

· 自动化技术 ·

基于腔扰动法的原子气室复介电常数估计

郭广坤, 张大年, 李艺媚, 侯冬, 刘科, 王厚军, 孙富宇*

(电子科技大学自动化工程学院 成都 611731)

【摘要】近年来, 基于原子的微波测量因其具有将微波量转换为频率量进行测量的优势引起了学术界的广泛关注。由于频率量具有所有物理量中最高的测量精度, 故这种新型微波测量手段具有极大的发展潜力。研究表明, 目前限制微波测量精度的主要因素来自于微波场传感探头的原子气室本身。为了定量评估气室对场量测量的影响, 该文首先准确评估了气室的结构尺寸和介电特性。作为原理性实验验证, 采用S和X频段矩形微波腔扰动方法, 对圆柱状原子气室的复介电常数做了测量评估。同时还简要讨论了其他可用于气室介电测量的方法。

关键词 腔扰动技术; 复介电常数; 微波测量; 原子气室

中图分类号 TM15 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2019.03.008

Estimation of Complex Permittivity of Atomic Vapor-Cell Using Cavity Perturbation Technique

GUO Guang-kun, ZHANG Da-nian, LI Yi-mei, HOU Dong, LIU Ke, WANG Hou-jun, and SUN Fu-yu*

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract Recently, atom-based microwave (MW) measurement has inspired great interest because of its potential ability to link the MW quantity with the international system of units (SI) second. The frequency has the highest measurement accuracy among all physical quantities, implying a great potential of atomic MW measurement. At present, the main factor limiting the measurement accuracy arises from atomic vapor-cell itself. In order to evaluate the effects of the vapor-cell on atom-based MW measurements, the structure parameters and permittivity of vapor-cell are firstly estimated in this paper. As a demonstration, the complex permittivity of a cylindrical vapor-cell is measured and evaluated through MW cavity perturbation technique at S and X bands. Finally, various methods used for the measurement of permittivity of vapor-cell are briefly discussed.

Key words cavity perturbation technique; complex permittivity; microwave measurement; vapor-cell

微波精密测量对于许多基础科学和工程应用都至关重要。过去的几年里, 作为量子精密测量的一个新方向和微波测量的一种新方法, 基于原子的微波测量吸引了研究者的广泛关注^[1-2]。在这一背景下, 相继出现了基于不同量子理论的原子微波电场计^[3-6]和原子微波磁场计^[7-9]。国内外从事原子微波测量相关研究尚不满十年, 相关研究正如火如荼地展开。

相比于传统采用金属探针的微波场测量手段, 新型原子微波场测量方法的主要优势在于: 1) 微波场测量实现了与频率量之间的转化测量, 即其可直接溯源至频率标准, 因而新方法具有自校准的优势^[5]; 2) 频率保持着目前所有物理量中最高的测

量精度^[10-11], 而原子微波测量利用原子跃迁拉比频率与微波场强之间的特定关系, 通过对频率量的测量反推出场强值, 意味着原子微波测量技术具有高精度的优势; 3) 新方法采用石英或派克斯玻璃材料的碱金属原子气室作为传感探头, 引起的待测微波场扰动显著弱于金属探头。尽管原子测量方法具有如上优势, 然而文献[5, 12]的研究表明, 在采用原子气室探测未知微波场过程中, 最大的不确定仍来自于气室本身。明确地说, 这是气室和测量环境之间存在介电特性差异的结果。这一差异导致了气室内原子感受到的微波场与入射微波场不同, 引入了测量误差, 故准确测量原子气室的介电常数对于评估

收稿日期: 2018-04-08; 修回日期: 2018-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(61601084)

