

# 780 nm 声光调制器的温度特性

吕 挺<sup>1,2</sup>, 段玉雄<sup>1,2</sup>, 项静峰<sup>1,2</sup>, 任 伟<sup>1</sup>, 吕德胜<sup>1</sup>, 汪 斌<sup>1</sup>, 李 琳<sup>1</sup>, 李 唐<sup>1</sup>, 屈求智<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 对 780 nm 声光调制器(AOM)的温度响应进行了详细的理论计算,发现 AOM 衍射光偏振角的温度响应系数远大于衍射效率和衍射角的温度响应系数。针对 AOM 衍射光偏振角的温度响应,在地面实验室环境下对其进行实验验证。在空间微重力环境下,AOM 的温度响应可能会成为制约空间项目光学平台工作温度范围和性能指标提高的主要因素之一。基于 AOM 在实际空间应用中的脉冲工作模式,通过仿真建模给出了 AOM 声光晶体温度随环境温度的变化曲线,并给出了优化措施。

**关键词** 测量; 声光调制器; 温度响应; 空间应用; 激光冷却

**中图分类号** O439 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0812001

## Temperature Characteristics of 780 nm Acousto-Optic Modulator

Lü Ting<sup>1,2</sup>, Duan Yuxiong<sup>1,2</sup>, Xiang Jingfeng<sup>1,2</sup>, Ren Wei<sup>1</sup>, Lü Desheng<sup>1</sup>, Wang Bin<sup>1</sup>,  
Li Lin<sup>1</sup>, Li Tang<sup>1</sup>, Qu Qiuzhi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Temperature response of 780 nm acousto-optic modulator (AOM) is calculated theoretically in detail. The research shows that the temperature response coefficient of polarization angle of diffraction light of AOM is much larger than that of diffraction efficiency and diffraction angle. Aiming at the temperature response of polarization angle of diffraction light of AOM, it is experimentally verified in the ground laboratory environment. In space microgravity environment, temperature response of AOM may become one of the main reasons that restricts the improvement of the operating temperature range and performance index of optical platform in space program. Based on the pulse working mode of AOM in practical space application, the variation curve between the temperatures of the acousto-optic crystal in AOM and environmental temperature is given by simulation modeling. And the optimization measures are given.

**Key words** measurement; acousto-optic modulator; temperature response; space application; laser cooling

**OCIS codes** 120.6810; 120.6085; 230.1040; 020.3320

## 1 引 言

高精度的空间冷原子钟在全球定位导航、计量守时、基础物理研究等领域具有重大需求,世界各国都在积极开展空间冷原子应用的研究<sup>[1]</sup>。2016年9月,中国科学院上海光学精密机械研究所研制的空间冷原子钟搭载天宫二号进入太空,成为世界首台在轨开展空间的空间冷原子钟。其中,高可靠的光学平台是空间冷

收稿日期: 2017-03-01; 收到修改稿日期: 2017-04-06

基金项目: 中国科技部仪器项目(2013YQ09094304)

作者简介: 吕 挺(1992—),男,硕士研究生,主要从事空间冷原子物理和原子频标方面的研究。

E-mail: tingshensky@siom.ac.cn

导师简介: 屈求智(1978—),男,博士,副研究员,主要从事空间冷原子物理和原子频标等方面的研究。

E-mail: quqiuzhi@siom.ac.cn(通信联系人)

原子钟的核心组成部分,近期世界上已经投入空间应用的光学平台主要有3个:欧空局的空间原子钟组(ACES)计划中 PHARAO 冷原子铯钟<sup>[2-6]</sup>把光学系统和相关电子学控制系统集成在一块平台上,计划于2018年进入太空;2017年1月,德国发射的 MAIUS-1 火箭搭载 Duncker H 等<sup>[7]</sup>研制的物质波原子干涉仪进行了微重力实验,其光学平台采用 Zerodur 微晶玻璃作为光学底板和光学支架材料;中国的空间冷原子钟光学平台<sup>[8-10]</sup>也有自己独特的设计,目前该平台最佳工作温度范围是 $(24 \pm 5)^\circ\text{C}$ ,可工作温度范围是 $10^\circ\text{C} \sim 32^\circ\text{C}$ ,可以满足空间冷原子钟原理验证工作模式的需求。

