



太赫兹量子频标的研究进展

韦博, 陈铭铭, 程序, 蒋艺, 饶云博, 张亮

Research progress of terahertz quantum frequency standard

WEI Bo, CHEN Mingming, CHENG Xu, JIANG Yi, RAO Yunbo, and ZHANG Liang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.ejors.2023271>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

太赫兹可编程超材料的研究进展和在单像素成像中的应用

Research progress of terahertz programmable metamaterials and applications in single-pixel imaging
电波科学学报. 2021, 36(6): 829–838

量子照射雷达技术的基本原理与研究进展

The fundamental and research progress of quantum illumination radar
电波科学学报. 2017, 32(2): 161–169

太赫兹频段星地通信信道建模与仿真

Modeling and simulation of satellite-ground communication channel in terahertz frequency band
电波科学学报. 2017, 32(5): 612–618

低太赫兹频段ITU大气吸收模型伪线谱的修正研究

Correction of pseudo-line of ITU atmospheric absorption model in low terahertz band
电波科学学报. 2021, 36(4): 524–531

DMSO掺杂PEDOT:PSS薄膜太赫兹波段介电性能研究

Dielectric properties of DMSO-doped-PEDOT: PSS in the THz range
电波科学学报. 2019, 34(1): 133–138

太赫兹波束可调谐的编码超表面设计

Coding metasurface design for terahertz beam shaping
电波科学学报. 2021, 36(6): 932–937



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

韦博, 陈铭铭, 程序, 等. 太赫兹量子频标的研究进展[J]. 电波科学学报, 2024, 39(6): 987-998. DOI: 10.12265/j.cjors.2023271

WEI B, CHEN M M, CHENG X, et al. Research progress of terahertz quantum frequency standard[J]. Chinese journal of radio science, 2024, 39(6): 987-998. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2023271

太赫兹量子频标的研究进展

韦博^{1*} 陈铭铭¹ 程序^{2,3} 蒋艺⁴ 饶云博^{2,3} 张亮^{2,3}

(1. 杭州电子科技大学通信工程学院, 杭州 310018; 2. 中国工程物理研究院电子工程研究所, 绵阳 621999; 3. 中国工程物理研究院微系统与太赫兹研究中心, 成都 610299; 4. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621999)

摘要 高度稳定的时钟对导航、通信和传感中的电子系统至关重要, 时钟的核心就是频率标准, 而以晶振作为频标难以满足高精作战和航天活动等要求。以基态原子或分子的跃迁频率作为参考的量子频标性能优于传统晶振。然而, 以原子钟为主的现有量子频标, 由于体积过于庞大无法满足战场调度等场景便携性的要求, 或价格过于昂贵难以实现普适。随着太赫兹光谱学和电子学技术的发展铺垫, 以硫化羰 (OCS) 为参考分子的太赫兹分子钟应运而生, 其既能拥有比传统晶振高几个数量级的稳定性和准确度, 又能大大减少器件尺寸和生产成本。但因现阶段技术限制, 其指标仍有很大的提升空间。随着相关领域技术的突破, 太赫兹量子频标将为现代化人们生产生活 and 科研探索提供关键性支持, 具有深远而重大的意义。

关键词 频率标准; 晶振; 量子频标; 原子钟; 太赫兹分子钟

中图分类号 TH714

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2024)06-0987-12

DOI 10.12265/j.cjors.2023271

Research progress of terahertz quantum frequency standard

WEI Bo^{1*} CHEN Mingming¹ CHENG Xu^{2,3} JIANG Yi⁴ RAO Yunbo^{2,3} ZHANG Liang^{2,3}

(1. School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China; 2. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China; 3. Microsystem & Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610299, China; 4. Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

Abstract A highly stable clock is indispensable for electronic systems in navigation, communication, and sensing, with the frequency standard serving as its core component. However, meeting the demands of high-precision military operations and aerospace activities using a crystal oscillator remains significant challenges. The quantum frequency standard based on the specific transition frequencies of ground state atoms or molecules is superior to the conventional crystal oscillator. However, the current quantum frequency standard based on atomic clocks either fails to meet the requirements of battlefield scheduling and other scenarios due to its excessive size or is prohibitively expensive for universal implementation. With the advancement of terahertz spectroscopy and electronics technology, a terahertz molecular clock based on Carbonyl Sulfide (OCS) as a reference molecule has emerged, offering a novel avenue for the further progression of terahertz quantum frequency standards. It can not only have several orders of magnitude higher stability and accuracy than the traditional crystal oscillator, but also greatly reduce the device size and production costs. With the technological breakthroughs in related fields, in the near future, the terahertz quantum frequency standard will provide key support for modern people's production and life and scientific research and exploration, which has far-reaching and great significance.

Keywords frequency standard; crystal oscillator; quantum frequency standard; atomic clock; terahertz molecular clock

1 时钟与频率标准

1.1 时钟和频率标准的发展历史与现实需求

时间是最基本的物理量之一,一切与运动相关的物理量均以时间为基础。时间标准经历了从世界时、历书时再到原子时的演变^[1]。如图1所示,距今六千年前的远古时代,人们根据巨石阵、日晷大致判

断时间。到公元一千多年,塔钟、航海天文钟、惠更斯摆钟等机械钟提供了更高的精度。20世纪,石英表等以石英晶振为核心的时钟进一步满足了人们对时间精度的要求。直至今,以原子能级为参考的原子钟为航天、金融、通信等领域提供了一颗稳定可靠的“心脏”。可见,人们从未停止过对更精确和更稳定时钟的追求和探索。

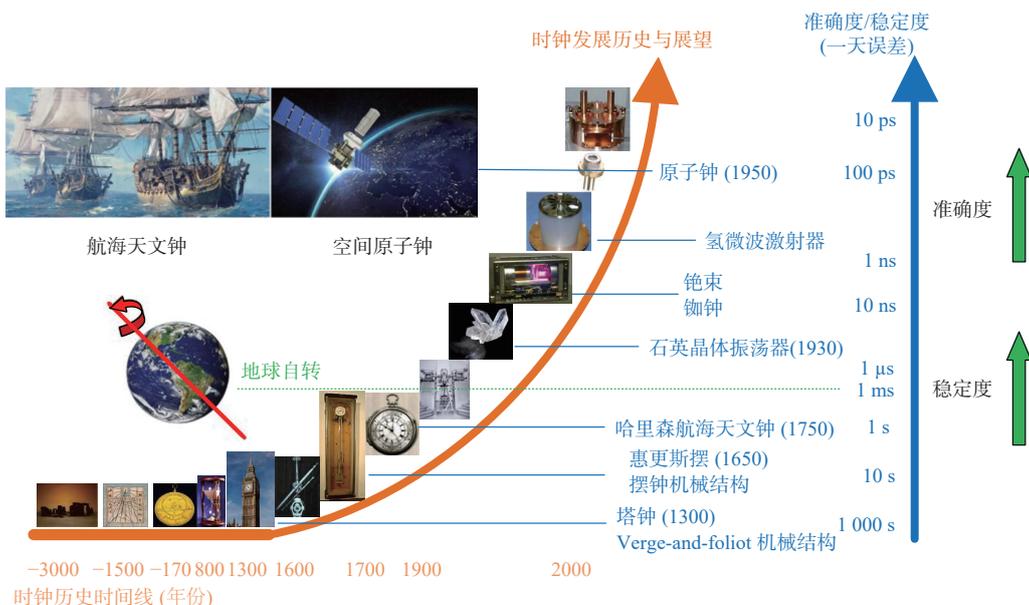


图1 时钟发展历史及发展趋势

Fig. 1 The history and development trend of clock

一般来说,时钟等于频标加计数器。当今世界,频标的重要性不言而喻。小到日常生活中的计时,大到战争中导弹的定位,都需要频标授时完成。各种正在运行的系统都有自己的时间尺度,例如我国的北斗系统、俄罗斯的全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite Systems, GLONASS)、美国的全球定位系统(Global Positioning System, GPS),以及欧洲的伽利略系统,都在地球表面或近地表导航中发挥

