

光学薄膜消偏振分光棱镜的设计与特性分析

张雅娟

(武汉职业技术学院 电子信息工程学院,湖北 武汉 430074)

摘 要: 首先比较传统制备薄膜消偏振分光棱镜的方法,提出以布儒斯特应用为依据的设计思路,然后对其实验结果进行分析并总结。

关键词: 光学薄膜;消偏振;偏振效应

中图分类号: O484.41

文献标识码: A

文章编号: 1671-931X (2012) 03-0077-03

当光束以某一角度(非正入射或掠入射)入射薄膜产品时,各膜层光学薄膜的有效厚度会变薄,这主要是因为光束入射两种介质交界面会产生相位跃变,电场和磁场在每个界面上切面分量连续,引起光振动中的 P 分量和 S 分量呈现不同的有效折射率,且膜系会出现非常强的偏振效应。虽然很多场合可以利用偏振现象,比如玻璃堆法获得线偏振光,或制成各种光学偏振仪器,但在很多场合,这些现象是致命的,要用到消偏振效应的器件来消除,例如消偏振效应滤波片、消偏振效应分光棱镜等。目前能够真正消除分光棱镜偏振效应的方法有限,而且局限于可见波段。

传统的消偏振效应的方法大多因为膜系制备困难、反射率太低、膜层数目过多或是膜厚不均匀等诸多缺陷,未能制备出在振幅和相位两个参数上同时达到消偏振效果的消偏振分光棱镜,消偏振分光棱镜反射相移问题开始被关注。在实际应用中,只有消除偏振分离和反射相移,才能在保持光束偏振态不变的前提下真正达到消偏振的效果。下面简单介绍利用布儒斯特定律消除消偏振设计思路。

一、消偏振分光镜的设计

由菲涅尔公式可知,当光束到达两种介质的光滑交界面,会发生折射和反射,反射光中的 P 分量和 S 分量之间会产生相位差,即为反射相移。反射相移的产生可以改变光束的偏振态。实验证明,利用布儒斯特定律,当光以某一锐角入射时,只用一层薄膜是不会实现消偏振效应的。例如用单层银膜作消偏振分光膜时,光振动中的 P 分量和 S 分量的有效折射率都会随着材料的介质折射率而发生变化。P 分量、S 分量都随着材料折射率的增加而单调递增,两分量的偏振分离很大。在银膜两侧加上硫化锌膜时,P 分量和 S 分量的最大偏振分离才 7%。因此高折射率层可以很好的改善消偏振的带宽。由于银膜的相移,其两侧的高折射率介质膜厚不等,就要求入射光一侧的膜厚要比出射光侧的膜厚要高些。但就算是这样处理。膜系的反射相移依然很大。

(一)设计依据

光线正入射时,单层介质膜的反射率:

$$R = \left(\frac{n_0 - Y}{n_0 + Y} \right)^2 \quad (1-1)$$

在特定波长处 λ_0 , 介质折射率高低轮流变化的膜系光学导纳:

收稿日期:2012-05-03

作者简介:张雅娟(1978-),女,湖北孝感人,武汉职业技术学院电子信息工程学院讲师,硕士,研究方向:光学冷加工、镀膜、激光加工、电子信息工程等。

表 1 部分光学薄膜介质材料特性

材料	熔点 /℃	蒸发温度 /℃	密度 g/cm ³	透明度 /μm	折射率	吸收消光系数
Al ₂ O ₃	2020	2100	3.98	0.2–8	1.54(0.55 μm,40℃) 1.62(0.55 μm,300℃)	2.3 × 10 ⁻⁴ (0.515 μm) 8 × 10 ⁻³ (1.06 μm)
TiO ₂	1850	2000	3.8–4.3	0.4–15	2.2–2.4	7.5 × 10 ⁻⁴ (0.5 μm) 2.5 × 10 ⁻⁴ (1 μm)
MgF ₂	1266	1540	2.9	0.11–6	1.38(0.55 μm)	9 × 10 ⁻⁶ (0.5 μm) 6 × 10 ⁻⁶ (1 μm)

$$Y=\left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2m}\cdot\frac{n_{sub}^2}{n_{sub}} \tag{1-2}$$

其中,n_H,n_L分别为高折射率、低折射率膜层的介质折射率;

n₀,n_{sub}分别是入射光所在介质折射率、膜层衬底折射率。

光线斜入射时,P分量和S分量的有效折射率分别是:

$$n_p=\frac{n}{\cos\theta} \tag{1-3}$$

$$n_s=n\cos\theta \tag{1-4}$$

当 n₀=n_{sub},将式(1-3)、(1-4)代入式(1-2),即可得到 P 分量和 S 分量的有效反射率。若交替在此基础上镀 2m 层的膜层,其折射率分别为 n_A 和 n_B。那么

