

声场中光波传播特性的研究

董秋霞

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要:利用量子理论对声场中光波的传播特性进行了研究,分析了声波与光波在相互作用中能量与动量的传递过程,给出了光波在声场中受声波调制后的频移量,提出了一种利用声光偏转效应对光波强度及传播方向实现主动控制的方法。

关键词:声场;超声光栅;光波

中图分类号:TN201 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2000)04-0055-04

随着通信事业的不断发展,光波与声波作为一种通信信号的载体,在很多方面已有广泛地应用。但对于既可以传播声波,又可以传播光波的一些光学介质来说,当光波与声波同时在该介质中传播时,它们彼此间产生的相互耦合作用将会改变该介质的光学特性。声波是一种纵向压力波,它在介质中传播时,能够引起介质的伸缩,从而改变介质的密度和折射率的分布,使得原来各向同性的均匀介质变为各向异性的非均匀介质,导致介质的光学特性发生本质性的变化,甚至会改变光波在该介质中的频率及传播方向。本文对声场中光波的传播特性作了定性和定量的理论分析,并给出了一种对光波强度及传播方向实现主动控制的方法。

1 声波对介质光学特性的影响

声波是一种机械应力弹性波,当声波在介质中传播时,沿波的传播方向必将引起介质密度发生疏密交替的周期性变化,在被声波压缩的地方密度较大,其折射率也大;在被声波拉伸的地方密度较小,其折射率也小,空间周期与声波的波长(λ_s)相等,如图1所示。

介质密度及折射率变化的结果,改变了光波在该介质中的传播特性。例如:当光波射入该介质中时,在折射率较大处能够使光波产生一定的反射,从这种意义上来说,声波所引起的介质折射率沿波传播方向呈现出的疏密周期性的分布,相当于一系列等间距放置的部分反射镜,当然,这种反射镜以介质中的声速 V_s 在运动。如果镜间距离 λ_s 非常小(比如:使用波长非常短的超声波),由光的衍射理论可知,载有超声波的介质,对侧面传来的光波来说,其作用就相当于一个光栅^[1-3],能够使光发生衍射,其光栅常数等于超声波的波长(λ_s),这种等价光栅称为光超声光栅。

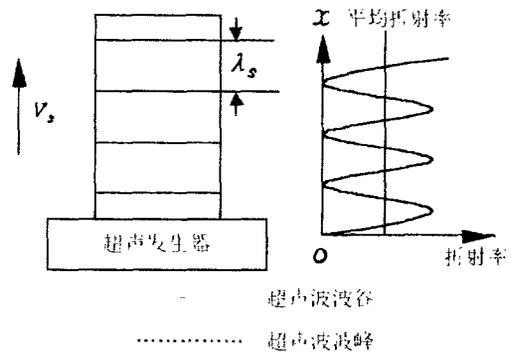


图1 声波对介质折射率的影响

2 声光作用的量子分析

由于声速远低于光速,因此,介质折射率的变化相对来说可以看成是稳定的。当光波与声波相遇时,光子与声子发生相互作用,并进行能量和动量的传递。根据量子理论有

收稿日期:2000-01-15

作者简介:董秋霞(1962-),女,陕西眉县人,讲师,主要从事光学应用研究。

光子的能量 $E_0 = h\nu_0$ (1)

光子的动量 $P = h/\lambda = (h/2\pi)K$ (2)

式中 ν_0 ——光子的频率

λ ——光波的波长

$K = 2\pi/\lambda$ ——光波的波矢量,即光波波矢,并且沿着光沿传播方向

矢量式 $\vec{P} = (h/2\pi)\vec{k}$ (3)

同样 声子量能 $E_s = h\nu_s$ (4)

声子的动量 $\vec{P}_s = (h/2\pi)\vec{k}_s$ (5)

式中 ν_s ——声子的频率

\vec{k}_s ——声波的波矢量,即声波波矢,并且沿着声波传播方向

声子与光子相互作用时,可看成是一具有能量为 $E_i = h\nu_i$, 波动量为 $\vec{P}_i = (h/2\pi)\vec{k}_i$ 的入射光子作用在一频率为 ν_s , 声波动量为 $\vec{P}_s = (h/2\pi)\vec{k}_s$ 的声子上, 入射光子湮灭, 与此同时, 产生一个频率为 ν_f 的波矢为 \vec{k}_f 的新光子和一个频率为 ν_s 波矢为 \vec{k}_s 的新声子, 使得光波产生一定的频移^[4]。

当超声波迎着光波传播时, 光子与迎面而来的声子结合后将产生一个新的光子。如图 2(a):

由能量守恒及(1)式有

$$h\nu_i + h\nu_s + h\nu_f$$

即 $\nu_s = \nu_f - \nu_i = \Delta\nu$ (6)

