

## 基于双片锯齿电极的宽带声光偏转器

汪昱聪<sup>1,2</sup>, 王梓<sup>1\*</sup>, 梁力<sup>1,2</sup>, 冯奇斌<sup>1</sup>, 吕国强<sup>2</sup><sup>1</sup>合肥工业大学特种显示与成像技术安徽省技术创新中心, 特种显示技术国家工程实验室, 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009;<sup>2</sup>合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

**摘要** 传统具有单片换能器结构的声光偏转器存在布拉格带宽与衍射效率的权衡关系。为了增加布拉格带宽而又不降低衍射效率, 提出一种基于双片锯齿电极的换能器结构的声光偏转器。首先采用双片换能器结构实现超声跟踪, 使超声波方向能随频率改变, 提高布拉格带宽。在此基础上应用锯齿形电极增大超声波的发散程度, 进一步提高布拉格带宽。仿真结果表明, 电极的锯齿边缘使声波波动性增大, 即增大了超声波的发散程度。实验结果表明, 在相同实验条件下, 具有双片锯齿电极换能器结构的声光偏转器的 3 dB 带宽比单片矩形电极换能器结构的声光偏转器高 62.5%。

**关键词** 声光偏转器; 超声跟踪; 锯齿电极; 布拉格带宽; 衍射效率

中图分类号 TN65 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230590

## 1 引言

声光偏转器主要原理是光束入射到有声波的介质中会发生偏转<sup>[1-4]</sup>。1922年, Brillouin<sup>[5]</sup>首次从理论上提出声光效应。随后, 激光的发明改善了声光互作用的研究条件, 推动声光器件的理论和应用研究, 同时, 声光器件的发展扩充了激光的应用方向<sup>[6-7]</sup>。作为光学系统中的一种基础元器件, 声光偏转器能控制激光的偏转方向, 使电、声、光信号之间发生转换, 实现光束角度的偏移<sup>[8-9]</sup>。声光偏转器在激光投影、微加工、气象雷达、光刻机等很多领域都已得到应用<sup>[10-13]</sup>。

现今, 很多国内外学者做了大量的工作来优化声光器件的性能。Goutzoulis等<sup>[14-18]</sup>的研究表明多片换能器结构能使超声跟踪技术得以实现, 提高器件的带宽, 而多片换能器之间的连接方式会影响超声波的能量利用率。Voloshinov等<sup>[19]</sup>从理论上证明了声光器件中声光互作用长度对性能的影响。俞宽新等<sup>[20]</sup>对多片换能器结构超声跟踪技术进行了具体研究, 研究表明多片换能器结构与单片换能器结构相比, 相对长度增加了 34.7%, 相对带宽增大了 9.1%。还有一些学者对声光器件电极的形状进行了研究, 证实了电极形状对声场有一定影响<sup>[21-23]</sup>。Wu等<sup>[24]</sup>从理论上分析了矩形、菱形和六边形电极的声近场分布特征, 表明六边形电极的声场分布最均匀, 具有良好的性能。这些研究

对于提高声光器件的性能至关重要。

布拉格带宽是声光偏转器品质的重要评价指标, 定义为声光衍射效率从最大值下降至最大值的一半时所对应的频率范围, 理想情况下, 声光偏转器在布拉格带宽内的频率段都能正常工作。布拉格带宽越大, 则声光偏转器适用的频率范围越广。单片换能器结构的声光偏转器产生的超声波发散角度小且方向固定, 入射光的方向也固定<sup>[25]</sup>, 因此单片换能器结构的声光偏转器只能在较小频率范围内使入射光发生布拉格衍射, 布拉格带宽较小。使用减小换能器长度或声光互作用长度的方法增大超声波的发散角来提高布拉格带宽, 又会导致声光衍射效率下降。为了提高布拉格带宽而不降低声光衍射效率, 本文提出一种具有双片锯齿电极换能器结构的声光偏转器。串联双片换能器形成反相驱动, 产生的超声波声束能随频率变化改变传播方向, 使声光偏转器在更大频率范围内完成布拉格衍射, 提高超声能量利用率, 增大布拉格带宽; 双片换能器的总声光互作用长度与单片换能器相同, 即能在不改变换能器总长度的条件下保证较高的衍射效率; 双片换能器的表电极均采用锯齿形电极, 可增大超声波的发散程度, 进一步提高布拉格带宽。仿真证明了电极锯齿边缘使超声波波动性增大的结论。实验结果表明, 具有双片锯齿电极换能器结构的声光偏转器能获得较大带宽, 并且衍射效率较高。

收稿日期: 2023-02-23; 修回日期: 2023-05-16; 录用日期: 2023-05-29; 网络首发日期: 2023-06-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3602500, 2021YFB3602502)、国家工程技术研究中心开放课题项目(OCM-2020-03)

通信作者: \*wangzi@hfut.edu.cn

## 2 原 理

声光偏转器主要由驱动电源、换能器和声光晶体组成。换能器又分为表电极、压电晶体、底电极 3 部分,其中电极作为重要联系媒介,其几何形状对声光晶体声场分布有着关键作用。如图 1 所示,激光以固定角度入射到声光晶体内,驱动电源施加电压,使换能器将电振荡转换为超声振荡,超声信号传播到声光晶体内,形成超声波。超声波传播的主方向称为  $a$  方向, $a$  方向声束使满足布拉格衍射条件的激光在声光晶体内发生衍射,从而产生激光方向的偏转。正常布拉格衍射条件要求超声波的方向必须平分入射光和衍射光,入射角为  $\theta_i$ ,入射光与衍射光之间的夹角等于布拉格角的 2 倍,布拉格角记为  $\theta_B$ ,可表示为

