

· 光电器件与材料 ·

声光相互作用产生拍频及其机理的研究

施慧渊, 杨立森, 李 强

(内蒙古师范大学 物理与电子信息学院, 呼和浩特 010022)

摘 要: 声光相互作用产生频移和拍频的理论已经较为完善, 但没有具体变化规律的描述。从实验出发, 利用高频探测器结合共焦扫描干涉仪和频谱分析仪, 用实验方法通过研究 Raman-Nath 衍射点的拍频现象直观地将声光相互作用产生拍频的现象展示出来, 对拍频的产生机理进行了相关分析, 并总结了拍频形成的规律, 对其产生的条件等因素做了探索。

关键词: 声光学; 声光调制器; 拍频

中图分类号: 0426.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-01-0018-04

Beat Frequency Generated by Acousto-optic Interaction and Principle Research

SHI Hui-yuan, YANG LI-sen, LI Qiang

(College of Physics and Electronic Information, Inner Mongolia Normal University, Huhhot 010022, China)

Abstract: The theories of frequency shift and beat frequency generated by acousto-optic interaction are more perfect, but the detailed changing rules are not described. Based on experiments and with a high frequency detector, a confocal scanning interferometer and a spectrum analyzer, through researching the beat frequency phenomena of Raman-Nath diffraction point, the beat frequency phenomena generated by acousto-optic interaction is directly shown. The generation principle of beat frequency is analyzed. The generation rule of beat frequency is summarized and elements such as generation condition are explored.

Key words: acousto-optics; acousto-optic modulator; beat frequency

声光学(acousto-optics)是研究光子与声子相互作用产生的物理现象、规律和应用的一门新的边缘性学科。这种现象是光波与介质中的声波相互作用的结果^[1]。在20世纪60年代,激光问世,由于它的单色性、方向性好等特点使得声光学理论的价值更具有实际意义。声光器件能对激光束进行调制,例如改变激光束的频率、方向和强度等^[2],因此激光很快地被应用到了声光学领域。光拍频是一种检测微小频率差的特别灵敏和简单的方法,是相干检测的一种十分重要的手段^[3]。拍频的实际应用有实现对液体吸收的测量^[4],制作对小位移具有高灵敏度的激光器^[5],用拍频的方法进行系统误差分析^[6],利用光

拍频技术来实现测风^[7]、速度测量^[8]等。近年来,由于高频声学 and 激光器的发展,这种技术也用于了国防^[9]。但声光作用的具体机理跟规律没有很好的诠释,文中就其基础理论的正确性,做了直观的实验证明,并就其机理做了相关研究。

1 理论分析

1.1 折射率光栅

当声光介质中有超声波通过时,介质的折射率将受应变的调制而作周期性变化,相当于一个光栅。工作原理如图1所示。

收稿日期: 2014-01-07

基金项目: 内蒙古自然科学基金资助(2013MS0926)

作者简介: 施慧渊(1987-),男,山西省神池县人,内蒙古师范大学硕士研究生,主要从事非线性光学的研究。

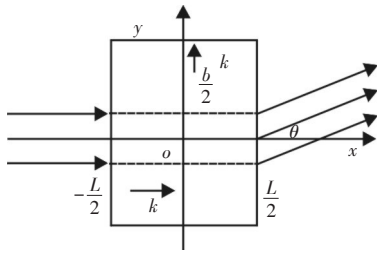


图1 折射率光栅

x 所示方向是光束传播的方向, y 所示方向是声波传播的方向。声波在声光介质中传播时会产生行波,在后垂直表面(图1中的上表面)会发生反射,由于是同一束声波的入射和反射,两束波相遇会发生干涉,干涉之后,实验所用的声光调制器为驻波型的,故形成驻波。入射和反射两束声波可用式(1)和式(2)表示^[10]

