

反射式“驻波声光调制器”的调制特性研究*

殷宝璐 韩彦军 蔡峰怡 彭 健

(北京工业大学应用物理系 北京 100022)

提要 从理论上对“驻波声光调制器”的调制特性进行了分析,提出了从器件的设计、加工上保证在器件的声光互作用介质内形成强的驻波声场,和增加声光互作用介质的长度,以及改进匹配网络等方法。保证器件具有较高的调制效率,从而获得了注入 1 W 的声功率,对 He-Ne 激光束零级光的调制效率达 50% 的调制器件。

关键词 驻波声光调制器,声模间隔

1 引 言

反射式驻波声光调制器件具有结构紧凑、功率低、电磁干扰小等优点,因此在目前的激光锁模技术中,无论作为主动锁模的腔内损耗调制,或主被动锁模的原始噪声重整,还是用以改进固体可调谐激光器的输出特性^[1,2]等诸多方面,均采用反射式驻波声光调制器件予以实现。

但是在这种器件的声光互作用介质内,同时存在行波声场与驻波声场,而有用的是器件的驻波声场,不希望出现行波声场,或者说把行波声场压至最低。通常用的方法是测量器件对光强的调制度,即

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

来检验器件性能的优劣。式中 I_{\max} 和 I_{\min} 为光强的瞬时极大值和极小值。本文介绍从器件的设计和加工上保证器件具有较强的声驻波效应对光强具有较高的调制效率两个方面来以使器件具有较高的调制深度,以便更大地发挥器件的潜力,满足科研工作的需要。

2 器件的设计及理论分析

反射式驻波声光调制器件在文献[3]中已有描述,即两列同频率、同振动方向、以同一速率无衰减地沿相反方向传播的简谐波的叠加为一驻波,如图 1 所示

$$a_+ = A_1 \sin(\Omega t - kz) \quad (1)$$

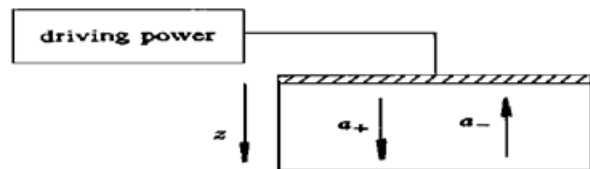


图 1 声光驻波调制器示意图

Fig. 1 Scheme of an acousto-optic standing modulator

* 北京市自然科学基金资助项目。

$$a_- = A_2 \sin(\Omega t + kz) \quad (2)$$

式中 a_+ 和 a_- 分别为入射和反射的声波。声波 a_+ 和 a_- 在声光互作用介质内产生相应的折射率波分别为 $\Delta\mu_1 \sin(\Omega t - kz)$ 和 $\Delta\mu_2 \sin(\Omega t + kz)$, 式中 $\Delta\mu_1$ 和 $\Delta\mu_2$ 分别为正向和反向行波声场所产生的折射率波变化的最大值, 设 $\Delta\mu_1 = \Delta\mu_2 + \Delta\bar{\mu}$, μ_0 为无声场时介质内的折射率, Ω 为声圆频率, k 为声波矢常数, 合成后介质内的折射率波为

$$\begin{aligned} \mu(z, t) &= \mu_0 + \Delta\mu_1 \sin(\Omega t - kz) + \Delta\mu_2 \sin(\Omega t + kz) \\ &= \mu_0 + \Delta\bar{\mu} \sin(\Omega t - kz) + 2\Delta\mu_2 \sin(\Omega t) \cos kz \end{aligned} \quad (3)$$

可见合成波为驻波声场 $\Delta\mu_2 \sin(\Omega t) \cos kz$ 与行波声场 $\Delta\bar{\mu} \sin(\Omega t - kz)$ 的叠加, 即这一反射式驻波调制器件可等效成一纯驻波器件与一纯行波器件叠加的结果。

