

单层光学薄膜中薄膜-衬底体系的双重干涉效应及其应用

郑 兵 陈 铮

(电子科技大学, 光电子技术系, 成都 610054)

摘 要 提出了单层光学薄膜中薄膜与衬底反射光之间的双重干涉效应的理论, 实验结果证实了理论分析的正确性。双重干涉效应使薄膜-衬底体系的热致反射调制度高达 80%, 这一效应可望有极广泛的应用。

关键词 单层膜-衬底体系, 双重干涉效应。

1 引 言

在有关单层膜系性质的研究中^[1,2], 人们主要关注薄膜的作用, 而从未注意到薄膜-衬底体系的相互作用。在有关性质的相干检测之中, 由于所用光源是具有一定相干长度的相干光(如 He-Ne 激光等), 因而, 不仅薄膜中存在干涉, 作为一个体系, 衬底反射光与薄膜反射光之间存在强烈的双重干涉效应。本文提出了对于单层膜系, 薄膜与衬底之间的双重干涉概念, 从理论上导出了相应的数学表达式, 实验与测试结果证明了理论分析的正确性。因此, 在有关的应用与研究工作中, 忽视单层膜系的薄膜-衬底体系的相互作用, 有时将导致对测试结果的片面理解, 得出不完善的结论。同时, 这一物理现象可望在材料研究和光强度调制领域获得广泛的应用。

2 理论分析

如图 1 所示的单层膜系, 薄膜折射率为 n_f , 厚度为 d , 衬底折射率为 n_s , 厚度为 D , 空气介质折射率为 n_a , 在各分界面, 相应的振幅反射和透射系数由菲涅耳公式给出^[3], 入射光在薄膜内形成多次反射并经薄膜-空气界面出射, 相邻光程差为 δ_f 。同时, 薄膜-衬底界面的各透射光作为二次光源, 经衬底-空气界面反射后经薄膜-空气界面出射, 相邻光程差仍为 δ_f , 但相对于薄膜反射光, 有一由衬底提供的附加相移 δ_s , 在近垂直入射下:

$$\delta_f = (2\pi/\lambda) 2n_f d, \quad \delta_s = (2\pi/\lambda) 2n_s D \quad (1)$$

对于单位振幅入射光, 在不考虑薄膜及衬底对光的吸收的情况下, 薄膜-衬底体系的总反射为薄膜反射 r_f 与衬底反射 r_s 的迭加:

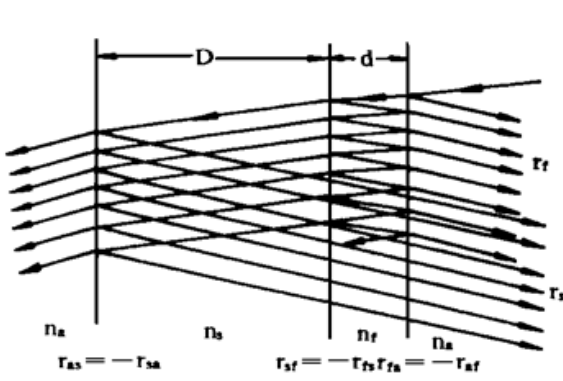


Fig. 1 Schem for theoretical analysis

$$r = r_f + r_s \tag{2}$$

考虑到所用光源的有限相干长度及厚达几毫米的衬底，在下述推导中只考虑二次光源在衬底-空气界面的一次反射即可。此时 r_f 和 r_s 分别由下述公式表示：

$$\left. \begin{aligned} r_f &= r_{af} + \frac{t_{af}t_{fa}r_{fs}\exp(-i\delta_f)}{1 - r_{fa}r_{fs}\exp(-i\delta_f)} \\ r_s &= \frac{t_{af}t_{fs}r_{sa}t_{sf}t_{fa}\exp(-i(\delta_s + \delta_f))}{1 - r_{fa}r_{fs}\exp(-i\delta_f)} \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

由(2)式和(3)式，得到薄膜-衬底体系的总振幅反射系数 r 以及总能量反射率 R 为：

$$r = \frac{r_{af} + r_{fs}\exp(-i\delta_f) + r_{sa}(1 + r_{fa}r_{af})(1 + r_{fs}r_{sf})\exp[-i(\delta_s + \delta_f)]}{1 + r_{af}r_{fs}\exp(-i\delta_f)} \tag{4}$$

$$R = \frac{R_{\theta}^2 + R_s^2 + 2R_f \cos \delta_f + 2R_s[R_{\theta}^2 + 2R_f \cos(\delta_f)]^{1/2} \cos(\delta_s + \delta)}{1 + R_f^2 + 2R_f \cos(\delta_f)} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} R_{\theta}^2 &= r_{af}^2 + r_{fs}^2, & R_f &= r_{af}r_{fs}, & R_s &= r_{sa}(1 + r_{fa}r_{af})(1 + r_{fs}r_{sf}) \\ \delta &= \arcsin \{r_{af} \sin \delta_f / [R_{\theta}^2 + 2R_f \cos(\delta_f)]^{1/2}\}. \end{aligned}$$