$$a_1 = A_1 \sin(\Omega t - Kz) \quad (1)$$

$$a_2 = A_2 \sin(\Omega t + Kz + \Phi) \quad (2)$$

式中, Ω 为声波频率; K 为声波矢; Φ 为 a_1 和 a_2 两声波的相位差; A_1 和 A_2 为声波振幅。就声光介质而言,声阻一般都远大于空气的声阻,故可以近似将空气反射面的声反射率视为1,由于是同一波,三者的振幅应该是相等的,所以有 $A_1 = A_2 = A_0$, 则两声波的合成波如式(3),且两声波的合成波为一驻波。

$$a = a_1 + a_2 = 2A_0 \sin(\Omega t + \frac{\Phi}{2}) \cos(Kz + \frac{\Phi}{2}) \quad (3)$$

在实际情况下,声光介质对声波有一定的吸收作用,且空气阻抗不为零,声反射率不会是百分之百,另外,工艺上声学面不可能磨得完全平行,这样反射波就会有损耗,使得 $A_1 \neq A_2$, 此时两列声波的合成波为

$$a = a_1 + a_2 = (A_1 - A_2) \sin(\Omega t - Kz) + 2A_2 \sin(\Omega t + \frac{\Phi}{2}) \cos(Kz + \frac{\Phi}{2}) \quad (4)$$

式(4)中右边第一项说明实际的驻波型声光调制器内包括有行波的成分。此时,调制器相当于一个光栅,行波在介质中传播相当于一个移动的光栅,驻波相当于一个随声波二倍频率闪动的相对位置固定的光栅。经实验验证,行波的衍射点是单频的,形不成拍频。

1.2 经声光效应器衍射后的各级衍射光振幅

经声光效应器衍射后的各级衍射光振幅的表达式如下式

$$A_n(\theta, t) = A \sum_{r=-\infty}^{+\infty} J_r(v^+) J_{n-r}(v^-) \exp\{j[\omega_0 + (2r - n)\Omega]t\} \quad (5)$$

其中, v^+ , v^- 表示正向声场和反向声场,由式(5)可知, n 级衍射光的光场并非是单频成分,而是由多个频率为 $\omega_0 + (2r - n)\Omega$ 的分量叠加而成的,就零级情况而言

$$A_0(t) = J_0(v^+) J_0(v^-) \exp(j\omega_0 t) + J_1(v^+) J_{-1}(v^-) \exp(j\omega_0 t) \exp(j2\Omega t) + J_{-1}(v^+) J_{+1}(v^-) \exp(j\omega_0 t) \exp(-j2\Omega t) + J_2(v^+) J_{-2}(v^-) \exp(j\omega_0 t) \exp(j4\Omega t) + J_{-2}(v^+) J_2(v^-) \exp(j\omega_0 t) \exp(-j4\Omega t) + \dots \quad (6)$$

同样,对于一级衍射光而言,有下式

$$A_1(t) = J_0(v^+) J_1(v^-) \exp(j\omega_0 t) \exp(-j\omega t) + J_1(v^+) J_0(v^-) \exp(j\omega_0 t) \exp(j\Omega t) + J_{-1}(v^+) J_2(v^-) \exp(j\omega_0 t) \exp(-j3\Omega t) + J_2(v^+) \exp(j\omega_0 t) \exp(j3\Omega t) + \dots \quad (7)$$

2 实验装置

实验装置如图2所示。其中,1为CG-V型光速测定仪;2为透镜;3为分光棱镜;4为共焦球面扫描干涉仪;5为示波器;6为光电探测器;7为GIGOL-DSA1020型频谱仪。

3 实验过程

实验光路如图2所示。

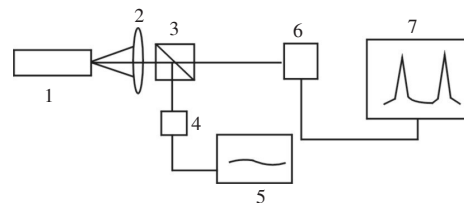


图2 实验光路图

激光器发出的光通过有声波通过的介质(图2中的光速测定仪本身含有声光调制器,所以没有单独画出)发生衍射,主要是Raman-Nath衍射,其衍射点为以零级点为中心的奇数个衍射点,在实验中主要用到的只有0级、 ± 1 级三个光衍射点(更高阶的衍射点光强太弱,实验现象不明显)。

