

文章编号: 2095-4980(2025)08-0836-08

基于 MUT 自谐振的太赫兹开口波导介电测试方法

贵 雨¹, 宁兴凯¹, 李 岩¹, 邓建钦², 李 川³, 于 壮³, 李环廷³, 王 斌^{*1}, 高睦志¹

(1. 中国石油大学(华东) 控制科学与工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 中电科思仪科技股份有限公司, 山东 青岛 266555;
3. 青岛大学附属医院, 山东 青岛 266011)

摘 要: 材料的介电检测对于准确评估其太赫兹电磁波特性及确保其在相关应用中的有效性至关重要。本文基于被测材料(MUT)自谐振特性提出一种结合电子法太赫兹技术与波导开口反射的材料介电特性测试方法。利用时域有限差分(FDTD)电磁场数值分析方法, 明确在矩形波导口 MUT 发生自身谐振的电磁过程及影响因素; 然后通过波导反射系数获得对 MUT 介电特性的表征关系; 基于材料自谐振的频率偏移, 在单晶硅片上开槽、刻蚀通道, 并与聚二甲基硅氧烷(PDMS)键合, 测量通道内液体的介电特性; 最后, 依据仿真规律在实验室搭建以单晶硅片为 MUT 的测试系统, 验证了仿真结果的可靠性以及所提出材料介电测试方法的可行性。

关键词: 矩形波导; 时域有限差分(FDTD); 被测材料(MUT)谐振; 太赫兹介电测试

中图分类号: TN814^{+.5}

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2024501

Dielectric measurement method of terahertz open waveguide based on MUT self-resonance

GUI Yu¹, NING Xingkai¹, LI Yan¹, DENG Jianqin², LI Chuan³, YU Zhuang³,
LI Huanting³, WANG Bin^{*1}, GAO Muzhi¹

(1. School of Control Science and Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao Shandong 266580, China;
2. Ceyear Technologies Co., Ltd., Qingdao Shandong 266555, China;
3. The Affiliated Hospital of Qingdao University, Qingdao Shandong 266011, China)

Abstract: Dielectric characterization of materials is crucial for accurately assessing their terahertz electromagnetic properties and ensuring their effectiveness in relevant applications. A method is proposed for dielectric property testing of Materials Under Test(MUT) based on their self-resonant characteristics, combining electronic terahertz technology with waveguide aperture reflection. The electromagnetic process and influencing factors of the self-resonance of the MUT at the rectangular waveguide aperture are clarified using the Finite-Difference Time-Domain(FDTD) method for electromagnetic field numerical analysis. Subsequently, the relationship between the waveguide reflection coefficient and the dielectric properties of the MUT is obtained. Based on the frequency shift of the material's self-resonance, grooves and etched channels are created on a single-crystal silicon wafer which is then bonded with polydimethylsiloxane(PDMS) to measure the dielectric properties of the liquid within the channels. Finally, a testing system with a single-crystal silicon wafer as the MUT is constructed in the laboratory according to the simulation rules, verifying the reliability of the simulation results and the feasibility of the proposed dielectric testing method.

收稿日期: 2024-08-24; 修回日期: 2024-09-30

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(42174141); 国家自然科学基金青年资助项目(62301611); 青岛市市南区科技计划资助项目(2022-4-010-YY)

*通信作者: 王 斌 email:wangbin2015@upc.edu.cn

引用格式: 贵雨, 宁兴凯, 李岩, 等. 基于 MUT 自谐振的太赫兹开口波导介电测试方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(8): 836-843. DOI: 10.11805/TKYDA2024501.

Citation format: GUI Yu, NING Xingkai, LI Yan, et al. Dielectric measurement method of terahertz open waveguide based on MUT self-resonance[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(8): 836-843. DOI: 10.11805/TKYDA2024501.

Keywords: rectangular waveguide; Finite-Difference Time-Domain(FDTD); Materials Under Test (MUT) resonance; terahertz dielectric testing

材料的介电检测在评估其电磁特性方面至关重要, 有助于优化在电子通信、生物医学和材料科学等领域的实际应用^[1]。当前太赫兹技术中的主流材料电参数测试方法主要包括传输线法和自由空间法^[2-5], 但这些方法因实验设备复杂, 往往受限于仪器和平台的性能。相比之下, 矩形波导因其优越的性能和简单的结构, 在电磁场测量和成像中得到广泛应用^[6-8]。电子法太赫兹技术依托微波矢量网络分析仪和太赫兹扩频模块, 在特定频段通过扫频方式进行测量。通过优化测试平台的中频带宽, 可实现 1 Hz 级别的频率分辨力, 而由于谐波输出能量更大, 频率分辨力和测试灵敏度通常优于太赫兹时域光谱技术。太赫兹扩频模块的输出端为标准矩形波导, 相比于自由空间的反射, 矩形波导对波场区域的限制更为严格, 这种能量汇聚提高了测量精确度, 尤其在测量高损耗材料时展现出优势。在微波频段, 基于矩形波导口的反射测量可利用单模块对高损耗材料的复介电常数进行测试^[9-10]。但现阶段采用矩形波导口反射法进行测试时, 仍存在一些不足, 包括高阶模影响显著, 导致测试结果的准确性受到影响; 此外, 推导过程复杂, 增加了使用和分析的难度。在太赫兹频段, 波长较短, 波导尺寸与之匹配, 已缩小至毫米级, 波导端口能有效集中电磁波的能量。当材料放置在波导端口处时, 端面处高度汇聚的电磁能量使反射的电磁波能够准确反映材料的电磁特性。