作者简介: 郭广坤(1982-), 男, 博士生, 主要从事电子测量仪器、原子钟和时频传递等方面的研究。

通信作者: 孙富宇, Email: sunfuyu@ntsc.ac.cn

其对待测场的影响至关重要。然而, 目前还没有针对原子气室介电常数的测量报道。

本文采用微波腔扰动技术对铯原子气室的复介电常数做了测量评估。微波腔扰动技术是目前测量材料介电特性最为准确的一种方法^[13], 其基本原理是通过矢量网络分析仪(矢网)分别测量空腔和含样品腔(有载腔)的腔响应曲线, 通过腔响应变化实现对样品介电参数的提取。在原子微波测量的实际应用, 由于样品(即文中原子气室, 后续描述中不再区分两者)体积不够小, 使得高频(本文中明确指X波段)情况下通过经典微扰公式计算得到的结果与真实值偏离较大。为了解决这一问题, 本文首先建立与实际情况一致的有限元电磁模型, 然后不断细致调节气室介电常数, 并最终使得有限元模型中由气室引起的扰动变化与矢网实测的扰动变化相同, 此时模型中气室介电常数设置值即被视为待测值^[14]。此外, 本文还在经典微扰理论有效的低频(文中明确指S波段)情况下测量了气室复介电常数。本文工作是评估气室本身对原子微波测量影响的第一步。

1 实验测量装置

本文所用介电常数测量装置如图1所示。图1a为待分析铯原子气室, 从中可看到室温下凝结于气室密封口的固相碱金属铯。图1b为测量装置结构说明, 其中炉体为密绕于腔体表面的加热丝, 起到加热腔-气室系统的作用。图1c为测量装置实物图。

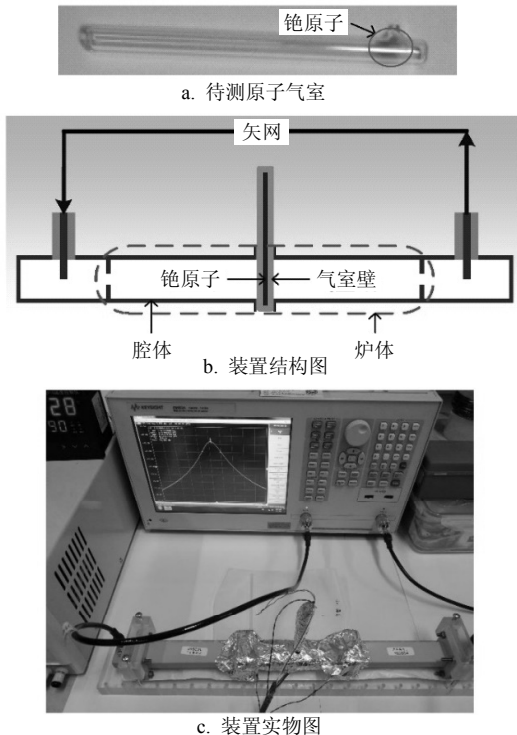


图1 介电常数测量装置

本文实验用腔为X波段WR 90 (截面尺寸为22.86 mm × 10.16 mm)和S波段WR 284 (截面尺寸为72.14 mm × 34.04 mm)标准矩形波导谐振腔。两个开有弱耦合小孔的薄膜片封闭波导形成双端口腔体。两个波导-同轴转换器连接于腔体两侧, 用以通过矢网测量评估腔响应特性所需的传输参数 S_{21} 。腔体E面中央开有通孔, 待测气室通过该孔置于腔体内部。

当腔体工作模式为奇数模时, 气室位置处将集中分布有微波电场分量。这种情况下, 作为一种介电材料, 气室会对腔内电场造成扰动, 进而影响腔体谐振特性变化。通过对腔响应变化的测量即可间接实现对气室介电特性的评估。

2 测量理论和方法

由基础电磁理论可知, 微波腔响应(包括腔谐振频率和品质因数)取决于腔体尺寸和气室复介电常数($\epsilon = \epsilon_0 = \epsilon_r = \epsilon_0(\epsilon_r' - j\epsilon_r'')$)。简要地说, 介电气室与腔内微波电场之间的相互作用引起了腔响应变化, 而这一变化量便包含了气室的复介电常数信息。一般通过谐振频率和品质因数变化, 在微扰法下根据如下关系计算复介电常数:

$$2\left(\frac{f_0 - f_s}{f_s}\right) - j\left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_0}\right) = \frac{(\epsilon_r - 1) \int_{V_s} E_0 E_s dV}{\int_{V_0} |E_0|^2 dV} \quad (1)$$

