

文章编号: 1001-3806(2004)01-0023-03

级联布喇格声光相互作用的频移与光束偏转分析

武继江, 石邦任, 孔梅, 刘支华
(长春理工大学物理系, 长春 130022)

摘要: 声光器件在设计和制作中, 由于器件结构和功能上的需要, 常采用级联形式的声光相互作用。根据声光相互作用的一般理论, 对不同的声光相互作用条件下, 级联布喇格声光相互作用的频移和光束偏转进行了分析。当组合两次不同的声光相互作用, 可以得到不同的频移和光束偏转。并指出, 通过调节两声波的频率, 可以使输出光波的传播方向不随声波频率的改变而变化。

关键词: 声光相互作用; 声光器件; 光束偏转; 频移; 级联

中图分类号: TN201 **文献标识码:** A

Analyses of the frequency-shifting and beam deflection of the Bragg acoustooptic interaction in cascade

WU Ji-jiang, SHI Bang-ren, KONG Mei, LIU Zhi-hua

(Department of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The cascaded acoustooptic interaction is usually used for the need of the devices' structure and function when the acoustooptic devices are designed and fabricated. The frequency-shifting and beam deflection of the Bragg acoustooptic interaction in cascade is analyzed according to general Bragg acoustooptic interaction theory. Different frequency-shifting and beam deflection can be obtained when the different cascaded acoustooptic interaction scheme is used. An important conclusion is presented that the doubly and frequency-shifted diffracted light propagates in a fixed direction irrespective of magnitude of frequency shift if the two acoustic wave frequency is changed rationally.

Key words: acoustooptic interaction; acoustooptic device; beam deflection; frequency shifting; cascade

引 言

声光器件是通过介质内传播的超声波和光波之间的相互作用——声光效应来达到控制光束的目的的。基于声光效应所实现的对激光束的控制, 可以构成各种声光器件, 如声光调制器、声光偏转器、声光可调滤波器、声光频谱分析器以及声光信号处理器等。声光器件具有体积小、重量轻、驱动功率小、易于与计算机兼容和自动控制等特点。因而, 声光器件同基于电光效应的电光器件一起, 是光电子器件中重要的组成部分, 在许多领域中得到应用。

根据声光相互作用条件的不同, 声光效应可分为喇曼-奈斯型和布喇格型两类。由于布喇格声光衍射只有零级和一级衍射, 衍射效率高, 因此, 目前常

用的声光器件均是工作在布喇格声光状态下。

声光器件在设计和制作中, 为了得到相对大的或小的频移^[1~4], 或者为了器件结构和功能上的需要^[5~8], 常采用级联形式的声光相互作用, 因此, 有必要对级联布喇格声光相互作用作一分析。笔者根据声光相互作用的一般理论, 对级联布喇格声光相互作用的频移和光束偏转做了分析。

1 正常布喇格声光相互作用^[9]

在介质中传播的超声波, 将引起介质的折射率发生周期性变化, 形成折射率光栅, 光栅常数等于超声波长 Λ 。在布喇格衍射情况下, 入射光与声波波阵面之间夹角 θ_B (称为布喇格角) 为:

$$\theta_B = \sin^{-1} \frac{\lambda_0}{2n\Lambda} \quad (1)$$

式中, λ_0 为真空中光波波长, n 为介质折射率。此时衍射光波只有一级: 正一级或负一级。衍射光波的圆频率 ω_d 和 \vec{k}_d 波矢满足以下关系:

$$\omega_d = \omega_i \pm \Omega \quad (2a)$$

作者简介: 武继江(1974-), 男, 博士研究生, 现主要从事光导波传输和传感方面的研究。

E-mail: w9513110@yahoo.com.cn

收稿日期: 2003-05-24; 收到修改稿日期: 2003-08-16

$$\vec{k}_d = \vec{k}_i \pm \vec{K} \quad (2b)$$

式中, ω_i 和 Ω 分别为入射光波和超声波的圆频率, \vec{k}_i 和 \vec{K} 分别为入射光波和超声波的波矢。(2a) 式表明, 衍射光波相对于入射光波有一个超声频率大小的频移。而动量匹配条件(2b)式则给出如图 1 所示的发生正一级或负一级正常布喇格声光衍射时的一个等腰三角形。由图 1 可知, 衍射光波发生的是正的频移还是负的频移, 与光波和声波之间的相对传播方向有关。当光波与声波互相“迎面”传播时, 衍射光波的频率相对与入射光波有一个正的频移, 当光波和声波同向传播时, 衍射光波相对于入射光波有一个负的频移。

