

用于 ArF 光刻机偏振照明系统的沃拉斯顿棱镜的设计

蔡燕民 王向朝 黄惠杰

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 ArF 光刻机偏振照明系统中需要采用偏振器件(沃拉斯顿棱镜),根据传统技术选用在 193 nm 波长透明材料设计沃拉斯顿棱镜,其分束角较小,或者分束角大时棱镜较长。为了解决这些实际问题,利用折射定律分析推导了由正晶体构成沃拉斯顿棱镜的分束角公式,还分析推导了由两种正晶体构成沃拉斯顿棱镜的分束角公式。经过分析比较,由两种正晶体构成沃拉斯顿棱镜的分束角比由单一正晶体构成沃拉斯顿棱镜有较大的提高。设计了一种用于 193 nm 波长的分束角达到约 10° 的偏振分光沃拉斯顿棱镜,另外还设计了一种用于 193 nm 波长的仅仅输出一束线偏振光的沃拉斯顿棱镜。这两种棱镜采用两种正晶体制作,棱镜长度适中,有利于偏振照明系统装置整体的紧凑化。

关键词 光学器件;沃拉斯顿棱镜;石英晶体;氟化镁晶体;o 光;e 光

中图分类号 O436.3; O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0616002

Design of Wollaston Prism Used for Polarization Illumination System in ArF Lithography Tool

Cai Yanmin Wang Xiangzhao Huang Huijie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Wollaston prism is used as a polarizer in ArF lithography tool polarization illumination system. Wollaston prism is made of one kind of material used at 193 nm wavelength, the beam separation angle is very small and the prism is very long. In order to solve these practical problems, Wollaston prisms made of positive crystal are analyzed by the law of refraction, and the beam separation angle formulas are derived. A result is presented that the beam separation angle of Wollaston prism made of two kinds of positive crystal is more than that of Wollaston prism made of single positive crystal after analysis and comparison by MATLAB. A Wollaston prism with the beam separation angle of about 10° is designed at wavelength of 193 nm. Another Wollaston prism only with a output beam of linearly polarized light is designed at wavelength of 193 nm. The two prisms are made of positive crystal, the lengths of both the two prisms are medium, which can be used for the polarization illumination system in ArF lithography tool.

Key words optical devices; Wollaston prism; SiO_2 crystal; MgF_2 crystal; o ray; e ray

OCIS codes 230.1360; 230.5480; 260.1440; 260.7190

1 引言

在半导体光刻技术领域,采用氟化氩(ArF)准分子激光和浸液光刻技术,并配合双图形曝光技术,目前已经实现 32 nm 节点技术的量产,实现该技术的典型设备是荷兰 ASML 公司型号为 TWINSCAN NXT:1950i 的光刻机。对于目前的 22 nm 节点光刻技术,由于极紫外光刻技术(EUVL)目前尚有一些关键技术需要改善,同时 ArF 浸液光刻技术得到偏振照明技术、双图形及多图形技术的支持,依然表现出

强大的生命力,例如 ASML 公司型号为 TWINSCAN NXT:1960Bi 的光刻机依然是 2X nm 节点量产强有力的竞争者之一,这两款设备均采用业界最大数值孔径($NA=1.35$)的投影物镜。ArF 光刻技术发展到了 $NA=1.35$ 时代得到了若干关键技术的大力支持,ASML 公司早在 PAS 系列光刻机的 $NA=0.75$ 时代就开始研究浸液技术、偏振照明技术等若干关键技术以延续 ArF 光刻技术的生命。例如,PAS 5500/1150C 光刻机实现 90 nm 节

收稿日期:2013-12-05;收到修改稿日期:2014-01-03

基金项目:国家国际科技合作项目(2011DFR10010)、高端光刻机偏振照明关键技术联合研究

作者简介:蔡燕民(1971—),男,博士,高级工程师,主要从事投影光刻技术方面的研究。E-mail: caiyanmin@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

