

文章编号 1004-924X(2011)10-2386-07

激光外差干涉中声光器件的非均匀声场特性

霍 雷*, 曾晓东

(西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要:针对声光晶体内部的声波反射使晶体内部声场分布不均匀,影响衍射效率和衍射光场分布,降低激光外差干涉效率的现象,以不改变声光设备为前提提出了光切趾方法。以 TeO_2 晶体为基底,理论分析声光器件的声场分布、体光栅衬度及其对衍射光效率的影响。提出非均匀光栅衬度模型,并利用光切趾法控制空间声场非均匀分布。通过理论仿真结合实验测量,证明该方法的传输性能。实验结果表明:当射频满足器件工作中心频率在 100~105 MHz 时,使用切趾法前,衍射光斑呈现双峰,光强未均匀分布,其光斑中心不呈现光强极大值,衍射光束出现串扰并携带大量噪声,外差信号功率为 -1.7 dBm;使用切趾法后,声场非均匀现象对光束质量的影响得到改善,光强分布均匀且呈高斯结构,声场衍射效率提高到 98%,传输带宽达到总衍射带宽的 50%~60%,外差信号功率达到 3.8 dBm。结果表明:该方法在优化传输容量、抑制光串扰同时,可提高激光外差干涉效率,使外差中频信号电压增益为 11 dB。

关键词:声光器件;声场分布;光栅衬度;衍射效率;激光外差干涉

中图分类号:TH744.3;TN65 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111910.2386

Non-uniform sound field distribution of acousto-optic device in laser heterodyne interferometry

HUO Lei*, ZENG Xiao-dong

(*Institute of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

* *Corresponding author, E-mail: muskhl@163.com*

Abstract: According to the effect of sound field distribution in an acousto-optic crystal on diffraction efficiency and optical fields, an apodization method was proposed to improve the laser heterodyne interferometric efficiency. By taking a TeO_2 for a substrate, the effect of sound field distribution and volume grating contrast in an acousto-optic device on the diffraction efficiency was analyzed. A nonuniform contrast model was established and the apodization method was used to control the nonuniform distribution of the spatial sound field. The results show that when the radio frequency is tuned to a working range from 100 to 105 MHz for an Acoustic Optical Modulation(AOM) without apodization, the diffractive spot shows two peaks with nonuniform distribution, diffractive light contains crosstalks with much noise and diffraction efficiency is affected. The heterodyne signal power is -1.7 dBm. However, the apodization achieves a better diffraction efficiency and crosstalk suppression. The diffraction efficiency reaches the maximum 98%, transmission bandwidth has been 50% to 60% of the

收稿日期:2011-05-16;修订日期:2011-07-18.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA12Z144)

total diffraction bandwidth. The heterodyne signal power is 3.8 dBm. The measurement results indicate that the method can optimize transmission capacity, suppress the crosstalk and can improve the laser heterodyne interferometric efficiency by an IF heterodyne signal voltage gain of 11 dB.

Key words: acousto-optic cell; sound field distribution; grating contrast; diffraction efficiency; laser heterodyne interferometry

1 引 言

继 1964 年美国 AI 实验室研制出第一台激光外差干涉仪后,几十年来美国 Agilent 公司、Zygo 公司、英国 Renishaw 等公司相继开发出各种激光干涉仪,使得激光干涉测量技术得到了高速发展,但这些产品虽各具特点却售价昂贵。激光外差干涉技术的实时性、高分辨率和可溯源性等优势,使得该项技术成功应用于计量领域,是工业中最具权威的长度测量仪器,尤其在纳米分辨力和大动态测量范围的精密定位和位移监测,如超精密测量与加工、微电子装备、纳米科学与技术等领域极受青睐^[1-2]。然而,实际应用中干涉仪的衍射效率不高,造成本振和信号光束相位与振幅不匹配,降低了外差效率,限制了激光外差干涉的测量精度,影响了外差干涉仪的应用效果。因此,各国学者仍在从不同角度研究如何提高激光外差干涉中衍射效率的可能性。美国马歇尔空间飞行中心的 L. D. Harris 等人成功研制了计算机控制的外形检验系统,用 X 射线仪来检测调整激光干涉仪。我国高晓萍等提出利用亚微米制作的二元结构衍射光栅来提高衍射效率^[3-4]。上述解决方法电路系统和光路系统都很复杂,不太适合科研和工业领域的实际需要。