着重要作用。如图2所示,当处于强磁干扰、地下钻井探测、海洋石油勘探或水下等极端恶劣条件下时,上述导航定位系统将失去作用,此时无人车/无人机/机器人需要本地授时设备协助完成无线数据链路建立和导航时钟同步,若其精度性能跟不上需求,很容易导致同步错误,甚至带来严重的人力物力损失。因此,人们亟需一个同时满足便携可靠和高精度要求的授时设备。

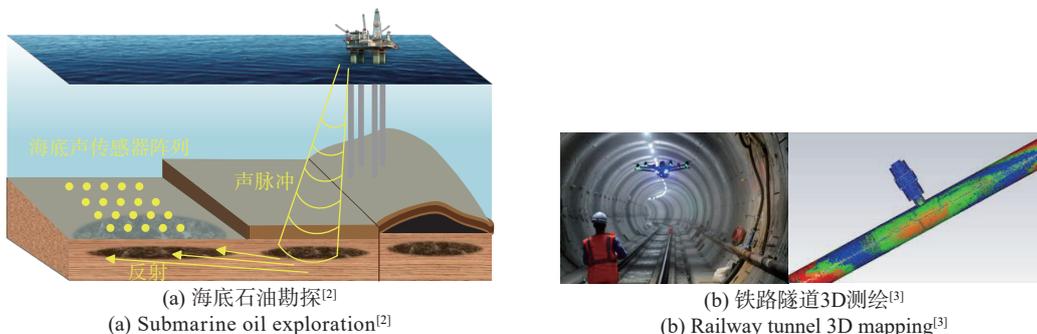


图2 北斗/GPS拒止环境

Fig. 2 BeiDou/GPS denial environment

1.2 频率标准的准确度与稳定度

授时设备的精度,根本上来说都是由其搭载的

频标所决定的。评估一个频标的性能好坏,需关注其准确度和稳定度^[1]。

评价频标稳定度高低就是测量其一段时间内输出频率的相对波动大小,其波动与无规行走噪声、闪变频率噪声、白频率噪声、闪变相位噪声和白相位噪声有关,其中仅白相位噪声为平稳随机过程,一般一台频标可以认为仅含有一种或两种噪声^[4]。时域上稳定度 σ 通常以阿伦偏差来表征^[5-6],即

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\left\langle \frac{(\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2}{2} \right\rangle} \quad (1)$$

式中, \bar{y}_k 为瞬时相对第 k 次测量的取样平均值, $\bar{y}_k = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k+\tau} y(t) dt$, τ 为每次测量持续的时间。定义上阿伦偏差包含了无数次测量平均,但经分析表明,实际测量中只要取样次数大于 100 就能有较好的可信度^[6]。

准确度则是测量一台频标的实际输出频率与其标称输出频率差值的误差率^[1],即

$$A = \frac{f_x - f_0}{f_0} \quad (2)$$

式中: A 为频标准确度; f_x 为频标实际输出频率值; f_0 为其标称频率值,取样时间一般为一小时以上。准确度反映了一台频标输出频率长期稳定度的极限^[6]。

频标稳定度和准确度之间的关系可以形象地用射击打靶类比描述^[7],图 3 展示了 4 种打靶情况与频标输出频率稳定度的比较: 1) 弹着点集中在靶心附近很小的一块区域,对应频标又准又稳; 2) 弹着点集中在偏离靶心的一块区域,对应频标很稳但不准; 3) 弹着点散布在靶心附近一块较大区域,对应频标很准但不稳; 4) 弹着点散布在偏离靶心的一片区域,对应频标既不准也不稳。作为一台合格的频标,应该同时满足高准确度和高稳定度两个要求。

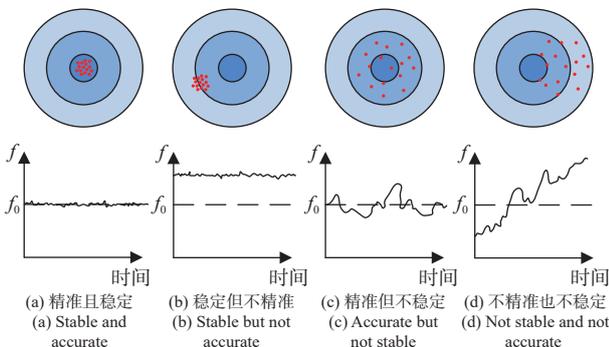


图 3 准确度与稳定度和射击打靶类比^[7]

Fig. 3 Accuracy, stability and precision examples for a marksman, top, and for a frequency source, bottom^[7]

从基本原理和参考对象来看,频率标准可以分为机械电子频标和量子频标,如图 4 所示,前者包含

了机械摆钟和晶体振荡器,后者则包含了原子型量子频标和分子型量子频标;而从参考对象频率来看,量子频标又可以分为微波量子频标和太赫兹量子频标。这些频标均各有优劣,下面将大致介绍各类频标的原理,分析相关指标并作对比,以此更直观地了解太赫兹量子频标的优势所在。

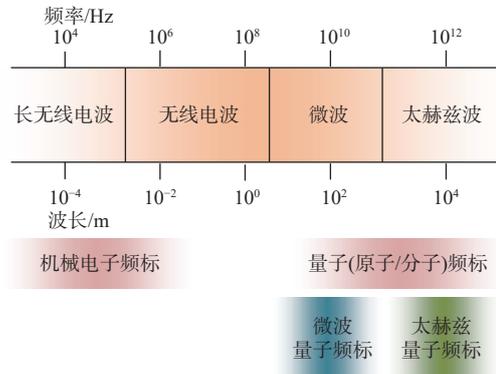


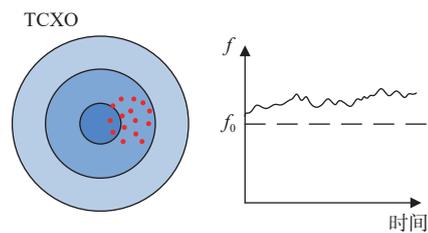
图 4 频率标准的波段与分类

Fig. 4 Band and classification of frequency standard

2 太赫兹量子频标的现实需求与发展

2.1 机械电子频标

作为机械电子频标,晶体振荡器的电路可以等效为一个电容、电感和电阻串联,再并联一个电容^[8]。相较于其他晶体,石英晶体在自然界中广泛存在,其机械和电气性能均衡,且易于获得、价格较低,从 20 世纪 60 年代末开始,人们就致力于开发用于电子表的高性能集成石英晶体振荡器^[8]。为了减小环境温度的变化对晶振工作稳定度的影响,人们又设计研制了温补晶体振荡器 (temperature compensated crystal oscillator, TCXO)^[9] 和恒温晶体振荡器 (oven controlled crystal oscillator, OCXO)^[10],通过频率调谐和算法优化,后者稳定度能达到 10^{-11} 量级^[11],如图 5 所示。然而,晶振仍会表现出各种各样的不稳定性^[7],影响因素包括老化、噪声、温度、加速度、电离辐射、电源电压的变化等。在全球化日益推进,万物互联逐渐密切的过程中,这样的稳定性越来越无法满足高精要求。



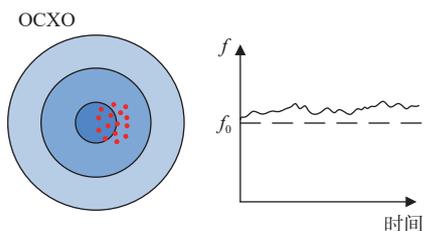


图 5 TCXO^[9] 与 OCXO^[10] 的性能类比
Fig. 5 Performance comparison between TCXO^[9] and OCXO^[10]

