

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.04.09

汞离子微波频标光学设计

王暖让¹, 张建伟², 薛潇博¹, 张升康^{1*}

(1. 北京无线电计量测试研究所 计量与校准技术重点实验室, 北京 100854;

2. 清华大学, 北京 100084)

摘要: 汞离子微波频标利用汞灯进行抽运, 可实现小型化, 同时具备体积小、指标高的优势, 未来可在卫星导航、深空探测和守时中得到广泛应用。为了提高抽运效率及降低噪底, 需要进行汞灯光学设计, 使抽运光通过四极阱中心与囚禁离子充分作用的同时减少与真空腔及四极杆的反射。首先提出遮挡光源法和非等比例放大法两种光学设计方法。然后介绍了两种设计方法的具体设计过程和设计结果, 并比较了两种光学设计方法汞灯的能量利用率。最后利用非等比例放大法进行光路优化设计, 并完成了物理系统信号探测实验。实验结果表明: 采用该光学设计方案, 汞离子光微波双共振跃迁信号幅度提高了20%以上。

关键词: 汞离子微波频标; 汞灯; 光学设计; 光抽运

中图分类号: TB939; O562.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795(2023)04-0113-06

Optical design of mercury ion microwave frequency standard

WANG Nuanrang¹, ZHANG Jianwei², XUE Xiaobo¹, ZHANG Shengkang^{1*}

(1. Key Laboratory of Metrology and Calibration Technology, Beijing Institute of Radio Metrology & Measurement, Beijing 100854, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The mercury ion trapped microwave frequency standard is pumped by the mercury lamp, and can achieve miniaturization. It has potential wide applications for the future satellite navigation, deep space explorations and time keeping for its advantages of small volume and high performance indicators. In order to improve pumping efficiency and reduce noise background, it is necessary to carry out optical design of mercury lamps, so that the pumping light can fully interact with trapped ions through the center of the quadrupole trap well while reducing reflection from the vacuum cavity and quadrupole rods. Firstly, two optical design methods, occlusion light source method and non proportional amplification method, are proposed. Then, the specific design process and results of the two design methods were introduced, and the energy utilization efficiency of the two optical design methods for mercury lamps was compared. Finally, the non proportional amplification method was used for optical path optimization design, and physical system signal detection experiments were completed. The experimental results show that using this optical design scheme, the amplitude of mercury ion light microwave dual resonance transition signal has been increased by more than 20%.

Key words: mercury ion trapped microwave frequency standard; mercury lamp; optical design; optical pumping

收稿日期: 2023-04-12; 修回日期: 2023-05-29

基金项目: 国家“十四五”技术基础科研项目(JSJL2022204B001)

引用格式: 王暖让, 张建伟, 薛潇博, 等. 汞离子微波频标光学设计[J]. 计测技术, 2023, 43(4): 113-118.

Citation: WANG N R, ZHANG J W, XUE X B, et al. Optical design of mercury ion microwave frequency standard[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(4): 113-118.



0 引言

通过近年来科技工作者的努力,氢钟、铷钟和铯钟等传统原子频标已广泛应用于科学实验、国家/国防守时授时等领域^[1-5]。随着星载空间环境下对原子频标的新需求不断涌现,在氢、铷、铯等传统频率标准之外,发达国家正在开展离子微波频标等新型原子频标的研制和应用工作,可以预见未来5~20年离子微波频标的地位尤为重要^[6-8]。离子微波频标种类较多,目前相关研究主要集中在汞、镉和铟离子微波频标,三种频标机理相同,实现方式不同。镉离子微波频标通过激光进行离子产生、冷却和抽运;铟离子微波频标通过激光进行离子产生和抽运,通过激光或者缓冲气体进行冷却;汞离子微波频标通过电子枪产生离子,利用汞灯进行抽运,通过缓冲气体冷却离子。因此,汞离子微波频标相对更易于小型化和工程化^[9-12]。美国已于2019年完成装载汞离子微波频标实验星发射,在轨测试结果符合预期^[13-14]。汞离子微波频标优势明显,但研制难度很大,多项关键技术亟需突破。其中汞灯的研制^[15-16]及其光学设计直接影响了汞离子微波频标的信噪比。国内外研制汞离子微波钟单位较少,相关报道甚少涉及光路设计,因此本文针对自研物理系统,提出遮挡光源法和非等比例放大法两种光路设计方法,用以提高汞灯的抽运效率及降低光噪声,可有效提升物理系统信噪比。经过仿真设计及计算比较,非等比例放大法设计的光路,汞灯能量利用率稍高,根据此方案进行实验研究,预期物理系统跃迁信号幅度可得到明显提升,为汞离子微波钟整钟指标的提