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda f}{2nv}, \quad (1)$$

式中: $\lambda$  为入射光波长; $f$  为换能器工作频率; $n$  为声光晶体折射率; $v$  为超声波在声光晶体内的传播速度。由式(1)可知,当频率  $f$  改变时,布拉格角  $\theta_B$  随之改变,表明不同频率处满足匹配条件的声波矢量方向不同。

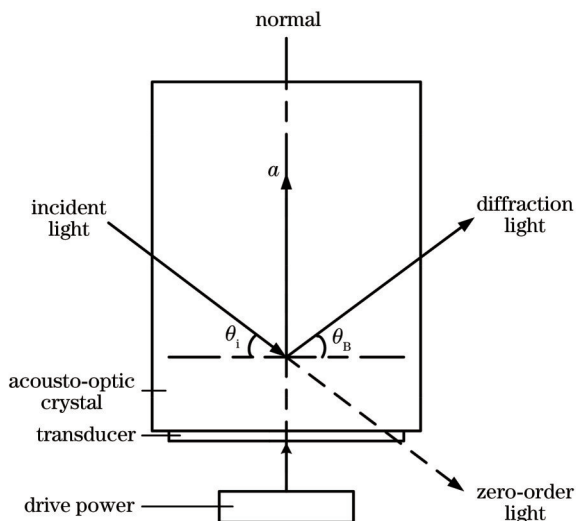


图 1 声光偏转器的衍射原理

Fig. 1 Diffraction principle of acousto-optic deflector

传统的具有单片换能器结构的声光偏转器振动产生的超声波存在一定角度的发散,但超声波传播方向固定,能量主要集中于一个方向,不随频率变化而改变。声光偏转器在实际工作时,激光入射的方向不变,单片换能器产生的超声波主方向也不变,导致激光只能在较小的频率范围内实现布拉格衍射,即带宽较小。

声光偏转器的带宽包括电声转换中的换能器带宽和声光转换中的布拉格带宽。换能器带宽指驱动电源的电功率能转换为超声波功率的频率范围。在声光互作用介质中,超声波能使入射激光完成布拉格衍射的频率范围就是布拉格带宽。由于布拉格衍射需要满足动量匹配条件,为了能在较大频率范围内发生布拉格

衍射,要求能在更大频率范围内提供方向合适的超声波。以下围绕如何增大声光偏转器的布拉格带宽展开讨论。

增大布拉格带宽最简单的方法是减小换能器长度,使超声波发散角度增大,能在更大频率范围内满足平分入射光与衍射光的条件。但换能器长度过短,又会影响声场的均匀性,使声光衍射效率降低。同时超声波传播角度过于发散,能量不够集中,会导致能量利用率下降。因此,换能器长度对声光衍射的影响决定了声光偏转器的带宽与衍射效率之间的权衡关系。

为了提高带宽又不减小换能器长度,可采用基于超声跟踪原理的双片换能器结构的声光偏转器。声光相互作用区域的总长度不变,而换能器分为两片,各换能器产生的超声波相互干涉、叠加。不同频率时,形成的超声波声束能随满足布拉格衍射条件的方向的变化改变传播方向,使声光偏转器能在更大频率范围内完成布拉格衍射,提高超声能量利用率,增大布拉格带宽。具有双片换能器结构的声光偏转器按照驱动电源连接方式的不同可分为同相驱动和反相驱动。同相驱动时,超声波零级声束集中了最多的超声能量,但零级声束的方向不会随频率变化而改变,能量利用率较低。反相驱动时,超声波中可以被利用的声束的方向会随频率变化而改变。因此,采取反相驱动方式。双片换能器结构声光偏转器还分为阶梯结构和平面结构,阶梯结构产生的超声波能量主要集中于超声主方向并随频率变化而变化,而平面结构产生的超声波干涉加强并形成两个对称的方向,只有一个方向上的能量能使激光实现衍射,因此阶梯结构的超声能量利用率比平面结构高。但对于传统的阶梯结构,要求在声光晶体表面打磨出相同的阶梯,制造工艺相当复杂,相比之下,平面结构易于加工,更适于大批量生产应用。综合比较,采取平面结构声光偏转器。

基于超声跟踪原理,在双片换能器结构的基础上,采用锯齿形表电极,如图 2 所示。电极的锯齿沿入射光传播方向周期性排列,锯齿边缘发射的声波沿入射光传播方向填充了锯齿之间的无声区域,导致边缘入射光的声光互作用长度更长,保证了声光偏转器的衍射效率。同时,锯齿边缘使声波发生衍射,导致超声波的发散角扩大,跟踪误差减小,能使入射光在更多频段完成衍射,从而增加器件带宽。

布拉格带宽可通过布拉格损耗的概念来计算,即利用起作用的超声方向上的超声功率恰好为超声主方向上的超声功率的 1/2 时的频率范围<sup>[2]</sup>来计算:

$$B_L = -10 \log \frac{P_a(\theta_i - \theta_B)}{P_a(0)} = 3 \text{ dB}, \quad (2)$$

式中: $B_L$  是超声功率利用率的分贝表示,布拉格损耗(BL)为 3 dB 时的频率范围称为 3 dB 带宽; $P_a(\theta_i - \theta_B)$  表示起作用的超声方向上的超声功率, $\theta_i$  表示入射角,

