

晶体与电极位置失配对声光移频器性能的影响研究

樊星¹, 张伟^{1*}, 郭光辉², 苏超乾¹, 李靖¹, 章鹏^{1**}, 陈伟民¹¹重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;²中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 绵阳 621000

摘要 为了提高声光移频器的性能,对其内部声光晶体(AOC)和压电超声换能器(PZT)电极之间的位置失配特性进行研究,并深入分析 AOC 和 PZT 电极之间几类不同的几何装配错位关系。通过构造 AOC 与电极失配的三维有限元模型,在不同轴向装配错位的条件下对 AOC 中的超声波声场进行仿真分析。根据超声波的声场分布特性,可以发现几何装配错位会导致 AOC 内部形成不发生声光相互作用区域,并揭示此区域长度与错位量的关系。通过分析声光相互作用区与不发生声光相互作用区之间的光学界面,发现位置失配会在输出光中发生双光束干涉效应,其对实际光学系统的输出会产生影响。基于双光束干涉原理搭建一种测量不发生声光相互作用区域长度的实验系统,所得结果证明理论分析的合理性。

关键词 光学器件; 声光移频器; 失配特性; 干涉效应; 超声波声场

中图分类号 TN65

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2223001

Impact of Position Mismatch Between Crystal and Electrode on Performance of Acousto-Optic Frequency Shifter

Fan Xing¹, Zhang Wei^{1*}, Guo Guanghui², Su Chaoqian¹, Li Jing¹,
Zhang Peng^{1**}, Chen Weimin¹

¹Key Lab of Optoelectronic Technology & Systems Ministry of Education, College of Opto-Electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

²AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang, Sichuan 621000, China

Abstract In order to improve the performance of the acousto-optic frequency shifter, the positional mismatch characteristics between the internal acousto-optic crystal (AOC) and piezoelectric ultrasonic transducer (PZT) electrodes are studied, and several geometric assembly mismatches between AOC and PZT electrodes are analyzed. By constructing a three-dimensional finite element model of AOC and electrode mismatch, the ultrasonic sound field in the AOC is simulated and analyzed under different axial assembly dislocation conditions. According to the acoustic field distribution characteristics of ultrasound, it can be found that the geometrical assembly dislocation will lead to the formation of an area without acousto-optic interaction inside the AOC, and the relationship between the length of this area and the amount of dislocation can be revealed. By analyzing the optical interface between the acousto-optic interaction area and the non-acousto-optic interaction area, it is found that the position mismatch will cause the double-beam interference effect in the output light, which will affect the output of the actual optical system. Based on the principle of double-beam interference, an experimental system is built to measure the length of without acoustic interaction occurs region, and the results prove the rationality of the theoretical analysis.

Key words optical devices; acousto-optic frequency shifter; mismatch characteristics; interference effect; ultrasonic sound field

OCIS codes 230.1040; 260.1180; 170.7170; 120.2230

收稿日期: 2021-01-22; 修回日期: 2021-04-14; 录用日期: 2021-06-03

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(51805054)、中国博士后科学基金(2018M643405)、中国航发集团创新平台项目(SHYS-GXDPL-18)

通信作者: *zhangwei1213052@126.com; **zhangpeng@cqu.edu.cn

1 引言

声光移频器是一种常规的声光器件,其主要由声光晶体(Acousto-Optic Crystal, AOC)和压电超声换能器(Piezoelectric Transducer, PZT)两大部分组成^[1]。其中 PZT 在高频电源的驱动下可以产生沿 AOC 横向传播的高频超声波,而超声波会对沿 AOC 轴向传播的入射光波进行高频调制,若入射光波的入射角度满足动量匹配的条件,则出射光的频率及方向将发生偏移,说明频移量和偏移角度均与超声波相关联^[2]。由于声光移频器独特的移频特性,其被应用到许多测量系统中,例如测距^[3-4]、频率疏^[5]、干涉腔衰荡^[6]、相干光检测^[7-8]和线性扫频^[9]等,并在这些系统中发挥着核心器件的作用,其性能的好坏直接影响到系统的最终性能。

为了提升器件的性能,国内外研究人员从不同角度对声光移频器的特性进行了研究。吕挺等^[10]和 Mantsevich 等^[11]分别研究了温度对声光移频器的衍射效率及相位匹配频率的影响,并提出了相应的优化措施;为了将声光移频器应用在光锁相环路中以实现锁相环路的快速精密调谐,曲正等^[12]对声光移频器的插入损耗进行了研究,并提出了改善插入损耗的优化方案;毕然等^[13]研究了声光移频器的偏振保持能力和声光衍射效率,并设计了一种可偏振保持的正反馈声光调制系统;陈慧挺等^[14]对四方相铋镁酸铅-钛酸铅单晶

的声光特性进行了研究,并提出了一种性能优异的新型 AOC 材料。然而,对于声光移频器的相关研究,都是基于理想的动量匹配条件来研究 AOC 与 PZT 不存在位置失配情况下的光学特性,对于位置失配情况下的光学特性研究却鲜有报道。声光移频器在生产过程中总是存在一定的装配误差,这使得 AOC 与 PZT 的电极存在装配错位,从而形成 AOC 与 PZT 的位置失配,这可能对出射光产生影响,进而对其相关的应用产生重要的影响。因此,本文对 AOC 与电极的装配错位进行深入研究,探讨其对声光移频器输出特性的影响,为进一步提高声光移频器的性能奠定理论基础。

