

# 拉曼-纳斯衍射声光 Q 开关的实验研究

邵中兴<sup>1</sup> 姜守军<sup>1</sup> 蒋坤军<sup>1</sup> 武鹏<sup>1</sup> 顾华东<sup>2</sup> 郑陈琪<sup>2</sup> 位兵<sup>2</sup> 武晓东<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 杭州法珀激光科技有限公司, 浙江 杭州 310016  
<sup>2</sup> 中国科学院苏州生物医学工程研究所, 江苏 苏州 215163)

**摘要** 实验研究了拉曼-纳斯(R-N)衍射的声光相互作用长度与声波光波参数之间的关系,确定了最佳声光相互作用长度。在此基础上,分别设计以水和 TeO<sub>2</sub> 晶体为声光介质的 R-N 衍射 Q 开关器件。测量了器件的衍射效率、衍射角和插入损耗等参数。应用 TeO<sub>2</sub> 晶体开关器件调制长脉冲 Nd:YAG/KTP 激光器,当重复频率为 10 kHz 时得到了脉宽约为 200 ns 的绿激光输出。

**关键词** 衍射;声光 Q 开关;最佳声光相互作用长度;调制 Nd:YAG/KTP 激光

**中图分类号** TN243 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0302003

## Acousto-optic Q-Switch Based on Raman-Nath Diffraction

Shao Zhongxing<sup>1</sup> Jiang Shoujun<sup>1</sup> Jiang Kunjun<sup>1</sup> Wu Peng<sup>1</sup> Gu Huadong<sup>2</sup>  
Zheng Chenqi<sup>2</sup> Wei Bing<sup>2</sup> Wu Xiaodong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Hangzhou FAPO Laser Technology Inc., Hangzhou, Zhejiang, 310016, China  
<sup>2</sup> Suzhou Institute of Biological and Medical Engineering, Chinese Academy of Sciences,  
Suzhou, Jiangsu 215163, China)

**Abstract** A series of experiments on the interaction length between the sound and the light with Raman-Nath diffraction is reported. Then the optimum interaction length at certain sound frequency is defined. Based on those results, the devices of acousto-optic Q-switch, made of H<sub>2</sub>O or TeO<sub>2</sub> as the medium, in terms of Raman-Nath diffraction are respectively designed. The diffraction and the loss of the devices are tested. Finally the device made of TeO<sub>2</sub> is employed to modulate a long pulsed Nd:YAG/KTP laser. The modulated pulse width is measured as about 200 ns at the repetition frequency of 10 kHz.

**Key words** diffraction; acousto-optic Q-switch; optimum interaction length; modulating Nd:YAG/KTP laser

**OCIS codes** 230.1040; 140.3540; 230.0250

## 1 引 言

声光衍射原理被广泛用于光学调制技术中,例如将连续波或者长脉冲激光调制为高重复频率、高功率的脉冲激光,利用声光锁模手段研制超短脉冲激光等<sup>[1~5]</sup>。声光调 Q 激光在工业加工等领域有着广泛应用。此外声光技术也被用于其他技术领域,例如临床诊断等<sup>[6]</sup>。根据声波与光波相互作用长度  $L$  的大小,声光衍射被分成两类<sup>[7]</sup>。一类是较高声频驱动的, $L$  比较长的布拉格(Bragg)衍射,只产生一级衍射;另一类是较低声频驱动的, $L$  比较短的拉曼-纳斯(Raman-Nath, R-N)衍射,产生多级衍

射。应用 Bragg 只有一级衍射的特点制作声光器件已经很多。而由于 R-N 衍射能量分布没有像 Bragg 衍射那样集中,所以,近年来研究较少<sup>[8,9]</sup>,应用其制作开关器件很少见,甚至没有。实际上,根据 R-N 声光衍射原理,贝塞尔函数  $J_m(\varphi)$  被用来计算各级衍射效率。根据贝塞尔函数性质,当综变量  $\varphi$  取 2.405, 5.520 等值时,零级衍射效率  $J_0(\varphi) = 0$ 。此时,全部入射光能量被衍射到各级次中去,零级衍射(即透过声光介质后的入射光)成为暗场。这提供了利用 R-N 零级衍射设计一种声光 Q 开关的可能。

