

# 调制因子对拉曼-纳斯声光衍射的影响

周亚梅, 周金运, 雷亮, 冉坐, 邓亚飞, 林清华

(广东工业大学 物理与光电工程学院, 广东 广州 510006)

**摘要:**通过建立拉曼-纳斯衍射模型,运用数值模拟法,获得了拉曼-纳斯声光衍射的各级光强分布规律。表明调制因子对拉曼-纳斯衍射现象的产生有重大作用,且随着调制因子的增加,各衍射级的光强相对系数变化明显,且各级衍射光强变得匀滑。同时进行了相应的实验测试,实验结果与理论分析一致。

**关键词:**声光作用;拉曼-纳斯衍射;衍射光强;调制因子;声光器件

**中图分类号:** O426.3 **文献标识码:** A

## Effects of Modulation Factor on Raman-Nath Acoustooptic Diffraction Intensity Distribution

ZHOU Yamei, ZHOU Jinyun, LEI Liang, RAN Zuo, DENG Yafei, LIN Qinghua

(School of Physics & Photoelectric Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The light intensity distribution of Raman-Nath diffraction at all levels is obtained by establishing Raman-Nath-diffraction model and using numerical simulation method. The simulation results indicates that the modulation factor  $\nu$  has an important effect on Raman-Nath diffraction phenomenon, and the relative coefficient of light intensity at all levels is clearly changed and become smoothing with the increase of modulation factor. Simultaneously the corresponding experiment is carried out, and the experimental results are consistent with theoretical analysis.

**Key words:** acoustooptic effect; Raman-Nath diffraction; diffraction light intensity; modulation factor; acoustooptic device

### 0 引言

利用声光效应制成的声光器件,如声光调制器、声光偏转器和可调谐滤波器等,在激光技术、光信号处理和集成光通讯技术等方面有着重要的应用<sup>[1]</sup>。声光效应中,当超声波频率较低,光波平行于声波面入射,声光作用长度  $L$  较短时,就产生不同于布喇格(Bragg)衍射的拉曼-纳斯(Raman-Nath)衍射。近年有很多对 Raman-Nath 衍射的应用进行研究<sup>[2-5]</sup>,在其运用中,人们考虑声光作用长度较多。若采用不同的 Raman-Nath 衍射判据,则 Raman-Nath 声光衍射器件制作参数的选择也不同。

本文研究了 Raman-Nath 原理和 Raman-Nath 声光衍射的各级光强分布规律,通过数值模拟结合实验验证了随着调制因子  $\nu$  的增大,Raman-Nath 声光衍射各级衍射光强越匀滑的规律,对 Raman-Nath 衍射声光器件参数的选择有一定的参考价值。

### 1 理论模拟分析

发生 Raman-Nath 衍射时,介质声致折射率改变量为

$$(\Delta n)_M = \sqrt{M_2} \sqrt{\frac{P_s}{2HL}} \quad (1)$$

式中: $P_s$  为超声波功率; $H$  为声光器件的声柱宽度;

$M_2 = \frac{n_0^6 P^2}{\rho \mu_s^3}$  为品质因数,是声光材料的一个很重要的量, $P$  为弹光系数率, $\mu_s$  为超声波速。

宽度为  $q$  的平面单色光波正入射<sup>[6]</sup>宽度为  $L$  的声波柱,晶体左边界时的光场描述为  $\tilde{A} = Ae^{2\pi i x}$ ,由夫琅和费衍射远场衍射积分可得,探测面上任意一点的光场分布为

$$\tilde{A}(\sin \theta) = \frac{A}{q} \int_{-q/2}^{q/2} dx \cdot$$

收稿日期:2012-09-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60977029,61107029);广东工业大学重大项目培育专项基金资助项目(092010)

作者简介:周亚梅(1987-),女,河南虞城人,硕士生,主要从事光电材料与器件的研究。通信作者:周金运(1962-),男,河南罗山人,教授,博士生导师,博士,主要从事工程光学研究。Email:zhijy@gdut.edu.cn

$$e^{2\pi i f t - 2\pi i l x_0 / \lambda} \cdot e^{2\pi i l / \lambda \sin(2\pi x / \lambda_*)} \cdot e^{-2\pi i y / \lambda} \quad (2)$$

式中:  $f$  为入射光波频率;  $l$  为探测面上任意一点与原点连线对  $x$  轴正方向的方向余弦,  $l = \cos(\pi/2 - \theta) = \sin \theta$ , 令  $u = 2\pi/\lambda, b = 2\pi/\lambda_*, \nu = u(\Delta n)_M L = 2\pi(\Delta n)_M L/\lambda$ , 根据欧拉公式及 Bessel 函数公式, 将 Raman-Nath 声光衍射效应的数学模型转为用贝塞尔函数解析为

$$q \sum_{r=0}^{\infty} J_{2r}(\nu) \left[ \frac{\sin(ul + 2rb)q/2}{(ul + 2rb)q/2} + \frac{\sin(ul - 2rb)q/2}{(ul - 2rb)q/2} \right] + q \sum_{r=1}^{\infty} J_{2r-1}(\nu) \cdot \left[ \frac{\sin[ul + (2r+1)b]q/2}{[ul + (2r+1)b]q/2} - \frac{\sin[ul - (2r-1)b]q/2}{[ul - (2r-1)b]q/2} \right] \quad (3)$$

