

文章编号: 2095-4980(2022)02-0166-04

0.23 THz 分子钟腔体设计与实验

蒋 艺, 雷文强, 胡 鹏, 宋 睿, 郭 俊, 马国武, 陈洪斌, 金 晓

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 介绍了用于太赫兹分子钟的精细低损耗密闭结构太赫兹腔体的设计方法及解决思路, 利用 CST 对太赫兹腔体开展了物理仿真设计及结构设计, 通过仿真优化设计出 230 GHz \pm 10 GHz 范围内, 反射系数 S_{11} 小于 -10 dB 的小型化太赫兹腔体结构。利用现有的加工技术完成了太赫兹腔体的加工与制备, 并开展了冷测工作, 实现带内反射小于 -10 dB, 传输损耗低于 -5 dB, 为后续的太赫兹分子钟的研制奠定了基础。

关键词: 太赫兹; 分子钟; 腔体; 测试

中图分类号: TN629.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020726

Design and experimental results of 0.23 THz molecular clock cavity

JIANG Yi, LEI Wenqiang, HU Peng, SONG Rui, GUO Jun, MA Guowu, CHEN Hongbin, JIN Xiao

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: A design method and experimental results of the low loss terahertz cavity used in terahertz molecular clock are introduced. Physical simulation design and structure design of terahertz cavity are carried out by CST. Through simulation and optimization, the miniaturized terahertz cavity structure with the reflection coefficient S_{11} less than -10 dB is designed in the range of 230 GHz \pm 10 GHz. The fabrication of terahertz cavity is completed by using the existing processing technology. The reflection of the cavity in G band is less than -10 dB and the transmission loss is less than -5 dB, which lays the foundation for the development of terahertz molecular clock.

Keywords: terahertz; molecular clock; cavity; test

传统太赫兹光谱学应用主要集中在天文学星际物质探测中, 近年来随着半导体技术的迅猛发展, 太赫兹光谱学应用开始转向便携式高精度传感器与系统应用, 比如便携式连续波气体分子探测系统、便携式呼吸监测系统^[1]。由于太赫兹气体分子探测系统的气体探测类型广, 绝对精度高, 其应用场景逐渐扩展到污染气体监控、呼吸有机物检测和有害物质探测上, 但是其广泛应用仍然受制于气体浓度(一般需要浓缩气体样本)和探测距离(便携式系统信噪比不高)^[2]。因此如何更好地利用太赫兹频段的超宽带高分辨率特性, 有效规避其功率与噪声系数问题, 从分子旋转和分子振动原理方向开展太赫兹应用技术研究, 成为太赫兹技术发展的关键^[3]。

基于固态电子学的太赫兹连续波光谱仪的诞生为探索微观粒子的量子跃迁频率提供了一种全电子学方案, 它将量子跃迁频率这种物理不变量与太赫兹时钟源联系起来, 尤其是随着太赫兹锁相环芯片和倍频链路芯片的发展, 基于负反馈环路的分子钟概念应运而生^[4]。分子钟中最核心的硬件包括太赫兹接收/发射芯片和作为分子钟参考的特种气体单元^[5], 此外精细的密闭结构和低损耗微组装技术也是硬件实现的关键。而本文主要介绍这种精细的低损耗密闭结构的设计方法及解决思路, 研制出 230 GHz \pm 10 GHz 范围内, 反射系数 S_{11} 小于 -10 dB 的小型化太赫兹腔体结构, 以保证反射功率不会影响馈源的工作状态, 同时保证太赫兹信号的有效馈入。

1 太赫兹腔体的设计

首先通过对总体方案所确定的硫化羰(carbonyl sulfide, OCS)气体分子进行了太赫兹频段谐振特性研究^[6], 而太赫兹腔体的体积受气体特性的影响。不同气体所需要的气体体积是不同的, 因此首先需要对所选 OCS 气体所需的气体体积开展设计工作。

太赫兹腔体的设计中存在一个最小可检测气体吸收系数 $\alpha_{\text{gas,min}}$ 可由下式导出^[6]:

$$\alpha_{\text{gas,min}} = \frac{4}{L} \sqrt{\frac{kT_n \Delta\nu}{P_0 e^{-\alpha_0 L}}} \quad (1)$$

式中: k 为玻兹曼常数; T_n 为混频器的输入牵引温噪, $T_n = T_0(F-1)$, 其中 F 是混频器的噪声系数, T_0 是环境温度; 基带的 $\Delta\nu$ 是输出带宽; 气室路径长度 L , P_0 是发射信号功率; α_0 是路径损耗系数。