空间冷原子钟光学平台热真空实验结果<sup>[10]</sup>表明,当光学平台温度在 $5.5^\circ\text{C} \sim 43^\circ\text{C}$ 变化时,其冷却光和探测光输出功率的最大变化量分别为38%和85%,可见空间环境温度大范围变化对光学平台光学性能的稳定性的影响很大。在空间微重力条件下,空气无法自然对流,传热性能近似于真空状态,因此热光学元件对环境温度变化的响应系数远高于地面,是影响光学平台输出激光功率稳定性的主要原因之一。冷原子钟光学平台上最主要的热光学元件是激光器和声光调制器(AOM),其中激光器自带二级温控,因此AOM的温度响应特性将会成为影响光学平台性能指标的主要因素。

本文首先对空间冷原子钟光学平台上使用的AOM的温度响应进行了详细的理论计算,给出了AOM各项温度响应的灵敏度分析,并且在实验室环境下对AOM衍射光椭圆偏振角的温度响应进行了实验验证。然后利用航天专业热分析软件SINDA/FLUNT对AOM进行了仿真建模,结合AOM脉冲式的工作模式,分析了空间微重力环境下AOM声光晶体的温度随外界环境温度的变化规律。

## 2 AOM 温度响应分析

空间冷原子钟采用激光冷却原子技术<sup>[11-12]</sup>冷却铷原子,利用原子双能级荧光探测法<sup>[13]</sup>探测冷原子,冷却光和探测光都是利用单模保偏光纤直接输入到物理系统。由于冷原子数和探测原子数的起伏会直接影响原子钟的信噪比<sup>[14]</sup>,因此对光学平台光纤输出激光功率的稳定性要求非常严格。原子的冷却和探测过程都需要利用AOM来实现冷却光和探测光的移频操作和功率控制,所以AOM是光学平台上的关键元器件之一。图1是AOM声光效应原理示意图,超声波沿声光晶体 $[001]$ 方向以纵模方式传播,入射线偏振光以线偏振角 $\theta$ 沿声光晶体 $[010]$ 方向入射,与声光晶体相互作用后发生衍射。衍射光分为两束,其中,零级衍射光与入射光传播方向相同,一级衍射光与入射光传播方向的夹角为衍射角 $\theta_B$ 。同时一级衍射光的偏振状态变为椭圆偏振,其长轴方向和声光晶体 $o$ 光振动方向的夹角为椭圆偏振角 $\varphi$ 。研究发现声光晶体温度的变化会导致衍射光的衍射效率、衍射角、椭圆偏振角发生变化,最终影响光学平台输出激光功率的稳定性。以AOM一级衍射光应用为例,对一级衍射光的温度响应进行研究,具体分析如下。

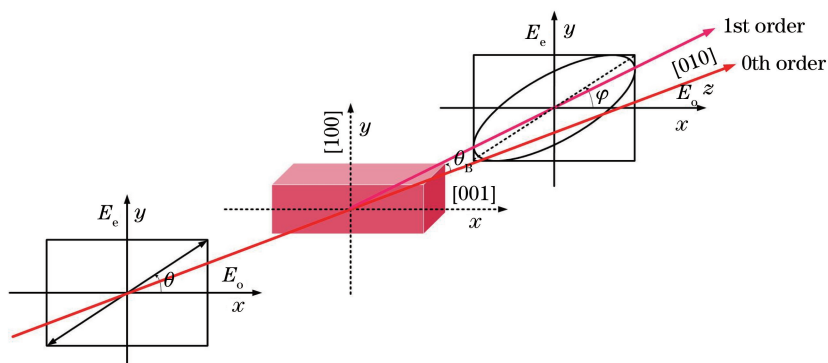


图1 声光效应原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of acousto-optic effect

### 2.1 衍射效率温度响应

声光效应是指超声波作用在声光晶体上,使其折射率发生周期性变化。折射率周期性变化的声光晶体类似于光学相位光栅,使入射光发生衍射。其中一级衍射光衍射效率可表示为<sup>[15]</sup>

$$\eta = \sin^2 \left( \frac{\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{M_2 L P_a}{2H}} \right), \quad (1)$$