点光刻技术是采用传统技术,对于 TWINSCAN XT:1450H 光刻机($NA=0.93$)采用传统技术可以实现 65 nm 节点技术,而采用偏振照明技术就可以将分辨率提高到 57 nm。可见,极紫外光刻技术目前尚有一些关键技术(比如光源功率问题、掩模版问题、光刻胶问题等)需要改善的情况下,研究浸液光刻、偏振照明等技术就显得非常有现实意义。

在 ArF 光刻机偏振照明系统中,对照明光瞳偏振态进行测量和控制是必备的关键技术,因此需要一些工作于 193 nm 波长的偏振器件。沃拉斯顿棱镜是一种重要的双折射型偏振器件,利用晶体的双折射特性将一束入射光分开成两束振动方向相互垂直的线偏振光,它由同一材料但光轴方向相互垂直的两块三棱镜制作而成。朱化凤等^[1]分析推导了由方解石晶体构成的沃拉斯顿棱镜的光强分束比的详细表达式,史萌等^[2]分析设计了由方解石晶体构成的双沃拉斯顿棱镜的双向对称分束结构,薛林等^[3]分析了发散光束经过沃拉斯顿棱镜(由方解石晶体构成)后出射的 o 光和 e 光的变化。因为在 193 nm 波长方解石晶体不透明,所以偏振器件材料不能采用方解石晶体;而且光刻采用 193 nm 波长准分子光源,也不适合使用胶合层。而在 193 nm 波长的透明材料仅有几种,氟化钙晶体是立方晶系,目前仅有石英晶体和氟化镁晶体有一定的双折射效应。如果根据传统技术由同一材料(如氟化镁晶体)的两块三棱镜制作成的沃拉斯顿棱镜,那么其分束角仅有约 $1^\circ\sim 2^\circ$ 。分束角比较小,即两束线偏振光比较靠近,这样势必增加系统的结构长度,不利于装置整体的紧凑化。这样,实际工作就需要结构比较紧凑才能产生比较大分束角的偏振器件,或者是仅产生一束线偏振光的偏振器件,针对这个问题,本文提出基于石英晶体和氟化镁晶体两种材料沃拉斯顿棱镜的设计,并根据折射定律和菲涅耳公式对这种思路的沃拉斯顿棱镜进行了详细的分析,揭示了按照这种思路设计沃拉斯顿棱镜的优点,最后给出了大分束角的沃拉斯顿棱镜和仅产生一束线偏振光的沃拉斯顿棱镜的设计结果。这种设计思路不但对于 ArF 光刻技术领域偏振器件的设计有一定的指导意义,而且对于将沃拉斯顿棱镜应用于其他光学波段,也提供了一种比较灵活的设计思路。

2 原 理

沃拉斯顿棱镜的原理如图 1 所示,平行光束正入射到第一块棱镜内,垂直于光轴传播,o 光和 e 光

以不同的相速度向同一方向传播,进入第二块棱镜时,因光轴旋转了 90° ,第一块棱镜中的 o 光在第二块棱镜中变成 e 光,如果是负单轴晶体($n_e < n_o$),所以远离界面法线偏折,而第一块棱镜中的 e 光则变成 o 光,所以靠近法线偏折。这两束线偏振光在穿出棱镜时再偏折一次,这样它们便分开一个角度,称为光束分离角,此角度大小与棱镜的材料及切割角度有关,对于负晶体近似地为^[4]

$$\varphi \approx 2 \sin^{-1}[(n_o - n_e) \tan \theta], \quad (1)$$

式中 φ 为光束分离角, θ 为棱镜切割角, n_e 为 e 光折射率, n_o 为 o 光折射率。

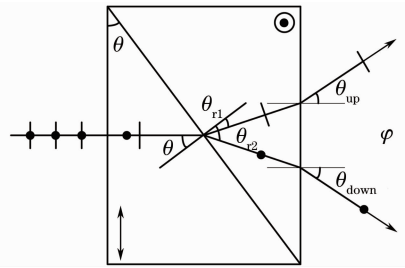


图 1 沃拉斯顿棱镜的原理(负单轴晶体)

