

声电光效应与声电光器件*

俞宽新 赵启大 何士雅 候艳萍

(北京工业大学应用物理系, 北京 100022)

摘 要 分析了声电光效应的原理, 并制作了铌酸锂反常声电光器件, 进行了实验验证。

关键词 声光效应, 电光效应, 声电光效应。

1 引 言

声光效应与电光效应都是通过改变晶体折射率椭球来达到控制激光束强度或方向的。它们在激光偏转、激光调制及实时信号处理等方面有广泛应用。将声光效应与电光效应合在一起, 利用声电光效应制成的声电光器件可克服这二种独立器件的某些局限性, 改善器件的性能^[1, 2]。本文讨论了声电光效应的原理, 说明了只有反常声光互作用才可产生有效的声电光效应, 并制作了铌酸锂(LN)反常声电光器件, 对理论进行了验证。

2 原 理

声光互作用是将具有某一频率和功率的驱动电信号加在换能器上, 激发相同频率的超声波进入声光晶体内而实现的。当声光器件的方位调整到入射光波矢、超声波矢、衍射光波矢恰好构成一个封闭的三角形时, 衍射光强达到最大, 此时满足了动量匹配条件。图1为反常声光效应的动量匹配三角形的示意图。其中 $k_1 = 2\pi n_1/\lambda$ 为入射光波矢, $k_2 = 2\pi n_2/\lambda$ 为衍射光波矢, $k = 2\pi f/v$ 为超声波矢。 n_1 、 n_2 分别为入射光和衍射光折射率, λ 为光波长, f 为超声频率, v 为超声速度。曲线1、2分别为入射光、衍射光折射率曲面。如果改变驱动电信号的频率从而改变超声波矢 k 的大小, 或者改变晶体的方位从而改变入射光波矢 k_1 的方向, 都会造成波矢三角形不再封闭, 产生如图2所示的动量失配 Δk , 此时衍射光强便会下降。由反常声光互作用理论知, 声光衍射效率为^[3]

$$\eta = (\xi/2)^2 \text{sinc}^2 \sigma \quad (1)$$

它由二个因子组成, 第一个因子 $(\xi/2)^2$ 反映的是声光互作用的强弱, ξ 称为声致相移。可以证明, ξ^2 与超声功率 P_a 或声光驱动电功率 P_e 成正比。第二个因子为辛格函数 $\text{sinc} \sigma = \sin \sigma/\sigma$, 它反映动量失配或位相失配的大小对衍射效率的影响。在弱声光互作用条件下, 位相失配 σ 与动量失配 Δk 的关系为

* 国家自然科学基金、北京市自然基金项目。

收稿日期: 1995年10月27日; 收到修改稿日期: 1996年4月25日

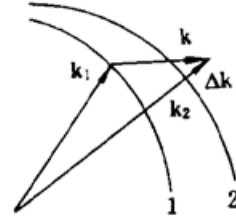
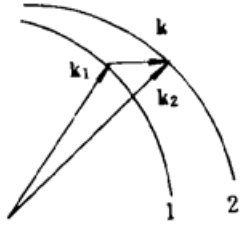
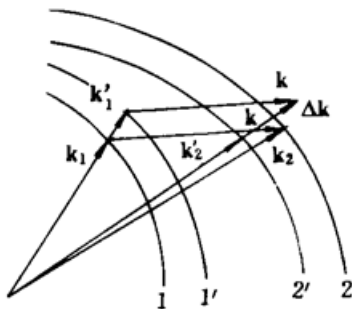


Fig. 1 The momentum match triangle of the anisotropic acousto-optic effect

Fig. 2 The momentum mismatch of the anisotropic acousto-optic effect

$$\sigma = \Delta k L / 2 \tag{2}$$

式中 L 为声光相互作用长度。当 $\Delta k = 0$ 时, $\text{sinc } \sigma = 1$, 此时位相匹配, 对衍射效率无减小的影响。 Δk 增加时, $\text{sinc } \sigma$ 的值下降, 衍射效率随之下降。当 $\Delta k = 2\pi/L$ 时, $\text{sinc } \sigma = 0$, 衍射效率降到零。声电光效应是同时在晶体中加超声波和直流电场, 通过电光效应改变晶体的折射率



