

# 双重干涉效应薄膜光学热光调制器的研究

郑 兵 陈 铮

(电子科技大学光电子技术系, 成都 610054)

**摘 要** 对双重干涉效应反射式薄膜光学热光调制器进行了研究, 基于双重干涉效应的分析方法, 就相关参数对器件调制特性的影响进行了理论分析, 并在实验上进行了有关测试, 实际器件获得了高达 92% 的调制深度。

**关键词** 薄膜光学, 光调制器, 双重干涉效应.

## 1 引 言

反射式薄膜光学调制器(无论是单元器件还是调制器列阵)在光存储、空间光调制以及光计算等领域均具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。这类器件从结构上主要分为量子阱器件<sup>[2,3]</sup>和非量子阱器件<sup>[4]</sup>。非量子阱结构使得器件构造简化, 而且具有优良的调制性能。然而, 当前人们广泛研究了半导体电致吸收效应在反射式薄膜非量子阱调制器中的作用, 而忽略了薄膜-衬底体系的相互作用对调制特性的影响<sup>[4]</sup>, 本文基于作者提出的双重干涉效应的分析方法, 着重讨论薄膜-衬底体系对反射光的调制作用。从理论上分析了相关参数对调制特性的影响, 并进行了相应的实验研究, 获得了性能优良的反射式热光调制器件。事实上, 有关分析与实验结果同样适用于采用其它方式改变相位的基于双重干涉效应的反射式薄膜光学调制器。

## 2 理论分析

双重干涉效应反射式调制器如图 1 所示。据相关理论分析, 在近垂直入射下, 能量反射率  $R$  由下述公式给出<sup>[5]</sup>

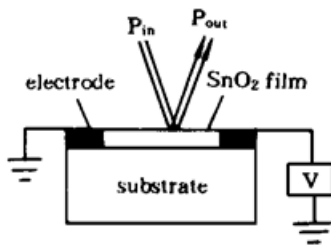


Fig. 1 Scheme of the device

其中

$$\left. \begin{aligned} R &= R_0 + R_m \cos(\delta_s + \delta) \\ R_0 &= \frac{R_s^2 + R_0^2 + 2R_f \cos \delta_f}{1 + 2R_f \cos \delta_f + R_f^2} \\ R_m &= \frac{2R_s(R_0^2 + 2R_f \cos \delta_f)^{1/2}}{1 + 2R_f \cos \delta_f + R_f^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} R_s &= r_{sa}(1 + r_{fa}r_{af})(1 + r_{fs}r_{sf}); & R_f &= r_{af}r_{fs} \\ R_0^2 &= r_{af}^2 + r_{fs}^2; & \delta &= \arcsin \frac{r_{af} \sin \delta_f}{(R_0^2 + 2R_f \cos \delta_f)^{1/2}} \\ \delta_f &= \frac{2\pi}{\lambda} 2n_f d; & \delta_s &= \frac{2\pi}{\lambda} 2n_s D \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

上述公式中  $n_f$ ,  $n_s$  分别为薄膜的折射率与衬底折射率,  $d$ ,  $D$  分别为膜厚与衬底厚度,  $r_{af}$ ,  $r_{fs}$ ,  $r_{sa}$  分别为在空气与薄膜, 薄膜与衬底以及衬底与空气界面的反射函数。

由(1)式可见, 体系的总反射项是由固定反射项  $R_0$  和调制反射项  $R_m$  构成, 通过改变衬底所提供的光程/相位, 即可实现反射调制。为评价器件的调制性能, 定义反射调制深度  $\eta$

$$\eta = \frac{I_{r\max} - I_{r\min}}{I_{r\max} + I_{r\min}} \quad (3)$$

因此, 在不考虑损耗的情况下, 器件的反射调制深度  $\eta$  可表述为

$$\eta = \left| \frac{2R_s(R_0^2 + 2R_f \cos \delta_f)^{1/2}}{R_s^2 + (R_0^2 + 2R_f \cos \delta_f)} \right| \quad (4)$$