1 汞离子钟系统概况

汞离子微波频标主要包括离子阱、汞灯及其光路控制系统、缓冲气体冷却系统及高稳微波源等,系统组成如图1所示。

图1中,离子阱提供离子产生和冷却的空间,通过真空制备与维持系统使离子阱真空系统真空度优于 5×10^{-9} Pa,通过缓冲气体冷却提高离子的囚禁数量,实现大数目离子云的稳定囚禁;通过汞灯及其光路控制系统完成态的制备及荧光的探

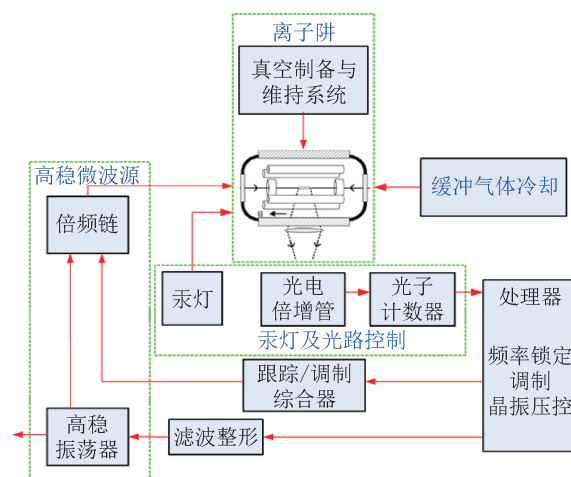


图1 汞离子微波频标系统组成示意图

Fig.1 Sketch map of composition of ion trapped mercury microwave frequency standard system

测;通过高稳微波源输出40.5 GHz微波,实现粒子数反转;通过扫描微波探测荧光的变化,将晶振锁定在汞离子跃迁谱线上,实现10 MHz高稳定微波信号的输出。

汞离子微波频标利用 $^{199}\text{Hg}^+$ 作为工作物质, $^{202}\text{Hg}^+$ 同位素发射谱线来进行离子态的制备,其简化能级图如图2所示。

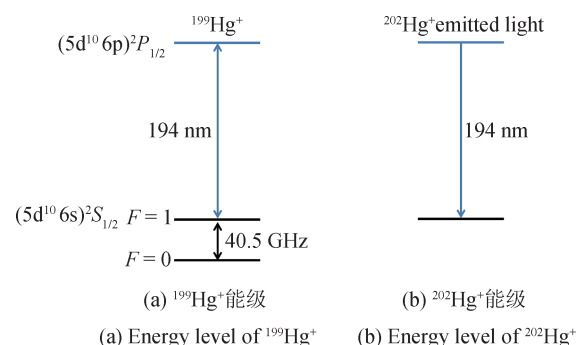


图2 汞离子能级简化示意图

Fig.2 Simplified diagram of mercury ion energy levels

$^{202}\text{Hg}^+$ 的 D_1 谱线波长约为194 nm,并且没有超精细结构,该谱线非常接近 $^{199}\text{Hg}^+$ 离子 $^2S_{1/2}$ 态的超精细能级 $F=1$ 和激发态 $^2P_{1/2}$ 之间的跃迁频率^[8]。因此,可以利用 $^{202}\text{Hg}^+$ 抽运谱灯的194 nm谱线进行 $^{199}\text{Hg}^+$ 离子光抽运。抽运过程中,处于基态 $F=1$ 能级的 $^{199}\text{Hg}^+$ 离子被抽运到激发态并自发辐射回到基态,平均分布到 $^2S_{1/2}$ 的 $F=0$ 态和 $F=1$ 态,由于汞灯的持续抽运,最终离子几乎全部落到 $^2S_{1/2}$ 的 $F=0$ 态,完成态的制备。离子荧光信号强度正比

