用于操控中性原子阵列的 TeO_2 反常声光偏转器的实验研究*

刘方德[1)2)] 赵非凡[1)2)] 李云达[1)2)] 杨雯馨[1)2)] 姚新江[1)2)]
韩伟[1)2)] 孟增明[1)2)†] 张靖[1)2)‡]

1) (山西大学光电研究所, 光量子技术与器件全国重点实验室, 太原 030006)

2) (山西大学, 极端光学协同创新中心, 太原 030006)

(2025 年 2 月 22 日收到; 2025 年 5 月 26 日收到修改稿)

中性原子阵列因具备单原子的精确操控能力以及强相互作用的可调性, 已成为量子计算和量子信息处理中最具潜力的物理平台之一. 声光偏转器是构建和控制中性原子阵列的关键器件, 可实现对原子的快速、高精度捕获与排列. 然而, TeO_2 反常布拉格型声光偏转器在实际应用中仍存在宽带衍射条件不明确、偏振敏感性与效率低等问题, 制约了其在多自由度操控中的性能发挥. 本文通过与声光调制器对比, 系统地分析了声光偏转器的工作机理, 提出了一种可快速确定宽带衍射中心频率与衍射级次的新方法, 通过全面测量不同衍射级次及不同偏振入射下的衍射效率与带宽, 获得声光偏转器的高速、高效率、大角度偏转的衍射级次和 45 MHz 宽频衍射频率的特定工作条件, 研究揭示了宽带偏转性能对超声波模式的依赖机制, 明确了调试过程中的关键技术参数, 为中性原子阵列的快速构建与动态可编程调控提供了重要技术支撑.

关键词: 声光偏转器, 声光调制器, TeO_2 晶体, 反常布拉格衍射, 宽频衍射

PACS: 42.79.Jq, 42.15.Eq, 42.40.Lx, 42.40.My **DOI:** 10.7498/aps.74.20250218

CSTR: 32037.14.aps.74.20250218

1 引 言

中性原子阵列具有相互作用可控、相干时间较长和高度可扩展的优势, 是开展复杂量子计算和量子模拟的理想实验平台[1]. 近年来, 随着高分辨率成像技术和单格点操控原子技术的发展, 实现了多样化中性原子阵列的精确排列和里德伯量子态的灵活调控, 开辟了研究复杂量子系统和构建大规模量子处理器的新道路[2,3]. 声光偏转器 (acousto-optic deflector, AOD) 具有高稳定性、低驱动功率和超宽频高衍射效率等突出特点[4], 在中性原子阵列领域发挥着重要作用. 通过精确操控光束的位置[5], 可实现任意形状的三维里德伯原子阵列[6]、量子纠缠原子阵列的相干输运[7]、可编程量子模拟器[8]等. 声光偏转器还被广泛应用于激光医学[9,10]、激光雷达[11,12] 和光通信[13] 等众多领域.

尽管当前广泛使用的二氧化碲 (TeO_2) 晶体反常布拉格型声光偏转器在性能上表现出诸多优势, 但在中性原子阵列系统搭建过程中, 仍面临一些关键挑战, 例如宽带高衍射效率偏转 (即宽频偏转) 的中心频率与衍射级次不易确定、偏振敏感性

* 科技创新 2030 重大专项 (批准号: 2021ZD0302003)、国家重点研发计划 (批准号: 2022YFA1404101, 2021YFA1401700) 和国家自然科学基金 (批准号: 12488301, 12034011, U23A6004, 12322409, 12474252, 12474266, 12374245) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zmmeng01@sxu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: jzhang74@sxu.edu.cn

© 2025 中国物理学会 Chinese Physical Society

以及缺乏对超声波模式与宽频偏转性能关系的系统理解.

本文通过与声光调制器 (acousto-optic modulator, AOM) 对比, 探讨了反常布拉格型声光偏转器独特的声光相互作用机制. 通过调节声光偏转器方位角, 系统地测量了不同偏振入射光在±1 级次的衍射效率与带宽变化规律, 提出了一种实验上快速判定宽频偏转中心频率与衍射级次的方法. 同时, 我们还对比分析了声光偏转器与声光调制器在 TeO_2 晶轴取向、超声波模式、偏转角及衍射效率方面的差异, 进一步揭示了其各自的应用优势. 该研究不仅有助于实现声光偏转器的快速调试与性能优化, 也为在中性原子阵列中实现高维可编程控制提供了实验基础[14,15].

2 声光偏转器和声光调制器的工作原理

声光偏转器和调制器都是基于声光效应, 主要包含压电换能器、声光介质和声吸收器. 声光偏转器主要用于精准、快速、大角度和高分辨率地控制光束指向的一种器件, 而声光调制器主要用于光束频率或相位、强度的调控. 压电换能器通过逆压电效应将射频信号转换为机械振动, 并产生相同频率的超声波, 再通过压电换能器和声光介质间的键合层将超声波导入声光介质晶体中. 超声波对介质折射率产生周期性调制, 从而在介质中形成一个类光栅结构, 光栅常数等于超声波的波长. 激光穿过声光介质就会发生衍射, 一级衍射光的偏转角度为

$$\theta = (\lambda/\nu)f, \tag{1}$$

式中, λ 为真空激光波长, f 为超声波频率, ν 为超声波在声光介质中的速度. 因此, 偏转角度 θ 与超声波频率 f 成正比, 与声速 ν 成反比. 声光偏转器就是通过改变超声波频率 f 控制激光束的指向, 并且声速越小, 偏转角度越大.