Fig. 1 Principle of Wollaston prism (negative uniaxial crystal)

文献[4]中(1)式是近似公式,当棱镜切割角较小时,与准确解析公式的结果很接近,当棱镜切割角增大到一定程度时,该公式与准确解析公式的差别将比较显著,下面根据折射定律推导出一个准确解析式,与(1)式进行比较就可以看出二者的差别。而文献[5]中(1)式给出的沃拉斯顿棱镜分束角公式比较繁复,而且是针对方解石晶体(负晶体)推导的,不适用于像氟化镁晶体和石英晶体等正晶体。

下面推导基于正晶体的沃拉斯顿棱镜的分束角公式,如图 1 所示,在第一块棱镜中的 o 光折射进入第二块棱镜变成 e 光,如果是正晶体, $n_e > n_o$,那么将靠近界面法线折射,折射角小于入射角,经第二块棱镜出射后形成上光束,折射角为 θ_{up} 。将 2 次折射写成如下的方程组:

$$\begin{cases} n_o \cdot \sin \theta = n_e \cdot \sin \theta_{r1} \\ n_e \cdot \sin(\theta - \theta_{r1}) = \sin \theta_{up} \end{cases} \quad (2)$$

在第一块棱镜中的 e 光折射进入第二块棱镜变成 o 光,如果是正晶体, $n_e > n_o$,那么将远离法线折射,折射角大于入射角,经第二块棱镜出射后形成下光束,折射角为 θ_{down} 。将 2 次折射写成如下的方程组:

$$\begin{cases} n_e \cdot \sin \theta = n_o \cdot \sin \theta_{r2} \\ n_o \cdot \sin(\theta_{r2} - \theta) = \sin \theta_{down} \end{cases} \quad (3)$$

求解(2)式和(3)式,得到正晶体构成的沃拉斯顿棱

镜光束分离角为

$$\begin{cases} \varphi = \theta_{\text{up}} + \theta_{\text{down}}, \\ \varphi = \sin^{-1} \left\{ n_e \cdot \sin \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_e}{n_o} \cdot \sin \theta \right) - \theta \right] \right\} + \sin^{-1} \left\{ n_e \cdot \sin \left[\theta - \sin^{-1} \left(\frac{n_o}{n_e} \cdot \sin \theta \right) \right] \right\}, \end{cases} \quad (4)$$

式中 φ 为光束分离角, θ 为棱镜切割角, n_e 为 e 光折射率, n_o 为 o 光折射率。同样道理, 利用折射定律可以推导基于负晶体的沃拉斯顿棱镜的分束角公式:

$$\varphi = \sin^{-1} \left\{ n_e \cdot \sin \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_o}{n_e} \cdot \sin \theta \right) - \theta \right] \right\} + \sin^{-1} \left\{ n_o \cdot \sin \left[\theta - \sin^{-1} \left(\frac{n_e}{n_o} \cdot \sin \theta \right) \right] \right\}. \quad (5)$$

选择常用的方解石(负晶体)构成沃拉斯顿棱镜, 在 589 nm 波长时折射率为 $n_o = 1.65835$, $n_e = 1.48640$, 利用(1)式和(5)式计算分束角如下图 2 所示。图中横轴为棱镜切割角, 纵轴为光束分离角, 红线是根据文献[4]中(1)式得到曲线, 蓝线是根据文中推导(5)式得到曲线, 由图 2 可见, 当棱镜切割角增大到一定程度时, (1)式与准确解析(5)式的差别比较显著。