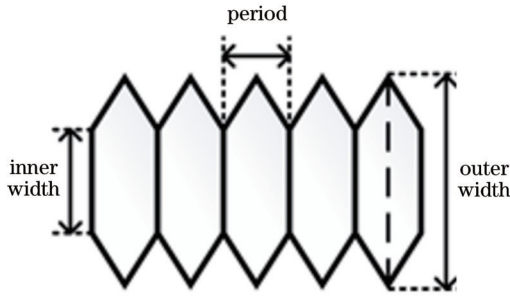


图2 锯齿电极的几何特征

Fig. 2 Geometric characteristic of sawtooth electrode

$\theta_B$  表示布拉格角;  $P_a(0)$  表示超声主方向上的声功率。超声波的发散角越小, 则布拉格带宽越小。双片锯齿电极换能器结构的声光偏转器的电极锯齿边缘使超声波的发散角增大, 因此带宽增加。

双片锯齿电极换能器结构的声光偏转器不仅能增加带宽, 而且能改善其他参数。声光偏转器的扫描角计算公式为

$$\Delta\alpha = \frac{\lambda}{v} \Delta f, \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  表示光波长;  $v$  表示声速;  $\Delta f$  表示带宽。当光波长  $\lambda$  和声速  $v$  不变, 双片锯齿电极换能器结构使带宽  $\Delta f$  增大, 则扫描角  $\Delta\alpha$  增大, 表明声光偏转器的偏转角的变化范围增大。而扫描角  $\Delta\alpha$  和带宽  $\Delta f$  同时增大, 则声光偏转器的扫描率  $\frac{d\alpha}{df} = \frac{\lambda}{v}$  不变。

声光偏转器的可分辨点数为

$$N = R \frac{\Delta\alpha}{\Delta\varphi}, \quad (4)$$

式中:  $R$  为常数;  $\Delta\varphi$  表示光束发散角。在相同的实验条件下, 假设光束发散角  $\Delta\varphi$  不变, 常数  $R$  不变, 双片锯齿电极换能器结构的声光偏转器的扫描角  $\Delta\alpha$  增大, 则声光偏转器的可分辨点数  $N$  增多, 激光束偏转范围内可分辨的光斑数增多。

偏转器的偏转速度往往用偏转时间来表示:

$$\tau = \frac{W}{v}, \quad (5)$$

式中:  $W$  表示激光束的宽度。在相同的实验条件下, 激光束的宽度  $W$  与超声速度  $v$  不发生改变, 因此, 双片锯齿电极换能器结构的声光偏转器的偏转速度不变。

### 3 仿 真

根据角谱理论<sup>[26]</sup>, 可以得到声光晶体内任意平面处的声场分布。角谱理论的公式为

$$U_2(x_2, y_2) = F^{-1}\{F[U_1(x_1, y_1)] \cdot H(f_x, f_y)\}, \quad (6)$$

式中:  $F$  表示傅里叶变换;  $F^{-1}$  表示傅里叶逆变换;  $U_1(x_1, y_1)$  为声波传播起始面的复振幅分布;  $x_1, y_1$  分别表示声传播起始面内的横、纵坐标;  $U_2(x_2, y_2)$  为声

光晶体内不同高度处的复振幅分布;  $x_2, y_2$  分别表示声波传播至声光晶体内某一高度处的平面内的横、纵坐标。  $H(f_x, f_y)$  为与传播高度  $Z$  相关的传递函数, 计算公式为

$$H(f_x, f_y) = \begin{cases} \exp\left(i \frac{2\pi}{\Lambda} Z \sqrt{1 - \Lambda^2 f_x^2 - \Lambda^2 f_y^2}\right), & \Lambda^2 f_x^2 + \Lambda^2 f_y^2 < 1 \\ 0, & \Lambda^2 f_x^2 + \Lambda^2 f_y^2 \geq 1 \end{cases}, \quad (7)$$

式中:  $\Lambda$  为超声波的波长;  $f_x, f_y$  分别为声光晶体内沿  $X$  轴、 $Y$  轴的空间频率。

如图 3 所示, 利用角谱法计算声光晶体中声场不同高度平面的复振幅分布, 得到所有平面的复振幅信息, 将其转换为相位信息, 提取声光晶体内与换能器平面 ( $XY$  面) 垂直的所有平面 (所有  $YZ$  面) 中处于  $X$  轴中心位置处的平面的相位分布。仿真如图 4 所示的双片矩形电极和双片锯齿形电极的声场, 其中单片矩形电极长度为 25 mm, 宽度为 6 mm, 两片电极的间距为 1 mm; 单片锯齿形电极的总长度为 25 mm, 锯齿的周期为 2.5 mm, 内宽为 2.2 mm, 外宽为 6 mm, 两片电极的间距为 1 mm。对比两种结构产生的中心平面的声场相位分布, 如图 5 所示, 可以发现: 矩形电极的声光偏转器产生的声波呈现出平面波的趋势; 锯齿形电极的声光偏转器产生的声波波动性更大, 具备更大的发散角。由于正常布拉格衍射要求超声波方向平分入射光与衍射光, 当超声波分散在很大的角度内, 就能在更大的频率范围内实现有效的超声跟踪, 从而使器件拥有更大的带宽。