2.2 微波量子频标

从宏观上来看,物质的能量是连续可变的。然而根据量子力学理论,类似原子、分子这样的微观粒子的能量是不连续的,对应的离散能量态就被称作能级^[12]。粒子在受到特定频率的电磁辐射后,会吸收或释放固定大小的能量,并完成能级间的跃迁,如图 6 所示。每种粒子都有自己独特的能级结构和对应的跃迁频率,例如铯原子的一个跃迁频率为 9.192 631 770 GHz 左右^[13],而这些能级结构都属于物理常量,受环境变化的影响较小,因此被用作量子频标的参考之一。微波量子频标的参考粒子通常为原子。

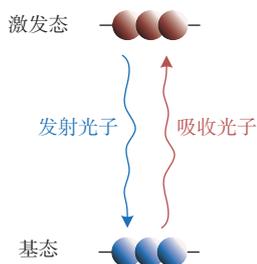


图 6 一种简化的两能级原子系统转换过程 (包含光子的释放与吸收)

Fig. 6 A simplified conversion process for a two-level atomic system involving the release and absorption of photons

2.2.1 原子型量子频标的结构与性能

量子频标的稳定度通常用阿伦偏差来衡量^[14]。经过推导,量子频标的稳定度近似为^[15]

$$\sigma(\tau) \approx \frac{0.2}{Q(S/N)\tau^{1/2}} \quad (3)$$

式中: $\sigma(\tau)$ 为量子频标阿伦偏差; $Q=f_0/\text{FWHM}$, 即跃迁中心频率/吸收谱线半高宽。微波量子频标以原子型量子频标为代表,而原子型量子频标通常被简称为原子钟。其与机电频标最主要的差别在于多了原子的反馈作用,主要机理就是通过原子某一对能级的跃迁谱线对激励信号鉴频,再利用锁相环将激励信号(压控晶振、受控激光器等)锁定在跃迁谱线中心频率^[6]。其功能性结构和环路框图^[6]如图 7 所示。

1955 年,第一个可操作的铯原子钟在英国特丁顿国家物理实验室被建成^[16]。之后,随着人们对各

种粒子能级特性的探索,研制出了铷原子钟^[17]、氢原子钟^[18]、锶原子光钟^[19]等产品。截至目前,性能最优的微波原子钟的不确定度指标可达到 10^{-16} 量级。原子钟性能类比如图 8 所示。

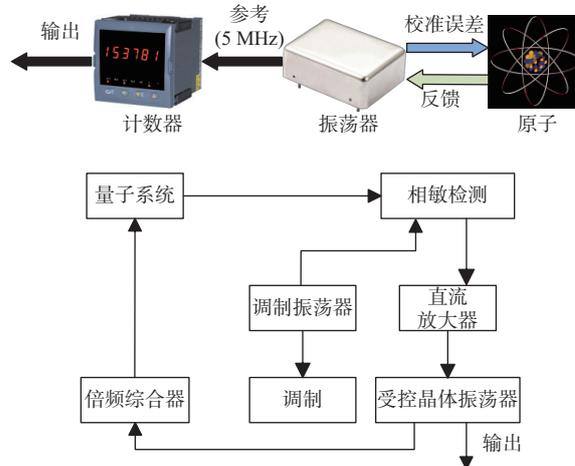


图 7 原子型量子频标的功能性结构与环路框图^[6]
Fig. 7 Structure and loop block diagram of atomic frequency standard^[6]

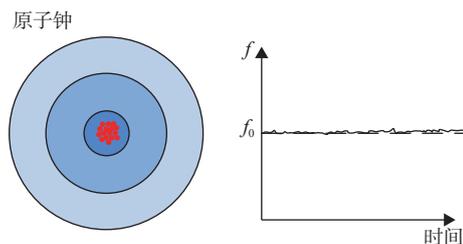


图 8 原子钟性能类比
Fig. 8 The performance of atomic clock

2.2.2 原子型量子频标的不足

对于 21 世纪来说,设备的移动化和轻量化是一个不容忽视的指标,因此上述几种原子钟稳定度虽高,但因其结构复杂、成本高昂、体积庞大等弊端,无法满足便携和普适的要求,如单兵作战、空中作业、空间探测等情形下,根本没有条件使用。为了缩小原子钟的体积,人们利用相干布居囚禁 (coherent Population trapping, CPT) 原理研制出了 CPT 芯片级原子钟^[20]。由于 CPT 原子钟不需要额外的微波谐振腔,并采用微机电系统 (micro-electromechanical system, MEMS) 工艺实现了小型化,使其有了更广阔的应用场景。在 2019 年,日本先进工业科学与技术研究所联合日本东北大学、东京工业大学和日本理光公司一同研制了一款体积 15.4 mL、功耗 59.9 mW 的商用超低功率原子钟 (ultra-low-power atomic clock, ULPAC)^[21],其一秒稳能达到 10^{-11} 量级,万秒稳能达到 10^{-12} 量级。虽然这样的不确定度水准已能够满足民用通信、科研生产等大部分场景并做到便携化,但其温度补偿和磁屏蔽要求高,需要几分钟甚至数十分钟的启动时间以达到最佳运行状态,且碱

金属、抗碱玻璃、激光光源等必需组件造价昂贵,基本靠进口,因此要实现批量生产和广泛应用难度很大。

2.3 太赫兹量子频标

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由传统的天文学星际物质探测转向便携式高精度传感器与系统应用,如便携式连续波气体分子探测系统^[22]、便携式呼吸监测系统^[23]等。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^[24]、呼吸有机物检测^[25]和有害物质探测^[26]上;另一方面,基于固态电子学的太赫兹连续波光谱仪^[27]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,尤其是随着太赫兹锁相环芯片和倍频链路芯片的发展——目前工业界先进的硅基互补金属氧化物半导体 (complementary metal-oxide-semiconductor transistor, CMOS)/SiGe 晶体管的截止频率已拓展到超过 2 THz^[28-30],为高集成度、小型化和低成本的毫米波/低太赫兹频段 (100~300 GHz) 全固态电子学气体探测器的实现提供了工艺路线支持。由此,伴随着对频标高便携性、高精度和低成本的需求,基于负反馈环路的太赫兹量子频标应运而生。

2.3.1 早期的氨分子钟

分子型量子频标与原子型量子频标一样,都是利用基于量子力学的能级结构作为参考基准,亦属于量子计量范畴。人们对分子型量子频标的探索实际上早于原子型量子频标。早在 1940 年就有了氨分子钟的概念,只不过当时被称为“原子钟”^[31]。1948 年,Harry M. Davis 利用氨分子在 23.87 GHz 附近会吸收光子能量并发生振动能级跃迁的特性,制作了世界上第一台分子钟^[32]。图 9 展示了第一台氨分子钟和氨分子的吸收谱线^[32]。然而,受限于当时的技术和工艺水平,氨分子钟的收发机系统无法做到更高频段,直接导致其整体体积较大(波长较长);另外,氨分子吸收率较低且抗电磁干扰 (electromagnetic interference, EMI) 较弱,因此这种分子钟的小型化与实用化仍然遥遥无期。

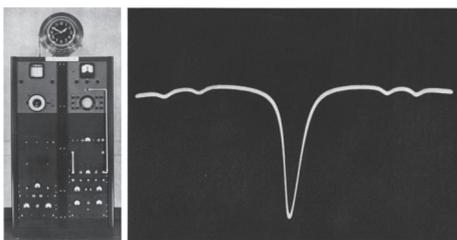


图 9 第一台氨分子钟和氨分子吸收谱线^[32]

Fig. 9 The first ammonia clock and absorption curve of ammonia recorded on an oscilloscope^[32]

2.3.2 太赫兹铯分子钟

2023 年, K. H. Leung 等人实现了一款以铯分子 (Sr_2) 为参考的光晶格分子钟,其能态跃迁频率约为 31.8 THz^[33]。其工作原理与现有光晶格原子钟类似,均涉及冷原子物理和光学干涉技术^[34-35],差别在于参考粒子为分子。经过实验测量,铯分子光晶格分子钟能达到 4.6×10^{-14} 的稳定度。