图2、图3中有两簇波形是因为所用的激光器是

双纵模激光器。随着声波频率的变化,频率展开的图形也有所不同,是图 3 中三种图形的往复渐变过程。将零级光点打到高频探测器上,示波器上会出现如图 3 所示的衍射图样。与此对应,频谱仪上会出现如图 4 所示的图样。其中,图 4a 所注频率为 98.250 000 MHz;图 4b 所注频率为 196.500 000 MHz。

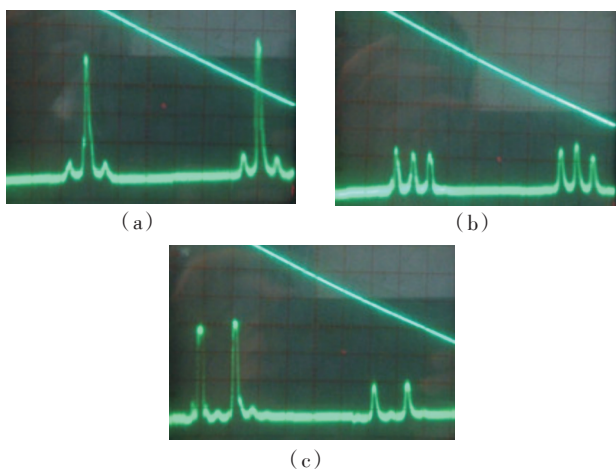
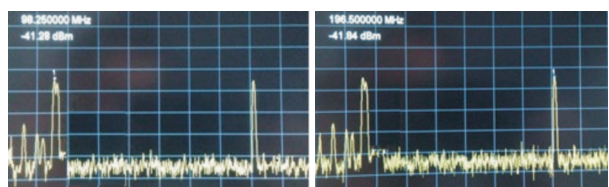


图 3 变化声波频率时零级谱的频率展开



(a)标注频率为 98.250 000 MHz (b)标注频率为 196.500 000 MHz

图 4 零级谱形成的拍频

将正一级打到高频探测器上,示波器上会出现如图 5 所示的衍射图样。

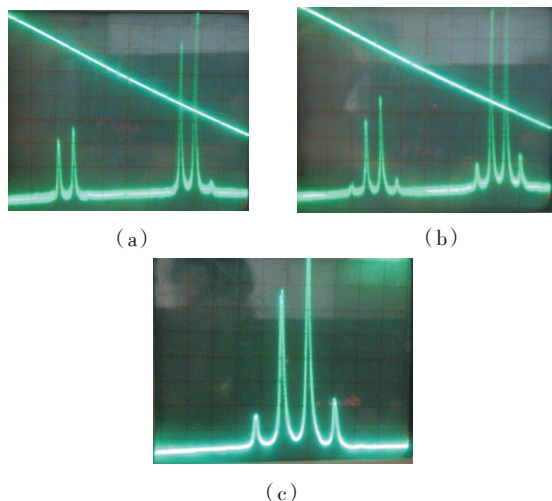


图 5 一级谱的频率展开

这时,频谱仪上会出现如图 6 所示的图形。其中,图 6a 所注频率为 98.298 156 MHz;图 6b 所注频率为 197.266 666 MHz;图 6c 所注频率为 296.200 000 MHz。将负一级光点打到高频探测器上,观察到的现象与正一级的类似,仅仅是示波器上的波形与正一级的呈对称,故不赘述。