近年来,作者研究小组实验研究了 R-N 衍射区

收稿日期: 2010-09-01; 收到修改稿日期: 2010-11-03

基金项目: 苏州科技局项目(SYJG0905)资助课题。

作者简介: 邵中兴(1947—),男,研究员,主要从事光学及激光技术等方面的研究。

E-mail: shaozhongxing@cjl. edu. cn

别于 Bragg 衍射的主要特性——声波与光波相互作用长度这一关键问题。并不断改进以换能器为核心的衍射头设计以及超声波馈电网络技术。实现了零级衍射 $[J_0(\varphi) \approx 0]$ 的最佳衍射效率。根据多年来使用声光 Q 开关(以及电光 Q 开关)调制 Nd:YAG 激光的经验,试图将这种器件应用到激光调制技术中。

另外,利用 R-N 衍射声光相互作用长度短的特点,可以研制小型声光器件。特别有意义的是应用这个特点研制  $10.6 \mu\text{m}$  波长  $\text{CO}_2$  激光器的声光 Q 开关器件。由于声光介质 Ge 单晶对  $10.6 \mu\text{m}$  的吸收系数较大( $0.03/\text{cm}$ ),所以介质的通光方向长度越短,损耗越小。

## 2 实验装置

测量最佳声光相互作用长度的实验装置如图 1 所示。将水介质装在一个长方体玻璃容器中,带有方位调节装置的电声换能器从容器上方置入水中,换能器尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ 。He-Ne 激光(波长  $632.8 \text{ nm}$ )和倍频 Nd:YAG 激光(波长  $532 \text{ nm}$ )分别用作衍射光源。将带有  $\phi 3 \text{ mm}$  小孔的铝块置于声波场中,小孔的初始位置刚好对准换能器的前沿。衍射光束可以通过小孔进入光电二极管接收器中。为了避免扰动声波场,铝块上面覆盖了一层多孔物质薄膜吸收声波,如图 1 所示。

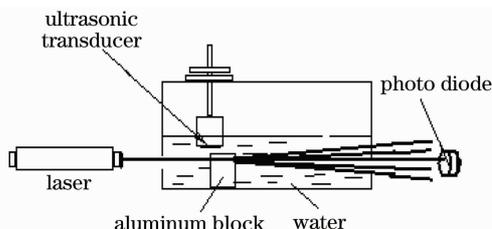


图 1 测量最佳声光衍射相互作用长度与声波和光波关系的实验装置

Fig. 1 Setup for measuring the optimum interaction length between the sound and the light

当换能器加超声波频率  $9 \text{ MHz}$ ,功率  $0.6 \text{ W}$  时,不同波长和功率激光的一级衍射效率随小孔位置在声波场中改变  $L$  的测量结果如图 2 所示。图中横坐标是声光相互作用长度  $L$ ,纵坐标是衍射光相对光强。菱形标记曲线表示倍频 Nd:YAG 激光( $532 \text{ nm}$ ,  $3 \text{ mW}$ )的衍射效率,方形标记曲线表示 He-Ne 激光( $632.8 \text{ nm}$ ,  $2 \text{ mW}$ )的衍射效率,三角形标记表示 Nd:YAG 激光( $532 \text{ nm}$ ,  $40 \text{ mW}$ )的衍射效率。由图 2 显见,无论被测激光波长和功率如何,所有曲线峰都显示在  $L \approx 8 \text{ mm}$  处衍射效率达到最大。

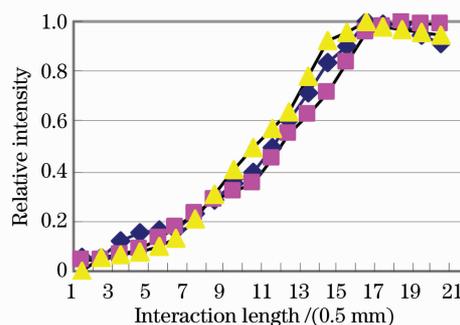


图 2 测量 R-N 衍射一级衍射效率随声光相互作用长度变化的实验结果

Fig. 2 Experimental results of the efficiency of the first order diffraction as the functions of the interaction length for R-N diffraction