式中  $P_a$  是声光相互作用区的超声波功率,  $L$  和  $H$  为压电换能器的长度和宽度,  $\lambda_0$  是入射光在真空中的波长,  $M_2$  为声光晶体的声光优值, 可以表示为

$$M_2 = \frac{n^6 p^2}{\rho V_a^3}, \quad (2)$$

式中  $n$ 、 $p$ 、 $\rho$  是声光晶体的折射率、光弹系数、密度,  $V_a$  为超声波在声光晶体中的传播速度, 它们都存在温度响应。相关理论计算和实验基于 AA Opto Electronic 公司型号为 MT110-B50A0.4-IR-780 nm 的 AOM, 其声光介质为  $\text{TeO}_2$  晶体。文献[16]给出了 400~700 nm 范围内  $\text{TeO}_2$  晶体的热光系数  $dn/dt$ , 通过三次样条差值拟合实验数据, 得到 780 nm 光入射下  $\text{TeO}_2$  晶体两个主折射率为

$$n_o(T) = 2.220702(1 + 6.01 \times 10^{-6} T), n_e(T) = 2.376522(1 + 5.03 \times 10^{-6} T). \quad (3)$$

$\text{TeO}_2$  晶体 3 个方向的线性热膨胀系数分别为  $\alpha_{[101]} = 5.5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $\alpha_{[100]} = \alpha_{[110]} = 21 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ [17], 由此计算得到  $\text{TeO}_2$  晶体密度  $\rho = 6000(1 - 4.66 \times 10^{-5} T) \text{ kg/m}^3$ 。当超声波沿 [001] 方向以纵模传播时, 对应的光弹系数  $p_{13} = 0.34$ ; 超声波传播速度  $V_a = \sqrt{c_{33}/\rho}$ [18], 其中  $c_{33}$  是超声波沿 [001] 方向以纵模方式传播时  $\text{TeO}_2$  晶体的弹性劲度系数, 文献[19]给出了  $c_{33}$  随温度的变化规律, 计算得到  $V_a(T) = 4198.8(1 - 1.17 \times 10^{-4} T) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。将以上各参数代入声光优值  $M_2$  中, 计算得到  $\text{TeO}_2$  晶体两个主折射率方向上的声光优值随温度的变化关系为

$$M_{2o} = 31.2(1 + 2.9 \times 10^{-4} T) \times 10^{-15} \text{ s}^3 \cdot \text{kg}^{-1}, M_{2e} = 23.4(1 + 2.84 \times 10^{-4} T) \times 10^{-15} \text{ s}^3 \cdot \text{kg}^{-1}. \quad (4)$$

根据声光优值随温度的变化关系, 可以得到 AOM 一级衍射光衍射效率随温度的变化规律。

图 2(a) 给出了入射光线偏振方向沿  $\text{TeO}_2$  晶体 o 光振动方向时 AOM 衍射效率随声光晶体温度的变化曲线。其中, AOM 的衍射效率接近 80%, 衍射效率和温度成线性关系,  $\text{TeO}_2$  晶体温度每升高 1  $^\circ\text{C}$ , 衍射效率变化 0.02%, 衍射效率温度响应系数为 0.02%/ $^\circ\text{C}$ 。

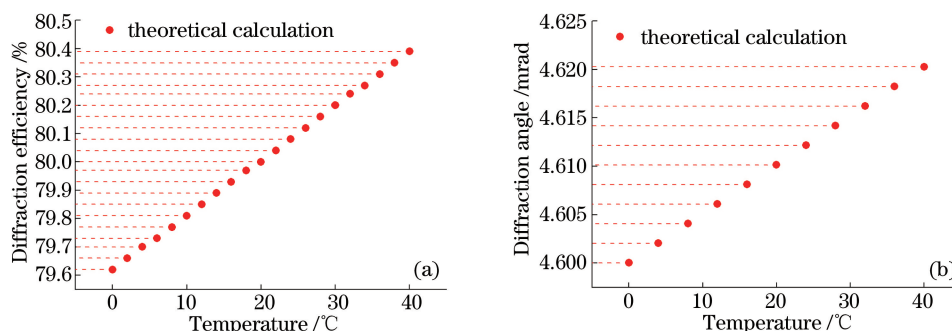


图 2 (a) 衍射效率随温度变化曲线; (b) 衍射角随温度变化曲线

Fig. 2 (a) Variation curve between diffraction efficiency and temperature; (b) variation curve between diffraction angle and temperature