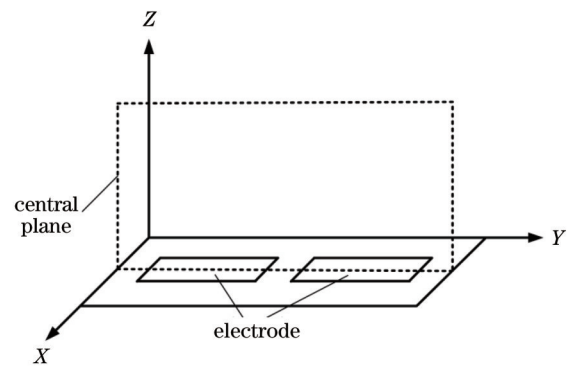


图3 声光晶体内空间坐标及中心平面位置

Fig. 3 Spatial coordinate and center plane position of acousto-optic crystal

分别仿真 3 种参数的双片锯齿电极结构的声场, 如图 6 所示, 其中单片锯齿电极的总长度均为 25 mm, 外宽均为 6 mm, 电极间距均为 1 mm。图 6(a) 中, 锯齿周期为 5 mm, 内宽为 2 mm, 该参数的双片锯齿电极结构的声场相位仿真结果如图 6(b) 所示; 图 6(c) 中, 锯齿周期为 1 mm, 内宽为 3.1 mm, 该参数的双片锯齿电

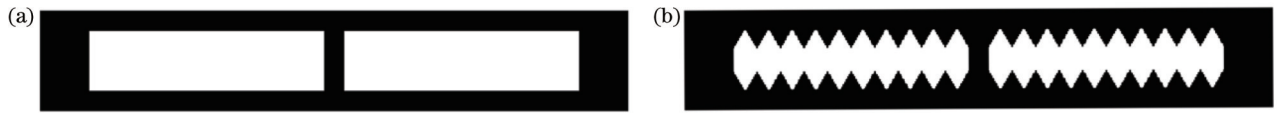


图 4 不同形状的电极仿真。(a)双片矩形电极;(b)双片锯齿电极

Fig. 4 Simulation of electrodes with different shapes. (a) Double rectangular electrodes; (b) double sawtooth electrodes

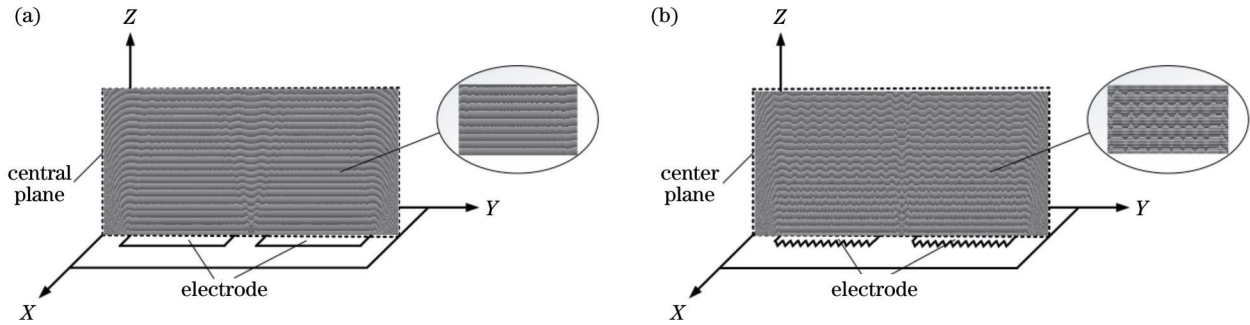


图 5 不同形状电极的中心平面处的声场相位分布。(a)双片矩形电极;(b)双片锯齿电极

Fig. 5 Phase distribution of sound field in central plane of different shape electrodes. (a) Double rectangular electrodes; (b) double sawtooth electrodes

极结构的声场相位仿真结果如图 6(d)所示;图 6(e)中,锯齿周期为 0.5 mm,内宽为 3.9 mm,该参数的双片锯齿电极结构的声场相位仿真结果如图 6(f)所示。

对比发现,锯齿周期越小,电极形状越接近矩形,声波波动性越小。

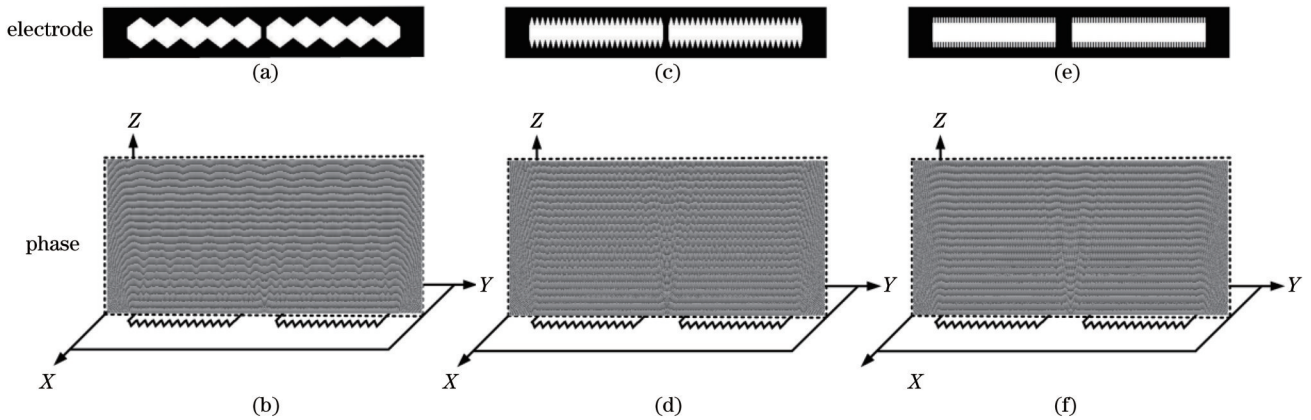


图 6 3种参数的双片锯齿电极结构的声场相位仿真。(a)(b)第1种;(c)(d)第2种;(e)(f)第3种

Fig. 6 Simulation of the sound field phase of double sawtooth electrode structures with three parameters. (a)(b) First; (c)(d) second; (e)(f) third