## 3 分析及结果

根据贝塞尔函数项  $J_m(\varphi)$ ,这里综量<sup>[10]</sup>

$$\varphi = (2\pi/\lambda_0) \times \Delta n \times L, \quad (1)$$

式中  $\lambda_0$  表示入射光波长,  $\Delta n$  表示声波引起的介质折射率改变量,  $L$  表示声光相互作用长度。依据(1)式,若取  $\lambda_0 = 632.8 \text{ nm}$ ,  $L = 8 \text{ mm}$ ,只要声波能量能够达到驱动水介质折射率变化  $\Delta n = 0.3 \times 10^{-4}$ ,则  $\varphi = 2.405$ ,  $J_0(\varphi) = 0$ ,零级衍射就可以成为暗场。事实上,对于水介质这是很容易做到的[通常估计声波可以驱动介质折射率变化  $\Delta n$ (约为  $10^{-4}$ )]<sup>[9]</sup>。仔细匹配超声波的馈电参数,驻波比小于  $1:1.5$  时,随着声功率增加零级衍射逐渐变暗,增加  $3 \text{ W}$  左右时,最佳衍射效果如图 3 所示。

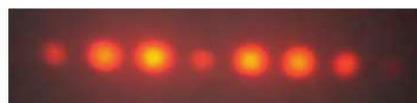


图 3 R-N 衍射(水介质)的总衍射效率实验结果。中间暗光斑是零级衍射

Fig. 3 Photo of the total efficiency of R-N diffraction with water as the acousto-optic medium. The darkest spot in the middle of the spots is the zero order diffraction

从图 3 可见,零级衍射(中间的暗光斑)已接近暗场,测量其能量只有不到入射光的  $0.03$ 。因此,实验上 R-N 衍射总效率已达  $97\%$ 。

根据上述实验结果设计加工了水介质 R-N 衍射 Q 开关器件。测量了其一级衍射角  $\theta$  约  $3.1 \text{ mrad}$ 。衍射效率如图 3 所示。水介质的透明波段  $200 \sim 900 \text{ nm}$ ,这种器件可用于可见和紫外光激光器的声光调 Q 器件。由于可供调 Q 实验的激光器是波长

1064/532 nm Nd:YAG/KTP 系统,因此,又设计加工了  $\text{TeO}_2$  R-N 衍射 Q 开关器件,结构如图 4 所示。[110]切制的  $\text{TeO}_2$  晶体的通光方向厚 8 mm,两通光面镀 1064 nm 激光增透膜。楔角是防止声波在晶体内形成驻波,以减少节点对衍射效率的影响。换能器厚 0.2 mm。整个器件尺寸为 56 mm×50 mm×14 mm(通光方向 14 mm)。

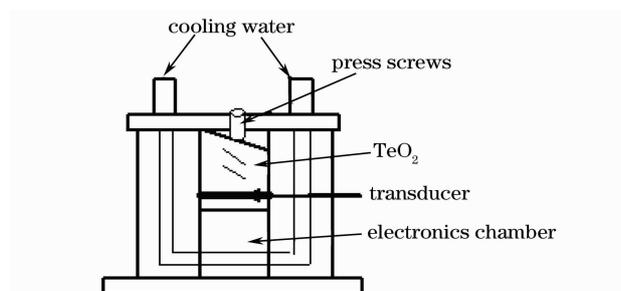


图 4 R-N 衍射  $\text{TeO}_2$  声光 Q 开关器件装置示意图

Fig. 4 Scheme of the design of  $\text{TeO}_2$  Q-switch based on R-N diffraction

对于  $\text{TeO}_2$  晶体而言,如令综量  $\varphi = 2.405$ ,取  $\lambda_0 = 1064$  nm,  $L = 8$  mm,折射率变化量必须满足  $\Delta n = 0.51 \times 10^{-4}$ ,才有  $J_0(\varphi) = 0$ ,零级衍射成为暗场。根据文献[11]

