

改进型 Wollaston 棱镜设计

徐毓娴, 蔡 昕, 张志利

(清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘要:介绍了改进型 Wollaston 棱镜的特点、主要参数及基于这些参数对光学系统结构的设计公式。应用 Matlab 软件自编程序对分束角 ϵ 与棱镜楔角 γ 和光轴倾角 δ 之间, 相干平面倾角 η 与棱镜楔角 γ 和光轴倾角 δ 之间的关系进行了计算并对结果做了分析, 得出一些有实用价值的结论, 克服了 Wollaston 棱镜使用上的局限, 因而扩大了它的应用范围。

关键词: Wollaston 棱镜; 光学系统; 分束角; 相干平面

中图分类号: TH70.3 文献标识码: A

1 Wollaston 棱镜典型结构及应用局限性

Wollaston 棱镜是最典型的一种偏振分光镜。在微分干涉相衬显微镜中用来观察与定量测量表面形貌, 在傅立叶光谱仪中用来测量波长, 在其他很多方面得到广泛应用^[1]。Wollaston 棱镜是由两个光轴相互垂直的楔形单轴晶体胶合而成, 它的结构与光路如图 1 所示。

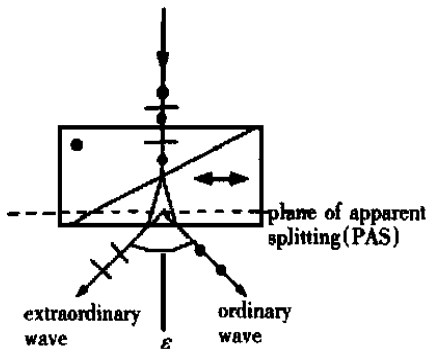


Fig. 1 Wollaston prism

线偏振光入射到棱镜的上半部时, 被分裂成两个线偏振光, 它们的振动方向相互垂直, 传播方向一致, 一个为非常光 e , 折射率为 n_e , 另一个为寻常光 o , 其折射率为 n_o 。当 e 光、 o 光进入胶合面时, 即分裂成两束具有某夹角的线偏振光, 且折射时 e 光、 o 光相互对换, 最后从棱镜下半部折射出的光为发散的两束光射向物镜, 这个发散光束的

夹角称分束角, 发散光束的会聚平面称相干平面。

Wollaston 棱镜的相干平面通常在棱镜内部, 光学系统设计时往往要求物镜的后焦面或聚光镜的前焦面与相干平面重合, 即需要聚光镜或物镜的焦距足够长, 对于高倍率镜头很难做到, 这就使它的应用受到限制^[2]。

改进型 Wollaston 棱镜特点是: 在其中一个楔块中, 使原来垂直棱镜短边的光轴变成某角度 δ 。改进后棱镜相干平面在棱镜的外部, 给高倍光学成像系统结构设计带来很大方便。同时由于 δ 存在, 使得光束通过棱镜后的分束角、相干平面位置及与光轴夹角等参数均发生变化, 又给设计带来困难。

2 改进型棱镜主要参数及设计计算

改进型棱镜主要设计参数有: 楔块楔角 γ 、棱镜厚度 ω 、楔块光轴与棱镜短边夹角 δ (参见图 2)。参数 γ 、 δ 决定了出射非常光与寻常光夹角 ϵ (称分束角) 以及相干平面与 x 轴夹角 η , 这些参数对光学系统结构设计是很重要的^[3]。

2.1 分束角 ϵ

为分析问题方便将光线入射棱镜到从棱镜射出分成四个区, 如图示 1、2、3、4 区, 其中入射角为 α , 出射角为 β 。易知振动方向垂直于纸面的线偏振光在 2 区中为非常光, 在 3 区中为寻常光, 称为

eo 光。由于 2 区的棱镜光轴平行于入射面, 所以该偏振光在各交界面上的折射遵循 Snell 折射定律。若楔块楔角为 γ , o 光在棱镜中的折射率为 n_o , e 光在棱镜中最小的主折射率为 n_e , 入射角为 α , 则该偏振光的最终出射角 β_{eo} 可用下式求出:

$$\left[n_o \sin \left[\sin^{-1} \left\{ \frac{n_e}{n_o} \sin \left[\sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha}{n_e} \right) + \gamma \right] \right\} - \gamma \right] \right] \quad (1)$$