声光效应依据声光互作用区域的特性可分为拉曼-奈斯 (Raman-Nath) 声光效应和布拉格 (Bragg) 声光效应. 拉曼-奈斯声光效应对应于较低频率的超声波和较短的声光互作用区域, 允许激光以多个角度入射, 并同时产生多级正负对称的衍射光, 其一级衍射效率较低, 通常不超过 33.9%. 由于具备多级衍射特性, 该效应广泛应用于超声传感[16,17]、光学信号处理[18]、激光技术等[19,20] 领域, 通过实现多通道的信号分离与调制, 极大地提升了系统的灵活性和处理效率[21,22].

与光波类似, 原子物质波在光晶格中也会受到周期性势场的调制, 从而表现出拉曼-奈斯和布拉格衍射, 例如采用短脉冲光晶格激发拉曼-奈斯衍射, 可实现对原子物质波的精确操控, 从而产生物质波亚波长结构[23]; 而利用驻波耦合光场激发布拉格衍射, 则可在玻色-爱因斯坦凝聚体中构建出超辐射光晶格[24,25]. 这些机制不仅揭示了波动性在不同体系中的普适性, 也为精密操控中性原子提供了重要的物理思路.

布拉格声光效应的超声波频率高且声光互作用区域长, 对入射光角度具有严格要求, 当激光以布拉格角入射时, 一级衍射效率可达到 100%, 所以激光利用率高. 此外, 声光效应根据入射光和衍射光的偏振特性 (相位匹配条件) 可分为正常声光效应和反常声光效应. 正常声光效应中的入射光与衍射光的偏振相同, 只利用 o 光 (或 e 光) 进行相位匹配, 一般由超声纵波引起. 反常声光效应中入射光与衍射光的偏振方向不同, 利用 o 光和 e 光进行相位匹配, 一般由超声切变波引起, 如图 1 所示, $\boldsymbol{k}_{\rm i}$ 为入射光波矢 (e 光), $\boldsymbol{k}_{\rm d}$ 为衍射光波矢 (o 光), $\boldsymbol{K}$ 为声光介质中的声波波矢, 三者满足动量守恒定律: $\boldsymbol{k}_{\rm d} = \boldsymbol{k}_{\rm i} + \boldsymbol{K}$. 为实现高衍射效率和宽工作频率偏转范围, 反常声光效应的中心频率通常设定在极值频率处, 此时声波矢量与衍射光折射率曲面相切, 即声波矢量 $\boldsymbol{K}_0$ 与衍射光波矢量 $\boldsymbol{k}_{\rm d0}$ 互相垂直, 见图 1, 所以相较于正常声光互作用, 反常声光效应利用小的超声发散角 $\Delta\theta_\alpha$ 和一定的射频工作频率范围可实现高衍射效率和较大衍射偏转角 $\Delta\theta$. 因此, 声光偏转器常用反常布拉格声光效应[26].

利用 TeO_2 单轴晶体中切变波构成的反常布拉格衍射器件是目前性能最好的声光偏转器. TeO_2 晶体是一种无色透明的高品质因数声光材料, 属于四方晶系中的 422 晶类, 无对称中心, 具有良好的双折射和旋光特性, 透明波段为 0.35—5.00 μm, 覆盖整个可见光范围, 被广泛用于声光介质. 介质中的光衍射效率主要由声光优值 $M = n_{\rm i}^3 n_{\rm d}^3 p^2/(\rho\nu^3)$ 决定, 式中 $n_{\rm i}$ 为入射光介质折射率, $n_{\rm d}$ 为衍射光介质折射率, p 为声光系数, ρ 为密度, ν 为声速. 在 TeO_2 单晶中, 沿 [110] 方向传播的超声波为切变波 ($\nu = 0.617$ km/s), 比一般固体中声速要慢 5—10 倍, 因此 TeO_2 声光偏转器具有高声光优值.

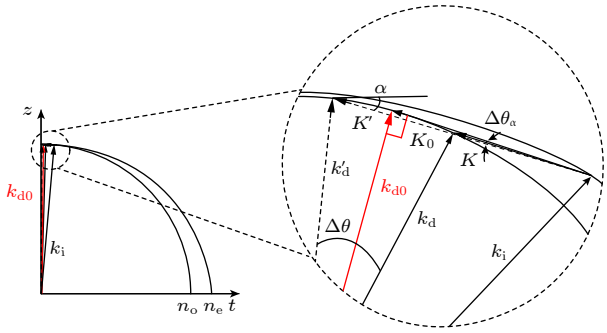


图 1 反常声光相互作用几何关系. t 轴为 TeO_2 的 [110] 轴 (超声切变波方向), z 轴为 TeO_2 的 [001] 轴 (入射光方向). n_o 和 n_e 分别为 o 光、e 光的折射率球面. $\boldsymbol{k}_{i0}$ 为宽带衍射中心频率的衍射矢量, $\boldsymbol{k}_i \sim \boldsymbol{k}'_d$ 为工作频率范围的两个极大点衍射矢量, $\Delta\theta$ 为工作频率范围内的两个极大点衍射偏转角. α 为超声切变波矢量与 t 轴的夹角

Fig. 1. Geometric relationship of anomalous acousto-optic interaction. The t-axis represents the [110] axis of TeO_2 (the direction of the ultrasonic shear wave), and the z-axis represents the [001] axis of TeO_2 (the direction of the incident beam). n_o and n_e are the refractive index spheres of the ordinary light and the extraordinary light respectively. $\boldsymbol{k}_{i0}$ is the diffraction vector of the central frequency of the broadband diffraction, $\boldsymbol{k}_i \sim \boldsymbol{k}'_d$ are the diffraction vectors of the two maximum points within the operating frequency range, and $\Delta\theta$ is the diffraction deflection angle of the two maximum points within the operating frequency range. α is the angle between the ultrasonic shear wave vector and the t axis.