2 声光移频器的动量匹配

在 PZT 与 AOC 等长的理想情况下,声光移频器的典型结构如图 1(a)所示,其中 H_{AO} 和 W_{AO} 分别为 AOC 的高和宽, H_P 和 W_P 分别为 PZT 的高和厚, L 为 AOC 和 PZT 的长, AOIR 为入射光波与超声波的声光相互作用区, k_m 为入射光波的 m 级波矢量, k'_m 为极化波的 m 级波矢量, Δk_m 为入射光波的 m 级失配量, f 为入射光波的频率, K 和 f_B 分别为超声波的波矢量和频率, θ_B 为 AOC 子午面上的入射角(布拉格角), θ 为入射光角度, $\Delta\theta$ 为沿 θ 方向的倾斜错位。PZT 在射频驱动模块的驱动下,可以产生频率为 f_B 和沿 AOC 横向(y 轴)传播的超声波。

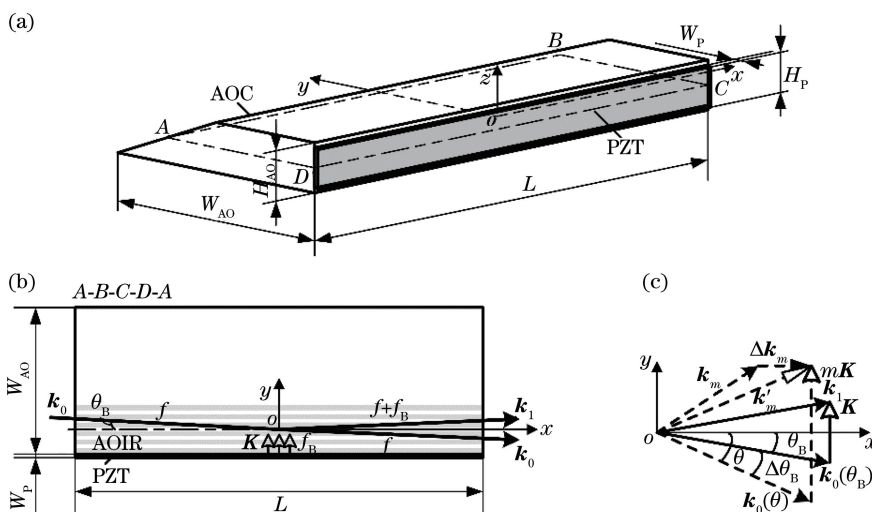


图 1 声光移频器的结构以及声光相互作用的示意图。(a) 声光移频器的典型结构;(b) 声光相互作用的示意图;(c) 动量失配的矢量图
 Fig. 1 Structure of acousto-optic frequency shifter and schematic of acousto-optic interaction. (a) Typical structure of acousto-optic frequency shifter; (b) schematic of acousto-optic interaction; (c) vector diagram of momentum mismatch

根据声光相互作用的基本原理可知,若频率为 f 的入射光波沿着 AOC 轴向传播,且在其子午面上的入射角为布拉格角 θ_B 并满足动量匹配的条件,则入射光波和超声波会相互耦合,从而产生图 1(b) 的一系列具有复合频率的极化波,最终出射光波的频率被调制为 $f + f_B$ ^[1,15]。由于超声波在晶体中传播,其衰减系数与声波频率的平方呈正相关,而 10 MHz 的高频超声波在沿着 AOC 横向传播的过程中会快速衰减,所以入射光波与超声波的 AOIR 紧靠超声发生器的电极附近,即光束紧靠 PZT。

若入射光波的圆频率和波矢量分别为 ω_0 和 k_0 , 超声波的圆频率和波矢量分别为 Ω 和 K , 则极化波的圆频率 ω_m 和波矢量 k'_m 分别为

$$\omega_m = \omega_0 + m\Omega, \quad (1)$$

$$k'_m = k_0 + mK. \quad (2)$$

当入射光不满足动量匹配的条件,即 $\Delta k_m = 0$ 时,将会产生图 1(c) 的动量失配,其失配量 Δk_m 可表示为

$$\Delta k_m = k_0 + mK - k'_m. \quad (3)$$

调整入射光的角度 θ , 使之满足

$$\sin \theta = \lambda_0 / 2n_M \lambda_s, \quad (4)$$

式中: λ_0 表示入射光在真空中的波长; n_M 表示入射光在声光相互作用区内的折射率; λ_s 表示超声波的波长。此时,零级和一级衍射光满足动量匹配的条件,故出射光由频率为 f 的零级衍射光和频率为 $f \pm f_B$ 的一级衍射光组成,且一级衍射光的衍射效率理论上可以达到 100%^[1]。

3 位置失配的特性分析

3.1 位置失配的定性分析

在图 1(a) 的声光移频器中, PZT 与 AOC 的几何长度相等,且两者的位置关于子午面呈对称关系,而器件的声光特性也都基于此理想条件进行分析的。但当两者的相对位置发生失配时,可能造成超声波场在 AOC 中分布不均匀。即使入射光的入射角满足布拉格角,但是由于入射光波与

超声波场的相互位置关系发生了改变,依然可能出现动量失配的现象,从而影响声光移频器的性能。

受到声光移频器生产工艺条件的限制, PZT 电极与 AOC 之间总是存在一定的装配误差,所以其位置失配是必然存在的。仔细分析两者的空间位置关系,可将其位置失配归纳为沿 z 轴方向的横向错位 ΔH 、沿 θ 方向的倾斜错位 $\Delta\theta$ 和沿 x 轴方向的轴向错位 ΔL 三大类,如图 2 所示。