然而,以铯分子钟为代表的大型太赫兹量子频标其缺点十分明显:光晶格钟通常需要强大的激光系统来冷却粒子并维持光晶格,导致系统整体功耗在数百瓦;虽然铯分子光晶格钟表现出了良好的磁场稳定性,但是由于装置复杂,其运行和维护成本很高,整体体积也非常大,目前还不适合广泛应用在需要达到即时便携的设备上。

2.3.3 太赫兹硫化羰分子钟

2.3.3.1 硫化羰分子钟的基本原理

2018 年, Wang Cheng 等人提出了基于 CMOS 工艺的硫化羰 (OCS) 分子钟的概念,利用 OCS 分子的转动能级做时钟参考^[36]。如图 10 所示,展示了 OCS 分子吸收特定光子能量而发生旋转能级跃迁的过程。

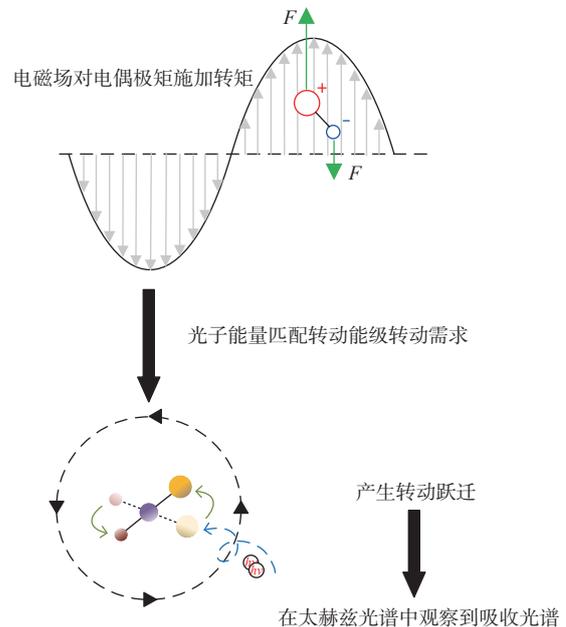


图 10 OCS 分子吸收特定光子能量而发生旋转能级跃迁^[2]

Fig. 10 The process of rotational transitions of OCS molecules^[2]

图 11 展示了 Wang Cheng 等人制造的 CMOS OCS 分子钟照片^[36],基本原理架构如图 12 所示,太赫兹锁相环的输出信号频率被锁定在 MHz 量级,通过倍频放大链路后发射给密封 OCS 气体的波导,太赫兹功率探测器/接收机在波导另一侧进行信号检波/接收,得到探测频率 f_c 与跃迁频率 f_0 的差值后供给

压控晶振的调谐端,从而动态调整压控晶振的时钟频率,进而通过反馈链路的负反馈迭代调整实现相同的探测频率 f_c 和跃迁频率 f_0 ,最终实现锁定在OCS分子跃迁频率的太赫兹分子钟系统。

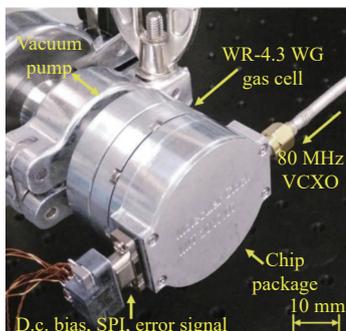


图11 CMOS OCS分子钟^[36]

Fig. 11 Photograph of the CMOS OCS molecular clock^[36]

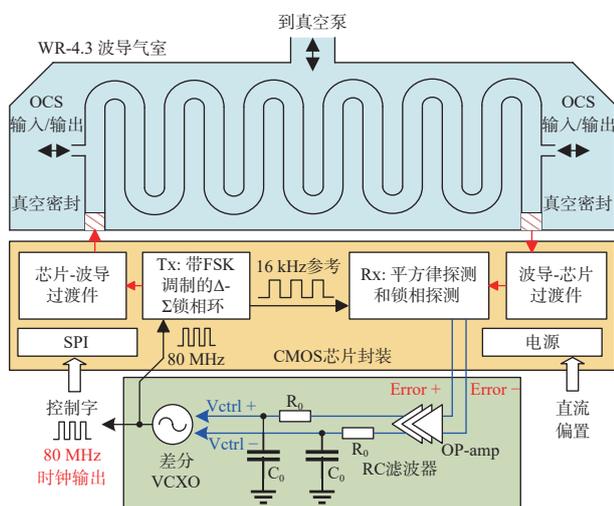


图12 CMOS OCS分子钟原理图^[36]

Fig. 12 Schematic of the CMOS OCS molecular clock^[36]

2.3.3.2 硫化碳分子钟的优势和不足

相比于原子钟,作为太赫兹量子频标的OCS分子钟有许多优势:

1) OCS分子钟的跃迁中心频率在亚太赫兹频段,高出原子钟两个数量级,且虽然OCS分子钟吸收线宽为几兆赫兹,但相比于原子钟的百千赫兹仅相差一个数量级,因此使得OCS分子钟 Q 值很大,理论上能达到的稳定度很高(阿伦偏差小)。

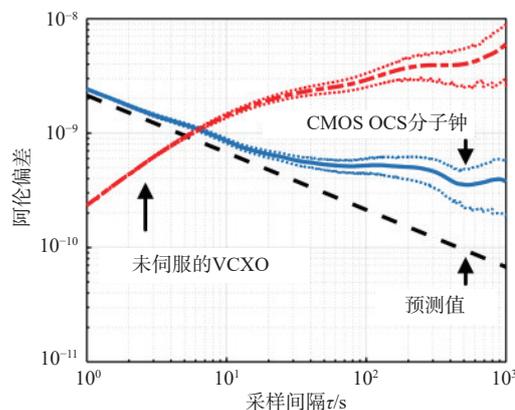
2) 传统铯、氢原子钟需要微波腔且主要依靠进口的激光光源,因此体积大、功耗高、成本高;而OCS分子钟由亚太赫兹的毫米波激发,仅需CMOS工艺的倍频芯片,体积小、功耗低、成本低。

3) 由于碱金属需要加热气化才能与电磁波发生作用,要达到稳定工作状态更是需几分钟或数十分钟左右,故原子钟启动时间较长,功耗也较大;OCS分子钟共振频率为亚太赫兹,比原子钟高出两个数量级,因此传输毫米波只需要小型行波腔,且OCS分

子能级的旋磁比只有碱金属旋磁比的千分之一^[37-39],几乎不受磁场的影响,所以物理系统无需磁屏蔽,因此整机为芯片结构,且气体无需加热,半导体器件稳定速度快、功耗低,能够实现快速启动。

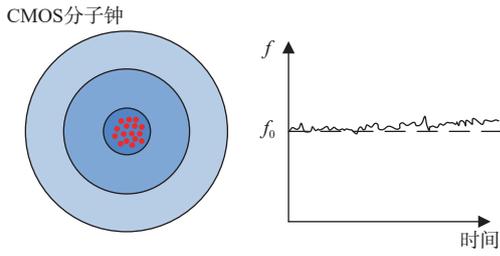
4) 原子钟里有光学系统,需要加固才能在高动态环境中工作,但光学加固主要靠光学胶固化,会随时间老化,长期工作存在稳定性漂移;OCS分子钟则是全固态毫米波信号传输,完全不存在老化问题,因此,OCS分子钟能够长期在高动态环境中工作。