本文作者曾提出一种改良方法,将 CCD 安装在合束器后,通过光斑识别调整光楔位置实现本振光和信号光准直的目的,但该方法目前仍局限于理论研究。由于换能器发出的超声在晶体内来回反射形成驻波,使晶体内声场分布混乱,降低衍射效率并影响衍射光分布,伴随大量光串扰,降低了激光外差干涉效率。因此,本文根据声光调制器(Acousto-optic Modulator, AOM)光束衍射特性,对声场非均匀效应对光栅衬度的影响进行研究,提出 AOM 存在声场非均匀,即体光栅呈现类高斯分布时,通过选择晶体衍射效率最优位置

及切入入射光横截面强度分布,可提高激光外差干涉效率的思想,并选择质子交换二氧化碲波导进行了实验研究。

2 理论分析与计算

当声波在介质中传播时,介质中存在弹性应力和应变,引起介质折射率变化,因而影响光在介质中的传播特性,光和声在介质中的相互作用可看作是“超声光栅”^[5]。利用激光的相干性声光相互作用可以快速有效地控制激光束的频率、方向和强度。

声光效应衍射光频率是入射光和超声频率的叠加,当在换能器上作线性调频时,衍射光频率被线性调制。当 Bragg 角作用在声光晶体上时,有如下表达式^[6]:

$$\sin \theta_B = \frac{\mathbf{K}}{2\mathbf{k}} = \frac{\lambda}{2v_s} f_x, \quad (1)$$

其中 \mathbf{K} 和 \mathbf{k} 分别是超声波矢和入射光波矢, Λ 是介质中声波长, λ 是介质中光波长。

根据公式(1)可知衍射角随声频改变。如图 1 所示,对 AOM 输入不同频率的电分量会造成不同方向的出射光分量。

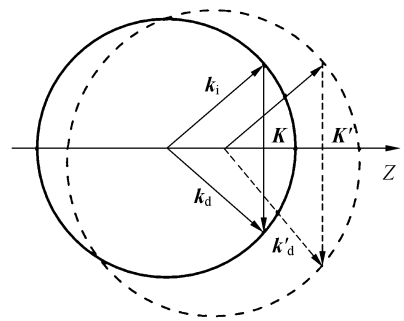


图 1 声光效应波矢图

Fig. 1 Wave vector diagram of AO interaction

实际中声光衍射常用于各向异性晶体中^[7-8]。图 1 中所示实线为 +1 级衍射矢量图。入射光和衍射光通过各向异性介质有着不同的偏振方向；波矢长度各异。然而,在此基础上考虑多普勒效应,需要修正该矢量图。矢量 \mathbf{k}_d 和 \mathbf{K} 替换为 \mathbf{k}'_d 和 \mathbf{K}' ,对照图 1 虚线所示。互作用波矢量有如下表达式:

$$\mathbf{k}_i = \frac{\omega_i}{c} \mathbf{n}_i, \mathbf{k}_d = \frac{\omega_d}{c} \mathbf{n}_d, \mathbf{K} = \frac{\Omega}{v}, \quad (2)$$

其中, n_i 和 n_d 是在频率 ω_i 和 ω_d 下的折射率,是由各向异性衍射造成的, Ω 是超声频率。伴随多普勒效应 $\omega_d = \omega_i + \Omega$,可以得到:

$$\mathbf{k}_d = \frac{\omega_i + \Omega}{c} \mathbf{n}_d. \quad (3)$$

声波以波速 v_s 传播,对介质密度存在微扰或者压缩,介质折射率随着密度改变,与声波振幅成

正比。超声传播对折射率调制有:

$$\Delta n(\mathbf{r}, t) = \Delta n(\mathbf{r}) \cos(\Omega t - \mathbf{K} \cdot \mathbf{r}) = \frac{1}{2} \Delta n(\mathbf{r}) \{ \exp[i(\Omega t - \mathbf{K} \cdot \mathbf{r})] + \exp[-i(\Omega t - \mathbf{K} \cdot \mathbf{r})] \}. \quad (4)$$

