳定时就可以储存数据了，注意将数据储存为 prn 格式，因为 prn 文件可以直接用文本处理器打开。

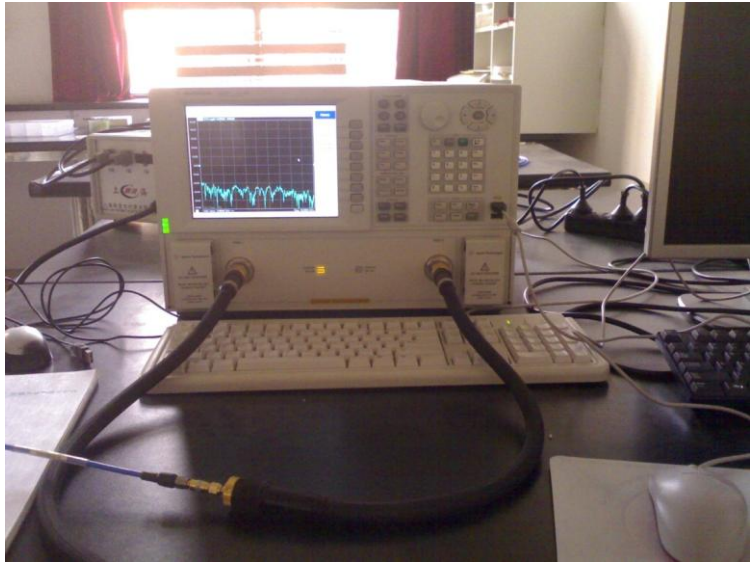


图 7 网络分析仪

5 金属栅网的制作

我们的基本设想是，在一块对微波传播影响很小的基板上，用带绝缘皮的电线紧密排列构造金属栅网结构。我们选择的基板是 $40\text{cm} \times 40\text{cm}$ 的木板，经测量该木板对微波传播的影响非常小，电线的金属芯直径为 0.5mm ，带绝缘皮的外直径为 1.1mm ，即金属栅网的金属线的分布周期为 1.1mm 。我们的具体制作方法是，把电线拉直，贴在木板上，然后用易干的胶水把电线粘在木板上，涂胶水的位置是电线的两端和中间的三个四等分点（我们事先已通过测量证明胶水对微波传播是没有影响的）。粘完一根电线后，紧贴着它粘下一根，不断重复下去。最终，我们制成的偏振片的有效区域（被电线覆盖的区域）的大小为 $35\text{cm} \times 40\text{cm}$ ，偏振片成品如图 8 所示。

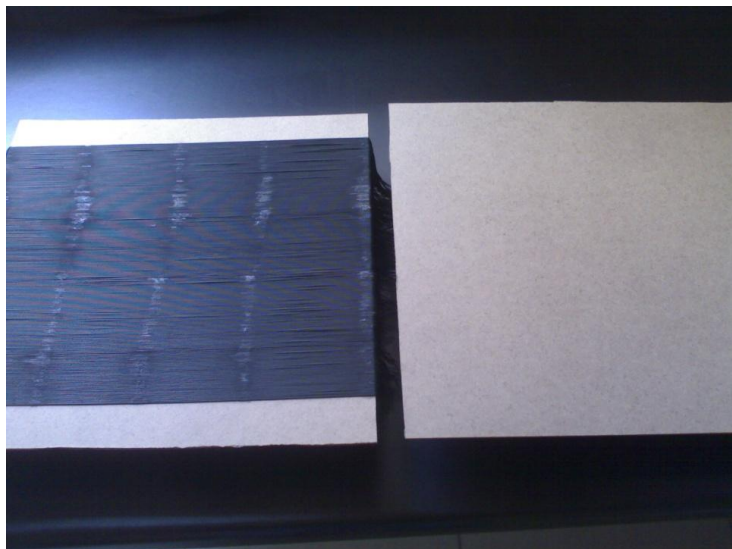


图 8 制作完成的偏振片与基板对照图

制作过程中值得注意的事项有，制作时要有两个人相互配合，一个人用力拉紧电线的两端，使电线笔直地贴着木板，另一个人快速地涂胶水，使电线与木板粘牢。胶水也不易涂地太多，否则多余的胶水凝固后会阻隔在电线之间，改变电线间距。最好是一次性地把所有电线排列粘合完毕，否则由于胶水凝固，两次操作的衔接处会有凝固的胶水阻隔，改变电线间距。

