

大功率声光 Q 开关的研制

朱三又

(上海市激光技术研究所 上海 200233)

提要 简述了大功率声光 Q 开关的原理及设计要点:偏振不灵敏性;光束发散度与声束发散度的匹配;衍射效率与超声频率的关系。并给出了关键工艺技术和合理结构。

关键词 偏振灵敏度 损耗调制 声光 Q 开关

Development of High Power Acousto - Optic Q - Switch

Zhu Shanyou

(Shanghai Institute of Laser Technology, Shanghai, 200233)

Abstract This paper briefly describes the principle of high power acousto - optical Q - switch. Design keys are unpolarized, ratio of optical angular spread and acoustic angular spread, diffraction efficiency and super acoustic frequency. Described key technology and proper structures.

Key words polarization sensitivity, loss modulation, acousto - optic Q - switch

大功率 YAG 调 Q 固体激光器广泛应用于激光热加工,如拉丝模打孔,量具标号刻字,陶瓷基板划片等,此外,还应用于激光医学,以及微量元素光谱分析等。为满足国内市场日益迫切的需求,并能与进口同类产品代换,我们研制了 AOQ - 27 型大功率声光 Q 开关。

声光 Q 开关的设计考虑

1. 基本原理

声光 Q 开关基本结构如图 1。RF 激励源连接于换能器的顶电极和底电极上,在换能器上产生的超声振动经由粘结金属膜系传入声光介质,使介质折射率 n 产生周期性变化,并以声速传播,形成一种行进的折射率光栅,使入射光产生衍射。当声光 Q 开关置于 YAG 激光谐振腔内时,折射率光栅产生调制损耗。如果调制损耗足够大,激光谐振腔处于低 Q 状态,激光器没有输出。一旦断开 RF 激励,声光介质中的行进

超声栅突然消失,激光谐振腔突变至高 Q 状态,并在一瞬间输出一峰值功率很高的巨脉冲。

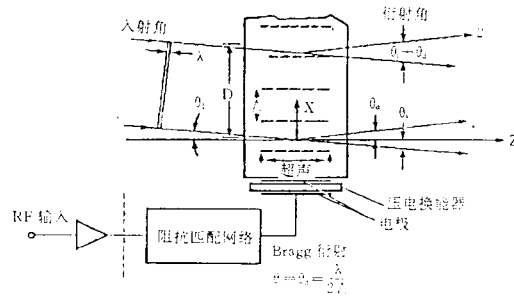


图 1

2. 大功率声光 Q 开关的设计考虑

声光 Q 开关用作 YAG 激光腔内的损耗调制元件,首要的是其自身的插入损耗应极小。各种声光介质材料中透光性能最好的是石英玻璃,它的光学质量好,声衰减小,膨胀系数极小,尺寸可做得较大。其不足之处是用以表征声光介质固有衍射效率 η 的声光优值 M_2 太小,要获得足够的调制损耗往往需要几十瓦的 RF 激励功率。石英玻璃声光介质在光束偏振与声波

1998 年 8 月 18 日收稿

矢作用方向不同时具有不同的光弹系数。如下表所列^[1]：

声波	光弹系数	光束偏振与声矢量关系	声速 V_s (10°C, m/s)	声光优值 M^2 ($10^{-18} S^3/g$)
剪切波	$P_{44}=0.075$	—	3.76	0.47
纵波	$P_{11}=0.121$	//	5.95	0.30
纵波	$P_{12}=0.270$	⊥	5.95	1.51

由表中可见,剪切波运动垂直于声波传播方向,石英玻璃材料中动态光损耗与偏振无关,适宜做偏振不灵敏的器件。从声光优值来比较,剪切波介于两种偏振纵波之间,在相同条件下获得每单位百分衍射效率的声功率之比为 1 : 3 : 5。YAG 激光器是非偏振的,纵波声光 Q 开关比较适宜用 50W 以下的 YAG 激光,其优点是效率高,超声激励功率低。但对 CW50W 以上的 YAG 激光,会产生漏光现象。若要关断高功率 YAG,所需的超声功率比剪切波声光 Q 开关的还大。