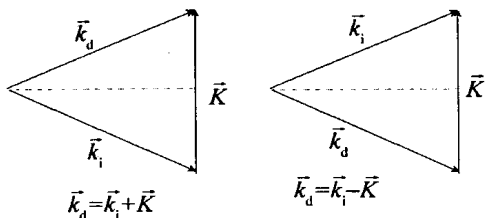


Fig. 1 Bragg acoustooptic interaction

由图 1 还可知, 衍射光和入射光的夹角即偏转角 α , 在小角度近似下为:

$$\alpha = 2\theta_B = 2\sin^{-1} \frac{\lambda_0}{2n\Lambda} \approx \frac{\lambda_0}{n\Lambda} = \frac{\lambda_0}{nv} f \quad (3)$$

式中, v 为超声波波速, f 为超声波频率。(3) 式表明, 偏转角 α 与超声频率 f 成正比, f 变化, 偏转角 α 也会发生变化。当频率变化量为 Δf 时, 相应的光束方向的变化量即为:

$$\Delta\alpha = \frac{\lambda_0}{nv} \Delta f \quad (4)$$

2 级联布喇格声光相互作用的频移和光束偏转分析

首先需要说明的是, 下面的讨论均是对正常布喇格声光相互作用而言的。光束连续发生两次布喇格声光相互作用, 可有如图 2 所示 6 种情况。图 2 中 f_1 和 f_2 分别为第 1 列和第 2 列超声波的频率。为保证第 2 次声光相互作用所必须满足的布喇格条件, 第 2 列声波与第 1 列声波在传播方向有一个夹角, 用 θ 表示, 如图 2a 所示, 为清楚起见, 其它图中的 θ 没有标出。 θ 的大小与两次声光相互作用所满足的布喇格角有关系。

对于图 2a 中所示的级联布喇格声光相互作用, 一次发生正一级布喇格衍射, 一次发生负一级布喇格衍射, 因此, 二次衍射光波相对于入射光波所发生的频移为:

$$\Delta f_a = f_1 - f_2 \quad (5)$$

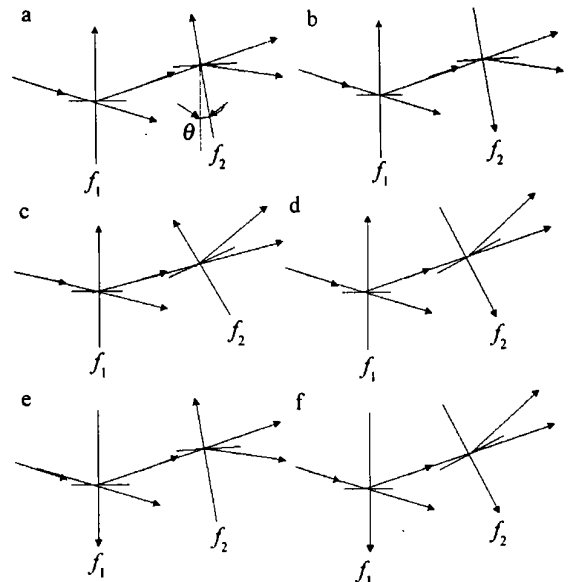


Fig. 2 Bragg acoustooptic interaction in cascade

二次衍射光波相对于入射光波所发生的光束偏转为:

$$\alpha_a = 2(\theta_{B_1} - \theta_{B_2}) \quad (6)$$

θ_{B_1} 和 θ_{B_2} 分别为发生两次布喇格声光相互作用所需满足的布喇格角。

对图 2 中其它 5 种情况进行相同的分析, 可知它们所发生的频移分别为: $\Delta f_b = f_1 + f_2$; $\Delta f_c = f_1 + f_2$; $\Delta f_d = f_1 - f_2$; $\Delta f_e = -f_1 - f_2$ 和 $\Delta f_f = -f_1 - f_2$ 。所发生的光束偏转角为: $\alpha_b = 2(\theta_{B_1} - \theta_{B_2})$; $\alpha_c = 2 \times (\theta_{B_1} + \theta_{B_2})$; $\alpha_d = 2(\theta_{B_1} + \theta_{B_2})$; $\alpha_e = 2(\theta_{B_1} - \theta_{B_2})$ 和 $\alpha_f = 2(\theta_{B_1} + \theta_{B_2})$ 。比较上面 6 种情况可知, b, c, e 和 f 4 种情况下发生了相对较大的频移, a, d 两种情况下的频移量相对较小。而就二次衍射光波相对于入射光波的光束偏转来说, c, d 和 f 3 种情况下的角度偏转较 a, b 和 e 3 种情况下的角度偏转大。可见, 若希望得到较大的偏转角度和较小的频移, 图 2d 所示的情况是最佳的选择。相反, 若希望得到较小的偏转角和较大的频移, 可选择 b 和 e。在 a 这种情况下, 频移和偏转角均比较小。在 c 和 f 两种情况下, 频移和偏转角均比较大。由于在实际中, 激光束在空间上都有一定的线度, 并且在传播时会在空间上进一步扩展, 在声光相互作用过程中, 这就不可避免地发生衍射光波与未发生衍射的光波之间的重叠, 这当然不是所希望发生的。从图 2 可以看出, 就所需要的光波来说, 对光波混叠影响最大的是第 2 次声光相互作用的一级光和零级光之间的重叠, 若避免这两束光与第 1 次声光相互作用的零级衍射光之间的重叠, 在实际中是很有意义的。由(3)式

可知,光束的偏转是同超声波的频率有关的。利用(3)式和(6)式有:

$$\alpha_a = 2(\theta_{B_1} - \theta_{B_2}) = \frac{\lambda_0}{n} \left(\frac{f_1}{v_1} - \frac{f_2}{v_2} \right) \quad (7)$$

式中, v_1 和 v_2 分别为两列声波在介质中的传播速度, 一般有 $v_1 \approx v_2 = v$, 则:

$$\alpha_a = 2(\theta_{B_1} - \theta_{B_2}) = \frac{\lambda_0}{nv} (f_1 - f_2) \quad (8)$$

当两列声波均有较小的频率变化时, 发生的光束偏转的变化为:

$$\delta \alpha_a = \frac{\lambda_0}{nv} (\delta f_1 - \delta f_2) \quad (9)$$

可见, 当两列声波的频率变化相同, 即 $\Delta f = \delta f_1 = \delta f_2$ 时, 可有 $\Delta \alpha_a = 0$ 。即此时经过两次声光衍射, 输出光方向不因声波频率的变化而改变。同理, 对于发生大的光束偏转时, 有:

$$\alpha = 2(\theta_{B_1} + \theta_{B_2}) = \frac{\lambda_0}{nv} (f_1 + f_2) \quad (10)$$

若两列声波的频率 f_1 和 f_2 相反变化, 即 $\Delta f = -\delta f_1 = \delta f_2$, 同样有 $\Delta \alpha = 0$ 。这在实际中是很有意义的, 这将使二次衍射光波的接收探测变得很容易。

一般情况下, 级联的两个声光器件是在同一声光介质材料上制作的。当两列声波的频率 f_1 和 f_2 相同时, 由图 2 可知, 在图 2a, 图 2b 和图 2e 中, 二次衍射光的传播方向同入射光的入射方向相同, 二者仅有一个侧向偏移, 并且, 当入射光以布喇格角入射时, 衍射光自动满足布喇格条件而发生第 2 次声光布喇格衍射。这样, 就避免了使用两个声光布喇格器件时, 为了满足布喇格条件而进行的调整, 并且这对于其它相关器件的连接也是很方便的。事实上, 级联形式的布喇格器件大都采用这种结构。对 c, d 和 f 3 种情况, 虽然它们在二次声光相互作用时不能自动满足布喇格角, 就光束偏转来说却有优势, 并且在器件设计上也不难实现。