## 2.2 衍射角温度响应

以布拉格衍射为例, 当入射光以布拉格衍射角入射到声光晶体表面时, 入射光发生布拉格衍射, 此时一级衍射光衍射效率达到最大, 布拉格衍射角  $\theta_B$  表达式为[18]

$$\theta_B = \arcsin \theta \left( \frac{\lambda}{2nV_a} f \right). \quad (5)$$

图 2(b) 给出了 AOM 衍射角随温度的变化曲线, 从图中可以看出衍射角和温度成线性关系,  $\text{TeO}_2$  晶体温度每升高 1  $^\circ\text{C}$ , 衍射角变化 0.5  $\mu\text{rad}$ , 衍射角的温度响应为 0.5  $\mu\text{rad}/^\circ\text{C}$ 。根据具体光路的测算, 此因素对光纤输出功率的影响约为 0.05%/ $^\circ\text{C}$ 。

## 2.3 偏振角温度响应

由于声光晶体存在双折射效应, 入射线偏振光经过 AOM 衍射后衍射光的偏振状态会发生相应的变化。如图 1 所示, 入射线偏振光以线偏振角  $\theta$  入射, 经 AOM 移频后一级衍射光变为斜椭圆偏振光, 椭圆偏振光轨迹  $\varphi$  可以表示为[20]

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan \left[ \frac{2E_o(B) \times E_e(B) \times \cos(\delta_{oe})}{E_o^2(B) - E_e^2(B)} \right], \quad (6)$$

式中  $E_o(B)$  和  $E_e(B)$  是 AOM 衍射光在声光晶体出射点处 o 光和 e 光振动方向上的振幅,  $\delta_{oe}$  是入射光通过声光晶体后产生的附加相位差。计算得到 AOM 衍射光椭圆偏振角  $\varphi$  随温度的变化曲线, 结果如图 3 中实线所示。

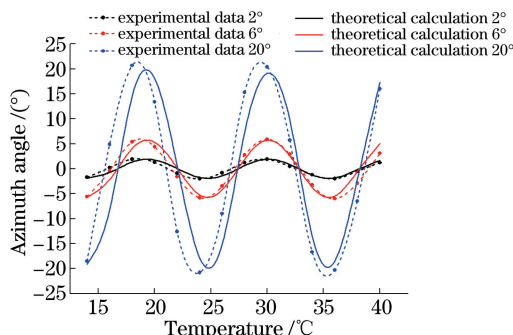


图 3 椭圆偏振角  $\varphi$  随声光晶体温度变化理论计算和实验结果对比

Fig. 3 Comparison between theoretical calculation and experimental results of elliptically polarized angle  $\varphi$  with acousto-optic crystal temperature variation

通过单路实验来验证 AOM 衍射光的偏振角温度响应。实验中 780 nm 的激光先后经过偏振分光棱镜 (PBS)、半波片、AOM, 最后利用偏振分析仪观测 AOM 衍射光椭圆偏振角  $\varphi$  随声光晶体温度的变化。实验上采用半导体热电制冷器 (TEC) 对 AOM 进行温控, 温控精度为  $\pm 5$  mK, 考虑到实验温度过高或者过低都会对声光晶体造成损害, 故将实验温度范围设置为  $14\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 实验结果如图 3 中虚线所示。