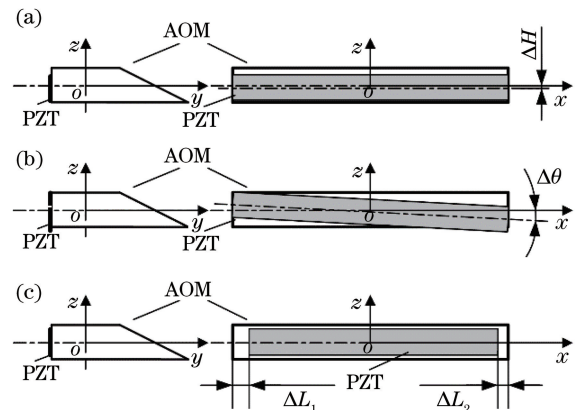


图 2 三类典型的装配错位关系示意图。

(a) 横向错位; (b) 倾斜错位; (c) 轴向错位

Fig. 2 Three typical assembly dislocation relation diagrams. (a) Lateral dislocation; (b) tilt dislocation; (c) axial dislocation

根据声光移频器的生产工艺可知,第三类沿 x 轴方向的轴向错位为最主要的错位因素,因此重点研究此类错位及其对声光移频器的具体影响。

仔细分析第三类沿 x 轴方向的轴向错位 ΔL , 其在子午面上可进一步分为三种轴向错位,即双侧错位、单侧错位以及等效单侧错位,如图 3 所示。从图 3 可以看到, PZT 与 AOC 的三种错位都因 PZT 的有效作用长度短于 AOC 而造成声光相互作用区的长度小于 AOC, 从而在 AOC 内部形成一个或两个不发生声光相互作用的区域。由于双侧错位和单侧错位比较常见,因此主要针对这两类装配错位进行深入研究。

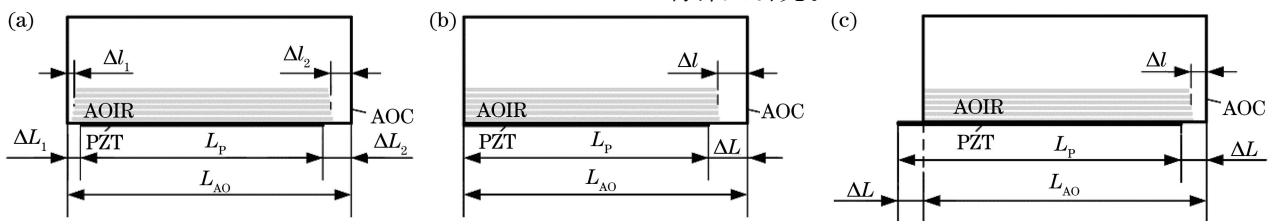


图 3 典型的轴向错位示意图。(a) 双侧错位; (b) 单侧错位; (c) 等效单侧错位

Fig. 3 Typical axial dislocation diagram. (a) Bilateral dislocation; (b) unilateral dislocation; (c) equivalent unilateral dislocation

3.2 位置失配的声场特性分析

图 3 定性地反映了声光移频器内部 AOC 与 PZT 电极之间的位置错位关系。为了定量研究位置错位对声光相互作用区的具体影响,使用 COMSOL Multiphysics 软件进行数值仿真,模拟 PZT 所产生的超声波在 AOC 中的分布以确定 AOC 与电极的失配情况,以及电极和 AOC 的间隙尺寸与不发生声光相互作用区长度的函数关系。

首先,构造仿真模型。AOC 采用声光材料中常用的二氧化碲,其长为 20.0 mm,高为 2.5 mm,宽为 10.0 mm。PZT 的电极采用材料库中的 PZT-5H 进行模拟仿真,参考实际产品尺寸,其高设为 2.00 mm,厚设为 0.08 mm。分别构造图 4(a)和图 4(b)的两种失配模型,PZT-5H 的长度均为 18 mm。其中图 4(a)对应于图 3(a)的双侧错位,PZT 的电极居中,其为失配模型一;图 4(b)对应于图 3(b)的单侧错位,PZT 的电极居左,其为失配模型二。设置 PZT-5H 的振动频率为 40 MHz,通过

有限元仿真计算可以得到 PZT-5H 所产生的超声波在 AOC 中的声场分布,如图 4 所示。其中图 4(a)和图 4(b)分别表示失配模型一和失配模型二所产生的超声波在 AOC 表面上的声压级分布,用来反映超声波的总体分布趋势;图 4(c)和图 4(d)分别表示失配模型一和失配模型二所产生的超声波在 AOC 的 $z=0$ 截面上的声压级等值线,用来表征光学子午面上的声压级分布。由于失配模型一的两侧均处于失配状态,因此图 4(c)中声压级的中间位置呈均匀分布,左右两侧出现明显的声压级锐减的趋势。由于失配模型二的右侧处于失配状态,因此图 4(d)中声压级的左侧位置呈均匀分布,右侧出现明显的声压级锐减的趋势。根据理论分析可知,超声波与光波的相互耦合会形成声光相互作用区,但在电极错位的位置由于超声波的声压级锐减,所以无法形成声光相互作用的区域。因此,从声场仿真结果来看,电极与 AOC 的失配形成了不发生声光相互作用的区域。