于上能级离子数,因此,可以通过测试由激发态自发辐射回到基态的荧光来探测离子的跃迁几率。当 $F=1$ 被抽空后,荧光变弱。外加40.5 GHz微波场,离子发生共振吸收,从 $F=0$ 态跃迁到 $F=1$ 态,使 $F=1$ 态离子数增加,重新被抽运到激发态,荧光变强。

2 光学设计

抽运谱灯的发光泡直径约10 mm,根据离子阱体的尺寸及离子囚禁的区域,需要将该发散光整形为 $32\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的长方形,使抽运光与囚禁离子充分作用的同时减少与离子阱四极杆的作用,直接对光源进行等比例放大缩小显然无法满足需求。为了解决此问题,主要有两种方案:第一种是遮挡部分光源,使非遮挡部分光源的长宽比例与目标区域相近,再用标准球面透镜对其进行放大;第二种是在两个正交方向上采用不同比例放大,从而将原本的圆形光源投影到一个 $32\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的长方形区域。下面将对这两种方案进行详细介绍与对比。

2.1 遮挡光源法

遮挡光源法的主要原理如图3所示,即遮挡部分光源以改变其形状,随后用球面镜对其进行放大以得到目标投影区域。实验所用透镜组由两个平凸透镜组成,可以避免产生较大像差导致投影成像效果不理想。实验所使用的透镜组结构也较为简单,具体仿真光路如图4所示。

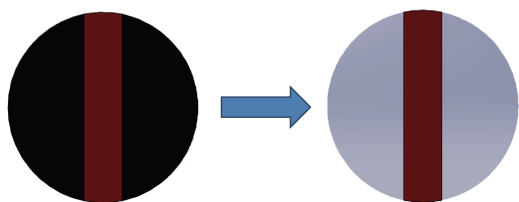


图3 遮挡光源法示意图

Fig.3 Sketch map of the method of blocking out the lamp

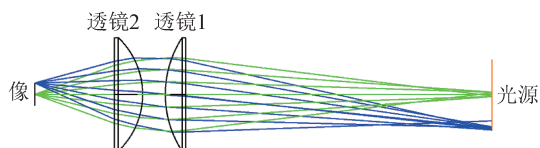


图4 遮挡光源法仿真光路图

Fig.4 Simulation diagram of optical path for method of blocking out the lamp

为了避免光源能量损失较大,所选用的透镜1的焦距为75 mm,焦距较小、汇聚能力强,可以使更多的能量进入光路中。随后调整透镜2的焦距及物距,使光源距圆心5 mm处点可投影到距目标区域圆心16 mm处,以满足设计要求。透镜2不同焦距的设计结果见表1。

表1 透镜2不同焦距的设计结果

Tab.1 Design results of different lens 2 focal lengths

焦距 / mm	物距 / mm	光斑均方根半径 / μm
75	27	3 063
100	35	1 334
150	43	763
200	49	1 027

由表1可知,随着透镜2的焦距增大,物距也增大,增大了能量损耗,再结合成像效果,选择透镜2焦距为100 mm或者150 mm时,透镜组综合性能较好。

2.2 非等比例放大法

非等比例放大法可采用柱面镜实现,柱面镜对通过轴向子午线的光线无汇聚作用,而对通过屈光力子午线的光有汇聚作用,因此,用两个正交放置的柱面镜可实现X、Y方向不同比例放大,可以满足设计要求,非等比例放大法示意图如图5所示。

