

多级声光衍射相互作用长度的实验研究

顾华东^{1,2}, 邵中兴¹, 杨杰^{1,2}, 郑陈琪^{1,2}, 陈瑞涛^{1,2}, 武晓东¹

(1. 中国科学院苏州生物医学研究所, 江苏 苏州 215163; 2. 江苏省医用光学重点实验室, 江苏 苏州 215163)

摘要: 实验研究了多级声光衍射条件下的最佳声光相互作用长度与声波和光波之间的定量关系。测量结果表明最佳声光相互作用长度与声频紧密相关而几乎与入射光波长及强度无关。实验结果发现当声频低时, 相互作用长度短, 声频在 9 MHz 左右, 相互作用长度约为 8 mm, 当声频降低为 6 MHz 左右时, 相互作用长度约为 4 mm。设计了以纯水为介质的声光 Q 开关器件, 在超声频率 9 MHz, 声功率 3.4 W 的条件下实现了约 98% 的总衍射效率。

关键词: 多级声光衍射; 拉曼-奈斯; 作用长度; 衍射效率

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2014.03.012

Experimental research on the interaction length of multi-order acousto-optic diffraction

GU Hua-dong^{1,2}, SHAO Zhong-xing¹, YANG Jie^{1,2}, ZHENG Chen-qi^{1,2}, CHEN Rui-tao^{1,2}, WU Xiao-dong¹

(1. Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Science, Suzhou 215163, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Medical Optics, Suzhou 215163, China)

Abstract: The experimental investigation on the interaction length for getting the optimum diffraction of the multi-order acousto-optic diffraction is introduced. Measurement results show that best acousto-optic interaction length is closely related to audio frequency, and it is not almost relate to the wavelength and power of the light. When audio frequency is lower, the interaction length became shorter. As audio frequency is about 9MHz, the interaction length is about 8mm, it shrinks to about 4mm at 6MHz of audio frequency. An acousto-optic Q-switch apparatus working with pure water is designed, and a total diffractive efficiency of about 98% is obtained under the condition of acoustic frequency at 9MHz and acoustic power at 3.4W.

Key words: multi-order acousto-optic diffraction; Raman-Nath; interaction length; diffractive efficiency

1 引言

基于光波场与声场在声光媒质中相互作用原理制作的器件被广泛用于光学、光电子学、声学中, 例如做成声光调制器将连续波或者长脉冲激光调制为高重复频率、高峰值功率的脉冲激光, 做成声光调制器用于测频系统、测距系统等^[1-3]。

根据超声波波长、光波长和声光作用长度的大小, 存在两种典型的声光衍射现象^[4]。一种是较高声频驱动的 Bragg 衍射, 这种衍射入射角不为零, 只有一级衍射条纹, 理论上其一级衍射效率可达 100%, 其声波和光波的相互作用长度比较长。另一

种是较低声频驱动的 Raman-Nath 衍射, 这种衍射呈现多级分布, 理论上其一级衍射效率最高只有 34%, 声光相互作用长度比较短。这种衍射的机理被理解为相位光栅衍射, 其原因是介质在声波作用下, 介质折射率发生了周期性变化。事实上, 当所加声频在上述两种情形之间, 一般十几至数十兆赫, 衍射亦呈多级现象。近年来大多研究者对 Bragg 衍射

基金项目: 苏州市科技计划项目 (No. 090702L090) 资助。

作者简介: 顾华东 (1963 -), 男, 高级工程师, 主要从事激光器、激光电源, 激光器件方面的研究。E-mail: ghd123@163.com

收稿日期: 2013-07-18

注意较多,而对多级声光衍射现象研究的比较少^[5]。

根据 Raman-Nath 声光衍射原理,第 m 级衍射光强为 $I_m/I_0 = J_m^2(\delta)$,对于 0 阶贝塞尔函数,当 δ 取 2.405, 5.520, 8.654 等值时, $J_0(\delta) = 0$,即零级衍射光光强为零。也就是说,虽然其一级衍射效率较低,但在 δ 取适当值得时候,其所有 1 级以上衍射光的总衍射效率在理论上还是可以达到 100% 的,这在理论上证明了利用 Raman-Nath 机制制作声光 Q 开关的可能性。正因为基于 Raman-Nath 机制的多级声光衍射机制的声光相互作用长度比较短,可以利用这一特性可以制作体积小的声光 Q 开关,从而对某些希望缩短声光开关通光长度的情况(例如用 Ge 单晶做 CO_2 激光器声光开关)具有实用价值。另一方面,由于声光相互作用长度比较短,因而所需介质体积小,换能器面积小,这样对声波能量的要求也降低了。