虽然随着腔体传输的气室路径长度 L 的增加, 吸收越强, 但是太赫兹波在其中的传输损耗也越大, 将会影响整体的系统的信噪比, 因此存在一个最佳长度 L_{opt} 以实现最小可检测吸收系数。

$$L_{\text{opt}} = \frac{2}{\alpha_0} = \frac{1}{\left| \ln \left(10^{-\frac{\alpha_{\text{LOSS}}}{10}} \right) \right|} \quad (2)$$

$$\alpha_{\text{gas,min}} = 2e\alpha_0 \sqrt{\frac{kT_n \Delta\nu}{P_0}} \quad (3)$$

当采用 WR4 波导作为传输腔体的时候, 波导(考虑实际加工粗糙度较大时)损耗 α_{LOSS} 约为 0.3~0.32 dB/cm(中值对应的 α_0 值为 0.071 cm^{-1}), 假定输入的信号为 0.1 mW, 混频器噪声系数为 18 dB, 在室温 296 K, 带宽 1 Hz 条件下, 最小可检测吸收强度 $\alpha_{\text{gas,min}}$ 为 $1.02 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-1}$, 最佳传输距离 L_{opt} 约为 14 cm。

在确定好腔体的长度尺寸结构之后, 接下来需要完成电磁结构的设计与仿真。为减少整个腔体的体积, 采用 WR4 作为太赫兹腔体截面, 对 WR4 波导进行弯折处理, 降低腔体封接的面积和接口间的距离; 同时为方便与太赫兹源部分进行连接, 需要将出口进行弯折处理降低, 使双端口朝向一致; 同时为封接真空需要, 采用盒型窗结构来进行隔离, 对盒型窗结构提出了较高的带宽要求。

首先对弯折部分进行仿真设计, 以保证在较宽的范围内得到匹配, 以免影响后续整个太赫兹腔体的带宽。在此设计了两种弯折方式以满足前述的要求。设计结构如图 1 所示。

通过对直角拐弯方式的设计及改进, 优化弯折半径, 最终实现在 230 GHz \pm 30 GHz 范围内的反射系数 S_{11} 小于 -11 dB 的宽带指标, 完成了对腔体结构的弯折设计。如图 2 所示。

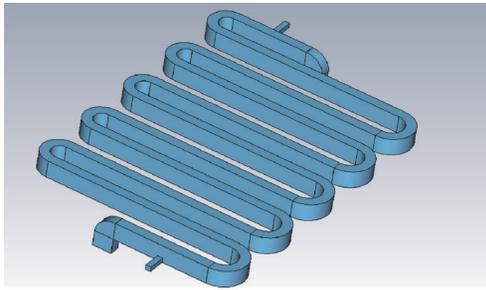


Fig.1 Structural model of gas cavity
图1 充气腔体结构模型

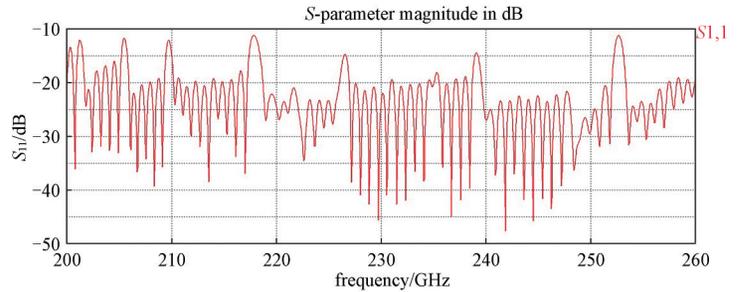


Fig.2 S_{11} diagram of optimized cavity
图2 仿真优化后的 S_{11} 图

接下来为有效保障太赫兹波在气体腔体中的传输, 同时保障和维持气体腔体中的低气压状态, 设计了宽带输入窗结构用于密封封接。借鉴行波管宽带窗的设计理念^[7-9], 通过仿真优化计算, 最终选用盒型窗结构, 窗片采用蓝宝石材料, 窗结构仿真模型如图 3 所示, 最终优化出在 210 GHz 到 240 GHz 频带内, 窗结构的反射系数优于 -16 dB。

将宽带窗结构与需封接的气体腔体联合后进行了太赫兹腔体完整腔体仿真, 通过进一步优化窗结构及弯波导结构, 最终确定的气体腔长为 140 mm, 弯折半径为 0.8 mm, 保证了整个气体腔体在 210 GHz~240 GHz 之间的反射系数小于 -13 dB。如图 4 所示。

2 太赫兹腔体的制备及实验测试

由于需要传输太赫兹信号, 因此采用 TU1 来进行腔体零件及窗零件的制备; 排气连接件等便采用不锈钢、镍铜合金等材料进行加工制备; 窗片材料选取常用的蓝宝石窗片进行真空封接; 尽量利用成熟的真空封接工艺, 有效保障太赫兹腔体结构的制备成功率。

