

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0221-04

受抑全反射光调制器实验研究

齐丽君 朱晓 宋婷婷 杨云锋 毛少卿

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

提要 建立了受抑全反射理论模型, 设计了受抑全反射光调制器和激光腔外、腔内调制实验, 分析了实验结果, 证明了利用受抑全反射可实现光调制。并提出了提高调制深度的方法, 展望了受抑全反射光调制器用于激光调 Q 的前景。

关键词 受抑全反射, 光调制, 激光调 Q

中图分类号 TN248.2⁺1; O437 文献标识码 A

Research of Frustrated Total Internal Reflection Modulator

Qi Li-jun ZHU Xiao SONG Ting-ting YANG Yun-feng MAO Shao-qing

(State Key Laboratory of Laser Technology of Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract Basing on the theory of frustrated total internal reflection, an optical modulator is designed. The experimental results of the optical modulator are reported. By putting the modulator in the laser cavity, there is no additional loss in the cavity and the peak power of the laser pulse is increased. The phenomenon is analyzed in the paper. The optical modulator can also be used as a Q-switch.

Key words frustrated total internal reflection, optical modulator, Q-switch

1 引言

早在 1902 年, 倏逝波现象的实验和理论探讨就已经有了相关报导, 而 1947 年受抑全反射概念的提出, 为倏逝波现象展现了更广阔的应用前景。文献 [1] 中详细地论述了受抑全反射的原理、发现过程和用途。

传统的光调制器(即光开关)的透射, 或由激光束自身控制(如可饱和染料开关); 或取决于光折射(如声光开关); 或含有控制激光束偏振态的元件(如电光开关); 或含有机械传动部分(如旋转棱镜开关)等等。

利用受抑全反射原理设计的光调制器是一个新的思路, 与上述光开关相比, 有很多优点。这种光调制器的原理虽在很早就已被发现和论证, 但将其用于光调制甚至调 Q 技术并得以实现却是近期研究的焦点。在国外, 开展了一系列的研究, 如用于钎激光器、YAG-glass 类激光器, 钕类激光器等, 得到了一些优势结果。但在国内, 这类研究却没有深入开展。

本文建立受抑全反射理论模型, 设计了新型光调制器, 并进行了外调制和内调制实验。

2 理论模型

受抑全反射发生时, 反射系数 r 和折射系数 t 可由以下公式表示^[2]:

$$r = \frac{r_{12} + r_{23} e^{i\delta}}{1 + r_{12} r_{23} e^{i\delta}} \quad t = \frac{t_{12} t_{23} e^{i\delta}}{1 + r_{12} r_{23} e^{i\delta}} \quad (1)$$

r_{12} 、 r_{12} 和 r_{23} 、 t_{23} 分别表示介质一、二界面和介质二、三界面的反射系数和透射系数。 δ 为反射和透射形成的位相差

$$\delta = 2kdn_2 \cos\theta_2 = \frac{4\pi}{\lambda} dn_2 \cos\theta_2$$

由全反射折射定律^[2]

$$n_2 \cos\theta_2 = i \sqrt{n_1^2 \sin^2\theta_1 - n_2^2} = i\gamma$$

因此

$$\delta = 2 \times \frac{2\pi}{\lambda} d \times i\gamma = 2bi$$

再由菲涅耳公式, 全反射时反射率为^[2]:

$$R = \frac{e^{2b} + e^{-2b} + 2\cos(\varphi_{12} - \varphi_{23})}{e^{2b} + e^{-2b} + 2\cos(\varphi_{12} + \varphi_{23})}$$

则透过率为:

$$T = 1 - R = \frac{-4\sin\varphi_{12}\sin\varphi_{23}}{e^{2b} + e^{-2b} + 2\cos(\varphi_{12} + \varphi_{23})} \quad (2)$$

文献[3]得到反射系数和折射系数垂直和平行分量的表达式。将 $\cos\varphi_{12s}, \cos\varphi_{23s}, \sin\varphi_{12s}, \sin\varphi_{23s}, \cos\varphi_{12p}, \cos\varphi_{23p}, \sin\varphi_{12p}, \sin\varphi_{23p}$ 代入(2)式,并考虑