6 金属栅网的性能检测

我们的测量参数为声级和透射率。声级反映的是样品对微波强度的影响，即把样品放在微波传播途中，测量微波信号穿过样品后声级的变化值。我们以没有放样品时的数据作为基准点，设为 0，测得的是相对基准点的增益。透射率则直接反映了样品能让入射波透过去多少。测量时要通过改变两个喇叭的间距，测得多组数据然后取平均，这样做是为了消除喇叭间驻波的影响。具体操作方法是，测量时把样品放在喇叭口，喇叭的距离从 40cm 变化到 85cm，每隔 5cm 测量一个数据。在此详细说明一下我们的测量方法。首先，对网络分析仪进行定标、取平均值等基本设置。然后将网络分析仪与两个双脊天线喇叭连接，调整好两个喇叭的位置，使两个喇叭口对齐（喇叭是安放导轨上的）。接着对网络分析仪进行归一化，将测量样品（偏振片、基板等）安放在喇叭口，待网络分析仪显示的图像相对稳定后记录保存数据。测完一个数据后，通过导轨调整喇叭间的距离，再做归一化，测量下一个数据。以我们制作的偏振片为测量样品，我们分别在入射波的电矢量垂直于金属圆柱轴线（TM 波）和入射波的电矢量平行于金属圆柱轴线（TE 波）两种情况下进行了测量，得到如下结果：

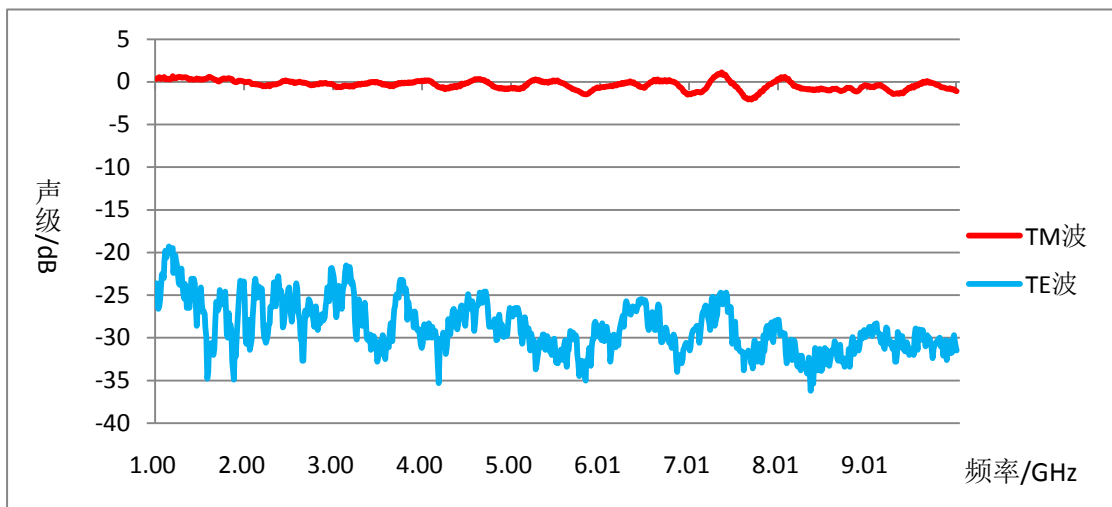


图 9 偏振片对微波强度的影响

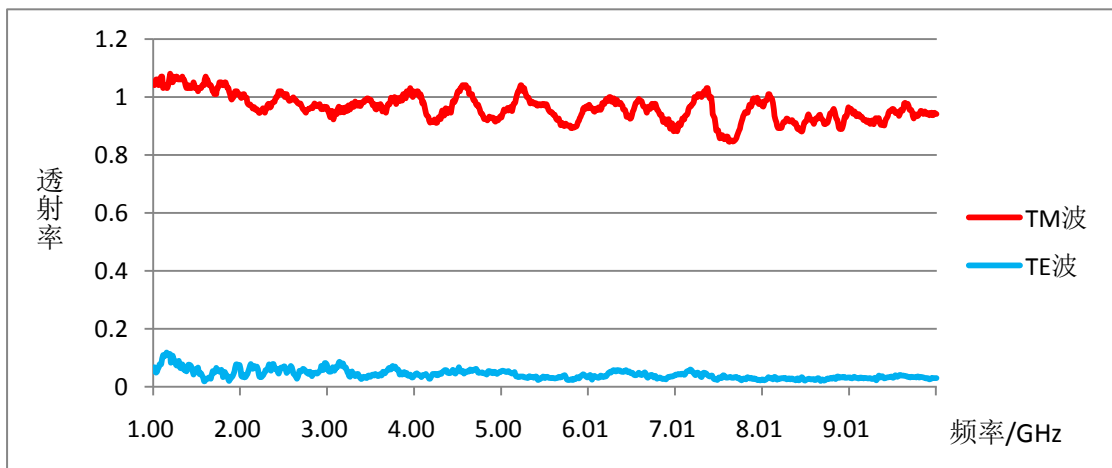
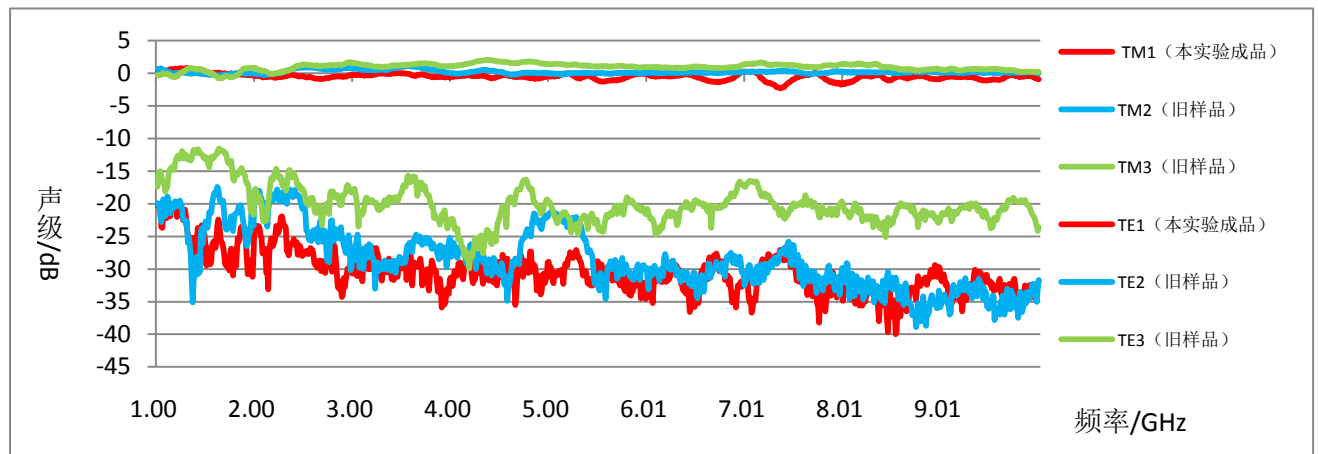