振动方向平行于纸面的线偏振光在 2 区中为寻常光, 在 3 区中为非常光, 称为 oe 光。该偏振光在 2、3 区交界面上发生的折射不遵循 Snell 折射定律。但其最终出射角 β_{oe} 仍可用与式(1)类似的形式给出:

$$\left[n_\theta \sin \left[\sin^{-1} \left\{ \frac{n_o}{n_\theta} \sin \left[\sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha}{n_o} \right) + \gamma \right] \right\} - \gamma \right] \right] \quad (2)$$

式中, γ 、 n_o 、 α 的定义与式(1)相同, θ 为 3 区中非常光的波法线方向与晶体光轴之间的夹角, n_θ 为 3 区中非常光的折射系数。且 n_θ 满足以下方程组:

$$\begin{cases} n_o \sin \left[\gamma + \sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha}{n_o} \right) \right] = n_\theta \sin(\delta + \gamma - \theta) \\ n_\theta = \frac{n_o n_e}{(n_o^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta)^{1/2}} \end{cases} \quad (3)$$

则分束角 $\epsilon = \beta_{eo} - \beta_{oe}$ 。

2.2 相干平面的位置及与系统光轴的夹角 η

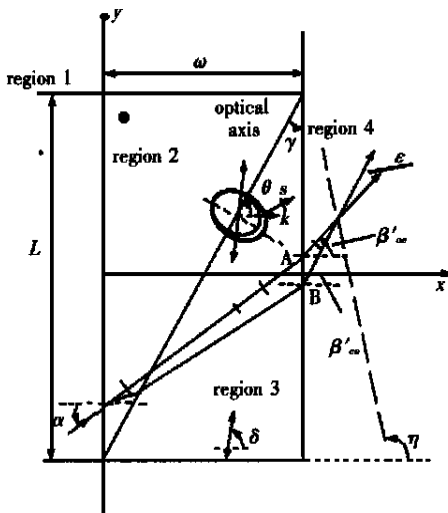


Fig. 2 Linearly polarized beam is incident on the Nomarski prism at an angle α relative to the normal to the entrance face

如图 2 建立直角坐标系, 用光线追迹法求出两线偏振光在 3、4 区交界面上的坐标值。其中 3

区中非常光取光线方向而不是波法线方向。设棱镜长 L , 入射点坐标为 $(0, Y_o)$, oe 光出射点 A 的坐标为 (ω, Y_{eo}) , eo 光出射点 B 的坐标为 (ω, Y_{eo}) , 用解析几何的方法求出两出射光线的交点 (X_p, Y_p) :

$$\begin{cases} X_p = \frac{Y_{oe} - Y_{eo}}{\tan \beta_{eo} - \tan \beta_{oe}} + \omega \\ Y_p = \frac{(Y_{oe} - Y_{eo}) \tan \beta_{eo}}{\tan \beta_{eo} - \tan \beta_{oe}} + Y_{eo} \end{cases} \quad (4)$$

分析可知: 相干平面与 x 轴不垂直而成 η 角, 为求出相干平面的倾角, 只需取入射位置分别为 $(0, Y_1)$, $(0, Y_2)$ 的两条入射光线, 求出对应相干平面上两点为 (X_{p1}, Y_{p1}) , (X_{p2}, Y_{p2}) 即可计算出倾角

$$\tan \eta = \frac{Y_{p1} - Y_{p2}}{X_{p1} - X_{p2}} \quad (5)$$

设此相干平面与系统光轴成 σ 角, 它们满足 $\sigma = \eta - \alpha$ 如图 3 所示。要使相干平面垂直于系统光轴, 只需 $\eta - \alpha = 90^\circ$ 。

3 计算结果分析

以上述理论为基础, 用 matlab 编写相应程序在计算机上进行计算, 结果如下:

3.1 分束角 ϵ 、棱镜楔角 γ 和光轴倾角 δ 之间的关系^[4]:

取棱镜材料为石英晶体, 照明光源波长为 555nm, 入射角 α 为 0° 。三者关系如图 3。从图 4(a) 上可以看出, 棱镜的楔角 γ 越小, 分束角 ϵ 越小。当 γ 一定时, wollaston 棱镜的分束角 ϵ 最大, 改进后分束角变小。

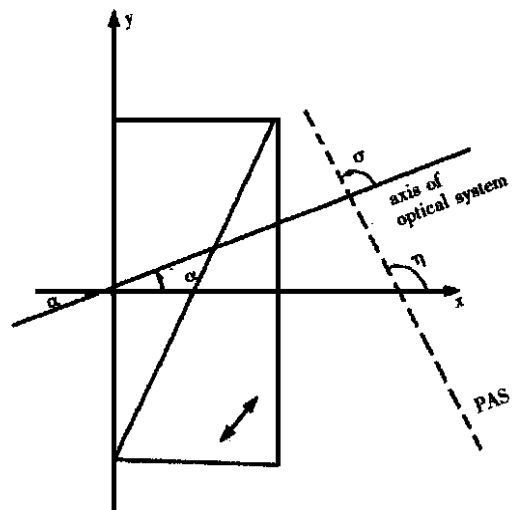
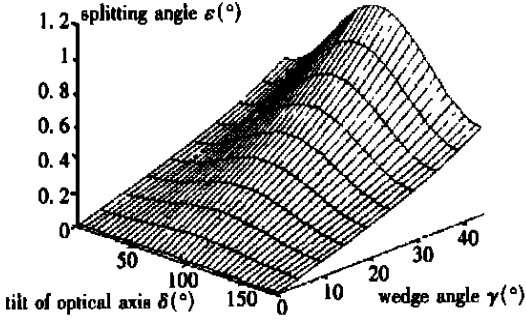
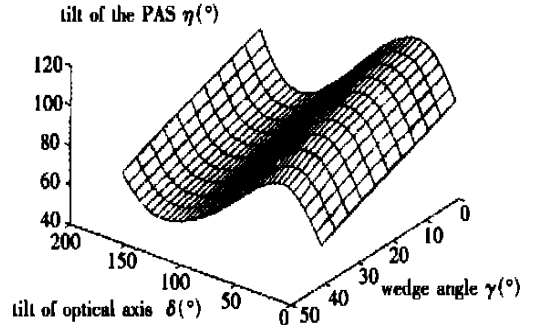


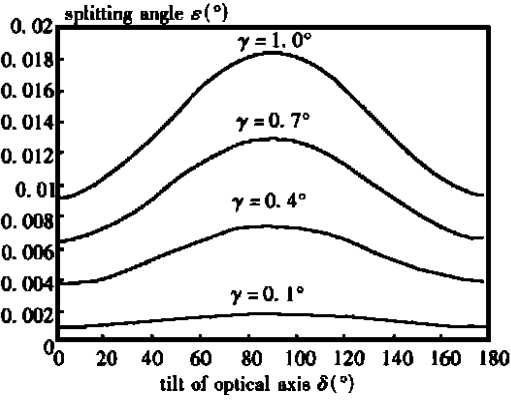
Fig. 3 Plane of apparent splitting perpendicular to the incident beam



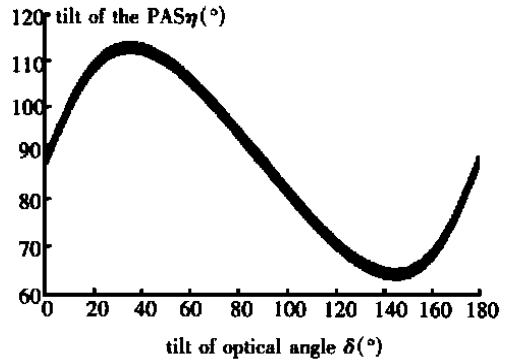
(a) Splitting angle ϵ as a function of the wedge angle γ and the optical axis inclination angle δ at normal incidence



