

经典文献中洛匈棱镜分束角公式问题澄清

李东风 李如意 杨春旺 周珺 陆守香

Clarification on the beam deviation angle formula of a Rochon prism in classical literatures

LI Dong-feng, LI Ru-yi, YANG Chun-wang, ZHOU Jun, LU Shou-xiang

引用本文:

李东风, 李如意, 杨春旺, 周珺, 陆守香. 经典文献中洛匈棱镜分束角公式问题澄清[J]. *中国光学*, 2025, 18(6): 1344–1352. doi: 10.37188/CO.2025–0036

LI Dong-feng, LI Ru-yi, YANG Chun-wang, ZHOU Jun, LU Shou-xiang. Clarification on the beam deviation angle formula of a Rochon prism in classical literatures[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(6): 1344-1352. doi: 10.37188/CO.2025-0036

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025–0036>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

二维 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 的制备与光学表征研究进展

Recent progress on synthesis and optical characterization of two-dimensional $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$

中国光学 (中英文). 2023, 16(1): 24 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0071>

基于Yb:CALGO晶体激光器的偏振复用

Polarization-multiplexing of a laser based on a bulk Yb:CALGO crystal

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1475 <https://doi.org/10.37188/CO.EN–2023–0005>

石墨烯缺陷对光子晶体光吸收特性的调制

The modulation effect of graphene defects on the light absorption properties of photonic crystals

中国光学 (中英文). 2022, 15(3): 418 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0203>

石墨烯等离激元时间晶体中的慢光

Slow light in graphene plasmonic time crystals

中国光学 (中英文). 2022, 15(4): 845 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0201>

基于最小偏向角法的高精度液体折射率测量装置的优化设计与测量研究

Optimization design and test of a high-precision measuring device of liquid refractive index based on the method of minimum deviation angle

中国光学 (中英文). 2022, 15(4): 789 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0064>

悬空氧化铟纳米线晶体管制备与光电性能表征

Fabrication and optoelectronic characterization of suspended In_2O_3 nanowire transistors

中国光学 (中英文). 2021, 14(1): 196 <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0062>

文章编号 2097-1842(2025)06-1344-09

经典文献中洛匈棱镜分束角公式问题澄清

李东风^{1,2}, 李如意², 杨春旺², 周 璿³, 陆守香^{1*}

- (1. 火灾科学国家重点实验室, 安徽合肥 230037;
2. 安徽芯核防务装备技术股份有限公司, 安徽合肥 230088;
3. 公安部第一研究所, 北京 100048)

摘要:在科研项目研发过程中发现经典光学文献中的洛匈棱镜(Rochon prism)的分束角公式(针对负晶体)是错误的,为此推导了准确的洛匈棱镜分束角表达式(分别针对负晶体、正晶体),并解决了科研项目中包含洛匈棱镜的光学系统设计错误问题。针对一般洛匈棱镜产品输出的2束光的夹角较小的问题,推导了分别由负晶体、正晶体构成的洛匈棱镜的分束角表达式。另外,对由异种晶体材料构成的洛匈棱镜的分束角进行了分析并推导出表达式。通过实际数据计算和比较可知,由异种晶体材料构成洛匈棱镜的分束角比由同种晶体材料构成洛匈棱镜的分束角有很大的提高。对于在紫外波段的应用,具体给出一种由异种晶体材料构成洛匈棱镜的较大分束角的设计实例。这种由异种晶体材料构成洛匈棱镜,按照合适的晶体排列顺序,可以在合理的晶体厚度的限制下获得相对较大的分束角度,这显然是有利于偏振仪器设备的结构设计。

关键词:洛匈棱镜;石英晶体;氟化镁晶体;o光;e光

中图分类号:O436.3;O439; 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2025-0036 CSTR:32171.14.CO.2025-0036

Clarification on the beam deviation angle formula of a Rochon prism in classical literatures

LI Dong-feng^{1,2}, LI Ru-yi², YANG Chun-wang², ZHOU Jun³, LU Shou-xiang^{1*}

- (1. State Key Laboratory of Fire Science, Hefei 230037, China;
2. Anhui Core Defense Equipment Technology Co. Ltd., Hefei 230088, China;
3. The First Research Institute of the Ministry of Public Security, Beijing 100048, China)

* Corresponding author, E-mail: sxlu@ustc.edu.cn

Abstract: During the research and development process of the scientific research project, it was found that the beam deviation angle formula of a Rochon prism in classical optical literatures (for negative crystals) was incorrect. Therefore, an accurate expression for the beam deviation angle of a Rochon prism was derived (distributed for negative and positive crystals), and the problem of design in the optical systems containing a Rochon prism in the scientific research projects was solved. In response to the problem of small angles between the two output beams of light in general a Rochon prism products, the expressions for the deviation

