

# 声 光 学 及 其 应 用

董 孝 义

(南开大学现代光学研究所)

## 摘 要

声光学是一门新兴的交叉学科,近些年来得到很大发展,本文在扼要地介绍了这门新学科的发展历史的基础上,较全面地叙述了它的理论纲要——非线性参量作用理论、由该理论导出的声光耦合波方程以及在各种情况下的解。有意义的解有两类,一是对应于正常声光效应,一是对应于反常声光效应。正常效应又划分为喇曼-奈斯型和布喇格型。本文对这些效应的物理图象作了简要描述。本文还介绍了声光学在信息科学、激光技术、光谱学和光通信几个领域的典型应用。

声光学(acousto-optics)处于声学和光学的交叉点上,近十几年来它已展示出广阔的应用前景,因此引起了人们的关注。

声光学是研究光与声相互作用的规律以及由此引起的各种物理效应及其应用的一门交叉学科。例如,作为声光作用的一个重要物理效应——光被超声波衍射早已成为声光学的主要研究对象之一。关于声光衍射概念的提出可以追溯到二十年代初。早在1921年布里渊就提出,当可见光辐照有压缩波的液体时,会产生光栅的衍射效应<sup>[1]</sup>。过了十年,德拜、席尔斯等人从实验上观察到了这种衍射现象<sup>[2]</sup>,并从此开辟了声光学的研究领域。经过研究,现在已从宏观上弄清了这类声光效应的物理实质,并将它分为两类。一类称为喇曼-奈斯(Raman-Nath)声光衍射;另一类称为布喇格声光衍射。前者与光学中的薄光栅(相位光栅)衍射类似,呈多级衍射图象;后者与光学中的厚光栅(体光栅)衍射类似,呈单级衍射图象。这样,便对声光衍射有了一个易于被人理解的诠释,并由此产生了一些关于声光效应的唯象理论<sup>[3]</sup>。

在激光出现以前,由于这类效应引起光波在频率和方向上的变化均很小,使其应用和研究受到限制,因此,在较长一段时间内,声光学的发展几乎处于停滞状态。直到六十年代,激光的问世才打破了这一局面。由于激光具有极

好的相干特性,这就使得其能量全部聚焦成衍射限大小的光斑成为可能,因此利用声光作用便可有效地、快速地控制激光束的频率、方向和强度等。此外,在这个时期微波超声的出现和高效率的声光介质的研制成功也是促成声光学振兴和发展的因素之一。在这种情况下,声光学理论也得到深入发展。1967年,狄克逊发现在各向异性介质中声光作用有两种表现形式<sup>[4]</sup>。其一称为正常效应,仍可沿用衍射光栅概念来描述;其二称为反常效应,不能用以往的理论来解释。1976年,华裔科学家张以丞用非线性参量理论建立了声光作用的统一宏观理论<sup>[5]</sup>。这一理论很快被人们所公认,从而为声光学打下了坚实的基础。而另外一些理论方法,例如积分方程方法<sup>[6]</sup>等,虽然立论也较为严格,但由于方法繁琐,无法推广应用。因此可以说,到目前为止,声光学的宏观理论已经建立,但微观理论仍处于探索之中。

## 一、原 理

声光非线性参量作用理论的基本思想和电光、磁光等类非线性作用情况相同,均认为这类作用也是由介质的非线性极化引起的。令声作用引起介质的应变张量为 $\mathbf{S}$ ,则由此产生的非线性极化为

$$P^{(NL)} = \epsilon_0 \chi \cdot S \cdot E, \quad (1)$$

式中  $\chi$  为介质极化率, 在声光作用情况下是四阶张量,  $E$  为光的电场强度. 令  $S, E$  分别为

$$S(\mathbf{r}, t) = \hat{s} S \sin(\omega_s t - \mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r}), \quad (2)$$

$$E(\mathbf{r}, t) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \hat{e}_m E_m(x) \exp[i(\omega_m t - \mathbf{k}_m \cdot \mathbf{r})]. \quad (3)$$

由能量守恒和动量守恒得知:  $\omega_m = \omega_0 + m\omega_s$ ,  $\mathbf{k}_m = \mathbf{k}_0 + m\mathbf{k}_s$ ,  $m = \pm 1, 2, \dots$ . 这里  $\omega_0$  和  $\mathbf{k}_0$  分别为入射声波的频率和波矢.

将  $P^{(NL)}$  作为微扰作用代入麦克斯韦方程, 经运算、整理和简化即可得到一般形式下的声光耦合波方程<sup>[2]</sup>, 并由此得出几个有意义的结论.