声光介质的声学和声光特性可通过声光衍射来测量[26]. 当超声波选择沿声光介质 TeO_2 [110] 方向传播和 532 nm 激光沿 TeO_2 [001] 方向入射到声光偏转器, 得到的衍射光分布图称为舍弗-伯拉曼 (Schaefer-Bergmann) 图, 如图 2 所示, –1, 0, +1 级衍射光分别有一套四角花瓣. 通过上文偏转角度公式可知衍射角与声速成反比, 因此在声速最慢的 2 个方向 (即 [110], [$\bar{1}$10] 方向) 衍射角或偏转角最大. 衍射效率由超声波传播方向的声光优值 M 决定, 声光优值与声速 ν^3 成反比. 图 2 超声切变波是沿 [110] 方向传播, 其声光优值 M 最大, 因此, 在舍弗-伯拉曼图上沿 [110] 方向的衍射光最强.

对于声光偏转器, 可分辨点数 N (决定偏转器的容量)、偏转时间 τ (决定偏转器的光束偏转速度) 也是十分重要的参数. 可分辨点数表示光束偏转范围内可分辨出的光斑数, $N = \Delta\theta/\Delta\phi$, 式中 $\Delta\theta = \lambda\Delta f/\nu$ 为总扫描角 (Δf 为频率宽度), $\Delta\phi = R\lambda/W$ 为光束发散角, W 为光束沿超声切变波传播方向的宽度, R 为常数 (标定光束性质和可分辨判据). 可分辨点数在激光寻址、激光阵列等系统中是非常重要的参数[27,28]. 偏转时间表示超声切变波穿过光束所用的时间, $\tau = W/\nu$. 通常的正常布拉格衍射器件 $N \leqslant 10$, 反常布拉格衍射器件 $N \geqslant 60$, 而 TeO_2 声光偏转器的可分辨点数可实现上百甚至超过 1000. 但是获得高分辨率点数要以降低偏转速度为代价, 实际应用中需要选择合适的偏转器参数.

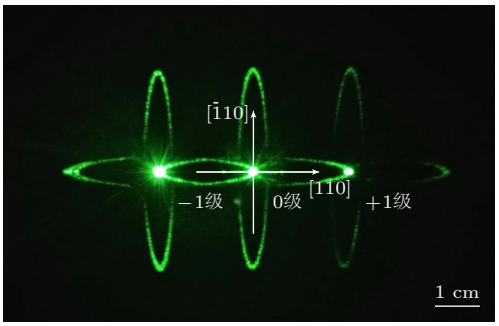


图 2 声光偏转器舍弗-伯拉曼图 (声光介质为 TeO_2), 实验条件对应图 4(b) 的中心频率处. 左侧点为–1 级衍射光, 中间点为 0 级光, 右侧点为+1 级衍射光

Fig. 2. Schaefer-Bergmann diagram of the acousto-optic deflector (with TeO_2 as the acousto-optic medium), the experimental conditions correspond to the central frequency in Fig. 4(b). The point on the left is the –1st order diffracted light, the point in the middle is the 0th order light, and the point on the right is the +1st order diffraction light.

声光调制器的工作原理与声光偏转器基本相同, 但工作特点和应用场景有所区别. 偏转器需要大的可分辨点数 N, 因此入射激光束需要进行扩束和准直, 使光束的发散角 $\Delta\phi$ 尽量小. 调制器对可分辨点数没有任何要求 (实际上只需要 $N = 1$), 而主要考虑调制速度, 因此入射激光束需要透镜聚焦在声光介质内, 通过缩小激光束腰斑提高超声渡越时间. 另外, 通过提高超声波速度也可以提高调制速度, TeO_2 单晶沿 [001] 方向传播的超声波为纵波 ($\nu = 4.26$ km/s), 远大于沿 [110] 方向传播的超声切变波速度, 因此声光调制器的超声波入射方向为 TeO_2 单晶的 [001] 方向.

3 实验研究

实验上采用的声光偏转器和声光调制器型号分别为 AA DTSX-250 和 G&H 3110-140. 激光源波长为 532 nm 的全固态单频激光器, 其输出经针孔空间滤波和透镜后, 获得腰斑为 300 μm 的 TEM_{00}

模式高斯光束. 为保证衍射过程稳定且可调, 声光偏转器 (声光调制器) 水平安装在三维光学调整架上, 位于透镜后高斯光束的束腰处, 可在 x-y 面内旋转 θ 和 y-z 面外旋转 β. 其中, $\theta = 0°$ 和 $\beta = 0°$ 对应于满足–1 级衍射宽频偏转时中心频率处的角度 (对应声光调制器–1 级衍射效率最高时的角度).