式中, f_s 和 f_0 、 Q_s 和 Q_0 分别为有无气室样品情况下微波腔的谐振频率和品质因数; V_0 和 V_s 分别为腔和气室的体积; E_0 和 E_s 分别为腔和样品内的电场。于是相对复介电常数的实部和虚部可表示为^[13]:

$$\epsilon_r' = 1 + \frac{V_0}{KV_s} \frac{f_0 - f_s}{2f_s} \quad (2)$$

$$\epsilon_r'' = \frac{V_0}{4K^2V_s} \left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_0} \right) \quad (3)$$

式中, K 为与样品结构和扰动位置相关的形状因子。损耗角正切表示为:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (4)$$

由微扰法基本原理可知, 为实现准确测量, 原子气室样品体积应显著小于腔体积(小于波长), 且气室全部要位于腔内最强电场区域, 此时 $K = 1$, 复介电常数便可直接由测量得到的腔响应变化, 并结合上面公式计算得到。然而, 实际情况经常无法满足 $K = 1$ 。在原子微波测量中, 作为场传感探头的原子气室体积一般较大, 这是因为过小的气室中原子浓度太低, 与电磁场(包括光场和待测微波场)相互作用

的原子数目十分有限,导致观测到的原子跃迁信号太弱,同时线形展宽明显,这些都不利于测量。

综上,X波段原子微波测量中通常采用的厘米尺度气室与待测微波波长相当,导致部分气室体积不是处于电场最强区域,此时形状因子无法获知,恶化了微扰法的计算精度。为解决这一问题,本文在有限元软件HFSS中建立相同的腔-气室系统,通过调节气室介电常数重建矢网实测得到的腔响应变化,以此来完成气室介电特性评估。不同地,S波段介电参数则直接采用微扰法进行计算。

3 X波段介电测量

X波段介电测量中谐振腔长为119.68 mm,两耦合膜片的孔直径均约为3 mm,膜片连接一定长度的过渡直波导,其作用为衰减不必要的高次模式。 E 面中央通孔直径约为5.5 mm。测量腔响应之前的矢网校准对保证测量准确性十分必要。本文在整个X波段内采用TRL(thru-reflect-line)校准,设置频点数为10 001,中频带宽100 Hz。由于室温下碱金属铯原子呈现固态凝聚于气室内壁,这会引入额外腔扰动。利用原子的趋冷效应,实验中对腔-气室适当加热(炉体如图1所示),并通过控温使其稳定在某一特定温度 T (高于环境温度),此时原子将凝聚于腔外的气室冷端部分,不会对气室壁的介电测量产生影响。

基于前述分析,校准后的实验测量步骤为:

- 1) 加热空腔并稳定其温度至目标温度 T ,测量无载情况下腔响应,记录无载腔频 f_0 和品质因数 Q_0 。
- 2) 插入气室样品,可观察到铯金属逐渐粘附于腔外的气室冷端。待腔-气室温度稳定后,记录有载腔频 f_s 和品质因数 Q_s 。

本文实验室温为20 °C,铯原子熔点为28.5 °C, $T=117$ °C,实测得到的腔响应曲线如图2所示。

由图2显见,微波腔在X波段内存在 TE_{104} , TE_{105} , \dots , TE_{108} 共5个谐振模式。注意到在偶数模(TE_{104} , TE_{106} 和 TE_{108})工作情况下,气室的引入仍导致了腔频的轻微移动,且随着模式数增加,移动量变大。这是由于高阶模式下波导波长更短,使得气室更多地暴露于电场区,故偶数模下也出现了腔谐振变化。

本文采用奇数模 TE_{105} 和 TE_{107} 模评估原子气室的介电常数。根据待测气室尺寸(外径5.2 mm,内径3.4 mm)计算得到 V_0/V_s 近似为225,气室引起的 TE_{105} 和 TE_{107} 模谐振频率变化为196和227 MHz,这些变化量都显著大于微扰理论通常建议的适用范围(即

0.1%扰动量)。借助于有限元工具HFSS,通过调节气室介电常数重建上述腔频变化,结果如图3所示。最终得到原子气室的相对介电常数为 $\epsilon'_r \approx 4.32$ (TE_{105} 模)和4.26(TE_{107} 模)。