## 4 实 验

为了验证基于超声跟踪原理设计的声光偏转器的性能,分别对具有单片矩形表电极换能器、双片矩形表电极换能器和双片锯齿表电极换能器结构的声光偏转器进行测试,中心频率都为 80 MHz。三种结构的声光偏转器除了表电极形状有差别以外,声光晶体、底电极与压电晶体尺寸均相同。其中,锯齿电极的锯齿内宽为 0.5 mm,外宽为 1.5 mm,周期为 0.5 mm。

实验所用声光偏转器如图 7 所示,不同形状的表电极结构如图 8 所示,采用石英材料作为声光晶体,铌酸锂材料作为压电晶体。声光晶体的一侧键合压电晶

体,相对的另一侧设计为用于多次反射的斜面,侧面倾斜 35°,正面倾斜 7°~8°,并用直径为 1.6 倍波长(中心频率时的超声波波长)的磨砂颗粒对该斜面进行打磨,以吸收和消散热量,减少声波反弹。在加工锯齿电极时,需通过光刻机在压电材料上镀制电极的锯齿边缘。首先在压电晶体薄片的整个表面镀制一层金属膜,并将光刻胶均匀涂覆在压电晶体薄片上,光刻胶厚度应控制在 10 μm 左右;接着,利用紫外光将锯齿状电极的光刻掩模版图形照射在光刻胶上,紫外光照射过的胶与显影液反应后,部分光刻胶溶解;最后,通过物理方法去除没有光刻胶保护区域的金属膜,清洗干净,光刻结束,压电晶体薄片上形成锯齿形电极。

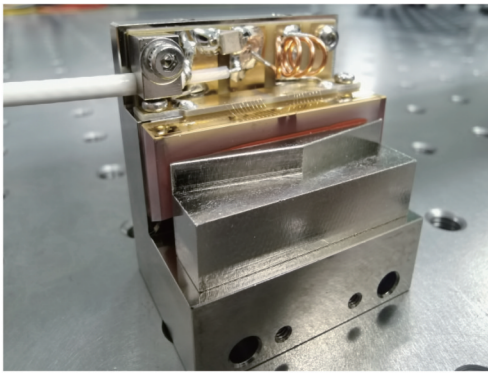


图 7 声光偏转器

Fig. 7 Acousto-optic deflector

红外光能够提供足够的能量用于声光偏转器的声光衍射,且受到的干扰较少,因此实验使用固态 1064 nm 激光器,其光束直径为 1.2 mm,光束发散角

约为 1 mrad。除此之外,还用到电脑(用于调节频率)、校准仪、功率放大器、射频功率计、光接收器、光功率计、电源、感光板等。测试平台可以实时采集光功率数据,并同步计算平均值,以减小测量误差。实验装置如图 9 所示。

实验测试过程中,将声光偏转器置于校准仪上,打开激光器,使用感光板判断激光方向,使激光能通过声光偏转器的通光面;调整校准仪使入射激光在最优入射位置,将光接收器连接光功率计读取初始激光功率最大值;打开驱动电源,将功率放大器提供的功率控制在 16 W 左右,可利用射频功率计读取功率数值。将电脑连接声光偏转器调节频率。首先测量中心频率为 80 MHz 时一级衍射光的光功率,其与初始光功率的比值即该频率下的衍射效率。实验对比了 3 种结构声光偏转器的衍射效率,为了得到各种电极换能器结构的声光偏转器的 3 dB 带宽(衍射效率峰值至峰值的 1/2

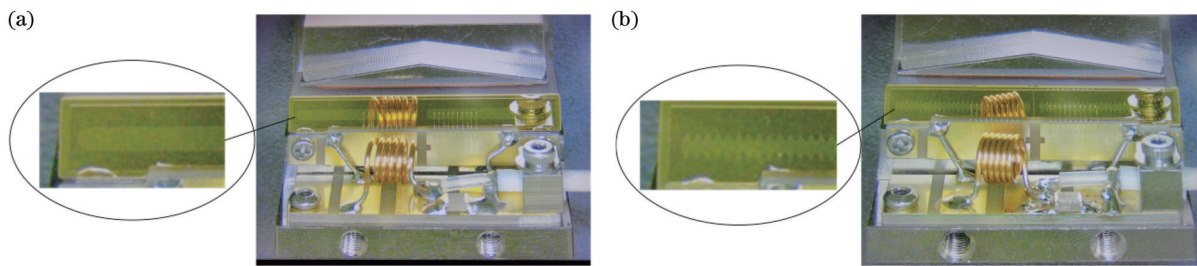


图 8 不同电极形状的声光偏转器。(a) 双片矩形电极换能器结构的声光偏转器;(b) 双片锯齿电极换能器结构的声光偏转器

Fig. 8 Acousto-optic deflectors with different electrode shapes. (a) Acousto-optic deflector with double rectangular electrode transducer structure; (b) acousto-optic deflector with double sawtooth electrode transducer structure