然而,在MIT课题组的报导中,其分子钟的稳定度并不高,和一般的恒温晶振具有相似的指标水平,其阿伦方差和性能类比如图13所示。首先,高频信号在传统无源器件中的损耗很大,这主要是由于无源元件在高频时对有源元件、印刷电路板(printed circuit board, PCB)走线轨迹和接地模式存在寄生效应,这种特性的改变也会引起EMI,导致其太赫兹频率源的输出功率低、太赫兹接收机噪声大等问题,因此,太赫兹源功率低和太赫兹接收机噪声系数高两大问题仍阻碍着现阶段分子钟以及传统基于分离器件/芯片的太赫兹通信、雷达等应用的发展。传统硅基半导体工艺的优势在于高集成度和量产低成本,但其噪声与功率特性随着工艺节点的演进很难得到本质上的提升;其次,其制作的OCS腔体是由两半块金属腔体合并成的,中间是挖空的WR-4.3波导,波导进出口用光学透明环氧树脂封装以保证真空,如图14所示。然而,由于其波导过渡结构损耗较大等原因,整体 S 参数不够理想(如图15所示),且因为是两半腔体合并成的,难免会有气体泄露等问题,影响分子钟使用寿命;最后,由于自然展宽、压力展宽、多普勒展宽等各种光谱展宽因素的存在,OCS吸收光谱的半高宽将扩大,直接导致分子钟稳定度的下降。因此,针对上述几个方面的改进是太赫兹量子频标进一步发展的方向,如表1所示。



(a) CMOS OCS分子钟的阿伦偏差^[36]

(a) Allan deviation of CMOS OCS molecular clock^[36]



(b) CMOS OCS分子钟的性能类比
(b) Performance analogy of CMOS OCS molecular clock

图 13 CMOS OCS 分子钟的阿伦偏差和性能类比
Fig. 13 Allan deviation and performance analogy of the CMOS OCS molecular clock

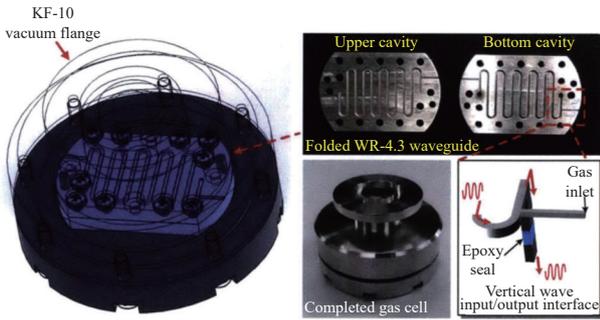


图 14 现有分子钟 OCS 波导腔结构^[40]

Fig. 14 Cavity structure of existing molecular clock OCS waveguide^[40]

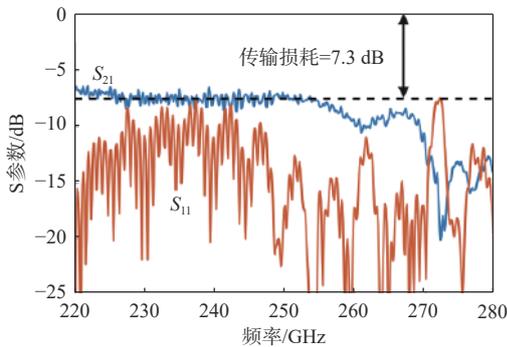


图 15 现有分子钟 OCS 波导 S 参数^[2]

Fig. 15 S parameters of existing molecular clock OCS waveguide^[2]

表 1 太赫兹量子频标的发展方向及关键瓶颈

Tab. 1 Development direction and key bottleneck of terahertz quantum frequency standard

发展方向	关键瓶颈
更加小型化便携化	集成度的提高;腔体结构的改进
稳定度提高	信噪比的提高;接收机灵敏度的提高;吸收光谱的压窄
准确度提高	温度、电磁场等环境因素影响的克服(虽然影响不大,但有利于进一步提高准确度)
使用寿命延长	腔体气密性的提高;腔体材料的选择
减小消耗功率	Tx/Rx电路工艺的改良

2.3.4 太赫兹量子频标环路

以 OCS 分子钟为代表的太赫兹量子频标工作机理与以原子钟为代表的传统微波量子频标原理基本

一致,均是利用原子或分子吸收(释放)光子产生能级跃迁的特性,通过鉴频和锁相环路将石英晶振等振荡器的频率锁定在粒子的跃迁频点附近,从而使振荡器达到极高的稳定性和准确度,而更为突出的是,太赫兹量子频标的跃迁频率在毫米波频段,利用的是振动或转动能级,结构更简单、成本更低、便携性更高,并且其稳定性和准确度还会随着电子学和光学的发展而不断提升,应用潜力巨大。有了高频器件和半导体工艺等关键部件和技术的蓬勃发展,太赫兹量子频标才能有进一步发展的理论可能和技术支持。太赫兹量子频标的基本环路框图与原子型量子频标环路框图(图 7)类似,如图 16 所示。

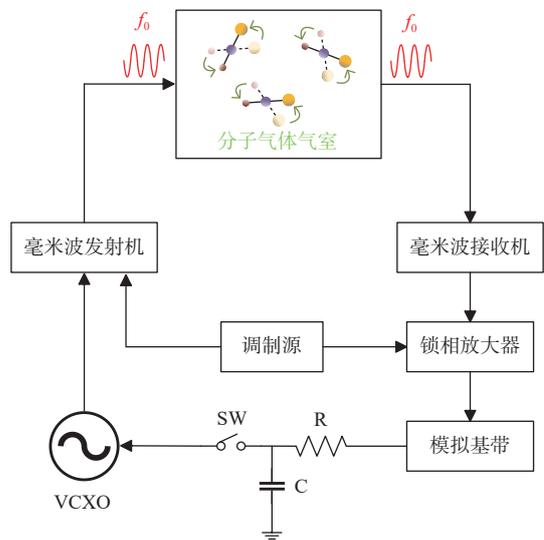


图 16 太赫兹量子频标环路框图

Fig. 16 Loop block diagram of terahertz molecular frequency standard

2.3.5 一款基于组件模式的硫化碳分子钟

2.3.5.1 电子学方面的改进

目前在半导体工艺方面,硅基 CMOS 工艺^[41]集成度最高,化合物 GaAs/InP/GaN^[42]工艺的性能最优,SiGe 工艺^[43]则介于两者之间。从太赫兹分子钟接收/发射芯片的实现来看,由于锁相环芯片需要射频/模拟/数字模块的高度集成,因此能够采用的工艺仅有硅基 CMOS 与 SiGe 工艺。在可比拟工艺节点上,SiGe 工艺的频率特性优于硅基 CMOS 工艺,但前者模拟/数字集成能力远弱于后者,此外前者一般是 8 吋晶圆,而后者则是 12 吋晶圆,因此在批量生产成本上硅基 CMOS 工艺占据极大优势。典型硅基 CMOS 工艺在 40 nm 节点的截止频率为 250~300 GHz,既可以满足太赫兹分子钟接收机芯片与发射机芯片的高频性能需求,又可以采用高集成度的片上数字集成模块提升响应速度,简化对外接口,集成高精度模拟电路和电源管理模块。因此,现阶段中国工程物理研究院针对现有分子钟所存在的问题,基