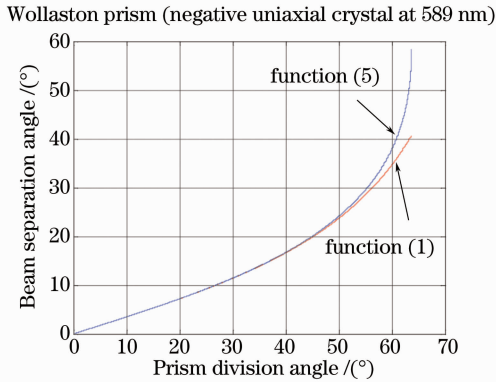


图 2 方解石沃拉斯顿棱镜的分束角

Fig. 2 Beam separation angle of Wollaston prism

3 设计

3.1 大分束角设计

设计一种用于 ArF 光刻机偏振照明系统中的偏振分光沃拉斯顿棱镜, 要求有约 10° 的分束角。

按照传统技术选择同一材料(氟化镁晶体, 或石英晶体)的两块三棱镜制作沃拉斯顿棱镜, 在 193nm 波长下氟化镁折射率为 $n_o = 1.42767$, $n_e = 1.44127$, 石英晶体折射率为 $n_o = 1.66091$, $n_e = 1.67455$, 根据(4)式可以计算分束角如下图 3 所示。图 3 中横轴为棱镜切割角, 纵轴为光束分离角, 红线是利用石英晶体构成沃拉斯顿棱镜的分束角曲线,

蓝线是利用氟化镁晶体构成沃拉斯顿棱镜的分束角曲线, 可见二者的分束角随棱镜切割角的变化十分相近。从图 3 中可以看出, 设计 10° 的分束角, 那么切割角需要大于 80° , 可以计算棱镜的长宽比为 5.98, 棱镜结构较长。如果考虑用双沃拉斯顿棱镜以增大分束角, 那么每个单沃拉斯顿棱镜需要负担 5° 的分束角, 切割角需要大于 72.5° , 可以计算 $\tan 72.5^\circ \times 2 = 6.34$, 这表明棱镜的长宽比为 6.34, 棱镜结构还是较长。

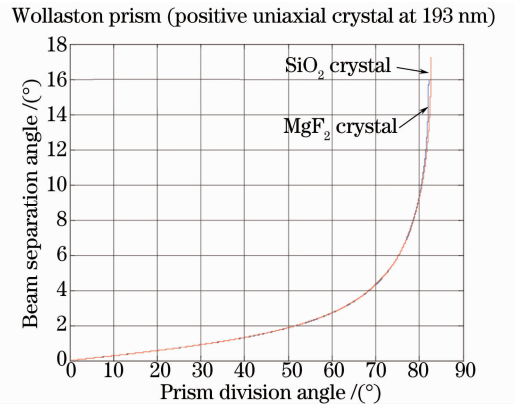


图 3 正晶体沃拉斯顿棱镜的分束角

Fig. 3 Beam separation angle of Wollaston prism

为了解决这个棱镜结构较长的问题, 提出一种由两种材料构成的沃拉斯顿棱镜, 两种材料在斜边通过光胶方式直接接触, 这两种材料是在 193 nm 波长有很高透射率的氟化镁晶体和石英晶体。

如图 4(a)所示, 一束入射光先进入到氟化镁晶体, 然后进入石英晶体, 由于在 193 nm 波长石英晶体的 o 光和 e 光折射率都大于氟化镁晶体的折射率, 因此, 出射光都向上偏折, 根据前面相似的分析, 求解 2 次折射的 2 个方程组, 得

$$\varphi = \sin^{-1} \left\{ n_{e, \text{SiO}_2} \cdot \sin \left[\theta - \sin^{-1} \left(\frac{n_{o, \text{MgF}_2}}{n_{e, \text{SiO}_2}} \cdot \sin \theta \right) \right] \right\} - \sin^{-1} \left\{ n_{o, \text{SiO}_2} \cdot \sin \left[\theta - \sin^{-1} \left(\frac{n_{e, \text{MgF}_2}}{n_{o, \text{SiO}_2}} \cdot \sin \theta \right) \right] \right\}, \quad (6)$$