如果能够事先确定相互作用长度的大小对于制作声光器件是非常有意义的^[6-7]。本文利用水做介质,得到了获得最佳衍射效率的声光相互作用长度与声频、光波长等关系,设计了以纯水为介质的声光 Q 开关器件并得到最高 98% 的衍射效率,为研制小型化声光开关器件提供实验依据。

2 实验装置

作为声光介质的水装在一个长方体玻璃容器(体积为 $30\text{ cm} \times 8\text{ cm} \times 6\text{ cm}$)中,带有方位调节装置的电声换能器从容器上方置入水中。使用频率范围 3 ~ 16 MHz 可调的超声波发生器驱动换能器(输出超声波最大功率约 10 W)。He-Ne 激光(波长 632.8 nm,输出功率约 3 mW)和倍频 CW Nd:YAG 激光(波长 532 nm,输出功率最大约 40 mW)用作光源。为探测衍射过程,将带有 $\phi = 3\text{ mm}$ 的小孔的铝块置于声波场中,衍射光束通过小孔进入衍射池外的光电二极管中。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。

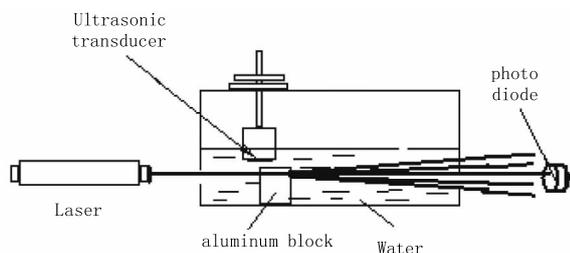


图1 测量声光衍射相互作用长度的实验装置
铝块安装在一个可以沿轨道滑动的小平台上。

铝块前沿的初始位置 P_0 刚好对准换能器的前边沿,这时入射光束不能被声波场作用。从 P_0 开始向右沿拉动小平台,使得入射光束可以逐渐进入声波场。实验发现当铝块位置刚一离开 P_0 ,衍射就发生了。随着铝块以步长 0.5 mm 移动,衍射光强被测量并记录下来,如图 2 所示。

3 实验结果与分析

移动声波场中的铝块,测量一级衍射光效率随 P_0 位置改变的结果。不同波长和不同功率激光的一级衍射效率测量结果示于图 2。菱形标记曲线表示倍频 Nd:YAG 激光(532 nm, 3 mW)衍射效率,方形标记曲线表示 He-Ne 激光衍射效率,三角形标记表示倍频 Nd:YAG 激光(532 nm, 40 mW)衍射效率。从图中可以看出,所有曲线峰都对应于横坐标相同位置,距离 P_0 约为 8 mm 处。如果定义这个距离为相互作用长度 L ,则 $L \approx 8\text{ mm}$ 。表明 L 几乎与衍射光波长和光功率无关。

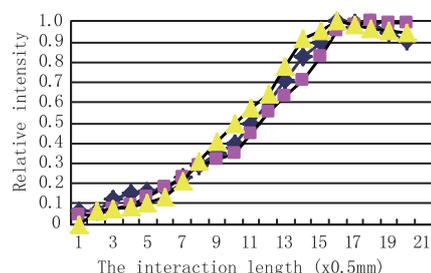


图2 测量一级声光相互作用长度的实验结果

调节声频分别为 6 MHz 和 12 MHz 时,用倍频 Nd:YAG 激光(532 nm, 40 mW)做光源重复前面的实验过程,测得一级衍射效率结果如图 3 所示,声频为 6 MHz 时声光作用长度 L 约为 4 mm,声频为 12 MHz 时 L 约为 12.5 mm。进一步表明 L 的大小主要与声频有关。

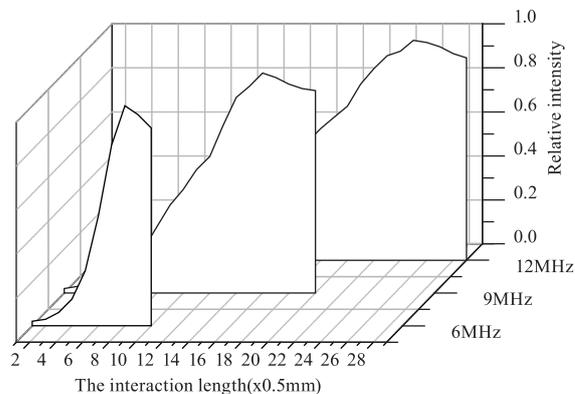


图3 不同声频的一级衍射效率

根据以上结果设计了一个以纯水为介质的声光 Q 开关器件(如图 4),换能器的尺寸为 $(\phi 8 \times 0.2\text{ mm}^3)$ 。仔细匹配超声波的馈电参数使得驻波比

小于 1 : 1.5。使用 He-Ne 激光器做光源,调节超声频率在 9 MHz 左右,在不同的超声功率下得到的衍射结果如图 5 所示,测得其衍射角为 3.1 mrad。

