

基于 Fabry-Perot 激光谐振腔的量子真空计量技术研究

贾文杰, 习振华, 范栋, 董猛, 吴成耀, 成永军*

兰州空间技术物理研究所真空计量技术研究中心, 甘肃 兰州 730000

摘要 研发了基于 Fabry-Perot 激光谐振腔的量子真空计量装置, 利用拍频和 PDH(Pound Drever Hall)激光锁频技术, 精确测量了充气前后腔内谐振激光的频率变化。在温度为 299.1485 K, 真空度为 $10^2 \sim 10^5$ Pa 的条件下, 对干燥 Ar 折射率进行了测量; 结合电容薄膜真空计的测量结果, 得到折射率与真空度之间的相关系数为 2.50835×10^{-9} , 并对比分析了反演真空度与测量结果之间的差异, 最后评定了激光频率不确定度及折射率和真空度测量不确定度。结果显示, 激光频率不确定度为 5×10^{-12} , 折射率测量不确定度为 1.64×10^{-8} , 真空度测量不确定度为 2.5×10^{-4} 。所研制的基于 Fabry-Perot 激光谐振腔的量子真空测量装置初步实现了量子化真空测量, 对我国量子真空计量技术的研究提供了参考。

关键词 测量; 真空计量; 量子化; Fabry-Perot 谐振腔; 激光锁频

中图分类号 TB935

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2212005

Quantum Vacuum Measurement Based on Fabry-Perot Laser Resonant Cavity

Jia Wenjie, Xi Zhenhua, Fan Dong, Dong Meng, Wu Chengyao, Cheng Yongjun*

Research Center of Vacuum Measurement Technology, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou, Gansu 730000, China

Abstract We develop a quantum vacuum measurement device based on a Fabry-Perot laser resonant cavity and use the beat frequency and the Pound Drever Hall (PDH) laser frequency-locking technology to accurately measure the change of resonant frequency in the cavity before and after inflation. The refractive index of dry Ar at the temperature of 299.1485 K and the vacuum degree of $10^2 \sim 10^5$ Pa is measured. With the measurement result by the capacitance diaphragm vacuum meter, we get the relation coefficient of 2.50835×10^{-9} between refractive index and vacuum degree. In addition, we compare and analyze the difference between the retrieved and measured vacuum degrees, and finally, we evaluate the laser frequency uncertainty as well as the refractive index and vacuum measurement uncertainty. The results show that the laser frequency uncertainty is 5×10^{-12} , the refractive index measurement uncertainty is 1.64×10^{-8} , and the vacuum measurement uncertainty is 2.5×10^{-4} . The developed quantum vacuum measurement device based on the Fabry-Perot laser resonator has been used to realize the quantum vacuum measurement, which provides some reference for the research of quantum vacuum measurement technologies in China.

Key words measurement; vacuum measurement; quantization; Fabry-Perot resonant cavity; laser frequency-locking

OCIS codes 120.2230; 120.3930

1 引 言

随着国际单位制量子化定义的发展, 量子真空计量技术成为真空计量领域的研究热点。不断深入的航空航天技术研究对真空计量技术的探测精度及

真空度探测下限也提出了更高要求^[1]。基于 Fabry-Perot 激光谐振腔的量子真空计量技术被认为是实现量子化原级真空计量标准的重要技术^[2-6]。该方法以气体密度 ρ 代替气体压强 p , 利用双腔谐振激光拍频来精确测量充气前后腔内激光频率的变

收稿日期: 2020-05-29; 修回日期: 2020-06-28; 录用日期: 2020-08-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(62071209)

* E-mail: ouc2016opjwj@sina.com

化,进而反演得到腔内的真空度^[7-10]。

研究者于 2011 年首先研发了基于 Fabry-Perot 腔的折射率测量装置,实现了测量不确定度为 3×10^{-9} 的干燥 N_2 折射率的测量^[11]。其后研究者又研发了多代基于 Fabry-Perot 激光谐振腔的量子真空测量装置^[12-16]。最新研究成果表明,基于 Fabry-Perot 激光谐振腔的真空测量装置的测量精度与传统测量方法的精度相当^[17]。瑞典研究者研发了基于无漂移 Fabry-Perot 谐振腔的光学折射率测量装置(DF-DFPC-OR),并分析了影响装置测量不确定度的因素^[18];为了实现该装置在非稳温度环境中的应用并抑制过长的数据采集时间所引入的噪声影响,研究者又研发了基于 Fabry-Perot 双腔的快速气体交换光学折射率测量装置(FS-DFPC-OR)^[19-20]和基于气体调制方法的光学折射率测量装置(GAMOR),在低压区实现了亚 10^{-6} 量级的真空度测量^[21-22]。日本研究者利用具有宽调谐范围的二极管激光器,在真空到大气压范围内实现了气体压强的间断测量,并完成了 91~109 kPa 之间的气体压强的连续测量^[23]。国内关于利用 Fabry-Perot 激光谐振腔进行真空度测量的研究鲜有报道。本文紧跟真空计量前沿技术的发展趋势,进行了基于 Fabry-Perot 激光谐振腔的量子真空测量装置的研制及真空度测量方法的研究,并完成了装置测量不确定度的评定,研究结果对量子真空计量标准的建立具有一定的推动意义。

