

# 石英声光开关

曾庆高<sup>1</sup>,张泽红<sup>2</sup>,高维松<sup>2</sup>,付礼鹏<sup>2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第四十四研究所, 重庆 400060; 2. 中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060)

**摘要:**该文介绍了一种用于高功率激光器的石英声光开关。该声光开关采用石英晶体作声光介质, 铌酸锂晶体作换能器材料, 工作波长为 1 064 nm, 工作频率为 68 MHz, 光孔径为  $\varnothing 4$  mm, 通过优化设计声光相互作用长度, 使 1 级光衍射效率可达 95%。该文还测量分析了衍射光的光束质量因子  $M^2$ , 通过优选晶体材料, 提高抛光质量, 合理设计散热结构等措施, 使衍射光较好地保持了入射光的光束模式。

**关键词:**声光开关; 石英晶体; 衍射效率; 光束质量因子  $M^2$ ; 激光器

**中图分类号:** TN248; TN65

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2019.02.007

## Quartz Acoustooptic Switch

ZENG Qinggao<sup>1</sup>, ZHANG Zehong<sup>2</sup>, GAO Weisong<sup>2</sup>, FU Lipeng<sup>2</sup>

(1. The 44th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

2. The 26th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** A quartz acousto-optic switch used for high-power laser is introduced in this paper. The acousto-optic switch uses quartz crystal as an acousto-optic medium, and lithium niobate crystal as transducer material. The working wavelength is 1 064 nm, working frequency is 68 MHz and diameter of the optical aperture is  $\varnothing 4$  mm. By optimizing the design of the acousto-optic interaction length, the first-order optical diffraction efficiency can reach 95%. This paper also analyzed and measured the beam quality factor  $M^2$  of the diffracted light. By optimizing the crystal materials, improving the polishing quality, and rationally designing the heat dissipation structure, the diffraction light can preferably maintain the beam mode of the incident light.

**Key words:** acousto-optic switch; quartz crystal; diffraction efficiency; beam quality factor  $M^2$ ; laser

## 0 引言

飞秒激光脉冲具有极短的脉冲宽度和极高的峰值功率, 与物质相互作用时呈现强烈的非线性效应, 它主要依靠多光子吸收机制来加工一些长脉冲激光无法作用的透明材料。飞秒脉冲作用时间极短, 热效应小(可忽略), 使得激光烧蚀的边缘整齐、光滑无毛刺裂纹, 因此, 近年来飞秒脉冲激光得到了飞速发展, 在精细加工领域的应用越来越多<sup>[1]</sup>。

在使用飞秒激光加工过程中, 需要对激光进行快速的开关控制。这种开关控制只能在激光腔外进行, 若在激光腔内会严重影响激光脉冲的稳定性。

声光开关具有承受激光功率高, 开关速度快, 损耗低, 工作寿命长, 全固化无机械运动, 控制方便等优点, 成为飞秒激光领域理想的开关部件。

## 1 基本原理

近年来, 为了提高激光加工的深度和速度, 飞秒激光的光功率越来越高(平均功率 100 W, 峰值功率 20 MW), 常用的氧化碲晶体承受不了这么高的激光功率, 因此, 需要采用耐受激光功率能力较好的石英晶体(峰值功率可达 1 GW)来制作声光开关。

声光开关主要由器件和驱动器两部分组成。器件主要由表电极、换能器和声光介质等组成<sup>[2]</sup>, 是完成声与光相互作用的核心部件, 如图 1 所示。驱动器的功能是给器件提供高频驱动信号。

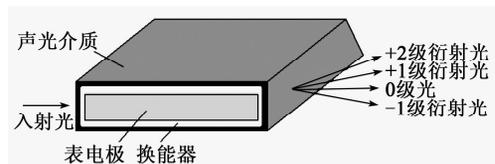


图 1 声光开关器件主要结构示意图

收稿日期: 2018-12-23

作者简介: 曾庆高(1964-), 男, 重庆梁平人, 高级工程师, 硕士, 主要从事半导体光电子与集成光学器件的研究。

图 2 为声光开关应用示意图。驱动器输出的电信号传输到器件内,经表电极加到换能器上,换能器转化为超声波传输到声光相互作用介质内,入射光在介质内与超声波发生声光相互作用,产生衍射光。衍射光与 0 级光(穿过器件未衍射的入射光)在空间上分离,再被光学系统整形聚焦到加工部件上。

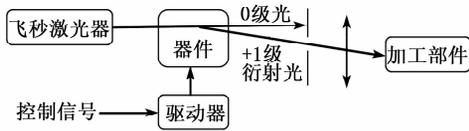


图 2 声光开关应用示意图

通过控制信号可控制衍射光的强弱、有无。控制信号有两组:

