

文章编号: 1006-4303(2003)06-0666-04

增透膜的选择

黄 琳

(浙江工业大学 理学院, 浙江 杭州 310032)

摘要: 在光学器件中, 由于器件(如透镜、棱镜)表面的反射作用而使光能损失, 为了减少光学器件表面的反射损失, 常在器件表面镀上一层透明介质薄膜(称为增透膜), 增透膜的效果与介质薄膜的折射率、厚度等相联系。本文以光波的电磁理论为基础, 讨论了光波入射介质薄膜的反射, 推导出了反射率公式, 并进行了讨论。结果表明: 当介质薄膜的厚度 $d = \frac{\lambda_0}{4n_2}$

$(2k+1)$ 时, 反射率有最小值 $R_{\min} = \left(\frac{n_1 n_3 - n_2^2}{n_1 n_3 + n_2^2} \right)^2$ ($k = 0, 1, 2, \dots, n_1, n_2, n_3$ 分别为空气、介质薄

膜、光学透镜的折射率, λ_0 为光波在真空中的波长), 而当介质薄膜的折射率 $n_2 = \sqrt{n_1 n_3}$ 时, 反射率 $R = 0$, 基本上无反射。

关键词: 反射; 介质薄膜; 反射率

中图分类号: TM 277. 1

文献标识码: A

Choosing of film of increasing transmission

HUANG Lin

(College of Sciences, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: The light energy will be lost due to the reflection of the lens's surface in optical devices. A layer of medium film is plated on the surface of such devices (called film of increasing transmission or FIT) in order to reduce the loss of surface reflection. The effect of FIT is relative to the refracting power and the thickness of the medium film. Based on the electromagnetic theory of light waves, the reflection of light waves entering the medium film is discussed, and the reflectivity is deduced and discussed. The result shows the reflectivity is min $R_{\min} = \left(\frac{n_1 n_3 - n_2^2}{n_1 n_3 + n_2^2} \right)^2$ while the thickness of medium film $d = \frac{\lambda_0}{4n_2} (2k+1)$ ($k = 0, 1, 2, \dots, n_1, n_2, n_3$ are the refracting power of air, medium film and optical lens, λ_0 is the vacuum wavelength). The reflectivity $R = 0$ while the refracting power of medium film $n_2 = \sqrt{n_1 n_3}$, there is no reflection nearly.

Key words: reflection; medium film; reflectivity

收稿日期: 2003-03-10; 修订日期: 2003-09-10

作者简介: 黄琳(1963-), 女, 江西丰城人, 副教授, 理学硕士, 主要从事磁性材料研究。

0 引言

在光学器件中,由于透镜表面的反射作用而使光能损失,对于一个由六个透镜组成的光学系统,光能的反射损失约占一半左右,现代的一些复杂光学系统,光能的损失更为严重。此外,光在透镜表面上的反射还会造成杂散光,严重影响光学系统的成像质量。

为了减少光学元件(如透镜、棱镜等)表面上光的反射损失,通常在元件表面镀上一层透明介质薄膜(称为增透膜),增透膜的效果与介质薄膜的折射率、厚度等密切相关,本文以光波的电磁理论为基础,对光波入射介质薄膜的反射进行了讨论。

1 薄膜干涉

光波入射介质薄膜,反射光的讨论一般采用多光束干涉的方法。设光波垂直入射介质薄膜,介质薄膜的上表面(界面 I)处发生反射、透射,反射光设为①,透射光在介质薄膜的下表面处(界面 II)又发生反射、透射,反射光设为②,设薄膜厚度为 d , n_1 、 n_2 、 n_3 分别是空气、介质薄膜和玻璃透镜的折射率,且满足 $n_1 < n_2 < n_3$ (如图 1 所示)。光波①、②是相干的,在介质薄膜的上表面附近相遇产生干涉效应,两束光在界面上的光程差为 $\Delta = 2n_2d$,当 $d = \frac{(2k+1)\lambda_0}{4n_2}$ 时,即 $\Delta = (2k+1)\frac{\lambda_0}{2}$ 时,两束光干涉相消。

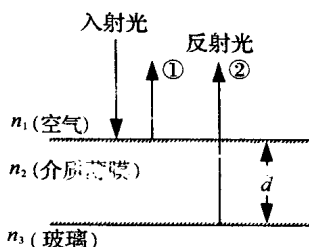


图1 薄膜干涉

设入射光的电场强度为 E_0 , 两束反射光强度分别为 $E^{(1)}$ 和 $E^{(2)}$; 则有^[1]:

$$E^{(1)} = - \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} E_0$$

$$E^{(2)} = - \frac{2n_1}{n_1 + n_2} \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} \frac{2n_2}{n_1 + n_2} E_0$$