收稿日期:2025-03-03; 修订日期:2025-03-20

基金项目:公安部科技计划项目(No. 2022ZB12)

Supported by the Science and Technology Program Project of the Ministry of Public Security (No. 2022ZB12)

angles of a Rochon prism composed of negative and positive crystals, respectively, were analyzed and derived. In addition, the deviation angles of a Rochon prism composed of different crystal materials were analyzed and the expression was derived. By calculating and comparing with actual data, it is known that the beam deviation angle of a Rochon prism made of different crystal materials is significantly higher than that of a Rochon prism made of the same crystal material. For applications in the ultraviolet band, a specific design example of a large beam deviation angle for a Rochon prism composed of heterogeneous crystal materials is provided. This type of a Rochon prism is composed of heterogeneous crystal materials, and according to the appropriate crystal arrangement order, a relatively large beam deviation angle can be obtained under the limitation of reasonable crystal thickness, which is obviously beneficial for the structural design of the polarization instruments and equipments.

Key words: Rochon prism; quartz; MgF_2 crystal; o ray; e ray

1 引言

在研究偏振检测装置科研项目过程中,采用经典光学文献中的洛匈棱镜(Rochon prism)的分束角公式来设计加工以及装配了偏振态检测用光学系统,然后在应用该偏振检测装置测量光学系统的偏振态实验过程中发现在 CCD 上探测到重影,这表明洛匈棱镜分开的 o 光和 e 光都被 CCD 探测到(设计方案应该是 e 光被遮拦),导致该科研项目受到重大挫折。为了解决该偏振检测装置的工程实际问题,推导了准确的洛匈棱镜分束角公式(分别针对负晶体、正晶体),同时指出了经典光学文献中的洛匈棱镜分束角公式(是针对负晶体)是错误的。这样就可以使光学领域技术人员不再被经典光学文献上洛匈棱镜分束角公式所误导,澄清一个重大的是非问题。

偏振分束器是各种偏振光学系统、偏振仪器设备中的一种重要器件。其通过应用晶体光学原理能够将振动方向相互垂直的两束偏振光从空间上分开。常用偏振分束器一般有三种:沃拉斯顿(Wollaston)棱镜、洛匈(Rochon)棱镜和塞拿蒙(Senarmont)棱镜。沃拉斯顿棱镜^[1-4]输出的 2 束线偏振光方向都与入射光方向成一定的夹角,分居入射光束轴线两侧。而一般的洛匈棱镜输出的 2 束线偏振光,其中一束的方向和入射光束同轴(即沿着原入射光束方向传输),而另一束的方向则与入射光束成一定的夹角。而塞拿蒙棱镜的前半块晶体的光轴方向与洛匈棱镜相同,而后半块晶体的光轴方向与洛匈棱镜的光轴成 90° ,导

致与入射光束同轴输出的 o 光振动方向垂直其主截面,而且 e 光的偏折角度略小于洛匈棱镜。由于洛匈棱镜具有显著优势,故其广泛应用于光度学,并作为偏振分束镜使用。洛匈棱镜是一种比较重要的偏振器件,得到许多研究人员和工业界人士的兴趣。文献 [5] 将洛匈棱镜用于空间型晶体退偏器的偏振度测量实验。文献 [6] 推导了由冰洲石晶体(即方解石)构成的洛匈棱镜分束角的表达式。文献 [7] 给出了洛匈棱镜正、反向使用时分束角的精确表达式。文献 [8] 基于惠更斯原理,通过几何光学作图法得到了由负晶体构成的洛匈棱镜的分束角与棱镜几何结构参数及双折射参量的量化关系。文献 [9-11] 给出了洛匈棱镜的分束角和切割角的关系表达式。

西北工业大学的 LVMB^[12]从理论上分析了在由单轴吸收材料制成的洛匈棱镜中传播的非均匀平面波的特性,利用光线追迹法推导了有吸收损耗的洛匈棱镜中寻常光和非常光的传播和衰减表达式。当光线垂直入射时,分析和讨论了非均匀平面波在有吸收损耗的洛匈棱镜中的传播特性。北京大学的 WANG B^[13]等通过操纵硅纳米块组分的取向和尺寸,同时控制几何相位和传播相位,设计制作了基于介电超表面的类似于洛匈棱镜功能的圆偏振光分束器。北京交通大学的 WANG X^[14]提出了一种基于洛匈棱镜的数字剪切散斑干涉测量技术的改进方法。其优点是避免了透射光引起的阴影噪声,通过减小发散角、改善干涉光路的分光路径,从而提高了剪切散斑的精度。实验结果证明,改进后的方法有助于剪切散斑术的实际应用和仪器化应用。深圳大学袁小