非均匀效应不仅对衍射光频率 ω_d 存在影响,还对折射率 n_d 也有影响。折射率变化表示为:

$$\delta n_d = n_d - n_{d_0}, \quad (5)$$

其中 n_{d_0} 是入射光进入介质折射率(非均匀声场振幅最小)。

另外,超声波矢长度变化有 $\delta \mathbf{K} = \delta \Omega / v_s$ 。Bragg 匹配条件下存在 $\delta \mathbf{K}_d = \delta \mathbf{K}$ 。因此有:

$$\delta \Omega = \frac{(\Omega n_d + \omega_i \delta n_d) v}{c}, \quad (6)$$

结合耦合波方程,在无损耗介质中衍射效率表示为:

$$\eta = \sin^2 \left[\int_0^L \frac{I(0)}{I_0} \frac{\exp(i \Delta \mathbf{k} \cdot \mathbf{z})}{2 \cosh \left[\frac{\gamma I(0)}{I_0} z + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{I(0)}{I_0/2} \right) \right]} \frac{2\pi \Delta n}{\lambda \cos \theta} dz \right], \quad (7)$$

其中 $I(0)$ 和 I_0 分别为衍射光强和入射光强, θ 为光入射角, L 为互作用长度。 Δn 由下式得:

$$\Delta n = \Delta n_{\max} G(z) \exp(\delta \mathbf{K} \cdot \mathbf{r}). \quad (8)$$

其中 Δn_{\max} 是折射率最大值, $G(z)$ 是光栅衬度,是对应 Bragg 匹配条件下的非均匀超声频率。因此最大衍射效率与晶体折射率分布密不可分。折射率调制中光栅衬度随折射率强度比值 $\Delta n / \Delta n_{\max}$ 变化曲线如图 2 所示。

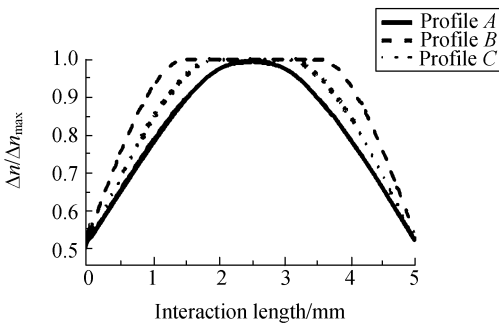


图 2 Z 轴空间光栅变化曲线

Fig. 2 Spatial variation of index gratings versus z

图中曲线为 $\Delta n / \Delta n_{\max}$ 比值,表示光栅衬度的变化趋势。从公式(7)和(8)中看出衍射效率随光栅衬度变化。结合方程组知道最大衍射效率位于

介质中心光栅衬度峰值处。利用增加体光栅互作用距离,可以实现提高 AOM 模式转换效率。

假设衍射光栅已经存在,结合耦合波理论,定义衍射光振幅,并将公式(7)变为:

$$\eta = \int_0^L \sqrt{I(0)} \exp(i \frac{\Delta \alpha}{2} z) (i \frac{\Delta \alpha}{2s} \sin sz + \cos sz) \Delta n dz, \quad (9)$$

$$A_{\text{dif}}(z) = -i \frac{\pi}{\lambda \cos \theta} \int \Delta n A_{\text{in}}(z) \exp(i \Delta \alpha z) dz. \quad (10)$$

其中 s 由 $\sqrt{(\gamma^2 + \Delta \alpha^2)}/2$ 得到, γ 为耦合常量, A_{dif} 和 A_{in} 分别为衍射光振幅和入射光振幅, $\Delta \alpha$ 为相位失配值。当声场非均匀分布,数值模拟衍射光强归一化分布如图 3。衍射光呈现多峰结构,可以看出声光互作用中光栅衬度非均匀时,衍射光受到极大串扰,光束质量下降,为后续工作带来不便。

该图为光栅衬度不均匀时,衍射光强的归一化分布,衍射光呈现多峰结构,不仅造成能量的分散,而且在光斑中心位置出现暗条纹。 A_{dif} 由 $\Delta n \cdot A_{\text{in}}$ 傅里叶变换得到,假设 Δn 为 A_{in} 的窗函数^[9],通过介质中光栅衬度峰值变化得到较高衍射效率,由此可抑制光串扰带来的影响。