正如文献[4]所述, 在行波声场与驻波声场同时存在的声光互作用介质内, 通过声光互作用, 其行波声场产生的各级衍射光的衍射角与驻波声场产生的各级衍射光的衍射角均相同, 不同的是: (1) 驻波声场产生的各级衍射光的光强以两倍于声频被调制, 而行波声场产生的各级衍射光的光强不随时间变化; (2) 行波声场产生的各级衍射光的频率呈单一性, 而驻波声场产生的各级衍射光呈多频性, 特别是对一级衍射光而言 $\omega - \Omega$, 谱线有行波成分, 其它谱线 $\omega + \Omega$ 与 $\omega \pm 3\Omega \cdots$ 只有驻波成分, 只有在纯驻波情况下, $\omega - \Omega$ 与 $\omega + \Omega$ 才呈对称分布, 这点可用于区分器件是行波器件或是驻波器件, 以及器件的声场驻波比。

因此为了提高驻波声光调制器件的调制特性, 在设计、加工时应着重考虑: (1) 保证器件形成强的驻波声场, 把行波成分压至最低限度; (2) 保证器件具有较高的调制效率。讨论如下:

(1) 驻波调制器件的驻波声场是靠与入射面平行的底面的反射波与入射波叠加形成, 为此, 第一, 要选用对高频声波吸收系数小的介质作为声光互作用介质, 例如石英的 $\Gamma = 12 \text{ dB}/(\text{cm} \cdot \text{GHz}^2)$; 第二, 加工时要保证两个声学面严格地平行, 10"之内可用, 2"之内效果最佳; 第三, 合理地选择声模间隔 $\Delta f = v_s/(2H)$ (其中 H 为介质的声场厚度, v_s 为介质中的声速), 通常选用几百 kHz 的范围。根据这三条原则加工成的器件, 介质内形成的驻波声场的驻波比 $a = A_1/A_2$ (A_1 和 A_2 分别为入射波和反射波的振幅) 接近于 1。借助于文献[4] 的频率分析方法, 测量我们加工成的两个声学面平行度小于 2" 的石英器件, 所产生的一级衍射光的边频 $\omega - \Omega$ 与 $\omega + \Omega$ 的谱线强度基本相等, 说明本器件具有较强的驻波声场。

(2) 在保证器件的驻波声场的驻波比小(接近于 1) 的前提下, 提高器件的调制效率, 为此, 应在加工条件许可的情况下, 尽可能地增加声光互作用介质的长度, 选择声光优值 M_2 大的介质, 这样就可注入低功率的情况下, 获得高的调制效率。综合考虑, 选用石英介质的长度为 50 mm。

根据上述原则及加工条件, 设计加工成的器件为: 选用石英作为声光互作用介质, 尺寸为 $50 \times 8 \times 5 \text{ mm}$ (50 mm 长为通光方向), 声学面的平行度为 2", 换能器采用 $36^\circ Y$ 切铌酸锂, 中心频率 50 MHz, 声模间隔 $\Delta f = v_s/2H = 0.57 \text{ MHz}$ 。当我们给器件注入 1 W 的声功率时, 测得对 He-Ne 激光的零级光的调制效率大于 50%。

3 反射式驻波声光器件的匹配网络

驻波器件的网络匹配技术是器件的关键技术之一, 必须保证信号源注入的声功率更有效地利用。因器件的阻抗 $Z_{in} = R + jX$, 既有实部 R , 又有虚部 X , 是一个复杂的阻抗, 而且带宽

很窄(几百千赫),远小于行波器件,如图 2 所示。匹配时只能匹配在其声模间隔内的某个频率点上,即匹配在指定的 $50\ \Omega$ 的纯阻上,才有可能使用足够长的 $50\ \Omega$ 的传输线把器件与高频驱动源连接,保证注入的声功率有效地传输利用,为此专门设计了一套高频的驻波器件的匹配网

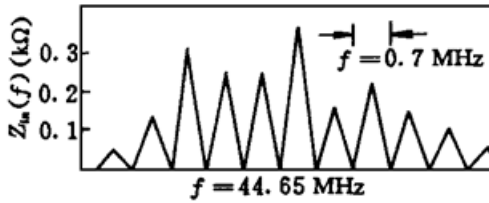


图 2 声光调制器的辐射阻抗随频率变化的曲线

Fig. 2 Radiative impedance-frequency curve of the modulator

络方法,测出器件的阻抗 $Z_{in} = R + jX$ 后,通过实验和计算并借助惠普公司的 4194A 阻抗分析仪,即可把器件匹配在指定 $50\ \Omega$ 的纯阻上,如图 3 所示。其中 $Z_{in} = R + jX$ 为器件的阻抗, C 和 L 为匹配网络用的电容和电感, Z'_{in} 为匹配后器件的输入阻抗。

