

## 激光腔内声光调制的多稳态输出特性

宋如华

(电子科技大学物理系, 610054)

**提要:** 根据声光调制器在腔内的基本性质, 本文详细分析了带负反馈腔内声光调制器的输出特性, 得出了输出(透射输出和一级衍射输出)具有多稳态的结论, 并讨论了腔内存在激活介质时调制的多稳态输出特性。此外, 文中还给出了各种参数对输出特性影响的数值计算结果。

**关键词:** 腔内调制, 声光调制器, 反馈, 多稳态

## Multistability for intracavity acoustic-optic modulators

Song Ruhua

(Physics Department, University of Electronic Science and Technology, Chengdu)

**Abstract:** Based on behaviours of acoustic-optic modulation in the resonator, the output characteristics of intracavity acoustic-optic modulator (IAOM) with feedback device are analysed, and the multistability of IAOM with active medium is discussed. Furthermore, the relations between the output power and the variables are given.

**Key words:** intracavity modulation, acoustic-optic modulator, feedback, multistability.

近年来, 为了在光通信中降低调制器的驱动功率和增加带宽, 人们提出了腔内调制<sup>[1]</sup>, 并开展了一些理论和实验研究<sup>[2,3]</sup>。腔内调制与腔外调制相比, 具有调制频带宽、驱动功率小、频率特性响应好等独特的优点, 对光通信(特别是空间光通信)的发展具有重要意义。

此外, 人们已经发现带反馈装置的腔外电光及声光调制器其输出特性呈现出光学多稳态<sup>[4,5]</sup>。由于这类装置在数字光通信中具有十分诱人的应用前景, 因而受到普遍关注。对腔内电光调制的光学多稳输出特性已有理论分析报道<sup>[6]</sup>, 本文对带负反馈装置的腔内声光调制的输出特性进行了系统的分析。

## 一、带负反馈的腔内声光调制器输出特性

常见的  $10.6\ \mu\text{m}$  波段腔内声光调制激光器, 若考虑其带有光声反馈装置, 则其结构见图 1 所示。由于实用化的声光调制器通常设计成布拉格型, 因而相应的零级和一级衍射场振幅为

$$E_0 = E_i \cos\left(\frac{\xi}{2}\right); \quad E_1 = E_i \sin\left(\frac{\xi}{2}\right) \quad (1)$$

其中  $E_i$  为入射场振幅(对腔内调制则为腔内循环场振幅), 而

$$\xi = -\frac{2\pi \Delta n l}{\lambda_0 \cos \theta_i} \quad (2a)$$

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n^3 p s \quad (2b)$$

式中  $l$  为声光有效作用长度,  $\lambda_0$  为入射光波长,  $\theta_i$  为入射角,  $n$  为光在声光介质中的折射率,  $p$  为声光系数,  $s$  为超声应力场振幅,  $\Delta n$  为声致折射率变化。相应的衍射效率为

$$\eta_1 = \left| \frac{E_1}{E_i} \right|^2 = \sin^2 \frac{\xi}{2} \quad (3a)$$

$$\eta_0 = \left| \frac{E_0}{E_i} \right|^2 = \cos^2 \frac{\xi}{2} \quad (3b)$$

为了提高衍射效率, 并保证激光腔振荡, 将零级光作为腔内循环光, 而将一级衍射光作为一种输出损耗, 则零级光的透射输出功率为

$$P_t = T_m \eta_0 (1 - R_f') P_i \quad (4)$$

其中  $T_m$  为声光调制器的光透率,  $R_f'$  为输出腔镜的反射率。一级衍射耦合输出功率为

$$P_d = P_i T_m (1 - R_f') \eta_1 + P_i T_m^2 R_f' \eta_1 \eta_0 \quad (5)$$

如果将放电管(气体激光器增益介质)放入腔内, 则应考虑介质增益对腔内循环功率(调制器左边的腔内功率)  $P_i$  的影响。为此, 可利用高增益介质的腔内循环公式<sup>[7]</sup>

$$P_i = \frac{K I_s A \sqrt{R_c} \left[ g_0 l + \frac{1}{2} \ln(R_c R_f) \right]}{(\sqrt{R_c} + \sqrt{R_f})(1 - \sqrt{R_c R_f})} \quad (6)$$