分析(5)式可见，此时薄膜-衬底体系的总反射即为由薄膜提供固定相位差的多光束干涉与衬底提供相移 δ_s 的多光束反射光之间的双重干涉。由于衬底厚度 D 一般较薄膜厚度 d 大 2~3 个数量级，当对薄膜-衬底体系施加影响(如温度对玻璃衬底的影响)，使衬底附加相移 δ_s 改变，则从(5)式可清晰看出，反射光将出现强度调制，此时，薄膜中的多次反射等效于提供“载波”，而由衬底提供“调制信号”，因此，反射光强度将随 δ_s 的改变而出现周期性变化。

$$\Delta(\delta_s) = m\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \tag{6}$$

对于热效应，若衬底材料的热光系数为 α ，线膨胀系数为 β ，则有：

$$(\alpha + n_s\beta)D\Delta T = m\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \tag{7}$$

其中 ΔT 为温度的变化范围。为评价薄膜-衬底体系的反射调制能力，定义反射调制度为：

$$\eta = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$$

式中 I_{\max} 、 I_{\min} 分别为归一化反射光强的最大值与最小值。

3 实验及其结果

因 SnO_2 薄膜具有较高的折射率、优良的热稳定性和导电能力，实验样品采用在 1~3 mm 厚的平板钠玻璃衬底上高温沉积约 90 nm 厚的 SnO_2 薄膜。实验装置如图 2 所示，其中图 2(a) 为使用热室(heating cell)进行热致反射调制特性测试的装置图，图 2(b) 为利用薄膜自身进行电加热的测试图。实验中所用光源为 632.8 nm 的 He-Ne 激光， T 为半导体数字温度计， D_1 和 D_2 为一对光探测器进行归一化光强测试。在图 2(a) 的测试中，使样品恒温于 200℃ 后缓慢降温，逐点测得对应温度下的归一化反射光强。实验中分别对未沉积 SnO_2 薄膜的同质玻璃衬底、 SnO_2 单层膜样品及背面打毛的样品这三种情况进行了相应的测试。

图 3(a) 为理论预计的归一化反射光强与温度的关系曲线，图 3(b) 给出了衬底厚度为 2 mm 时的实验结果，同时，因 SnO_2 薄膜自身具有电热能力，因而对同一 SnO_2 单层膜样品在其自身电热的情况下进行了热致反射调制特性的测试，所得结果如图 3(c) 所示，此时，衬底

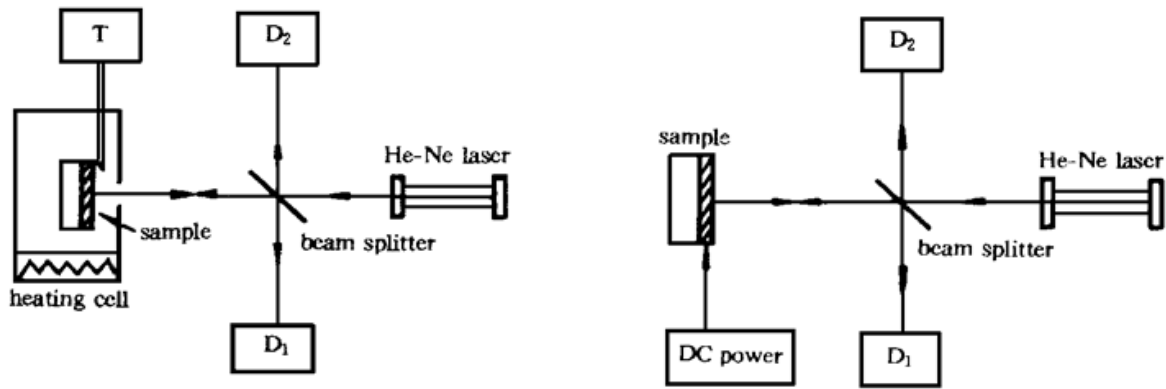


Fig. 2 Experimental arrangements

及薄膜的温度均匀性主要由薄膜电阻率的均匀性决定, 因本实验所作的 SnO₂ 薄膜的电阻率具有良好的均匀性以及光束的有限尺寸, 因而可以认为衬底及薄膜的温度是均匀的。