特殊情况介质一的折射率与介质三相同,介质二为空气。则 $n_1 = n_3 = n, n_2 = 1, \theta_1 = \theta_3$, 得到折射率垂直和平行分量的表达式:

$$\left. \begin{aligned} T_s &= 4n^2 \cos^2 \theta_1 \gamma^2 / [(n^2 - 1)^2 \text{sh}^2 b + 4n^2 \cos^2 \theta_1 \gamma^2] \\ T_p &= 4n^2 \cos^2 \theta_1 \gamma^2 / [4n^2 \cos^2 \theta_1 \gamma^2 + (1 - n^2)^2 (n^2 \sin^2 \theta_1 - \cos^2 \theta_1)^2 \text{sh}^2 b] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中

$$b = \frac{2\pi d \gamma}{\lambda} \quad \text{sh}^2 b = \frac{e^{2b} + e^{-2b} - 2}{4}$$

根据(3)式,通过计算机编程、绘图,可以得到相对间距(d/λ),入射角 θ_1 与 T_s, T_p 的关系图(如图1,图2所示)。

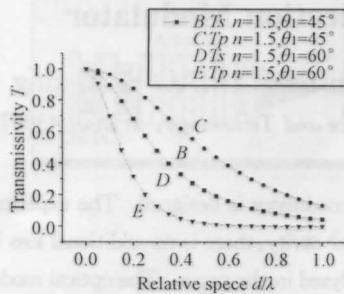


图1 透过率与相对间隙关系图

Fig. 1 The relation of transmissivity and relative space

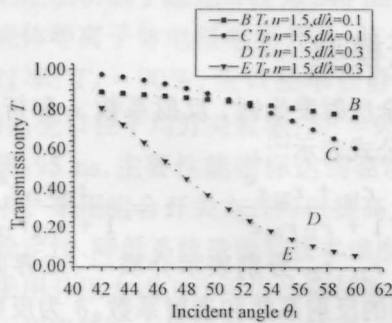


图2 透过率与入射角关系图

Fig. 2 The relation of transmissivity and incident angle

透过率 T 随着 d/λ 的增加而逐渐降低。当 d 超过一个光波长时,透过率降到百分之几,这证明了全反射倏逝波在光疏介质只能传播波长量级的距离。

入射角大于临界角情况下,角度越大,透过率越低,且随间隙的增大减少得越快。并且随着角度增加, T_s 减少的速度小于 T_p (如图2)。此时对于同一折射率,存在某一特定的角度,有 $T_s = T_p$ 。小于此角度, $T_s < T_p$; 大于此角度, $T_s > T_p$ 。如在图1中,入射角为 45° 时, $T_s < T_p$; 入射角为 60° 时, $T_s > T_p$ 。

3 实验结果及分析

基于上述理论模型,我们设计了受抑全反射光调制器,它是由两个折射率相同的镜子组成,两块镜子之间的介质是空气。并且进行了内调制和外调制实验。

3.1 受抑全反射光调制器外调制实验

保持受抑全反射光调制器2的两面镜子的初始间隙 d_0 小于光波长 λ , 存在初始透过率 T_0 。半导体激光器1发出的连续激光以大于临界角的入射角入射到光调制器2的一个镜子表面,控制电源3发出周期性的方波控制另一面镜子,使光调制器的间