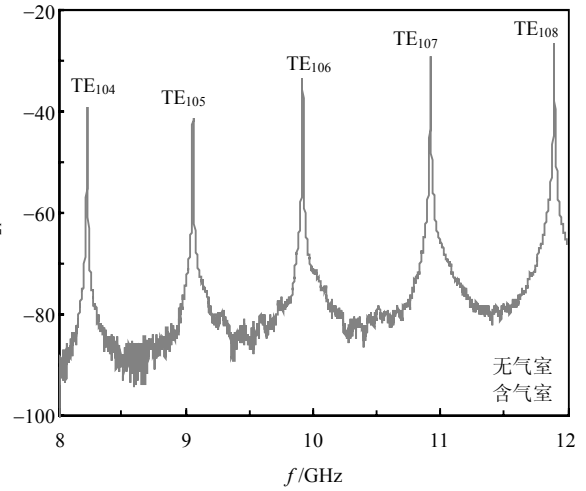


图2 X波段空腔和有载腔传输参数实测结果

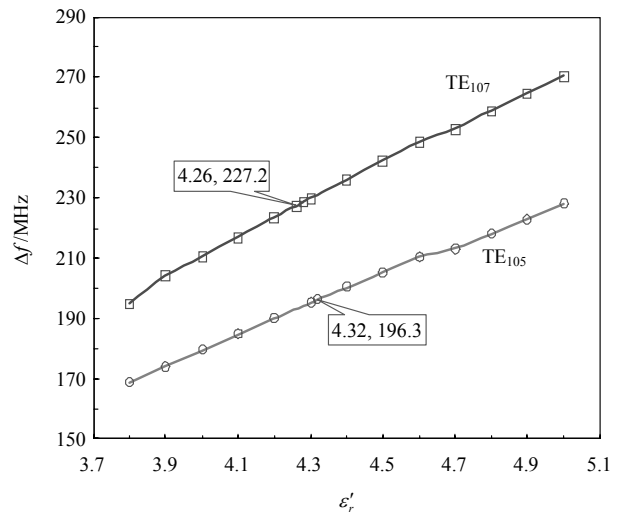


图3 腔响应变化与介电常数之间的关系

以上演示了原子气室高频介电常数的评估。然而如文献[14]的研究指出,实验和模拟相结合的介电评估手段目前在损耗角正切的测量上误差较大。

4 S波段介电测量

由于玻璃/派克斯材料气室的介电特性一定程度上不敏感于频率变化,故为实现对损耗角正切的评估,本文按照X波段实验步骤进行相对低频(S波段)时的气室介电特性测量。

实验用腔为WR 284标准矩形谐振腔,其腔长为400 mm,此时 V_0/V_s 近似为2 373;场耦合孔直径约10 mm,膜片厚度为1 mm。该腔在S波段内存在 TE_{105} , TE_{106} , \dots , TE_{109} 共5个谐振模式。由于波导波长显著大

于气室尺寸, 在偶数模(TE_{106} 和 TE_{108})工作情况下, 无磁气室仅位于磁场区, 故其几乎未引起腔响应扰动。

本文采用奇数模 TE_{105} 、 TE_{107} 和 TE_{109} 模评估原子气室的介电常数。作为示例, 图4给出了工作模式为 TE_{105} 模时加载气室样品前后的腔响应曲线。