图 10 偏振片的透射率

由上面两图可知，在 1 至 10GHz 的频率范围内，偏振片对 TM 波的透射率普遍达到百分之九十以上，对 TM 波强度的影响很小，普遍在小于 0.1 dB；偏振片对 TE 波的透射率很小，普遍小于百分之一，对 TE 波的强度影响很大，普遍能使声级减弱 30dB 左右。总之，偏振片的性能是不错的。

另外，我们还对比了我们的新偏振片与前人的两个旧偏振片的性能，得到如下结果：

图 11 三个偏振片对微波传播的影响，编号 1 代表我们的新偏振片，2、3 分别代表前人的两个旧偏振片。



由上图可以发现：我们的偏振片对 TE 波的阻挡作用还是很好的，能普遍使入射波的声级降低 30 到 40dB，特别在高频段，不仅能很好的阻止微波的通过，而且衰减得很均匀、稳定；而对 TM 波的透过作用也是很好，对其声级的影响一般都在 0.1dB 的量级。与前人的偏振片相比而言，综合对 TE 波和 TM 波的影响，我们的新偏振片的性能还是不错的。

7 总结

本实验的最初目标是设计制作能调控微波偏振性的微波偏振片并对其性能进行测量，我们通过定性、定量的分析和 COMSOL 软件的模拟，建立了基本的实验方案，在前人的基础上用带绝缘皮电线在基板上密排的方法制作完成了新型的微波偏振片。网络分析仪测试的结果显示，在 1 至 10GHz 的频率范围内，我们的偏振片的偏振性能良好。

8 致谢

感谢张新夷老师和乐永康老师对我们实验的悉心指导和帮助。感谢何琼老师在网络分析仪使用方面对我们的指导。

参考文献

- [1] W. G. Chambers, T. J. Parker, A. E. Costley, Freestanding fine-wire grids for use in millimeter- and submillimeter-wave spectroscopy, *International Journal of Infrared and millimeter waves*, vol.9, no.2, pp.157-172, 1988
- [2] J. Lahtinen and M. Hallikainen, Fabrication and characterization of large free-standing polarizer grids for millimeter waves, *International Journal of Infrared and millimeter waves*, vol.20, no.1, 1999
- [3] E. Hecht 原著，张存林改编. 光学（第四版）. 北京，高等教育出版社
- [4] 刘云飞，金属栅网的亚毫米波散射特性研究，南京航空航天大学，pp.5-7
- [5] M. G. Moharam, Eric B. Grann, Drew A. Pommet, T. K. Gaylord, Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings, *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, 12(5):1068-1076
- [6] M. G. Moharam, T. K. Gaylord, Rigorous coupled-wave analysis of metallic surface-relief gratings, *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, 3(11):1780-1787
- [7] 邢德财，几种介质光栅的衍射特性研究，四川大学，pp.27-39
- [8] 刘双平，陈若霖，乐永康，微波偏振片的机理研究和制作，未发表
- [9] 杨程，微波偏振片的设计和制作，未发表