聪团队^[15]提出了一种基于超表面的非交错器件。该器件利用圆偏振光的透射共偏振和交叉偏振通道设计一种自旋可切换的功能类似于沃拉斯顿棱镜和洛匈棱镜的圆偏振光分束器。这些超表面和超材料在调控光波和电磁波的相关研究中得到应用,表明超表面和超材料较自然界中的晶体更容易产生各向异性电磁响应,并且可以产生极度各向异性的介质,而这种极端各向异性人造结构材料,有可能更容易产生较大的分束角度,但这还有待于科研人员研究开发出成熟的商用产品以用于工程实践。

文献 [16-20] 中的洛匈棱镜一般都是用负晶体推导出的表达式,而且一般讨论的都是方解石晶体。针对紫外波段(例如 193 nm 波长)的偏振分光洛匈棱镜的实际需求,目前已知仅能使用氟化镁或石英晶体等正晶体,因此需要分析推导由正晶体构成的洛匈棱镜的分束角表达式。

由于棱镜切割角以及材料等的限制,一般的洛匈棱镜产品输出的 2 束光的夹角不大。经调研,本文采用由异种晶体材料构成的洛匈棱镜,并比较不同的异种晶体材料顺序对分束角的不同影响。通过实际计算知道,由异种晶体材料构成洛匈棱镜的分束角比由同种晶体材料构成洛匈棱镜的分束角有一定的改善。对于在紫外波段的应用,给出了一种由异种晶体材料构成的具有较大分束角的洛匈棱镜设计实例。这种由异种晶体材料构成洛匈棱镜,按照合适的晶体顺序排列,可以在合理的晶体厚度下获得相对较大的分束角度,显然是有利于偏振仪器设备的结构设计。

2 经典文献中洛匈棱镜分束角公式的错误

2.1 经典文献中洛匈棱镜分束角公式

洛匈棱镜是一种最普通的偏振分束器,其原理如图 1 所示,光束垂直入射到洛匈棱镜的前半部分,由于入射光沿着棱镜光轴前进,那么折射率仍为 n_o ,即以相同的相速度向同一方向传播。棱镜的后半部分和前半部分的光轴相互垂直,因此光束进入棱镜后半部分后, o 光传播方向不变,而 e 光在分界面发生折射而分成两束光, o 光的电矢量振动方向在图纸平面内(如图 1 短线所

示), e 光电矢量的振动方向垂直于 o 光,如图 1 黑点所示。

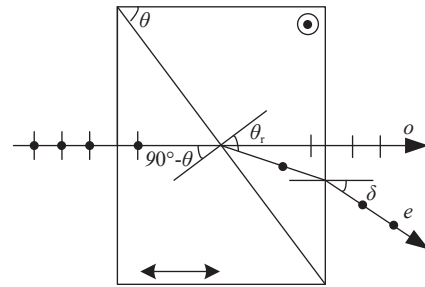


图 1 由负单轴晶体构成的洛匈棱镜的原理

Fig. 1 Principle of Rochon prism composed of negative uniaxial crystal

假设以 θ 表示负晶体棱镜的切割角,则 o 光和 e 光的分束角与 θ 的关系为(文献 [9] 的表达式 (1)):

$$\tan \theta = (n_o - n_e) / \sin \delta_0 + \sin \delta_0 / 2n_e, \quad (1)$$

其中, θ 为棱镜的切割角, δ_0 为棱镜的分束角, n_o 和 n_e 分别为 o 光和 e 光的折射率。

文献 [10-11] 的洛匈棱镜分束角与切割角的关系表达式为:

$$\tan S = \frac{n_o - n_e}{n_e \sin \delta} + \frac{\sin \delta}{2}, \quad (2)$$

其中, S 为棱镜切割角, δ 为棱镜的分束角, n_o 和 n_e 分别为 o 光和 e 光的折射率。

文献 [10] 和文献 [11] 的公式完全相同,而和文献 [9] 表达式不同,具体表现为 e 光折射率 n_e 出现在了不同的分母位置,即式(1)的 n_e 在第二部分的分母位置,而式(2)的 n_e 在第一部分的分母位置,显然有一个表达式是错误的,或者二者都是错误的。

2.2 准确的负晶体洛匈棱镜分束角公式推导

下面推导基于负晶体的洛匈棱镜的分束角公式,如图 1 所示,在棱镜前半部分中 o 光和 e 光同向传播,由于前后两部分的交界面是负晶体,则有 $n_e < n_o$,这样 e 光经过棱镜后的折射角为 δ' 。而 o 光方向不变。因此,可以将 e 光的行为表示为如下的表达式:

$$\begin{cases} n_o \cdot \sin(\pi/2 - \theta) = n_e \cdot \sin \theta_r \\ n_e \cdot \sin(\theta_r + \theta - \pi/2) = \sin \delta \end{cases}, \quad (3)$$