图 4 为声束在传输中心轴上的声强分布曲

线。由图可知,随着传输距离增加,声强在换能器中心轴上先增加后减小。

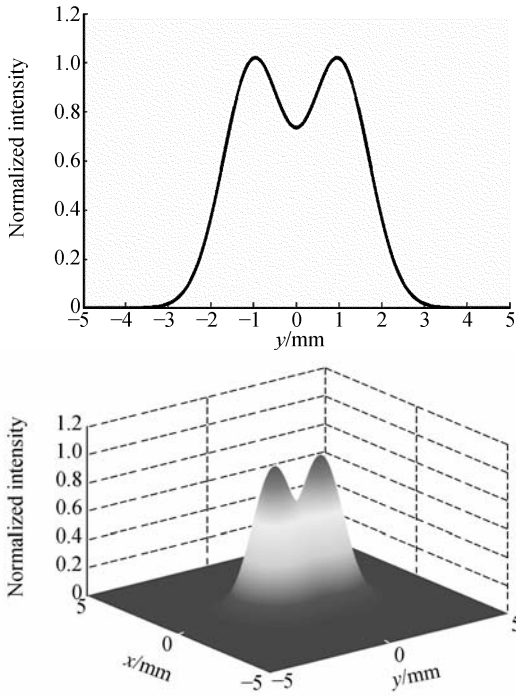


图 3 非均匀光栅衬度衍射光场分布的数值模拟
Fig. 3 Numerical simulation of diffraction field distribution of non-uniform grating contrast

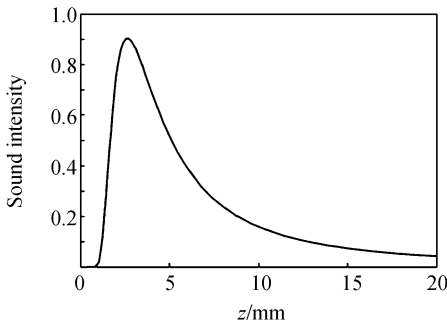


图 4 传输中心轴上声强分布
Fig. 4 Sound intensity distribution of transmission center axis

定义声强归一化后, $I/I_{\max} > 88.9\%$ 为最佳声强范围。由此计算得出最佳声强位置为 $2.08 \text{ mm} \leq z \leq 3.43 \text{ mm}$, 声光作用在该区域具有最佳的模式转换效率。

3 衍射现象观察与实验设计

图 5 是由 CCD 采集的衍射光斑图样。左图

显示未切趾时衍射光斑直径为 2 mm;右图则显示切趾后衍射光斑直径为 0.9 mm。

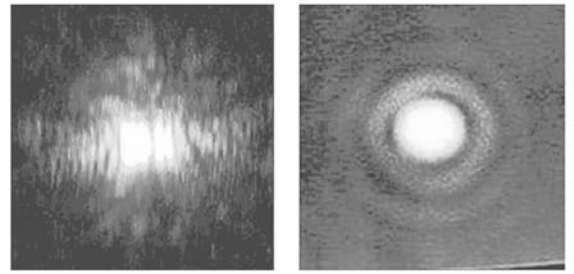


图 5 CCD 采集+1 级衍射光斑图样
Fig. 5 CCD gathering diffraction plot

经过图像处理,分别得到切趾前后衍射光强沿 x 轴的归一化分布。非均匀光栅衬度导致衍射光斑呈现双峰,如图 6 所示。衍射光束出现串扰并携带大量噪声,光强未均匀分布并且在光斑中心不呈现光强极大值,对激光外差干涉效率造成影响。实验得到衍射光斑图样与理论分析非均匀衬度造成的衍射光斑(图 3)能够较好吻合,说明理论模型是较符合实际情况的。图 7 是切趾后衍射光强归一化一维分布,光强呈现高斯分布,这与入射光强分布一致,光束质量较未切趾时有所改善。图 7 中旁瓣由切趾光阑圆孔衍射造成,后续经光学处理可以去除,对激光外差干涉不带来影响。