由上式可见, 1) 薄膜的光学厚度(反映在薄膜提供的相位  $\delta_f$  中)对器件的调制具有直接的影响。据极值条件, 欲使调制度  $\eta$  取极值, 则  $\delta_f$  应满足:  $\sin \delta_f = 0$ , 即  $\delta_f = m\pi$ ,  $m = 1, 2, 3 \dots$ 。当  $m$  为奇数时, 薄膜的光学厚度为  $\lambda/4$  的奇数倍, 获得最大调制, 与此对应的能量反射率  $R_{\lambda/4}$  由下式给出

$$\left. \begin{aligned} R_{\lambda/4} &= \frac{R_s^2 + (r_{af} - r_{fs})^2}{(1 - R_f)^2} (1 + \eta \cos \delta_s) \\ \eta &= \frac{2R_s(r_{af} - r_{fs})}{R_s^2 + (r_{af} - r_{fs})^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

当  $m$  为偶数时, 薄膜的光学厚度为  $\lambda/2$  的整数倍,  $\eta$  取极小值, 获得低调制特性。

2) 为获得优良的调制特性, 参数  $R_s$  应满足

$$R_s = (R_0^2 + 2R_f \cos \delta_f)^{1/2} \quad (6a)$$

与此对应, 反射系数  $r_{sa}$  的取值为:

$$r_{sa} = \frac{(R_0^2 + 2R_f \cos \delta_f)^{1/2}}{(1 - r_{fa})(1 - r_{fs})} \quad (6b)$$

从上述分析可见, 虽然人们早已知道在光源相干长度足够长的情况下, 衬底与薄膜构成的体系中必然存在干涉过程, 衬底作为分层媒质的一部分, 对干涉作出相应的贡献。然而, 人们却只将这一干涉作为必然结果看待, 而未曾考虑到利用衬底的光程变化来实现光调制。事实上, 由于衬底的光程变化通过电光, 热光等手段是易于实现的, 因而, 通过对衬底的光程控制来实现对反射光的强度调制是非常有效且很简便的。本文中, 作者利用热光效应来改变衬底的光程, 此时, 衬底提供的相位  $\delta_s$  与衬底的温度变化量  $\Delta T$  之间有关系

$$\delta_s(\Delta T) = \delta_{s0} + \delta_{s0}[(\alpha/n_s) + \beta] \Delta T \quad (7)$$

$\alpha$ ,  $\beta$  分别为衬底材料的折射率温度系数和线膨胀系数,  $\delta_{s0}$  为衬底在初始温度下的相移。从上述讨论可见, 通过适当选择薄膜的光学厚度和衬底空气界面的反射系数, 就能获得性能优良的反射式薄膜光学调制器。

### 3 实验及结果

实验上采用化学汽相沉积(CVD)法,在3mm钠玻璃衬底上制备不同厚度的SnO<sub>2</sub>薄膜,

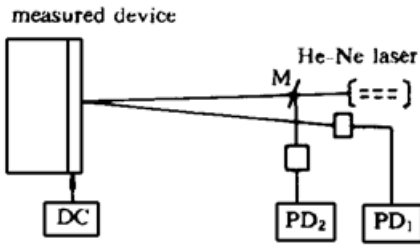


Fig. 2 Measuring arrangement

在近垂直入射下进行有关测试。测试装置如图2所示。其中所用光源为632.8nm的He-Ne激光器, M为分束镜, PD<sub>1</sub>和PD<sub>2</sub>为两台光功率计。同时,对同一器件,通过在衬底背面涂敷和蒸镀不同折射率的介质以及不同厚度的铝层来获得不同的衬底界面反射系数,并对相应反射系数下的调制深度进行了测试,所得结果如图5所示。在实验中,为避免所涂敷(蒸镀)的介质与空气界

面的反射,在界面上涂上黑膏(black wax)。

### 4 讨论及结论

从图3所示的加热功率与光能量反射率关系曲线可见,基于双重干涉效应的反射式热光调制器具有优良的调制能力。通过对衬底进行热调制,器件的最大能量反射率约为13.5%,最小能量反射率约为0.53%,获得了高达25:1(约为92%)的调制深度。与理论预计的最大能量反射率15%,最小能量反射率0.1%和调制深度99%基本吻合。二者之间的微小差异主要来自有关参数的偏差以及SnO<sub>2</sub>多晶薄膜的缺陷。进一步分析上述结果发现,在低折射率衬底上的λ/4高折射率薄膜,并非总是增反作用。对具有一定相干性的相干光,通过衬底与薄膜之间的双重干涉,仍然可获得良好的增透性。