本文研究了基于电子法太赫兹技术的开口矩形波导反射法用于检测材料的介电特性, 探讨了矩形波导反射法在材料测试中的应用方法, 并对 110~170 GHz 频段下的数值仿真与物理实验进行了分析和对比, 验证了该方法的可行性。

1 矩形波导反射法介电测试的理论基础和原理

1.1 矩形波导端口主模的传输特性

TE₁₀ 模是矩形波导中最基本的传播模式之一, 具有宽频带、低损耗、易于激励和实现单模稳定传输^[11]的特性。TE₁₀ 模的截止波数 $k_c = \frac{\pi}{a}$ (a 为波导的宽边长), 截止波长为 $\lambda_c = \frac{2\pi}{k_c} = 2a$ 。当工作波长 λ 小于截止波长 λ_c 时, 电磁波能够以 TE₁₀ 模在矩形波导中传播。导行系统中, 沿轴向相位差为 2π 的两点之间的距离称为波导波长 λ_g , TE₁₀ 模的波导波长为:

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}} \quad (1)$$

波导口近场区域, 电场 E_y 分量沿波导宽边(x 轴方向)呈正弦分布, 在波导的中心线处($x = a/2$)达到最大值, 在波导两侧($x = 0, x = a$)为零; 沿波导窄边(y 轴方向)均匀分布, E_x 和 E_z 分量均为零。磁场 H_x 和 H_z 分量同样沿波导窄边(y 轴方向)均匀分布, H_x 沿波导宽边(x 轴方向)呈正弦分布, 在波导的中心线处($x = a/2$)达到最大值, 在波导两侧($x = 0, x = a$)为零; H_z 沿波导宽边(x 轴方向)呈余弦分布, 在波导的中心线处($x = a/2$)为零, 在波导两侧($x = 0, x = a$)达到最大值。 E_y 、 H_x 和 H_z 沿波导宽边都是半个驻波分布^[11]。

在波导口的近场区域, 虽然电磁波尚未完全形成平面波, 但主要能量仍集中在主模的分布上, 依然保持近似主模传播, 目前测试系统应用 TE₁₀ 主模作为测试模式。

1.2 开口矩形波导材料测试的电磁过程

当电磁波在不同介质中传播时, 2 次反射波之间会产生相位差。当材料的厚度恰好等于或接近电磁波波长的半或其整数倍(式(2))时, 这种相位差会引发相长或相消干涉, 导致反射波强度发生显著变化, 这种现象通常称为半波损失。当电磁波从光疏介质(如空气)入射到光密介质(如硅片)时, 会产生半波损失; 而从光密介质入射到光疏介质时, 则不会出现这种现象^[12]。

$$d = k \times \frac{\lambda_m}{2} \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

式中: d 为材料厚度; λ_m 为材料中的波长。

在矩形波导的波导口处电磁场近似以 TE₁₀ 模传播, 因此波长 λ_m 可与波导波长 λ_g 构建关联:

$$\lambda_m = \frac{\lambda_g}{n} = \frac{\lambda_g}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (3)$$

式中: n 为材料的折射率; ϵ_r 和 μ_r 为材料的介电常数和磁导率。

电磁波在波导端面遇到材料时, 会经历前后端面的反射。部分电磁波能在材料的前端面反射, 并发生半波损失; 而另一部分电磁波能穿透材料在其后端面被反射, 此时反射的电磁波不会经历半波损失, 如图 1 所示。其中 n_1 和 n_2 分别为空气和材料的折射率, 且 $n_1 < n_2$ 。电磁波前后端面的反射, 会导致相位相差 π , 使反射波之间相消干涉, 反射的 S_{11} 幅值会出现极小值, 发生谐振。谐振频率 f_r 为:

$$f_r = \frac{c}{\lambda_m \sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

式中 c 为光速。

在材料前后端面的反射中, 波导波长 λ_g 影响了电磁波从波导进入材料之前的传播状态及其初始相位分布, 电磁波的相位差主要由材料中的波长 λ_m 决定, 这两个波长共同作用, 决定了电磁波在材料中的反射行为。