### 1. 正常声光作用

所谓正常作用是指作用结果不改变入射光的偏振态, 因此对于所有的  $m$ ,  $\hat{e}$  均相同, 进而有  $n_m = n$ ,  $k_m = k = 2n\pi/\lambda$ . 这时耦合波方程为

$$\frac{dE_m(x)}{dx} - i\Delta k_m E_m(x) = \frac{\pi n^3 P S}{2\lambda_0 b_m} [E_{m-1}(x) - E_{m+1}(x)]. \quad (4)$$

当声波与光波传播方向垂直时, 式中  $b_m = \cos\theta_0$ ,  $\theta_0$  为光波入射角,  $P$  为介质的有效光弹系数. 此方程可给出两个有实际意义的解.

#### (1) 喇曼-奈斯声光衍射效应

引进参数  $\xi = -2\pi\Delta n L/\lambda_0 \cos\theta_0$ ,  $Q = k_s^2 L/k \cos\theta_0$ ,  $\alpha = k \sin\theta_0/k_s$ , 其中  $L$  为声光作用长度. 不难看出, 仅当  $Q \gg 1$  和  $Q \ll 1$  时, (4) 式才有解析解. 令  $Q \ll 1$ , 并假定输入面只有入射光, 即边界条件为  $E_0(0) = E_0$ ,  $E_m(0) = 0$ , 则可得(4)式的解析解为

$$E_m(x) = E_0 \exp\left\{-i\frac{m\alpha Q}{2L} x\right\} \cdot J_m\left\{\frac{2\xi}{\alpha Q} \sin\left(\frac{\alpha Q}{2L} x\right)\right\}, \quad (5)$$

说明声光作用引起  $m$  级光衍射. 其物理图象可由图 1(b) 得知. 光垂直入射时,  $\theta_0 = 0$ ,  $\alpha = 0$ , 由(5)式可得到  $m$  级衍射光的衍射效率, 即

$$\eta_m = J_m^2(\xi). \quad (6)$$

$\xi = 1.84$  时, 一级衍射效率为  $\eta_1 = 34\%$ , 这也是喇曼-奈斯声光效应的最大衍射效率.

如果考虑到声波的时间变化形式, 还可以划分为两类不同的情况: (i) 声行波情况: 此时  $m$  级衍射光场为  $J_m(\xi) \exp[i(\omega_0 \pm m\omega_s t)]$  形式, 说明  $m$  级衍射光相对于入射光产生一个大小为  $m\omega_s$  的频移, 或者说, 衍射光波的空间分布与频谱分布具有确定的对应关系. (ii) 声驻波情况: 此时  $m$  级衍射光场为  $J_m(\xi \sin \omega_s t) \exp(i\omega_0 t)$  形式, 说明各级衍射光在时间上出现起伏, 起伏频率为  $2\omega_s$ . 同时还可以证明, 这时偶数级衍射光包含的频率成分为  $\omega_0 \pm 2q\omega_s$ , 奇数级包含的频率成分则为  $\omega_0 \pm (2q+1)\omega_s$ . 因此不同于行波情况, 这里衍射光波的空间分布与频谱分布间的一一对应关系不存在了.

#### (2) 布喇格衍射效应

当  $Q \gg 1$  且入射角  $\theta_0$  接近于布喇格角  $\theta_B$  时, 且  $m=0$  和  $m=1$ , 耦合波方程缩简为以下形式:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dE_0(x)}{dx} &= -\frac{\xi}{2L} E_1(x), \\ \frac{dE_1(x)}{dx} &= \frac{\xi}{2L} E_0(x). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

求解此方程, 很容易得到布喇格衍射效率, 即  $\eta = |E_1(L)|^2/|E_0(0)|^2 = \sin^2(\xi/2)$ . 当  $\xi = \pi/2$  时,  $\eta = 1$ , 说明全部入射光转化为衍射光. 这样高的效率是喇曼-奈斯声光衍射效应情况下所不可能达到的. 因此, 布喇格衍射具有更高的实用价值. 由动量守恒与能量守恒条件[参考图 1(c)]进一步可得到

$$\theta_B = \sin^{-1}(\lambda/2n\lambda_s). \quad (8)$$

因此可以说, 布喇格衍射是一种满足动量守恒的声光效应, 而喇曼-奈斯衍射则为不满足动量守恒的一种声光效应. 已知光波在通过周期介质时会发生上述诸效应<sup>[7]</sup>, 因此将这类效应类比为光栅衍射效应, 并称之为正常声光效应是确切的.