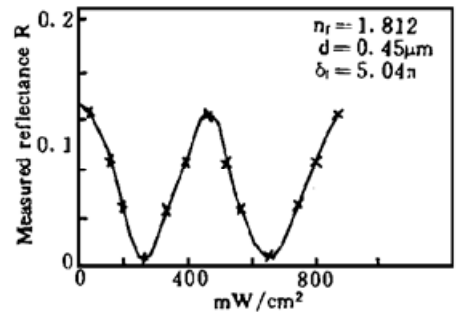


Fig. 3 Measured optical power reflectance  $R$  via heating power per square centimeter

图4为同种衬底上不同膜厚时的调制特性的测试结果。它表明薄膜的光学厚度对器件的调制能力具有决定性的作用。

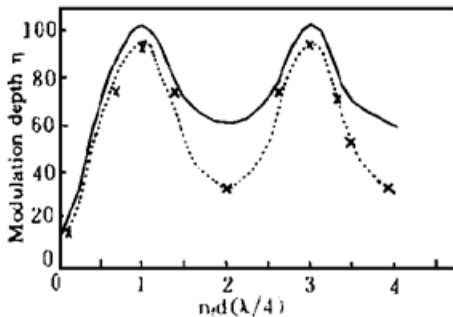


Fig. 4 Modulation depth  $\eta$  via optical thickness  $n_f d$  of the film in term of  $\lambda/4$ , solid line-theoretical curve, dash line-measured curve

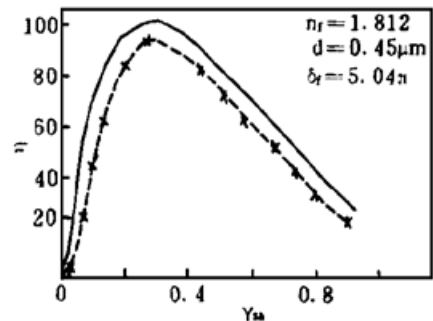


Fig. 5 Modulation depth  $\eta$  via the back reflecting coefficient  $\gamma_{sa}$  of the substrate, solid line-theoretical curve, dash line-measured curve

图5为不同衬底界面反射系数下的调制能力曲线。可见当衬底界面的反射系数为某特定值时,器件呈现最佳调制特性,获得最大调制深度。偏离该特定值将导致器件调制性能的退化,甚至无调制能力。所以衬底反射对器件的调制性能亦具有决定性的作用。

综上所述, 通过使薄膜的光学厚度为  $\lambda/4$  以及恰当选择衬底界面的反射, 使反射式薄膜光学热光调制器获得了优良的调制性能。上述结论不仅适用于本文所讨论的情况, 对于应用其它方式改变相位进行调制的反射式薄膜光学调制器也将提供有益的参考。

### 参 考 文 献

- [1] Thomas V. Higgins, Optical storage light the multimedia future. *Laser Focus World*, 1995, **31**(9) : 103~ 111
- [2] Badrit N. Gomatam, Neaig Anderson, Electroabsorption enhancement in tensile strained quantum well via absorption edge merging. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **QE-28**(6) : 1496~ 1507
- [3] Bridget R. Max, Research consortium tries to go commercial. *Laser Focus World*, 1995, **31**(6) : 19~ 24
- [4] Badrit N. Gomatam, Lawrence H. Domash, Hybrid optoelectronic modulators function without quantum well. *Laser Focus World*, 1995, **31**(6) : 83~ 86
- [5] 郑兵, 陈铮, 单层光学薄膜中薄膜——衬底体系的双重干涉效应及其应用。光学学报, 1996, **16**(11) : 1607~ 1611

## Thermo-Controlled Thin-Film Optical Modulator Based on Dual Interference Effect

Zheng Bing      Chen Zheng

(Department of Opto-Electronic Technology, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054)

(Received 25 January 1996; revised 17 August 1996)

**Abstract** Thermo-controlled thin film optical modulator operating on reflecting mode is studied based on dual interference effect. The relationship between the modulation depth and the device's parameters has been analysed theoretically based on dual interference effect and tested experimentally. The modulation depth high as 92% is measured.

**Key words** dual interference effect, thin film optics, optical modulator.