声光衍射根据声光相互作用的 Klein-Cook 判据, $Q \ll 1$ 属于喇曼-奈斯型; $Q \gg 1$ 属于布喇格型。而 $Q \geq 1$ 则属于过渡型。声光器件多半设计成布喇格型。理论上当 $Q \gg 1$ 时,布喇格衍射只产生零级和一级衍射光。它们的强度:

$$I_0 = I_i \cos^2(\xi/2) \quad (1)$$

$$I_1 = I_i \sin^2(\xi/2) \quad (2)$$

式中 $\xi = C\Delta n$, C 是与声光介质有关的常数:

一级光的衍射效率

$$\eta_1 = \sin^2(\xi/2) \quad (3)$$

当 $\xi = \pi$ 时,一级光的衍射效率最大 $\eta_1 = 1$ 。

而喇曼-奈斯衍射效率

$$\eta_m = J_m^2(\xi) \quad (4)$$

其最大值在 $\xi = 1.84$ 处, $\eta_m = 0.34$ 。与布喇格衍射相比较,其衍射效率低得多,原因是声光相互作用长度 L 太小。为了达到一定的衍射效率势必超声功率要提高许多。

多模 YAG 激光输出的光束发散角较大。一般而言,50~100W 的 YAG 激光的光束发散角约为 5~6mrad,150W 的 YAG 激光光束发散角~10mrad,200~250W 的 YAG 激光光束

发散角为 12~14mrad。显然多模激光是发散的光波,应看作一组沿不同方向传播的其波幅取决于波场分布的平面波束,把平面波作为元波,发散的多模激光分解为振幅任意空间分布的一组平面波的角谱,衍射效应转换为入射光波的角谱变化。对高斯光束的分析表明衍射效率是光束和声束空间分布的函数。高斯光束衍射发散度为 $\delta\Phi = 2\lambda/\pi\omega_0$, 长度为 L 的均质压电换能器发出超声的声发散度为 $\delta\theta \cong \lambda_s/L$ 。光束发散度与声束发散度之比 $a = \delta\Phi/\delta\theta = 2\lambda L/\pi\omega_0\lambda_s$ 。图 2 给出了布喇格衍射效率与参数 a 的关系曲线。从中可见 $a=0$ (平面波) 时衍射效率为 1, $a=1$ 时下降为 0.8, $a=2$ 时下降为 0.55, $a=3$ 时下降为 0.4, $a=4$ 时下降为 0.3。 $a \gg 1$ 时衍射效率趋于零。声光 Q 开关其实质是一种腔内调制器件,选取光声发散度比 a 在 1~3 的范围是适宜的。

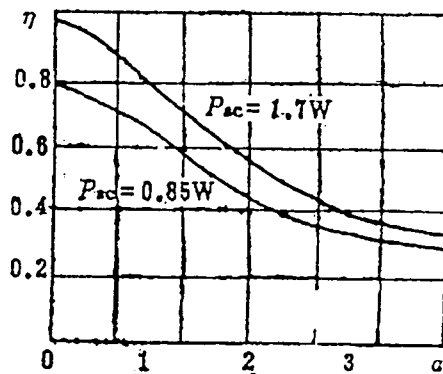


图 2

由于石英玻璃的声光优值 M_2 很小,要获得足够的调制损耗就需要几十瓦的超声激励功率。换能器的声功率密度 P_d 成了设计声光 Q

开关的一个重要参数,单位功率密度的衍射效率为^[2]

$$\frac{\eta}{P_d} = \left(\frac{\pi^2}{2\lambda_0^4 f_0^2} \right) M_4 \cdot l^2 \quad (5)$$

式中 $M_4 = n^8 p^2 v / \rho$, $L_0 = n \Lambda^2 / \lambda_0^2 \cos \theta_0$, L 为声光相互作用长度, $l = L/L_0$ 。从(5)式中可见,在其它条件确定时,单位功率密度的衍射效率与超声频率的四次方成反比。显然,超声频率适当选低一些是有利的。此外,降低超声频率则压电换能器的半波厚度增大,机械强度增大,承受的超声功率密度也增大。