2 基本原理

基于 Fabry-Perot 激光谐振腔的量子真空测量装置是基于激光锁频技术^[24],利用双腔谐振激光的拍频精确测量充气前后腔内谐振激光的频率变化,进而实现真空度的反演。在理论计算中,实际气体压强和密度的维里关系为

$$p = RT [\rho_n + B_\rho \rho_n^2 + C_\rho \rho_n^3 + O(\rho_n^4)], \quad (1)$$

式中: p 为真空度; R 为气体常量; T 为气体温度; ρ_n 为气体密度; B_ρ 和 C_ρ 分别为真空度与密度关系的二阶和三阶维里系数; $O(\rho_n^4)$ 为密度的高阶项。

同时,气体密度与折射率之间存在 Lorentz-Lorenz 等式关系,即

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = A_R \rho_n + B_R \rho_n^2 + C_R \rho_n^3 + O(\rho_n^4), \quad (2)$$

式中: n 为气体折射率; A_R 、 B_R 和 C_R 分别为折射率与密度关系的一阶、二阶和三阶维里系数。

利用(2)式,可得折射率与气体密度的关系为

$$\rho_n = A_n(n-1) + B_n(n-1)^2 + C_n(n-1)^3 + O(n-1)^4, \quad (3)$$

式中: A_n 、 B_n 和 C_n 分别为密度与折射率关系的一阶、二阶和三阶维里系数; $O(n-1)^4$ 为 $(n-1)$ 的高阶项。

由于 $(n-1)$ 的量级很小,因此其高次项均可忽略,通过代入维里系数,(3)式可简化为

$$\rho_n = \frac{2}{3A_R}(n-1), \quad (4)$$

式中: $A_R = \frac{4\pi}{3}N_A(\alpha + \chi)$,其中 α 为气体分子的极化率, χ 为气体分子的抗磁磁化率; N_A 为阿伏伽德罗常数。

(4)式显示,可通过测量气体的折射率来反演气体密度。折射率 n 与腔内激光的频率变化之间的关系式为

$$n - 1 = \frac{\Delta\nu_{cm}}{\nu} - \frac{\Delta p}{3K}, \quad (5)$$

式中: $\Delta\nu_{cm}$ 为充气前后谐振激光频率的变化量; ν 为末态腔内谐振激光的频率; K 为腔体材料的杨氏模量; Δp 为腔内真空度变化量。

(5)式显示,通过精确测量充气前后腔内谐振激光频率的变化量 $\Delta\nu_{cm}$,可以反演得到腔内气体的折射率 n 。结合(1)、(4)和(5)式,并进行一阶近似,可得

$$p = \frac{2RT}{3A_R} \left(\frac{\Delta\nu_{cm}}{\nu} - \frac{\Delta p}{3K} \right), \quad (6)$$

式中: $A_R = \frac{4\pi}{3}N_A(\alpha + \chi)$ 。

在一阶近似过程中,当压强为 $10^2 \sim 10^5$ Pa 时, $(n-1)$ 的高阶项为 10^{-8} 量级,其对真空度测量结果的影响很小,可忽略。通过(6)式可利用激光频率的变化来反演真空度,其中腔长变化对真空度测量结果的影响最大,可利用修正项 $\frac{\Delta P}{3K}$ 进行修正^[25]。

本文所用的装置结构如图 1 所示。

在图 1 所示的装置中,检测光路与参考光路的结构相同,两光路的入射激光经能量比为 1:99 的分束光纤分束,各有能量百分数为 1% 的出射光被光纤耦合器耦合并形成拍频,利用频率计对拍频频率进行监测,进而精确测量充气引起的激光频率变化。其余能量百分数为 99% 的入射光经准直器准直后,由 1/2 波片进行偏振态调制,以特定的偏振态进入格兰棱镜,产生边带用以锁频^[26]。利用一对完全对称的透镜组对光斑形状及能量密度进行调制,并使用 1/2 波片对入射激光偏振态再次进行调制,而后利用电光调制器(EOM)调节激光频率。光隔离器