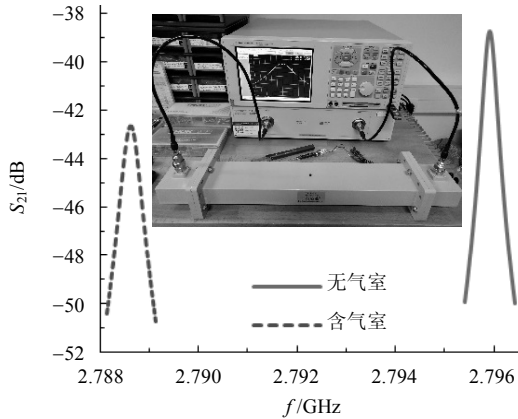


图4 S波段空腔和有载腔传输参数实测结果, 其中插图为测量装置实物图

在以上3个模式下测量得到有载和无载时的腔谐振频率、品质因数, 以及由这些实测值和微扰公式计算得到的气室复介电常数, 如表1所示。

表1 S波段气室介电测量

模式	f_0 /GHz	f_s /GHz	Q_0	Q_s	ϵ'_r	$\tan \delta (\times 10^{-3})$
TE_{105}	2.795 917	2.788 63	9 810.2	6 352.2	4.10	8.03
TE_{107}	3.344 128	3.335 35	10 892.9	6 711.0	4.12	8.23
TE_{109}	3.958 671	3.948 20	11 677.5	6 854.5	4.15	8.62

除前述基于矩形腔的复介电常数测量外, 本文还利用 TM_{030} 模圆柱腔(谐振频率约为3.32 GHz)对相同气室做了介电估计, 结果为 $\epsilon'_r = 4.31$ 和 $\tan \delta = 0.006 87^{[15]}$, 与矩形腔测量结果相差约4.6%(对于相对介电常数)和19.8%(对于损耗角正切)。由此可见, 经由不同结构腔扰动方法测量得到的气室相对介电参数近似一致, 验证了原子气室复介电常数测量的可行性。不同测量结果之间的差别主要来自于不同测量装置与微扰理论的假设条件相符合的程度不同。后续将优化腔体结构, 提高测量精度, 同时使测量覆盖更宽频率范围。

气室介电特性的测算要以获取其结构尺寸参数为前提。由于气室加工过程中要经过几百摄氏度的高温处理工艺, 使得成型(即填充完原子蒸气)后的气室在结构和厚度上都可能产生不规范现象, 如气室壁存在微小凹凸, 以及厚度不均匀等。故对于已成

型气室的评估, 最佳办法是逐点测量, 集点成线, 汇线成面, 最终完成整个气室体的结构和厚度测量。在此基础上, 即可选择适当的复介电常数测量手段进行气室介电特性评估。

作为演示, 本文采用光谱共焦法对4个不同结构类型的铯原子气室做了厚度实测, 如图5所示。

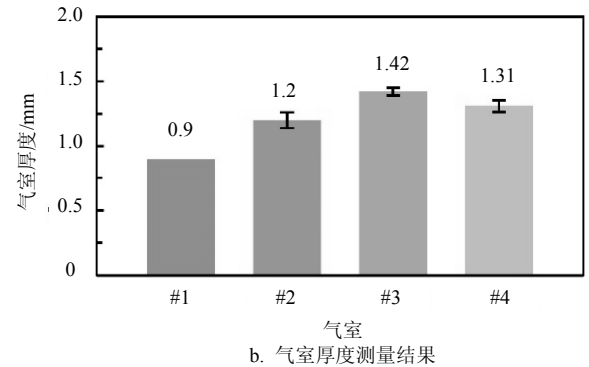


图5 厚度实测

图5中气室#1较长, 其侧壁厚度十分均匀, 多次测量结果均为0.9 mm。气室#1也是本文重点分析的待测样品。其他结构气室的厚度则随测量位置不同呈现不同程度差异, 这主要是由向气室内填充碱金属气体(一般还要另外填充惰性气体), 以及填充后封闭气室等高温工艺流程所致。

本文分析的待测气室样品为细长圆柱形, 适于采用微波腔扰动法进行测量。除此之外还存在其他可选测量手段用于气室分析, 如利用同轴腔测量圆柱状气室, 采用波导或终端开放探针法分析超薄气室等^[15]。

5 讨论

原子微波测量中待测微波场量实现了与频率量的直接联结, 使得电磁量也可溯源至国际单位制^[16]。目前国际上包括美国、日本、瑞士、加拿大和中国等相关国家计量科研单位正在推动基于原子的微波场/功率标准的建立。在这一进程中, 研究表明新方法带来的最大测量不确定度来自于作为传感探头的原子气室。