为说明器件的阻抗变化对注入声功率的影响,引入器件的终端反射系数 $|\Gamma|$,即

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (4)$$

其中 Z_{in} 为器件的阻抗, Z_0 为标准阻抗。用日本 DIAMOND 公司的 SX-200 型高频通过式功率计监测反射回来的注入声功率随阻抗变化的情况。

图 4 为用 4194A 阻抗分析仪测得的给所设计的器件注入功率的反射系数 $|\Gamma|$ 随注入的频率的改变而变化的曲线。图 4(a) 为器件匹配前的情况,由图可看出,几乎 50% 的注入功率被反射回去;图 4(b) 为器件匹配后的情况,当 $f = 49.2\ \text{MHz}$ 时, $|\Gamma| = 0$,说明注入的功率 100% 被器件吸收,全部有效地利用了。

4 实验与结果

反射式驻波声光调制器件的带宽很窄,为一个声模间隔(本器件的声模间隔为 $0.57\ \text{MHz}$),而且所用换能器对温度变化的敏感性远大于石英,温度稍有变化,器件的阻抗就随着变化,导致与信号源的输出阻抗失配,使器件的调制效率下降,使得激光器的稳定性变差,必须采取控温等措施予以解决。下面分两种情况讨论。

4.1 给器件以连续方式注入声功率

对这种以连续方式注入声功率运转的器件,采用控温技术即可使器件稳定地工作。室温下

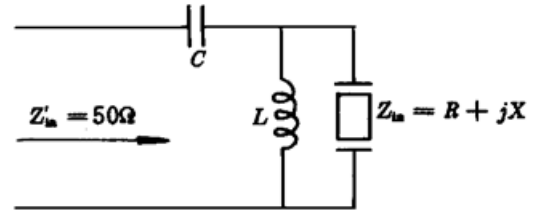


图 3 匹配网络示意图

Fig. 3 Scheme of the matching networks

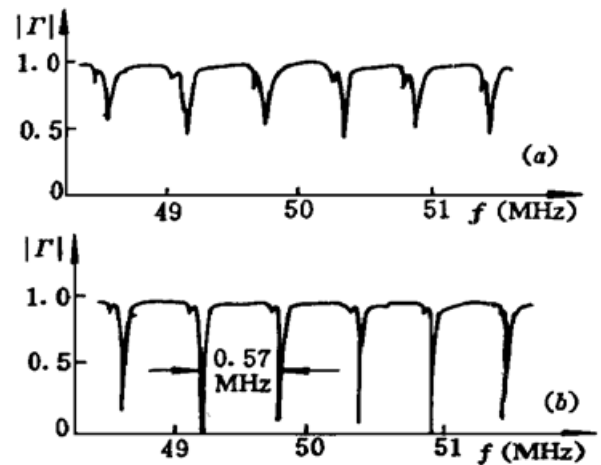


图 4 调制器的声阻抗(在 $49.2\ \text{MHz}$ 附近阻抗 $\Gamma = 0$)
(a) 匹配前; (b) 匹配后

Fig. 4 Acoustic resonances of the modulator. The resonance near $49.2\ \text{MHz}$ was used ($\Gamma = 0$)
(a) before matching; (b) after matching

匹配好的中心频率为 49.2 MHz 的器件, 当注入 1 W 声功率时, 由通过式功率计读出的反射功率为零, 调制光强稳定不变; 注入功率升高时, 反射功率也增加, 采取控温技术把器件控制在 50℃ 上, 注入 4 W 功率, 反射 0 W, 并用一个 5 mW 的 He-Ne 激光器通过控温器件, 测得零级光的调制效率为 70%, 而且稳定不变, 但注入功率达 6 W 时, 被控温度必须增加至 52℃, 反射功率为 1.5 W。可见器件的工作条件为: 控温 50℃, 注入功率 4 W, 反射 0 W。