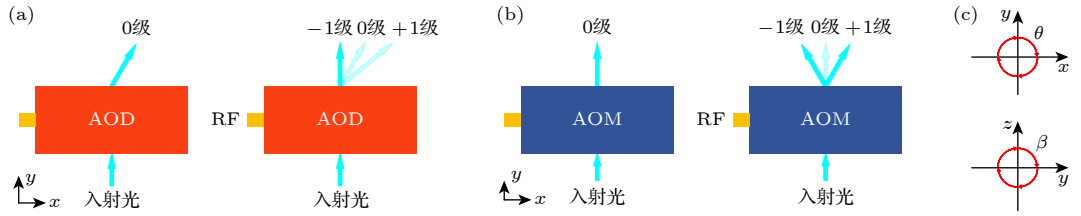


图 3 声光偏转器 (AOD)、声光调制器 (AOM) 的 0 级光和±1 级衍射光 (a) 无射频信号输入时, 入射光注入声光偏转器, 0 级光会偏折, 未与注入光重合; 射频信号输入时 (频率为满足宽频偏转时的中心频率), ±1 级衍射光在 0 级光的左右两侧, –1 级衍射光与入射光路重合; (b) 无射频信号输入时, 入射光注入声光调制器, 0 级光未发生偏折, 与入射光路重合; 射频信号输入时, ±1 级衍射光在 0 级光的左右两侧; (c) 面内和面外的旋转角度

Fig. 3. The 0th order light and ±1st order diffracted light of the acousto-optic deflector (AOD) and the acousto-optic modulator (AOM): (a) When there is no radio frequency (RF) signal input, the incident beam is injected into the AOD, and the 0th order light will be deflected and does not overlap with the incident beam. When the RF signal is input (at the central frequency), the ±1st order diffracted light appears on the left and right sides of the 0 th order light, and the –1st order diffracted light overlap with the incident light path; (b) when there is no RF signal input, the incident beam is injected into the AOM, and the 0th order light is not deflected and overlaps with the incident light path. When the RF signal is input, the ±1st order diffracted light appears on the left and right sides of the 0th order light; (c) the in-plane and out-of-plane rotation angles.

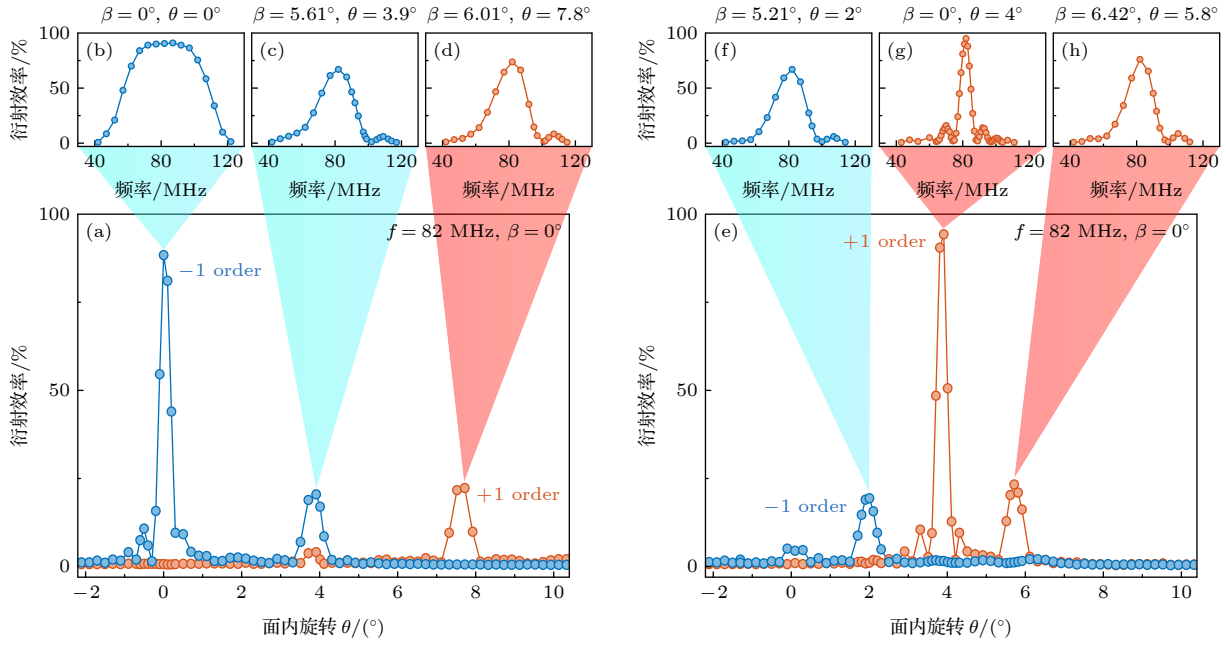


图 4 声光偏转器的衍射效率与水平、垂直偏振光及入射角度的关系, 蓝色线、红色线分别为–1, +1 级衍射光效率 (a) 入射光为水平偏振, –1 级有两次衍射极值, 第一次衍射极值条件 (b) 满足反常声光互作用, 衍射光为垂直偏振, 带宽为 45 MHz, 满足高效率、大角度偏转的要求; 其余情况 ((c), (d)) 的衍射带宽仅为 13 MHz 和 15 MHz; (e) 入射光为垂直偏振, –1 级 (f)、+1 级 ((g), (h)) 衍射光不满足反常声光互作用条件, 高效率衍射带宽分别为 15 MHz, 4 MHz, 11 MHz

Fig. 4. Relationship between the diffraction efficiency of the acousto-optic deflector and the incident angles of horizontal and vertical polarization light. The blue line and the red line represent the diffraction efficiencies of the –1st and +1st order diffracted light respectively: (a) When the incident light is horizontal polarization, the –1st order has two diffraction extreme values. The condition for the first diffraction extreme value (b) satisfies the anomalous acousto-optic interaction. The diffracted light is vertical polarization, with a bandwidth of 45 MHz, meeting the requirements of high efficiency and large-angle deflection. In the remaining cases ((c), (d)), the diffraction bandwidths are limited to only 13 MHz and 15 MHz, respectively; (e) when the incident beam is vertical polarization, the –1st order (f) and +1st order ((g), (h)) diffracted beam do not satisfy the conditions of the anomalous acousto-optic interaction. Their high-efficiency diffraction bandwidths are measured to be 15 MHz, 4 MHz, and 11 MHz respectively.