式中 θ_r 为折射角。求解方程组(4),可得到负晶体

构成的洛匈棱镜的光束分离角为:

$$\sin \delta' = \left(n_o \sin \theta - \sqrt{n_c^2 - n_o^2 \cos^2 \theta} \right) \cos \theta \quad (4)$$

其中, δ' 为光束分离角。

2.3 分析经典文献中洛匈棱镜分束角公式错误的原因

表达式(4)中根式内的部分需要大于等于零, 即棱镜的切割角需要满足下述条件:

$$n_c^2 - n_o^2 \cos^2 \theta \geq 0 \Rightarrow \cos \theta \leq \frac{n_c}{n_o} \Rightarrow \theta \geq \arccos\left(\frac{n_c}{n_o}\right) \quad (5)$$

由于棱镜的切割角和棱镜内前后两部分分界面的入射角互为余角(如图 1 所示), 即入射角需要满足下述条件:

$$(\pi/2 - \theta) \leq \arcsin\left(\frac{n_c}{n_o}\right) \quad (6)$$

式(7)正是在棱镜内前后两部分分界面处不发生全内反射时的临界条件, 即入射角如果大于式(7)右边的角度(即临界角), 那么将发生全内反射, 此时, e 光无法传输到棱镜的后半部分。

以常用的方解石(负晶体)为例, 其 o 光和 e 光折射率分别为 1.65835 和 1.48640(@589 nm 波长), 根据式(6)可计算入射临界角为: 63.68°, 对应的棱镜切割角为 26.32°。

而式(1)、式(2)则没有可以判断全内反射条件的要素。这样在某些情况下就可能会出现错误的结果。还是以方解石晶体为例, 根据式(1)、式(2)得出方解石晶体切割角和分束角之间的关系, 如图 2(彩图见期刊电子版)所示, 由式(4)得到的结果如图 3 所示。

从图 2 可知, 由文献 [10] 和 [11] 的切割角和分束角之间的关系曲线可知, 在棱镜切割角约小于 31° 时, 会有 2 个分束角, 这显然是不合理的。同样由根据文献 [9] 得到的曲线可知, 在棱镜切割角小于约 26° 时, 会有 2 个分束角, 这显然也是不合理的。由文献 [9] 的曲线切割角的最小值为 25.68772°, 按文献 [10] 和 [11] 得到的曲线切割角的最小值为 25.68774°, 二者均超过了全内反射临界角的物理限制, 这显然也是不合理的。此外, 由图 2~图 3 可知, 当棱镜切割角大于 26.32° 时, 按文献 [9] 的曲线(红线)更接近图 3 中的曲线, 而文献 [10] 和 [11] 的曲线则与图 3 中曲线差别较大。

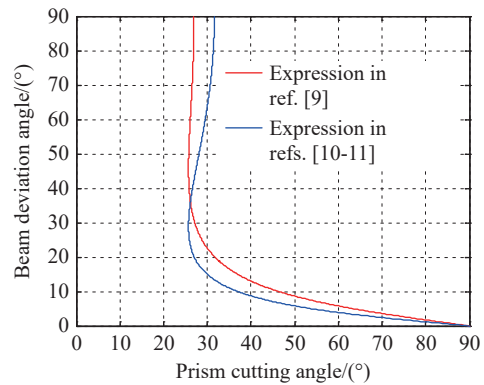


图 2 文献 [9] 及文献 [10-11] 推导的切割角和分束角之间的关系

Fig. 2 Relationship between cutting angle and beam deviation angle in Ref. [9] and Refs. [10-11]

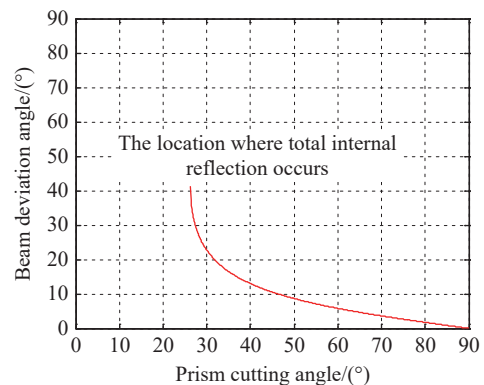


图 3 本文推导的切割角和分束角之间的关系@方解石晶体

Fig. 3 Relationship between cutting angle and beam deviation angle in this paper

将按文献 [9-11] 公式和按本文推导的曲线放到一起展示。如图 4(全部)和图 5(局部放大图)(彩图见期刊电子版)所示。其中, 蓝线是文献 [9] 得到的曲线, 红线是根据本文推导得到的曲线, 绿线是文献 [10-11] 得到的曲线。