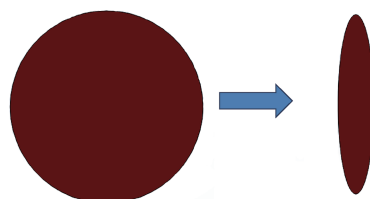


图5 非等比例放大法示意图

Fig.5 Sketch map of non-geometric proportion magnification method

分别对两个光路进行设计,将5 mm处点投影至2 mm处的光路,将5 mm处点投影至16 mm光路,设计参数见表2和表3。由于最终要将初步设计的两个光路合为一个光路,如图6所示,因此两光路的光路总长度应匹配。

根据仿真实验可得两光路的物距与光路总长度及放大倍数规律:对于5 mm→2 mm光路,减小物距,光路总长度减小,放大倍数增大;对于5 mm→16 mm光路,减小物距,光路总长度增大,

表2 5 mm→2 mm 光路设计参数
Tab.2 Optical path design parameters
of 5 mm→2 mm 单位: mm

焦距	物距	像距	光路总长度
50	140	50	190
75	200	84	284
100	280	112	392
150	430	170	600

表3 5 mm→16 mm 光路设计参数
Tab.3 Optical path design parameters
of 5 mm→16 mm 单位: mm

焦距	物距	像距	光路总长度
50	47	163	210
75	77	245	322
100	104	340	444
150	158	515	673

表4 三组光路参数

Tab.4 Three sets of optical path parameters						单位: mm
透镜1焦距	透镜2焦距	物距	透镜间距	像距	光路总长度	光源尺寸
50	75	光路总长度相差过大, 无法匹配				
75	100	77	95	150	322	10 × 4.6
100	150	光路总长度相差过大, 无法匹配				

2.3 两种方案对比

光源光路中一个重要的因素是不宜损耗较多能量, 因此, 在确定最终方案前还需要比对两种方案的能量利用率。

所设计的成像系统, 能量利用率的估算公式为

$$\eta \approx \sin \alpha \times \frac{S_1}{S_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: α 为孔径角, S_1 为遮挡后光源面积, S_2 为光源面积。

方案一的孔径角可根据设计时的入瞳直径及入瞳位置计算, 计算公式为

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{d_1}{2 \times l_1}\right) \quad (2)$$

式中: α_1 为方案一的孔径角, d_1 为入瞳直径, l_1 为入瞳位置。

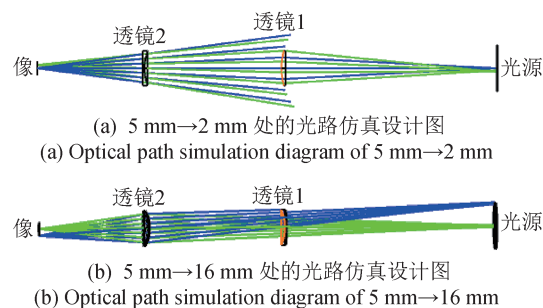


图6 非等比例放大法光路仿真图

Fig.6 Simulation diagram of optical path for non-geometric proportion magnification method

放大倍数增大。由于实际放大倍数大于要求放大倍数时, 可通过遮挡光源使目标区域符合设计要求, 而实际放大倍数小于要求放大倍数时无法调整。当调整两光路使其总长度匹配时只可以增大放大倍数, 即减小物距。因此, 可以匹配的光路有三组, 匹配后的参数见表4。根据实际仿真设计, 透镜1焦距75 mm与透镜2焦距100 mm成功匹配。另外两组由于光路总长度相差过大无法匹配。

方案二的孔径角由两柱透镜共同确定, 难以确定其具体数值, 但可根据两透镜孔径角估算出孔径角范围, 计算公式为

$$\alpha_2 = \arctan\left(\frac{r_2}{l_2}\right) \quad (3)$$

式中: α_2 为方案二的孔径角, r_2 为透镜半径, l_2 为透镜位置。

遮挡后的光源面积, 可根据图7, 由平面几何知识可得, 公式为

$$S_1 = \pi r^2 - 4 \left(\frac{\theta}{2\pi} \times \pi r^2 - r^2 \frac{\sin \theta \cos \theta}{2} \right) \quad (4)$$