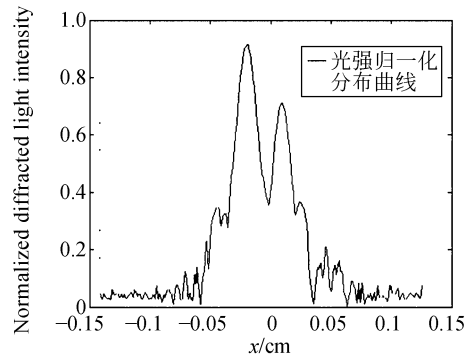


图 6 未切趾衍射光强归一化分布曲线
Fig. 6 Non-apodization gratings with optical intensity

根据二氧化碲密度^[10] $\rho = 5\,990 \text{ kg/m}^3$ 等器件特性确定声速大小为 $v = 0.65 \text{ km/s}$ 。衍射效率 $I(0)/I_0$ 。在光波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 压电换能器在 $6\,000 \text{ mW}$ 驱动下进行了效率计算。

对于选定的声波模式来说,切趾前后传播方

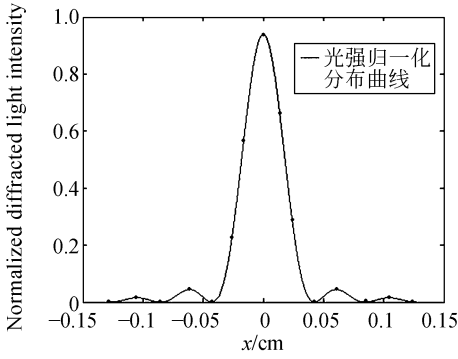


图 7 切趾后衍射光强归一化分布曲线

Fig. 7 Apodization gratings with optical intensity

向角的微小变化不引起波特征值明显变化^[11]。事实证明超声频率对应布拉格匹配条件和因此产生的最大衍射效率都与晶体温度密切相关。晶体温度升高 1℃ 导致超声匹配频率下降约 500 kHz^[12]。为了减少实验误差,实验在室温下进行。由于非均匀效应频移由 $\delta n_d \Delta n v^2$ 决定,比实验误差小两个数量级^[13],因此,非均匀效应可以当作特定温度范围内的实验误差。

图 8 为研究非均匀效应实验原理图。实验中对信号发生器使用扫频方式工作,由此可以在示波器上直接观察衍射光强 $I(f)$ 的频率特性。

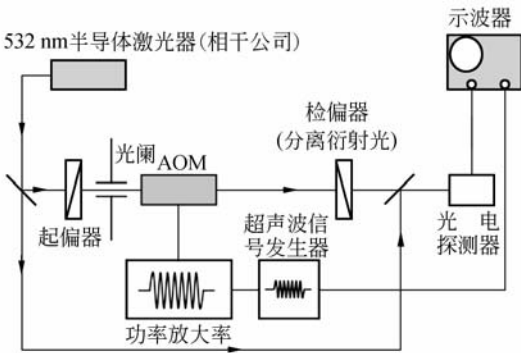


图 8 实验装置

Fig. 8 Scheme of experimental setup

实验中,当光波与声波角度失配最小时,衍射效率最大和相互作用带宽最小,即外差中频信号信噪比最大。调整系统后,确定超声频率和相互作用带宽。然后,使用切趾光阑重复相同实验。通过数据比较,可以判断非均匀效应对外差带来的影响。

4 实验结果

如图 8 实验,入射光 $\lambda=632.8 \text{ nm}$ 时,在声频 F 近似为 100.5 MHz 处(室温下),有最大衍射率。未切趾入射光时,光斑直径 ϕ 为 2 mm,衍射带宽 ΔF 约为 210 kHz,光波带宽 $\Delta \lambda$ 约为 0.127 nm。超声衰减造成频带展宽,衍射光强归一化随超声频率改变情况如图 9 所示。切趾入射光后,光斑直径 ϕ 为 0.9 mm,带宽 ΔF 约为 195 kHz,对应光波带宽为 $\Delta \lambda$ 约为 0.15 nm。衍射光强归一化随超声频率改变情况如图 10 所示。

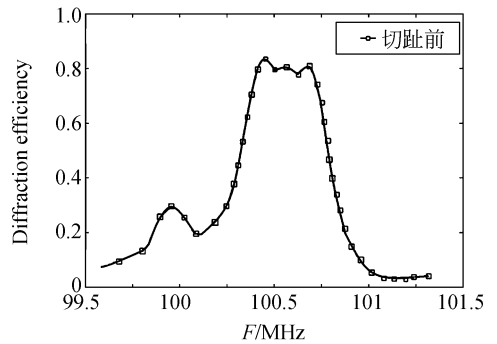


图 9 切趾前 $\lambda=632.8 \text{ nm}$ 时的衍射效率图

Fig. 9 Acoustic frequency transmission band of AO cell of non-apodization at $\lambda=632.8 \text{ nm}$

