

反常声电光偏转器*

俞宽新 何士雅 赵启大 侯艳萍

(北京工业大学应用物理系 北京 100022)

1995 年 10 月 30 日收到

摘要 本文介绍的新型声电光偏转器可提高传统声光偏转器的带宽,制作了一个 LN 反常声电光偏转器,中心频率为 60 MHz,测试结果表明,带宽由原来的 26 MHz 提高到 37 MHz.

关键词 声电光效应,偏转器

Acousto-electro-optic deflector

Yu Kuanxin, He Shiya, Zhao Qida, Hou Yanping

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

Abstract In this paper an acousto-electro-optic deflector is introduced. It can increase the bandwidth of the acousto-optic deflector. A Lithium Niobate (LN) anisotropic acousto-electro-optic deflector is constructed. Its central frequency is 60 MHz, and its bandwidth is increased from 26 MHz to 37 MHz.

Key words Acousto-electro-optic effect, Deflector.

1 引言

如何提高工作频带宽度是声光偏转器研制中的一个重要课题,传统声光偏转器的带宽在换能器带宽允许的条件下主要受布拉格带宽的限制.产生布拉格带宽的原因是,当工作频率 f 偏离中心频率 f_c 时,由于入射光波矢、衍射光波矢、超声波矢之间的动量匹配条件不满足而造成衍射光强下降.近年来出现的一种新型声电光器件^[1~3],它同时利用声光效应和电光效应进行工作.这种器件作为偏转器,仍利用声光效应对激光束进行偏转,但在工作频率偏离中心频率时,加上直流高电压,利用电光效应来补偿动量失配,使衍射光强回升,达到提高器件带宽的目的.本文分析了这种声电光偏转器的工作原理,并制作了铌酸锂(LN)反常声电光偏转器,中心频率为 60 MHz.测试结果表明,不加电压时器件带宽为 26 MHz,加电压补偿后,器件带宽可扩大到 37 MHz.

2 原理

声光效应是将具有某一频率和功率的驱动电信号加在换能器上,激发出相同频率的超声波进入声光晶体内.在中心频率处调整好器件的方位,使入射光波矢 $\vec{K}_1 = 2\pi n_1/\lambda$ 、衍射光波矢 $\vec{K}_2 = 2\pi n_2/\lambda$ 、超声波矢 $\vec{K} = 2\pi f_c/V$ 恰好构成一个封闭的三角形,此时衍射光强达到最大,我们称之为满足动量匹配条件.其中 n_1 、

* 国家自然科学基金、北京自然科学基金项目

n_2 分别为入射光、衍射光折射率, λ 为光波长, V 为超声速, f 为超声频率. 当驱动电信号频率 f 偏离中心频率 f_c 时, 将造成声致动量失配 $\Delta \vec{K}_a$, 衍射效率随之下降. 这个过程如图 1 所示, 1、2 分别为入射光、衍射光的折射率曲面, $\vec{K}_1$ 为入射光波矢, $\vec{K}$ 为中心频率处的超声波矢, $\vec{K}_2$ 为动量匹配时的衍射光波矢.

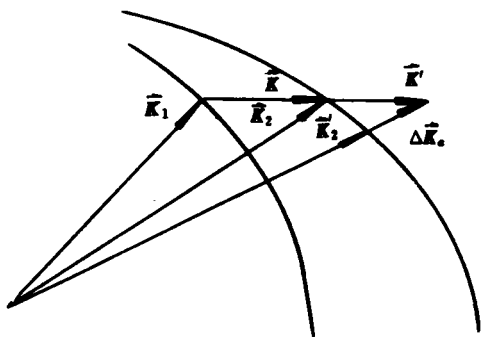


图 1 声致动量失配

若电信号频率 f 超过中心频率 f_c , 超声波矢由 $\vec{K}$ 变为 $\vec{K}'$, 衍射光波矢则由 $\vec{K}_2$ 变为 $\vec{K}_2'$. 这时的 $\vec{K}_1$ 、 $\vec{K}'$ 、 $\vec{K}_2'$ 不再自行封闭, 产生了动量失配 $\Delta \vec{K}_a$, 它定义为

$$\Delta \vec{K}_a = \vec{K}_1 + \vec{K}' - \vec{K}_2' \quad (1)$$

ΔK_a 的大小由 f 与 f_c 之间的频率偏差 $\Delta f = f - f_c$ 所决定. 从图中可看出, 他们的关系近似为

$$\Delta K_a = \frac{2\pi}{V} \Delta f \quad (2)$$

若 $f > f_c$, $\Delta f > 0$, 则有 $\Delta K_a > 0$. 若 $f < f_c$, $\Delta f < 0$, 则有 $\Delta K_a < 0$. 由声光互作用理论知, 声光衍射效率为^[4].