2 结果与分析

2.1 仿真分析

矩形波导的尺寸与材料的响应频率存在直接关联。材料的厚度影响其在波导中的谐振频率, 而波导的尺寸决定了可以传播的最低模式频率。为优化系统的普适性, 应根据材料的响应频率选择合适的波导型号, 确保波导的工作频段与材料谐振频率匹配。每种型号的波导对应特定的频率范围(即模块频段), 不同的波导类型能够支持的频率范围差异较大, 因此在实验中需根据材料的介电特性和预期的频率范围选择相应的波导型号。如, WR-10 波导适用于 75~110 GHz 频段, WR-3 波导适用于 220~325 GHz 频段。本文以厚度 0.3 mm、半径 11 mm、介电常数 11.9 的无损硅片为例进行建模, 其谐振频率为 144.9 GHz, 可采用标准型号 WR-6 的矩形波导。其宽边尺寸 a 为 1.651 mm, 窄边尺寸 b 为 0.825 5 mm, 工作频段为 110~170 GHz, 中心频段为 140 GHz, 如图 2 所示。其他常用矩形波导工作频段推荐选用的材料(以硅片为例)厚度如表 1 所示。基于时域有限差分(FDTD)方法对电磁波的传播过程进行模拟, 通过仿真可精确预测电磁波在材料中的行为, 有助于明确材料的介电常数、厚度等因素对电磁波的影响。

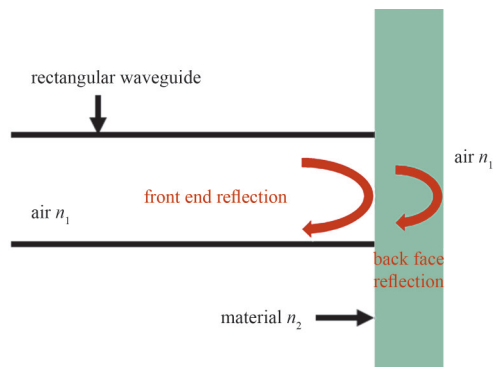


Fig.1 Reflection of electromagnetic wave on the end face
图 1 电磁波在端面的反射

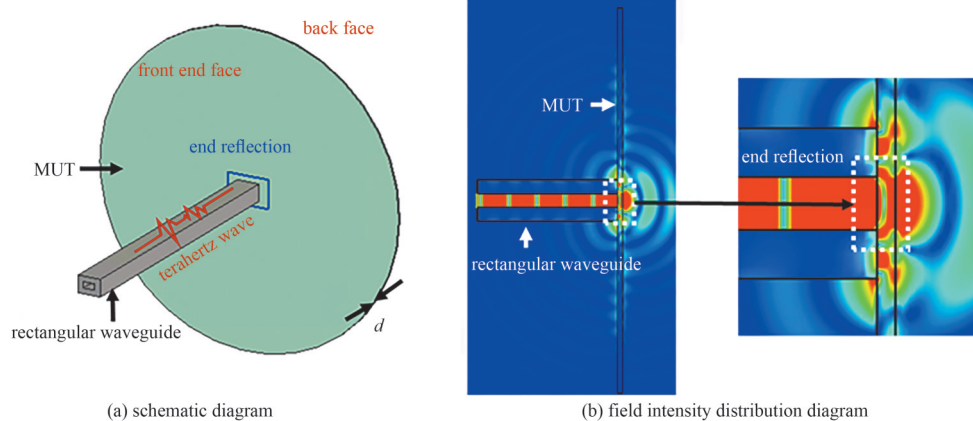


Fig.2 Simulation model(using silicon wafer as an example) and field intensity distribution diagram
图 2 矩形波导仿真模型(以硅片为例)和场强分布图

表 1 常用矩形波导型号与发生谐振的材料(硅片)推荐厚度

Table 1 Commonly used rectangular waveguide models and the recommended thickness of the resonant material(silicon)

waveguide type	operating frequency band /GHz	recommended center frequency/GHz	recommended thickness of the material/ μm
WR-10	75~110	92.5	462
WR-6	110~170	140.0	305
WR-5.1	140~220	180.0	237
WR-4.3	170~260	215.0	198
WR-3.4	220~330	270.0	155

2.1.1 材料的介电常数对谐振频率的影响

在保证材料的厚度、大小等参数不变的前提下, 模拟不同介电常数下的反射系数。图 3 和图 4 为材料介电常数在 1 和 0.1 增量级变化时, 反射系数 S_{11} 的幅值和相位响应。结果表明, 介电常数的变化导致谐振频率发生偏移, 同时 S_{11} 参数的幅值和相位也呈现出规律性的变化, 特别是介电常数变化增量级为 0.1 时, 突显了该测试方法在检测微小介电变化方面的超灵敏性。这些结果验证了该测试方法能够准确反映材料介电特性的细微变化, 展示了其在高精度材料特性测量中的潜力。