- 1) 模拟控制信号(0~1 V)。它调节驱动器输出电功率信号的幅度,从而控制衍射光的强弱。
- 2) 开关控制信号(TTL 电平)。它控制驱动器的输出,从而根据需要控制衍射光的有无:低电平无电功率输出(无衍射光),高电平有电功率输出(有衍射光)。这样声光开关实现了对激光的开关控制功能,如图 3 所示。

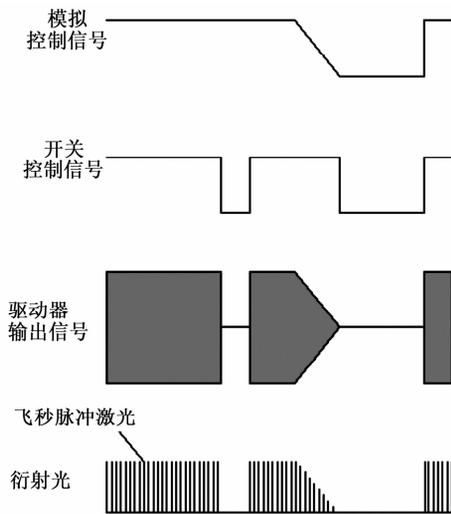


图 3 声光开关控制示意图

## 2 衍射效率

衍射效率  $\eta$  是指 +1 级衍射光占总光强的百分比,是表征声光开关特性的重要技术指标。 $\eta$  越高,激光能量的利用率越高,对系统的损耗就越低。为了提高  $\eta$ ,器件设计成布喇格衍射模式,布喇格衍射的条件是品质因数  $Q$  不低于  $4\pi$ 。 $Q$  值越大,进入布喇格衍射模式的程度越高,+1 级衍射光可达到的效率越高。 $Q$  值<sup>[2]</sup>为

$$Q = 2\pi L f^2 \lambda / (n v^2) \quad (1)$$

式中: $f$  为工作频率; $\lambda$  为光波长; $n$  为声光介质折射率; $v$  为声光介质中超声波的速度; $L$  为声光相互作用长度。

本文声光介质采用石英晶体,取  $f = 68 \text{ MHz}$ ,  $\lambda = 1\,064 \text{ nm}$ ,  $n = 1.55$ ,  $v = 5\,750 \text{ m/s}$ 。当器件工作模式为布喇格衍射时,+1 级衍射光的  $\eta$ <sup>[3]</sup>为

$$\eta = \sin^2 \left( \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{P k L M_2}{2H}} \right) \quad (2)$$

式中: $P$  为输入器件的电功率; $k$  为器件换能器的机电耦合系数; $M_2$  为器件声光介质的声光优值; $H$  为光孔径。

本文换能器材料采用铌酸锂晶体,其  $k = 0.49$ ,  $M_2 = 3.5 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ ,  $H = 4 \text{ mm}$ 。

$\eta$  还与声波发散角  $\Delta\theta$ 、入射光的光束质量因子  $M^2$  有关。对于大多数激光器,适当增加声波发散角能获得更高的  $\eta$ ,但会浪费一定的声波功率。器件声波发散角为

$$\Delta\theta = v / (L f) \quad (3)$$

由式(3)可知,当声光介质石英晶体的  $v$  和  $f$  确定后,减少  $L$  是增加声波发散角的唯一途径。 $L$  与  $Q$ 、 $\eta$  有关,故需兼顾设计。

比较  $L$  分别为 42 mm、35 mm 和 28 mm 的声光开关的最大  $\eta$ 。测试激光器的  $\Delta\theta = 1.4 \text{ mrad}$ ,这 3 种声光开关能达到的最大  $\eta$  和需要的驱动电功率典型值如表 1 所示。由表可见,1# 声光开关的  $L$  最大, $\Delta\theta$  最小,需要的驱动电功率最小,但能达到的最大  $\eta$  最小;3# 声光开关的  $L$  最小, $\Delta\theta$  最大,浪费的声波功率较多,故所需电功率较大。又由于  $Q$  值较小,进入布喇格衍射模式的程度不高,故而获得的最大  $\eta$  较低。比较可知, $L = 35 \text{ mm}$  时,既能获得较高的  $\eta$ ,又不需要太高的驱动电功率,因此设声光开关的  $L = 35 \text{ mm}$ 。

表 1 3 种声光开关能达到的最大  $\eta$

声光开关	$L/\text{mm}$	$\eta/\%$	电功率/W	$\Delta\theta/\text{mrad}$	$Q$
1#	42	93.2	25	2.01	25.60
2#	35	95.0	30	2.42	21.34
3#	28	94.1	40	3.02	17.07