考虑到声光偏转器的衍射效率对入射光偏振高度敏感, 实验中通过半波片和偏振分束器实现偏振选择, 以控制入射偏振态. 射频信号 (RF) 通过射频开关和功率放大器后输入声光偏转器 (功率约为 30 dBm), 驱动其产生衍射效应.

对于声光偏转器, 当无射频信号输入时, 0 级光会偏折, 与入射光不重合; 当施加射频信号时, ±1 级衍射光分别出现在 0 级光的两侧, 而–1 级衍射光与入射光路重合 (该初始射频频率即为声光偏转器宽频偏转的中心频率), 见图 3(a). 文中声光偏转器的中心频率为 $f_0 = 82$ MHz; 0 级光偏折是因为声光晶体的激光入射面与出射面不平行导致的, 实际应用中利用声光材料的斜切角可精确调控出射光的角度. 相比之下, 声光调制器在无射频信号输入时, 0 级光未发生偏折, 与入射光路重合; 当施加射频信号时, ±1 级衍射光在 0 级光的左右两侧, 见图 3(b).

首先研究声光偏转器, 入射光为水平偏振时, 调整声光偏转器的角度 θ, 当衍射满足布拉格条件时, 可依次观察到–1 和+1 级衍射光功率由弱到强的变化. 其中–1 级衍射有两次满足布拉格条件, 分别为 ($\theta = 0°$, $\beta = 0°$) 和 ($\theta = 3.9°$, $\beta = 5.61°$), 见图 4(a). 当 ($\theta = 0°$, $\beta = 0°$) 时, 带宽为 45 MHz (带宽: 高于 80%*最高衍射效率的射频带宽), 见图 4(b), 最高衍射效率为 91%, 衍射光为垂直偏振, 与输入光的偏振正交, 满足反常声光效应的特点, 为实验所需的宽频偏转条件. 当 ($\theta = 3.9°$, $\beta = 5.61°$) 时, –1 级衍射带宽变为 13 MHz, 见图 4(c), 最高衍射效率仅为 67%; +1 级衍射有一次满足布拉格条件 ($\theta = 7.8°$, $\beta = 6.01°$), 最高衍射效率为 74%, 带宽为 15 MHz, 见图 4(d), 这两种情况的衍射光偏振与入射光偏振基本相同, 但具有轻微椭圆偏振分量.

入射光为垂直偏振时, 调整声光偏转器, –1 级衍射有一次满足布拉格条件 ($\theta = 2°$, $\beta = 5.21°$), 见图 4(e), 带宽为 15 MHz, 见图 4(f), 最高衍射效率为 67%. +1 级衍射有两次满足布拉格条件, 分别为 ($\theta = 4°$, $\beta = 0°$) 和 ($\theta = 5.8°$, $\beta = 6.42°$). 当 ($\theta = 4°$, $\beta = 0°$) 时, 带宽为 4 MHz, 见图 4(g), 最高衍射效率为 95%; 当 ($\theta = 5.8°$, $\beta = 6.42°$) 时, 带宽仅为 11 MHz, 见图 4(h), 最高衍射效率为 76%. 该状态的衍射光偏振与入射光偏振基本相同, 但具有轻微椭圆偏振分量.