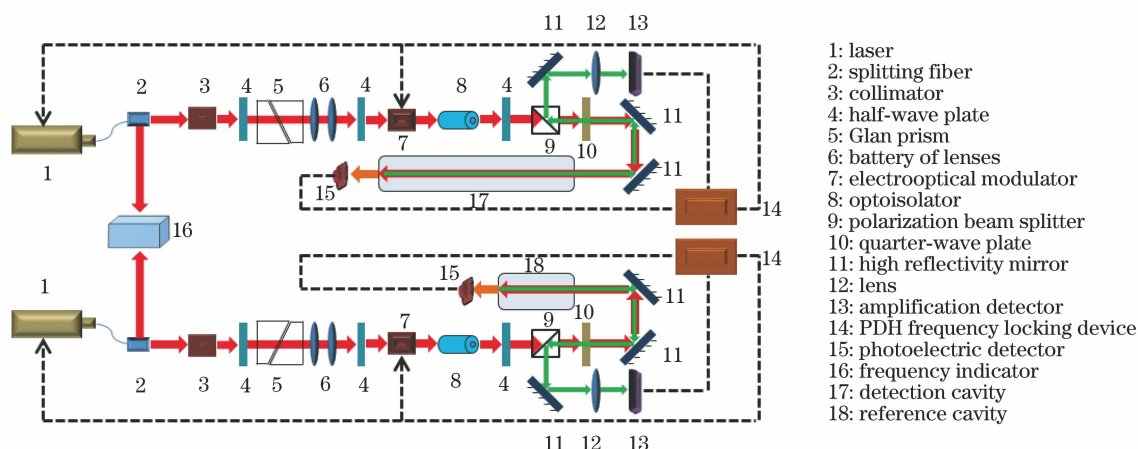


图 1 基于 Fabry-Perot 谐振腔的量子真空测量装置结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of quantum vacuum measurement device based on Fabry-Perot resonant cavity

主要是为了避免各个镜面的反射光对激光器造成损伤,经光隔离器后的入射光再经 1/2 波片进行偏振态调制以通过偏振分束棱镜 PBS;随后入射激光经 1/4 波片调制,由反射镜反射进入参考腔及检测腔内部。腔体的入射窗口为增透镜,反光侧为高反镜,入射光束被腔内高反镜反射后沿原路返回,经高反镜到达 1/4 波片,此时该光束两次经过 1/4 波片,偏振态完全相反。因此,反射光经偏振分束棱镜 PBS 和高反镜反射后,被透镜聚焦至光电放大探测器转化为电流信号,并传输至 PDH(Pound Drever Hall)锁频装置^[27]。透射光被光电探测器所探测,电流信号也由 PDH 锁频装置接收。最后,根据所接收到的反馈信号,利用 PDH 锁频装置对 EOM 及可调谐激光器进行调节,以控制激光频率,实现腔内激光谐振锁频。

3 实验测试

为了准确测试腔内气体的折射率并实现真空度测量,利用 SRS 温度监测模块及 Pt100 铂电阻将腔内温度控制在超低热膨胀(ULE)材料的零膨胀点 299.1485 K,将由温度变化引起的腔长变化降至最低。其后测试了装置的激光频率稳定性,并在 $10^2 \sim 10^5$ Pa 范围内,对体积分数为 99.999% 的干燥 Ar 的折射率进行了测量,确定了真空度与折射率之间的相关系数,最后对 $10^4 \sim 10^5$ Pa 范围内的真空度进行了反演和对比分析,并完成了装置的测量不确定度评定。

3.1 激光频率稳定性测试

首先将腔体抽气至压强为 10^{-5} Pa,然后测定腔内谐振激光频率、腔内谐振激光与光梳模的拍频、纵模长度和光梳初始零点位置。腔内谐振激光频率公

式为

$$\nu_{\text{laser}} = \nu_0 + N \times \nu_{\text{FSR}} + \nu_{\text{beat}}, \quad (7)$$

式中: ν_{laser} 腔内谐振激光频率的精确值; ν_0 为光梳初始零点; ν_{beat} 为腔内谐振激光与光梳模的拍频; ν_{FSR} 为激光纵模长度; N 为谐振激光的纵模模数, N 值由 $|\nu_d/\nu_{\text{FSR}}|$ (比值取整)计算,其中 ν_d 为腔内谐振激光频率的粗测值。

激光频率稳定性评定公式为

$$u_{r,\text{laser}} = \Delta\nu/\nu_{\text{laser}}, \quad (8)$$

式中: $u_{r,\text{laser}}$ 为激光频率稳定性; $\Delta\nu$ 为激光频率随时间的变化量; ν_{laser} 为腔内谐振激光频率的精确测量值。