4.2 给器件以脉冲方式注入声功率

采用脉冲方式给器件注入声功率, 解决器件的热不稳定性的问题, 方法简单易行, 而且器件既可在注入低功率下又可在注入高功率下稳定地工作, 同时使器件性能得到改进。

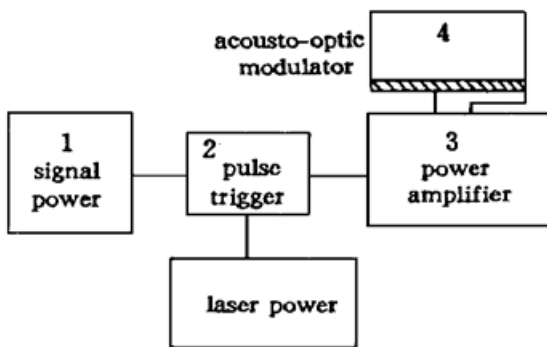


图 5 脉冲方式的声光调制器实验装置

Fig. 5 Experimental setup of the pulsed acousto-optic modulator

图 5 为用脉冲方式给器件注入功率的实验装置, 1 为高频器件信号源, 频率调节范围为 45 ~ 55 MHz, 稳定度为 10^{-7} , 2 为触发器, 3 为高频功率放大器, 由激光电源控制, 一旦激光电源打开触发器, 信号源的输出信号通过触发器送到功率放大器放大后加到器件上。将一个 5 mW 的 He-Ne 激光束通过器件时, 当注入功率 10 W 时, 可看到除零级光以外的 ± 4 级的衍射光, 而且 ± 1 级衍射光的亮度基本上与零级光相同。

触发器的开门时间为 0~ 3000 μs 可调, 因此器件对激光束的调制效果, 除取决于注入声功率、频率和布拉格角外, 还取决于注入到器件上的声功率的作用时间。最佳调制效果, 视具体器件, 调节触发器开门时间而定。

5 结 论

我们分析了反射式驻波声光调制器件的调制特性, 以及如何从器件的设计、加工来保证在声光互作用介质内形成强的驻波声场, 和增加声光互作用介质的长度以及匹配网络等办法, 来保证器件具有较高的调制效率, 并获得了注入 1 W 声功率, 零级光的调制效率达 50% 的结果。从这些结果来看, 若器件的其它技术例如高真空钢压焊技术等改进后, 该器件的应用范围将更广阔。

参 考 文 献

- 1 王清月, 沈家强, 许 键. 非腔长匹配相干叠加脉冲锁模激光器的实验研究. 物理学报, 1994, **43**(8): 1289~ 1291
- 2 Pang Y. Yanovsky, Wise F.. Self-mode-locked Cr^{4+} -forsterite laser. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(4): 1168~ 1170
- 3 殷宝璐, 周劲峰, 黄 骝. 用声光调制器的调制窗口改进纯被动锁模 YAG 激光器的输出特性. 激光与红外, 1995, **25**(5): 28~ 32
- 4 杜燕贻, 殷宝璐, 蔡峰怡 等. 用频谱分析法测量声光驻波调制器的调制度. 光学学报, 1995, **15**(3): 361 ~ 366

Study on the Modulation Characteristics of a Reflective-type Standing-wave Acousto-optic Modulator

Yin Baolu Han Yanjun Cai Fengyi Peng Jian

(*Department of Applied Physics, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022*)

Abstract In this paper, the modulation characteristics of a reflective-type standing-wave acousto-optic modulator are analysed theoretically. In order to ensure forming of a strong standing-wave ultrasonic field in the acousto-optic interaction substance and the higher modulation efficiency of devices by increasing the length of the acousto-optic interaction substance and improving the matching network and so on, some methods regarding the design and manufacture of the modulator are proposed. Thereby, a modulator with a modulation efficiency of 50% for the zero order light of a He-Ne laser under the injecting power of 1 W is obtained.

Key words standing-wave acousto-optic modulator, acousto model space