膜系结构: $\frac{n_{sub}}{(H,L)^m H},\frac{(A,B)^k}{n_{sub}}$,从而得出光学导纳:

$$Y=\left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2m}\cdot\frac{n_{sub}^2}{n_{sub}}\left(\frac{n_B}{n_A}\right)^{2k} \tag{1-5}$$

S 分量的有效反射率可以通过改变膜系层数 2m 来实现。当 n_A>n_B,S 分量反射率减小,反之则增加。

(二)膜系设计

用 TiO₂ 和 Al₂O₃ 这两种镀膜材料(如表 1)构造一个十层的 1/4 波长的多层膜,使 P 分量在特定波长 λ=560nm 时反射率达到 52%,而且这两种材料的 P 分量折射率差不多,就可以得到以下几种情况:

1. 50%反射的消偏振设计

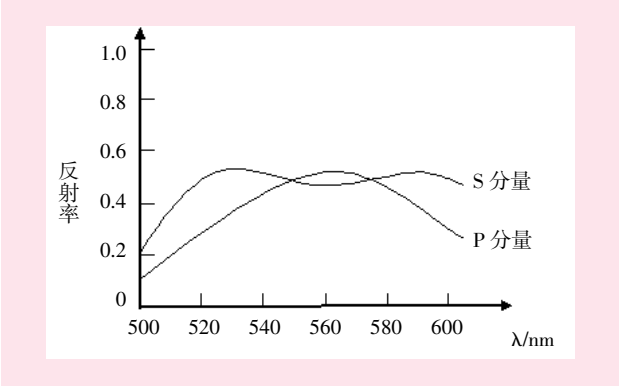


图 1 宽带消偏振 S 分量和 P 分量有效反射率曲线

采用不同的膜系结构,可以获得相应的宽带消偏振和窄带消偏振法。将 Al₂O₃ 均匀分布在 ZnS 和 MgF₂ 之间,可以达到宽带消偏振的效应,实验结果如图 1 所示。此时光束波长取在 500–600nm 之间,不难发现,当 λ=560nm 的时候,P 分量反射率达到最大值,约为 48.5%,而 S 分量的反射率有最小值,约为 46.6%,偏振分离小于 5%,消偏振波段达到 20nm,这样膜系设计比较简单,易于实现。

将 Al₂O₃ 与 ZnS 或与 MgF₂ 组合构成基本周期,成为法布里–帕罗(F-P)结构,中级层为间隔层,就达到了窄带消偏振效应。实验结果如图 2 所示。同样在 λ=560nm 处,P 分量和 S 分量的反射率和宽带消偏振法中的值完全相同,只是两分量的反射率随光波长变化的曲线与宽带消偏振的不同。P 分量的反射率的变化更加平缓,S 分量反射率的变化更接近深 V 字形,这说明膜层的不同分布不会影响 λ=560nm 处两分量的有效反射率的极大值或极小值,而只会影响到此波长以外波段的反射率。

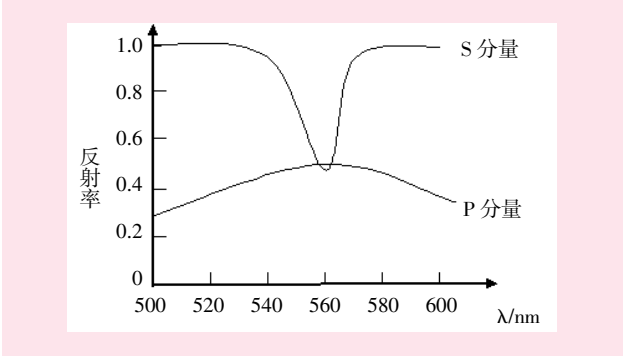


图 2 窄带消偏振 S 分量和 P 分量有效反射率曲线

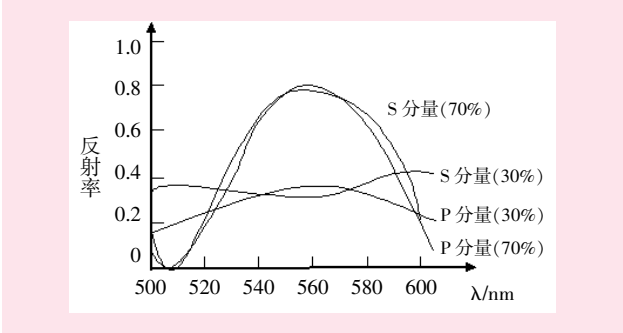


图 3 30%和 70%消偏振 S 分量和 P 分量有效反射率曲线

2. 30%、70%反射的消偏振设计

同样将 Al_2O_3 与 ZnS 或与 MgF_2 组合构成基本周期,把总周期降为 3。实验结果如图 3,在 $\lambda=560\text{nm}$ 处,S 分量和 P 分量的有效反射率同时降到了 30%,前者接近 32.1%,后者约为 30.7%,偏振分离依然小于 5%。这主要是因为 Al_2O_3 和 MgF_2 中的 P 分量有效折射率一样。因此可以通过膜层周期数来改变其有效反射率,从而实现高反射率薄膜膜系设计。