在激光频率稳定性测试过程中,每隔 1 s 进行一次激光拍频及谐振激光频率测试,部分结果如表 1 所示。

表 1 激光频率测试部分数据

Table 1 Partial test result of laser frequency

Serial number	Time /s	$\Delta\nu$ /MHz	ν /MHz
1	0	0	384350383.4336
2	4000	0.0007	384350383.4329
3	8000	0.0010	384350383.4326
4	12000	0.0017	384350383.4319
5	16000	0.0021	384350383.4315
6	20000	0.0025	384350383.4311
7	24000	0.0030	384350383.4306
8	28000	0.0034	384350383.4301
9	32000	0.0039	384350383.4297
10	36000	0.0044	384350383.4292

激光频率测试结果如图 2(a)、(b)所示。由测试结果可知,除去测量仪器带来的误差,激光频率本身的中心频率随着时间发生漂移,本文将谐振激光

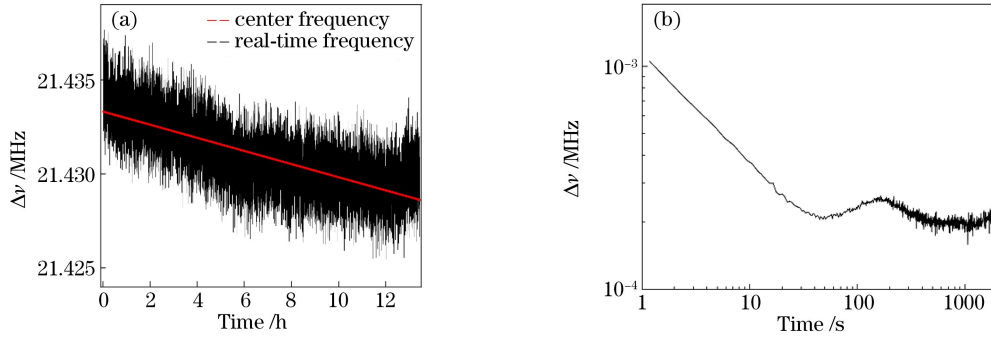


图 2 激光频率不稳定性测试结果。(a)拍频随时间的变化;(b) Allan 方差评定结果图
Fig. 2 Test results of laser frequency uncertainty. (a) Variation of beat frequency with time;
(b) evaluation result of Allan deviation

中心频率随时间漂移的变化量与激光中心频率的比值作为激光频率的不确定度。经长时间测量,激光频率稳定性 $\Delta\nu/\nu_{\text{laser}}$ 为 5×10^{-12} 。与波长计及频率计等测量装置的测量不确定度、腔长变化和温度漂移等引入的折射率测量不确定度相比,激光频率不稳定性对折射率测量不确定度的影响很低,因此,本文所设计的基于 Fabry-Perot 激光谐振腔的真空度测量装置的激光频率测量不稳定性完全满足实际测量要求。由(8)式可知,当由激光频率不稳定性引入的 $\Delta\nu_{\text{cm}}$ 和 ν_0 的相对不确定度 $u_{r,\nu_{\text{cm}}}$ 和 $u_{r,\text{laser}}$ 均为 5.0×10^{-12} 时,折射率测量不确定度为

$$u_{r,nl} = \sqrt{u_{r,\nu_{\text{cm}}}^2 + u_{r,\text{laser}}^2}, \quad (9)$$

式中: $u_{r,nl}$ 为激光频率不稳定性引入的折射率测量不确定度; $u_{r,\nu_{\text{cm}}}$ 为激光频率不稳定性引入的频率变化量的不确定度; $u_{r,\text{laser}}$ 为激光频率不稳定性引入的腔内谐振激光频率的不确定度。各分量相互独立且不相关。

经计算,激光频率不稳定性对折射率测量不确定度的贡献为 7.07×10^{-12} ,影响很小,可以忽略不计。

3.2 折射率测量实验及不确定度评定

折射率的精确测量是反演真空度的基础,利用装置对体积分数为 99.999% 的干燥 Ar 进行折射率测量。首先将装置双腔抽气至压强为 10^{-5} Pa,测定真空状态腔体的谐振激光频率;其后将检测腔充气至各压强点,分别测量拍频频率和检测腔谐振激光频率。腔内气体的折射率 n 为

$$n - 1 = \frac{\Delta\nu_{\text{cm}}}{\nu} - \frac{\Delta p}{3K} = \frac{\nu_i - \nu_f + \Delta m \cdot \nu_{\text{FSR}}}{\nu_f} - \frac{\Delta p}{3K}, \quad (10)$$

式中: ν_i 为腔体真空时的谐振激光频率; ν_f 为充气后检测腔的激光频率; Δm 为检测腔内谐振激光纵模模数变化量; $m = \lfloor \nu_m/\nu_{\text{FSR}} \rfloor$ (商值取整); $K=34.1$ GPa。