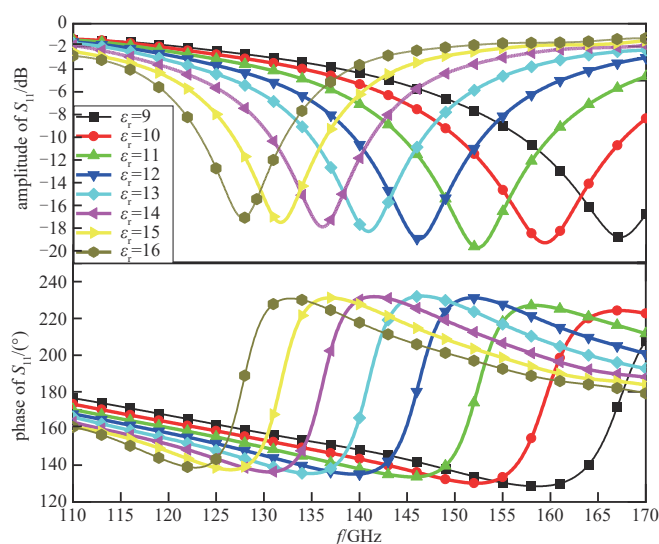


Fig.3 Response of reflection coefficient S_{11} when dielectric constant changes in increment of 1

图 3 当介电常数以 1 为增量变化时, 反射系数 S_{11} 的响应

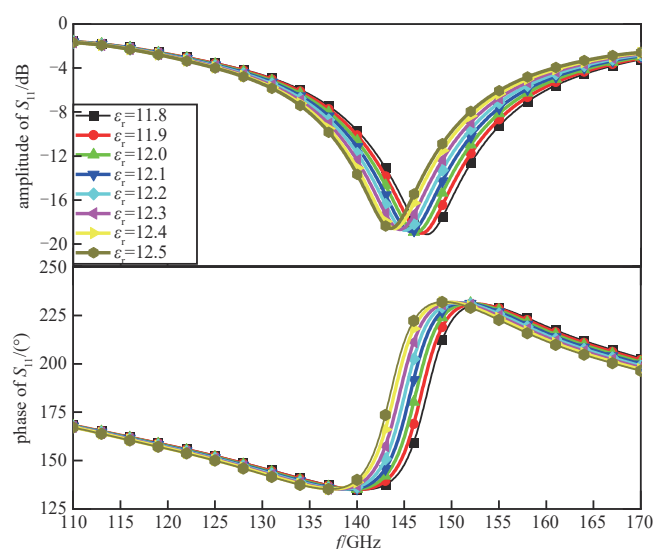


Fig.4 Response of reflection coefficient S_{11} when dielectric constant changes in increment of 0.1

图 4 当介电常数以 0.1 为增量变化时反射系数 S_{11} 的响应

为进一步探讨介电常数与谐振频率之间的关系, 绘制了材料介电常数与谐振频率的映射曲线, 如图 5 所示。图中结果清晰地反映被测材料(MUT)自谐振频率随介电常数的增加而显著降低。运用二阶多项式拟合得出介电常数以 1 为步长变化时的拟合结果为 $y = 0.328\,57x^2 - 13.83x + 264.97$, 拟合结果的残差平方和为 0.380 48; 介电常数以 0.1 为步长变化时的拟合结果为 $y = 0.749\,92x^2 - 23.787\,27x + 323.663\,83$, 拟合结果的残差平方和为 0.007 56。该关系进一步验证了谐振频率作为表征材料介电特性的关键参数的有效性和可靠性, 有助于更精确地预测和控制材料在特定频段下的电磁行为。

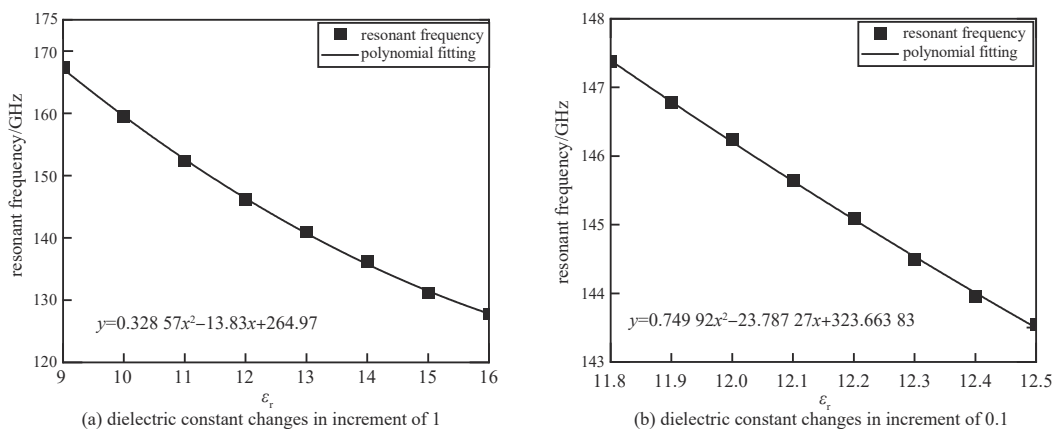


Fig.5 Resonance frequency changes with the dielectric constant

图 5 谐振频率随介电常数的变化

在保持硅片厚度为 0.3 mm 不变的条件下, 通过改变硅片的介电常数虚部, 即引入不同程度的损耗, 对硅片进行仿真分析。硅片的介电常数分别设置为 11.9、11.9+1j、11.9+2j、11.9+3j、11.9+4j 和 11.9+5j, 其他仿真参数保持不变, 仿真结果如图 6 所示。基于 S_{11} 参数的实部和虚部, 计算质量因子 Q 值。以损耗为 0 的硅片为基准, 进