$$\Delta n = n^3 \times P \times (2\pi/\lambda_s) \times A_m, \quad (2)$$

式中  $n, P$  分别表示晶体折射率和弹光系数; $\lambda_s$  表示声波波长; $A_m$  表示声波驱动晶体产生的振幅。将  $\Delta n = 0.51 \times 10^{-4}$ ,  $n = 2.258$ ,  $P = 0.0074$ ,  $\lambda_s = v_s/f_s = 6 \times 10^{-6}$  m ( $v_s = 0.6 \times 10^3$  m/s,  $f_s = 10$  MHz) 代入(2)式可计算出  $A_m = 571.674 \times 10^{-12}$  m。一方面,电声换能器将超声波电能转换成机械振动的振幅<sup>[12]</sup>  $A_t = k_{33} \times d_{33} \times V$  (式中机电耦合系数  $k_{33} = 0.34$ ,压电常数  $d_{33} = 260 \times 10^{-12}$  m/V,  $V$  为超声波电压),如果估计换能器振幅最多耦合到晶体 50%,  $A_t = 2A_m$ ,可计算出加到换能器的声波电压  $V = 2A_m/88.4 \times 10^{-12}$  m  $\geq 12.9$  V。另一方面,晶体的固

体结构以及安装方式都不如液体介质那样容易产生大的折射率变化。因此产生最佳衍射效率的声波功率要足够大,而且需要很好的冷却措施。加频率约 10 MHz,功率约 10 W 声波到  $\text{TeO}_2$  器件上,衍射效果如图 5 所示。测量其衍射效率约为 75%,一级衍射角  $\theta$  约为 1.4 mrad[不到水介质的 1/2。从  $\theta = \arcsin(\lambda_s/\lambda_0)$  可知,声频相同时,晶体中的声波长比水短一半还多]。

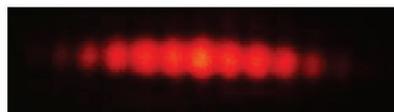


图 5  $\text{TeO}_2$  器件的衍射效果

Fig. 5 Photo of diffraction of Q-switch device with  $\text{TeO}_2$  crystal

利用长脉冲 Nd:YAG/KTP 激光器测量  $\text{TeO}_2$  开关单程损耗  $L_{sg}$ 。测量条件为:从激光腔内取出倍频晶体 KTP,使用在 1064 nm 透射率  $T = 10\%$  的输出镜。激光参数为:脉宽 20 ms,输出能量约每脉冲 400 mJ。测量结果: $L_{sg}$  约 5%。然后,将器件插入激光腔内测量其静态损耗  $L_{ss}$ 。测量条件同上。结果: $L_{ss}$  约 10.5%。其他条件不变,再将输出镜换成 1064 nm 高反/532 nm 高透双色镜,这时, $L_{ss}$  增加到约 25%。分析认为是使用的  $\text{TeO}_2$  晶体两个通光面不平行度(约为 1.24 mrad/4.24")过大引起的。

最后,将器件插入长脉冲 Nd:YAG/KTP 激光器的谐振腔中,不加声波时,脉宽 20 ms 的长脉冲激光输出波形如图 6(a)(幅度衰减为 1 V)所示。加频率 11 MHz,功率 6 W,调制频率 1~30 kHz(占空比为 1:1)可调的声波驱动器件后,经过器件调制的激光输出波形如图 6(b)所示,比较图 6(a),(b)可以看出,调制深度几乎 100%,但是长脉冲幅度增加不超过 1 倍。改变调制频率 1~30 kHz,测量了脉冲宽度,图 6(c)所示为 10 kHz 时的脉宽约 200 ns。

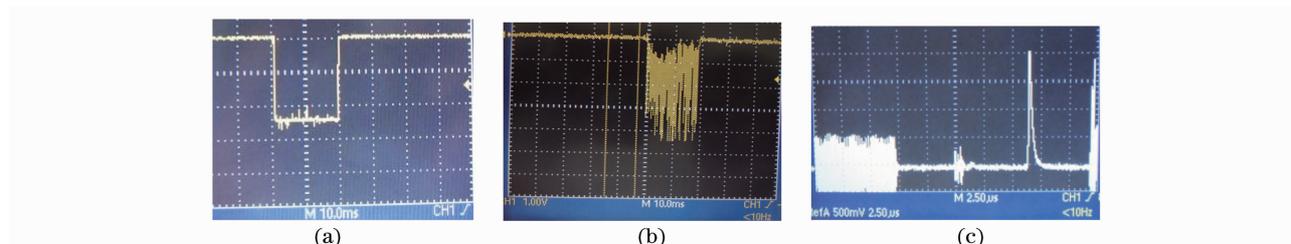


图 6 应用 R-N 衍射  $\text{TeO}_2$  声光 Q 开关调制 Nd:YAG/KTP 激光的实验结果。(a)未调制,(b)调制后,(c)调制脉宽约 200 ns