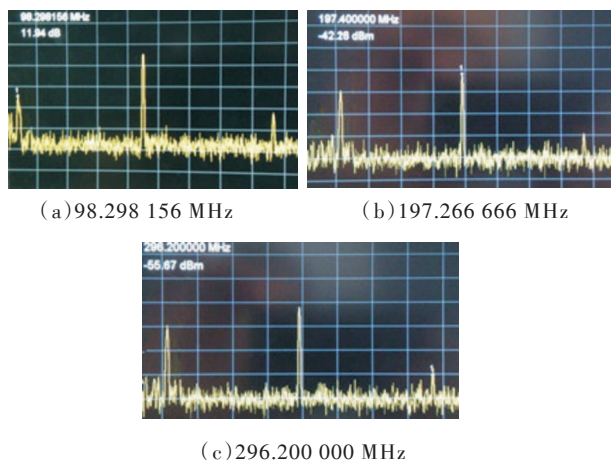


图 6 一级谱形成的拍频

4 实验结果分析

实验中经检测,经过声光效应器衍射后的每一簇衍射光中各光点的纵模间具有相同的偏振方向,两簇之间偏振方向垂直。由于是一个激光点的衍射点,实验过程中各器件位置固定不变,故各点间的相位差也是固定的值。各参数均不变的条件下,仅将声光器件与高频探测器之间的距离作调整,实验现象是一致的,只是开始时的现象与之前的不在同一起点上,后续过程是一样的。这个现象可以说明,拍频稳定呈现的条件是相位差固定、偏振方向一致。

(1)由式(6)可以看出,对于零级光而言,其频率展开图是以 ω_0 为中心对称的,各谱线之间间隔为 2Ω 。如图 7a 所示。

同样,由式(7)可以看出,对一级衍射光而言,其频率展开图是偶数个峰,呈左右对称分布,如图 7b 所示。频率为 $\omega_0 \pm (2n-1)\Omega$ 的两条谱线显示出来的图形一般来说也不是完全对称的,这是由于有行波成分导致的。当 $n=1$ 时, $\omega_0 - \Omega$ 谱线有行波成分,而 $\omega_0 + \Omega$ 只有驻波成分,故不对称。理论上讲,仅在 $v^+ = v^-$ 的情况下,也就是纯驻波时才对称。考虑到现实中多种误差因素,这种情况很难达到的,只能无限趋近。

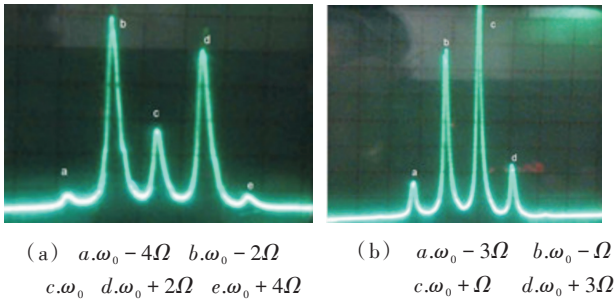


图7 谱线间隔分布图

(2)对于零级光点,声波频率的变化与示波器波形的变化规律及频谱仪上各倍频谱出现的情况见表1。

表1 零级光点规律图

声波频率/MHz	示波器波形	频谱仪上频谱情况		
		二倍	四倍	六倍
49.144	图3c所示	较矮	较高	无
49.144~49.195	图3c~图3b渐变	较高	较矮	无
49.195~49.244	图3b~图3a渐变	较高	较矮	无
49.244~49.209	图3a~图3b渐变	较高	较矮	无
49.209~49.354	图3b~图3c渐变	较矮	较高	无
49.354~49.402	图3c~图3b渐变	较高	较矮	无
49.402~49.452	图3b~图3a渐变	较高	较矮	无
49.452~49.497	图3a~图3b渐变	较高	较矮	无
49.497~49.545	图3b~图3c渐变	较矮	较高	无
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