根据各压强点下的频率测量结果,结合(10)式,完成折射率反演,其结果如表 2 所示。

表 2 折射率测量结果

Table 2 Measurement results of refractive index

Serial number	Vacuum degree /Pa	$n - 1$	Serial number	Vacuum degree /Pa	$n - 1$
1	111	2.73023×10^{-7}	12	10051	2.51911×10^{-5}
2	620	1.54968×10^{-6}	13	20230	5.07167×10^{-5}
3	1034	2.58229×10^{-6}	14	30089	7.54434×10^{-5}
4	2207	5.52102×10^{-6}	15	40255	1.00935×10^{-4}
5	3169	7.93029×10^{-6}	16	50304	1.26143×10^{-4}
6	3998	1.00120×10^{-5}	17	60498	1.51719×10^{-4}
7	5040	1.26219×10^{-5}	18	70038	1.75653×10^{-4}
8	6067	1.51961×10^{-5}	19	80192	2.01135×10^{-4}
9	7038	1.76357×10^{-5}	20	90104	2.26002×10^{-4}
10	8044	2.01531×10^{-5}	21	100186	2.51302×10^{-4}
11	9046	2.26681×10^{-5}			

根据表 2 所示结果,对折射率测量不确定度进行评定分析。在(10)式中, $\Delta p/3K$ 的量级很小,对

折射率测量不确定度的影响可以忽略不计。因此(10)式可简化为

$$n - 1 = \frac{\Delta\nu_{\text{cm}}}{\nu_f} = \frac{\nu_i - \nu_f + \Delta m \times \nu_{\text{FSR}}}{\nu_f} = \frac{\nu_{\text{beati}} - \nu_{\text{beatf}} + \Delta m \times \nu_{\text{FSR}}}{\nu_r + \nu_{\text{beatf}}}, \quad (11)$$

式中： ν_{beati} 为充气前两束激光拍频； ν_{beatf} 为充气后两束激光拍频。

在(11)式中，分子部分为充气前后激光频率的变化量，其相对不确定度为 $u_{r,1}$ ，分母部分为末态谐振激光频率，其相对不确定度为 $u_{r,2}$ ，由其他因素引入的折射率测量不确定度 $u_{r,n}$ 。在测量过程中，参

考激光频率 ν_r 和自由光谱范围 ν_{FSR} 的测量装置为波长计，其测量不确定度 $u_{c,\text{ref}}$ 和 $u_{c,\text{FSR}}$ 为 10^{-6} ；拍频测量装置为频率计，初始拍频和模态拍频引入的测量不确定度 $u_{c,\text{beati}}$ 和 $u_{c,\text{beatf}}$ 均为 10^{-6} ；当测量压强为 10^2 Pa 时，折射率测量不确定度最大，随着腔内气体压强的增大，折射率测量不确定度逐渐降低，因此选取测量不确定度最大时的点作为不确定度评定点。当 $p = 111$ Pa 时，利用(11)式进行装置测量不确定度评定。不确定度评定公式为

$$u_{r,1} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial \Delta\nu_{\text{cm}}}{\partial \nu_{\text{beati}}} u_{c,\text{beati}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta\nu_{\text{cm}}}{\partial \nu_{\text{beatf}}} u_{c,\text{beatf}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta\nu_{\text{cm}}}{\partial \nu_{\text{FSR}}} u_{c,\text{FSR}}\right)^2}}{\Delta\nu_{\text{cm}}}, \quad (12)$$

$$u_{r,2} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial \nu_f}{\partial \nu_r} u_{c,\text{ref}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \nu_f}{\partial \nu_{\text{beatf}}} u_{c,\text{beatf}}\right)^2}}{\nu_f}. \quad (13)$$

各项参数值分别为： $\nu_{\text{FSR}} = 1497.9916$ MHz， $\Delta m = 0$ ， $\nu_r = 384366590$ MHz， $\nu_{\text{beati}} = 1420.71$ MHz， $\nu_{\text{beatf}} = 1506.09$ MHz。经评定，(11)式分子部分的测量不确定度为 1.64×10^{-8} ，分母部分的测量不确定度为 3.17×10^{-15} ，各分量相互独立且不相关，且

$$u_{r,n} = \sqrt{(u_{r,1})^2 + (u_{r,2})^2}. \quad (14)$$

由(14)式可知，当 $p = 111$ Pa 时，折射率测量不确定度 $u_{r,n}$ 为 1.64×10^{-8} 。

3.3 真空度反演及不确定度评定

结合表 2，对折射率与检测腔内气体压强之间的关系进行分析，结果如图 3 所示。

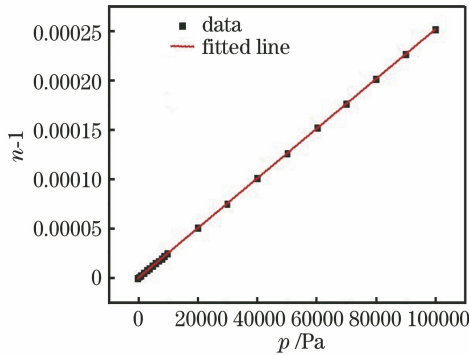


图 3 p 与 $n-1$ 的关系

Fig. 3 Relationship between p and $n-1$

结合(6)式，将折射率与气体压强之间的相关系数设置为 α ，则有

$$\alpha p = n - 1. \quad (15)$$

将(5)式代入(15)式，可得系数 α 的关系式为

$$\alpha = \frac{\nu_i - \nu_f + \Delta m \times \nu_{\text{FSR}}}{\nu_f p}. \quad (16)$$