曲面, 从而也可以引起动量失配 Δk , 如图 3 所示。由于加上直流电压使得入射光、衍射光折射率曲面分别由 1、2 变为 1'、2'。各自产生的折射率变化量分别为 Δn_1 、 Δn_2 。由图 3 可见, 电光效应所产生的电致动量失配近似为

$$\Delta k = (2\pi/\lambda) (\Delta n_1 - \Delta n_2) \tag{3}$$

Δn_1 、 Δn_2 的大小可统一表示为

$$\Delta n_{1,2} = n_{i,2}^3 \gamma_{i,2} E / 2 \tag{4}$$

Fig. 3 The momentum mismatch caused by the electro-optic effect

γ 为有效电光系数, E 为外加电场, 大小为

$$E = U/h \tag{5}$$

U 为外加电压, h 为晶体沿电场方向的厚度。因为正常声光效应中入射光与衍射光偏振方向及折射率都相同, 因此 $\Delta n_1 = \Delta n_2$, 电致动量失配 $\Delta k = 0$, 这就是为什么声电光效应必须采用反常声光互作用的原因。

将(2)式中 Δk 换成电致动量失配(3)式, L 换成电光相互作用长度, (1)式就变为声电光效应的衍射效率公式, 即

$$\eta = (\xi/2)^2 \text{sinc}^2(\pi U/U^{AEO}) \tag{5}$$

U^{AEO} 定义为

$$U^{AEO} = (\lambda h/L) [(n_1^3 \gamma_1 - n_2^3 \gamma_2)/2]^{-1} \tag{7}$$

它反映了声电光效应所引起的位相失配, 其数值等于将衍射效率降至零所需加的电压。

3 实 验

为了验证声电光效应, 作者用铌酸锂(LN)晶体制作了一个声电光器件。LN 是 3m 晶类的负单轴晶体, $n_o = 2.29$ 、 $n_e = 2.20$, 无旋光性^[4]。在 Y 轴方向上加直流电压并产生电场 E_y 后, 其折射椭球方程变为

$$[(1/n_o^2) - \gamma_{22} E_y] x^2 + [(1/n_o^2) + \gamma_{22} E_y] y^2 + z^2/n_e^2 + 2\gamma_{51} E_y yz = 1 \tag{8}$$

为消除交叉项 yz , 可令坐标系以 x 为轴旋转 θ 角

$$\text{tg } 2\theta = 2\gamma_{51} E_y / [(1/n_e^2) - (1/n_o^2)] \tag{9}$$

式中 $\gamma_{51} = 2.8 \times 10^{-11}$ m/v。即使 E_y 高达 10^6 v/m, θ 也仅只有 0.1° , 因此忽略(8)式中的交叉项后, 可认为折射率椭球主轴方向没有改变, 只是沿 x 、 y 二个主轴方向的轴半径大小分别

增加和减小了 $n_0^3 \gamma_{22} E_y$ 。当光沿近光轴 z 方向传播时, 可实现横向电光效应。为了实现反常声光相互作用, 在 (100) 晶面方向上粘贴了一个换能器, 它也是由 LN 晶片制成的, 切割方向为 x 向。由它激发出沿 x 方向传播、沿 y 方向偏振的切变波。器件中心频率 55 MHz。声光相互作用平面为 XOZ 面, 光沿 z 轴附近传播。入射光使用沿 x 方向偏振的 e 光, 衍射光的偏振方向沿 y 轴, 即变成 o 光。由 LN 反常声光相互作用动量匹配三角形的几何关系不难求出, 对于沿 x 传播、频率为 55 MHz 的超声波矢来说, 入射光、衍射光波矢方向与 z 轴的夹角分别为 $\theta_1 = 5.3^\circ$ 、 $\theta_2 = 5.5^\circ$ 。由入射光折射率曲面方程可求出入射光折射率为 $n_1 = 2.289$, 而衍射光折射率则仍为 $n_2 = n_0 = 2.29$ 。由电光效应所造成的入射光与衍射光折射率变化量分别为

$$\Delta n_1 = n_1^3 \gamma_{22} E_y \cos \theta_1 / 2, \quad \Delta n_2 = -n_2^3 \gamma_{22} E_y / 2 \quad (10)$$

