手性材料的波导特性：实验

Gerald Busse，IEEE，Jens Reinert，IEEE，
和ArneF.Jacob，IEEE成员

文摘：本文研究了手性材料的波导实验：从两个不同长度的手性板的测量响应中提取本构参数。 实施的实际方面进行讨论。 这包括用于制造手性材料的注射成型技术。 进行了初步调查，以定性地评估材料的性质。 这些都是由提取的本构参数定量证实的。 通过对参考材料的实验验证了测量结果。

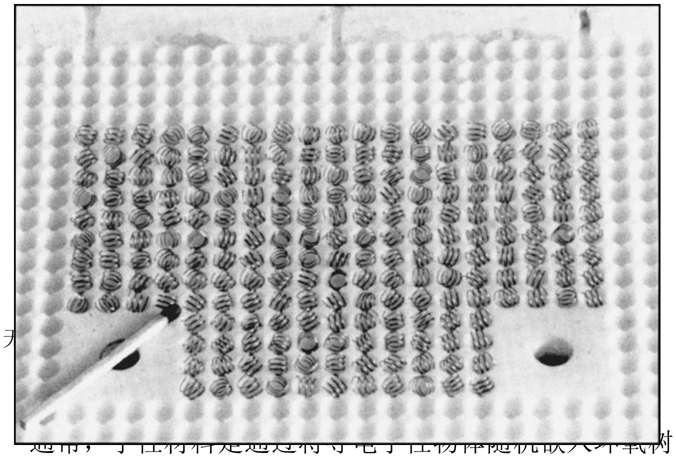
指数项-手性材料，本构参数，波导测量。

I. 导言

u 在各种实现中，自由空间设置被用来表征手性材料的[1]。 尽管本构参数提取在数学上简单，但测量齿轮必须进行精确的设计、制造和调整，以获得所需的精度和稳定性[2]。 相反，波导测量系统以简单、重现性和精度[3]而闻名。 然而，更多的是涉及数学数据处理。 在[4]中，从合成散射参数中提取手性参数，用简单的半解析方法得到了该问题的解。 这种方法在实验上得到了验证，[5]我们确定了泡沫基手性材料的手性，这也在本文中得到了应用。 理论上[6]处理的完全反演得到了介电常数 ，渗透性 β以及通过Drude-Born-Fedorov定义的手性参数表示法

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon_0\varepsilon_r(\boldsymbol{E} + \beta\nabla\times\boldsymbol{E}), \boldsymbol{B} = \mu_0\mu_r(\boldsymbol{H} + \beta\nabla\times\boldsymbol{H}). \tag{1}$$

本文简要回顾了手性材料的生产情况，并详细介绍了该脱层工艺的实际实施情况。 初步的测量被描述，这允许定性地评估材料的行为。 这些发现被从倒置测量的散射参数中得到的本构参数定量地证实。 该方法得到了对已知性能的复合介质材料的测量的支持。



通常，手性材料是通过将导电手性物体随机嵌入环氧树脂或硅橡胶宿主[7]-[10]来制备的。 除了所需的疏散和固化宿主材料的过程外，样品的固定形状、尺寸和手性浓度也是缺点。 进一步地，偶然的不均匀性或各向异性不能被纠正。 为了避免这些困难，研制了一种粒状球基手性材料。 这种材料的改进灵活性最能满足我们的实验需要。 这是特别正确的，因为这里使用的数学去床程序[6]需要在至少两个不同长度的板上进行测量。

将直径为0.2mm的铜线绕成右三圈螺旋，得到直径为4.0mm、高度为4.0mm的手性物体。 电线长37.5毫米，即4GHz的半波长。 对象的几何形状没有以任何方式进行优化。 对于电绝缘和允许随机取向，每个螺旋被嵌入在一个6.0毫米介电泡沫球使用注射成型工艺[5]。 为此，螺旋分散在聚四氟乙烯模具，注入常规的两组分聚氨酯泡沫(图。 1)。 在每次运行中，产生了8400个手性物体，足以填充平均0.79米直径为50毫米的圆形波导。 这相当于61%的体积分数%。 该材料可以通过随机添加泡沫球而不含手性包合物来稀释。 波导内手性板的形状由两个7.5mm厚的聚苯乙烯泡沫塞固定。 因为长度短，介电常数大 $j1.28$ 例如