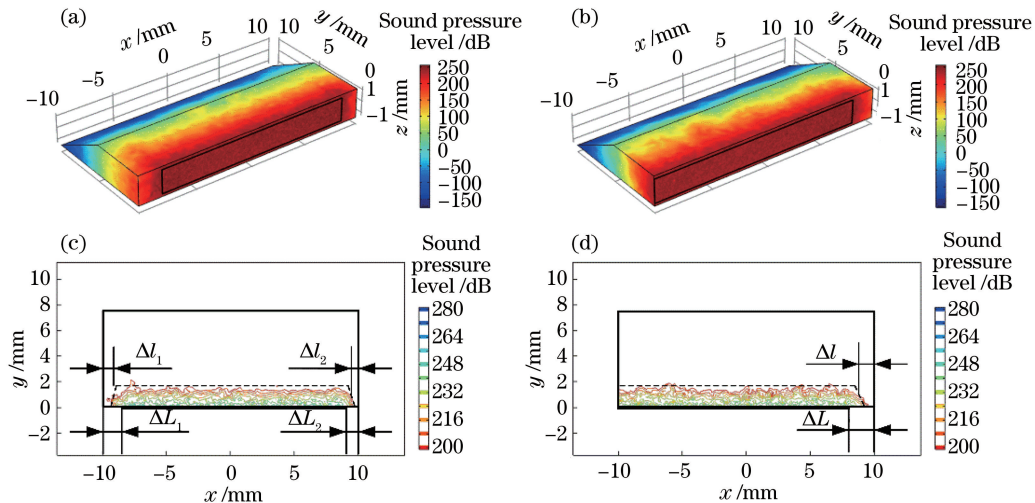


图 4 仿真模型及超声波在 AOC 中的声压级分布图。(a) 双侧错位的表面声压级;(b) 单侧错位的表面声压级;

(c) 双侧错位的子午面声压级等值线;(d) 单侧错位的子午面声压级等值线

Fig. 4 Simulation model and sound pressure level distribution of ultrasonic waves in AOC. (a) Surface sound pressure level of bilateral dislocation; (b) surface sound pressure level of unilateral dislocation; (c) sound pressure level isolines of meridian plane of bilateral dislocation; (d) sound pressure level isolines of meridian plane of unilateral dislocation

通过计算可知,当声压级下降至 210 dB 时,衍射效率出现明显的下降,因此可以认为此声压级等值线是 3.1 节中声光相互作用区与不发生声光相互作用区的边界。为了进一步观察 PZT 电极长度 L_p 的变化,在 $10 \text{ mm} < L_p < 20 \text{ mm}$ 之间以 $\Delta L_p = 0.5 \text{ mm}$ 为步长分别逐次改变图 4(a)和图 4(b)中 PZT-5H 的长度,通过有限元分析计算声压级为 210 dB 的等值线,从而确定电极与 AOC 的间隙尺

寸变化 ΔL 与不发生声光相互作用区长度 Δl 的关系。图 5(a)和图 5(b)分别为两种失配模型下 ΔL 和 Δl 之间的关系及其拟合曲线。

从图 5(a)可以看到,由于声光相互作用区的长度不会超过 AOC,当电极长度大于 19.0 mm,即 ΔL 小于 1.0 mm 时,数据已具有非线性,因此舍去。利用最小二乘法对图 5(a)的散点进行一阶多项式拟合,得到的拟合函数为

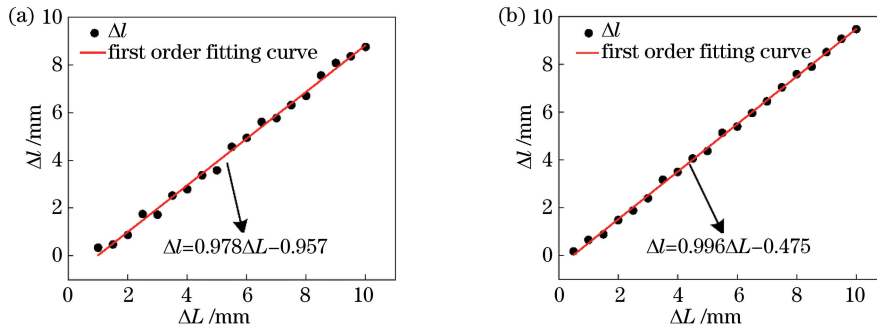


图 5 失配下的 ΔL 和 Δl 关系及其拟合曲线。(a) 双侧错位; (b) 单侧错位
Fig. 5 Relationship between ΔL and Δl under mismatch condition and their fitting curve.

(a) Bilateral dislocation; (b) unilateral dislocation

$$\Delta l = 0.978\Delta L - 0.957. \quad (5)$$

因此在双侧错位的情况下, 间隙与不发生声光相互作用区长度的数学关系为

$$\Delta l = \begin{cases} 0, & \Delta L \leq 0.978 \text{ mm} \\ 0.978\Delta L - 0.957, & \Delta L > 0.978 \text{ mm} \end{cases} \quad (6)$$

从图 5 (b) 可以看到, 当电极长度大于 19.5 mm, 即 ΔL 小于 0.5 mm 时, 数据已具有非线性, 因此舍去。利用最小二乘法对图 5 (b) 的散点进行一阶多项式拟合, 得到的拟合函数为

$$\Delta l = 0.996\Delta L - 0.475. \quad (7)$$

因此在单侧错位的情况下, 间隙与不发生声光相互作用区长度的数学关系为

$$\Delta l = \begin{cases} 0, & \Delta L \leq 0.477 \text{ mm} \\ 0.996\Delta L - 0.475, & \Delta L > 0.477 \text{ mm} \end{cases} \quad (8)$$