再次改变膜系结构和膜层周期,S 分量和 P 分量的有效反射率分别可以达到 73.6%和 72.1%。实验证明,膜层总周期不变时,膜层的重新分布只会影响到 $\lambda=560\text{nm}$ 以外的其他波段的两分量的有效反射率,而对这个特定点的分离偏振度没有任何影响。

二、实验结果分析

(一)膜厚的影响

制备膜系过程中,系统和人为误差肯定存在,那么膜层的厚度一定也会有误差。膜厚带来的相位厚度的变化,必然会引起消偏振位置的偏移,庆幸的是,它对 P 分量和 S 分量的折射率影响不大。例如 Ta_2O_5 、 Al_2O_3 、 SiO_2 这几种材料的膜厚对消偏振膜系性能的影响无太大差异。选取 Ta_2O_5 来进行其膜层分析可知,消偏振位置虽然发生了偏移,但反射光波的两个分量的有效反射率之间的偏振分离小于 5%,符合条件。

(二)光束入射角的影响

设计时理论要求入射角为 45° ,但若实际入射角偏离成 47° ,那么 P 分量和 S 分量的有效反射率肯定不等,并发生至少 2%的偏振分离,这时消偏振的位置移动到了高频光波段 $\lambda=545\text{nm}$ 处,此时入射角偏大,S 分量的有效反射率稍稍减小到 46.5%,而 P 分量的反射率稍稍增大到 48.6%。这样变化的主要原因是各个光学薄膜相位厚度发生了变化,而膜材料的有效折射率的改变必然两分量折射率的变化。虽然角度有偏差,但依然可以看到 S 分量和 P 分量的

偏振分离是小于 5%的,基本可满足条件。

三、结束语

本设计是利用布儒斯特定律在消偏振分光棱镜中的应用,对于一种新型膜系结构研究其在 $\lambda=545\text{nm}$ 处的反射光波中的 P 分量和 S 分量的反射率。对上述实验结果分析可知,要实现不同反射率的消偏振膜系,只需要调节膜层的组合周期即可。同时,各膜层厚度和入射光角度的偏差会给膜系的消偏振特性带来不同的影响。这些特点给薄膜偏振分光棱镜的设计和工业实现提供了一定的理论依据。可以预测到,如何解决消偏振分光棱镜和滤波片的相位等问题将会成为人们关注的重点。

参考文献:

- [1] F.A.Jenkins,H.E.White.光学基础(上)[M].北京:高等教育出版社,1990.
- [2] 李明宇,顾培夫.近紫外区宽角度消偏振平板分光镜[J].光子学报,2003,32(10):1231-1233.
- [3] M.Shokooch-Saremi,M.Nourian, M.M.Mirsachi et al..Design of multilayer polarizing beam splitters using genetic algorithm[J].Opt.Commun.,2004,233(1-3):57-65.
- [4] A. K. Kalkan, M. R. Herry, H. D. Li et al.. Biomedical/analytical applications of deposited nanostructured Si films[J]. Nanotechnology, 2005, (16):1383-1391.
- [5] V.R.Costich.Reduction of polarization effects in interference coatings[J].Appl.Opt,1970,9(4):866-870.
- [6] 尚石焯,等.近代物理实验技术(II)[M].北京:高等教育出版社,1993.
- [7] M.Gilo.Design of a nonpolarizing beam splitter inside a glass cube[J].Appl.Opt,1992,31(25):5345-5349.
- [8] 史金辉,王政平.消偏振分光棱镜的设计与性能分析[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学学报,2008,29(9).

[责任编辑:刘 骋]

Analysis of Design and Characteristics of Non-polarizing Beam Splitters with Optical Thin Film

ZHANG Ya-juan

(Wuhan Polytechnic, Wuhan 430074, China)

Abstract: Firstly, the paper compares the traditional methods of preparing non-polarizing beam splitter with thin films. Then, it proposes design ideas based on Brewster applications. Finally, the experimental results are analyzed and summarized.

Key words: optical thin film; non-polarizing; polarization effects