这时(7)式中的入射光与衍射光有效电光系数分别为

$$\gamma_1 = \gamma_{22} \cos \theta_1, \quad \gamma_2 = -\gamma_{22} \quad (11)$$

实验装置如图 4 所示。光源为 He-Ne 激光器。AEO 为声电光器件, 声电光相互作用介质 LN 晶体的长: $L = 20$ mm、宽: $H = 6$ mm、高: $W = 18$ mm。用于换能器 LN 晶片的长: $L' = 18$ mm、宽: $H' = 2$ mm、厚: $W' = 30 \mu\text{m}$ 左右。其中长是指通光方向, 即沿晶体 Z 轴方向的尺寸, 宽是指电场方向, 即沿晶体 Y 轴方向的尺寸, 高和厚是指声传播方向, 即沿晶体 X 轴方向的尺寸。驱动声光换能器的信号源是用 XG-22 型的超高频信号发生器, 它能产生频率可调的等幅振荡电信号。电功率计是通过式的, 可测量出信号源输出的电功率和器件所反射回来的电功率, 二者之差就是器件所吸收的电功率。加在声电光器件前、后电光电极上的电压由直流高压电源提供, 它能输出在 0~3000 V 范围内连续可调的直流高压。由于 LN 声电光器件使用的是反常声光效应, 零级光和衍射光的偏振方向互相垂直, 故可以使用彼此互相正交的起偏镜 P_1 和检偏镜 P_2 来压低零级光强, 但衍射光强却不被压低。这样一来便可大大减小主要杂散光即零级光对测量的干扰作用。为了验证声电光相互作用衍射效率公式, 特在弱声光相互作用条件下测量了衍射效率 η 分别与声光驱动电功率 P_e 、电光电压 U 的关系, 实验结果分述如下:

1) 衍射效率 η 与声光驱动电功率 P_e 的关系

将驱动器件的超高频信号频率调整到器件中心频率 $f_e = 55$ MHz 处, 并调整器件方位, 使衍射光强达到最大, 这时可认为声光相互作用的动量匹配。令电光电压分别固定在 $U = 0$ V、1000 V、2000 V 上, 测量衍射效率随声光驱动电功率变化的曲线, 如图 5 所示。为排除器件换能器本身频率特性的影响, 图中横轴 P_e 实际上是器件所吸收的电功率。由(6)式可知, 当电光电压固定时, η 近似与 ξ^2 成正比, 而 ξ^2 与超声功率 P_a 成正比, P_a 又正比于声光驱动电功率 P_e 。故 $\eta \sim P_e$ 曲线近似为直线。电光电压 U 越高, 直线的斜率也越小。实验结果与理论相符合。

2) 衍射效率 η 与电光电压 U 的关系

仍使器件在中心频率 55 MHz 处满足动量匹配条件, 分别令器件所吸收的电功率为 0.5 W、0.3 W、0.1 W, 测量衍射效率随电光电压变化的规律, 结果如图 6 所示。由(6)式可知, 当声光驱动电功率固定时, $\eta \sim U$ 曲线的形状应为辛格函数, 实验结果与理论也符合的很好。