上述仿真结果表明, 当 AOC 与电极失配时, 在二者失配的位置会出现有效声压级的降低, 无法进行声光相互作用, 为此形成不发生声光相互作用的区域。此外, 电极和 AOC 的间隙尺寸 ΔL 与不发生声光相互作用区长度 Δl 呈线性关系。

3.3 失配的光学特性分析

当电极与 AOC 存在位置失配时, 在 AOC 内会形成不发生声光相互作用的区域, 其会影响声光移频器的光学特性, 而当在测距^[3-4]、频率疏^[5]、干涉腔衰落^[6]、相干光检测^[7-8]和线性扫频^[9]等场合应用时, 其也会对相应的系统产生影响, 因此必须进一步研究不发生声光相互作用区域的光学特性。

考虑到声光相互作用区中晶体的折射率与不发生声光相互作用区不同, 为了分析方便, 将图 4 (c) 和图 4 (d) 等效简化为图 6 (a) 和图 6 (b), 并设置一组不存在位置失配的对照, 如图 6 (c) 所示, 其中 n

和 n_M 分别为光在不发生声光相互作用区和声光相互作用区中晶体的折射率, n_0 为光在空气中的折射率, I_1 为直接透射光, I_2 和 I_3 表示两束反射光。

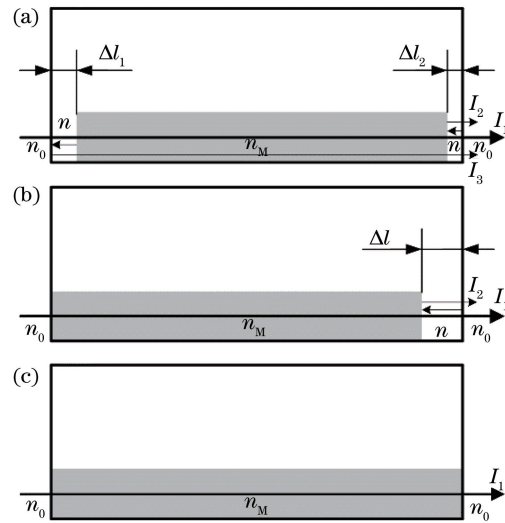


图 6 入射光在不同情况下的等效传播路径。

(a) 双侧错位; (b) 单侧错位; (c) 位置匹配

Fig. 6 Equivalent propagation path of incident light under different conditions. (a) Bilateral dislocation; (b) unilateral dislocation; (c) position matching

由于声光相互作用区中晶体的折射率与不发生声光相互作用区不同 (即 $n_M \neq n$), 所以在二者之间会形成一个等效的光学界面; 此外在 AOC 与空气之间, 也因两者的折射率不同 (即 $n \neq n_0$) 而存在界面。光波从外界入射到晶体后, 在图 6 (a) 双侧错位的情况下, 输入光会经历 4 个光学界面; 在图 6 (b) 单侧错位的情况下, 输入光会经历三个光学界面。由于光束在光学界面上存在部分反射, 而出射光就是部分反射光与直接透射光的叠加, 其会影响输出光的特性。当入射光为相干光时, 这两束光就会形成双光束干涉, 则影响被放大。由于声光相互作用区的长度较长, 而相干光的相干长度有限, 为

此仅在不发生声光相互作用区域的两个界面才可能形成明显的双光束干涉。

根据物理光学的原理,双光束干涉^[16]的透射干涉光强为

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) - 2\sqrt{R_1R_2} \left[1 - \cos\left(\frac{4\pi n}{\lambda}\Delta l\right) \right] I_0(\lambda), \quad (9)$$

式中: $I_0(\lambda)$ 和 λ 分别表示入射光的光强及波长; R_1 和 R_2 分别表示不发生声光相互作用区域两侧界面的反射率。

在图 6 的三种情况下,当入射光为相干光时,得到的透射干涉光谱曲线如图 7 所示。

利用光波长 λ 与光频 ν 和光速 c 之间的关系 $\nu=c/\lambda$,将波长 λ 转换为频率 ν ,并令等效频域中峰值位置的角频率 $\omega_1=4\pi n\Delta l/c$,则(9)式可转换为

$$I(\nu) = I_0(\nu) - 2\sqrt{R_1R_2} [1 - \cos(\omega_1\nu)] I_0(\nu). \quad (10)$$

对(9)式进行傅里叶变换,表达式为

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\nu) \exp(-j\omega\nu) d\nu. \quad (11)$$

不同情况下的频谱如图 8 所示。经过带通滤波处理后可以找到频率峰值位置 ω_1 ,则不发生声光相互作用区域的长度^[17]可表示为

$$\Delta l = \frac{\omega_1 c}{4\pi n}. \quad (12)$$

由于图 6 中的部分反射光强度 I_2 和 I_3 远远小于直接输出光强度 I_1 ,因此在某些条件下对输出光的影响可以忽略不计,这也是其一直没有被关注的原因。但是在图 9 的外差干涉间隙测量系统中^[4,18],这个影响就绝对不能忽略不计,其中SLD