$$\eta = \left(\frac{\xi}{2} \right)^2 \text{Sinc}^2 \sigma_a \quad (3)$$

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 $\text{Sinc} x = \text{Sin} x / x$, σ_a 称声致位相失配, 在弱声光互作用条件下, 它与声致动量失配 ΔK_a 的关系为

$$\sigma_a = \frac{1}{2} \Delta K_a L_a \quad (4)$$

L_a 为声光互作用长度. 将(2)式代入(4)中, 可把 σ_a 改写成

$$\sigma_a = \frac{\pi \Delta f}{\Delta f^{A0}} \quad (5)$$

式中 Δf^{A0} 定义为

$$\Delta f^{A0} = \frac{V}{L_a} \quad (6)$$

其物理意义是使声光衍射效率降至零所需的频率偏差.

本文着重讨论的声电光效应是同时在晶体中加超声波和直流电场, 如果当声光互作用满足动量匹配条件时加上直流电压, 电光效应将使得晶体的折射率曲面发生改变, 这也可以造成电致动量失配 $\Delta \vec{K}_e$, 这可用图 2 进行解释.

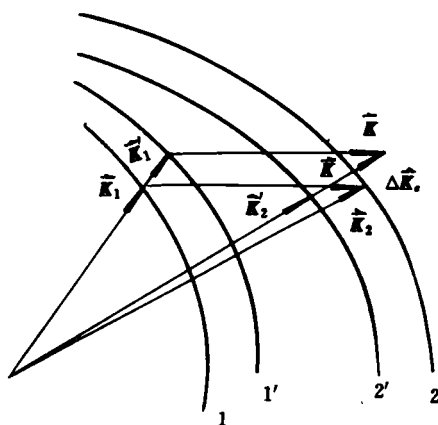


图 2 电致动量失配

一般电光效应总是使单轴晶体的 o 光和 e 光折射率变化符号相反; 设原来的入射光、衍射光折射率曲面分别为 1、2, 加电压后变成 1'、2', 即入射光折射率变大, 衍射光折射率变小. 这时入射光波矢由原来的 $\vec{K}_1$ 变成 $\vec{K}_1'$, 超声波矢 $\vec{K}$ 不变, 衍射光波矢由 $\vec{K}_2$ 变成 $\vec{K}_2'$. 所产生的电致动量失配 $\Delta \vec{K}_e$ 为

$$\Delta \vec{K}_e = \vec{K}_1' + \vec{K} - \vec{K}_2' \quad (7)$$

入射光与衍射光的折射率变化量分别为 Δn_1 、 Δn_2 . 电光效应所产生的电致动量失配 $\Delta \vec{K}_e$ 近似为

$$\Delta K_e = \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta n_1 - \Delta n_2) \quad (8)$$

由电光效应的理论, Δn_1 、 Δn_2 的大小可统一表示为^[5]

$$\Delta n_{1,2} = \frac{1}{2} n_{1,2}^3 \gamma_{1,2} E \quad (9)$$

γ 为有效电光系数, E 为外加电场, 其大小为

$$E = \frac{U}{h} \quad (10)$$

U 为外电压, h 为晶体沿电场方向的厚度. 图 2 所示情况因 $\Delta n_1 > 0$ 、 $\Delta n_2 < 0$, 故 $\Delta K_e > 0$. 若外加电压方向相反, 则入射光折射率将减小、而衍射光折射率增大. 即 $\Delta n_1 < 0$ 、 $\Delta n_2 > 0$, 故 $\Delta K_e < 0$. 正常声光效应中入射光与衍射光折射率相等, 因此 $\Delta n_1 = \Delta n_2$, 电致动量失配 $\Delta K_e = 0$, 这就是为什么声光电效应必须采用反常声光互作用的原因. 定义电致位相失配为

$$\sigma_e = \frac{1}{2} \Delta K_e L_e \quad (11)$$

L_e 是电光互作用长度. 将(8)~(10)代入(11)式中, 便可得到 σ_e 的表达式为

$$\sigma_e = \frac{\pi U}{U^{E0}} \quad (12)$$

其中 U^{E0} 定义为

$$U^{E0} = \frac{\lambda h}{L_e} \left(\frac{n_1^3 \gamma_1 - n_2^3 \gamma_2}{2} \right)^{-1} \quad (13)$$