图 3 是 AOM 一级衍射光椭圆偏振角  $\varphi$  随声光晶体温度变化的理论计算和实验结果对比。根据理论计算可知衍射光椭圆偏振角  $\varphi$  随声光晶体温度呈周期性变化, 其变化周期约为  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当入射光线偏振方向与  $\text{TeO}_2$  晶体 o 光振动方向夹角为  $2^{\circ}, 6^{\circ}, 20^{\circ}$  时, 衍射光椭圆偏振角  $\varphi$  的振幅是  $1.9^{\circ}, 5.7^{\circ}, 19.1^{\circ}$ 。根据椭圆偏振光理论<sup>[20]</sup>, AOM 衍射光再次通过 PBS 后, 单路激光功率变化幅度分别为  $6.6\%, 19.8\%, 61.8\%$ 。实验结果和理论计算之间存在细微的差别, 其中, 理论计算误差主要来自于声光晶体参数测量误差以及部分参数查阅值和真实值之间的误差。实验中利用半波片调节入射光偏振方向, 调节精度存在  $\pm 0.5^{\circ}$  的偏差, 相应的入射光线偏振方向与声光晶体 o 光振动方向存在  $\pm 1^{\circ}$  的误差。实验结果与理论分析结果基本吻合, 从而验证了 780 nm AOM 衍射光椭圆偏振角的温度响应。

#### 2.4 AOM 温度响应灵敏度分析

表 1 列出了 AOM 衍射光衍射效率、衍射角、偏振角对温度的灵敏度分析以及各自引起的光学平台输出激光功率的相对变化量。由表 1 可以看出衍射光椭圆偏振角的温度响应对光学平台输出激光功率的稳定性影响最大。

表 1 AOM 温度效应灵敏度分析以及引起的输出激光功率的变化

Table 1 Sensitivity analysis of temperature effect of AOM and variation of output laser power

Temperature impact factor	Sensitivity analysis	Variation of output power
Diffraction efficiency	$0.02\%/^{\circ}\text{C}$	$0.02\%/^{\circ}\text{C}$
Diffraction angle	$0.5\ \mu\text{rad}/^{\circ}\text{C}$	$0.05\%/^{\circ}\text{C}$
Polarization angle with incident light of $2^{\circ}$	$0.76^{\circ}$ (max)	$2.64\%/^{\circ}\text{C}$ (max)
Polarization angle with incident light of $6^{\circ}$	$2.28^{\circ}/^{\circ}\text{C}$ (max)	$7.92\%/^{\circ}\text{C}$ (max)

### 3 空间环境下声光晶体的温度变化

AOM 的温度响应归根结底是声光晶体的温度变化导致的, 所以必须了解 AOM 实际工作过程中声光晶体温度变化的规律以及变化原因。在空间微重力条件下, 导致声光晶体温度变化主要有以下几个的原因有: 空间环境温度的变化、压电换能器转换效率和超声波晶体吸收率。本节采用航天专业热分析软件

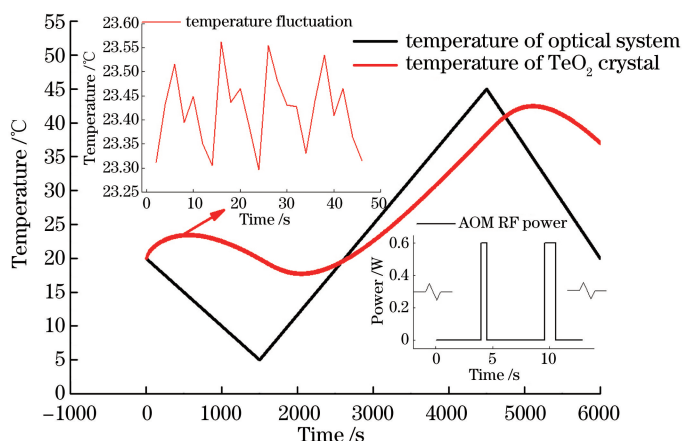
SINDA/FLUINT 对 AOM 进行了详细的热模拟与热分析。AOM 声光介质为  $\text{TeO}_2$  晶体,其几何模型为上底 6.1 mm(下底 8.68 mm)×18.8 mm×5.2 mm 的梯形棱柱,AOM 外壳以及导热材料是 6061 铝合金,光学平台基板材料是铝基碳化硅,表 2 列出了相关材料的热学参数。

表 2 相关材料热学参数

Table 2 Thermal parameters of related materials

Parameter	Density /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	Thermal conductivity /( $\text{W} \cdot \text{°C} \cdot \text{m}^{-1}$ )	Specific heat /( $\text{J} \cdot \text{°C} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
$\text{TeO}_2$ crystal	6000	3	1000
6061 alloy	2710	167	920
Aluminum silicon carbide	2770	220	875