由于以上只考虑了两束反射光的干涉作用,而没有考虑光波在薄膜内经过多次反射而最后从介质上表面(界面 I) 折射出来的其它光束。两束光的强度不同,干涉相消,只能使反射光减弱,并不能使反射光强度为零,更深入、更严格的讨论,必须借助光波的电磁理论。

2 光波在介质表面的反射

设光波入射介质表面,入射角 θ , 反射角 θ' , 折射角 θ'' (图 2) 由菲涅耳公式可以得到光波在介质表面的反射率为

$$R_s = \frac{\sin^2(\theta - \theta'')}{\sin^2(\theta + \theta'')} (E \perp \text{入射面})$$

$$R_p = \frac{\tan^2(\theta - \theta'')}{\tan^2(\theta + \theta'')} (E \parallel \text{入射面})$$

当入射角 $\theta \rightarrow 0$ 时 $\frac{\theta}{\theta''} = \frac{n_2}{n_1}$

$$\therefore \text{反射率} \quad R = R_s \approx R_p = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (1)$$

当光波由空气垂直射向玻璃表面,若取 $n_1 = 1$, 当 $n_2 = 1.5$, 反射率 $R = 0.04 = 4\%$

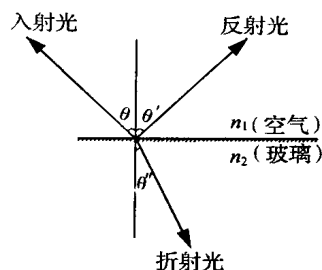


图2 光波在介质表面的反射

3 光波在介质薄膜上的反射

设光波垂直入射介质薄膜, 设 $n_1 < n_2 < n_3$, 建立坐标, 如图 3 所示。

三种介质中电场、磁场强度分别为:

介质 1 中, $E_1 = E_1^+ + E_1^- = E_{10}^+ e^{i(k_1 z - \omega t)} + E_{10}^- e^{i(-k_1 z - \omega t)}$,

$$H_1 = \frac{1}{\mu_1 \omega} K_1 \times E_1$$

介质 2 中, $E_2 = E_2^+ + E_2^- = E_{20}^+ e^{i(k_2 z - \omega t)} + E_{20}^- e^{i(-k_2 z - \omega t)}$,

$$H_2 = \frac{1}{\mu_2 \omega} K_2 \times E_2$$

介质 3 中, $E_3 = E_{30}^+ e^{i(k_3 z - \omega t)}$, $H_3 = \frac{1}{\mu_3 \omega} K_3 \times E_3$

其中 $k_i = \omega \sqrt{\epsilon_i \mu_i} = \frac{\omega}{c} n_i$ $\mu_1 \approx \mu_2 \approx \mu_3 \approx \mu_0$

$Z = 0$ 处, 边值关系: E 和 H 的切向分量连续

$$E_{10}^+ + E_{10}^- = E_{20}^+ + E_{20}^-$$

$$n_1(E_{10}^+ - E_{10}^-) = n_2(E_{20}^+ - E_{20}^-)$$

$Z = d$ 处, 边值关系: E 和 H 的切向分量连续

$$E_{20}^+ e^{ik_2 d} + E_{20}^- e^{-ik_2 d} = E_{30} e^{ik_3 d}$$

$$n_2(E_{20}^+ e^{ik_2 d} - E_{20}^- e^{-ik_2 d}) = n_3 E_{30} e^{ik_3 d}$$

由上述方程解得

$$E_1^- = \frac{(n_1 - n_2)(n_2 + n_3) + (n_2 - n_3)(n_1 + n_2)e^{2ik_2 d}}{(n_1 + n_2)(n_2 + n_3) + (n_1 - n_2)(n_2 - n_3)e^{2ik_2 d}} E_1^+$$

$$\text{反射率 } R = \left| \frac{E_1^-}{E_1^+} \right|^2 = \frac{(n_1^2 + n_2^2)(n_2^2 + n_3^2) - 4n_1 n_2 n_3 + (n_1^2 - n_2^2)(n_2^2 - n_3^2) \cos \frac{4\pi}{\lambda_0} \cdot n_2 d}{(n_1^2 + n_2^2)(n_2^2 + n_3^2) + 4n_1 n_2 n_3 + (n_1^2 - n_2^2)(n_2^2 - n_3^2) \cos \frac{4\pi}{\lambda_0} \cdot n_2 d}$$

