

薄膜偏振分光镜的研究

孔伟金, 吴福全, 王吉明

(曲阜师范大学 激光研究所, 山东 曲阜 273165)

摘要: 概述薄膜偏振分光镜的研究现状及其主要特点, 重点分析薄膜偏振分光镜的设计原理, 并利用等效折射率的方法计算中心波长的反射率。

关键词: 薄膜偏振分光镜; 消光比; 视场角; 带宽

中图分类号: TH744. 2-34

文献标识码: A

引言

在进行激光调制和激光隔离以及光信息处理时, 需要把普通激光变成偏振光, 这个调制过程就需要起偏器件。普通起偏器件和检偏器件是利用晶体的双折射特性设计而成, 其优点是消光比和透射比高, 适用的光谱范围大。但由于通常使用的冰洲石晶体是一种天然晶体, 透明、无色、纯净的晶体很少, 且不易得到大块, 所以不容易做成大口径晶体起偏镜, 且价格高、加工工艺复杂。薄膜偏振分光镜是基于薄膜内光的干涉作用和布氏角的特点研制而成的。其优点是孔径大, 损耗低, 系统设计灵活。由于传统的薄膜分光镜没有尺寸限制, 同时可以以低成本生产出大尺寸结构, 设计和制作可以多样化, 因此被广泛应用于光学仪器、激光技术、光电显示和光学存储等领域。

1 发展过程及研究现状

最常用的宽带薄膜偏振分光镜是 MacNeille 在 1946 年发明^[1~2], 贝宁(Banning)实际制做的。这种形式的棱镜可以工作在相对宽带的范围, 透射光的消光比较高, 但其视场角比较小。另一种薄膜偏振分光镜是基于透射 P 偏振光, 截止滤光片反射 S 偏振光, 在边界分离 S 光和 P 光的, 可以淀积在平板上或者装在立方棱镜中^[3~4]。这种棱镜的视场角比 MacNeille 偏光镜相对要大, 但其相对较小的带宽不适合应用于激光系统。如果镀层比较多, 透射光的消光比可以很高, 但是反射光很难达到较高的消光比。

Bergstein 提出一种基于受抑全内反射的三层

薄膜偏振分光镜^[5], 然而并未给出相应器件的详细说明。Lees 和 Baumeister 利用受抑全内反射原理设计了薄膜紫外偏光镜, 它是标准的 F-P 带通滤光片形式^[6]。在特定角度和特定波长, 标准具可以满足一种偏振光的分光条件而不满足另一种偏振光, 因此一种偏振光被透射, 另一种偏振光则被反射。这种偏光镜要求有高折射率的基底, 适合于红外光谱, 可工作在较窄的波长范围和较小的视场角。

为了拓宽薄膜偏振分光镜的应用范围和提高应用精度, 出现了大视场角、宽带、高消光比的薄膜偏振分光镜的设计^[7~10]。这些设计都基于 MacNeille 的设计原理。

在我国, 薄膜偏振分光镜的设计和研制比较成熟, 早在 1981 年就有人对该棱镜的制作工艺作出了详细的论述^[11]。尔后, 随着计算机辅助设计软件的出现, 为高性能薄膜偏振分光镜的设计提供了很好的设计方法和优化途径^[12~13]。

2 薄膜偏振分光镜的设计原理

当干涉镀层用于倾斜入射时通常会产生强烈的偏振效应, 在不同折射率材料界面上 S 分量和 P 分量的有效折射率为

$$\eta_s = N \cos \varphi \quad (\text{S 分量})$$

$$\eta_p = N / \cos \varphi \quad (\text{P 分量})$$

棱镜偏振片的基本结构如图 1 所示。其基本原理是: 对于折射率不同的两种材料的交界面, 总可以找到一个入射角, 使其满足布儒斯特角条件, 在此条件下, 激光由棱镜左侧入射后, 在棱镜右侧透射的光

为P分量光,在下侧反射的光为S分量光。只有当光线从一个高折射率介质入射到多层膜上时这个条件才能实现,因此多层膜通常是胶合在玻璃棱镜中间的。玻璃偏振分光棱镜的基本结构是在光学玻璃棱镜上镀制多层介质,形成偏振分光镜,再将两块棱镜的分光面胶合起来,并在通光面上镀制增透膜,以降低光通过棱镜时的反射损耗。

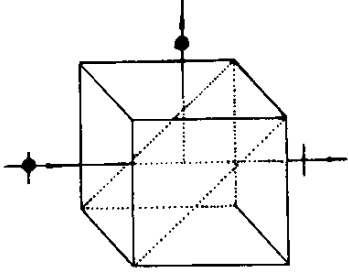


图1 薄膜偏振分光镜结构及光路

Fig. 1 The structure and light-path of thin-film polarizing splitter

2.1 P分量

由菲涅尔原理可知,折射率为 n_H 和 n_L 的两种材料界面上P分量的反射系数为

$$r_{HLP} = \frac{n_H/\cos\varphi_H - n_L/\cos\varphi_L}{n_H/\cos\varphi_H + n_L/\cos\varphi_L} \quad (1)$$