于太赫兹分子钟典型架构,用 SiGe BiCMOS 工艺实现了一版基于组件模式的太赫兹分子钟,整体由发

射机芯片、接收机芯片和 OCS 折叠波导腔组成,如图 17 所示。

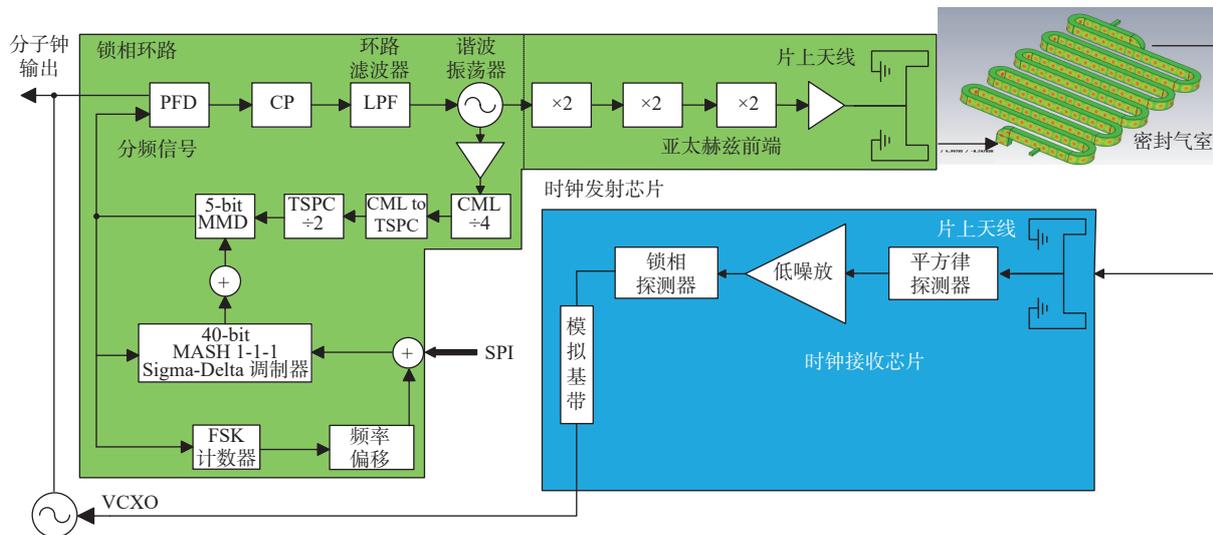
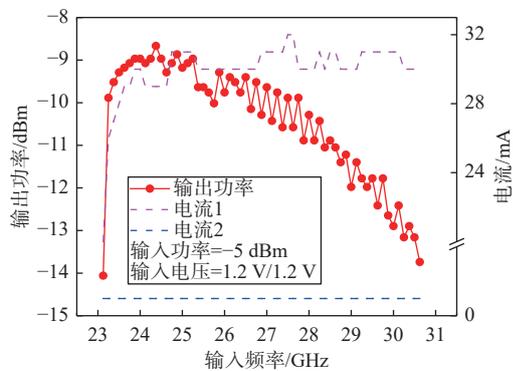


图 17 太赫兹分子钟典型架构

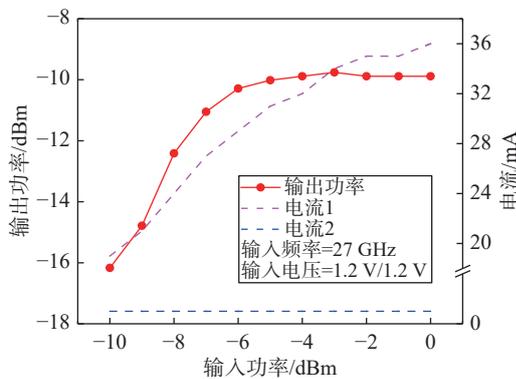
Fig. 17 Typical architecture and block diagram of the THz molecular clock

太赫兹分子钟八倍频芯片及检波器芯片测试结果如图 18 和图 19 所示。八倍频芯片输出功率分别在输入 24.4 GHz 附近以及 -3 dBm 附近达峰,最大输出功率约为 -8.6 dBm; 235 GHz 的调制信号经过检波器解调后,得到脉冲信号的包络,实现了设计功能。



(a) 输出功率和电流随输入频率的变化关系

(a) The relation of output power and current with input frequency



(b) 输出功率和电流随输入功率的变化关系

(b) The relation of output power and current with input power

图 18 八倍频芯片测试结果

Fig. 18 Testing results of octave chip



图 19 检波器芯片测试结果

Fig. 19 Testing results of detector chip

2.3.5.2 硫化羰吸收腔体方面的改进

对于 OCS 折叠波导腔,中国工程物理研究院改进了腔体波导过渡结构,用盒型窗^[44]做封装,并通过理论计算^[45]和仿真优化各结构参数,整个腔体一体成型,通过对腔体的加工制备,利用矢量网络分析仪对带盒型窗结构的腔体进行测试,结果如图 20 所示。可以看出,220~240 GHz 频带内波导 S_{11} 在 -10 dB 以下, S_{21} 优于 -5 dB, 满足使用需求。

对各模块整合之后,得到的短期稳定度测试结果如图 21 所示。

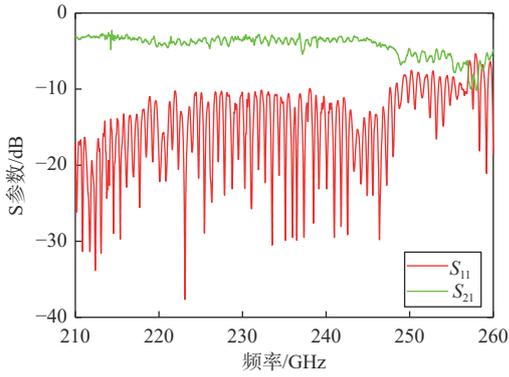


图 20 带盒型窗的折叠波导网测试结果

Fig. 20 Test results of folding waveguide with two windows by vector network analyzer

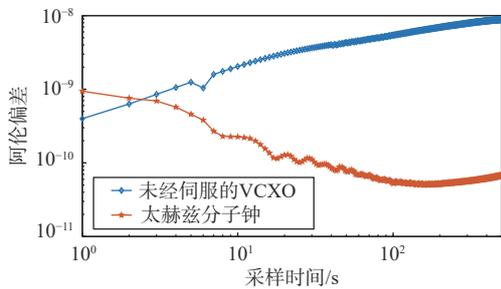


图 21 短期稳定度测试结果

Fig. 21 Testing results of short-term stability

3 总结与展望

如表 2 所示, 展示了各类频标的相关指标对比。我们可以看到, 表中两款分子钟成本比较低, 体积也很小, 启动时间均小于 1 s, 消耗直流功率均在 100 mW 以内, 结构均比较简单。在没有磁屏蔽和温度补偿条件下, 芯片级分子钟 (chip-scale molecular clock, CSMC) 的磁场和温度漂移能够达到和芯片级原子钟 (chip-scale atomic clock, CSAC) 相似的水平,

但在稳定度方面, 两款分子钟还有比较大的提升空间。

尽管本文基于组件模式的 OCS 分子钟和现有芯片级分子钟的稳定度指标不如原子钟, 但随着相关领域的不断进步, 太赫兹量子频标的稳定度和准确度指标必然会得到提高。下面是两种提高其稳定度的思路:

1) 在电子学上, 可以使用更加高阶的谱线探测方式, 以进一步消除温度、压强等因素所带来的基线倾斜 (如图 22 所示), 进而影响频标准确度。但是阶次越高, 谐波电压就越低, 对检波器来说探测难度将越大, 因此需要一种折中的选择。未来若检波器的检波能力提升, 并提高太赫兹源输出功率和鲁棒性, 则能进一步使用更高阶的谐波探测光谱, 使太赫兹量子频标达到更高的准确度。

2) 光学上可以结合饱和和吸收光谱法。由于气室中原子/分子的速度遵循麦克斯韦-玻尔兹曼分布^[49], 即大部分粒子均处于零速度状态, 但由于多普勒效应的存在, 具有初速度的粒子群与探测器之间的相对速度不为零, 因此这些非零速度的粒子也能吸收光子发生能级跃迁, 导致整体光谱展宽, 这是光谱展宽最主要的原因^[50]。前文中提到谱线 Q 值越大频标稳定度越好, 而吸收谱线半高宽越小 Q 值就越大, 因此在光学上, 可以将饱和吸收光谱法^[51]与太赫兹量子频标相结合以减小吸收光谱的线宽, 进一步提高 Q 值以改善稳定度。去除了多普勒效应的影响之后, 线宽大大减小, 能够作为稳定度进一步提升的理论基础。以 OCS 分子钟为例, 通过调整吸收腔体出射端蓝宝石玻璃厚度使得一部分能量反射回腔体中, 进而充当泵浦光的角色, 另一束光作为探测光, 实现饱和和吸收。如图 23 所示, 展示了 OCS 气体的饱和和吸收光谱。