根据图 3 所示 p 和 $(n-1)$ 的拟合结果，可知 α 的值为 2.50835×10^{-9} 。因此，折射率与气体压强之间的经验关系式为

$$n - 1 = 2.50835 \times 10^{-9} \times p. \quad (17)$$

系数 α 的不确定度主要来源于真空度的测量不确定度 $u_{c,\text{test}}$ 和折射率测量不确定度 $u_{r,n}$ 。电容薄膜真空计 (INFICON) 的真空度测量不确定度为 2.5×10^{-4} ，折射率测量不确定度为 1.64×10^{-8} 。系数 α 的不确定度 $u_{r,\alpha}$ 为

$$u_{r,\alpha} = \sqrt{(u_{r,n})^2 + (u_{c,\text{test}})^2}, \quad (18)$$

各分量相互独立且不相关。由(18)式可得，系数 α 的不确定度 $u_{r,\alpha}$ 为 2.5×10^{-4} 。建立真空度与折射率关系后，利用本文所搭建的基于 Fabry-Perot 激光谐振腔的真空测量装置对体积分数为 99.9999% 的干燥 Ar 在 $10^4 \sim 10^5$ Pa 范围内的真空度进行间断测量，每隔 10^4 Pa 测量一次，并将测量结果与电容薄膜真空计测量结果进行对比。真空度反演公式为

$$p = \frac{\Delta\nu_{\text{cm}}}{\alpha \cdot \nu_f} = \frac{\nu_{\text{beati}} - \nu_{\text{beatf}} + \Delta m \times \nu_{\text{FSR}}}{\alpha \cdot (\nu_r + \nu_{\text{beatf}})}. \quad (19)$$

参考腔频率为 384366870 MHz，初始拍频为 205.986 MHz，真空度测量结果和反演结果如表 3 所示。

表 3 真空度测量结果和反演结果

Table 3 Measured and retrieved results of vacuum degree

Measured value /Pa	Beat frequency /MHz	Deviation of modulus	Retrieved value /Pa	Relative deviation
10056	-595.35	7	10052	3.90×10^{-4}
20235	227.86	13	20233	2.40×10^{-5}
30094	744.00	19	30084	9.60×10^{-5}
40260	1554.07	25	40248	1.21×10^{-4}
50309	757.33	32	50298	1.06×10^{-4}
60503	1599.67	38	60496	7.50×10^{-5}
70043	1811.00	44	70038	5.10×10^{-5}
80197	1119.60	51	80198	-7.00×10^{-6}
90109	1689.90	57	90113	-3.50×10^{-5}
100191	928.30	64	100199	-8.40×10^{-5}

由(19)式可知,利用本文所搭建的量子真空测量装置进行真空度测量时,测量不确定度主要来源有:拍频测量不确定度 $u_{c,beati}$ 和 $u_{c,beatf}$,其值为 10^{-6} ;参考激光频率 ν_r 和自由光谱范围 ν_{FSR} 的测量不确定度 $u_{c,r}$ 和 $u_{c,FSR}$,其值为 10^{-6} ;系数 α 的不确

定度 $u_{r,\alpha}$,其值为 2.5×10^{-4} ;末态谐振激光频率 ν_f 的测量不确定度 $u_{r,f}$ 。(19)式中分子部分为充气前后谐振激光频率的变化量,其测量不确定度为 $u_{r,3}$,分母部分为系数 α 与末态谐振激光频率的乘积,其测量不确定度为 $u_{r,4}$,则有

$$u_{r,3} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial \Delta \nu_{cm}}{\partial \nu_{beati}} u_{c,beati}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta \nu_{cm}}{\partial \nu_{beatf}} u_{c,beatf}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta \nu_{cm}}{\partial \nu_{FSR}} u_{c,FSR}\right)^2}}{\Delta \nu_{cm}}, \quad (20)$$

$$u_{r,4} = \sqrt{u_{r,f}^2 + u_{r,\alpha}^2} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\partial \nu_f}{\partial \nu_r} u_{c,ref}\right)^2 + \left(\frac{\partial \nu_f}{\partial \nu_{beatf}} u_{c,beatf}\right)^2}{\nu_f^2} + u_{r,\alpha}^2}. \quad (21)$$