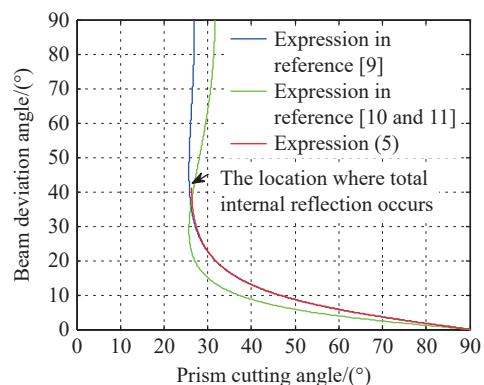


图 4 切割角和分束角之间的关系

Fig. 4 Relationship between cutting angle and beam deviation angle

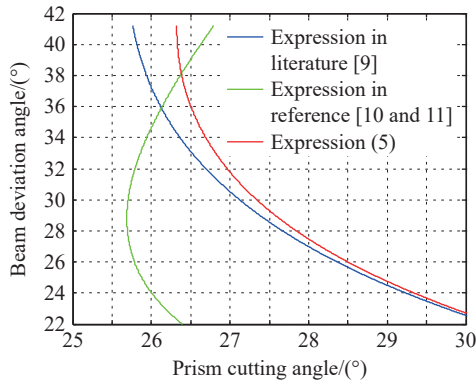


图 5 切割角和分束角之间的关系(图 4 局部放大图)

Fig. 5 Relationship between cutting angle and beam deviation angle (partial enlarged view of Fig. 4)

2.4 正晶体洛匈棱镜分束角公式推导

文献 [9-11] 都没有给出由正晶体构成的洛匈棱镜的分束角和切割角关系的表达式, 本文对此展开研究。

由正单轴晶体构成的洛匈棱镜原理如图 6 所示, 在棱镜前半部分中 o 光和 e 光同向传播。在前后两部分的交界面处, 对于正晶体, 有 $v_e < v_o$, 此时 e 光经过棱镜后将发生折射(折射角为 δ), 而 o 光保持方向不变由棱镜射出。根据折射定律, 将 e 光的 2 次折射写成如下形式:

$$\begin{cases} n_o \cdot \sin(\pi/2 - \theta) = n_e \cdot \sin \theta_r \\ n_e \cdot \sin(\pi/2 - \theta_r - \theta) = \sin \delta \end{cases} \quad (7)$$

求解方程组(7), 可得到正晶体构成的洛匈棱镜的光束分离角为:

$$\sin \delta' = \left(\sqrt{n_e^2 - n_o^2 \cos^2 \theta} - n_o \sin \theta \right) \cos \theta \quad (8)$$

式中 δ' 为光束分离角。

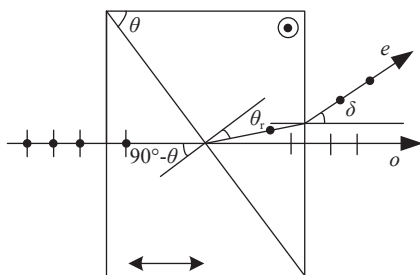


图 6 由正单轴晶体构成的洛匈棱镜的原理

Fig. 6 Principle of a Rochon prism composed of positive uniaxial crystals

对于式(8)中根号内部分, 由于正晶体 $n_e > n_o$, 则有 $n_e^2 - n_o^2 \cos^2 \theta > 0$ 。由于在洛匈棱镜的出射面

上的入射角通常比较小(如图 6 所示), 一般不会发生全内反射, 因此 e 光一般都可以射出。

以常用的石英晶体、氟化镁晶体(都是正晶体)为例, 石英晶体的 o 光和 e 光折射率分别为 1.66091 和 1.67455(@193nm 波长), 氟化镁晶体的 o 光和 e 光折射率分别为 1.42767 和 1.44127(@193 nm 波长), 根据式(8)可以得到如图 7 所示结果。

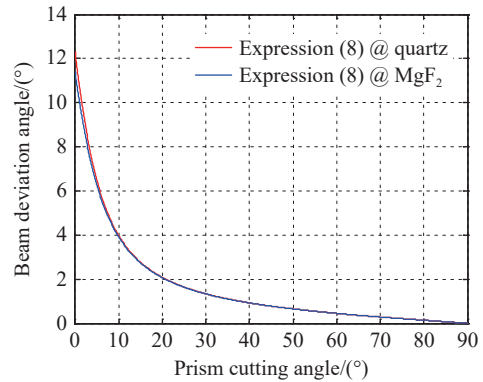


图 7 由式(8)得到的由正晶体构成的洛匈棱镜的切割角和分束角之间的关系(193 nm 波长)

Fig. 7 Relationship between cutting angle and beam deviation angle of a Rochon prism composed of positive crystals, derived from equation 8 at 193 nm wavelength