把(3)式中的 σ_a 换成 σ_e , 不难看出 U^{E0} 的物理意义是使衍射效率降为零所须加的电压. 考虑声光与电光效应同时对衍射效率的影响时, 我们定义一个总位相失配

$$\sigma = \sigma_a + \sigma_e \quad (14)$$

这样声光电效应的总衍射效率可写成

$$\eta = \left(\frac{\xi}{2} \right)^2 \text{Sinc}^2 \sigma \quad (15)$$

或者将(5)、(12)式代入(15)式中, 有

$$\eta = \left(\frac{\xi}{2} \right)^2 \text{Sinc}^2 \left(\frac{\pi \Delta f}{\Delta f_{\lambda 0}} + \frac{\pi U}{U^{E0}} \right) \quad (16)$$

由上式可看出, 声光驱动电信号的功率、频率及外加电压对衍射效率都会产生影响.

声光电偏转器工作时, 驱动电功率固定不变, 上式中的 $(\xi/2)^2$ 为定值. 将器件的方位调整到中心频率处满足声光匹配条件, 这时不加电压, 式中 $\Delta f = 0$ 、 $U = 0$, 衍射效率最大. 当应用声学

频率 f 偏离中心频率 f_c 时, 产生声致位相失配 σ_a , 只要加大小方向合适的补偿电压, 产生符号与 σ_a 相反的电致位相失配 σ_e , 就可以减小总位相失配, 保证衍射效率不下降. 这个过程如图 3 所示. 图中画的是 $f < f_c$ 的情况, $\vec{K}_1$ 、 $\vec{K}$ 、 $\vec{K}_2$ 不能形成封闭的三角形, 产生的声致位相失配 $\sigma_a < 0$, 外加电压使 n_1 加大、 n_2 减小, $\sigma_e > 0$. 此时入射光波矢由 $\vec{K}_1$ 变成 $\vec{K}_1'$ 、超声波矢 $\vec{K}$ 不变, 衍射光波矢由 $\vec{K}_2$ 变成 $\vec{K}_2'$, 与 $\vec{K}_1'$ 、 $\vec{K}$ 组成封闭三角形, 并使总位相失配减小到零. 对于 $f > f_c$ 的情况, 产生的声致位相失配 $\sigma_a > 0$, 若加与上述方向相反的电压, 可产生 $\sigma_e < 0$, 从而使 $\sigma = 0$. f 偏离 f_c 越远, 所须补偿电压越大. 经过电光电压的补偿作用, 显然器件的带宽得以加大.

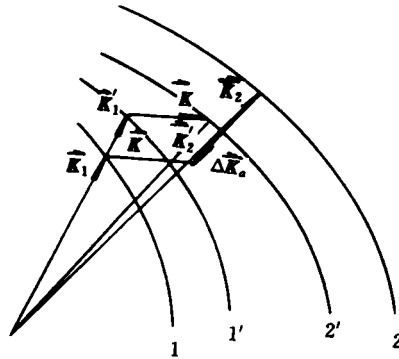


图 3 声光电偏转器原理

3 实验

目前同时具有较好的声光效应与电光效应的晶体是铌酸锂, 它是 3 m 晶类的负单轴晶体, $n_o = 2.29$ 、 $n_e = 2.20$, 无旋光性^[6]. 可以证明, 在 Y 轴方向上加直流电压并产生电场 E_y 后, 其折射率椭球主轴方向基本没有变, 只是沿 x 、 y 二个主轴方向的轴半径大小分别增加和减小. 只要光沿 z 轴方向附近传播, 便可实现横向电光效应. 我们用铌酸锂制作了一个反常声光电偏转器, 在 $[100]$ 晶面方向上粘贴了一个 x 切 LN 晶片作为换能器, 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 60 MHz. 声光互作用平面为 XOZ 面,

光沿 z 轴附近传播. 入射光使用沿 x 方向偏振的 e 光, 衍射光的偏振方向变成垂直于 XOZ 面, 成为 o 光. 由 LN 反常声光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 60 MHz 的超声波矢来说, 动量匹配条件要求入射光、衍射光波矢方向与 Z 轴的夹角分别为 $\theta_1 = 5.8^\circ$, $\theta_2 = 6.0^\circ$.