对于  $L = 35 \text{ mm}$  的声光开关,除穿过器件的 0 级光外,还能观察到 +1 级、+2 级和 -1 级衍射光,其他高阶衍射光能量很小,可忽略。这种声光开关各级衍射光(包括 0 级光)占总光强比(典型值)如表

2所示。由表可见,驱动器输出电功率为30W时,器件达到的+1级光 $\eta$ 最高,再增加电功率有用的+1级光 $\eta$ 会降低,无用的0级光及高阶衍射光(-1级和+2级)会增加,因此,我们设计的模拟电压控制信号能精确控制输入器件的电功率,以获得最佳的衍射效率。

表2  $L=41\text{ mm}$ 时各级衍射光(包括0级光)占总光强比

电功率/W	-1级光 占总光 强比/%	0级光 占总光 强比/%	+1级光占总 光强比(衍 射效率)/%	$\eta$ (理论值)/ %	+2级光 占总光 强比/%
0	0	100	0	0	0
5	0.05	69.3	30.5	29.8	0.05
10	0.12	46.3	53.5	53.2	0.07
15	0.24	29.2	70.4	70.9	0.14
20	0.37	16.0	83.4	83.7	0.22
25	0.46	7.5	91.7	92.4	0.33
30	0.55	4.0	95.0	97.6	0.45
35	0.60	6.4	92.3	99.8	0.60
40	0.63	12.5	86.1	99.6	0.77

图4为+1级光 $\eta$ 随电功率的变化趋势。由图可见,在+1级光 $\eta$ 达到最大值前,实测值与理论值较吻合。在+1级光 $\eta$ 最大时,各级衍射光占总光强比如图5所示。

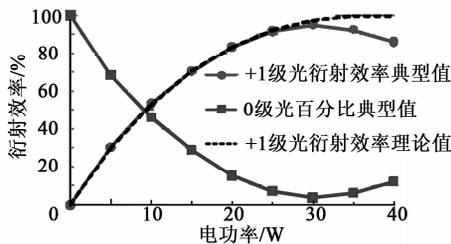


图4 +1级光 $\eta$ 随电功率变化的趋势

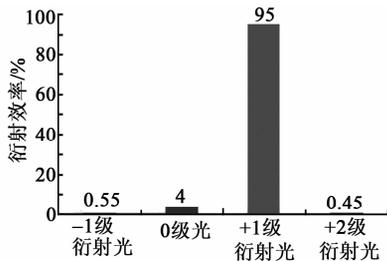


图5 各级衍射光光强比

### 3 光束模式

$\eta$ 决定了激光功率的利用率,光束模式决定了激光束的质量。如果把激光束比作一把加工用的刀,那么激光功率就表示这把刀的质量,而光束模式表示这把刀的锋利程度。如果只是激光的功率大,

而光束模式不好,就如同一把钝刀,不会取得好的加工效果。激光模式的本质是激光能量的空间分布,它决定了聚焦焦点的能量分布,对激光加工质量具有重要的影响<sup>[4]</sup>。

为获得好的加工质量,飞秒激光的光束模式质量一般都做得较好。声光开关与激光发生直接接触的是器件里的声光介质,声光介质的光学性能、通光面质量、温度分布及应力分布等情况会影响激光的光束模式。

声光介质选用光学级的石英晶体,其光学性能很好,理论上不会对激光的光束模式产生影响。声光介质通光面质量对光束模式影响较大,必须采用高等级的抛光技术、提高平面度等级及降低粗糙度来消除通光面质量对光束模式的影响。

我们采用浴法抛光,工件和抛光模具同时都浸在抛光液中,使用极细的抛光粉和很低的抛光压力,这样抛光时产生摩擦热能迅速扩散到抛光液中,有效避免了工件和抛光模具的温度升高,彻底消除了工件的热变形,从而使工件表面质量达到较高的水平:通光面粗糙度 $R_a$ 可达 $0.3\sim 0.5\text{ nm}$ ,平面度为 $\lambda/20$ ( $\lambda$ 为波长)。

石英晶体的热导率很高,为减小体积,采用了单面水冷的紧凑结构模式,产品外形如图6所示。器件工作2min就达到热平衡,这时使用的区域内晶体温度差小于 $2\text{ }^\circ\text{C}$ ,如图7所示。