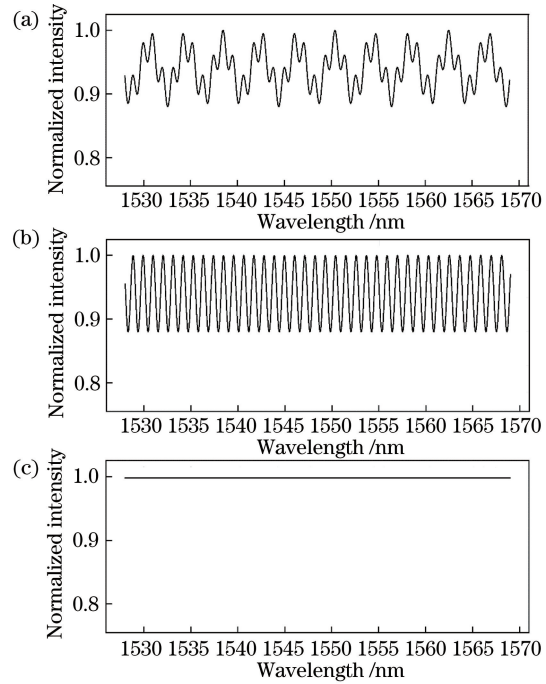


图 7 不同情况下的透射干涉光谱曲线。

(a) 双侧错位;(b)单侧错位;(c)位置匹配

Fig. 7 Transmission interference spectral curves under different conditions. (a) Bilateral dislocation; (b) unilateral dislocation; (c) position matching

为超辐射发光二极管宽带光源,PC为计算机。由系统输出的功率谱信号如图 10 所示,其中 AOFs 为该功率谱强度峰是由声光移频器引起的干扰峰。

从图 10 可以看到,由于实际声光移频器存在电极错位,所以其内部在声光相互作用区与不发生声光相互作用区之间会形成等效界面,为此在输出结果中形成两个干扰峰,从而导致测量结果的误判以及测量范围的压缩。

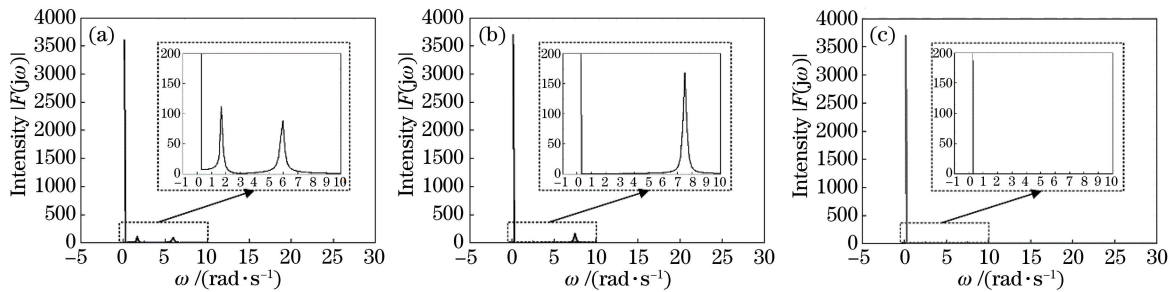


图 8 不同情况下的频谱及其局部放大图。(a)双侧错位;(b)单侧错位;(c)位置匹配

Fig. 8 Frequency spectrum and its partial enlargement under different conditions. (a) Bilateral dislocation; (b) unilateral dislocation; (c) position matching

4 实验验证

根据理论分析可知,当电极与 AOC 之间存在位

置失配时,AOC 的内部会形成不发生声光相互作用的区域,这会导致声光移频器的光学输出产生双光束干涉效应。为了证明这一结论,搭建图 11 的不发生

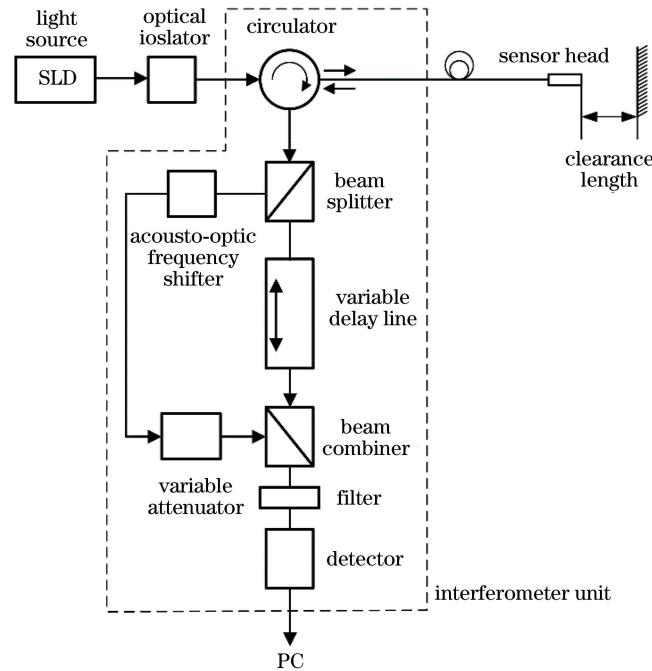


图 9 应用声光移频器的光学系统

Fig. 9 Optical system using acousto-optic frequency shifter

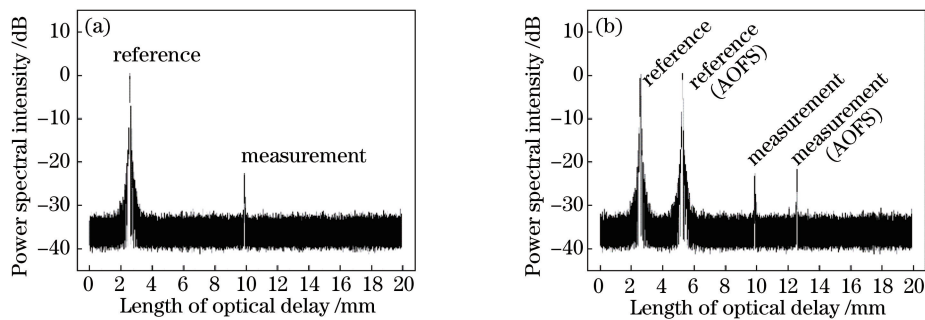


图 10 系统输出的功率谱信号。(a)无错位的理想功率谱;(b)存在轴向错位的实际功率谱

Fig. 10 Power spectrum signal of system output. (a) Power spectrum without mismatch; (b) power spectrum with mismatch