式中  $K$  为经验常数,  $I_s$  为饱和光强,  $A$  为腔内光束的横截面积,  $g_0 l$  为放电管增益,  $R_c$  和  $R_f$  分别为左腔镜和右腔镜(包括声光调制器)的反射率。对于一般腔镜有

$$R_c \approx 1; \quad R_f \approx T_m^2 R_f' \eta_0^2 \quad (7)$$

$R_f'$  为右腔镜(不考虑调制器)的反射率。由(7)式, (6)式可简化为

$$P_i = \frac{K I_s A \left[ g_0 l + \frac{1}{2} \ln R_f \right]}{1 - R_f}; \quad R_f = T_m^2 (1 - \eta_1)^2 R_f' \quad (8)$$

若引入反馈装置, 即将透射输出光场的一部分利用光电转换、放大后再来驱动超声源, 反过来调制透射输出光和一级衍射输出。设反馈为线性反馈

$$S = S_0 + k P_t \quad (9)$$

其中  $S_0$  为起偏置作用的稳恒超声场,  $k$  为反馈系数(取决于转换和放大系数及超声源驱动功率)。此外, 由(3)式可知

$$\eta_0 + \eta_1 = 1 \quad (10)$$

上式是忽略声光作用过程中的各种损耗及吸收, 并严格遵守布拉格衍射时得出的结论; 而实际上这是一种理想情况, 对于实用的声光调制器, 常需考虑由上述原因所引起的差别, 并有

$$\left. \begin{aligned} \eta_0 &= \beta \cos^2(\xi/2) \\ \eta_1 &= \beta' \sin^2(\xi/2) \\ \eta_1 + \eta_0 &= \beta, \quad 0 \leq \beta < 1 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

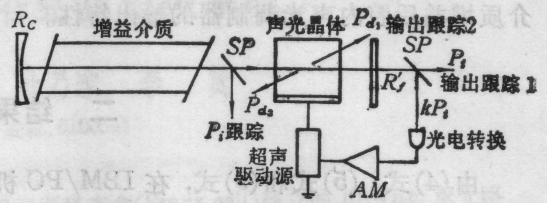


图1 带负反馈装置的激光腔内声光调制装置结构示意图

在理想情形下,  $\beta=1$ , (11)式即过渡到(3)式和(10)式。由(4)、(5)和(9)式, 即可得腔内无增益介质时内腔式声光调制器的输出特性; 而由(5)式、(8)式和(9)式则可得考虑到激光器激活介质增益后腔内声光调制器的输出特性。

## 二、结果分析及讨论

由(4)式、(5)式和(9)式, 在 IBM/PC 机上进行了数值解。计算时将  $P_i$  (或  $P_a$ ) 作为自变量,  $P_t$  作为应变变量 (因  $P_t$  或  $P_a$  相对于  $P_i$  具有多个值), 自变量取值间隔为相应最大值的 1/100, 求值重复次数为 100 次, 计算结果见图 2 及图 3 所示, 其中图 2 为透射输出功率与腔内循环功率之间的关系, 图 3 为一级衍射输出功率与腔内循环功率之间的关系, 图中呈现出典型的多稳特性。由图中可知: 透射和衍射输出功率均远小于腔内循环功率; 零级衍射透射输出特性不同于一级衍射耦合输出特性 (尽管均具有多稳特性); 这种输出特性不同于带反馈的腔外调制特性<sup>[5]</sup>, 也不同于无反馈的腔内调制输出特性<sup>[6]</sup>。