式中 φ 为光束分离角, θ 为棱镜切割角, n_{o, SiO_2} 为石英晶体 o 光折射率, n_{e, SiO_2} 为石英晶体 e 光折射率, n_{o, MgF_2} 为氟化镁晶体 o 光折射率, n_{e, MgF_2} 为氟化镁晶体 e 光折射率。

如图 4(b) 所示, 一束入射光先进入到石英晶

体, 然后进入氟化镁晶体, 由于在 193 nm 波长石英晶体的 o 光和 e 光折射率都大于氟化镁晶体的折射率, 因此, 出射光都向下偏折, 根据前面相似的分析, 求解 2 次折射的 2 个方程组, 可得

$$\varphi = \sin^{-1} \left\{ n_{o, MgF_2} \cdot \sin \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_{e, SiO_2}}{n_{o, MgF_2}} \cdot \sin \theta \right) - \theta \right] \right\} - \sin^{-1} \left\{ n_{e, MgF_2} \cdot \sin \left[\sin^{-1} \left(\frac{n_{o, SiO_2}}{n_{e, MgF_2}} \cdot \sin \theta \right) - \theta \right] \right\}. \quad (7)$$

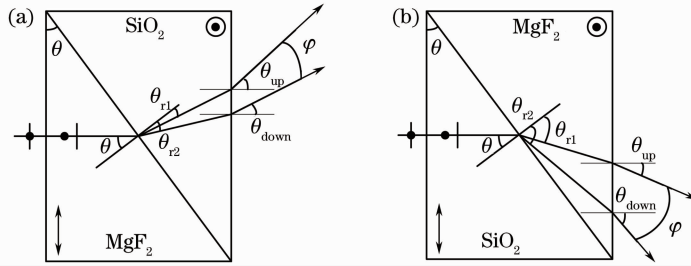


图 4 两种正晶体构成的沃拉斯顿棱镜。(a) 氟化镁+石英;(b) 石英+氟化镁

Fig. 4 Wollaston prism made of two kinds of positive crystal. (a) $MgF_2 + SiO_2$; (b) $SiO_2 + MgF_2$

Wollaston prism (positive uniaxial crystal at 193 nm)

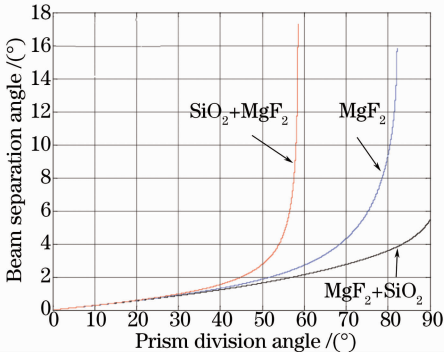


图 5 正晶体沃拉斯顿棱镜的分束角

Fig. 5 Beam separation angle of Wollaston prism of positive crystal

如图 5 所示, 利用(4)式计算由氟化镁单一材料构成的沃拉斯顿棱镜分束角(图 5 中蓝线所示), 利用(6)式计算由氟化镁和石英两种材料构成的沃拉斯顿棱镜分束角(图 5 中黑线所示), 利用(7)式计算由石英和氟化镁两种材料构成的沃拉斯顿棱镜分束角(图 5 中红线所示), 可见, 在同一棱镜切割角情况下红线表示的分离角大于蓝线和黑线, 也就是表示可以在小切割角情况下获得大分束角。

根据前面公式, 举几个不同的棱镜切割角作为具体例子来计算光束分离角如下表 1 所示, 可见, 由石英和氟化镁两种材料构成的沃拉斯顿棱镜分束角比用单一材料构成的沃拉斯顿棱镜, 在棱镜切割角大于 40° 的情况下显著增大。