$\Delta\nu$ ——光波的频移量

由动量守恒及式(3)有

$$(h/2\pi)\vec{k}_i + (h/2\pi)\vec{k}_s = (h/2\pi)\vec{k}_f$$

即 $\vec{k}_f = \vec{k}_i + \vec{k}_s$ (7)

因为 $\nu_s \ll \nu_i$, 由(6)式可知

$$\nu_f \approx \nu_i$$

同理 $k_f \approx k_i$

动量矢量关系如图 2(b):

当超声波背离光波传播时, 光子与声子作用后, 产生一个新的光子和一个新声子。如图 2(c):

同理可得到

频率的变化量 $\Delta\nu = \nu_f - \nu_i = -\nu_s$ (8)

新光子的波矢 $\vec{k}_f = \vec{k}_i - \vec{k}_s$ (9)

其动量矢量关系如图 2(d):

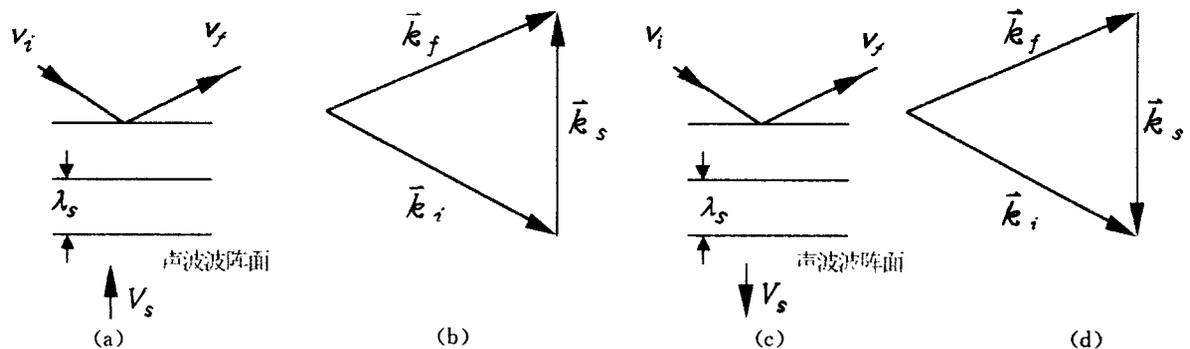


图 2 光波与声波作用的矢量图

将(6)、(8)式写在一起有

$$\nu_f = \nu_i \pm \nu_s$$

其中, 声波平面迎着光波运动时取“+”, 背离光波运动时取“-”

由此看出, 当光波射入载有声波的光学介质时, 将有一部分入射光被衍射至新的方向, 与此同时, 还会出现频率的移动, 频移量正好等于声波的频率, 其值可为正, 也可为负。

3 声波引起的光波的布喇格衍射

当声波以速度 V_s 在介质中传播时，它所形成的声光栅的栅面也将以相同的速率 V_s 作相应的移动，使介质密度呈现疏密交替变化。

设 超声波的波动方程为

$$Y = Y_0 \cos[\omega t - (2\pi/\lambda_s)x] \tag{10}$$

λ_s ——超声波的波长

ω ——超声波波源的振动圆频率

Y_0 ——介质元振动的振幅

则 介质折射率的空间变化关系也可表示为同样的形式

$$\Delta n = \Delta n_0 \cos[\omega t - (2\pi/\lambda_s)x] \tag{11}$$

平面单色光波进入载有上述超声波的介质中后，光波在声场中波峰附近的波前遇到最大的折射率，其传播速度最小，波面落后；而在声场中波谷附近的波前遇到最小的折射率，其传播速度则最大，波面超前。所以，平面单色波在载有声波的介质中的波前不再是平面，而是呈现出波浪形，且其形状与介质折射率的分布、超声波的波长有关。如图 3：

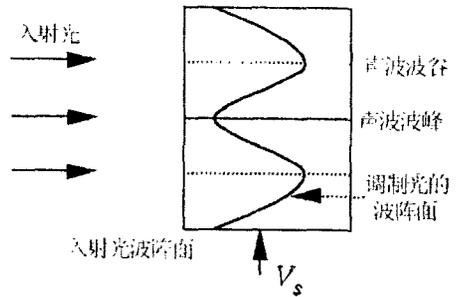


图 3 声光波阵面调制示意

超声波所引起的介质密度呈现出不均匀分布，对入射光波来说，其作用类似于间距 $d = \lambda_s$ 的原子平面的规则排列。当光波以掠射角 θ 进入载有声场的介质时，将发生衍射，使光波偏离原入射方向的一个角度（偏转角），如图 4。