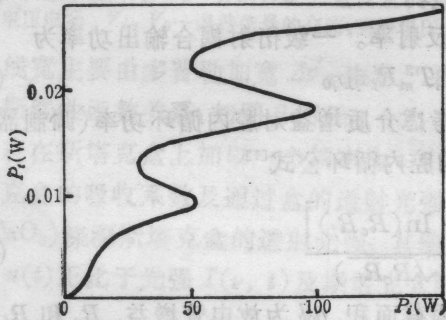


图 2 透射输出的多稳态特性

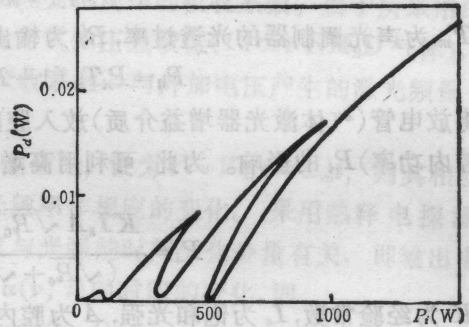


图 3 一级衍射输出的多稳态特性

其中取:  $\beta=0.9$ ,  $K=0.6$ ,  $S_0=0.5$ ,  $\theta_i=0.0001$  rad,  $T_m=0.05$ ,  $R_f=0.99$ ,  $l=100\mu\text{m}$ ,  $\lambda_0=10.6\mu\text{m}$ ,  $p=0.3$ ,  $n=2.2$  其中取:  $\beta=0.6$ ,  $K=0.6$ ,  $S_0=0.5$ ,  $l=100\mu\text{m}$ ,  $\theta_i=0.0001$  rad,  $T_m=0.05$ ,  $R_f=0.99$ ,  $\lambda_0=10.6\mu\text{m}$ ,  $p=0.3$ ,  $n=2.2$

进一步, 适当改变方程中各参数 ( $\beta$ 、 $K$ 、 $S_0$ 、 $l$ 、 $T_m$ 、 $R_f$  等), 则将发现输出特性发生显著变化。图 4 为透射输出特性随其中一些参数的变化情况, 其中所取参数为常见  $10.6\mu\text{m}$  波段腔内声光调制器所取参量 (便于实验验证)。由图 4 及其它大量数值计算结果表明: (i) 改变  $\beta$ 、 $K$ 、 $S_0$ 、 $l$  可降低 (或升高) 第一级稳态的阈值功率; (ii) 参数  $\beta$ 、 $T_m$  和  $R_f$  可影响第一级稳态的回滞区间宽度; (iii) 当  $K$ 、 $\beta$ 、 $R_f$  中之一小到某一值, 透射输出的多稳特性将消失, 因而存在参数优化问题, 计算结果表明, 选  $\beta=0.5\sim 0.9$ ,  $K>1$ ,  $R_f=0.9\sim 0.99$  较为适宜; (iv) 减小  $\beta$  和  $R_f$  或增大  $T_m$ , 可提高透射输出功率; (v) 对于  $\text{CO}_2$  激光的腔内声光调制器, 取图 2 中的参数, 则可知当腔内循环功率为 50 W 处, 出现第一级稳态。同样, 可以得到一级衍射耦合输出功率随不同参数变化的特征。

如果计入腔内增益介质对输出特性的影响, 则可得相应的透射输出特性和一级衍射耦合输出特性, 利用(5)式、(8)式和(9)式, 则可得相应的结果, 其计算机的数值计算结果 (方法与前相同) 见图 5 及图 6 所示。根据计算结果可知: 透射输出仍可出现多稳特性, 但与无激活介质时的结果已显著不同 (图 5 中各稳态的起跳阈值光功率几乎相同, 且只有当  $P_i > P_{i0}$  时才有输出); 图 6 的结果亦与图 3 (无激活介质) 的不同: 起始点不在原点, 表明该区间内腔停振, 曲线