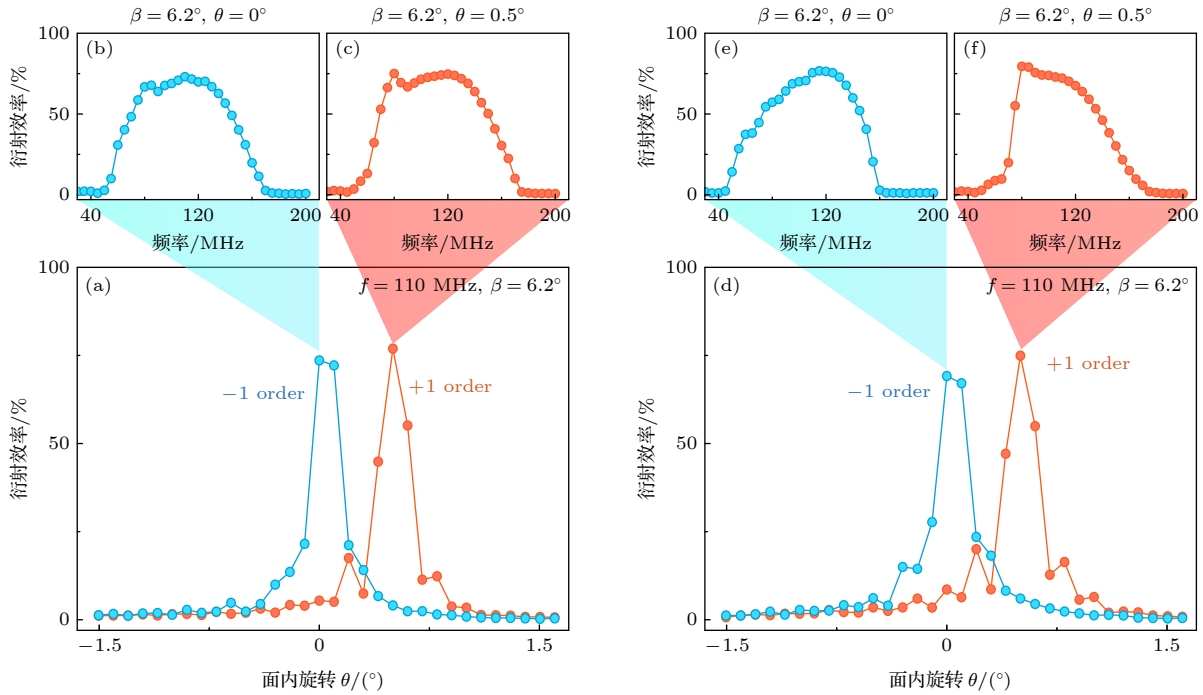


图 5 声光调制器的衍射效率与水平、垂直偏振光及入射角度的关系, 青色线、红色线分别为–1, +1 级衍射光效率 (a)—(c) 入射光为垂直偏振; (d)—(f) 入射光为水平偏振

Fig. 5. Relationship between the diffraction efficiency of the AOM and the incident angles of horizontal and vertical polarization beam. The cyan line and the red line represent the diffraction efficiencies of the –1st and +1st order diffraction light respectively: (a)–(c) The incident beam is vertical polarization; (d)–(f) the incident beam is horizontal polarization.

将声光偏转器更换为声光调制器 (型号: G&H 3110-140). 入射光为垂直偏振时, –1 级衍射和+1 级衍射带宽分别为 58.5 MHz 和 69 MHz, 最高衍射效率为 73.1% 和 75.1%, 见图 5(a)—(c), 衍射光均为垂直偏振, 与输入光偏振一致. 入射光为水平偏振时, –1 级衍射和+1 级衍射带宽分别为 52.5 MHz 和 48 MHz, 最高衍射效率为 76.7% 和 79.5%, 见图 5(d)—(f), 衍射光均为水平偏振, 与输入光偏振一致. 因此, 实验中的声光调制器为正常布拉格声光效应.

通过改变射频频率, 测量声光偏转器与声光调制器的–1 级衍射光的角度调控性和偏转时间. 对于声光偏转器, 偏转角为 0.842 mrad/MHz, 偏转时间为 10.5 μs; 对于声光调制器, 偏转角为 0.133 mrad/MHz, 偏转时间为 5 μs.

4 总 结

本文研究了声光偏转器和声光调制器的声光效应, 揭示了两者在衍射效率、偏振特性和应用上的差异. 通过调节声光偏转器的方位角, 测量了水平与竖直偏振入射光的±1 级次衍射光的效率和射频带宽, 进而提出了一种实验上获得宽带衍射中心频率与衍射级次的方法; 实验全面系统地测量了声光调制器的工作参数, 明确其与声光偏转器在性能机制与应用特性上的差异, 主要结论如下.

1) 声光偏转器的光束偏转性能与超声波模式或速度密切相关 (声速越小, 偏转角度越大). 以 TeO_2 晶体为例, 采用超声切变波从 TeO_2 的 [110] 轴入射, 声速为 0.617 km/s, 衍射光偏转角度为 0.842 mrad/MHz (激光波长: 532 nm); 当 TeO_2 用于声光调制器时, 采用超声纵波从 TeO_2 的 [001] 轴入射, 声速为 4.26 km/s, 衍射光偏转角度为 0.133 mrad/MHz (激光波长: 532 nm).

2) 为实现高衍射效率和宽工作频率偏转范围, 声光偏转器需满足反常布拉格衍射的相位匹配条件. 以声光偏转器 (型号: AA DTSX-250) 为例, 其采用单向入射工作模式: 当水平偏振光 (e 光) 入射时, 仅–1 级衍射光满足反常布拉格衍射条件, 并转换为垂直偏振 (o 光), 从而实现中心频率 82 MHz、带宽 45 MHz 的高衍射效率宽频偏转. 为便于未来搭建二维偏转光路, 声光介质 TeO_2 的入射面与出射面设计有微小斜切角, 使中心频率处的–1 级衍射光与入射光路保持共线. 而对于其他情况 (①水平偏振光入射的+1 级衍射; ②垂直偏振光入射的±1 级衍射), 均不属于反常布拉格衍射, 其衍射光偏振与入射光偏振基本相同, 此类模式仅能实现窄频偏转, 无法满足宽频偏转需求.

该实验结果揭示了声光偏转器通过反常声光效应实现高衍射效率、宽频偏转调节范围和较大偏转角, 适用于高速、高精度的光束扫描与控制. 声光调制器则利用正常声光效应, 在更快的调制速度下实现对光束强度、频率和相位的灵活调控, 广泛应用于激光通信和光纤传输. 本研究结果为深入地理解声光偏转器工作原理及其在可编程中性原子阵列中的应用提供了详细的技术参考.