### 2. 反常声光效应

反常声光效应是一种各向异性的声光效

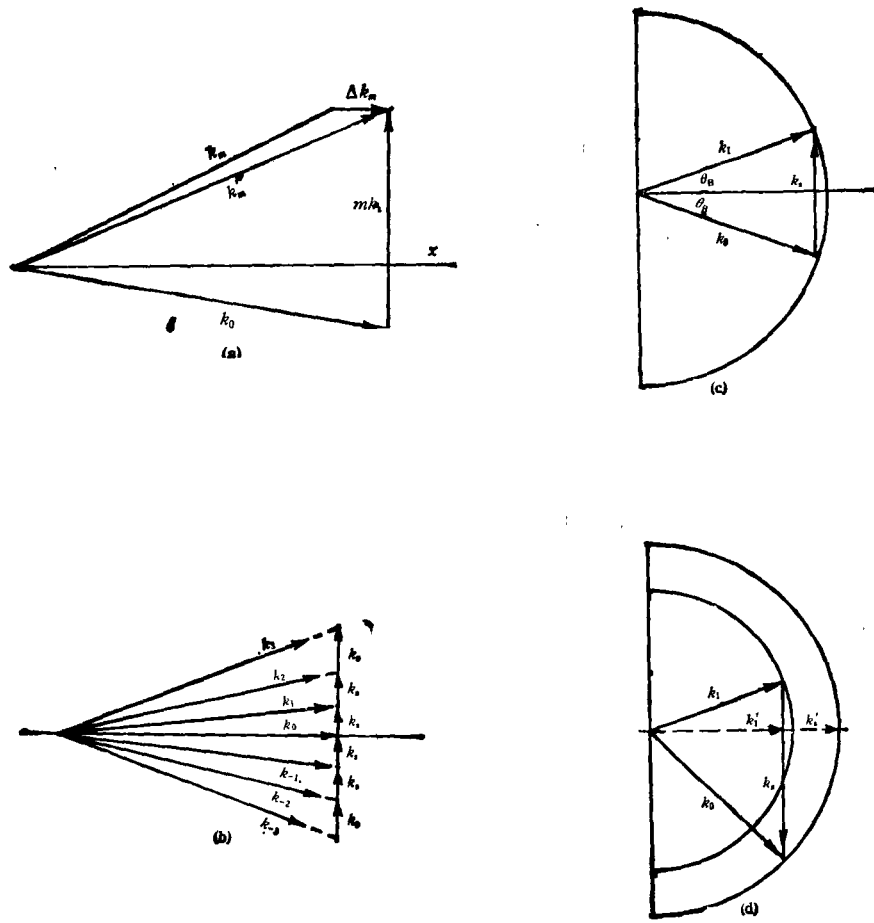


图 1 声光作用矢量图

- (a) 一般形式的作用矢量图；(b) 喇曼-奈斯作用矢量图；  
(c) 布喇格作用矢量图；(d) 反常布喇格作用矢量图

应，它仍服从于普遍形式的耦合波方程。目前有实际意义的是反常布喇格效应。如图 1 (d) 所示，这时动量三角形不再是等腰三角形，由余弦定理不难写出

$$\left. \begin{aligned} \sin \theta_0 &= \frac{\lambda_0}{2n_0(\theta_0)v_s} \left\{ f_s + \frac{v_s}{\lambda_0^2 f_s} \right. \\ &\quad \cdot [n_0^2(\theta_0) - n_1^2(\theta_1)] \left. \right\}, \\ \sin \theta_1 &= \frac{\lambda_0}{2n_1(\theta_1)v_s} \left\{ f_s - \frac{v_s}{\lambda_0^2 f_s} \right. \\ &\quad \cdot [n_0^2(\theta_0) - n_1^2(\theta_1)] \left. \right\}. \end{aligned} \right\} (9)$$

这便是描述反常布喇格声光效应的著名的狄克逊方程。它给出  $\theta \sim f_s$  关系曲线。存在一种非常有意义的情况：当动量三角形退化为一 条直线时，由于有

$$k_1 = k_0 \pm k_s,$$

因此得到

$$\lambda_0 f_s = \pm v_s (n_1 - n_0) = \text{常数}. \quad (10)$$

这表明，不同的声频  $f_s$  只允许不同的波长  $\lambda_0$  通过，就是说这种效应有滤波作用。

由上述可知，反常声光效应不能再用光栅效应来描述。

## 二、应用

声光学的发展与其应用的推广息息相关。今天,声光学已在许多学科领域得到应用,这里我们仅举几个方面的例子加以说明。

### 1. 在信息科学领域中的应用

如上所述,由于衍射光的频率成分与空间位置有对应关系,因此,它在频谱分析、信号相关(或卷积)运算等方面将得到应用。

#### (1) 声光频谱分析仪

利用声光器件作频谱分析,早已在射电望远镜和雷达信号处理中得到广泛应用。由于布喇格型器件衍射效率高,所以一般多采用这类器件做频谱分析仪<sup>[8]</sup>。由(8)式可知,方向角  $\theta \propto 1/\lambda, = f_s$ ,即不同声频(亦即被分析的信号频率)对应于不同的方向角,因此可用空间阵列探测器实时地显示出信号的频谱。