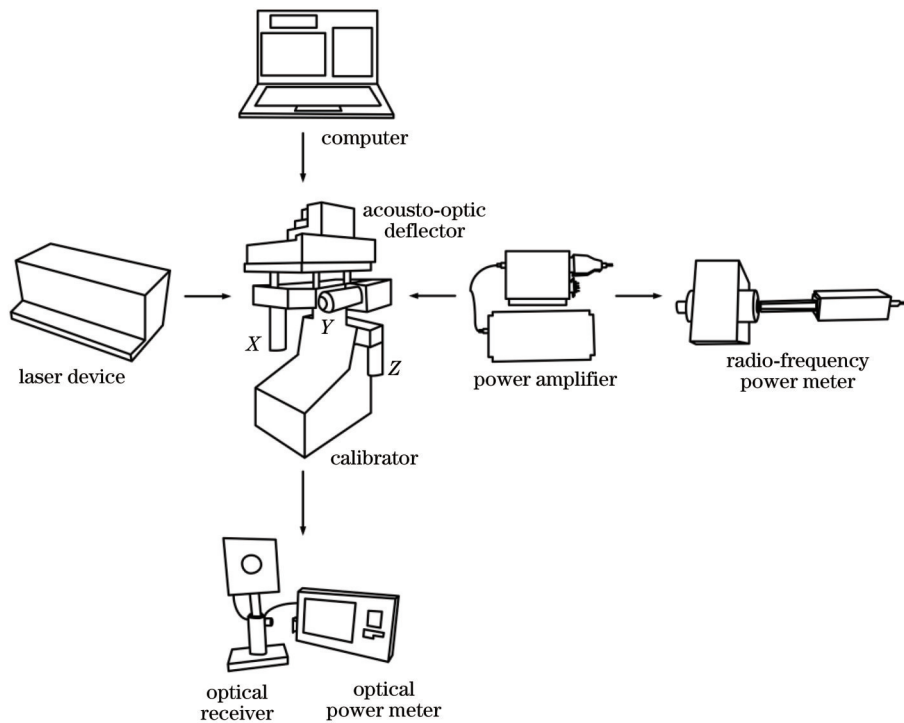


图 9 实验装置图

Fig. 9 Diagram of experimental setup

时所对应的频率范围),固定声光偏转器的位置,使入射光始终在距换能器 1.5 mm 处,保持射频功率不变。在 40~95 MHz 频率范围内,以 5 W 为步进,依次改变频率,测试各个频率下的声光偏转器的衍射效率,得到各种结构声光偏转器衍射效率能达到最高衍射效率 1/2 时的频率范围,即 3 dB 带宽。

整理实验数据,利用 MATLAB 软件中 Smoothing Spline 函数使实验数据曲线更平滑,得到具有单片矩形表电极换能器结构、双片矩形表电极换能器结构和双片锯齿表电极换能器结构的声光偏转器在不同频率下的衍射效率曲线。如图 10 所示,单片矩形表电极换能器结构的声光偏转器的最高衍射效率为 84.78%, 按此最高衍射效率的 1/2 所对应的频率范围计算带宽,则单片矩形电极换能器结构的声光偏转器的 3 dB 带宽能达 24 MHz; 双片矩形表电极换能器结构的声光偏转器的最高衍射效率为 85.46%, 按此最高衍射效率的 1/2 所对应的频率范围计算带宽,则双片矩形电极换能器结构的声光偏转器的 3 dB 带宽能达 32 MHz; 双片锯齿电极换能器结构的声光偏转器的最高衍射效率为 87.41%, 按此最高衍射效率的 1/2 所对应的频率范围计算带宽,则双片锯齿电极换能器结构的声光偏转器的 3 dB 带宽能达 39 MHz。实验结果表明,在相同实验条件下,双片锯齿电极换能器结构的声光偏转器的 3 dB 带宽比单片矩形电极换能器结构的声光偏转器高 62.5%。

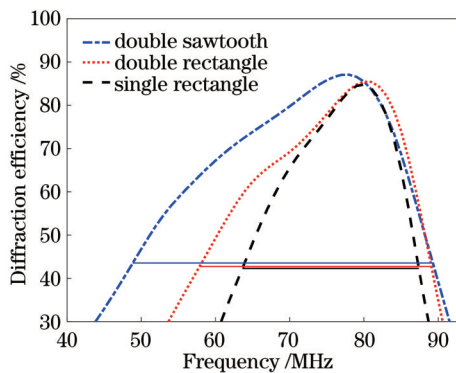


图 10 三种结构的声光偏转器在不同频率下的衍射效率

Fig. 10 Diffraction efficiency of acousto-optic deflectors with three structures at different frequencies

## 5 结 论

提出一种具有双片锯齿电极换能器结构的声光偏转器。这种结构继承了超声跟踪多片换能器的优点,保证了器件衍射效率,又增大了超声波发散范围,使声光偏转器的 3 dB 带宽得到有效提升。仿真结果表明,电极锯齿边缘使超声波波动性增大。实验结果表明,双片锯齿形电极换能器结构的声光偏转器能在保证衍射效率的基础上增加带宽,运用到高频声光器件时,会对带宽的增加有显著作用。