分析表1可知,示波器跟频谱仪上的图形变化都是周期性的。声波频率每变化大概0.22 MHz(平均值),两图形就各自完成一个周期的变化;在一个周期内,声波频率每变化0.044 MHz,二者的图形也是分别一致的;结合图7a,只有在b和d两个波峰越高时,四倍的频谱才会越明显,而二倍的一直都存在,只是谱线高低即拍频强弱有所变化。

(3)对于一级光点,声波频率的变化与示波器波形的变化规律及频谱仪上各倍频谱出现的情况见表2。

分析表中可以得出跟零级点时一致的变化周期,同样是0.22 MHz。结合图7b,只有在a和d两个波峰越高时,四倍和六倍的频谱才会越明显,而二倍频同样是一直都存在。

(4)由第(2)、(3)部分的分析可得,图4所示的频率98.250 000 MHz、196.500 000 MHz分别是图7

中的 ω_0 分别与 $\omega_0 - 2\Omega$ 、 $\omega_0 + 2\Omega$ 形成拍后的叠加(理论上还应该含有 $\omega_0 - 4\Omega$ 与 $\omega_0 + 4\Omega$ 的拍频,由于实验条件限制,更高阶的实验现象不容易观察,故忽略)。图5所示频率98.298 156 MHz、197.266 666 MHz、296.200 000 MHz分别由图7b中的 $\omega_0 - \Omega$ 与 $\omega_0 + \Omega$ (相差 2Ω)、 $\omega_0 - \Omega$ 与 $\omega_0 + 3\Omega$ 和 $\omega_0 - 3\Omega$ 与 $\omega_0 + \Omega$ (相差 4Ω)及 $\omega_0 - 3\Omega$ 与 $\omega_0 + 3\Omega$ (相差 6Ω)所形成的三种不同频率的拍频。

表2 零级光点规律图

声波频率/MHz	示波器波形	频谱仪上频谱情况		
		二倍	四倍	六倍
49.144	图5b所示	较矮	较高	较矮
49.144~49.256	图5b~图5a渐变	较高	较矮	消失
49.256~49.331	图5a~图5b渐变	较矮	较高	较矮
49.331~49.449	图5b~图5a渐变	较高	较矮	消失
49.449~49.576	图5a~图5b渐变	较矮	较高	较矮
49.576~49.687	图5b~图5a渐变	较高	较矮	消失
49.687~49.820	图5a~图5b渐变	较矮	较高	较矮
49.820~49.940	图5b~图5a渐变	较高	较矮	消失
49.940~50.043	图5a~图5b渐变	较矮	较高	较矮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

5 结论

通过以上分析,要产生拍频,得保证声光器件中的声波经反射后形成的是驻波,因为实验证明行波是形不成拍频的,有固定的相位差。还有就是每一簇衍射光中各光点的纵模间具有相同的偏振方向。文中明确的实验现象证实了驻波拍频的存在,实验所用的声波频率范围是49.144~51.151 MHz,声光调制器内的声波经反射形成的是驻波,每个衍射光点(包括零级点)内都不是单一成分。零级点中的频谱为奇数个,关于中间峰对称,一级点中的频谱为偶数个,成轴对称。随着入射声波的频率由小到大递增,各级点在示波器上显示的波形呈周期性变化(周期大约是0.22 MHz)。相应的频谱仪上的拍频频谱线图像也会出现高低周期性的变化(周期大约是0.22 MHz),X轴方向会有单方向的移动(频率大小)。用零级点时,调节频率过程中,会有二倍、四倍谱的出

(下转第31页)

- [10] ZHANG Ning, LIU Cang-li, SUN Cheng-wei. The thermal-coupling effect of CW COIL beam on composites[R]. AIAA, 95-1930.

- [11] 杨世铭,陶文铨.传热学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社, 2005:44-45.