$\varepsilon_r = 1.03 -$ 10^{-4}

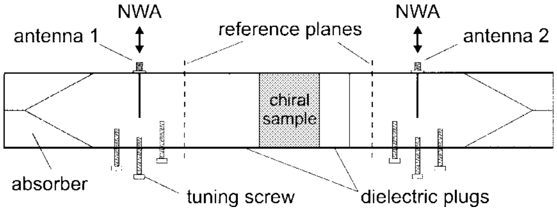
稿件于1998年2月18日收到；1998年10月26日修改。

G.巴斯与大众汽车公司，技术开发，汽车电子，D-38436沃尔夫斯堡，德国。

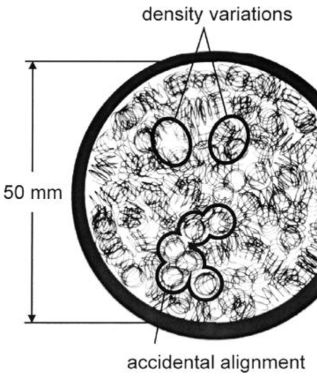
j. 莱因特和A。 f。 雅各布是¨德国联邦共和国布伦瑞克技术大学D-38023布伦瑞克技术学院的¨。

出版商项目标识符S0018-9480（99）01955-9。

0018-9480/99$10.00 1999IEEE



无花果。 2. 测量装置的草图。



无花果。 3. 在50毫米圆波导内20毫米手性板的X射线摄影。

由谐振器测量确定，它们对测量响应的影响可以忽略不计。

III. 设置

在[6]中，使用左右侧循环模式来表征材料。 在实践中，线偏振波更方便测量。 散射参数

S_{11}在S_{12}前者和，S_{21}在后者的情况下是相关的$S_{11}^{\mathbf{lln}}S_{21}^{\mathbf{lln}}S_{21}^{\mathbf{lln},\phi}$

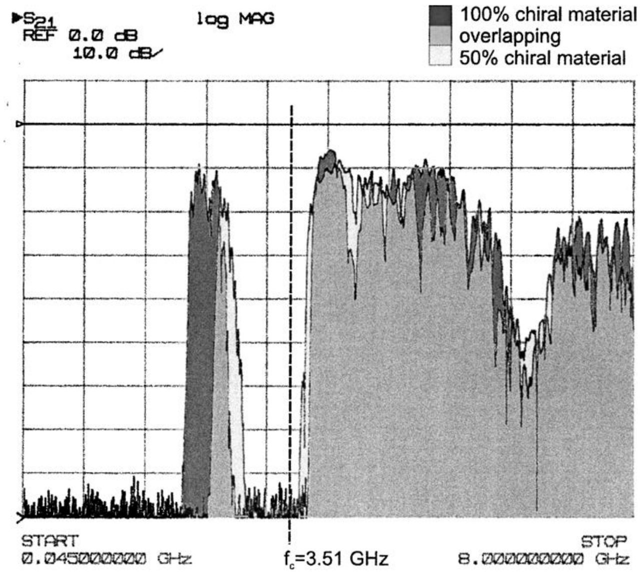
$$S_{11}^{\mathbf{lln}} = S_{11}$$

$$S_{21}^{\mathbf{lln}} = \frac{S_{21}+S_{12}}{2}$$

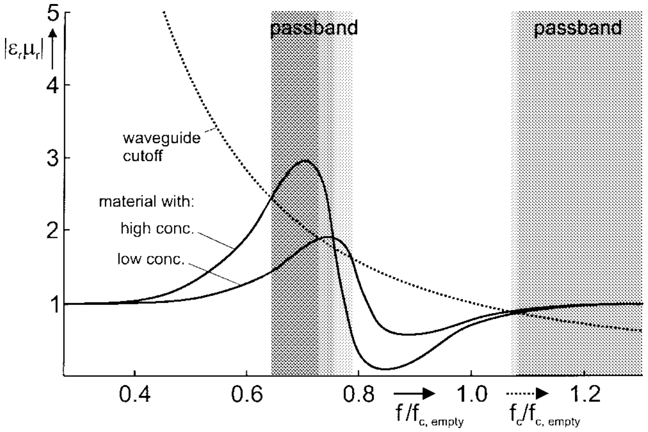
$$S_{21}^{\mathbf{lln},\phi} = \frac{S_{21}e^{j\phi}+S_{12}e^{-j\phi}}{2}. \qquad (2)$$