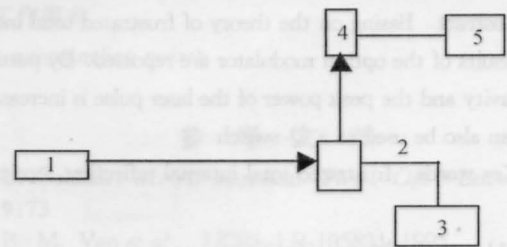


图3 受抑全反射光调制器外调制实验原理图

Fig. 3 The figure of external modulating experiment

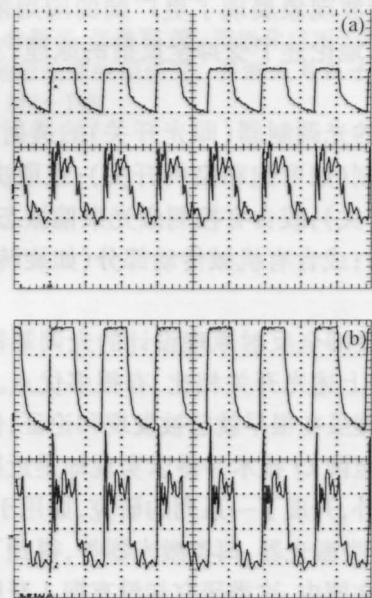


图4 电信号与光信号波形图

Fig. 4 The relation of electrical signal and optical signal

隙 d 在小于一个光波长 λ 范围内变化,按照(2)式,受抑全反射的透过率 T 也会在一定范围内发生周期性变化,光电探测器 4 接收到变化信号,在示波器 5 上显示出来。实验结果如图 4。

实验结果表明倏逝波的存在和传播。周期性的方波电压加于光调制器上,使空气间隙和光的透过率 T 发生周期性变化。因此透过空气间隙进入探测器的光信号会与电信号同频同相变化。电信号电压值越大,空气间隙越小,透过率越大,所以光信号幅度随电压的增加而增加。 $U_{\text{电}}-U_{\text{光}}$ 的曲线图(图 5)与 $T-d/\lambda$ 理论曲线图近似,符合理论计算结果。

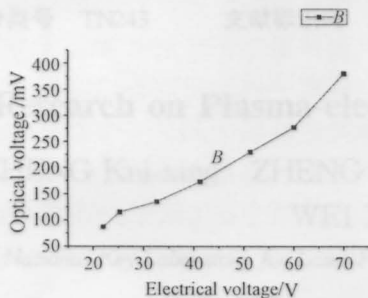


图 5 电信号电压与光信号电压关系图

Fig. 5 The relation of electrical and optical voltage

3.2 受抑全反射光调制器内调制实验

外调制实验中,受抑全反射光调制器置于激光腔外,充当外调制器的作用。我们将它的一面镜子作为脉冲激光器的输出镜,并与全反镜构成一个谐振腔,便形成内光调制器。其实验原理图如图 6 所示。

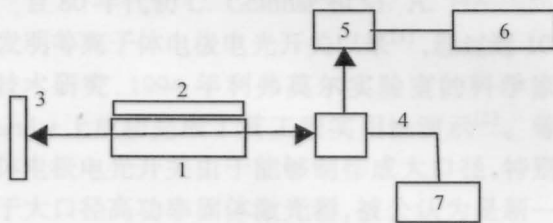


图 6 受抑全反射光调制器内调制实验原理图

Fig. 6 The figure of inner modulating experiment

实验步骤:图中 1 是 Nd:YAG 晶体,2 是泵浦灯,3 为全反镜。与外调制实验类似,保持受抑全反射光调制器 4 的初始间隙 d_0 小于光波长 λ ,存在初始透过率 T_0 。不加控制信号,调整谐振腔,使激光输出,光电探测器 5 接收,在示波器 6 上显示。再由控制电源 7 发出固定频率的正弦信号加于光调制器 4 上,使透过率 T 在一定范围内变化,输出激光也会发生变化,同样被接收,并在示波器上显示。实验结果如图 7 所示(双灯泵浦电压:(a) 500 V,(b) 图 550 V)。