Fig. 6 Photos of the experimental results of modulating the Nd:YAG/KTP laser with the R-N diffraction  $\text{TeO}_2$  Q-switch. (a) without modulating, (b) with modulating, (c) modulated pulse width about 200 ns

## 4 结 论

在实验确定 R-N 衍射最佳声光相互作用长度基础上,设计了水介质和  $\text{TeO}_2$  晶体两种声光 Q 开关器件。分析了两种器件实现零级衍射暗场效应的条件,测试了两种器件的衍射效率分别为 97% 和 75% 左右,衍射角分别为 3.1 mrad 和 1.4 mrad。利用长脉冲 Nd:YAG/KTP 激光器测量了  $\text{TeO}_2$  Q 开关的单程损耗和插入损耗等参数。最后利用  $\text{TeO}_2$  Q 开关调制长脉冲 Nd:YAG/KTP 激光器得到了重复频率 10 kHz (1~30 kHz 可调) 时脉宽约为 200 ns 的绿激光输出。证实了利用 R-N 衍射原理制造声光 Q 开关的可行性。由于目前使用的声光晶体加工缺陷造成插入损耗过大,调制后的绿光能量增强不是很明显,最好结果尚未超过无调制的 2 倍。

**致谢** 本工作先后得到了中国计量学院王训斌、王元强、曾铁峻等同学以及长春中吉光电设备公司朱晓毅总经理的帮助,在此一并表示感谢。

## 参 考 文 献

- 1 Yan Ying, Zhang Hengli, Li Jing *et al.*. LD pumped acoustic-optic Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1162~1165  
闫莹,张恒利,李静等.激光二极管抽运声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub>板条激光器[J].中国激光,2010, **37**(5): 1162~1165
- 2 Jan K. Jabczyński, Waldemar Zendzian, Jacek Kwiatkowski. Q-switched mode-locking with acousto-optic modulator in a diode pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(6): 2184~2190
- 3 Zhang Xinlu, Ju Youlun, Wang Yuezhu. Laser-diode-pumped acoustooptic Q-switched Tm, Ho:YLF laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1072~1076  
张新陆,鞠有伦,王月珠.激光二极管抽运 Tm, Ho:YLF 晶体声光调 Q 激光器 [J]. 光学学报, 2005, **25**(8): 1072~1076
- 4 Yao Baoquan. Technical study of ZeGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillator by 2 μm Lm, Tm, Ho:YLF laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 39~42  
姚宝权. 2 μm Lm, Tm, Ho:YLF 激光抽运 ZnGeP<sub>2</sub> 光参量振荡技术研究 [J]. 中国激光, 2005, **32**(1): 39~42
- 5 Dechun Li, Shengzhi Zhao, Guiqiu Li *et al.*. Optimization of doubly Q-switched lasers with both an acousto-optic modulator and a GaAs saturable absorber [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(24): 6127~6135
- 6 P. A. Edney, Joseph T. Walsh, Jr. Acoustic modulation and photon-phonon scattering in optic coherence tomography [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(34): 6381~6388
- 7 M. G. Moharam, L. Young. Criterion for Bragg and Raman-Nath diffraction regimes [J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(11): 1757~1759
- 8 V. Voloshinov. Close to collinear acousto-optical interaction in paratellurite [J]. *Opt. Eng.*, 1992, **31**(10): 2089~2094
- 9 V. Laude. General solution of the coupled-wave equation of acousto-optics [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(12): 2307~2314
- 10 A. K. Ghatak, K. Thyagarajan. *Optical Electronics* [M]. London: Cambridge University Press, 1989, 264~280
- 11 Li Jiaye, Yan Jixiang. *The Fundamental of Optical Electronics* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002. 100~102  
李家泽, 阎吉祥. 光电子学基础 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002. 100~102
- 12 Zibo Radio Ceramic Factory, *Manuel of Products*, P7  
淄博无线电瓷件厂, 产品说明书, P7