根据图 7 可知, 氟化镁晶体洛匈棱镜和石英晶体洛匈棱镜的分束角比较接近, 都比较小。

3 设计分束角较大的洛匈棱镜

3.1 两种正晶体构成洛匈棱镜分束角公式的推导

设计一种大分束角的洛匈棱镜, 希望达到的分束角为 9.9° , 这样棱镜切割角需要小于 1° (氟化镁晶体)或小于 1.5° (石英晶体), 这样设计的棱镜将非常长。通过实际计算知道, 由异种晶体材料构成洛匈棱镜的分束角比由同种晶体材料构成洛匈棱镜更容易获得较大的分束角。

先经过氟化镁晶体再经过石英晶体的光路顺序, 图 8(a)所示。根据紫外波段的两种正晶体的特性, 显然知道出射光的方向。先经过石英晶体再经过氟化镁晶体的光路如图 8(b)所示。

首先, 分析图 8(a)所示的情况。根据折射定律推导由两种晶体材料构成的洛匈棱镜的分束角公式。

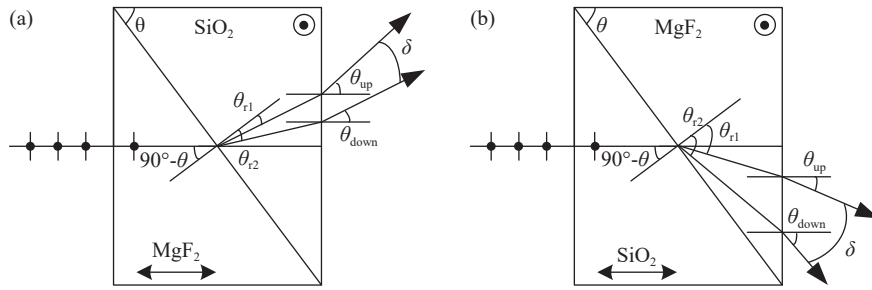


图 8 两种正晶体构成的洛匈棱镜光路。(a) 氟化镁+石英; (b) 石英+氟化镁

Fig. 8 Optical path of the Rochon prism made of two types of positive crystal: (a) magnesium fluoride and quartz; (b) quartz and magnesium fluoride

对于 e 光, 形成上光束, 出射角度为 θ_{up} , 满足式(9)所示的折射定律:

$$\begin{cases} n_{oMgF_2} \cdot \sin(\pi/2 - \theta) = n_{eSiO_2} \cdot \sin \theta_{r1} \\ n_{eSiO_2} \cdot \sin(\pi/2 - \theta_{r1} - \theta) = \sin \theta_{up} \end{cases}, \quad (9)$$

可得,

$$\sin \theta_{up} = \left(\sqrt{n_{eSiO_2}^2 - n_{oMgF_2}^2 \cos^2 \theta} - n_{oMgF_2} \sin \theta \right) \cos \theta. \quad (10)$$

对于 o 光, 形成下光束, 出射角度为 θ_{down} , 满足式(11)所示的折射定律:

$$\begin{cases} n_{oMgF_2} \cdot \sin(\pi/2 - \theta) = n_{oSiO_2} \cdot \sin \theta_{r2} \\ n_{oSiO_2} \cdot \sin(\pi/2 - \theta_{r2} - \theta) = \sin \theta_{down} \end{cases}, \quad (11)$$

可得

$$\sin \theta_{down} = \left(\sqrt{n_{oSiO_2}^2 - n_{oMgF_2}^2 \cos^2 \theta} - n_{oMgF_2} \sin \theta \right) \cos \theta. \quad (12)$$

图 8(a) 中的分束角, 即 o 光和 e 光出射夹角为:

$$\delta = \arcsin \left(\left(\sqrt{n_{eSiO_2}^2 - n_{oMgF_2}^2 \cos^2 \theta} - n_{oMgF_2} \sin \theta \right) \cos \theta \right) - \arcsin \left(\left(\sqrt{n_{oSiO_2}^2 - n_{oMgF_2}^2 \cos^2 \theta} - n_{oMgF_2} \sin \theta \right) \cos \theta \right), \quad (13)$$

其中, n_{oSiO_2} 为石英晶体 o 光折射率, n_{eSiO_2} 为石英晶体 e 光折射率, n_{oMgF_2} 为氟化镁晶体 o 光折射率, n_{eMgF_2} 氟化镁晶体 e 光折射率。

对于先经过石英晶体再经过氟化镁晶体的光路顺序, 同理可得。

对于 e 光, 形成上光束, 出射角度为 θ_{up} , 满足式(14)的折射定律:

$$\begin{cases} n_{oSiO_2} \cdot \sin(\pi/2 - \theta) = n_{eMgF_2} \cdot \sin \theta_{r1} \\ n_{eMgF_2} \cdot \sin(\theta_{r1} + \theta - \pi/2) = \sin \theta_{up} \end{cases}, \quad (14)$$

可得

$$\sin \theta_{up} = \left(n_{oSiO_2} \sin \theta - \sqrt{n_{eMgF_2}^2 - n_{oSiO_2}^2 \cos^2 \theta} \right) \cos \theta. \quad (15)$$