一步计算 $\Delta(1/Q)$ 与损耗之间的关系, 结果如图 7 所示。通过二阶拟合, 结果为 $y = -0.01048x^2 + 0.13333x - 0.01202$, 拟合残差平方和为 8.13798×10^{-4} , 拟合效果良好。仿真结果表明, 随着材料损耗的增加, Q 值呈现出明显的减小趋势, $1/Q$ 逐渐增加。这一结果说明, 损耗越大的材料, 其谐振特性越弱, 能量耗散越快, 从而导致质量因子的下降。此结论与理论预期一致, 为微波频段内材料介电损耗的研究提供了有力支持。

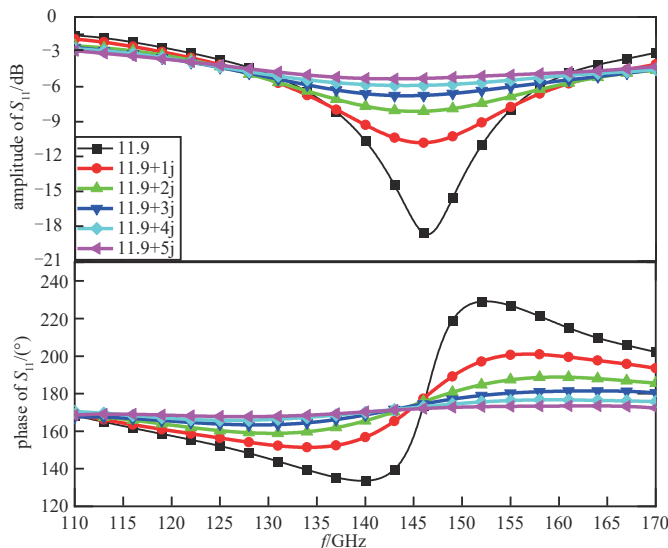


Fig.6 The response of S_{11} when the imaginary part of the material is changed
图 6 改变材料虚部时 S_{11} 的响应

2.1.2 材料的厚度对谐振频率的影响

在保持材料介电常数恒定(以介电常数 11.9 的硅片为例)的情况下, 通过改变材料厚度分析参数 S_{11} 的变化。以厚度为 0.3 mm 的硅片为例, 其理论谐振频率为 144.94 GHz。图 8 为硅片厚度变化时 S_{11} 的仿真结果。可清晰地观察到, 在 145~150 GHz 频段内, 当厚度为 0.3 mm 的整数倍时, S_{11} 幅值出现了显著的极小值, 表明 MUT 发生自谐振; 在厚度不为 0.3 的整数倍时, 未发生自谐振。表 2 列出了不同材料厚度对应的自谐振频率及相对误差。仿真结果与理论计算值之间的相对误差小于 3%, 验证了材料的厚度等于或接近电磁波波长的一半或其倍数时, 由于半波损失的存在, MUT 在特定频率下会发生自谐振。