#### (2) 声光相关器(AOC)、卷积器

相关(或卷积)处理是提高信噪比的一种有

效检测手段。早在七十年代,声光相关器、卷积器就受到广泛关注,并在雷达信号处理中得到重要应用。目前,声光相关器、卷积器已有多种形式<sup>[9]</sup>,其重要指标——时间带宽积可达  $10^6-10^8$ 。这样高的相关效率是其他类型相关器无法达到的。声光相关器可分为空间积分和时间积分两种形式。图2是它们的原理图。两相关信号分别为  $S_1$  和  $S_2$ 。其中图2(a)通过透镜完成空间积分,而图2(b)则通过阵列探测器完成时间积分。令相关输出的信噪比为  $SNR_0$ ,接收信号的信噪比为  $SNR_1$ ,则有  $SNR_0 = \tau \cdot \Delta f \cdot SNR_1$ ,因此时间带宽积  $\tau \cdot \Delta f$  在这里起着相关增益作用,目前一些声光相关器已有商品出售,指标也是很可观的<sup>[10]</sup>。

#### (3) 声光效应对光学相干度的调制与解调

利用喇曼-奈斯声光效应的多重频移作用可对相干光的相干度进行调制,人为地调节其大小<sup>[11]</sup>。在相干光图象处理中,用这种方法能有效地消除相干噪声。同时,相干度被调制的光波也象调幅、调频波那样携带信息,并通过双

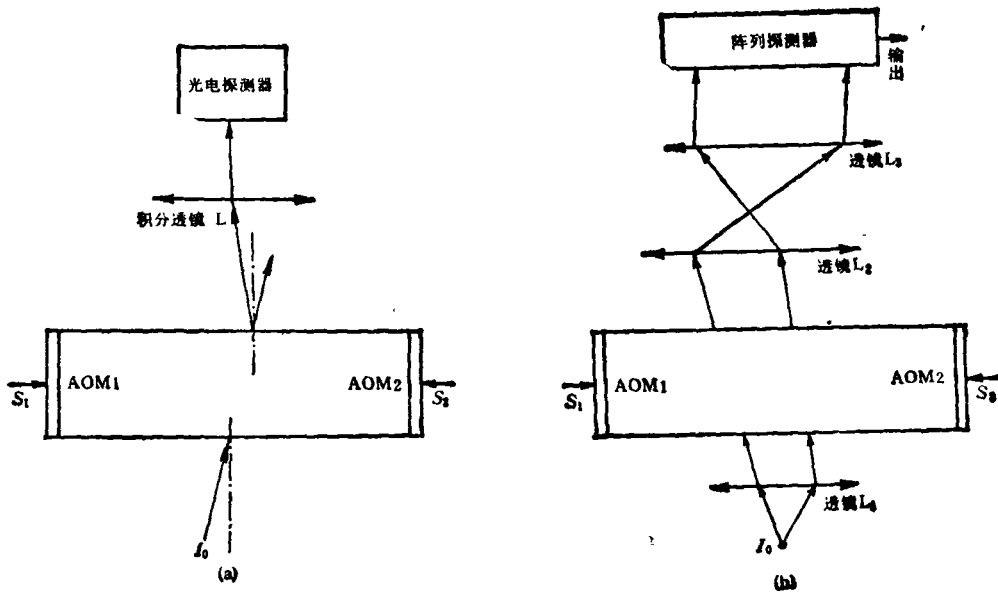


图2 声光相关器原理图  
(a) 空间积分相关器; (b) 时间积分相关器

缝解调,从而完成信息的传输和复用<sup>[22]</sup>。显然,这在光通信中具有重要实际意义。

此外,在二维图象实时处理、模糊函数实时处理<sup>[23]</sup>等方面,声光学均已得到重要应用。

## 2. 在激光技术领域中的应用

如上所述,由于声光效应对激光有调制、偏转作用,因此可得到许多有关的重要应用。

### (1) 激光大屏幕显示

利用声光调制器(AOM)和声光偏转器(AOD)可组成激光彩色显示系统<sup>[24]</sup>,其中 $Ar^+$ 和 $Kr^+$ 激光器分别给出蓝、绿、红三束激光。日本已用这类装置制作出高清晰度(1125行)激光彩色大屏幕电视机。如果将这种装置的显示屏幕去掉,改为被探测的物,并用光探测器接收其反射(或透射)光,那么该装置就变成激光摄像装置。它已在激光传真、激光捉弊、激光记录、激光打印、激光检索等许多方面得到应用。