前两个散射参数是发射和接收天线的共极性取向。 在第三个方程中，表示接收天线必须旋转的方位角，以评估材料的旋转和圆二色性。ϕ

实验装置(图。 2)由直径50毫米的波导[5]组成。 其基本模式区域从3.51扩展到4.59GHz。 的 TE_{11} 模式是通过径向线性天线调谐的最小反射来激发的。 在天线后面，波导被吸收部分终止，以避免多次反射。 样品保持架，波导截面为600毫米，使用卡口接头连接到两个天线截面。 后者旨在提供精确的对齐和可重复的低损耗连接。 此外，样品保持架可以很容易地旋转。 这对于确定平均材料性能是有用的(见第四-B节)。 以测量共极和跨极 $(\phi =$ $90°)$ 传输时，接收天线部分可以单独旋转。 天线的同轴端口连接到矢量网络分析仪(NWA)HP8510C。天线截面的波导端口是通过反射线(TRL)校准的参考平面[1] 进行以消除系统错误。 设计了合适的校准标准。 板坯的确切位置，有关这些参考平面，必须考虑在剥离过程中。



无花果。 4. 完全手性填充装置的通带和截止频率。



无花果。 5. 从建模的材料色散（颜色如图所示）构造通带和截止频率。 4)。

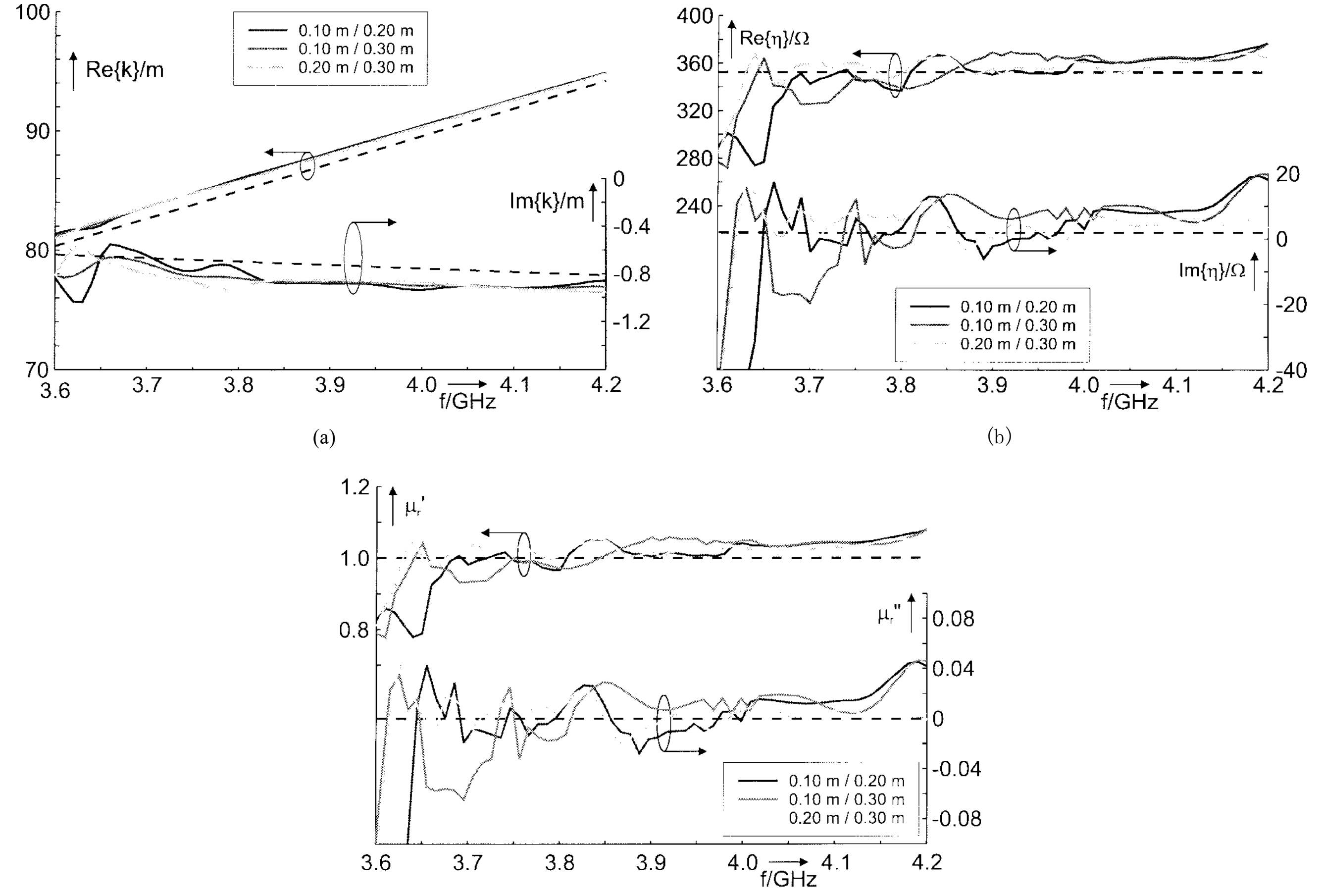
IV. 测量和结果

A. 定性评估

在这一部分中，提出了一些初步的研究，提供了关于同质性、手性，特别是手性材料的共振行为的重要信息。 当样品相对于天线旋转时，观察到散射参数的波动。 它们是由材料的不均匀性引起的。 事实上，X射线摄影(图。 一个20毫米长的手性板在50毫米波导内的3)揭示了这两个局部

---

[1] 惠普公司，“应用HP8510BTRL校准非同轴测量，”产品说明8510-8，圣罗莎，CA1987。



(a)

(b)

(c)

无花果。 6. 测量(A)波数k，(B)波阻抗，(C)渗透率,木材刨花与频率的关系。
$\varepsilon_r\mu_r$.

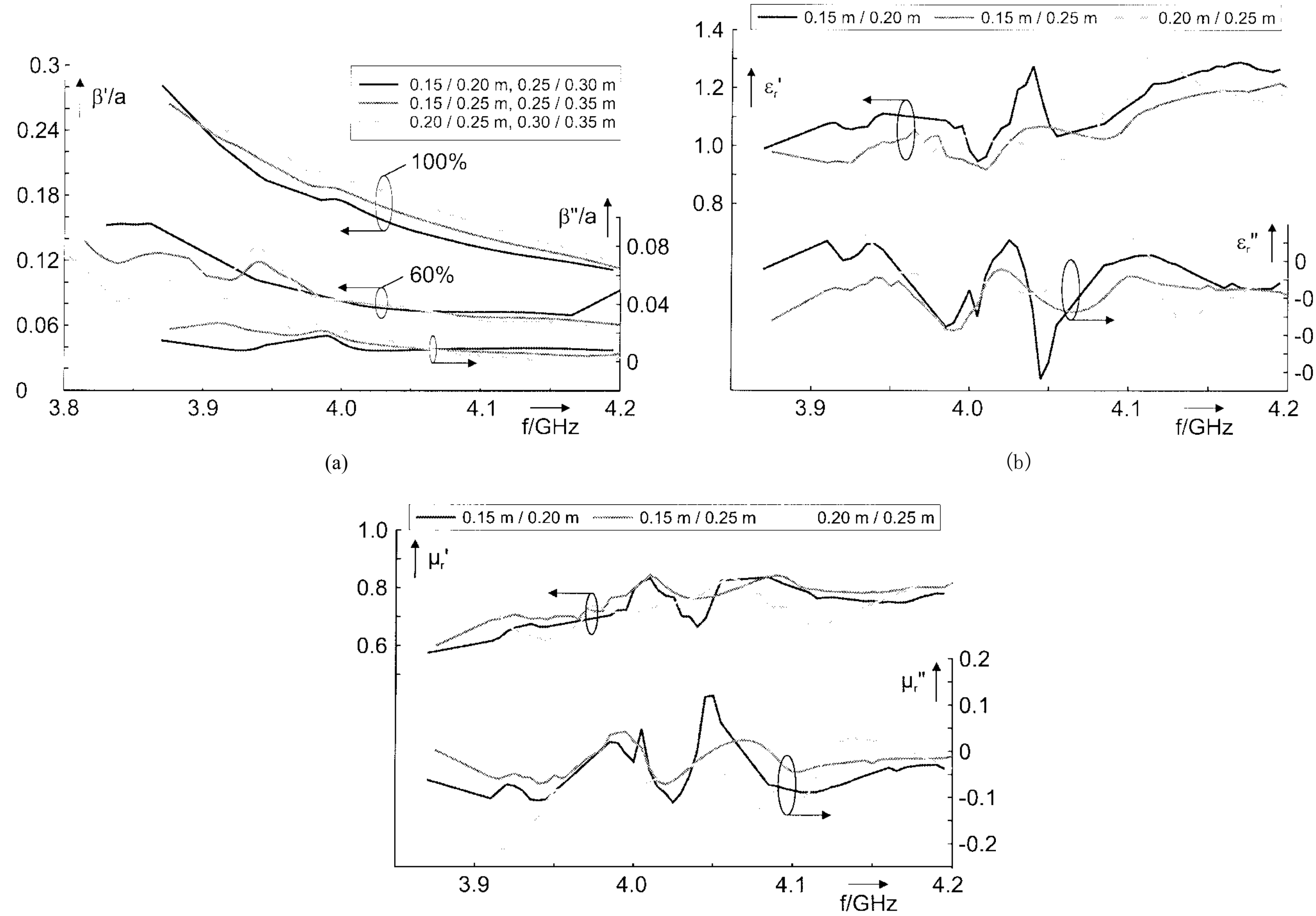
螺旋的密度变化和偶然排列。 由于测量的波动超过了反演程序[6]可接受的限度，因此必须对材料进行人工均匀化。 为此，将样品旋转30次，并对六次测量的散射参数进行平均。 这最终产生了在一定程度上可重复的结果。