根据材料属性和实验中的真实情况,AOM 和光学平台各表面的干接触热交换系数取  $150 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$ ,对其进行有限元差分,共建立 7000 个节点,设置各节点初始温度为  $20 \text{ °C}$ 。以空间冷原子钟实验(CACES)的工作模式为例,不同的原子抛射速度对应不同的 AOM 工作时序,其温度响应也不一样。图 4 中右下小图是冷原子在轨抛射速度为  $0.1 \text{ m/s}$  时 AOM 的工作时序图,整个工作周期为  $10.7 \text{ s}$ ,AOM 在冷原子选态和探测期间加载  $0.6 \text{ W}$  的射频(RF)功率,分别持续  $0.4 \text{ s}$  和  $1 \text{ s}$ 。超声波沿[001]方向传播时衰减系数为  $-1.32 \text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1}$ [17],由此得到压电换能器转化的热功率为  $0.337 \text{ W}$ ,声光晶体吸收超声波转化的热功率为  $0.263 \text{ W}$ 。通过以上热参数、有限元差分、工作模式和热源的设置,对 AOM 声光晶体进行瞬态热分析,结果如图 4 所示。

图 4 空间微重力环境下  $\text{TeO}_2$  晶体的热模拟结果Fig. 4 Thermal simulation result of  $\text{TeO}_2$  crystal under space microgravity environment

如图 4 所示,分析结果显示当光学平台温度在  $5 \text{ °C} \sim 45 \text{ °C}$  之间变化时,空间环境下  $780 \text{ nm}$  AOM 声光晶体温度跟随光学平台温度在  $18 \text{ °C} \sim 42 \text{ °C}$  之间变化,与此同时,以这种脉冲模式工作会给声光晶体带来额外  $0.3 \text{ °C}$  左右的温度抖动。因此,为了进一步提高光学平台输出性能的稳定性,必须对光学平台和 AOM 进行温控和散热增强设计。以空间冷原子钟光学平台为例[9],光学平台采取了两级温控技术、底板隔热安装与 AOM 局部高导热率石墨膜散热等配套热控方式,将温度变化对光学元件的影响控制到最小,使其达到满足空间应用需求的要求。但是,与 Duncker H 等[7]采用的光学平台相比,该平台的温度系数、耦合效率还有较大的提升空间。具体可操作的办法有,采用 AOM 倒装散热设计降低 AOM 温度梯度,利用超高精度装调技术[21]对光路中激光的行进路线和偏振状态进行精密控制,减小由传统光学装调方式带来的不确定误差。另外,还可以考虑采用机械光开关或者双频驱动 AOM 改变工作模式,减小 AOM 射频功率变化幅度,从而减小声光晶体温度的抖动。但是由于航天工程对机械光开关的运动部件长期使用要求非常严苛,而双频驱动 AOM 目前还无法满足冷原子实验激光关断的要求,这些方案目前仍处于技术攻关阶段。

## 4 结 论

为了扩大空间冷原子技术的应用范围,满足未来空间冷原子物理、空间高精度时频系统等空间科研及工

程任务的需求,需要进一步提高空间微重力环境下冷原子钟光学平台的稳定性和适应性。详细分析了 AOM 的温度响应,发现温度的变化会导致 AOM 衍射光的衍射效率、衍射角、偏振角发生变化,其中衍射光偏振角的温度响应对光学平台输出激光功率的稳定性影响最大。与地面实验室环境不同,在空间微重力环境下声光晶体的温度变化范围较大、散热能力较差等因素会导致 AOM 存在较大的温度响应。同时,在空间冷原子钟实际工作过程中,AOM 脉冲式的工作模式会使声光晶体产生较高的温度抖动。通过对 780 nm AOM 声光晶体的温度系数进行详细的理论计算和实验测试,并根据分析结果对改进 AOM 在光学平台上的温度响应给出了优化措施,为新一代空间应用光学平台的方案设计和性能提升提供了设计依据。