$$f_r = \frac{c}{2d\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5)$$

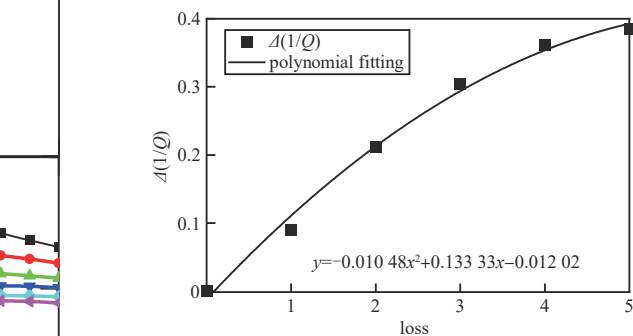


Fig.7 The relationship between loss and $\Delta(1/Q)$
图 7 损耗与 $\Delta(1/Q)$ 的关系

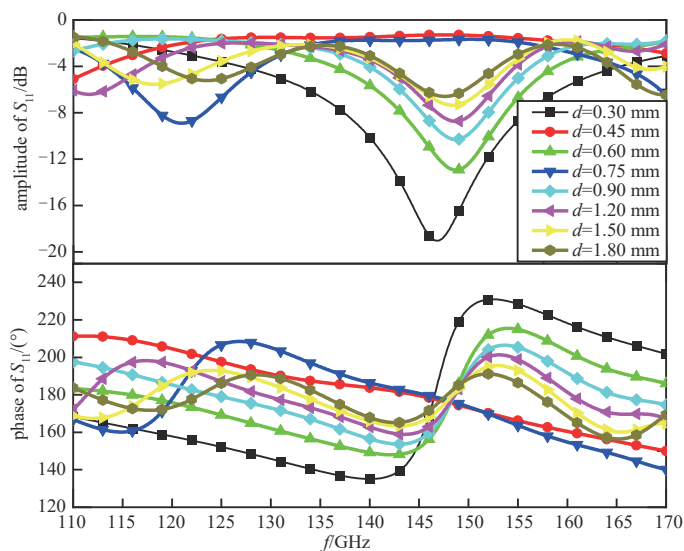


Fig.8 Response of reflection coefficient S_{11} to changes in thickness
图 8 反射系数 S_{11} 对厚度变化的响应

表 2 不同厚度对应的谐振频率及相对误差

Table1 Resonance frequency and relative error corresponding to different thickness

thickness /mm	resonant frequency/GHz	relative error/%
0.3	146.78	1.27
0.6	148.70	2.59
0.9	148.70	2.59
1.2	148.64	2.55
1.5	148.40	2.39
1.8	147.56	1.81

2.1.3 硅片上刻蚀通道, 分析微小材料的介电常数

固定被测材料厚度前提下进行 MUT 介电变化的微扰测量。在初步研究了材料厚度和介电常数等因素对反射系数的影响后, 进一步对材料进行开槽处理, 以 0.3 mm 单晶硅片为例, 并与聚二甲硅氧烷(PDMS)进行键合处

理, 如图 9 所示。考虑到加工工艺的限制和压力对材料性能的影响, PDMS 的厚度优化至 200 μm , 并在其上打孔以便实现样品的进样和出样操作。图 10 为在槽深度为 200 μm , 宽度为 200 μm , 长度为 8 mm, PDMS 紧贴波导口, 通过改变通道内样品的介电常数所获得的仿真结果。随着通道内样品介电常数的变化, 反射系数随之改变。图 11 给出了相应的谐振频率差值(以介电常数 1 为基准)与样品介电常数之间的关系, 并进行了线性拟合, 拟合结果为 $y = -0.00755x^2 - 0.19029x + 130.08527$, 拟合结果的残差平方和为 0.00592, 拟合效果良好, 表明谐振频率随通道内样品介电常数的增加而向低频方向偏移。

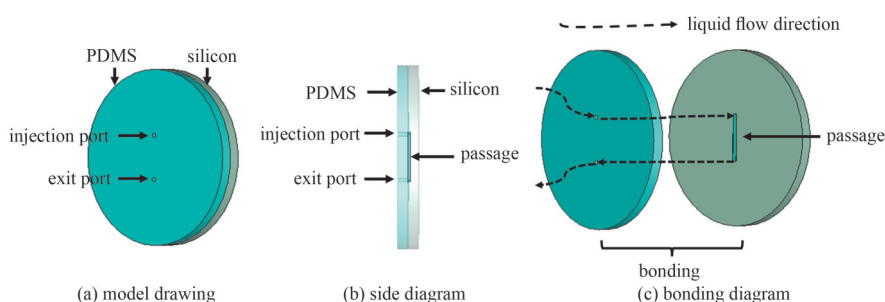
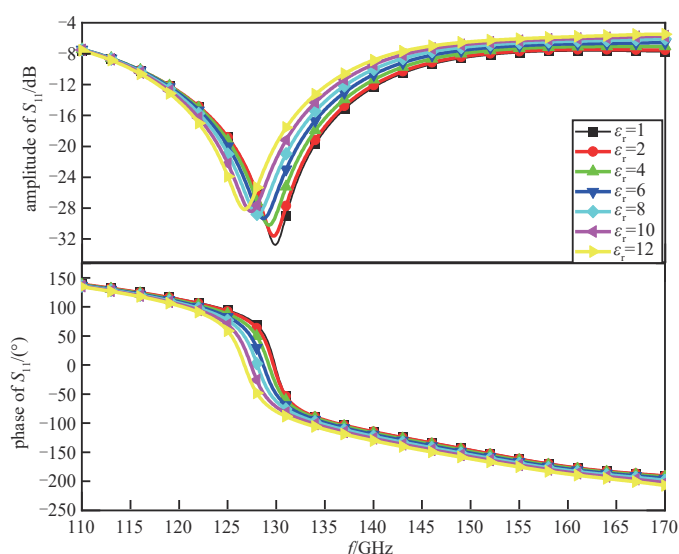


Fig.9 Material etching channel and PDMS bonding diagram

图 9 材料刻蚀通道与 PDMS 键合示意图

Fig.10 Response of the reflection coefficient S_{11} when PDMS is close to the waveguide port图 10 PDMS 紧贴波导口时的反射系数 S_{11} 的响应