参考文献

[1] Henriet L, Beguin L, Signoles A, Lahaye T, Browaeys A, Reymond G, Jurczak C 2020 *Quantum* **4** 327

[2] Barredo D, Léséleuc S, Lienhard V, Lahaye T, Browaeys A 2016 *Science* **354** 1021

[3] Endres M, Bernien H, Keesling A, Levine H, Anschuetz E, Krajenbrink A, Senko C, Vuletic V, Greiner M, Lukin M D 2016 *Science* **354** 1024

[4] Antonov S N, Kotelnikov V 2019 *PAIJ* **3** 235

[5] Wang L W, Wen K, Liu F D, Li Y D, Wang P J, Huang L H, Chen L C, Han W, Meng Z M, Zhang J 2022 *Chin. Phys. B* **31** 103401

[6] Barredo D, Lienhard V, Léséleuc S, Lahaya T, Browaeys A 2018 *Nature* **561** 79

[7] Bluvstein D, Levine H, Semeghini G, Wang T T, Ebadi S, Kalinowski M, Keesling A, Maskara N, Phchler H, Greiner M, Vuletić V, Lukin M D 2022 *Nature* **604** 451

[8] Semeghini G, Levine H, Keesling A, Ebadi S, Wang T T, Bluvstein D, Verresen R, Pichler H, Kalinowski M, Samajdar R, Omran A, Sachdev S, Vishwanath A, Greiner M, Vuletić V, Lukin M D 2021 *Science* **374** 1242

[9] Jiang R H, Zhou Z Q, Lü X H, Zeng S Q 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 043709

[10] Lyer V, Losavio B, Saggau P 2003 *J Biomed. Opt.* **8** 460

[11] Xu H Q, Jiang Y 2005 *J. Air Force Radar Academy* **19** 17 (in Chinese) [徐海全, 蒋跃 2005 空军雷达学院学报 **19** 17]

[12] Jiang H Y, He N, Chen M 2008 *Opt. Tech.* **34** 299 (in Chinese) [蒋红艳, 何宁, 陈明 2008 光学技术 **34** 299]

[13] Nikulin V, Khandekar R, Sofka J 2008 *Opt. Eng.* **47** 064301

[14] Yan J W, Yu X D, Han Z V, Li T C, Zhang J 2023 *Photonics Res.* **11** 600

[15] Meng Z M, Wang L W, Han W, Liu F D, Wen K, Gao C, Wang P J, Chin C, Zhang J 2023 *Nature* **615** 231

[16] Wu Y Q, Shankar P M, Lewin P A, Koller D P 1994 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **41** 166

[17] Ruan L F, Tang Z L, Liu X L 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 03070016 (in Chinese) [阮立锋, 唐志列, 刘雪凌 2013 光学学报 **33** 03070016]

[18] Das P, Chen H L 1987 *Piezoelectrics & Acoustooptics* **3** 42 (in Chinese) [Das P, 陈焕林 1987 压电与声光 **3** 42]

[19] Li Q, Zheng Y J, Wang Z Y, Li G, Zuo T C 2003 *Chin. J.*

Lasers **30** 795 (in Chinese) [李强, 郑义军, 王智勇, 李港, 左铁钏 2003 中国激光 **30** 795]
[20] Zhang Z W, Wen Z Y, Shang Z G, Li D L, Hu J 2012 *J. Semicond.* **33** 094009
[21] Schrödel Y, Hartmann C, Zheng J A, Lang T, Steudel M, Rutsch M, Salman S H, Kellert M, Pergament M, Hahn-Jose T, Suppelt S, Dörsam J H, Harth A, Leemans W P, Kärtner F X, Hartl I, Kupnik M, Heyl C M 2024 *Nat. Photonics* **18** 54
[22] Baryshev V N, Epikhin V M 2010 *Quantum Electron.* **40** 431
[23] Wen K, Meng Z M, Wang L W, Chen L C, Huang L H, Zhou L H, Cui X L, Zhang J 2020 *Sci. Rep.* **10** 5870
[24] Chen L C, Wang P J, Meng Z M, Huang L H, Cai H, Wang D W, Zhu S Y, Zhang J 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 193601
[25] Wang P J, Chen L C, Mi C D, Meng Z M, Huang L H, Nawaz K S, Cai H, Wang D W, Zhu S Y, Zhang J 2020 *npj Quantum Inf.* **6** 18
[26] Xu J, Stroud R 1992 *Acousto-Optic Devices: Principles, Design, and Applications* (Hoboken: Wiley-Interscience)
[27] Xu J P 1978 *Acta Phys. Sin.* **27** 421 (in Chinese) [徐介平 1978 物理学报 **27** 421]
[28] Li D R, Lü X H, Wu P, Luo Q M, Chen W, Zeng S Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4729 (in Chinese) [李德荣, 吕晓华, 吴萍, 骆清铭, 陈伟, 曾绍群 2006 物理学报 **55** 4729]

Experimental study of TeO_2 anomalous acousto-optic deflector for manipulating neutral atom arrays*

LIU Fangde [1)2)] ZHAO Feifan [1)2)] LI Yunda [1)2)] YANG Wenxin [1)2)]
YAO Xinjiang [1)2)] HAN Wei [1)2)] MENG Zengming [1)2)†] ZHANG Jing [1)2)‡]

1) (*State Key Laboratory of Quantum Optics Technologies and Devices*, *Institute of Opto-Electronics*, *Shanxi University*, *Taiyuan* 030006, *China*)

2) (*Collaborative Innovation Center of Extreme Optics*, *Shanxi University*, *Taiyuan* 030006, *China*)

(Received 22 February 2025; revised manuscript received 26 May 2025)

Abstract

Neutral atom arrays have emerged as one of the most promising physical platforms for quantum computing and quantum information processing due to their precise single-atom control and tunable strong interactions. The acousto-optic deflector (AOD) is a key device for constructing and manipulating neutral atom arrays, enabling rapid and high-precision atom trapping and arrangement. However, TeO_2-based anomalous Bragg AODs still face challenges in practical applications, such as unclear broadband diffraction conditions, polarization sensitivity, and low efficiency, which limit their performance in multi-degree-of-freedom control.