## 参 考 文 献

- [1] 徐介平. 声光器件的原理、设计和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 77-84.  
Xu J P. Principle, design and application of acousto-optic devices [M]. Beijing: Science Press, 1982: 77-84.
- [2] 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: 153-218.  
Yu K X, Ding X H, Pang Z G. Acousto-optic principle and acousto-optic devices[M]. Beijing: Science Press, 2011: 153-218.
- [3] Akunets V V, Demchenko A I, Evtushenko Y F, et al. Analyser of radar signals based on acousto-optic deflector[C]// 2000 10th International Crimean Microwave Conference, September 11-15, 2000, Crimea, Ukraine. New York: IEEE Press, 2004: 503-504.
- [4] Chang I C. I. acoustooptic devices and applications[J]. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 1976, 23(1): 2-21.
- [5] Brillouin L. Diffusion de la lumière et des rayons X par un corps transparent Homogène[J]. Annales De Physique, 1922, 9(17): 88-122.
- [6] Cui Z, Duan X M, Yao B Q, et al. Doubly Q-switched Ho: LuAG laser with acoustic-optic modulator and Cr<sup>2+</sup>: ZnS saturable absorber[J]. Applied Optics, 2015, 54(34): 10272-10276.
- [7] Cuadrado-Laborde C, Diez A, Andrés M V, et al. In-fiber acousto-optic devices for laser applications[J]. Optics and Photonics News, 2011, 22(5): 36-41.
- [8] 俞宽新, 赵启大, 何士雅. 声电光效应的耦合波方程理论[J]. 光学学报, 1998, 18(4): 466-470.  
Yu K X, Zhao Q D, He S Y. Theory about coupled wave equations of acousto electro optic effect[J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(4): 466-470.
- [9] 俞宽新, 赵启大, 何士雅, 等. 声电光效应与声电光器件[J]. 光学学报, 1997, 17(2): 253-256.  
Yu K X, Zhao Q D, He S Y, et al. Acousto electro optic effect and acousto electro optic device[J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17(2): 253-256.
- [10] 刘娟娟, 邹建. 声光偏转工作模式及其应用研究[J]. 信息通信, 2008, 21(4): 20-23.  
Liu J J, Zou J. Operation mode and application research of acoustooptic-deflector[J]. Information & Communications, 2008, 21(4): 20-23.
- [11] 何大伟, 许承杰, 徐叙稼. 空间积分声光相关处理的研究[J]. 光学学报, 2000, 20(11): 1514-1517.  
He D W, Xu C J, Xu X R. Space integrating acousto-optic correlator[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(11): 1514-1517.
- [12] 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.  
Liao X, He N, Chen M, et al. Application of acousto-optic deflection effect in coherent light detection[J]. Acta Optics Sinica, 2008, 28(s2): 278-282.
- [13] 刘彪, 王晓新, 吴冉, 等. 宽带声光布拉格器件及应用[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S4): 523-527.  
Liu B, Wang X X, Wu R, et al. Wide band acousto-optic Bragg device and its applications[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(S4): 523-527.
- [14] Goutzoulis A P. Design and fabrication of acousto-optic devices [M]. Boston: CRC Press, 2021: 403-464.
- [15] 徐介平. 平面结构一级超声跟踪情况下的布拉格带宽[J]. 北京工业大学学报, 1979, 5(2): 35-39.  
Xu J P. Bragg bandwidth under the condition of first-order ultrasonic tracking of plane structure[J]. Journal of Beijing University of Technology, 1979, 5(2): 35-39.
- [16] 赵启大, 徐介平. 平面结构一级超声跟踪时的布拉格带宽和声光器件的最佳设计[J]. 北京工业大学学报, 1980, 6(4): 25-31.  
Zhao Q D, Xu J P. The Bragg bandwidth of the first-order beam

- steering with plane configuration and the optimum design of acoustooptic devices[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 1980, 6(4): 25-31.
- [17] 丁晓红, 俞宽新. 正常声光偏转器的超声跟踪分析[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(11): 1043-1046.  
Ding X H, Yu K X. Analysis of ultrasonic steering in isotropic acousto-optic deflector[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32(11): 1043-1046.
- [18] 吴中超, 唐诗, 吴畏, 等. 宽带声光器件声场仿真研究[J]. 压电与声光, 2020, 42(6): 757-760.  
Wu Z C, Tang S, Wu W, et al. Study on acoustic field simulation of broadband acousto-optical devices[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2020, 42(6): 757-760.
- [19] Voloshinov V B, Nikitin P A, Trushin A S, et al. Acousto-optic cell based on paratellurite crystal with surface excitation of acoustic waves[J]. Technical Physics Letters, 2011, 37(8): 754-756.
- [20] 俞宽新, 米银梅, 索萌. TeO<sub>2</sub> 超声跟踪反常声光偏转器的优化设计[J]. 压电与声光, 2007, 29(5): 510-512, 529.  
Yu K X, Mi Y M, Suo M. Optimal design of TeO<sub>2</sub> ultrasonic beam-steering anisotropic acousto-optic deflector[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2007, 29(5): 510-512, 529.
- [21] Wu J, Liang L, Tu K F, et al. Serrated periodic electrode for high energy efficiency and large bandwidth acousto-optic modulators[J]. Chinese Optics Letters, 2023, 21(3): 031403.
- [22] Illienko M, Pilgun Y, Smirnov Y. Simultaneous acousto-optic diffractions by two lobes of a shaped phased-array transducer[J]. Ukrainian Journal of Physical Optics, 2021, 22(3): 138-150.
- [23] 樊星, 张伟, 郭光辉, 等. 晶体与电极位置失配对声光移频器性能的影响研究[J]. 光学学报, 2021, 41(22): 2223001.  
Fan X, Zhang W, Guo G H, et al. Impact of position mismatch between crystal and electrode on performance of acousto-optic frequency shifter[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(22): 2223001.
- [24] Wu J, Xu Z H, Li K Y, et al. Analysis of acoustic near field characteristics in acousto-optic modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(4): 201-204.
- [25] 何宁, 冯太琴, 廖欣. 基于声光效应的相干探测光学降噪方法研究[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0706001.  
He N, Feng T Q, Liao X. Research on noise cancellation based on acousto-optic effect in coherent detection[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0706001.
- [26] 李俊昌. 角谱衍射公式的快速傅里叶变换计算及在数字全息波面重建中的应用[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1163-1167.  
Li J C. FFT computation of angular spectrum diffraction formula and its application in wavefront reconstruction of digital holography[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1163-1167.