表 1 各种沃拉斯顿棱镜分束角的比较

Table 1 Comparison of beam separation angle of different Wollaston prisms

Wollaston prism	Beam separation angle / ($^\circ$)			
Prism division angle / ($^\circ$)	40	45	50	55
Wollaston prism made of SiO_2 and MgF_2	1.5357	1.9898	2.7434	4.5497
Wollaston prism made of MgF_2	1.3078	1.5586	1.8576	2.2263
Wollaston prism made of SiO_2	1.3116	1.5632	1.8630	2.2328

图 6 为用于 193 nm 波长的由石英晶体和氟化镁晶体两种材料构成的沃拉斯顿棱镜, 是用 AutoCAD 软件绘制的尺寸图, 设计棱镜切割角为 58° , 输出两束线偏振光的分离角为 9.7356° , 满足分

束角约 10° 的要求, 而且计算该棱镜的长宽比为 1.60, 结构比较紧凑, 有利于检测装置整体的紧凑化。它可以应用于两束线偏振光同时检测的偏振态监测系统中, 例如实时监测照明光瞳的斯托克斯参

量 S_1 的变化,如果发现 S_1 变化超过一定阈值,那么触发系统进行全部斯托克斯参量的测量。

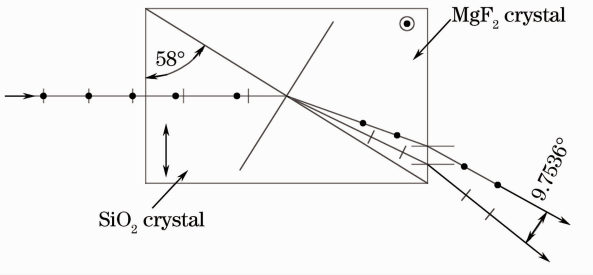


图 6 由石英和氟化镁晶体构成的沃拉斯顿棱镜

Fig. 6 Wollaston prism made of SiO_2 and MgF_2 crystal

3.2 单偏振光束输出设计

设计另一种用于 ArF 光刻机偏振照明系统中的沃拉斯顿棱镜,要求仅仅输出一束线偏振光束。

对于由正单轴晶体制作的沃拉斯顿棱镜,在第一块直角三棱镜内的 e 光,折射进入第二块直角三棱镜时变成 o 光,将远离界面法线折射。这样,当切

割角大于或等于 e 光的临界角时,将发生全内反射,不能进入第二块直角三棱镜,该 o 光可以从棱镜侧面引出,或在侧面涂黑漆吸收掉。而第一块直角三棱镜内的 o 光,则变成 e 光,将靠近界面法线折射,因此就得到唯一的一束线偏振输出光(e 光)。这样,设计一种正晶体切割角大于或等于 e 光的临界角,就得到唯一的一束线偏振输出光。

按照传统技术选择同一材料(氟化镁晶体,或石英晶体)的两块三棱镜制作沃拉斯顿棱镜,在 193 nm 波长下氟化镁折射率为 $n_o = 1.42767$, $n_e = 1.44127$,石英晶体折射率为 $n_o = 1.66091$, $n_e = 1.67455$,计算氟化镁晶体和石英晶体的 e 光的临界角分别为 82.1227° 和 82.6820° 。

因为氟化镁临界角小于石英,所以设计氟化镁晶体切割角为 82.5° ,图 7 是用 AutoCAD 软件绘制的尺寸图,从该沃拉斯顿棱镜的左表面入射一束光,将从右表面得到仅仅一束线偏振光,与右表面法线的夹角为 4.846° 。