由图 3(b)、(7) 式以及钠玻璃的线膨胀系数 $\beta \sim 0.69 \times 10^{-5} / C^{[4]}$, 则可求得对应的热光系数为 $\alpha \sim 0.66 \times 10^{-5} / C^{\circ}$ 。

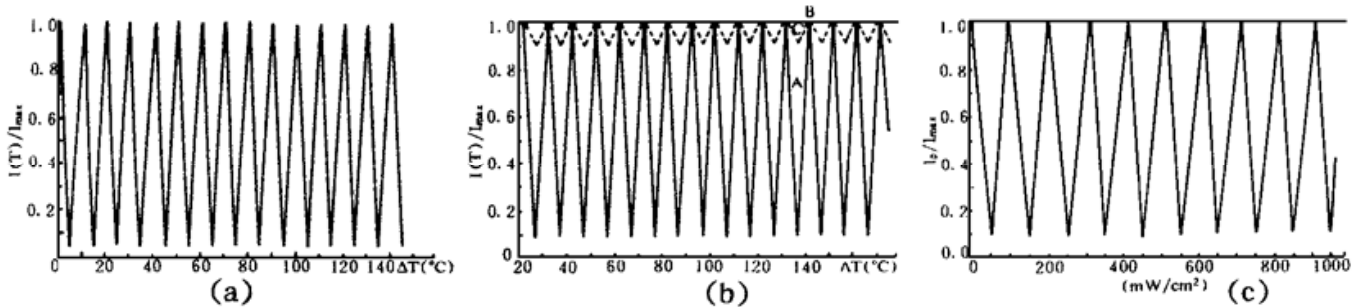


Fig. 3 (a) Theoretical curve for normalized reflecting light intensity $I(T)/I_{max}$ vs temperature T ; (b) Measured normalized reflecting light intensity $I(T)/I_{max}$ vs temperature TA : film-substrate sample; B: back ground sample; C: substrate; (c) measured normalized reflecting light intensity $I(P)/I_{max}$ vs heating power P

4 讨论及展望

对于纯衬底的情况(图3(b)曲线 C), 由于衬底有一定的厚度和光源相干长度的限制, 以及衬底在平行度和平整度方面难以满足形成光学标准具的严格要求, 因而难以形成多光束干涉, 使得其虽然有部分热致反射调制现象存在, 但不能形成强烈的效应。

对于背面打毛的样品, 所得结果如图3(b)曲线 B 所示, 此时衬底-空气界面的菲涅耳反射系数为零, (5) 式简化为:

$$R = \frac{R_0^2 + 2R_f \cos \delta_f}{1 + R_f^2 + 2R_f \cos \delta_f} \quad \eta = 0 \tag{8}$$

在测量的温度范围内, 没有观察到明显的有规律的热致反射调制特性, 充分说明了在双重干涉效应中, 衬底-空气界面所起的重要作用。

对于薄膜-衬底体系, 当膜厚约 90 nm 时, 对于 632.8 nm 波长, $\delta_f \sim \pi$, 此时, (5) 式可进一步简化成下述形式:

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{R_{\theta}^2 + R_s^2 - 2R_f + 2R_s(R_{\theta}^2 - 2R_f)^{1/2} \cos \delta_s}{(1 - R_f)^2} \\ \eta &= \frac{2R_s(r_{fs} - r_{of})}{R_{\theta}^2 + R_s^2 - 2R_f} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

体系呈现出强烈的热致反射调制特性,与图3(b)中所得曲线 A 一致。

对于所用材料, $n_s = 1.512$, $n_f = 1.812$, 可求得调制度的理论值约为 $\eta \sim 99\%$, 从图3(b)得实测值为 $\eta \sim 80\%$ 。反射调制度的理论预计值与实测值之间的差异主要来源于下述原因, 首先, 在理论上导出相关公式的过程中, 对有关因素如衬底的平行度与平整度、光束质量以及薄膜质量等均作理想化考虑, 而实际情况与理想情况之间有差别; 其次, 实验中薄膜厚度与实现 π 相移的要求也存在一定的差距。所有这些原因都对实测结果有不利影响, 尽管如此, 体系仍然表现出了强烈的调制效应。

从上述结果及讨论可见, 无论是纯衬底还是纯薄膜, 都不能产生强烈的热致反射调制, 只有两者结合形成薄膜-衬底体系的双重干涉效应才能导致强烈的热致反射调制特性。这一结果说明在双重干涉中薄膜和衬底具有同等重要的地位。