对于 o 光, 形成下光束, 出射角度为 θ_{down} , 满足式(16)所示的折射定律:

$$\begin{cases} n_{oSiO_2} \cdot \sin(\pi/2 - \theta) = n_{oMgF_2} \cdot \sin \theta_{r2} \\ n_{oMgF_2} \cdot \sin(\theta_{r2} + \theta - \pi/2) = \sin \theta_{down} \end{cases}, \quad (16)$$

可得

$$\sin \theta_{down} = \left(n_{oSiO_2} \sin \theta - \sqrt{n_{oMgF_2}^2 - n_{oSiO_2}^2 \cos^2 \theta} \right) \cos \theta. \quad (17)$$

图 8(b) 中的分束角, 即 o 光和 e 光出射夹角为:

$$\delta = \arcsin \left(\left(n_{oSiO_2} \sin \theta - \sqrt{n_{oMgF_2}^2 - n_{oSiO_2}^2 \cos^2 \theta} \right) \cos \theta \right) - \arcsin \left(\left(n_{oSiO_2} \sin \theta - \sqrt{n_{eMgF_2}^2 - n_{oSiO_2}^2 \cos^2 \theta} \right) \cos \theta \right). \quad (18)$$

3.2 大分束角的洛匈棱镜设计

图 9(彩图见期刊电子版) 给出了几种由正晶体构成的洛匈棱镜的分束角结果。其中, 绿线表示由氟化镁晶体构成洛匈棱镜分束角, 蓝线表示由石英晶体构成洛匈棱镜分束角, 可见二者比较接近。黑线表示光先经过氟化镁再经过石英晶体的洛匈棱镜分束角, 红线表示先经过石英晶体再经过氟化镁晶体的洛匈棱镜分束角, 可见红线和黑线距离较远。显然先经过石英晶体再经过氟化镁晶体的光路顺序, 可以获得更大的分束角。

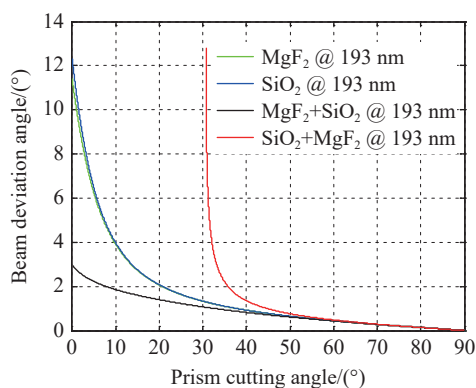


图 9 几种正晶体洛匈棱镜的分束角

Fig. 9 Beam deviation angles of a Rochon prism composed of several types of positive uniaxial crystals

表 1 为各种洛匈棱镜分束角的实际数据。显然,按照先经过石英晶体再经过氟化镁晶体的光路顺序制作的洛匈棱镜的分束角最大。

表 1 各种洛匈棱镜分束角的比较

Tab. 1 Comparison of beam deviation angles of several kinds of a Rochon prisms (RP)

Rochon prisms (RP)	Prism cutting angle/(°)	RP made of Quartz and MgF ₂	RP made of MgF ₂	RP made of Quartz	RP made of MgF ₂ and Quartz
Beam deviation angle/(°)	30.78	9.9474	1.2914	1.2974	1.0550
	32	4.1185	1.2324	1.2380	1.0213
	37	1.7548	1.0257	1.0298	0.8925
	42	1.1850	0.8605	0.8637	0.7767
	47	0.8897	0.7237	0.7262	0.6717

图 10 为对于紫外波段的应用,按照先经过石英晶体再经过氟化镁晶体的光路顺序制作洛匈棱镜,其中设计棱镜切割角为 30.78°。这样输出两束线偏振光的分束角为 9.947°,满足分束角为 9.9°的要求。

参考文献:

- [1] 朱化凤,南玉杰,云茂金,等.双沃拉斯顿棱镜光强分束比精确分析[J].*光学学报*,2012,32(6):0623002. ZHU H F, NAN Y J, YUN M J, *et al.*. Precise analysis of the intensity splitting ratio of double wollaston prism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0623002. (in Chinese).
- [2] 史萌,吴福全.双向分束角对称的偏光分束镜设计与性能分析[J].*光子学报*,2006,35(3):439-442. SHI M, WU F Q. The principle design and performance analysis of two-way symmetric splitting angle beam splitting prism[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(3): 439-442. (in Chinese).
- [3] 薛林,吴福全,蒋琳琳. Wollaston 棱镜对发散光束的分束特性分析[J].*激光技术*,2011,35(6):833-836. XUE L, WU F Q, JIANG L L. Effect of Wollaston prism on splitting properties of divergent beam[J]. *Laser Technology*, 2011, 35(6): 833-836. (in Chinese).
- [4] 蔡燕民,王向朝,黄惠杰.用于 ArF 光刻机偏振照明系统的沃拉斯顿棱镜的设计[J].*中国激光*,2014,41(6):0616002.