式中 φ_H 和 φ_L 为光在 n_H 和 n_L 薄膜中的折射角。如果令

$$n_H/\cos\varphi_H = n_L/\cos\varphi_L \quad (2)$$

则

$$r_{HLP} = 0 \quad (3)$$

设光在薄膜的入射角为 φ_0 ,棱镜材料的折射率为 n_0 ,则

$$\cos\varphi_H = [1 - (n/n_H)^2 \sin^2\varphi_0]^{1/2} \quad (4)$$

$$\cos\varphi_L = [1 - (n_0/n_L)^2 \sin^2\varphi_0]^{1/2} \quad (5)$$

联合(3)、(4)、(5)式可以得到

$$n_0 \sin\varphi_0 = \frac{n_H n_L}{(n_H^2 + n_L^2)^{1/2}} \quad (6)$$

公式(6)即为薄膜棱镜分光镜的设计原理。从以上公式可以看出有两种设计方案:

- ① 选择入射角为 45° ,对于给定的 n_H 和 n_L ,可求出 n_0 ;
- ② 选择 n_0 ,并给定膜料折射率 n_H 和 n_L ,可求出 φ_0 。

2.2 S分量

垂直方向的振动与各膜层中的光学导纳是不同的,即 $\eta_{LS} \neq \eta_{HS}$ 。由于相临两膜层导纳的跃变,S分量的光存在反射。将膜系设计成 $\lambda/4$ 形式,选择适当的膜厚(S分量的反射率随层数的增加而增加),使S分量的反射光产生相长干涉,在具有适当的层数后,入

射光束的S分量基本上全反射。

3 中心波长的反射率

等效折射率概念是分析膜系和设计膜系的一种有效方法^[14]。对于 $\lambda/4$ 多层膜,可以利用膜系特性矩阵求出其中心波长的反射率。本文利用膜系的特征矩阵分析反射S偏振光分量和透射P偏振光分量的反射率。

设多层膜的层数为 $2n+1$ ($n=0,1,2,3,\dots$),光学厚度为 $\lambda/4$,则膜系的特性矩阵为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & i/\eta_H \\ i\eta_H & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & i/\eta_L \\ i\eta_L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & i/\eta_H \\ i\eta_H & 0 \end{bmatrix} \\ &\dots \begin{bmatrix} 0 & i/\eta_H \\ i\eta_H & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_g \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & i^{2n+1} \eta_L^n / \eta_H^n \\ i^{2n+1} \eta_L^n / \eta_H^n & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_g \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} i^{2n+1} \eta_L^n \eta_g / \eta_H^n \\ i^{2n+1} \eta_L^n / \eta_H^n \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

膜系的等效折射率为

$$Y = \frac{C}{B} = \frac{\eta_H^{2n+2}}{\eta_L^n \eta_g} \quad (8)$$

膜系的反射率为

$$R = \left(\frac{n_g - Y}{n_g + Y} \right)^2 = \left(\frac{\eta_g - \eta_H^{2n+2} / \eta_L^n \eta_g^{2n}}{\eta_g + \eta_H^{2n+2} / \eta_L^n \eta_g^{2n}} \right)^2 \quad (9)$$

当光线倾斜入射时,膜料的折射率用修正导纳表示,即

$$\begin{cases} \eta_g = n_g \cos\varphi_g \\ \eta_H = n_H \cos\varphi_H \text{ (S偏振光)} \\ \eta_L = n_L \cos\varphi_L \end{cases} \quad \begin{cases} \eta_g = n_g / \cos\varphi_g \\ \eta_g = n_g / \cos\varphi_g \text{ (P偏振光)} \\ \eta_g = n_g / \cos\varphi_g \end{cases} \quad (10)$$

对于P偏振光,根据公式(8)和(9)可得

$$R_P = \left[\frac{\eta_g - \eta_H^2 / \eta_g}{\eta_g + \eta_H^2 / \eta_g} \right]^2 = \left[\frac{(n_g^2 \cos\varphi_H / \eta_g - 1) / (n_g^2 \cos\varphi_H / \eta_g + 1)}{n_H^2 \cos^2\varphi_g} \right]^2 \quad (11)$$

对于S偏振光有

$$R_S = \left[\frac{n_g^2 \cos^2\varphi_g - (n_H \cos\varphi_H)^{2n+2} / n_g \cos\varphi(n_L \cos\varphi_L)^{2n}}{n_g^2 \cos^2\varphi_g + (n_H \cos\varphi_H)^{2n+2} / n_g \cos\varphi(n_L \cos\varphi_L)^{2n}} \right]^2 \quad (12)$$

$$\text{因为 } \frac{n_H \cos\varphi_L}{n_L \cos\varphi_H} = 1 \quad (13)$$

可以得到

$$\frac{n_H \cos\varphi_H}{n_L \cos\varphi_L} = \frac{n_H^2}{n_L^2} \quad (14)$$

将(13)式代入(12)式得

$$R_s = \left[\frac{n_g^2 \cos^2 \varphi_g - (n_H \cos \varphi_H)^2 n_H^{4n} / n_g n_L^{4n}}{n_g^2 \cos^2 \varphi_g + (n_H \cos \varphi_H)^2 n_H^{4n} / n_g n_L^{4n}} \right] \quad (15)$$