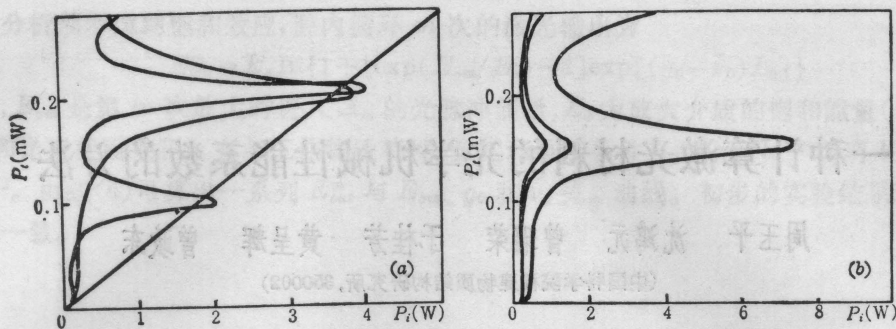


图4 零级衍射透射输出特性随不同参数变化的性质

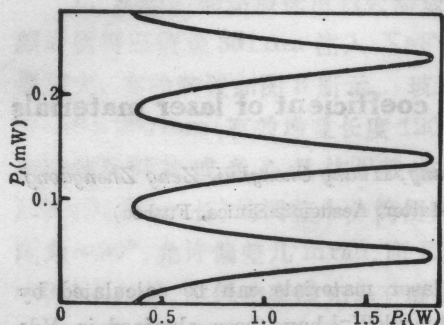
(a) 透射输出特性随  $K$  的变化; (b) 透射输出特性随  $B_1^2$  的变化

图5 充有激活介质的腔内声光调制器的多稳态输出特性

(各参数取值与图2相同)

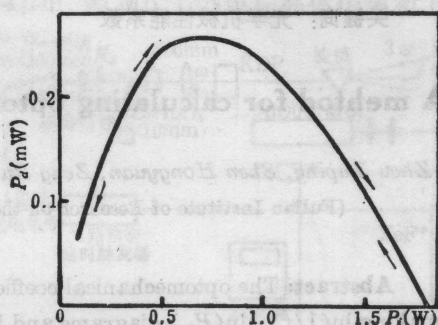


图6 充有激活介质的腔内声光调制器的一级耦合衍射输出特性

(参数与图3相同)

与  $P_i$  轴的交点表示此时即使腔内有较大的循环功率,亦无一级衍射耦合输出功率;当考虑腔增益后,出现多稳态的起始阈值功率显著减小,这是由于增益介质的放大之故;此外,上述结果显然不同于无反馈的腔内调制输出特性。以  $\text{CO}_2$  激光的腔内声光调制为例,取图2所给出的参数值,则透射输出的一级稳态阈值功率约(腔内循环功率)1.75 W,有透射输出的最小腔内循环功率为 0.35 W,有耦合输出的最小和最大腔内循环功率分别为 0.15 W 和 1.85 W。

综上所述,带负反馈的腔内声光调制器,其输出特性完全不同于迄今已知的腔内和腔外声光调制的输出特性,具有多稳态输出特性。这一特性在光通信(特别是数字光通信)中具有潜在的应用价值。此外,这类激光腔可望得到较高质量的输出光束。

本文所得的结果,有助于进一步开展对腔内声光调制的理论和实验研究,并对探讨这类腔输出的不稳定性和混沌态具有指导意义。

作者感谢冯志超教授、乐时晓高工的指导,对戴伐、傅恒周同志的帮助表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- 1 Scholtz A. L. et al., *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-17** (3), 423 (1981)
- 2 戴伐 et al., *中国激光*, **16**(3), 170 (1989)
- 3 陈光明 et al., *中国激光*, **15**(5), 311 (1988)
- 4 Smith P. W. et al., *Appl. Phys. Lett.*, **30**, 280 (1977)
- 5 Chrostowski J. et al., *Opt. Commun.*, **41**(2), 71 (1982)
- 6 宋如华, *量子电子学*, **4**(3), 236 (1987)
- 7 Rigrod W. W., *J. Appl. Phys.*, **36**, 2487 (1965)