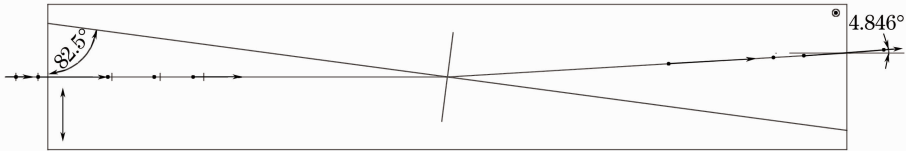


图 7 由氟化镁晶体构成的沃拉斯顿棱镜输出一束光

Fig. 7 Wollaston prism made of MgF_2 crystal outputs one beam

从图 7 可以看出,设计输出一束线偏振光,棱镜切割角需要为 82.5° ,可以计算棱镜的长宽比为 7.60,棱镜结构较长。为了解决这个棱镜结构较长的问题,采用由石英晶体和氟化镁晶体两种材料构成的沃拉斯顿棱镜,计算在石英晶体中 e 光和 o 光的临界角分别为 58.4922° 和 60.1993° 。

由石英晶体和氟化镁晶体两种材料构成的沃拉斯顿棱镜,两种材料在斜边通过光胶方式直接光学接触,设计其切割角为 59° ,那么在石英晶体中 e 光大于临界角,发生全内反射;而在石英晶体中 o 光小于临界角,折射进入氟化镁晶体,变成 e 光,从而输出一束线偏振光。图 8 是用 AutoCAD 软件绘制的尺寸图,从该沃拉斯顿棱镜的左表面入射一束光,将从右表面得到仅仅一束线偏振光,与右表面法线的夹角为 32.739° 。与图 7 相比,该棱镜的长宽比为 1.66,结构比较紧凑,有利于检测装置整体的紧凑化。它可以应用于通过 $1/4$ 波片调制一束线偏振光的光强来检测斯托克斯参量的偏振态测量系统中,例如测量照明光瞳的全部斯托克斯参量的偏振测量系统。

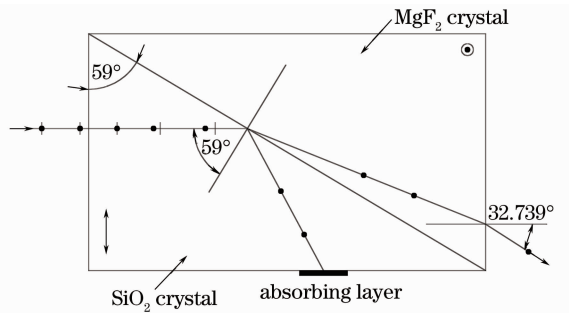


图 8 由石英和氟化镁晶体构成的沃拉斯顿棱镜输出一束光

Fig. 8 Wollaston prism made of SiO_2 and MgF_2 crystal outputs one beam

3.3 透射率分析

上面基于石英和氟化镁晶体两种材料设计的沃拉斯顿棱镜,由于在两种材料的界面两侧折射率发生变化,可能导致透射率的变化,而沃拉斯顿棱镜入射面和出射面可以通过镀增透膜的方式改善透射率,因此,下面分析不同棱镜切割角时两种材料的界面透射率的变化情况。根据菲涅耳公式^[4],选择石英晶体和氟化镁晶体两块三棱镜制作沃拉斯顿棱镜,在 193 nm

波长下氟化镁折射率为 $n_o = 1.42767$, $n_e = 1.44127$, 石英晶体折射率为 $n_o = 1.66091$, $n_e = 1.67455$, 用 Matlab 软件编程计算得到结果如图 9 所示, 其中横轴为棱镜切割角(也就是两种材料界面的入射角), 纵轴为透射率, 红线表示在第一块棱镜(石英晶体)中的 e 光透射率, 绿线表示在第一块棱镜(石英晶体)中的 o 光透射率, 从图中可见, 在棱镜切割角小于 50 度时, 两束光的透射率都大于 95%。

Wollaston prism (positive uniaxial crystal at 193 nm)