## 参 考 文 献

- [1] Lü Desheng, Liu Liang, Wang Yuzhu. Space cold atomic clock and its scientific applications[J]. Manned Spaceflight, 2011, 17(1): 47-51.  
吕德胜, 刘 亮, 王育竹. 空间冷原子钟及其科学应用[J]. 载人航天, 2011, 17(1): 47-51.
- [2] Laurent P, Abgrall M, Jentsch C, *et al.* Design of the cold atom PHARAO space clock and initial test results[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2006, 84(4): 683-690.
- [3] Lévêque T, Faure B, Esnault F X, *et al.* PHARAO laser source flight model: design and performances[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(3): 033104.
- [4] Laurent P, Jentsch C, Clairon A, *et al.* The PHARAO space clock: results on the ground operation of the engineering model[C]. Geneva: 2007 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum, 2007: 1106-1112.
- [5] Leger B, Stringhetti L, Massonnet D, *et al.* Results of the ACES engineering model system test[C]. Noordwijk: EFTF-2010 24th European Frequency and Time Forum, 2010: 1-8.
- [6] Esnault F X, Grosjean O, Delaroche C, *et al.* PHARAO flight model: Integration and "on ground" performances tests [C]. Taipei: 2014 IEEE International Frequency Control Symposium (FCS), 2014: 1-3.
- [7] Duncker H, Hellmig O, Wenzlawski A, *et al.* Ultrastable, Zerodur-based optical benches for quantum gas experiments [J]. Applied Optics, 2014, 53(20): 4468-4474.
- [8] Qu Qiuzhi, Wang Bin, Lü Desheng, *et al.* Principle and progress of cold atom clock in space[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0902006.  
屈求智, 汪 斌, 吕德胜, 等. 空间冷原子钟原理样机地面测试结果[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0902006.
- [9] Qu Qiuzhi, Xia Wenbin, Wang Bin, *et al.* Integrating design of a compact optical system for space laser cooling application[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0602003.  
屈求智, 夏文兵, 汪 斌, 等. 空间激光冷却原子集成光学平台设计[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0602003.
- [10] Ren W, Sun Y G, Wang B, *et al.* Highly reliable optical system for a rubidium space cold atom clock[J]. Applied Optics, 2016, 55(13): 3607-3614.
- [11] Dalibard J, Cohen-Tannoudji C. Laser cooling below the Doppler limit by polarization gradients: simple theoretical models[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1989, 6(11): 2023-2045.
- [12] Ungar P J, Weiss D S, Riis E, *et al.* Optical molasses and multilevel atoms: theory[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1989, 6(11): 2058-2071.
- [13] Metcalf H J, van der Straten P. Laser cooling and trapping[M]. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2012.
- [14] Zhang S G. Frequency shift due to blackbody radiation in a cesium atomic fountain and improvement of the clock performance[C]. Paris: Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2004: 75-77.
- [15] Feng Yuanyuan, Li Wujun, Yu Jintao. Analysis of polarization diffraction characteristics in acousto-optic modulator[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2013, 33(6): 449-452.  
冯媛媛, 李武军, 于金涛. 声光调制器偏振衍射特性的分析[J]. 西安工业大学学报, 2013, 33(6): 449-452.
- [16] Uchida N. Optical properties of single-crystal paratellurite (TeO<sub>2</sub>) [J]. Physical Review B, 1971, 4(10): 3736-3745.
- [17] 蔡起善. 二氧化碲晶体的结构与物理性能[J]. 压电与声光, 1981(2): 55-60.
- [18] Zhang Chunguang. The technology of the acousto-optic tunable filter based on the hyperspectral imaging system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 27-28.  
张春光. 基于超光谱成像系统的声光可调滤波技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 27-28.
- [19] Ohmachi Y, Uchida N. Temperature dependence of elastic, dielectric, and piezoelectric constants in TeO<sub>2</sub> single crystals [J]. Journal of Applied Physics, 1970, 41(6): 2307-2311.
- [20] Zhong Xihua. Modern fundamentals of optics[M]. Beijing: Beijing University Press, 2012: 98-103.  
钟锡华. 现代光学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012: 98-103.
- [21] Robertson D I, Fitzsimons E D, Killow C J, *et al.* Construction and testing of the optical bench for LISA pathfinder [J]. Classical & Quantum Gravity, 2013, 30(8): 085006.