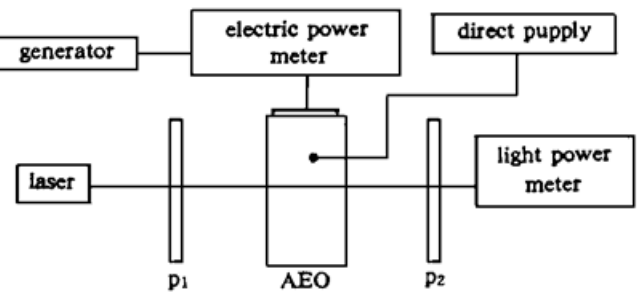


Fig. 4 The experimental setup

声光驱动电功率越小, 曲线越低, 从图中可以看出当 $U = 1800 \text{ V}$ 时, η 基本降至零左右。

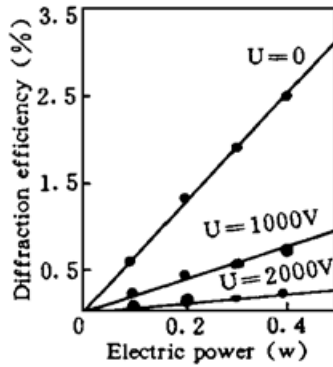


Fig. 5 The experimental curve of relations between the diffraction efficiency and the electric power

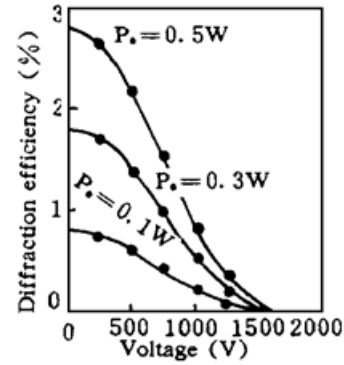


Fig. 6 The experimental curve of relations between the diffraction efficiency and the voltage

结 论 声电光器件将声光器件与电光器件的特点集於一身, 由于声光驱动电功率和电光电压都可用来进行激光束的强度或方向的控制, 因此声电光器件无论作为调制器还是作为偏转器, 都具有相当大的灵活性, 其性能也比单独的声光器件或电光器件有所提高。声电光调制器可以有二种工作方式, 其一是利用电光效应进行调制, 声光效应便可用来控制激光束的方向, 只要改变声光驱动电信号的频率, 激光束的偏转方向就会相应改变。其二是利用声光效应进行调制, 电光效应便可用来控制器件的中心频率。在不加电压时, 将器件调整到某一频率处满足动量匹配条件, 加上电压后该频率处就不再满足动量匹配条件了。而在另一频率处会满足此条件, 这说明器件的中心频率转移了。声电光偏转器的工作方式是利用声光效应来控制激光束的偏转方向, 而利用电光效应来提高器件的工作频带宽度。因为当声光驱动电信号的频率偏离器件中心频率后会造成声致动量失配, 使衍射光强下降, 若此时加上方向和大小都合适的电光电压, 利用电致动量失配去抵消声致动量失配, 即可使衍射光强回升。

综上所述, 声电光器件由于其性能的灵活性和优越性, 必将在激光调制、激光偏转等技术以及声光信号处理中得到应用。

参 考 文 献

- [1] D. Psaltis, H. Lee, G. Sirat, Acousto-electro-optic modulation. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **46**(3) : 215~217
- [2] H. Lee, Scanning acousto-electro-optic deflector with even intensity respond. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**(1) : 24~ 25
- [3] 徐介平, 声光器件的原理、设计和应用. 1982, 北京, 科学出版社: 54~ 56
- [4] R. S. Weis, T. K. Gaylord, Lithium Niobate: summary of physical properties and crystal structure. *Appl. Phys. (A)*, 1985, **37**(3) : 191~ 203

Acousto-Electro-Optic Effect and Acousto-Electro-Optic Device

Yu Kuanxin Zhao Qida He Shiya Hou Yanping

(Department of Applied Physics, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

(Received 27 October 1995; revised 25 April 1996)

Abstract Principle of the acousto-electro-optic effect is analysed in this paper, and the theory is verified with a Lithium Niotate anisotropic acousto-electro-optic device.

Key words acoustooptic effect, electrooptic effect, acoustoelectrooptic effect.