## Wideband Acousto-Optic Deflector Based on Double Sawtooth Electrodes

Wang Yucong<sup>1,2</sup>, Wang Zi<sup>1\*</sup>, Liang Li<sup>1,2</sup>, Feng Qibin<sup>1</sup>, Lü Guoqiang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Special Display and Imaging Technology Innovation Center of Anhui Province, National Engineering Laboratory of Special Display Technology, Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;

<sup>2</sup>School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China

### Abstract

**Objective** Acousto-optic deflectors, which constitute a class of precision optical functional components, play a central role in modern optoelectronics technology owing to their excellent performance. Bandwidth, a key performance indicator, determines the frequency range of these devices. Conventional acousto-optic deflectors with single transducer structures face challenges related to bandwidth and diffraction efficiency. To increase the bandwidth, the transducer length must be reduced; however, this may lead to low diffraction efficiency. Therefore, the influence of transducer length on diffraction efficiency and bandwidth must be considered to maintain a balance between the two factors when designing an acousto-optic deflector. The proposed ultrasonic tracking technique addresses this challenge and provides simultaneous improvements in bandwidth and diffraction efficiency. Further optimization of the device's performance requires investigation of additional methods that can ensure high diffraction efficiency while enhancing bandwidth.

**Methods** This paper proposes a design method that enhances the bandwidth of an acousto-optic deflector while maintaining high diffraction efficiency. Utilizing the principle of ultrasonic tracking, the proposed method employs two transducers in series to form an antiphase drive. This configuration generates an ultrasonic beam that can change its propagation direction according to frequency, enabling the device to achieve Bragg diffraction over an extended frequency range, thereby improving ultrasonic energy utilization and increasing Bragg bandwidth. By maintaining the same acousto-optical interaction area for single- and double-blade transducers, the overall transducer length remains constant, ensuring high diffraction efficiency. Additionally, the surface electrode of the two-piece transducer features a serrated design, which further enhances ultrasonic wave dispersion and Bragg bandwidth. To validate this method, the phase distribution of the acoustic field generated by the serrated and rectangular electrodes is simulated mathematically by the angular spectrum method. The simulation confirms that the sawtooth edge of the electrode increases ultrasonic waveform volatility. Bandwidth comparison experiments further verified the effectiveness of this approach, showing that the acousto-optic

deflector with two-piece serrated electrode structure possesses a large bandwidth and high diffraction efficiency.

**Results and Discussions** In designing the acousto-optical deflector with two-piece serrated electrode structure, two transducers featuring serrated surface electrodes are used. The geometric features of these serrated electrodes consist of the inner width, outer width, and period (Fig. 2). Through the angular spectrum method, sound field simulations were established for the two-piece rectangular and serrated electrodes (Fig. 4). A comparison of the phase distribution at the central plane of the acoustic field generated by the two-piece rectangular and serrated electrodes reveals that while the rectangular electrode produces a planar acoustic wave, the serrated electrode produces a more volatile acoustic wave with a large divergence angle (Fig. 5). Since normal Bragg diffraction necessitates the ultrasonic wave direction to equally divide the incident and diffracted light, the increased angular dispersion of ultrasonic waves facilitates effective ultrasonic tracking over a large frequency range, resulting in a device with increased bandwidth. The acoustic fields of the two-piece sawtooth electrode structures with different parameters were individually simulated. Their comparison revealed that smaller serrated periods yield electrode shapes closer to rectangles and decreases acoustic wave volatility (Fig. 6). To further validate these results, bandwidth comparison experiments were conducted for the acousto-optic deflectors with single rectangular, double rectangular, and double serrated table electrode transducer structures (Fig. 9). The results show that the bandwidth of the acousto-optic deflector with two-piece serrated electrode structure (3 dB) surpasses that of the deflector with single-piece rectangular electrode structure (by 62.5%) under the same experimental conditions (Fig. 10).

**Conclusions** This paper proposes an acousto-optical deflector with two-piece serrated electrode transducer structure that effectively increases the bandwidth while maintaining high diffraction efficiency. Utilizing the two-blade transducer structure, the surface electrode is designed into a serrated shape. This design inherits the advantages of ultrasonic tracking multichip transducers while ensuring high diffraction efficiency of the device and enhancing the ultrasonic dispersion range, ultimately leading to an improved acousto-optic deflector bandwidth. The phase distribution of the two-piece rectangular and serrated electrodes is determined by the angular spectrum method. Further, the comparison of the simulation results reveal that the serrated edge of the electrode increases ultrasonic wave volatility. Bandwidth comparison experiments were conducted for acousto-optic deflectors with single rectangular, double rectangular, and double serrated table electrode transducer structures. The results show that the acousto-optic deflector with two-piece serrated electrode transducer structure can enhance the bandwidth while maintaining high diffraction efficiency. The implementation of this two-piece serrated electrode transducer structure in high-frequency acousto-optic devices will have a considerable effect on bandwidth enhancement.

**Key words** acousto-optic deflector; ultrasonic tracking; sawtooth electrode; Bragg bandwidth; diffraction efficiency