式中:  $J_r(\nu)$  是  $r$  阶贝塞尔函数, 当  $r$  从 0、1 到无穷大演化时, 对应有  $n = \dots, -1, 0, 1, \dots, J_0(\nu), J_1(\nu), \dots, J_{\infty}(\nu)$  多个  $n$  阶贝塞尔函数,  $n$  为衍射极值的级次。各级衍射光强度  $I_n$  满足  $I_n \propto J_n^2(\nu), \nu = u(\Delta n)_M L = 2\pi(\Delta n)_M L/\lambda$ 。根据式(3)通过 MATLAB 对 Raman-Nath 声光衍射光强相对系数  $J_n^2(\nu)$  随  $\nu$  变化绘制的三维图, 如图 1 所示。

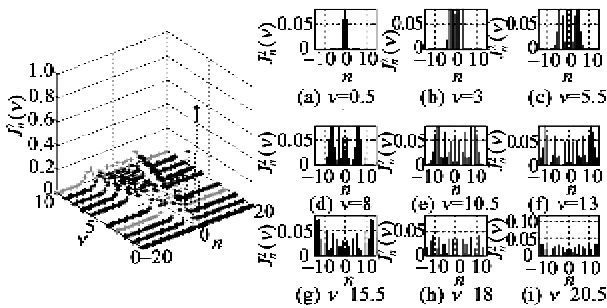


图 1 Raman-Nath 衍射光强系数模拟三维图及多个取值下的光强系数变化

由图 1(a) 可见,  $\nu$  为 0~10。当  $\nu=0$  时, 衍射光强分布在 0 级处, 即入射光强度分布没发生变化。随着  $\nu$  的增加, 各衍射级的光强相对系数  $J_n^2(\nu)$  变化明显。各级衍射光对称地分布在零级衍射光两侧, 同级次衍射光的强度也相当,  $\nu$  越大, 阶数  $n$  也相应增加, 各级衍射光强越匀滑。由此可看出,  $\nu$  与 Raman-Nath 衍射的级数强度有关。

由图 1(b) 可看出各个衍射级的  $J_n^2(\nu)$  随着  $\nu$  改变的变化趋势。当  $\nu$  很小时, 只看到 -1、0、+1 衍射级, 当  $\nu$  值足够大时, 可看到 18 个以上的衍射级

次。

由此可见, 要达到某种程度 Raman-Nath 的衍射, 需要对  $\nu$  进行合理取值。

### 3 实验和讨论

实验采用 He-Ne 激光器、融石英声光器件、27 MHz 功率信号源、光束质量分析仪等为实验装置, 在超声波频率  $f_s = 27$  MHz、 $P_s = 5$  W、 $\lambda = 632.8$  nm、 $H = 35$  mm 时,  $L$  为 50 mm 和 8 mm 下进行 Raman-Nath 衍射实验, 如图 2 所示。

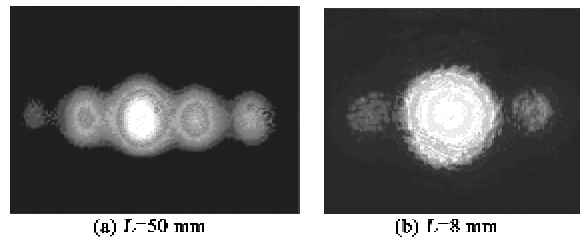


图 2 实际采集图像

根据  $(\Delta n)_M = \frac{1}{2} n_0^3 P S = \sqrt{M_2} \sqrt{\frac{P_s}{2HL}}, Q = \frac{2\pi\lambda L}{n_0 \lambda_*^2}, \nu = u(\Delta n)_M L = 2\pi(\Delta n)_M L/\lambda, Q' = \frac{Q}{\cos \theta}, \gamma = \frac{\pi(\Delta n)_M L}{\lambda \cos \theta}$ , 2 种情况下的实验参数理论数据计算如表 1 所示。

表 1 理论数据

$L/\text{mm}$	$\nu$	$Q$	$Q'\gamma$
50	0.728 9	2.795 3	1.018 8
8	0.291 6	0.447 0	0.063 2

如果以 Klein 和 Cook [7] 提出的  $Q \ll 1$  作为产生 Raman-Nath 声光衍射的判据, 那么只有在  $L = 8$  mm,  $Q = 0.447 0$  时工作在 Raman-Nath 状态下,  $L = 50$  mm 时工作在非 Raman-Nath 状态下。显然, 这与图 2(a) 所示的实际情况不符。可见当  $Q$  较大时, 仍有可能使介质工作在 Raman-Nath 状态下, 并产生多级衍射图样。如用 Willard [8] 提出的判据  $Q'\gamma \leq \pi^2/8 = 1.233$  时, 从图 2 可看出, 在  $L$  为 8 mm 和 50 mm 下均可产生 Raman-Nath 衍射。各级的衍射光强也与模拟图中的效果相符。