这些结果表明, 通过在硅片上进行开槽处理, 可进一步精确测量微量液体样本的介电常数变化。这一方法扩展了 MUT 自谐振方法在微量样品介电检测中的应用潜力, 为基于谐振频率的高精确度介电检测提供了新的思路 and 手段。

2.2 实验结果分析

按照仿真模型在实验室搭建以单晶硅片为 MUT 的测试系统, 实验材料测试装置如图 12 所示, 该系统采用中电科思仪科技股份有限公司出品的太赫兹矢量网络分析仪、110~170 GHz 扩频模块以及对应频段的直波导。材料选择厚度为 0.3 mm, 半径为 101.6 mm 的硅片。为确保实验测试数据的准确性和稳定性, 硅片通过夹持器稳固地固定在波导端口, 减少空气缝隙的影响, 确保硅片紧贴波导端口。

将 0.3 mm 厚的硅片紧贴在波导端口上的实验结果与

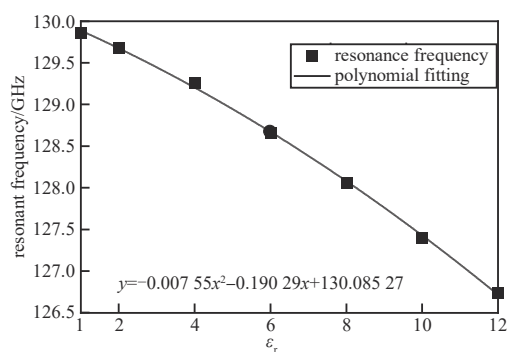


Fig.11 The fitting result of the resonant frequency of the dielectric constant when PDMS is close to the waveguide port

图 11 PDMS 紧贴波导口时的介电常数谐振频率的拟合结果

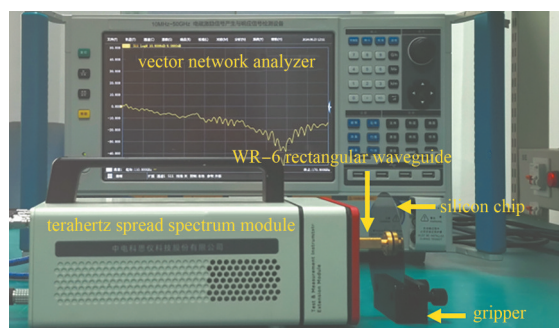


Fig.12 Material test device

图 12 材料测试装置

仿真结果对比如图 13 所示。仿真得到的谐振频率为 146.78 GHz, 与理论计算结果 144.94 GHz 相比, 相对误差为 1.68%, 呈现向高频移动的趋势; 实验测得的谐振频率为 144.5 GHz, 与理论值 144.94 GHz 相比, 相对误差为 0.3%, 呈现向低频移动。实验和仿真的结果在数值上存在一定的差异, 可能存在的原因包括: a) 仿真中选用的硅片是无损的, 而实验中使用的硅片存在损耗; b) 仿真设置中矩形波导材料为理想导体, 而实际波导材料为铜镀金。实验结果与仿真趋势一致, 这种一致性证明了实验、仿真与理论分析方法的相互补充性, 验证了仿真结果的可靠性以及所提出材料介电测试方法的可行性。基于材料参数, 该方法能够有效预测波导反射法下材料的电磁特性。

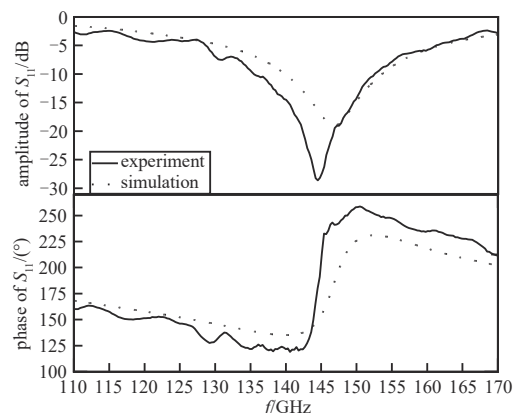


Fig.13 Comparison between experiment and simulation
图 13 实验与仿真的对比

3 结论

本文提出了一种基于 MUT 自谐振特性的新型材料介电特性定量测试方法。借助 FDTD 电磁场数值分析方法, 深入研究了矩形波导口 MUT 自谐振的电磁过程及其影响因素。研究发现, 当材料厚度接近或等于波导主模波长的一半或整数倍时, MUT 的前后端面会分别反射太赫兹能量, 受到半波损失效应的影响, 在特定频率下引发自谐振现象。基于波导反射系数, 探讨了 MUT 介电特性与自谐振频率之间的关系, 结果显示, 随着介电常数的增大, 自谐振频率逐渐降低。基于谐振微扰, 在硅片上进行开槽处理, 进而可检测微量液体样本的电磁特性。最后, 通过在实验室搭建的以单晶硅片为 MUT 的测试系统, 成功验证了仿真结果的准确性, 证明了所提出的介电测试方法的实用性和可靠性, 为太赫兹频段材料介电特性检测提供了更丰富的手段。