由于手性参数的真实部分与透射线性偏振波的旋转相连，因此在三个频率上测量了旋转角，即3.85、4.0和4.3GHz，以及与[7]中不同的板坯长度和手性浓度。 事实上，材料的手性随着手性浓度的增加而增加。 此外，旋转角度几乎随板坯长度呈线性增加，但随频率[5]而减小。 虽然前者的结果表现出预期的行为，但后者表明手性材料的共振低于3.85GHz。

在进一步的实验中，不仅样品保持架，而且天线截面分别完全填充50%和100%的手性材料。 然后测量从0到8GHz的传输。 从图中可以看出。 4、假通带远低于空波导的截止频率。f_c 然后是一个阻带。f_c 再一次，在第二通带中传播是可能的。 此外，当降低手性浓度时，该通带向较低的频率移动，而带宽下通带和阻带减小。 这样的光谱序列是由波导和材料色散的叠加引起的。 为了解释这个，图。作为虚线，圆波导的归一化截止频率与 $\varepsilon_r\mu_r$ 这里，为了简化，省略了手性的影响。 无花果。 还分别显示了一些高浓度和低浓度任意手性材料的分散特性。定性共振行为取自数值模拟[11]。注意，对于较高的手性浓度，共振向较低的频率移动，而极值变得更明显。 通过用这样的材料填充波导，通带将发生在哪里 允许波传播，即色散曲线超过截止曲线。 事实上，除了预期的高通行为外，虚假通带是用这种相对粗糙的模型构造的。 此外，如图所示。 对于较高的浓度，杂散通带被扩展并向较低的频率移动，而第二通带则移动到较高的频率。 这些发现支持了被测材料的共振如下设置的基本模式区域。

B. 定量评估

在第一步中，对介电材料进行了表征，以验证测量过程。 由于泡沫基手性介质预计将显示大约一个产品，the $\varepsilon_r\mu_r$



(a) (b)

(c)

无花果。 7. 测量了手性材料的本构参数与频率的关系。 (a)浓度为100%和60%的归一化手性参数(a=0：025m)。 (b)介电常数（100%）。 渗透率（100%）。