下面求 R 的最小值

$$\text{令 } \frac{\partial R}{\partial d} = 0, \frac{\partial^2 R}{\partial d^2} > 0$$

当 $d = \frac{\lambda_0}{4n_2} (2k + 1)$ $k = 0, 1, 2 \cdots$ 时, 反射率 R 取极小值

$$R_{\min} = \left(\frac{n_1 n_3 - n_2^2}{n_1 n_3 + n_2^2} \right)^2 \quad (2)$$

前边已指出, 光波从空气($n_1 = 1$)射向玻璃($n_3 = 1.5$)时, 有 4% 的光能被反射掉, 若在玻璃上镀上一层厚度为 $d = \frac{\lambda_0}{4n_2} (2k + 1)$ $k = 0, 1, 2 \cdots$ 的透明介质薄膜, 可大大降低光波的反射率。例如在玻璃上镀一层厚度为 $d = \frac{\lambda_0}{4n_2}$ ($k = 0$) 的氟化钙(CaF_2 , $n_2 = 1.23$), 可求出 $R \approx 0$, R 随 n_2 的变化曲线如图 4 所示($n_1 = 1$, $n_3 = 1.5$)。

由(2)式知, 当介质薄膜的折射率 $n_2 = \sqrt{n_1 n_3}$ 时, $R = 0$, 基本上无反射, 因而寻找具有适当折射率的材料是薄膜技术的一个重要任务。

实际应用中, 入射光一般为复色光, 而且玻璃透镜的折射率也是变化的, 因此要根据不同的入

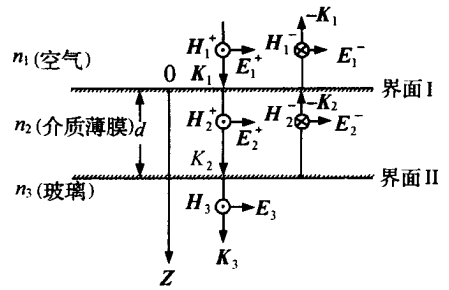


图 3 光波在介质薄膜上的反射

射光波长、不同的玻璃透镜材料选择合适的薄膜材料及其厚度。

4 结 论

在光器件表面镀上一层透明介质薄膜可以减小光能的损失, 当入射光波长一定时, 薄膜的厚度 $d = \frac{\lambda_0}{4n_2} (2k + 1) k = 0, 1, 2, \cdots$ 时, 光波的反射率取极小值 $R_{\min} = \left(\frac{n_1 n_3 - n_2^2}{n_1 n_3 + n_2^2} \right)^2$, 而当介质薄膜的折射率时 $n_2 = \sqrt{n_1 n_3}$, 反射率 $R = 0$, 几乎没有反射。

参考文献:

[1] 张泽瑜, 赵钧 电动力学[M] 北京: 清华大学出版社, 1987.

(责任编辑: 翁爱湘)

(上接第 661 页)

压和修正后的饱和蒸汽压的关系。由图 4 可以看到收集量和蒸汽压差的关系基本成线性关系, 说明膜的传质系数 k 基本不变。

4 结 论

- (1) 通过对膜蒸馏浓缩益母草溶液的实验表明, 益母草的有效成分没有损失, 利用膜蒸馏的方法进行浓缩是可行的。
- (2) 提高实验温度和流速能提高膜能量, 加快浓缩的速度。
- (3) 用纯水同中药料液相比, 通量上没有明显变化, 这说明在膜蒸馏中, 浓差极化不很明显。

参考文献:

[1] Marcel Mulder: 膜技术基本原理[M] 北京: 清华大学出版社, 1990

[2] Tomaszewska M, Gryta M, Morawski A W. Mass transfer of HCL and H2O across the hydrophobic membrane during membrane distillation[J] Journal of Membrane Science, 2000, 166: 149- 157.

[3] Fernández- Pineda C, Izquierdo- Gil M A, García- Payo M C. Gas permeation and direct contact membrane distillation experiments and their analysis using different models[J] Journal of Membrane Science, 2002, 198: 33- 49.

(责任编辑: 翁爱湘)