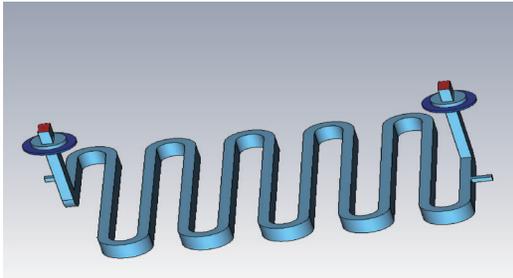


Fig.3 Non-metal material structure of total cavity
图3 太赫兹腔体完整气体腔结构

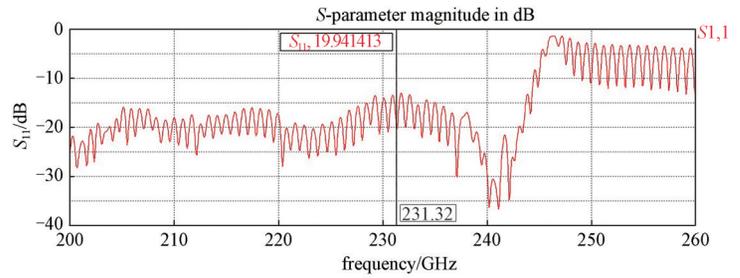


Fig.4 Calculation results of gas cavity reflection coefficient
图4 气体腔反射系数计算结果

利用高速机床完成了太赫兹腔体的零件加工，将部件完全装配为整体，3D模型及金属件照片如图5所示。利用矢量网络分析仪对未充气条件下的太赫兹腔体开展冷测工作，经过测试，首件测试发现测试范围内存在部分频点传输参数 S_{11} 偏高达到 -7 dB，而传输参数 S_{21} 则均在 -15 dB以下，与设计指标偏差较大。经分析原因为本次制备的样件粗糙度较差，存在较大的传输损耗，且窗与腔体的对接匹配处存在加工对中问题，因此改进宽带窗匹配结构，对加工粗糙度提出更高要求，进行了第二轮腔体的制备。通过对第二版的测试，首先在不带宽带窗结构的条件下，对波导结构进行测试，与仿真结果吻合较好，大部分频段内均为 -20 dB以下；再对包含宽带窗结构的腔体结构进行测试，实现 $230\text{ GHz}\pm 10\text{ GHz}$ 带内 S_{11} 小于 -10 dB，传输损耗优于 -5 dB的实验测试结果，测试结果如图6所示，满足使用需求。通过对比实验结果与仿真结果，发现在带内的反射参数 S_{11} 实验结果均有明显的恶化，经分析认为在焊接过程中宽带窗结构的尺寸控制较差，造成整个太赫兹腔体的性能降低。后续将进一步控制宽带窗结构在焊接过程中的公差及平行度，进一步提升太赫兹腔体的传输特性。

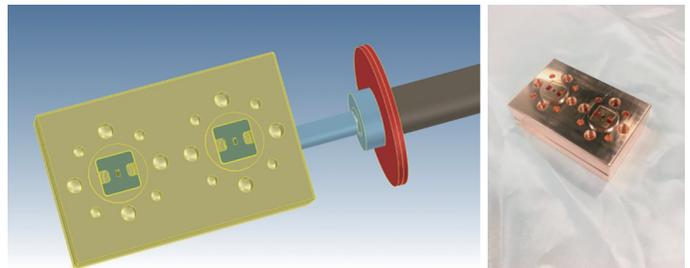


Fig.5 (a) 3D structure of terahertz cavity and (b) photo of terahertz cavity
图5 太赫兹腔体 3D 结构示意图(a)及金属件照片(b)

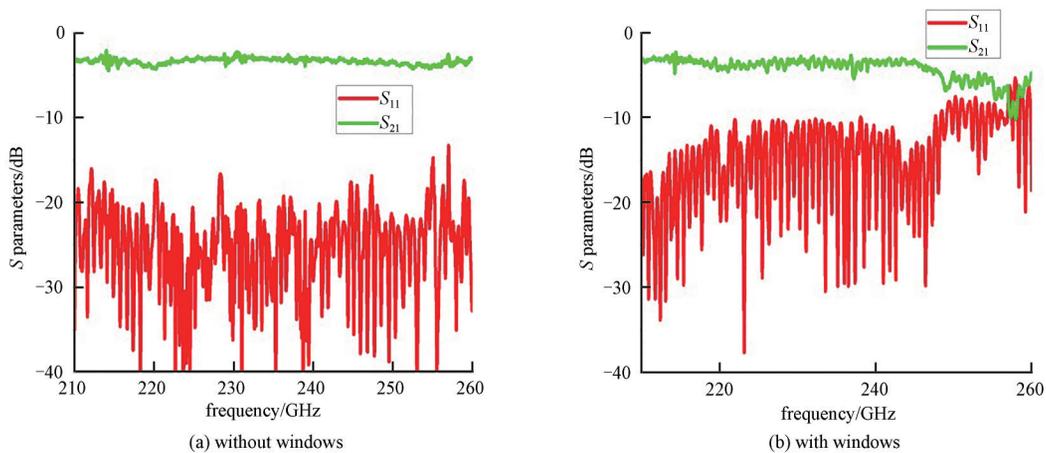


Fig.6 Test results of terahertz cavity by vector network analyzer
图6 太赫兹腔体矢量网测试结果(左图不带窗, 右图包含窗结构)