试验材料由给定密度的木屑制成。 它的介电常数被确定为 $j0.02$ 从a 谐振器测量在3.46GHz。$=1.145-$ 与手性介质TM_{011}一样，它是复合的，因此，它可能包括不均匀。 它还需要聚苯乙烯插头来调整样品的几何形状和位置，并保持其密度。 测量了三个0.1-、0.2-和0.3-m长度的共极性样品 $90°)$ 天线方向。 没有取平均值。 无花果。 6说明了所有三种板长组合的反演结果。 手性参数$(\phi =$几乎为零，因此，这里没有显示。 齐次空间波数 与用虚线标记的外推参考值完全一致[图。 6(a)]。 这也适用于波阻抗 $\eta = \sqrt{(\mu_0\mu_r)/(\epsilon_0\epsilon_r)}$ 然而，它表现出显著的波动[图。 6(b)]。 这些都是重复的，从图中可以看到。$k = \omega\sqrt{\epsilon_0\epsilon_r\mu_0\mu_r}$ μ_r 6(c)。 这里没有显示介电常数，因为它与磁导率是互补的。 这是因为 曲线。 如[6]所讨论的，相对较大的波动是由误差积累引起的。k 虽然真实的部分和可以确定在5%-10%以内，但小的虚部受到更强的变化。η 这一问题是非共振测量方法固有的，只能通过采取长度[6]差异较大的板坯来缓解。ϵ_r μ_r

其次，测量了含100%手性球的板坯的共极和交叉极散射参数。 对样品支架的六个不同方位方向进行了测量，并进行了平均测量，以减少材料不均匀性的影响。 板坯长度分别为0.15、0.2和 0.25米。 7描述了三种可能组合的本构参数。 它们遵循[6，eq的解。 （17）]，即从手性波导中的基模传播常数 还有 因为剩下的模 相位模糊，反演结果并不唯一。 由和确定的传输相位k_z^+ k_z^-必须被一些2π倍数独立地改变β这些数字是经验性地调整的，以给出一个物理上健全的k_z^+ k_z^- 2π 解决方案，由于这两个量表现出相当平稳的频率依赖性，k标准是它们的响应没有突然的跳跃。 事实证明，程序相当明确。 这基本上是因为反演关联了从两个独立测量中获得的信息，即从两个不同长度的板中获得的信息。 由于手性材料中的移位截止(见IV-A节)，曲线仅在3.85GHz处开始。 手性参数在3.85-4.2GHz之间减小，在数量上证实了上述定性结果（另见[5]）。 （归一化）真实部分大约从0.3减少到0.1，不同的曲线在百分之几以内β'/a

β''/a其他。 正虚部以类似的方式减小。 发现它对方位向样品取向敏感。 至于介电情况，曲线为 反过来，对于介电常数和磁导率，表现出更强的变化，η证实了前面所说的。 然而，由于材料的不均匀性，波动现在要明显得多。ε_r' 平均值大致从1.0（0.6)增加到1.25(0.8），证实了手性材料的共振。 这些数字被用来(μ_r)预测可调谐腔谐振器的谐振频率。 计算结果可[12]实验验证。 想象的部分仍然更不确定，也没有得出如此明确的结论。 事实上，从这些不稳定的测量中得到的本构参数甚至描述了在大部分频率范围内的（轻微）活性物质。 用0.25-、0.3-和0.35-m长度的手性板重复测量，由60：40螺旋加载和卸载泡沫球的混合物组成。 作为一个例子，手性参数包括在图中。 7(a)。 它几乎与手性浓度成比例地降低。 此外，截止点向较低频率略有移动。 这与图中所示的简单模型是一致的。 5. 这里没有显示的是均匀性降低的影响，即剩余本构参数的较强波动。

这些结果验证了所提出的测量方法结合[6]中的反演算法，适合于确定手性材料的本构参数。 如参考材料所示，固有的测量误差是可以接受的小。 因此，在手性材料的本构参数上观察到的强波动显然是由其不均匀性引起的。 与模型假设相反，平板是由离散散射体组成的，虽然与波长相比很小，但它们的行为不像理想的材料。 散射参数，特别是反射系数对平板内手性物体排列的强烈依赖性证实了这一点。 为了解决这个问题，必须制造一种具有更紧密的缠绕螺旋导致更小球体的手性材料。

本文提出的方法的一个限制是对手性板内外基模传播的需求。 这是很难满足的，特别是在材料的共振附近，或者对于具有高介电常数或磁导率的宿主介质。 不同直径的样品持有者可以[13]解决这一问题。 将这一分析与本文描述的反演和测量过程相结合，可以提高可接近的本构参数范围。