声光相互作用区的长度测量系统,首先将宽带光通入声光移频器中,然后通过光谱仪来测量透射光谱。

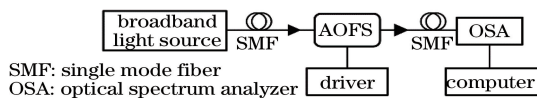


图 11 不发生声光相互作用区域的长度测量系统

Fig. 11 Length measurement system without acoustic interaction occurs region

基于图 11 的系统实际测量了中国电子科技集团公司第二十六研究所提供的 4 个型号 (SGYF40-1550-1 型、SGYF80-1550-1 型、SGYF100-1550-1 型和 SGYF150-1550-1 型) 的声光移频器,对照出厂记录可知所有样品均是在单侧错位的情况下进行测试,最后得到的透射光谱如图 12 所示。采用傅里叶变换解调算法^[16-17]对每组光谱进行解调,解调值如表 1 所示。从表 1 可以看到,对于

不同型号的声光移频器,其不发生声光相互作用区域的长度是不相等的,这是由于不同型号的声光移频器的失配间隙存在较大差异,这半定量地证明了不发生声光相互作用区域的存在,同时验证了声光移频器的光学输出存在双光束干涉效应。由于受限于企业的生产工艺,所以无法加工特定失配尺寸的声光移频器,也难以对声光移频器的失配尺寸进行准确测量,因此无法验证不发生声光相互作用区域的长度与失配尺寸之间的定量关系。

为了标定测量结果的准确性,采用一块厚度 $h = 1440 \mu\text{m}$ 的玻璃片替代图 11 中的声光移频器,测得的透射光谱如图 13 所示。通过解算可以求出其厚度测量值 $h' = 1438.62 \mu\text{m}$,与真实值相符,因此说明图 11 的测量系统可以准确测量不发生声光相互作用区域的长度 Δl 。

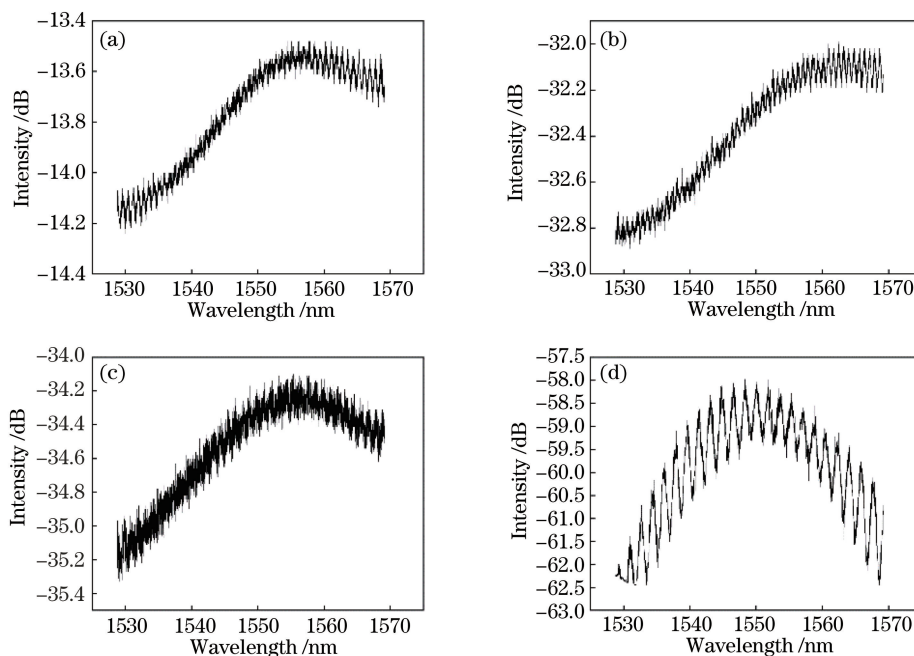


图 12 不同声光移频器的透射光路光谱。(a) SGYF40-1550-1;(b) SGYF80-1550-1;(c) SGYF100-1550-1;(d) SGYF150-1550-1

Fig. 12 Transmission spectra of different acousto-optic frequency shifters. (a) SGYF40-1550-1; (b) SGYF80-1550-1; (c) SGYF100-1550-1; (d) SGYF150-1550-1

表 1 不同声光移频器中不发生声光相互作用区域的长度

Table 1 Length of without acoustic interaction occurs region in different acousto-optic frequency shifters

| Type | SGYF40-1550-1 | SGYF80-1550-1 | SGYF100-1550-1 | SGYF150-1550-1 |
|-----------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| Length/ μm | 1458.07 | 1532.67 | 1045.99 | 1289.19 |

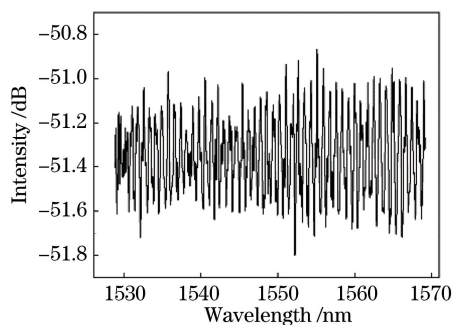


图 13 玻璃片的透射光谱图

Fig. 13 Transmission spectrum of glass plate

5 结 论

通过对声光移频器内 AOC 和电极之间的失配问题进行定性分析,可以发现存在三类位置失配。通过 AOC 内部声场的有限元模型可以发现电极的轴向错位会形成不发生声光相互作用的区域,且此区域长度随着错位量的增加呈线性增大。同时发现,由于不发生声光相互作用区域的存在,在 AOC 内部会形成等效光学界面。当以相干光入射时,等效光学界面的部分反射光会叠加到出射光上,从而