参考文献:

- [1] 于明媚,王益,张翠翠,等. 基于闭式谐振腔的一体化介电常数测量系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(11):1163–1167,1197. (YU Mingmei,WANG Yi,ZHANG Cuicui,et al. Integrated permittivity measurement system based on closed resonant cavity[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022,20(11):1163–1167,1197.) DOI:10.11805/TKYDA2020443.
- [2] ZHANG Xiansheng, CHANG Tianying, CUI Hongliang, et al. A free-space measurement technique of terahertz dielectric properties[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2017,38(3):356–365. DOI:10.1007/s10762-016-0341-2.
- [3] UNUTMAZ M A, UNLU M. Terahertz spoof surface plasmon polariton waveguides: a comprehensive model with experimental verification[J]. Scientific Reports, 2019,9(1):7616. DOI:10.1038/s41598-019-44029-1.
- [4] NSENGIYUMVA W, ZHONG S, WANG B, et al. Terahertz spectroscopic study of optical and dielectric properties of typical electrical insulation materials[J]. Optical Materials, 2022,123(1):111837. DOI:10.1016/j.optmat.2021.111837.
- [5] CHUDPOOTI N, DUANGRIT N, BURNETT A D, et al. Wideband dielectric properties of silicon and glass substrates for terahertz integrated circuits and microsystems[J]. Materials Research Express, 2021,8(5):056201. DOI:10.1088/2053-1591/abf684.
- [6] WEIR W B. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies[J]. Proceedings of the IEEE, 1974,62(1):33–36. DOI:10.1109/PROC.1974.9382.
- [7] TAEB A, GIGOYAN S, SAFAVI-NAEINI S. Millimetre-wave waveguide reflectometers for early detection of skin cancer[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2013,7(14):1182–1186. DOI:10.1049/iet-map.2013.0189.
- [8] GHASR M T, SIMMS D, ZOUGHI R. Multimodal solution for a waveguide radiating into multilayered structures—dielectric property and thickness evaluation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009,58(5):1505–1513. DOI:10.1109/TIM.2008.2009133.
- [9] 李涛. 基于矩形波导传输线的材料电磁特性测试技术[D]. 太原:中北大学, 2014. (LI Tao. Test technology of material electromagnetic properties based on rectangular waveguide transmission lines[D]. Taiyuan, Shanxi, China: North University of China, 2014.)
- [10] 江禹,姚金杰,杨志良. 高温材料反射率测试支撑平台 RCS 减缩仿真[J]. 电子测量技术, 2021,44(14):38–42. (RCS reduction simulation of the support platform for material reflectivity testing at high temperature[J]. Electronic Measurement Technology, 2021,44(14):38–42.) DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106785.

- [11] 雷虹,余恬,刘立国. 电磁场与电磁波[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2008. (LEI Hong,YU Tian,LIU Ligu. Electromagnetic fields and waves[M]. Beijing,China:Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2008.)
- [12] BORN M,WOLF E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light[M]. Cambridge,England:Cambridge University Press, 1999.

作者简介:

贵 雨(1999-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹材料测试.email:gy18833817158@163.com.

宁兴凯(2001-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹材料测试.

李 岩(2000-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹生物医学应用.

邓建钦(1981-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为太赫兹仪器及测试方法.

李 川(1967-), 男, 硕士, 主任医师, 主要研究方向为胸外科疾病诊治与胸部影像.

于 壮(1967-), 男, 硕士, 主任医师, 主要研究方向为胸部肿瘤综合治疗.

李环廷(1973-), 男, 博士, 主任医师, 主要研究方向为神经外科肿瘤基础与临床.

王 斌(1988-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为太赫兹测试方法、微波材料测试等.

高睦志(1993-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为太赫兹器件、超材料、材料测试方法等.

(上接第 835 页)

- [62] STANOJEVIĆ N,DEMIĆ A,VUKOVIĆ N,et al. Effects of background doping,interdiffusion and layer thickness fluctuation on the transport characteristics of THz quantum cascade lasers[J]. Scientific Reports, 2024,14(1):5641. DOI:10.1038/s41598-024-55700-7.

作者简介:

刘诚旭(1998-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为量子级联激光器的电子输运.email:18768173897@163.com.

湛治强(1990-), 男, 大专, 高级技工, 主要从事半导体微纳器件加工.

王雪敏(1975-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为中红外及太赫兹量子级联器件.

陈风伟(1986-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为量子级联器件、红外物理仿真.

蒋 涛(1988-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹科学与量子器件.

樊 龙(1985-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为功能薄膜与器件.

彭丽萍(1979-), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为纳米功能材料.

舒 琳(1987-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为 MEMS 技术、新型传感器技术.

吴卫东(1967-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为多功能薄膜、半导体激光器、气体传感器.