在 $10^4 \sim 10^5$ Pa 范围内,选取 10^4 Pa 作为不确定度评定参考点,其各参数值均已知,经计算, $u_{r,3}$ 为 1.53×10^{-10} , $u_{r,4}$ 为 2.5×10^{-4} 。则真空度测量不确定度 $u_{r,p}$ 为

$$u_{r,p} = \sqrt{(u_{r,3})^2 + (u_{r,4})^2}, \quad (22)$$

各分量相互独立且不相关。经计算,真空度测量不确定度为 2.5×10^{-4} 。最后,对基于 Fabry-Perot 激光谐振腔的真空测量装置和电容薄膜真空计的测量结果进行对比分析,结果如图 4 所示。

图 4 所示拟合线的斜率为 1.00014,即

$$p_{fy} = 1.00014 p_{cl}, \quad (23)$$

式中: p_{fy} 为反演所得的真空度; p_{cl} 为利用电容薄膜真空计测得的真空度。

分析可知,基于 Fabry-Perot 激光谐振腔的量子真空测量装置的测量不确定度与电容薄膜真空计的测量精度相当,且前者被后者限制,这是因为在经验系数测算过程中使用了电容薄膜真空计的测量不确定度。

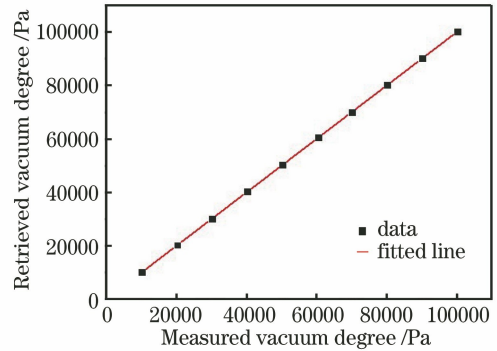


图 4 测量真空度与反演真空度的关系

Fig. 4 Relationship between measured and retrieved vacuum degrees

4 结 论

研发了基于 Fabry-Perot 激光谐振腔的真空测量装置,利用 PDH 锁频原理,实现了 Fabry-Perot 腔内激光谐振,并利用拍频原理精确测量了充气前后检测腔内的激光频率变化,进而反演得到腔内真

空度,实现了初步量子化真空测量。测试了装置的激光频率稳定性,其测量不确定度为 5×10^{-12} ;使用装置对 $10^2 \sim 10^5$ Pa 范围内的 99.9999% 干燥 Ar 折射率进行测量,其测量不确定度为 1.64×10^{-8} ;对 $10^4 \sim 10^5$ Pa 范围内的 Ar 真空度进行测量,真空度测量不确定度为 2.5×10^{-4} ,并与电容薄膜真空计测量结果进行对比。基于 Fabry-Perot 激光谐振腔的量子真空测量装置本身的测量精度应远高于目前的测量结果,后期通过与活塞压力计等具有更高精度的装置进行对比,可进一步确定相关系数 α 的精度,实现部分真空计量标准的替代;同时也可通过解决渗 He 问题,完善分子极化率的理论模型计算,实现真正意义上的量子化真空计量。所研制的基于 Fabry-Perot 激光谐振腔的量子真空测量装置初步实现了量子真空计量,对我国量子真空计量研究具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Gibney E. New definitions of scientific units are on the horizon[J]. *Nature*, 2017, 550(7676): 312-313.
- [2] Dai H, Wang Y J, Li D T. Vacuum partial pressure measurement method by means of broad-bandwidth laser absorption spectrum [J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2020, 26(1): 37-41.
代虎,王永军,李得天.基于宽波段激光吸收谱的真空分压力测量方法[J].*真空与低温*, 2020, 26(1): 37-41.
- [3] Wu B Y, Yu J L, Wang J, et al. Accuracy correction of miniaturization device for air refractive index measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 040102.
吴炳阳,于晋龙,王菊,等.小型化空气折射率测量装置的精度修正[J].*激光与光电子学进展*, 2018, 55(4): 040102.
- [4] Xi Z H, Li D T, Cheng Y J, et al. Recent advances of vacuum metrology techniques and applications with optical methods[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2016, 22(6): 311-318.
习振华,李得天,成永军,等.光学方法在真空计量中应用研究进展[J].*真空与低温*, 2016, 22(6): 311-318.
- [5] Li D T, Cheng Y J, Xi Z H. Development of quantum vacuum standard[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2018, 38(5): 1-15.
李得天,成永军,习振华.量子真空标准研究进展[J].*宇航计测技术*, 2018, 38(5): 1-15.
- [6] Ren X Y, Dai H, Li D T, et al. Mid-infrared electro-optic dual-comb spectroscopy with feedforward frequency stepping[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(3): 776-779.
- [7] Pachucki K, Puchalski M. Refractive index and generalized polarizability [J]. *Physical Review A*, 2019, 99(4): 041803.
- [8] Hendricks J H. Quantum for pressure [J]. *Nature Physics*, 2018, 14(1): 100.
- [9] Scherschligt J, Fedchak J A, Ahmed Z, et al. Review article: quantum-based vacuum metrology at the National Institute of Standards and Technology [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2018, 36(4): 040801.
- [10] Miu J. The research of vibration sensitivity of optical cavity in stable and narrow-linewidth lasers system [D]. Shanghai: East China Normal University, 2018.
缪瑾.窄线宽稳频激光系统中的光学谐振腔振动敏感性问题研究[D].上海:华东师范大学, 2018.
- [11] Egan P F, Stone J A. Absolute refractometry of dry gas to ± 3 parts in 10^9 [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(19): 3076-3086.
- [12] Bae H, Yun D, Liu H J, et al. Hybrid miniature Fabry-Perot sensor with dual optical cavities for simultaneous pressure and temperature measurements [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(8): 1585-1593.
- [13] Egan P F, Stone J A, Hendricks J H, et al. Performance of a dual Fabry-Perot cavity refractometer [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(17): 3945-3947.
- [14] Hendricks J H, Ricker J E, Jack A. Stone J A, Jr, et al. Measuring pressure and vacuum with light: a new photonic, quantum-based, pressure standard [C]//XXI IMEKO World Congress "Measurement in Research and Industry", August 30-September 3, 2015, Prague, Czech Republic. Gaithersburg: NIST, 2015.
- [15] Egan P F, Stone J A, Jr, Ricker J E, et al. Stuck in a moment: a view from the MIRE [C]//ASPE 2017 Topical Meeting, April 23-26, 2017, Tucson, AZ, USA. Gaithersburg: NIST, 2017.
- [16] Egan P F, Stone J A, Ricker J E, et al. Cell-based refractometer for pascal realization [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(15): 2944-2946.
- [17] Egan P F, Stone J A, Scherschligt J, et al. Measured relationship between thermodynamic pressure and refractivity for six candidate gases in laser barometry [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2019, 37(3): 031603.
- [18] Axner O, Silander I, Hausmaninger T, et al. Drift-free Fabry-Perot-cavity-based optical refractometry-accurate expressions for assessments of gas