This study investigates the acousto-optic effects in AOD and acousto-optic modulator (AOM), and reveals their differences in diffraction efficiency, polarization characteristics, and applications. By adjusting the azimuthal angle of the AOD, we measure the efficiency and RF bandwidth of the $\pm$1st-order diffracted beams under horizontal and vertical polarization incident light, and propose an experimental method to determine the broadband diffraction center frequency and diffraction order. Additionally, we systematically characterize the operational parameters of AOM, clarifying their performance mechanisms and application-specific differences compared with those of AOD. The main conclusions are as follows:

1) The beam deflection performance of an AOD is closely related to the ultrasonic mode or acoustic velocity: a lower sound velocity results in a larger deflection angles. For TeO_2 crystals, when a shear wave propagates along the [110] axis (sound velocity: 0.617 km/s), the diffraction angle reaches 0.842 mrad/MHz

* Project supported by the Science and Technology Innovation of 2030-Major Project, China (Grant No. 2021ZD0302003), the National Key Research and Development Program of China (Grant Nos. 2022YFA1404101, 2021YFA1401700), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12488301, 12034011, U23A6004, 12322409, 12474252, 12474266, 12374245).

† Corresponding author. E-mail: zmmeng01@sxu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: jzhang74@sxu.edu.cn

(laser wavelength: 532 nm). In contrast, when TeO_2 is used in AOM with a longitudinal wave along the [001] axis (sound velocity: 4.26 km/s), the diffraction angle decreases to 0.133 mrad/MHz under the same wavelength.

2) To achieve high diffraction efficiency and a broad operational frequency range, the AOD must satisfy the phase-matching condition for anomalous Bragg diffraction. Taking the AOD (model: AA DTSX-250) for example, it operates in a unidirectional incident mode: when horizontally polarized light (extro-ordinary light) is incident, only the –1st-order diffracted beam satisfies the anomalous Bragg condition. The beam undergoes polarization conversion to vertically polarized light (ordinary light), enabling high-efficiency broadband deflection (center frequency: 82 MHz, bandwidth: 45 MHz). To support future two-dimensional deflection implementations, the input and output surfaces of the TeO_2 crystal are fabricated with slight bevel angles, ensuring collinearity between the –1st-order diffracted beam and the incident beam at the center frequency. In other cases—(i) +1st-order diffraction of horizontally polarized light and (ii) ±1st-order diffraction of vertically polarized light—the anomalous Bragg condition is not met. These beams retain their original polarization and allow only narrowband deflection.

These results demonstrate that AODs, leveraging anomalous acousto-optic effects, can achieve high diffraction efficiency, wide frequency tuning ranges, and large deflection angles, making them suitable for high-speed, high-precision beam steering applications. In contrast, AOMs utilize normal acousto-optic effects to perform rapid modulation of beam intensity, frequency, and phase, and are widely used in laser communication and optical fiber transmission. This study provides a detailed technical reference for understanding the operational principles of AODs and their applications in programmable neutral atom arrays.

Keywords: acousto-optic deflectors, acousto-optic modulators, TeO_2 crystals, anomalous Bragg diffraction, broadband diffraction

PACS: 42.79.Jq, 42.15.Eq, 42.40.Lx, 42.40.My **DOI:** 10.7498/aps.74.20250218

CSTR: 32037.14.aps.74.20250218

物理学报 Acta Physica Sinica
Chinese Physical Society
Institute of Physics, CAS

用于操控中性原子阵列的TeO_2反常声光偏转器的实验研究

刘方德 赵非凡 李云达 杨雯馨 姚新江 韩伟 孟增明 张靖

Experimental study of TeO_2 anomalous acousto-optic deflector for manipulating neutral atom arrays

LIU Fangde ZHAO Feifan LI Yunda YANG Wenxin YAO Xinjiang HAN Wei MENG Zengming ZHANG Jing

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 74, 164210 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250218
CSTR: 32037.14.aps.74.20250218
在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.74.20250218
当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于一维耦合腔光子晶体的声光可调谐平顶滤波器的研究
Acousto-optic tunable flat top filter based on one-dimensional coupled-cavity photonic crystals
物理学报. 2021, 70(5): 054208 https://doi.org/10.7498/aps.70.20201461

基于双声光调制的高稳定双频激光
High-stability dual-frequency laser based on dual acousto-optic modulation
物理学报. 2025, 74(9): 094203 https://doi.org/10.7498/aps.74.20250067

级联声光器件与回音壁模式微腔实现非对称传输
Asymmetric transmission of cascaded acousto-optic device and whispering gallery mode microcavity
物理学报. 2024, 73(1): 014101 https://doi.org/10.7498/aps.73.20230653

基于台阶声光调Q外腔泵浦MgO:PPLN光参量振荡器的3.4 μm中红外脉冲串激光器
3.4 μm mid-infrared pulse train laser based on stepped acousto-optic Q-switched external cavity pumped MgO:PPLN optical parametric oscillator
物理学报. 2024, 73(4): 044206 https://doi.org/10.7498/aps.73.20231348

声光调Q Nd:YVO_4晶体级联拉曼倍频窄脉宽657 nm激光器
Frequency doubling of acousto-optic Q-switched Nd:YVO_4 cascaded Raman laser for narrow pulse-width 657 nm laser
物理学报. 2021, 70(22): 224209 https://doi.org/10.7498/aps.70.20210695

基于微尺度光学偶极阱的一维单原子阵列的实验制备
Experimental realization of one-dimensional single-atom array based on microscale optical dipole traps
物理学报. 2024, 73(10): 103701 https://doi.org/10.7498/aps.73.20240135