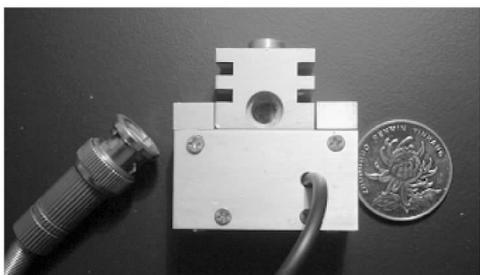


图 4 以纯水为介质的声光 Q 开关器件

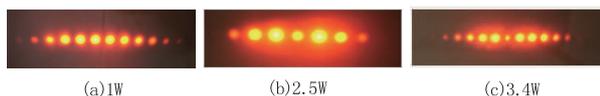


图 5 不同超声功率下的衍射结果

对贝塞尔函数 $J_m(\delta)$, 这里综量 δ 有^[8]:

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

式中, λ_0 是入射光波长; L 是声光相互作用长度; Δn 是声波引起的介质折射率的改变量, 其可表示为:

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

这里, P 是水的光弹系数; λ_s 是超声波长; A 是超声波驱动水产生的振幅。

图 5(a) 是在超声功率为 1 W 下得到的。测得正一级或负一级光斑的能量约占总能量的 27%, 由 $I_m/I_0 = J_m^2(\delta)$ 得贝塞尔函数项 $J_1(\delta) = 0.52$, $\delta = 1.25$, 从而 $J_0(\delta) = 0.65$, 则零级衍射光斑的效率, 即 $J_0^2(\delta) = 42%$ 。实验测得零级光斑的能量约占总能量的 40%, 符合得较好。该情况下, 器件工作的温度比室温略高。图 5(b) 是在超声功率为 2.5 W 下得到的。超声振幅应为(a)的 1.58 倍, 由式(1)和(2)有 $\delta = 1.25 \times 1.58 = 1.98$, 从而一级衍射效率 $J_1^2(\delta) = 33.4%$, 零级衍射效率 $J_0^2(\delta) = 5.8%$ 。该情况下一级效率已经接近理论预测的最大值了, 可以看到相纸上零级光斑已经很暗了。图 5(c) 中超声功率达到 3.4 W, $\delta = 1.98 \times 1.17 = 2.32$, 这样 $J_0^2(\delta) \approx 0.2%$, 实验中零级光斑几近消失, 测得衍射光斑中零级光斑的能量不到总能量的 2%。实验中 $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$, $L = 8 \text{ mm}$, 由式(1)得 $\Delta n = 0.23 \times 10^{-4}$, 显然, 即使在衍射效率已接近极限的情况下, Δn 仍然比文献[8]中所预计的 10^{-4} 要

小。该实验条件下, Q 开关器件在没有冷却的情况下温度升高到了 50 °C, 但衍射仍然是稳定的。不过如果进一步增加超声功率的话, 衍射将变得不稳定。如果对器件进行冷却降温, 声光作用长度 L 会变长, 即声光器件的尺寸变长。

4 结 论

通过对低声频作用下产生多级声光衍射现象的声光相互作用长度进行实验研究, 得到下述结果: ①声光相互作用长度主要取决于声频, 声频高作用长度长, 反之则短。而几乎与衍射光的波长和强度无关; ②在超声频率为 9 MHz, 超声功率 3.4 W 下实现了约 98% 的总衍射效率(零级衍射光斑能量只剩下总能量的 2%)。

本文的工作得到了杭州法珀激光科技有限公司提供超声波驱动器的支持, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] A Yariv. Quantum electronics[M]. New York: John Wiley & Sons, 1975.
- [2] He Ning, Jiang Hongyan. Research on the coherent detection for frequency based on acousto-optic deflection[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(11): 1188 - 1192. (in Chinese)
何宁, 蒋红艳. 基于声光偏转的载频相干探测研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(11): 1188 - 1192.
- [3] LI Juan, Yang Zhiwen. Use of acousto-optic modulator for simulated system of reliability of laser range finder[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(6): 535 - 536. (in Chinese)
李娟, 杨志文. 声光调制器在激光测距模拟系统中的应用[J]. 激光与红外, 2008, 38(6): 535 - 536.
- [4] Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2005. (in Chinese)
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [5] V Laude. General solution of the coupled-wave equation of acousto-optics[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 2003, 20: 2307 - 2314.
- [6] G F Albrecht, L Lund, D Smith. Building a simple reliable low-cost modelocked system[J]. Appl. Opt., 1983, 22: 1276 - 1280.
- [7] V Voloshinov. Close to collinear acousto-optical interaction in paratellurite[J]. Opt. Eng., 1992, 31: 2089 - 2094.
- [8] A K Ghatak, K Thyagarajan. Optical electronics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.