综上所述, 无论是以  $Q'\gamma \leq \pi^2/8 = 1.233$  为判据还是以  $\nu$  为依据来判别发生 Raman-Nath 衍射, 都说明产生 Raman-Nath 的效应受多种因素的影响, 最主要的判据是要考虑折射率改变  $\Delta n$  和  $L$  的乘积量, 有时即使  $L$  不是太小, 也能产生同种程度的衍

射。甚至在某种允许条件下,同样的超声频率和功率, $L$ 太小反而不利于产生 Raman-Nath 衍射。

#### 4 结束语

本文将 Raman-Nath 声光衍射效应的贝塞尔函数解析得到各级衍射光强分布,通过 MATLAB 绘制图形,随着调制因子  $\nu$  的增加,各衍射级的光强相对系数有明显变化。当  $\nu$  很小时,只会看到 -1、0、+1 三个衍射级, $\nu$  越大,阶数  $n$  也相应增加,会有更多的衍射级次。通过实验得到的对比衍射图形,说明了 Raman-Nath 的效应受多种因素的影响,有时即使声光作用长度不小,也能产生同种程度的衍射。甚至在某种允许条件下,同样的超声频率和功率,声光作用长度太小反而不利于产生 Raman-Nath 衍射。也说明了 Klein 和 Cook 提出的 Raman-Nath 衍射判据的局限性;尽管实验能证实后来 Willard 及 Moharam/Young 补充的判据<sup>[9-10]</sup>,但仍有一些影响衍射光强的因素有待进一步探讨和研究。本研究在某种程度上能为 Raman-Nath 衍射声光器件制作参数的选择具有一定的参考作用。

#### 参考文献:

- [1] 于艳春,李冠成,王秉坤,等.声光效应实验装置及实验研究[J].光学仪器,2004,26(6):52-56.  
YU Yanchun, LI Guancheng, WANG Bingkun, et al. Studies on the experiment and experiment installation of acoustooptic effect[J]. Optical Instruments, 2004, 26(6):52-56.
- [2] 石将建,费阳,王毅.声光效应实验的理论研究和曲线模拟[J].大学物理实验,2010,23(4):27-30.  
SHI Jiangjian, FEI Yang, WANG Yi. The theoretical simulation of acoustooptic effect experiment [J]. Physical Experiment of College, 2010, 23(4):27-30.
- [3] 杨桂娟,郝斌,王君,等. Raman-Nath 衍射光强的研究[J].压电与声光,2011,33(4):533-535.  
YANG Guijuan, HAO Bin, WANG Jun, SHI Hua. Research on light intensity for Raman-Nath diffraction [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(4):533-535.
- [4] 曹跃祖.声光效应原理及应用[J].物理与工程,2000,10(5):46-52.  
Cao Yaozu. Principle and applications of acoustooptic effect[J]. Physics and Engineering, 2000, 10(5):46-52.
- [5] 邵中兴,姜守军,蒋坤军等.拉曼纳斯衍射声光 Q 开关的实验研究[J].中国激光,2011,38(3):3-4.
- [6] 蓝信钜.激光技术[M].北京:科学出版社,2009,33-43.
- [7] KLEIN W R, COOK B D. Unified approach to ultrasonic light diffraction[J]. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 1967, 14(3):123-134.
- [8] WILLARD G W. Criteria for normal and abnormal ultrasonic light diffraction effects[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1949, 21(2):101-108.
- [9] MOHARAM M G, GAYLORD T K, MAGNUSSON R. Criteria for raman-nath regime diffraction by phase gratings[J]. Optics Communications, 1980, 32(1):19-23.
- [10] MOHARAM M G, YOUNG L. Criterion for Bragg and Raman-Nath diffraction regimes[J]. Applied Optics, 1978, 17(11):1757-1759.
- [11] XI Feng, HU Li. Defect states in one-dimensional photonic crystal with dispersive negative refractive index metamaterial [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(1):85-88.
- [12] 刘启能.各向异性圆柱光子晶体中光波的量子效应及其带隙[J].人工晶体学报,2010,39(5):1231-1235.  
Liu Qineng. Quantum effects and the bandgap of light wave in cylindrical anisotropic photonic crystal [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2010, 39(5):1231-1235.
- [13] 高金霞,武继江.材料色散对一维光子晶体带隙的影响研究[J].宁夏大学学报:自然科学版,2011,32(3):243-246.  
GAO Jinxia, WU Jijiang. Influence of the material dispersion on the bandgap of one-dimensional photonic crystal[J]. Journal of Ningxia University: Natural Science Edition, 2011, 32(3):243-246.
- [14] 席锋,胡莉.色散负折射特异介质的 1 维光子晶体缺陷态[J].强激光与粒子束,2012,24(1):85-88.

(上接第 639 页)