表 2 各类频标指标对比

Tab. 2 Comparison of various frequency standards

文献	频标	实现方式	探测频率/GHz	谐波锁定阶数	阿伦偏差 ($\tau=1$ s)	阿伦偏差 ($\tau=1000$ s)	温度漂移/ $^{\circ}\text{C}$	磁场漂移/ Gauss^{-1}	直流功率/mW	启动时间/s	尺寸	成本
[46]	OCS	晶振+加热器+双MEMS温度感知	0.060	-	1.6×10^{-11}	2.5×10^{-11}	$\pm 5 \times 10^{-9}$	-	950	150	9 mm×7 mm×5.6 mm	中等
[47]	星载铷钟	电子器件+铷气室+光电/温度控制/微波气室/磁屏蔽+VCXO	6.835	1	6.1×10^{-13}	1.9×10^{-14}	$\pm 6 \times 10^{-16}$	$\pm 8.0 \times 10^{-16}$	2000	600	相对庞大	高昂
[48]	^{133}Cs CSAC	电子器件+MEMS铷气室+光电/温控/磁屏蔽+VCXO	4.596	1	3.0×10^{-10}	1.0×10^{-11}	$\pm 5 \times 10^{-10}$	$\pm 9.0 \times 10^{-11}$	120	180	4.1 inch×3.5 inch×1.1 inch	高昂
[40]	OCS CSMC	65 nm IC + 分子气室+XTAL	231.061	3	3.2×10^{-10}	4.3×10^{-11}	$\pm 3 \times 10^{-9}$	$\pm 2.9 \times 10^{-12}$	70	<1	50 cm×50 cm×50 cm	低廉
本文	组件模式 OCS分子钟	40 nm SiGe BiCMOS器件+OCS折叠波导腔+VCXO	231.061	1	9.0×10^{-10}	7.0×10^{-11}	-	-	99	<1	2 cm×2 cm×2.3 cm (不包含腔体)	低廉

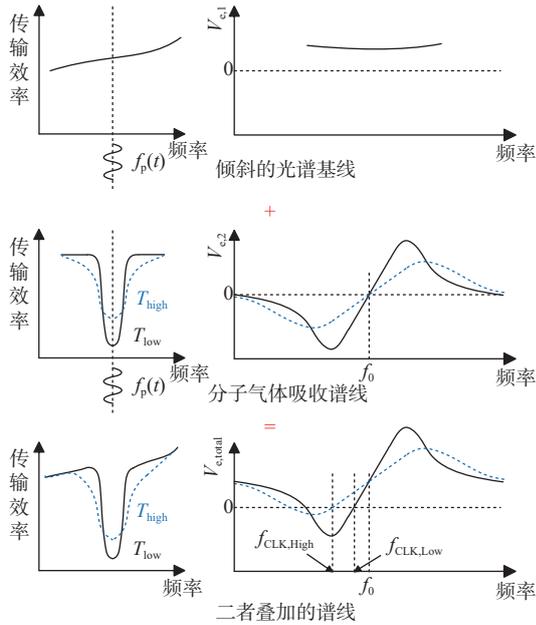


图 22 基线倾斜与原始对称谱线叠加导致的谱线轮廓不对称 (包含温度 T 的影响)^[40]

Fig. 22 Asymmetric spectral line profile due to superposition of baseline tilting and original symmetric spectral line (including the influence of temperature T)^[40]

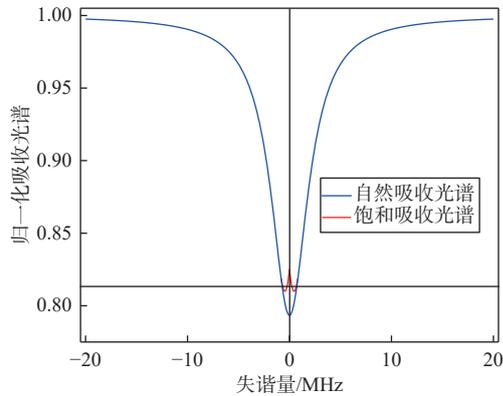


图 23 OCS 气体饱和和吸收归一化光谱

Fig. 23 Normalized saturated absorption spectroscopy of OCS

本文从回顾时钟发展历史出发,简要介绍了晶振、原子型量子频标等主流频标发展情况,之后将新兴的太赫兹量子频标与其他频标做对比,尤其是 OCS 分子钟,展现出体积小、结构简单、成本低、启动速度快、稳定性高、可靠性高等无可比拟的优势。随着电子学和光学的不断突破,我们能结合高阶谱线探测和饱和吸收光谱法进一步改善太赫兹量子频标的性能,使其能够为卫星发射、航天活动、战场调度、金融结算等活动提供精确授时的基础和强有力的保障。

参考文献

[1] 童宝润. 时间统一系统 [M]. 北京: 国防工业出版社,

2003: 15-106.

TONG B R. Timing system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003: 15-106. (in Chinese)

[2] 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]// Proceedings of the IEEE Symposium on VLSI Circuits, June 18-22, 2018. Honolulu: IEEE, 2018: 113-114.

[3] Hovering Solutions. Crossrail tunnels 3D mapping [Z/OL]. [2023-08-21]. <https://hoveringsolutions.com/use-case/crossrail-tunnels-3d-mapping-using-drones.html>

[4] ZHAI J, DONG L, ZHANG S S, et al. Different variances used for analyzing the noise type of atomic clock[J]. *Applied mechanics and materials*, 2012, 229-231: 1980-1983.

[5] DOBROGOWSKI A, KASZANIA M. Real-time assessment of Allan deviation and time deviation[C]// Proceedings of the 2007 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum, May 29-1 June, 2007. Geneva: IEEE, 2007: 877-882.

[6] 王义道. 量子频标原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1986: 235-260.

WANG Y Q. Principle of quantum frequency standard [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd. (CSPM), 1986: 235-260. (in Chinese)

[7] VIG J R. Introduction to quartz frequency standards, revision 1[R]. NASA STI/Recon Technical Report N, 1992: 93.

[8] VITTOZ E A, DEGRAUWE M G R, BITZ S. High-performance crystal oscillator circuits: theory and application[J]. *IEEE journal of solid-state circuits*, 1988, 23(3): 774-783.

[9] WANG Z Y, WU J. A method to increase the frequency stability of a TCXO by compensating thermal hysteresis[J]. *Sensors*, 2020, 20(23): 1-16.

[10] JOTEPPA S, CHANDRASHEKAR B K, CHIPPAK-ATTI V S. Design optimization of OCXO to fulfil the phase noise requirement under dynamic load condition[J]. *Journal of mechanical engineering and automation*, 2017, 7(2): 23-29.

[11] PAWŁOWSKI E, WARDA P. Metoda i układ do dyscyplinowania lokalnego generatora wzorcowego względem sygnału 1PPS systemu GPS[J]. *Przegląd elektrotechniczny*, 2018, 94(7): 38-41. (in Polish)

[12] JONATHAN P D, GERARD J M. Quantum technology: the second quantum revolution[J]. *Philosophical transactions series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 2003, 361(1809): 1655-1674.