切趾后光斑直径减小到匹配光栅衬度。由图 10 可以看出衍射效率得到提高,传输带宽占总衍射带宽的 50%~60%。

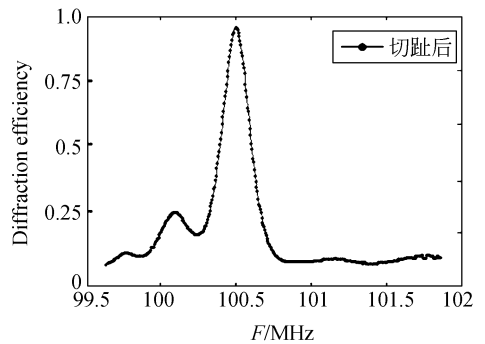


图 10 切趾后 $\lambda=632.8 \text{ nm}$ 时的衍射效率图

Fig. 10 Acoustic frequency transmission band of AO cell of apodization at $\lambda=632.8 \text{ nm}$

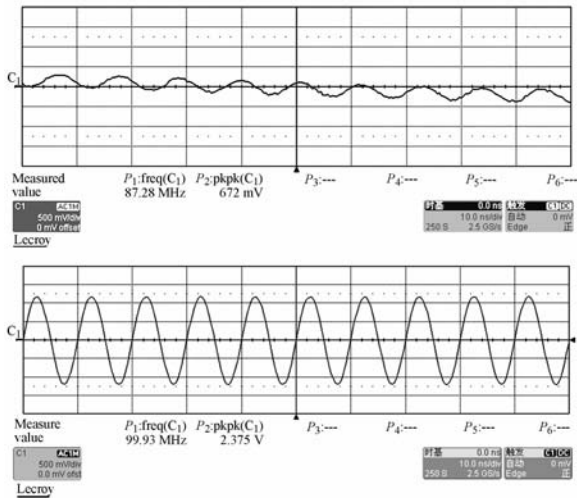


图 11 激光外差干涉中频信号采集图

Fig. 11 Figure of IF signal acquisition of laser heterodyne interferometer

激光外差干涉实验中频信号数据采集如图 11。通过切趾入射光,提高了衍射光光束质量,衍射光强集中在光斑中心处,本振和信号两束相干光在探测器面上混频。激光外差干涉中频信号为 2.375 V,切趾前后外差信号功率分别为 -1.7

参考文献:

- [1] ZHANG SH, TAN J B, WANG L, *et al.*. Improvement of iterative error-correction method in laser direct writing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2):317-325.
- [2] 谢冀江,李殿军,张传胜.声光调 Q CO₂ 激光器[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5):1008-1013.
- XIE J J, LI D J, ZHANG CH SH, *et al.*. Acousto-optically Q-switched CO₂ laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1008-1013. (in Chinese)
- [3] 李玉斌. 高效 389.5 MHz 声光调制器研究及应用 [J]. *光学精密工程*, 1996, 4(2):78-82.
- LI Y B. Study and application of high efficiency 389.5 MHz acousto-optic modulator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(2):78-82. (in Chinese)
- [4] BALAKSHY V I, BOGUMIL B J. Acousto-optic interaction in a non-homogeneous acoustic field excited by a wedge-shaped transducer[J]. *Ultrasonics*, 2008, 48(5):351-356.
- [5] BALAKSHY V I, BOGUMIL B L. Light diffraction in an inhomogeneous acoustic field[J]. *Molecular and Quantum Acoustics*, 2006, 27:7-16.
- [6] BALAKSHY V I, REVENKO A V. Acousto optic

dBm 和 3.8 dBm,中频信号的电压增益为 11 dB.