图6 声光开关外形

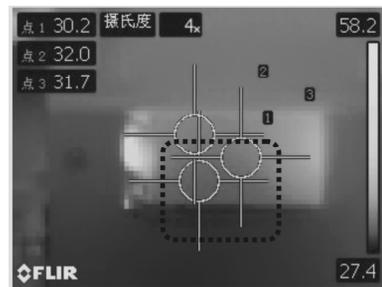


图7 声光开关的热像仪照片

$M^2$ 能较好地表征光束模式的特性,本文采用 $M^2$ 测试仪测量光束模式。光源为二极管泵浦连续

激光器,其光功率为2.4 W。由于 $M^2$ 测试仪承受的激光功率很低,因此,在激光器的输出端使用了一个衰减片,将激光功率降低到0.5 mW时再进行测量。

用 $M^2$ 测试仪测试经过衰减片后的入射激光的光束模式,测试结果如图8所示。衍射光光束的测量结果如图9所示。

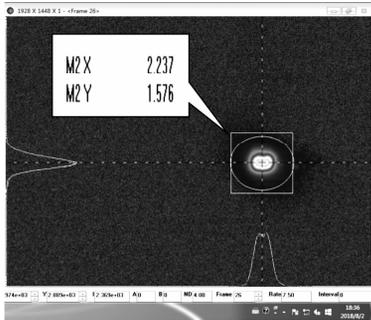


图8 入射光的光束模式

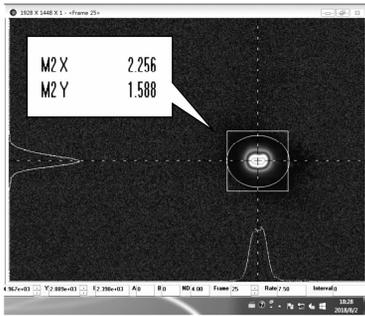


图9 衍射光的光束模式

表3为入射光和衍射光的 $M^2$ 对比分析。由表可见,与入射光 $M^2$ 相比,衍射光 $M^2$ 的相对变化量小于1%,基本上未改变光束模式。这个变化量是晶体质量、通光面抛光质量、衍射作用及温度分布等多

种因素综合作用的结果,要进一步降低变化量,需从上述几方面着手分析解决。

表3 入射光与衍射光的 $M^2$ 对比分析

	$M^2$		绝对变化量	相对变化量/%
	入射光	衍射光		
x方向	2.237	2.256	0.019	0.85
y方向	1.576	1.588	0.012	0.76

#### 4 结束语

石英声光开关全固化无机械运动,控制方便,性能稳定,且对入射光的光束模式改变很小,不仅可用于高功率飞秒激光器系统中,还可用于其他高功率脉冲激光器或连续激光器系统中。通过优化设计声光互作用长度,在光束质量较好的条件下,获得了高达95%的+1级光衍射效率,但与理论值相比还有一定的差距,需在以后工作中改进。

#### 参考文献:

- [1] 姚云华,卢晨晖,徐淑武,等.飞秒激光脉冲整形技术及其应用[J].物理学报,2014,63(18):184201.  
YAO Yunhua, LU Chenhui, XU Shuwu, et al. Femto-second laser pulse shaping technology and its application[J]. Journal of Physics, 2014, 63(18):184201.
- [2] 徐介平.声光器件的原理、设计和应用[M].北京:北京科学出版社,1982.
- [3] 俞宽新,丁晓红,庞兆广.声光原理与声光器件[M].北京:北京科学出版社,2011.
- [4] 王剑,邓德国,张晓敏,等.激光光束模式的检测技术与应用[J].金属世界,2012,2(2):54-56.  
WANG Jian, DENG Deguo, ZHANG Xiaomin, et al. Detection technology and application of laser beam pattern[J]. Metal World, 2012, 2(2):54-56.
- [11] KAMMA A, DAS R, BHATT D, et al. Multi-mode resonators based triple band notch UWB filter[J]. IEEE Microw Wireless Compon Lett, 2017, 27(2):120-122.
- [12] CHU Q X, QIU L L. Wideband balanced filters with high selectivity and common-mode suppression[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2015, 63(10):3462-3468.
- [13] GUO X, ZHU L, WU W. Strip-loaded slotline resonators for differential wideband bandpass filters with intrinsic common-mode rejection[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2016, 64(2):450-458.

(上接第180页)

- [9] LIM J S, KIM C S, LEE Y T, et al. A spiral-shaped defected ground structure for coplanar waveguide[J]. IEEE Microw Wireless Compon Lett, 2002, 12(9):330-332.
- [10] MUNIR A, WULANDARI B D, ADITOMO W, et al. DGS-based UWB microstrip bandpass filter and its equivalent circuit [C]// Johor Bahru: 2017 IEEE 13th Malaysia International Conference on Communications (MICC), 2017:70-73.