式中: $\theta = \arccos\left(\frac{a}{r}\right)$ 。

根据公式(1)~(4)可计算出各种方案的能量利用率, 方案一的能量利用率最高约4.5%, 而方案二的能量利用率约5%~9%, 估计实际情况约6%~7%, 略高于方案一。

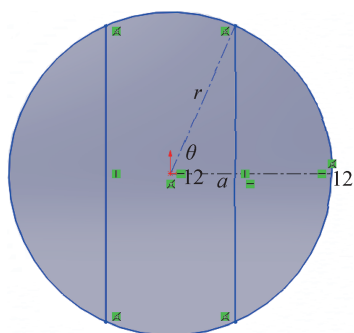


图7 光源面积计算示意图
Fig.7 Sketch map of lamp area calculation

2.4 具体设计方案

据上述分析,选择方案二,用Edmund Optics提供的透镜焦距分别为75 mm和100 mm的F68-173及F68-174透镜,物距为75 mm,透镜间距为90 mm,像距为150 mm。具体光路及结构设计如图8所示。抽运光源发出的发散光经过整形透镜组后,在离子阱中心处被整形为 $32\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的长方形光照区域,与囚禁离子充分作用的同时,不接触四极杆,降低光的散射引起的噪底,通过荧光收集光路得到荧光信号。

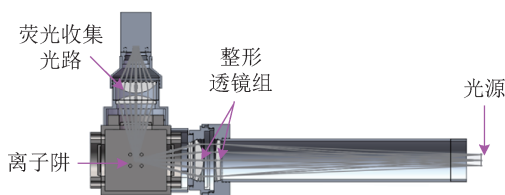


图8 光路图及结构设计图
Fig.8 Diagram of optical path and structure design

3 实验研究

按照总体框图完成系统组装,各参数设置分别为:汞灯电压12 V,电流1.5 A;囚禁射频场频率1.1 MHz,电压峰峰值为2 000 V;汞炉电压为0.6 V,电流为9.5 A;电子枪灯丝电流1.9 A,阳极板电压为200 V。利用光-微波双共振方法进行测试,首先通过汞灯完成抽运,此时离子均集中于 $^3S_{1/2}$ 的 $F=0$ 态,打开40.5 GHz微波,离子发生共振吸收,从 $F=0$ 态跃迁至 $F=1$ 态,使 $F=1$ 态离子数增加,重新被抽运到激发态,荧光变强。测试结果如图9所示,利用本文设计的光学系统,测试结果如图中黑色曲线所示,利用未改进光学

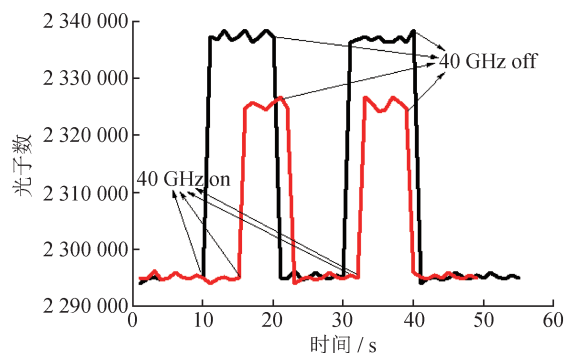


图9 跃迁信号测试曲线
Fig.9 Test curve of transition signal

系统的测试结果如图中红线所示,可见信号幅度提高了20%以上。

4 结束语

文章分析了两种抽运汞灯光学设计方法,并利用商业软件进行了光路的仿真设计,完成了抽运谱灯整形光路的优化设计。通过汞离子光-微波双共振实验可以发现,采用设计的光路汞离子跃迁信号的幅度提高了20%,有效提升了物理系统的信噪比,为高指标汞离子微波钟的研制奠定了基础。

为了进一步降低光噪声,后续需要对抽运汞灯光路继续进行优化,如利用双反射噪声抑制技术或者通过镀膜提高194 nm波段的透过率等技术手段,降低杂散光对物理系统信噪比的影响,以尽快推进汞离子微波钟的研究进度。