实际中常保持两超声波的工作频率 f_1 和 f_2 有相等的中心频率 f_0 , 因此, 两超声波的工作频率可表示为:

$$f_1 = f_0 \pm \delta f_1 \quad (11a)$$

$$f_2 = f_0 \pm \delta f_2 \quad (11b)$$

式中, 正负号的选取根据情况而定。在实际中可根据需要选择图 2 中任一种情况, 所不同的是如何组合两次声光相互作用, 如何对声波频率变化进行控制。

上面所进行的讨论均是理想情况下的结果。在实际中, 介质中声速 v 是同方向有关的, 即一般 $v_1 \neq v_2$ 。上面的讨论也没有考虑到发生声光效应后光波频率的变化和光波频率变化而引起的相应的折

射率 n 变化——即色散问题。

下面先就声速的影响作一讨论。设两列声波的频率变化为 $\Delta f = \delta f_1 = \delta f_2 = \delta f$ 。由(7)式, 考虑两声波波速不同, 由于声波频率的变化而引起的光束偏转角的变化为:

$$\delta \alpha = \frac{\lambda_0 \delta f}{n} \left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right) \quad (12)$$

只要(12)式所给出的角度变化小于光束发散角 λ/L , 这种变化一般是可以忽略的。这里 L 是光束在声光相互作用的光束宽度。利用(12)式, 要求 $\delta \alpha < \lambda/L$, 可有:

$$|\delta f| < \frac{v_1 v_2}{L |v_1 - v_2|} \quad (13)$$

由(13)式可知, 当 $v_1 = v_2$ 时, 有 $\delta f < \infty$, 这实际表明此时对 δf 没什么限制。基于这一点, 在器件设计时保持两声波的速度基本相等将是很有必要的。对其它情况进行分析, 也会有相同的结果。

通常所选用光波频率约为 10^{14} Hz, 应用的超声频率一般在几百兆赫兹, 即 10^8 Hz 量级, 光波频率远大于声波频率, 因此, 可近似认为在发生第 2 次声光相互作用时, 光波频率没有发生改变。并且, 声光相互作用本身也具有一定的带宽, 可以在一定范围内近似满足布喇格条件, 而对于一般介质来说, 色散很小, 因而可不考虑光波频率的变化。

文中仅就正常布喇格声光相互作用进行了讨论, 对反常布喇格衍射的情况也是类似的, 只是情况要复杂些。

3 结 语

对级联布喇格声光相互作用的频移和光束偏转进行了分析, 当组合两次声光相互作用, 可以得到不同的频移和光束偏转。在不同的情况下, 可以通过调节两列声波的频率, 使其相同变化或相反变化, 来实现二次衍射输出光波的传播方向不发生变化。

参 考 文 献

- [1] KOTOV V M. Quantum Electron, 2000, 30(4): 373~376.
- [2] CHENG Zh Y, TASI C S. J Lightwave Technol, 1989, 7(10): 1575~1579.
- [3] GAZALET M G, RAVEZ M, HAINE F *et al.* Appl Opt, 1994, 33(7): 1293~1298.
- [4] BAROCSI A, JAKAB L, RICHTER P. Proc SPIE, 1994, 2240: 108~113.
- [5] 俞宽新. 压电与声光, 1994, 16(4): 10~14.
- [6] 俞宽新. 光学学报, 1995, 15(3): 381~384.
- [7] 许炳活, 储海群, 金建辉 *et al.* 应用声学, 1994, 13(5): 10~14.
- [8] 殷宝璐, 杜燕贻, 黄 骝 *et al.* 量子电子学, 1995, 12(4): 354~360.
- [9] 亚里夫 A, 叶 P. 晶体中的光波. 北京: 科学出版社, 1991. 291~292.