(上接第21页)

现,用一级点时,调节频率过程中会有二倍、四倍、六倍谱的出现。在调节声波频率的过程中,可以看出,频谱仪上对应的谱线频率有 98.250 000 MHz、196.500 000 MHz、98.298 156 MHz、197.266 666 MHz、296.200 000 MHz,基本符合二倍,四倍,六倍的规律,与理论吻合。

参考文献

- [1] 李明,李冠成.声光效应实验研究[J].应用光学, 2005, 26(6):23-27.
 [2] 李武军,王晓颖.声光 Naman-Nath 衍射特性的研究[J].大学物理, 2009, 28(9):25-27.
 [3] 刘闯.声光脉冲延时自外差拍频实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
 [4] Kohanzadeh Y, Auston D H. Measurement of low-absorption coefficients using the beat frequency shift between transverse modes of a laser[J]. IEEE J. Quantum Electron, 1970, QE-6(7):475-477.

- [5] Weksler M, Vager Z, Neumann G. Measurement of a very high displacement sensitivity of the beat frequency in an He-Ne laser[J]. IEEE J. Quantum Electron, 1980, QE-16(7):785-790.
 [6] Jettappa, Richard Rodrigues, Sharma Seshadri. Frequency error estimation in nonlinear systems using beats[J]. ASME Des Eng Div Publ DE. 1991, 37:91-96.
 [7] Pelusi M D, Liu H F, Novak D. THz optical beat frequency generation from a single mode locked semiconductor laser[J]. Appl. Phys. Lett, 1997, 71(4):449-451.
 [8] Strand O T, Berzins L V, Goosman D R, et al. Veloeimetry using heterodyne techniques[J]. Proc. SPIE, 2005, 5580:593-599.
 [9] 程乃平.声光信号处理及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2004:195.
 [10] 李港.驻波型声光调制器的理论研究[J].北京:北京工业大学学报, 1998, 24(1):49-54.

(上接第25页)

频谱覆盖范围更宽的超连续光源,这为白光激光的研究提供了帮助,可见波段内的超连续光源将会在激光显示等新一代显示技术中发挥巨大的作用,同时对于可见波段内的多种复杂体系的探测分析也提供了理论和实验的研究基础。

参考文献

- [1] Yin S S, Kim J H, Zhan C, et al. Supercontinuum generation in single crystal sapphire fibers[J]. Optics Communications, 2008, 281(5): 1113-1117.
 [2] Nakaema W M, Hao Z, Rohwetter P, et al. Supercontinuum generation in a sapphire fiber and comparison with a compact PCF based light source[C]//CLEO: Science and Innovations. Optical Society of America, 2011: JThB97.
 [3] Wang Q, Geng J, Luo et al. T. Mode-locked 2 μm laser with highly thulium-doped silicate fiber[J]. Opt. Lett., 2009, 34

- (23):3616-3618.
 [4] Alexander Sell, Günther Krauss, Rüdiger Scheu, et al. 8-fs pulses from a compact Er: fiber system: quantitative modeling and experimental implementation[J]. Optics Express, 17(2).
 [5] 阮双琛,闫培光,郭春雨.光子晶体光纤超连续谱光源[J].深圳大学学报:理工版, 2011, 28(4):295-301.
 [6] 刘双龙,陈丹妮,刘伟.基于全正色散光子晶体光纤的超连续谱光源[J].物理学报, 2013, 62(18):184210-1-184210-7.
 [7] 冀翔,王小林,周朴.声光调Q纳秒脉冲全光纤超连续谱光源[J].强激光与粒子束, 2013, 25(1):119-122.
 [8] 谭方舟,刘江,孙若愚.基于多模干涉效应的全正色散被动锁模掺镱光纤激光器[J].中国激光, 2013, 40(4).
 [9] 沈君凤,罗风光.光子晶体光纤产生的超连续谱[J].光子学报, 2014, 43(1):0106007-1-0106007-4
 [10] 李超,朱启华,赵磊.中红外超连续谱在氟化物光纤中的产生[J].强激光与粒子束, 2014, 26(10):101005-1-101005-3.