(a) The PAS inclination angle η , the angle to the PAS from the x axis as a function of the wedge angle γ and the optical axis inclination angle δ at normal incidence



(b) Splitting angle ϵ as a function of the optical axis inclination angle δ corresponded to different wedge angles



(b) η , the angle to the PAS from the x axis as a function of the optical axis inclination angle δ corresponded to different wedge angles (from 0.5° to 5°)

Fig. 4 Splitting angle ϵ as a function of the wedge angle γ and the optical inclination angle δ

Fig. 5 The PAS inclination angle η , the angle to the PAS from the x axis as a function of the wedge angle γ and the optical axis inclination angle δ

3.2 相干平面倾角 η 、棱镜楔角 γ 和光轴倾角 δ 之间的关系

计算条件同上, 光线垂直入射棱镜表面。

如图 5 所示, 当 γ 在接近 0° 的较小范围内(如 5° 内), η 的变化由光轴倾角 δ 决定。Wollaston 棱镜相干平面基本垂直 x 轴, 也可认为近似垂直系统光轴, 改进型棱镜要复杂些。当 γ 一定时, $\delta - \eta$ 曲线不是一条直线, $\delta \in [0^\circ; 90^\circ]$ 的所有的 η 落在大于 90° 的范围内, 这表示相干平面的倾斜方向与胶合面的倾斜方向相反。 $\delta \in (90^\circ; 180^\circ]$ 的所有 η 落在小于 90° 的范围内, 这表示相干平面的倾斜方向与胶合面的倾斜方向相同。

4 结 论

(1) 分束角是棱镜设计重要参数, 如测量表面形貌的微分干涉相衬显微镜中 Wollaston 棱镜是关键部件, 用它将入射线偏振光分为两束具有微小夹角, 且振动方向垂直的线偏振光。这两束光经过物镜后产生一平行的剪切量 ΔX , 投射到被测表面后返回发生干涉。由于两束光的横向剪切量小于显微镜的分辨率极限, 因此在视场中只能看到单一双重像。当被测表面在微小区内有高度变化时, 这两束光产生一定光程差, 视场中相应地方就有强烈的光强变化, 于是表面形貌的微观细节便清晰地呈现出来, 该方法应用很广泛。文章首先讨论分束角有应用价值, 分析可知它主要由棱镜楔角决定。当楔角确定后, Wollaston 棱镜分束角

最大。改进型分束角变小。

(2) 若要求相干平面移出棱镜出射面的外边,需用改进型棱镜,此时由于存在 η 应将棱镜转

过相应角度(参看图 3),以保证相干平面垂直系统光轴。为保证整个光学系统结构设计正确性是必要的条件。

参考文献:

- [1] 陈峻堂. 微分干涉相衬显微术[J]. 光学仪器, 1984, 6(1): 1- 15.
- [2] Pluta M. Nomarski's DIC microscopy: a review [A]. Proc. SPIE, 1994. 1846: 10- 24.
- [3] Montarou C C, Gaylord T K. Analysis and design of modified Wollaston prisms[J]. Appl. Opt, 1999, 38(31): 6604- 6616.
- [4] 蔡昕. 晶体形貌测量中关键技术理论分析与设计计算[D]. 北京: 清华大学, 2000.

Design of modified Wollaston prisms

XU Yu-xian , CAI Xin , ZHANG Zhi-li

*(Department of Precision Instruments and Mechanology,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)*

Abstract: The paper introduces a kind of modified Wollaston Prism, including its wedge angle γ , thickness ω optical axis inclination angle δ and the formulas of designing the optical system based on these parameters. Using Matlab software developed by the authors, two relational expressions indicating the inflection of the wedge angle and the optical axis inclination angle both on the splitting angle ϵ and the plane of apparent splitting inclination angle η were calculated. By analysing the result, some useful conclusions were obtained, and the limitation of the original Wollaston prism was conquered, therefor, extending its applications.

Key words: Wollaston prism; optical systems; splitting angle; plane of apparent splitting

作者简介: 徐毓娴(1941-),女,北京市人,清华大学精密仪器与机械学系,教授。