参考文献

- [1] 王义遒. 频率标准在中国的发展[J]. 宇航计测技术, 2007(S1): 1-5, 19.
WANG Y Q. On the development of frequency standards in China[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2007(S1): 1-5, 19. (in Chinese)
- [2] 李变, 屈俐俐, 陈永奇. 氢钟在守时钟组配置中的应用研究[J]. 宇航计测技术, 2018, 38(5): 43-47.
LI B, QU L L, CHEN Y Q. Study on the application of hydrogen maser in clock allocation[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2018, 38(5): 43-47. (in Chinese)
- [3] PRESTAGE J, TJOELKER R, MALEKI L. Recent developments in microwave ion clocks, in: Luiten A[C]. Proceedings of Frequency Measurement and Control. Springer Berlin Heidelberg, 2001: 195-211.

- [4] PRESTAGE J, TU M, CHUNG S, et al. Compact microwave mercury ion clock for space applications [C]. 2008 IEEE International Frequency Control Symposium, 2008: 651–654.
- [5] ZHOU T Z, WU Q, HUANG J, et al. Progress on sapphire hydrogen maser for Beidou navigation system [J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2013, 245: 357–369.
- [6] DIDDAMS S A, BERGQUIST J C, JEERTS S R, et al. Standards of time and frequency at the outset of the 21st century [J]. Science, 2004, 306: 1318–1324.
- [7] BURT E A, TAGHAVI-LARIGANI S, TJOELKER R L. A new trapped ion atomic clock based on $^{201}\text{Hg}^+$ [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2010, 57: 629–635.
- [8] YI L, BURT E A, TJOELKER R L. Mercury lamp studies in support of trapped ion frequency standards [C]. 2015 IEEE European Frequency and Time forum, 2015: 188–192.
- [9] PRESTAGE J, CHUNG S, THOMPSON R, et al. Progress on small mercury ion clock for space applications [C]. 2009 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 22 nd European Frequency and Time forum, 2009: 54–57.
- [10] HOANG T M, CHUNG S K, LE T, et al. Performance of micro mercury trapped ion clock [C]//2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (EFTF/IFC). IEEE, 2019.
- [11] BANDI T, PRESTAGE J, CHUNG S, et al. Demonstration of long vacuum integrity lifetime of a trapped ion clock package [J]. Interplanet. Netw. Prog. Rep, 2016, 204: 1–9.
- [12] TJOELKER R L, PRESTAGE J D, BURT E A, et al. Mercury ion clock for a NASA technology demonstration mission [J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2016, 63(7): 1034–1043.
- [13] ELY T A, BURT E A, PRESTAGE J D, et al. Using the deep space atomic clock for navigation and science [C]. IEEE Trans. On Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control 55, 2018: 950–961.
- [14] ELY T A, SEUBERT J, PRESTAGE J. Deep space atomic clock mission overview [C]. AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, AAS19–796, 2019: 1–20.
- [15] WANG N, CHEN X, ZHAO H. Design of mercury lamp for trapped ion frequency standards [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2020, 40(3): 27–30.
- [16] WANG N, CHEN X, ZHAO H. Design of mercury lamp for trapped ion frequency standards [C]. European Frequency and Time Forum (EFTF), 2018: 50–52.

(本文编辑: 朱俊真)



第一作者: 王暖让(1980—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事汞离子微波钟技术的研究工作。发表学术论文30余篇, 授权发明专利10余项, 获国防科技进步一等奖1项, 中国专利金奖1项。



通讯作者: 张升康(1980—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事时频基准、时频传递与同步、时频计量及时间统一与应用方面的研究工作。航天科工集团高级专家, 国际时间频率咨询委员会卫星双向时间频率传递工作组成员, 中国宇航学会计量与测试专业委员会委员, 全国数字计量技术委员会委员, 发表学术论文80余篇, 授权发明专利40余项, 获国防科技进步一等奖2项, 三等奖2项。