由于双重干涉效应极大地提高了信号幅度(信噪比), 且其调制周期宽度由衬底材料的有关参数决定, 因此, 该效应可用于对材料的相关参数(如热光系数)的测量。众所周知, 在集成光学中, 特别是在各种形式的热光开关和调制器中, 热光效应获得了广泛的应用^[5-7]。因此, 方便、准确地测量光学材料的热光系数是极为重要的。由(7)式, 若知道了材料的线膨胀系数, 则仅需测得在温度范围 ΔT 内反射光强度变化的周期数, 就可容易地获得材料的热光系数, 而无需从对光强度绝对值或光束偏转角精确测量来导出热光系数。由(7)式, 测量的绝对误差 Δ 为:

$$\Delta \leq \frac{\lambda |m|}{2D \Delta T} + \frac{m\lambda}{2} \left[\frac{|\Delta D|}{D^2 \Delta T} + \frac{|\Delta(\Delta T)|}{D(\Delta T)^2} \right] \quad (10)$$

因周期数 m 的计数误差 $\Delta m = 0$, 衬底厚度 D 的绝对误差 $\Delta D \leq 5 \mu\text{m}$ (螺旋测微计), 而数字式半导体温度计的测量误差 $\Delta(\Delta T) \leq 1^\circ\text{C}$, 则对热光系数 α 的绝对测量误差 $\Delta \leq 1.2 \times 10^{-7} / \text{C}^\circ$ 。

在前述理论分析导出衬底反射 r_s 的表达式时, 由于光源有限的相干长度只考虑二次光源在衬底-空气界面的一次反射。对于光源有较长的相干长度的情况, 若需考虑二次光源在衬底-空气界面的多次反射, 则只需将(3)式的 r_s 改写成下式即可:

$$r_s' = \frac{r_s}{1 + r_{sf} r_{as} \exp(-i\delta_s)} \quad (11)$$

不难看出, 此时体系仍表现出强烈的双重干涉效应。

综上所述, 本文从理论上分析并从实验上证实了单层膜系的薄膜-衬底体系的双重干涉效应。通过对有关参数的优化, 可望获得更为优良的调制特性。这一效应可用于材料科学基本参数(如热光系数、电光系数等)的测试, 并可望在光强度调制领域获得应用。

参 考 文 献

- [1] 彭栋梁, 蒋生蕊, 透明导电 Cd_2SnO_4 薄膜的光学性质研究. 光学学报, 1993, 13(4) ·375~ 378
- [2] 胡文涛, 范正修, 刘应用, 利用光热偏转技术实施光学薄膜弱吸收的多波长测量. 光学学报, 1993, 13(4) ·475~ 477

- [3] Max Born, Emil Wolf 著, 杨霞荪等译校。光学原理, 北京科学出版社, 1978·61~ 64
- [4] 光学仪器材料手册编写组, 光学仪器材料手册, 北京, 测绘出版社, 1988·895~ 902
- [5] 西原 浩, 春名正光, 栖原敏明, 光集积回路。东京, 日本, オーム社, 1984·130~ 133
- [6] Bing Zheng, Zheng Chen, Study of a thermo-controlled wave division multiuse technique based on two-mode coupling mechanism. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(3)·514~ 516
- [7] Robert Bozeat, Armando Loni, Silicon-based waveguides offer low-cost manufacturing. *Laser Focus World*, 1995, **31**(4)·97~ 102

Dual Interference Effects from a Single Layer Film-Substrate System and Their Applications

Zheng Bing Chen Zheng

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

(Received 27 May 1995; revised 19 September 1995)

Abstract The theory of dual interference effects (DIFE) from a single-layer film and a substrate is proposed in this paper, the related mathematical expressions are obtained. The experimental results have shown that our theoretical analysis is correct. As the result of DIFE, the thermo-induced light intensity reflecting modulation depth is as high as 80%. The effects are expected to have widely potential applications.

Key words single layer film-substrate system, dual interference effects.

【 编者的话 】

近来发现个别作者有一稿多投现象, 这将有损于我刊及有关刊物的信誉。也涉及到“知识产权”事宜。本刊公告昭示:

1. Hang Liu, Jiangquan Yao, Ashok Puri, Second and third harmonic generation in BBO by femto-second Ti:sapphire laser pulses. *Opt. Commun.*, 1994, **109**(2)·139~ 144
Yao Jianquan, Liu Hang, Ashok Pari, Femtosecond pulse-second and third harmonic generation with BBO. *Acta Optica Sinica*, (光学学报), 1995, **15**(6)·641~ 647
2. 杨怀江, 沈柯, 翁兆恒, 周立伟, 混沌光学系统之前向神经网络混沌加速的系统辨识研究。光学学报, 1996, **16**(5)·651~ 656
杨怀江, 沈柯, 翁兆恒, 周立伟, 混沌光学系统的前向神经网络系统辨识研究。中国激光, 1996, **A23**(6)·548~ 554