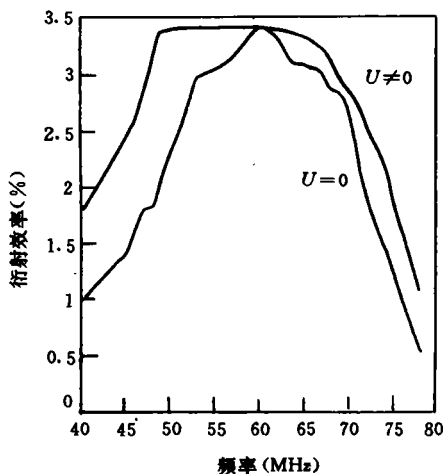


图 4 声电光偏转器衍射效率的频率响应实验曲线

我们对器件进行了测试, 调整器件的方位, 令 $f = 60$ MHz 时衍射光强最大, 此时不加补偿电压. 当驱动电信号频率 f 低于 60 MHz 时, 沿 y 方向加正向电压, 反之若 f 高于 60 MHz 时加反向电压. 电压的大小随频率偏差 Δf 成正比, Δf 每增加 1 MHz, 电压加大 80 v,

驱动电功率在测量过程中始终保持固定不变. 测量了衍射效率随频率变化的响应曲线, 如图 4 中标有 $U \neq 0$ 的曲线所示. 标有 $U = 0$ 的曲线为不加补偿电压时的响应曲线. 测量结果表明, 无补偿电压时的声光偏转器带宽 Δf 为 26 MHz, 加补偿电压的声电光偏转器带宽为 $\Delta f = 37$ MHz.

4 结论

我们的实验表明, 声电光偏转器比起单独的声光偏转器来, 带宽在换能器带宽的限制范围内提高了约 1.4 倍. 因此, 在其它条件相同的情况下, 可分辨点数也提高了 1.4 倍. 由于补偿电压的大小与频率偏差 Δf 的大小成简单的线性关系, 而方向取决于 Δf 的符号, 因此补偿电压的大小和方向很容易实现自动控制, 这使得声电光偏转器具有很好的实用性.

参 考 文 献

- [1] Psaltis D, Lee H, Sirat. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **46** (3): 215—217.
- [2] Lee H. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**(1): 24—25.
- [3] Lee H. *Appl. Optics*, **25**(23): 4452—4455.
- [4] 徐介平. 声光器件的原理、设计和应用, 科学出版社, 1982, 56.
- [5] 董孝义. 光波电子学, 南开大学出版社, 1987, 312—323.
- [6] Weis R S, Gaylord T K. *Appl. Phys. (A)*, 1985, **37**: 191—203.

(上接第 28 页)

1.39 次幂的关系. 以上结果(声衰减系数大小及其与频率的关系)与参考文献[3]中某些实验室样品测量结果相接近.

(2) 实验中发射和接收的最远距离约为 62 cm, 活塞式发射换能器的直径为 10 cm, 如此水听器所在位置对所测频率范围已是远场, 从而避开了在近场情况下声强随距离变化剧烈的影响^[4].

(3) 为了避开液体上界面反射对直达信号的干扰, 水听器移动距离仅为 5 cm, 但由于移位调节精度很高(0.002 cm), 这就保证了图 1

中接收位置 1 和 2 之间距离的精度.

(4) 测量中所用发射装置稳定性较好, 据此采用多次重复发射接收求统计平均的方法降低了无规噪声干扰.

参 考 文 献

- [1] 马恒仁, 王宝升, 林俊轩. 青岛海洋大学学报, 1988, **18**, 31—34
- [2] 玉荣津等. 水声材料手册, 科学出版社, 1983, 115.
- [3] (苏) Л. М. 布列霍夫斯基主编, 山东海洋学院物理系, 中国科学院声学研究所水声研究室译. 海洋声学, 科学出版社, 1983, 11—14.
- [4] 杜功焕, 声学基础. 上海科学出版社, 1981, 103—111.