3 结论

通过分析太赫兹分子钟的精细的低损耗密闭结构太赫兹腔体的设计需求，采用弯折方式布局和直角转弯方式进一步缩小腔体尺寸，开展了物理仿真设计及结构设计，通过仿真优化设计出 $230\text{ GHz}\pm 10\text{ GHz}$ 范围内，反射系数 S_{11} 小于 -10 dB的小型化太赫兹腔体结构。利用现有的加工技术完成了太赫兹腔体的加工与制备，并开展了冷测工作，实现了带内 S_{11} 小于 -10 dB，传输损耗优于 -5 dB的实验测试结果，为后续的太赫兹分子钟的研制奠定了基础。

参考文献:

- [1] GARDNER A T, COLLINS J A. A second look at chip scale atomic clocks for long term precision timing[C]// IEEE OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. Monterey, CA, USA: IEEE, 2016: 1–9. doi:10.1109/OCEANS.2016.7761268.
- [2] 翟造成. 上海天文台原子频标研究 50 年[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2007(28):142–150. (ZHAI Zaocheng. Teh atomic frequency standard research at Shanghai astronomical observatory in 50 years[J], Annals of Shanghai Astronomical Observatory Chinese Academy Sciences, 2007(28):142–150.) doi:CNKI:SUN:KXTW.0.2007–00–026
- [3] QIAN Z, CHOI W, MILLER C, et al. A 210–to–305 GHz CMOS receiver for rotational spectroscopy[C]// 2016 IEEE International Solid–State Circuits Conference (ISSCC). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2016. doi: 10.1109/ISSCC.2016.7418089.
- [4] WANG C, YI X, MAWDSLEY J, et al. An onchip fully electronic molecular clock based on sub-terahertz rotational spectroscopy[J]. Nature Electron, 2018, 1(7):421–427. doi:10.1038/s41928–018–0102–4.
- [5] WANG C, YI X, KIM M, et al. A CMOS molecular clock probing 231.061 GHz rotational line of OCS with sub-ppb long-term stability and 66 mW DC power[C]// Symposia on VLSI Technology and Circuits. Honolulu, Hawaii, USA: [s. n.], 2018. doi: 10.1109/VLSIC.2018.8502271)
- [6] WANG B, PERKINS Z, HAN R. Molecular detection for unconcentrated gas with ppm sensitivity using 220 to 320 GHz dual-frequency-comb spectrometer in CMOS[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits & Systems, 2018, 12(3):709–721.
- [7] 周泉丰, 徐翱, 阎磊, 等. 0.22 THz 折叠波导行波管设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(2):166–170. (ZHOU Quanfeng, XU Ao, YAN Lei, et al. Study of designing 0.22 THz folded waveguide traveling wave tubes[J]. Journal of terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014, 12(2):166–170.) doi:10.11805/TKYDA201402.0166.
- [8] 蒋艺, 雷文强, 胡林林, 等. 140 GHz 宽带窗的设计及实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(2):187–190. (JIANG Yi, LEI Wenqiang, HU Linlin, et al. Design and experiment study of 140 GHz broadband window[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16 (2):187–190.)
- [9] 雷文强, 蒋艺, 胡林林, 等. 工艺参数影响的 D 波段行波管盒型窗分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(6):853–856. (LEI Wenqiang, JIANG Yi, HU Linlin, et al. Analysis of pill-box window for D band TWT considering process parameters influence[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(6): 853–856.) doi: 10.11805/TKYDA201306.0853.

作者简介:

蒋 艺(1985–), 男, 成都市人, 在读博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹电真空器件 .email: babyjjoy@163.com.

雷文强(1973–), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹电真空器件.

胡 鹏(1985–), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹电真空器件.

宋 睿(1984–), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹电真空器件.

郭 俊(1986–), 男, 技师, 主要研究方向为太赫兹电真空器件工艺技术.

马国武(1981–), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为高功率微波及太赫兹电真空器件.

陈洪斌(1971–), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为高功率微波及太赫兹电真空器件.

金 晓(1969–), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为高功率微波及太赫兹电真空器件.