V. 结论

提出了一种从波导测量中提取手性材料本构参数的新方法。 结果表明，与对材料性能的定性评价是一致的。 通过对介电测试材料的测量，进一步验证了该过程。 自的手性参数-制备的手性介质可以用较高的重现性来测定。 然而，介电常数和磁导率受到一些变化的影响，这些变化被证明是材料不均匀的影响，并主导了测量精度。 这些问题可以很容易地用改进质量的材料来解决。 该测量方法设置简单、计算速度快、精度高，带宽相对较窄，但具有较强的竞争力。

参考资料

[1] 罗R.，V.V。Varadan和V.K。瓦拉丹，“手性复合材料的实验研究”，Proc。 SPIE-Int。 Soc。 选择。 英格。，第二卷。 1558页。 269–287,1991.

[2] A.史密斯，人工手性介质的实验研究 微波频率，Ph。 D.论文，大学。 Stellenbosch，南非，1994年。

[3] C.R.Brewitt-Taylor，P.G.Lederer和S.Haq，“理论的比较并测量了螺旋负载手性复合材料的性能，“在Proc。 *双异构体‘97-Int。 Conf。 和车间电磁学。* 复杂媒体，Univ。 格拉斯哥，格拉斯哥，苏格兰，1997年6月，pp。 55–58.

[4] j. 雷纳特，G。 巴斯，和A。 f。 雅各布，“提取气的程序-来自波导测量的Rality参数，“在Proc中。 第四届国际会议。 Conf。 手性双各向异性媒体，宾夕法尼亚州立大学，大学公园，PA，1995年10月，pp。 9–12.

[5] G.Busse，J.Reinert，M.Klemt和A.F.Jacob，“论手性度量-圆形波导中的Ments，“复杂电磁材料的进展”，A.Priou，A.Sihvola，S.Tretyakov和A.Vinogradov，Eds。 Norwell，MA：Kluwer，1997年，pp。 333–339.

[6] J.Reinert，G.Busse和A.F.Jacob，“手性材料的表征：理论”，这个问题，pp。 290-296.

[7] R.D.Hollinger，V.V。Varadan，D.K.Ghodgaonkar和V.K。 瓦拉丹，“各向同性手性复合材料在圆形波导中的实验表征”无线电SCI。，第二卷。 27，不。 2，pp。 161–168,1992.

[8] a. 西沃拉，M。 奥克萨宁和A。 胡詹恩，“宽带微波人工手性材料的测量和分析，“在Proc。 第24届欧洲微波Conf。戛纳，法国，1994年9月，pp。 378–383.

[9] R.Luebbers，H.S.Langdon，F.Hunsberger，C.F.Bohren和S。吉川，“复合手性材料在宽带上的有效手性参数的计算和测量”，IEEETrans。 Antennas Propagat。，第二卷。 43页。 123-130，1995年2月。

[10] K.W.Whites，“计算和测量散射的比较人工手性材料，“在Proc。 第四届国际会议。 Conf。 手性双各向异性双各向异性媒体，宾夕法尼亚州立大学，大学公园，PA，1995年10月，pp。 17–20.

[11] g. 奥伯施密特和A。 f。 雅各布，“关于手性的共振行为*材料，“在Proc。 第24届欧洲微波Conf。*戛纳，法国，1994年9月，pp。 372–377.

[12] g. 巴斯，J。 雷纳特和A。 f。 雅各布，“实验表征手性介质，“在INT。 Conf。 Antennas，Radio-Commun。 Syst，Means，vol。 3，Voronezh，Russia，May1997，pp。 134–140.

[13] g. 巴斯，J。 施密茨和A。 f。 雅各布，“不同的手性部分*圆波导测量直径，“在Proc。双异构体‘97-Int。 Conf。 和车间肌电图。 复杂媒体，Univ。 格拉斯哥，格拉斯哥，苏格兰，1997年6月，pp。 47–50.*

杰拉尔德·巴斯(A’94)，关于照片和传记，见本期，第296页。

延斯·莱因特(S‘95-A’96)，关于照片和传记，见本期，第295页。

Arne F.Jacob(S’79-M’81)，关于照片和传记，请看本期， p. 296.