3. 器件的设计及制作

综合上述设计考虑,大功率声光 Q 开关设计成剪切波 Bragg 型窄带声光调制器,超声频率 27MHz。压电换能器选取 x 切 LiNbO_3 晶体,其密度 $\rho = 4640 \text{ kg/m}^3$,声速 4800m/s,声阻抗 $Z_T = 22.3 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$,频率常数为 $2400 \text{ MHz} \cdot \mu\text{m}$,机电耦合系数 $K = 0.68$ 。换能器的半波厚度 $t = 0.088 \text{ mm}$ 。该器件的 Bragg 角 $\theta_B = \lambda / 2n\Lambda_S \approx 2.6 \text{ mrad}$,选取声发散度约为 3 mrad ,相应得到合适的声光相互作用长度为 40 mm 。该器件的 Klein-Cook 常数:

$$Q = 2\pi\lambda L / \Lambda_S^2 \cos \theta \approx 10$$

压电换能器、粘结层、声光介质及顶电极的输入阻抗 Z_{in} 按 Mason 理论给出:

$$Z_{in} = (\dot{A}Z_D + \dot{B}) / (\dot{C}Z_D + \dot{D}) \quad (6)$$

式中 Z_D 是压焊到换能器上的声光介质的声阻抗, \dot{A} 、 \dot{B} 、 \dot{C} 、 \dot{D} 是声光器件等效电路二端网络的矩阵元。在忽略电极阻抗 Z_e ,压电层粒结层的声衰减,换能器的电介质损耗时,声光开关的输入阻抗 Z_{in} 可简化为

$$Z_{in} = Z_a - jX_{co} \quad (7)$$

当 $f = f_0$ 时,取换能器作用高度 $H = 5 \text{ mm}$,换能器采用二片串联激励方式,相应每一片的容抗 $X_{co} = 1/\omega_0 C_0 = 17 \Omega$ 。输入阻抗 Z_{in} 的等效实阻抗为 $Z_a = R_a = \frac{\pi X_{co}}{4k^2} \cdot \frac{Z_D}{Z_T} = 10.5 \Omega$ 。声光开关的输入阻抗表现为一容性的复阻抗,为了能与超声激励源匹配与采用 T 型或 Γ 型匹配网络

转换成 50Ω 。

声光 Q 开关的衍射效率:

$$\eta = \sin^2 \left[\frac{\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{M_2 L P_s}{2H}} \right] \quad (8)$$

石英玻璃剪切波的声光优值 $M_2 = 0.47 \times 10^{-18} \text{ S}^3/\text{g}$,衍射 50% 的入射光束所需的超声功率:

$$P_s = \frac{\lambda_0^2}{8} \cdot \frac{1}{M_2} \cdot \frac{H}{L} \approx 6 \text{ W}$$

所需的 RF 电功率,应考虑换能器的转换效率,顶电极、底电极、匹配网络的功率损耗,因此配套的声光开关电源的 RF 电功率要在 50 W 以上。

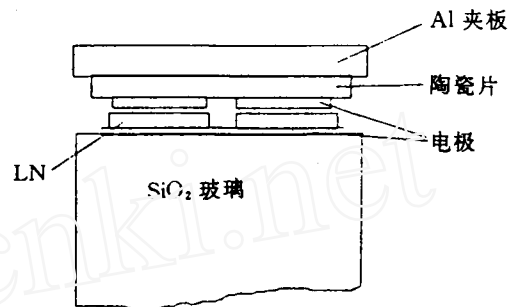


图 3

大功率声光 Q 开关,用于高功率 YAG 激光,承受的超声激励功率达几十瓦,对换能器与声光介质的粘结提出了较高的要求。对此我们采用了真空冷压焊工艺,控制作声阻抗变换层的蒸发膜层厚度为 $200 \sim 300 \text{ nm}$,蒸发...镀膜的真空气度 $2.7 \sim 6.7 \times 10^{-3} \text{ Pa}$,压焊的压强约为 686 N/cm^2 。