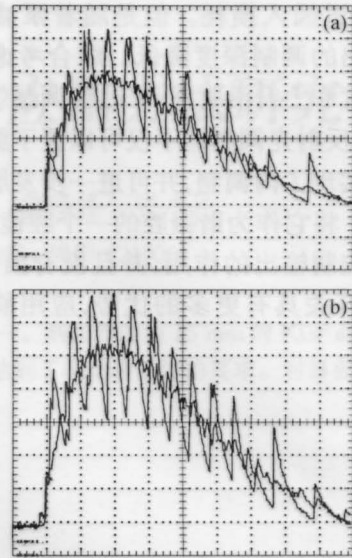


图 7 激光未调制输出与激光调制输出波形图

Fig. 7 Laser output and laser modulating output

实验分析:未加调制时测得的激光输出与一般脉冲激光器的输出相同,且输出随着泵浦电压增加而增加。光调制器加上正弦调制信号后,间隙 d 发生变化, d 变大时,透过率变小,输出降低,光能在腔内有积累; d 变小时,透过率变大,积累的光能在短时间内输出,输出峰值功率变高的光脉冲信号。图 8 为另一调制频率情况下,调制激光输出波形与调制正弦波关系图。两者同频同相变化。电压高, d 小,输出功率高。调制光脉冲信号约有 8、9 个,这是因为脉冲激光输出为 $150 \mu\text{s}$ 左右,正弦信号频率约为 60 kHz。

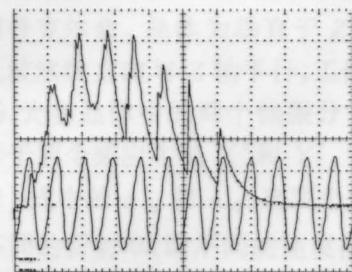


图 8 调制正弦波与调制激光输出波形关系图

Fig. 8 The modulating sine wave and laser output

4 结论与讨论

利用受抑全反射原理设计的光调制器,实现了对连续激光的外调制,并且响应准确、及时。

将受抑全反射光调制器置于脉冲激光器腔内,作为输出镜和控制镜,得到峰值功率增加的脉冲信号,激光输出能量在调制前后几乎未变(从输出波形的面积看出),说明将调制器作为谐振腔的一部分的

结构不会引进插入损耗。但是随着泵浦电压的增加,激光输出的调制深度降低。综合考虑控制电压的频率、幅度和上升沿时间,来改善调制效果。

受抑全反射光调制器不仅可以置于腔外作为调制器,而且实现了内调制,并可进一步发展成为新型调 Q 器件。将它作为谐振腔的一个腔镜,可同时起到调 Q 和控制输出的作用,并且没有插入损耗,比传统的 Q 开关具有更多的优势,应用前景十分广阔。

参 考 文 献

- 1 S. Zhu *et al.*. Frustrated total internal reflection: A demonstration and review. *Am. J. Phys.*, 1986, **54**(7): 601~607
- 2 M. Born. *Principles of Optics*. Beijing: Science Press, 1978 (in Chinese)
- 3 Zhang Zhenxi. The theoretical research of FTIR Q-switch. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1984, **4**(5): 450~455 (in Chinese)

图 1 所示为受抑全反射光调制器结构示意图。图中展示了两个介质层之间的光耦合现象。当泵浦电压施加在两个介质层之间时，会产生受抑全反射现象，从而实现对光信号的调制。该装置结构简单，易于集成到激光腔中。

图 2 展示了该调制器在不同电压下的输出光强特性。随着泵浦电压的增加，输出光强的调制深度逐渐减小。这主要是由于随着电压的增加，两个介质层之间的耦合增强，导致更多的光信号通过，从而降低了调制深度。

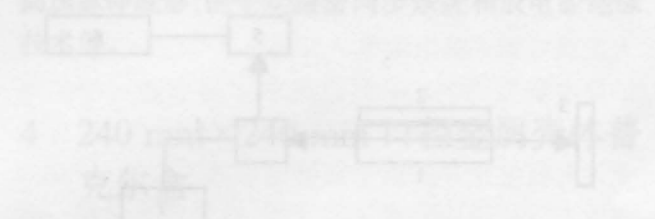


图 4 展示了 240 mm 激光腔的示意图。该腔体由两个反射镜和中间的增益介质组成。腔体长度为 240 mm，设计用于实现稳定的激光振荡。腔体内部的光路清晰可见，展示了激光在腔内的传播和反射过程。