5 结 论

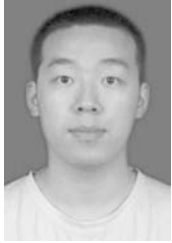
研究了声光效应的声场分布,理论建立了非均匀光栅衬度模型,并通过实验证明了模型符合实际情况。针对入射光半径和形状利用切趾方法,来改变空间变化光栅,提高了信噪比。利用切趾入射光保证通过体光栅后衍射光的光束质量,提高了激光外差干涉效率目的。经过实验可知:当射频符合器件工作中心频率在 100~105 MHz 时,在优化入射光参数及光栅衬度后,声光衍射效率最高达到 98%,传输带宽达到总衍射带宽的 50%~60%。衍射效率和衍射强度得到提高。激光外差干涉中频信号为 2.375 V,切趾前后激光外差中频信号电压比值为 11 dB,前后外差信号功率分别为: -1.7 dBm 和 3.8 dBm。然而,实验由于衍射体光栅不能真正观察,没有提出改变折射率分布的细节。下一步的研究会着重于通过光束传播有限差分三维分析方法优化入射光半径和形状,从而调制衍射光栅空间变化。

cells with wedge-shaped piezoelectric transducers excited at high-order harmonics [J]. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2010, 55(7):831-837.

- [7] 龚育良,李红卫,白世武,等. 激光外差探测超声位移的原理、方法和实验[J]. *声学学报*, 1996, 21(3): 259-264.
- GONG Y L, LI H W, BAI SH W, *et al.*. Principle, method and experiment of ultrasonic displacement measurement by laser heterodyne interferometer [J]. *Acta Acustica*, 1996, 21(3): 259-264. (in Chinese)
- [8] 杨薇,刘迎,肖立峰,等. 两级串联声光可调谐滤波器旁瓣抑制的研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(1): 328-332.
- YANG W, LIU Y, XIAO L F, *et al.*. Suppression of sidelobe levels using two cascaded single-stage acousto-optic tunable filters[J]. *ACTA Physica Sinica*, 2009, 58(1):328-332. (in Chinese)
- [9] HUO L. Inhomogeneous spatial distribution of scattering light intensity based on Bragg acousto-optic diffraction field [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(1):161-163.

- [10] YURY S D, VITALY B V. Nonreciprocity of acousto-optic interaction in collinear tunable acousto-optic filters [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(7): 67-73.
- [11] SUZUKI K, OKAMOTO A. Apodization method by nonuniform spatial distribution of diffraction gratings for photorefractive wavelength filter [J]. *ACP*, 2009;1-2.
- [12] KUSTERS J A, WILSON D A, HAMMOND D L. Optimum crystal orientation for acoustically tuned optical filters [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1974, 64(4): 434-440.
- [13] MAKK P, LENK S. Optimization of transducer configuration for bulk acousto-optic tunable filters [J]. *Optics Communications*, 2004, 241(1-3): 87-98.

作者简介:



霍雷(1983—),男,陕西西安人,博士研究生,2006年于西安电子科技大学获得学士学位,主要从事合成孔径激光雷达激光技术的研究。E-mail: muskhl@163.com

导师简介:



曾晓东(1956—),男,四川重庆人,教授,博士生导师,1982年于吉林大学物理系获学士学位,1985年、1996年于西安电子科技大学分别获硕士和博士学位,主要从事激光器光学、光纤传感与测量技术以及远轴光传播等方面的研究工作。近期研究工作主要涉及大功率半导体激光器阵列光束整形技术,激光综合孔径雷达技术,相干光通信技术,新型激光器技术,光纤温度、压力传感器,精密激光测距技术以及光谱测量技术。E-mail: xdzeng@xidian.edu.cn

● 下期预告

光学成像系统光学波前的高精度测试方法

邵晶^{1,2}, 马冬梅¹, 聂真威^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

基于扩展奈波尔-泽尼克理论,分析不同出瞳振幅分布情况对光学系统焦面处光强分布的影响。针对光学成像系统出瞳振幅实际分布状态,采用了一种新的测试光学波前的方法。为解决相位恢复算法中出瞳振幅分布不均匀和快速傅里叶变换引入计算误差的问题提供思路。通过测评实验,对一光学系统进行了测试,获得光学系统的出瞳波前值 $PV=0.1965\lambda$, $RMS=0.0224\lambda$ (测试波长 $\lambda=632.8\text{ nm}$), 此波前中主要含有像散、彗差和高阶像散等像差,分析了光学系统出瞳振幅分布形式。测评实验证明了此方法的有效性。