- refractivity and density [EB/OL]. (2018-01-10) [2020-01-15]. <https://arxiv.org/abs/1704.01187>.
- [19] Silander I, Hausmaninger T, Bradley M, et al. Fast switching dual Fabry-Perot cavity optical refractometry - methodologies for accurate assessment of gas density [EB/OL]. (2018-01-10) [2020-01-15]. <https://arxiv.org/abs/1704.01186>.
- [20] Zelan M, Silander I, Hausmaninger T, et al. Fast switching dual Fabry-Perot-cavity-based optical refractometry for assessment of gas refractivity and density—estimates of its precision, accuracy, and temperature dependence [EB/OL]. (2018-01-10) [2020-01-15]. <https://arxiv.org/abs/1704.01185>.
- [21] Silander I, Hausmaninger T, Forssén C, et al. Gas equilibration gas modulation refractometry for assessment of pressure with sub-ppm precision [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2019, 37(4): 042901.
- [22] Silander I, Hausmaninger T, Zelan M, et al. Gas modulation refractometry for high-precision assessment of pressure under non-temperature-stabilized conditions [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2018, 36(3): 03E105.
- [23] Takei Y, Arai K, Yoshida H, et al. Development of an optical pressure measurement system using an external cavity diode laser with a wide tunable frequency range [J]. *Measurement*, 2020, 151: 107090.
- [24] Yan Q, Yuan M, He T T, et al. Pulse laser frequency locking method based on molecular absorption [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1028005.
闫庆, 袁萌, 何甜甜, 等. 基于分子吸收的脉冲激光锁频方法研究 [J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1028005.
- [25] Jousten K, Hendricks J, Barker D, et al. Perspectives for a new realization of the pascal by optical methods [J]. *Metrologia*, 2017, 54(6): S146-S161.
- [26] Zhao Y, Liu Y Z, Zhao D S, et al. Study on side bands in passively mode-locked fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(4): 991-995.
赵羽, 刘永智, 赵德双, 等. 被动锁模光纤激光器光谱边带 [J]. *光学学报*, 2009, 29(4): 991-995.
- [27] Zou X X, Shen H, Quan Z, et al. Polarization control and laser combination with high polarization extinction ratios based on optical heterodyne detection and phase locking [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 1014002.
邹星星, 沈辉, 全昭, 等. 基于光外差锁相的激光偏振控制与高偏振消光比的光束合成 [J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 1014002.