理论上,人们只希望气室中原子与待测场发生作用,但气室本身与待测场的相互作用目前成为了主要干扰因素。电磁波不仅被气室壁部分吸收,且在气室壁之间来回反射形成驻波(Fabry-Perot腔效应)。这些因素导致了待测场幅度和相位的变化,变化程度取决于气室结构尺寸、气室介电特性和微波场频率等^[12,16]。

6 结束语

本文研究工作表明,在一定情况下,采用微波材料测量领域广为使用的微扰法可以实现对原子气室的介电特性评估。这里的一定情况是指不同测量手段对样品(原子气室)的结构尺寸有不同要求,故在原子微波测量中,为了能够对电磁场传感探头-原子气室进行介电评估,要根据拟采用的介电测量手段综合考虑气室的设计和加工。目前,采用传统介电测量手段进行原子气室介电特性评估尚未见相关报道,本文工作主要目的便是演示这一测量的可行性,为最终定量评估原子气室本身对原子微波测量的影响提供参考。

参 考 文 献

- [1] KITCHING J, KNAPPE S, DONLEY E A. Atomic sensors – a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(9): 1749-1758.
- [2] DEGEN C L, REINHARD F, CAPPELLARO P. Quantum sensing[J]. *Review of Modern Physics*, 2017, 89(3): 035002.
- [3] SEDLACEK J, SCHWETTMANN A, KUBLER H, et al. Microwave electrometry with Rydberg atoms in a vapour cell using bright atomic resonances[J]. *Nature Physics*, 2012, 8(11): 819-824.
- [4] FAN H Q, KUMAR S, SEDLACEK J, et al. Atom based RF electric field sensing[J]. *Journal Physics B: Atomic Molecular and Optical Physics*, 2015, 48(20): 202001.
- [5] HOLLOWAY C L, GORDON J A, JEFFERTS S, et al. Broadband Rydberg atom-based electric-field probe for SI-traceable, self-calibrated measurements[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(12): 6169-6182.
- [6] 黄巍, 梁振涛, 杜炎雄, 等. 基于里德堡原子的电场测量[J]. *物理学报*, 2015, 64(16): 160702.
HUANG Wei, LIANG Zhen-tao, DU Yan-xiong, et al. Rydberg-atom-based electrometry[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(16): 160702.
- [7] KINOSHITA M, SHIMAOKA K, KOMIYAMA K. Determination of the microwave field strength using the Rabi oscillation for a new microwave power standard[J]. *IEEE Transaction on Instrument and Measurement*, 2009, 58(4): 1114-1119.
- [8] HORSLEY A, TREUTLEIN P. Frequency-tunable microwave field detection in an atomic vapor cell[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(21): 211102.
- [9] SUN Fu-yu, MA Jie, BAI Qing-song, et al. Measuring microwave cavity response using atomic Rabi resonances[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(5): 051103.
- [10] LUDLOW A D, BOYD M M, YE J, et al. Optical atomic clocks[J]. *Review of Modern Physics*, 2015, 87(2): 637-701.
- [11] GUO Guang-kun, LIU Jie, HOU Dong, et al. Dual-mode Ramsey microwave cavity for a dual Rb/Cs atomic clock[J]. *Electronics Letters*, 2018, 54(10): 632-634.
- [12] FAN H, KUMAR S, SHENG J, et al. Effect of vapor-cell geometry on Rydberg-atom-based measurements of radio-frequency electric fields[J]. *Physical Review Applied*, 2015, 4(4): 044015.
- [13] SHEEN J. Amendment of cavity perturbation technique for loss tangent measurement at microwave frequencies[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102: 014102.
- [14] SANTRA M, LIMAYE K U. Estimation of complex permittivity of arbitrary shape and size dielectric samples using cavity measurement technique at microwave frequencies[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, 53(2), 718-722.
- [15] YU Cheng-yong, LI En, GUO Gao-feng. Dielectric characterisation of small samples using broadband coaxial cavity[J]. *Electronics Letters*, 2017, 53(19): 1316-1318.
- [16] HOLLOWAY C L, SIMONS M T, GORDON J A, et al. Atom-based RF electric-field metrology: from self-calibrated measurements to subwavelength and near-field imaging[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2017, 59(2): 717-728.

编辑 漆蓉