从(11)和(15)两式可以看出,只要满足布氏角的条件, P 偏振光的反射率与膜层数无关,只决定于膜料和基底的折射率; S 偏振光的反射率取决于膜层数 $2n+1$, n 越大 R_s 也越大。然而,任何膜料都存在一定的吸收,因此 n 越大,带来的附加损耗也越大。所以,必须合理地选择膜层数。

一般地说,当膜层数不多时,反射光的偏振度优于透射光的偏振度;但是当层数很多时,反射偏振度则次于透射偏振度。另外, S 光的高反射带宽由下式决定^[15]:

$$\Delta g_s = \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{\eta_{HS} - \eta_{LS}}{\eta_{HS} + \eta_{LS}} \quad (16)$$

从上述理论分析可以看出,影响薄膜偏振分光镜膜系性能的因素比较多。因此,对膜系和基底以及膜层的厚度等参数必须进行合理的选择,以达到优化其性能的目的。

4 薄膜偏振分光镜的优化设计

为了获得尽可能高的透光效率和尽可能好的光学质量,薄膜偏振分光镜的性能通常用下列优化指标来衡量:

- 1)工作波长,即带宽要尽可能宽。
- 2)透射光的透射率和反射光的反射率要尽可能高,即分束光束的偏振度要高。
- 3)工作视场角要尽可能大。
- 4)抗激光的强度要尽可能高。

目前,为适应液晶投影技术、光学仪器、光电显示、光学记录等领域的发展,研究高性能的薄膜偏振分光镜成为一个重要的课题。可以通过合理的选择膜系结构参数和镀膜工艺来提高反射光和透射光的性能。

参考文献:

- [1] S M MacNeile. Beam splitter[P]. U S pat-ent:2403 731,1946-07-06.
- [2] M Banning, Practical methods of making and using multiple layer filters[J]. J Opt Soc Am, 1947,37:792 ~797.
- [3] W W Buchman, S J Holmes. Singles wavelength thin-film polarizers [J]. J Opt Soc Am, 1997, 61:1604 ~ 1606.
- [4] D Kermisch. Analytic solution for single-wavelength thin film polarizers [J]. J Opt Soc Am, 1972, 62A: 1010.
- [5] L Bergstein. Nover thin-film polarizer for the visible and infrared[J]. J Opt Soc Am, 1971, 61A:665.
- [6] D Lees. Versatile frustrated-total-reflection polarizer for the infrared[J]. Opt Letter, 1979, (4):66~67.
- [7] Jacques Mouchart. Modified MacNeille cube polarizer for a wide angular field [J]. Applied Optics, 1989, 28 (14):2847~2853.
- [8] Li Li, J A Dobrowolski. Visible broadband, wide-angle, thin-film multiplayer polarizing beam splitter [J]. Applied Optics, 1996, 35(13):2221~2225.
- [9] H F Li, H C Huang. Broadband, large accep-tan-ce angle polarizing beam splitters for reflective LVD projectors [J]. Projection Displays, 2000, 3954:186 ~ 196.
- [10] Rong-Chuang Tyan. Design, fabrica-tion, and characterization of form-birefringent multiplayer polarizing beam splitter[J]. J Opt Soc Am A, 1997, 14(7):1627 ~1635.
- [11] 顾培夫. 一种棱镜分光膜的设计和制备[J]. 光学技术, 1981, (4):17~20.
- [12] 顾培夫, 刘旭, 等. 宽波长宽角度偏振分光镜设计[J]. 光学仪器, 1999, 21(4):17~21.
- [13] 强西林, 高明. 棱镜偏振分光膜研究[J]. 西安工业学院学报, 2000, 20(2):106~109.
- [14] 尹树百. 薄膜光学[M]. 北京:科学出版社, 1987, 44~68.
- [15] 唐晋发. 应用薄膜光学[M]. 上海:上海科学出版社, 1980, 171~180.

INVESTIGATION ON THE THIN FILM POLARIZING BEAM SPLITTER

KONG Wei-jin, WU Fu-quan, WANG Ji-ming

(Laser Institute of Qufu Normal University, Shandong 273165, China)

Abstract: The existing circumstances and main character of thin-film polarizing beam splitter are presented and demonstrated. The basic design principle is emphatically analyzed. At the same time, the index of reflection of central wavelength is counted by using equivalent index concept.

Keywords: thin-film polarizing beam splitter; extinction ratio; field angle; broadband