由于声光 Q 开关是行波器件,为防止驻波效应在器件的底部磨约 15° 的偏角来防止声反射,并采用铅板吸声。为保证在消声角上反射的声波不与光束再次满足 Bragg 衍射条件,消声角在作用长度方向上应偏 3° 以上的角。

大功率声光 Q 开关的散热要求比普通开关高得多,为此我们采用了导热橡胶来保证石英玻璃介质与水冷盒的热接触,明显降低了由于玻璃介质表面与夹板表面接触不良引起的热阻。由于输入电激励功率经由压电换能器转换

成声能,相当大的部分能量变成热量消耗在换能器中,是声光 Q 开关中温升最大的区域,在钽酸铅声光调制器中可以发现换能器附近热畸变最大。对此我们采用了图 3 所示的结构,电极用 0.1mm 的磷铜皮,通过 1mm 厚的绝缘陶瓷板将换能器热量传导给水冷夹板,实践证明该结构较为合理,取得了较好的散热效果。

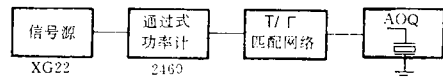


图 4

实验与测试结果

我们制作的 AOQ-27 型大功率声光 Q 开关,换能器的高度分别为 5mm 和 7mm 以适应不同功率的高功率 YAG 激光器。为了能与 RF 激励源输出阻抗相匹配,对每一只器件用图 4 所示实验装置调试,利用分立元件制作的 T 型或 Γ 型网络匹配到 50 Ω ,电压驻波比(VSWR)达到 1.25:1。

声光 Q 开关最主要的指标是调制损耗。作为 YAG 激光谐振腔内主动损耗开关元件,单程调制损耗越大能关断的连续 YAG 激光的功率就越高。习惯上借用声光调制器的衍射效率表示。首先对 He-Ne 激光做不同 RF 激励功率下的衍射效率 η 测量。设 He-Ne 激光初始值为 I_{00} ,加 RF 功率于声光 Q 开关上,调整入射激光的入射角为 $\theta_b \cong 9'$,使 Q 开关产生的衍射最强,零级光剩余光强为 I_{01} 。实测如下:

$I_{00} = 44$ (格)

V (V)	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5
I (A)	0.54	0.61	0.67	0.74	0.78	0.82	0.85
Pe (W)	12	18	22	27.8	34	40	46
I_{01}	29.5	24	22	19.5	15.5	13	10.5
η (%)	33	45.5	50	56	65	70.5	76

由于 1.06 μ m YAG 激光的输出稳定较差,用一台进口 Mode17200 半导体激光泵浦的 YLF 激光作光源(CW 输出稳定性 $\pm 2\%$),按图 5 实验装置测量器件的单程调制损耗。

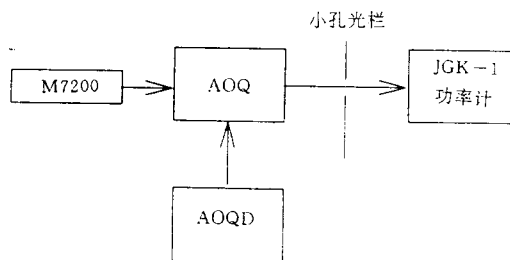


图 5 声光开关单程调制损耗测量装置

结果单程调制损耗如下:

@1.047 μ m $I_{0i} = 35$ $I_{0f} = 34$

V (V)	3	5	7	8	9
Pe (W)	12	34	57	65	69
I_{01}	39	26	20	17	14
η	12	23.5	41	50	59

可见当 RF 激励功率为 65W 时大功率声光 Q 开关的单程调制损耗已达到 50%,而且随激励功率的增加而继续增大。由以上 AOQ-27 型声光 Q 开关主要技术指标的测试结果和在高功率 YAG 调 Q 激光器上的使用效果看,该器件的性能指标已达到国外同类大功率声光开关的水平,可以替代进口的同类产品。

参考文献

- [1] W. Koechner, Solid - State Laser Engineering
- [2] I. C. Chang, Proc. SPIE, 1982, 352, 34
- [3] Yaliv, A. Optical Waves in Crystals
- [4] 徐介平,《声光器件原理设计与应用》