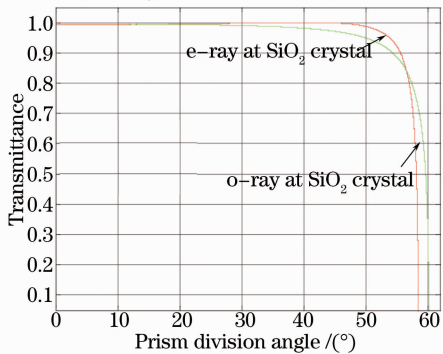


图 9 由石英和氟化镁晶体构成沃拉斯顿棱镜的界面透射率(切割角从 0°~60°)

Fig. 9 Transmittance at interface of Wollaston prism made of SiO₂ and MgF₂ crystal (division angle is from 0°~60°)

而对上面设计的由石英和氟化镁晶体材料构成的沃拉斯顿棱镜(两种棱镜的切割角分别为 58°和 59°), 图 10 所示是图 9 在切割角从 50°到 61°的细节, 可见, 计算得到 58°棱镜的两束光的透射率分别为 60.4%和 76.5%, 而 59°棱镜的一束光的透射率为 65.9%。由于本项目所采用的 CCD 探测器灵敏度很高, 需要加入光强衰减片进行探测, 因此, 这两种棱镜界面透射率的下降对本项目不产生影响。而对其他应用来讲, 根据具体情况可以对界面透射率和光束分离角进行综合平衡分析, 而进行具体设计。

4 结 论

通过分析可以得到 2 点结论: 1) 由两种正晶体材料构成的沃拉斯顿棱镜的分束角比由单一正晶体构成的沃拉斯顿棱镜有较大的提高, 这样有利于偏振照明系统装置整体的紧凑化; 2) 按照由两种正晶体

Wollaston prism (positive uniaxial crystal at 193 nm)

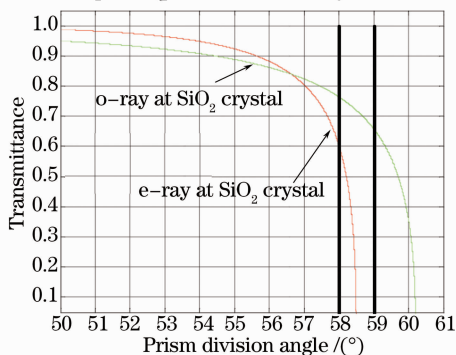


图 10 由石英和氟化镁晶体构成沃拉斯顿棱镜的界面透射率(切割角从 50°~61°)

Fig. 10 Transmittance at interface of SiO₂ and MgF₂ crystal (division angle is from 50°~61°)

材料构成沃拉斯顿棱镜的思路来设计仅输出一束线偏振光的沃拉斯顿棱镜, 也比由单一正晶体构成沃拉斯顿棱镜的结构紧凑。提出一种在 193 nm 波段产生一束线偏振光的棱镜解决方案, 与需要满足布儒斯特角的用反射镜产生一束线偏振光的方案相比, 角度调整精度的要求可以降低, 而且结构稳定。

参 考 文 献

- 1 Zhu Huafeng, Nan Yujie, Yun Maojin, *et al.*. Precise analysis of the intensity splitting ratio of double Wollaston prism[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0623002.
- 2 Shi Meng, Wu Fuquan. The principle design and performance analysis of two-way symmetric splitting angle beam splitting prism[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(3): 439-442.
- 3 Xue Lin, Wu Fuquan, Jiang Linlin. Effect of Wollaston prism on splitting properties of divergent beam[J]. Laser Technology, 2011, 35(6): 833-836.
- 4 Liao Yanbiao. Polarization Optics[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- 5 Zhu Jiukai, Wu Fuquan, Ren Shufeng. Forward and backward splitting angles of Wollaston prisms and their symmetry[J]. Laser Technology, 2012, 36(5): 636-638.
- 6 Zhu Jiukai, Wu Fuquan, Ren Shufeng. Wollaston prism positive and negative splitting angles and their symmetry[J]. Laser Technology, 2012, 36(5): 636-638.

栏目编辑: 韩 峰