显然
$$\varphi = 2\theta \tag{12}$$

当入射光波与介质中声光栅的的栅面相交成布喇格角时，则产生布喇格衍射，

按布喇格衍射条件

$$2nds \sin\theta = K \cdot \lambda \tag{13}$$

因为，声光栅光栅常数 $d = \lambda_s$
$$\tag{14}$$

式中 n ——介质的折射率

K ——衍射级数

λ ——光在真空中波长

θ ——入射光的掠射角

将(14)式代入(13)式得
$$2n\lambda_s \sin\theta = K \cdot \lambda \tag{15}$$

光波被声衍射时，如果作用路程较长，则强度较弱的较高衍射级的衍射光波就会被散失掉，因此，只有 0, ±1 级衍射光才能受到声波的耦合，如取 $K=1$ 代入(15)式，则有

$$2n\lambda_s \sin\theta = \lambda \tag{16}$$

因为
$$\lambda_s \gg \lambda$$

所以(16)式可写成
$$\theta \approx \sin\theta = \lambda/2n\lambda_s \tag{17}$$

将(17)式代入(12)式可得

偏转角
$$\varphi \approx 2\theta = \lambda/n\lambda_s = \lambda\nu_s/nV_s \tag{18}$$

其中 ν_s ——声波频率

V_s ——声波在介质中的速度

由于晶体中的原子平面固定不动，所以伦琴射线的布喇格衍射不出现频移，而声光栅的“晶格”却以速度 V_s 运动，实质上，光波是入射在以速率 V_s 运动的平面上，因而要产生多普勒频移。

将(18)式两边微分得
$$\Delta\varphi = (\lambda/nV_s)\Delta\nu_s \tag{19}$$

该式说明，利用改变超声波的频率可使光波发生偏转，其偏转角的大小取决于声波的频率。当频率改变

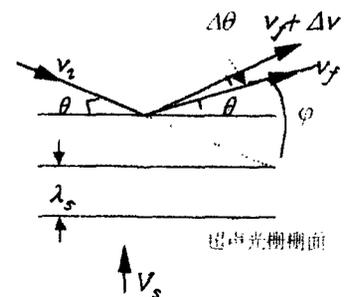


图 4 声光偏转原理示意图

时,偏转角也随之改变,偏转角的改变量与声频的改变量成正比。如图4。

4 应用

在光通信中,根据实际用途,常常需要对光波的强度及传播方向进行必要的控制。利用声光相互作用,可以制成声光调制器和声光偏转器。它们的基本结构类似于图1。

根据声场对光波的衍射作用,在布喇格衍射条件下工作时,衍射光的强度、频率和方向都随声场的变化而变化,从而可方便地控制光束强度和传播方向,达到调制的目的。声光调制具有结构稳定、不易失调、光损耗小、所需的电源调制功率也较小等优点,因而,在传播、显示和信息情报等技术中得到广泛应用。

通过改变超声波频率的方法,能够使工作在布喇格衍射条件下的光束改变方向,从而实现光束的偏转。对于一个好的偏转器件来说,不仅要有足够大的偏转角,更重要的是应具有能分辨的光斑数目 N ,若入射光束的直径为 D ,

$$\text{发散角} \quad \theta_{\text{发}} \approx \lambda/nD \quad (20)$$

$$\text{则可分辨的光斑数目} \quad N = \Delta\varphi/\theta_{\text{发}} \approx (D/V_s)\Delta\nu_s = \tau\Delta\nu_s \quad (21)$$

其中, $\tau=D/V_s$ 为超声波穿过光束直径的时间,与材料的声损耗及频率有关。

由式(21)可知,要提高偏转器的分辨率,就必须增宽超声波的带宽和入射光束的宽度。

利用声光偏转既可对光波进行主动控制,也可将各种信号加载到光波上去,完成对信息的运输、存储及各种处理。偏转效应在激光技术及计算机技术中有广泛应用。

参考文献:

- [1] 史锦珊,郑绳植. 光电子学及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1991.
- [2] 杨经国,冉瑞江,杜定旭,等. 光电子技术[M]. 四川:四川大学出版社,1990.
- [3] 丁俊华,崔砚生,吴美娟,等. 激光原理及应用[M]. 北京:清华大学出版社,1987.
- [4] A. 亚里夫. 量子电子学[M]. 上海:上海科学出版社,1982.

Investigation on Moving Feature of Light Wave in Sound Wave Field

DONG Qiu-xia

(The Telecommunication Engineering Institute, AFEU., Xi'an 710077, China)

Abstract: The moving feature of light wave in sound wave field is studied by using quantum theory. We analyse the transfer process of energy and momentum when light wave and sound wave interact. The frequency deviation of light wave is given after light wave is modulated by sound wave in sound field. The initiative controlling method of light quantity and it's moving direction is put forward by using sound-light deviation effect.

Key words: sound field; ultrasonic grating; light wave