[13] SHANG H S, ZHANG T Y, MIAO J X, et al. Laser with 10-13 short-term instability for compact optically pumped

- cesium beam atomic clock[J]. *Optics express*, 2020, 28(5): 6868-6880.
- [14] DAVID V L, LEVICK A P, JEFF H. The use of the Allan deviation for the measurement of the noise and drift performance of microwave radiometers[J]. *Measurement science and technology*, 2007, 18: 1917-1928.
- [15] VANIER J, BERNIER L G. On the signal-to-noise ratio and short-term stability of passive rubidium frequency standards[J]. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 1981, IM-30(4): 277-282.
- [16] ESSEN L, PARRY J V L. An atomic standard of frequency and time interval: a caesium resonator[J]. *Nature*, 1955, 176: 280-282.
- [17] CAMPARO J C. The rubidium atomic clock and basic research[J]. *Physics today*, 2007, 60(11): 33-39.
- [18] STRELNITSKI V S, PONOMAREV V O, SMITH H A. Hydrogen masers. I: theory and prospects[J]. *The astrophysical journal*, 1996, 470: 1118-1158.
- [19] ANDREW D L, MARTIN M B, JUN Y E, et al. Optical atomic clocks[J]. *Reviews of modern physics*, 2015, 87(2): 637-701.
- [20] GODONE A, LEVI F, VANIER J. A new atomic frequency standard: the coherent population trapping Cs maser[C]// 1998 Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest, 1998: 175-176.
- [21] ZHANG H S, HERDIAN H, NARAYANAN A T, et al. 29.4 Ultra-low-power atomic clock for satellite constellation with 2.2×10^{-12} long-term allan deviation using cesium coherent population trapping [C]// 2019 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), 2019: 462-464.
- [22] CUISSET A, BIGOURD D, HINDLE F, et al. Continuous-wave terahertz spectroscopy applied to mainstream cigarette smoke analysis[J]. *Optics letters*, 2006, 31(15): 2356-2358.
- [23] OSMAN O B, HARRIS Z B, ZHOU J W, et al. In Vivo assessment and monitoring of burn wounds using a handheld terahertz hyperspectral scanner[J]. *Advanced photonics research*, 2022, 3(5): 1-11.
- [24] GALSTYAN V, DARCO A, FABRIZIO M D, et al. Detection of volatile organic compounds: From chemical gas sensors to terahertz spectroscopy[J]. *Reviews in analytical chemistry*, 2021, 40(1): 33-57.
- [25] MEILA B D A, REGINA A N, ERAN G, et al. Clinical trial and detection of SARS-CoV-2 by a commercial breath analysis test based on Terahertz technology[J]. *PLOS ONE*, 2022, 17(9): 1-14.
- [26] BOJAN M, DAMIAN V, FIEAKA C, et al. Terahertz spectroscopic investigations of hazardous substances[J]. *National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics*, Romania, 2016, 10010(10): 1-6.
- [27] WANG C. Wideband and fast Terahertz spectrometer using dual-frequency-comb on Complementary metal-oxide-semiconductor[D]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 2018.
- [28] ZEROUNIAN N, ANIEL F, BARBALAT B, et al. 500 GHz cutoff frequency SiGe HBTs[J]. *Electronics letters*, 2007, 43(14): 774-775.
- [29] JAIN V, CHENG P, GROSS B J, et al. Schottky barrier diodes in 90nm SiGe BiCMOS process operating near 2.0 THz cut-off frequency[C]// Proceedings of the 2013 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM), September 30-October 3, 2013. Bordeaux: IEEE, 2014: 73-76.
- [30] GIDEL V, GIANESELO F, CHEVALIER P, et al. Smart way to adjust Schottky barrier height in 130 nm BiCMOS process for sub-THz applications[C]// Proceedings of the 2020 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), January 26-29, 2020. San Antonio, TX, USA, IEEE, 2020: 337-340.
- [31] NATURE P G. The conception of the atomic clock[J]. *Nature*, 1940, 145: 417.
- [32] DAVIS H M. Radio waves and matter[J]. *Scientific American*, 1948, 179(3): 16-23.
- [33] LEUNG K H, IRITANI B, TIBERI E, et al. Terahertz vibrational molecular clock with systematic uncertainty at the 10-14 level[J]. *Physical review X*, 2023, 13(1): 1-18.
- [34] TAKAMOTO M, HONG F L, HIGASHI R, et al. An optical lattice clock[J]. *Nature*, 2005, 435: 321-324.
- [35] DEWEVIANKO A, KATORI H. Colloquium: physics of optical lattice clocks[J]. *Reviews of modern physics*, 2011, 83(2): 331-347.
- [36] WANG C, YI X, MAWDSLEY J, et al. An on-chip fully electronic molecular clock based on sub-terahertz rotational spectroscopy[J]. *Nature electronics*, 2018, 1(7): 421-427.
- [37] LO M K, FLYGARE W H. Rotational magnetic moment of OCS[J]. *Physical review*, 1967, 154(1): 93-94.
- [38] ESHBACH J R, STRANDBERG M W P. Rotational magnetic moments of molecules[J]. *Physical review*, 1952, 85(1): 24-34.
- [39] JOHN T C, GORDY W. Zeeman effect of some linear and symmetric-top molecules[J]. *Physical review*, 1956, 101(4): 1298-1300.
- [40] WANG C. Terahertz wave-molecule interactions via CMOS chips: from comb gas sensor with absolute specificity to ultra-stable, miniaturized clock[D]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 2020.
- [41] VELDHORST M, EENINK H G J, YANG C H, et al. Silicon CMOS architecture for a spin-based quantum

- computer[J]. *Nature communications*, 2017, 8(1): 1766.
- [42] CHAKRABARTI B, GHOSH D, MITRA M. High frequency performance of GaN based IMPATT diodes[J]. *International journal of engineering science and technology*, 2011, 3(8): 6153-6159.
- [43] CHEVALIER P, LIEBL W, RÜCKER H, et al. SiGe BiCMOS current status and future trends in Europe[C]// *Proceedings of the 2018 IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium (BCICTS)*, October 15-47, 2018. San Diego, IEEE, 2018: 64-71.
- [44] 祝方芳, 刘文鑫. 0.22 THz 折叠波导行波管输出窗的仿真设计与实验研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2017, 37(10): 997-1002.
- ZHU F F, LIU W X. Design of output window for 0.22 THz folded waveguide travelling wave tube: a simulation and experimental study[J]. *Chinese journal of vacuum science and technology*, 2017, 37(10): 997-1002. (in Chinese)
- [45] 蒋艺, 雷文强, 胡鹏, 等. 0.23 THz 分子钟腔体设计与实验[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2022, 20(2): 166-169.
- JIANG Y, LEI W Q, HU P, et al. Design and experimental results of 0.23 THz molecular clock cavity[J]. *Journal of terahertz science and electronic information technology*, 2022, 20(2): 166-169. (in Chinese)
- [46] SITIME. SiT5711, 1 to 60 MHz, Stratum 3E OCXO [Z/OL]. North America, 2023[2023-08-21]. <https://www.sitime.com/products/stratum-3e-ocxos/sit5711.html>
- [47] 梅刚华, 赵峰, 祁峰, 等. 用于北斗三号卫星导航系统的星载铷原子钟特性[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2021, 51(1): 118-124.
- MEI G H, ZHAO F, QI F, et al. Characteristics of the space-borne rubidium atomic clocks for the BeiDou III Navigation Satellite System[J]. *Scientia sinica physica, mechanica & Astronomica*, 2021, 51(1): 118-124. (in Chinese)
- [48] MICROSEMI. SA. 45s CSAC and RoHS CSAC Options 001 and 003, Chip-scale atomic clock [Z/OL]. 2019[2023-08-21]. https://www.microsemi.com/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=133305.html
- [49] ROWLINSON J S. The Maxwell-Boltzmann distribution [J]. *Molecular physics*, 2005, 103(21-23): 2821-2828.
- [50] TOWNES C H, SCHAWLOW A L. *Microwave spectroscopy* [M]. New York: Dover Publications, 2013: 336-375.
- [51] PRESTON D W. Doppler-free saturated absorption: Laser spectroscopy[J]. *American journal of physics*, 1996, 64(11): 1432-1436.

作者简介

韦博 (1986—), 男, 副研究员, 硕士, 研究方向为智能感知、高性能计算、大数据存储与挖掘、伪装检测评估、量子精密测量等。E-mail: weibo@hdu.edu.cn

陈铭铭 (1998—), 男, 硕士生, 研究方向为太赫兹量子频标。E-mail: 775787066@qq.com

程序 (1987—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为微波集成电路和模拟基带电路设计。E-mail: chengxu@mtrc.ac.cn