### (2) 激光锁模与激光调Q

已知一般连续激光器的输出为“直流”激光。当在激光腔内插入声光调制器,并令其受频率为 $\omega = mc/\pi L$ 的信号驱动时,激光器将以脉冲形式输出,这种现象称为激光锁模<sup>[25]</sup>。输出激光脉冲宽度为 $t_p \approx L/NQ$ , $N$ 为激光纵模数。例如钕玻璃激光器中 $N$ 可达 $10^4$ ,因此声光锁模后可得宽度为0.1—1 ps,峰值功率为平均功率 $10^4$ 倍的光脉冲输出。

如果将这里的声光调制器作为开关使用,便可得到调Q激光器,它可有宽度为 $10^{-8}$ — $10^{-9}$ s的高功率激光巨脉冲输出;如果使用的是声光偏转器,便可得到倒空腔激光器,它可有宽度为 $10^{-11}$ s的高峰值功率的单一激光脉冲输出<sup>[26]</sup>。

## 3. 在光谱学中的应用

从(10)式可以看出,对应不同的声频( $f_s$ ),有相应的波长( $\lambda_0$ )的光被衍射,因此这里的声光器件可作为可调滤光器使用。与常规的光谱仪不同,它用电调谐代替了机械调谐,所以具有分光速度快、可随机分析图象光谱等优点<sup>[27]</sup>。它已在电子分光、微弱图象信号分析、光纤色散测量等很多方面得到应用。

## 4. 在光通信中的应用

声光学在光通信中已有很多应用实例。例如,利用声光效应的移频作用完成光通信的外差探测,进而可实现相干光通信;利用这种频移作用还可以完成频分多路(信号复用)通信;利用声光多级衍射或偏转作用可以制作出通信线路的分接器和多通道开关<sup>[28]</sup>等等。

随着声光学的发展,其应用也日益广泛。目前引人注目的两个领域是:开发表面波声光器件和纤维声光器件。表面波声光效应与上述体波声光效应在原理上是相同的,但由于前者使用叉指电极取代了换能器,因此器件易于小型化和多功能化,有利于光集成<sup>[29]</sup>。纤维声光器件是一种功能性光纤,光纤的包层是换能体,当以信号驱动时,通过光纤的光波即受到声光作用。利用这种结构已研制出纤维声光移频器<sup>[20]</sup>等许多微型光器件,这对光通信、光计算的发展无疑是一种很大的推动力量。

- [1] L. Brillouin, *Ann. Physique*, 17(1921), 103.
- [2] P. Debye and F. W. Sears, *Proc. Nat. Acad. Sci. Wash.*, 18(1932), 409.
- [3] C. V. Raman and N. S. Nath, *Proc. Indian. Sci.*, A2(1935), 406; A3(1936), 75.
- [4] R. W. Dixon, *IEEE J. Quan. Electron.*, QE-3(1967), 85.
- [5] I. C. Chang, *IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics*, SU-23(1976), 2.
- [6] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergamon Press., (1980) (6th ed.), 593—609.
- [7] A. Yariv and Pochi Ye, *Optical Waves in Crystals*, John Wiley & Sons, (1984), 318.
- [8] R. Wattenbach, *Laser and Optoelectronics*, 17-2(1985), 111.
- [9] W. T. Rhodes, *Proc. IEEE*, 69(1981), 65.
- [10] 徐介平等, *应用声学* 5(1986), 1.
- [11] 董孝义等, *光学学报*, 4(1984), 760.
- [12] 董孝义等, *通信学报*, 7-2(1985), 83; *物理*, 15(1986), 439.
- [13] B. Belikov, *Sov. Tech. Phys. Lett.*, 10-10(1984), 517.
- [14] 丸文, *O plus E.*, No. 74(1986), 36.
- [15] 董孝义等, *中国激光*, 8-2(1981), 13.
- [16] 董孝义, *光波电子学*, 南开大学出版社, (1987), 364—405.
- [17] J. H. Labrum, *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.*, 519(1985), 25.
- [18] 董孝义, *光学学报*, 5(1985), 1074.
- [19] 山田纯, *应用物理*, 54(1985), 539.
- [20] B. Y. Kim et al., *Opt. Lett.*, 11(1986), 389.