产生双光束干涉效应,进而影响声光移频器的输出特性,实验结果证实了此理论分析的合理性。

致谢 中国电子科技集团公司第二十六研究所吴中超高级工程师为本文实验提供了实验器件和实验平台,冉洪清和刘滕两位研究人员在实验过程中给予了指导和大力帮助,在此一并致以衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] Xu J P. Principle, design and application of acoustooptic devices [M]. Beijing: Science Press, 1982: 31-50.
徐介平. 声光器件的原理、设计和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 31-50.
- [2] Yu K X, Ding X H, Pang Z G. Acousto-optic principles and acousto-optic devices [M]. Beijing: Science Press, 2011: 55-87.
俞宽新, 丁晓红, 庞兆广. 声光原理与声光器件 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 55-87.
- [3] Zou F, Zheng T X, Zhang G Y, et al. Research on linear sweep distance measurement based on AOM acousto-optic modulator[J]. Applied Laser, 2020, 40

- (6): 1132-1137.
邹峰, 郑天雄, 张官扬, 等. 基于 AOM 声光调制器线性扫频测距研究 [J]. 应用激光, 2020, 40(6): 1132-1137.
- [4] Kempe A, Schlamp S, Rösger T, et al. Low-coherence interferometric tip-clearance probe [J]. Optics Letters, 2003, 28(15): 1323-1325.
- [5] Shao L B, Sinclair N, Leatham J, et al. Integrated microwave acousto-optic frequency shifter on thin-film lithium niobate [J]. Optics Express, 2020, 28(16): 23728-23738.
- [6] Zhang H R, Zhou C M, Fan D, et al. Fiber cavity ring-down refractive index sensing method based on frequency-shifted interferometry [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170627.
张浩然, 周次明, 范典, 等. 光纤频移干涉腔衰减振荡率传感方法研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170627.
- [7] He N, Xie Z L. Effect of beam characteristic on detection efficiency for the coherent optical detection system based on acousto-optic deflection [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0206007.
何宁, 谢朝玲. 光束特性对声光偏转相干光探测效率的影响 [J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0206007.
- [8] Liao X, He N, Chen M, et al. Application of coherent optical detection technology based on acousto-optic deflecting effect [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(s2): 278-282.
廖欣, 何宁, 陈明, 等. 声光偏转效应在相干光检测的应用 [J]. 光学学报, 2008, 28(s2): 278-282.
- [9] Li H B, Tan Z W, Kong M L, et al. Linear frequency scanning laser based on acousto-optic modulation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1201004.
李宏博, 谭中伟, 孔梦龙, 等. 基于声光调制的线性扫频激光器 [J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1201004.
- [10] Lü T, Duan Y X, Xiang J F, et al. Temperature characteristics of 780 nm acousto-optic modulator [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0812001.
吕挺, 段玉雄, 项静峰, 等. 780 nm 声光调制器的温度特性 [J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0812001.
- [11] Mantsevich S N, Kostyleva E I. Examination of the temperature influence on phase matching frequency in tunable acousto-optic filters [J]. Ultrasonics, 2019, 91: 45-51.
- [12] Qu Z, Zhang L, Tong S F, et al. Insertion loss characteristics of acousto-optic frequency shifter in optical phase-locked loop and its optimization [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 100609.
曲正, 张磊, 佟首峰, 等. 光锁相环路中声光移频器插入损耗特性研究及优化 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 100609.
- [13] Bi R, Chen L R, Li J P, et al. Acousto-optic diffraction efficiency enhancement system for polarization maintaining of arbitrarily polarized light [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 0123002.
毕然, 陈力荣, 李晋鹏, 等. 任意偏振光保偏的声光衍射效率增强系统的研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 0123002.
- [14] Chen H T, He C J, Li Z Q, et al. Acousto-optic effect of tetragonal lead magnesium niobate-lead titanate single crystal [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2020, 49(4): 587-591, 612.
陈慧挺, 赫崇君, 李自强, 等. 四方相铌镁酸铅-钛酸铅单晶的声光特性研究 [J]. 人工晶体学报, 2020, 49(4): 587-591, 612.
- [15] Mahmoud M, Mahmoud A, Cai L T, et al. Novel on chip rotation detection based on the acousto-optic effect in surface acoustic wave gyroscopes [J]. Optics Express, 2018, 26(19): 25060-25075.
- [16] Chen W M, Lei X H, Zhang W, et al. Recent progress of optical fiber Fabry-Perot sensors [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328010.
陈伟民, 雷小华, 张伟, 等. 光纤法布里-珀罗传感器研究进展 [J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328010.
- [17] Kong M L, Tan Z W, Zhang L. Application and implementation of optical Fourier transform based on optical fiber [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(11): 110701.
孔梦龙, 谭中伟, 张琳. 基于光纤的光学傅里叶变换实现方法及应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(11): 110701.
- [18] Su C Q. Study on radial clearance measurement technology of engine [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019: 51-61.
苏超乾. 发动机径向间隙测量技术的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2019: 51-61.