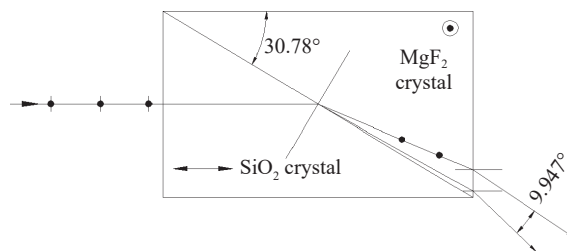


图 10 由石英和氟化镁晶体构成的洛匈棱镜

Fig. 10 A Rochon prism made of Quartz and magnesium fluoride crystals

4 结 论

本文通过分析传统文献中负晶体洛匈棱镜分束角的表达式,发现其存在错误,故根据折射定律推导了由负晶体构成洛匈棱镜分束角的一般表达式,并补充推导了由正晶体构成的洛匈棱镜的分束角表达式。经过比较和讨论,给出文献 [9-11] 中的洛匈棱镜分束角的表达式不准确的明确结论。澄清了一个重大的是非问题,可以避免光学领域技术人员继续被经典光学文献上洛匈棱镜分束角公式误导,避免以讹传讹。

本文提出一种采用石英晶体和氟化镁晶体两种材料构成洛匈棱镜的思路,通过实际计算知道,由异种晶体材料构成洛匈棱镜的分束角比由同种晶体材料构成洛匈棱镜的分束角大。对于在紫外波段的应用,具体给出一种由异种晶体材料构成洛匈棱镜的较大分束角的设计实例。这种由异种晶体材料构成洛匈棱镜,按照合适的晶体排列顺序,可以在有限的晶体厚度下获得相对较大的分束角度,有利于偏振仪器设备的结构设计。

- CAI Y M, WANG X ZH, HUANG H J. Design of Wollaston prism used for polarization illumination system in ArF lithography tool[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(6): 0616002. (in Chinese).
- [5] 罗云瀚, 王芳, 葛菁华, 等. 基于洛匈棱镜的偏振度测量与空间退偏度分析方法研究[J]. *光子学报*, 2014, 43(9): 0912002.
- LUO Y H, WANG F, GE J H, *et al.*. Simultaneous measurement of the degree of polarization and spatial analysis of depolarization based on a Rochon prism[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(9): 0912002. (in Chinese).
- [6] 侯影, 石广立, 冯彤, 等. 洛匈棱镜分束角的光谱效应及入射角效应[J]. *曲阜师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 38(2): 73-76.
- HOU Y, SHI G L, FENG T, *et al.*. The spectral and the incident angle's effections of the los Austro-Hungarian prism's splitting angle[J]. *Journal of Qufu Normal University (Natural Science)*, 2012, 38(2): 73-76. (in Chinese).
- [7] 陈西园, 单明. 洛匈棱镜的正反向特性[J]. *光学技术*, 2006, 32(2): 280-283.
- CHEN X Y, SHAN M. Characteristics of the Rochan prism in forward-use and backward-use[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(2): 280-283. (in Chinese).
- [8] 吴许强. 利用惠更斯原理作图解释罗雄棱镜的工作原理[J]. *合肥师范学院学报*, 2023, 41(3): 59-62.
- WU X Q. Graphical explanation of the working principle of Luo Xiong prism using Huygens' Principle[J]. *Journal of Hefei Normal University*, 2023, 41(3): 59-62. (in Chinese).
- [9] STEINRNETZ D L, PHILLIPS W G, WIRICK M, *et al.*. A polarizer for the vacuum ultraviolet[J]. *Applied Optics*, 1967, 6(6): 1001-1004.
- [10] 廖廷彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 206-207.
- LIAO Y B. *Polarization Optics*[M]. Beijing: Science Press, 2003: 206-207. (in Chinese).
- [11] 李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1986: 526-527.
- LI J ZH. *Optical Handbook*[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1986: 526-527. (in Chinese).
- [12] LV M B, WANG P. Ray tracing in Rochon prisms with absorption[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14676-14690.
- [13] WANG B, DONG F L, FENG H, *et al.*. Rochon-prism-like planar circularly polarized beam splitters based on dielectric metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1660-1664.
- [14] WANG X, GAO Z, GAO C J, *et al.*. Digital shearing speckle pattern interferometry based on Rochon prism and its application[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(12): 2554.
- [15] KHALID A U R, ULLAH N, HAN Y, *et al.*. Metasurface based spin-selective wollaston-and-Rochon-prism-like circularly polarized beam splitter[J]. *Advanced Theory and Simulations*, 2023, 6(1): 2200574.
- [16] 张郁文, 刘丙才, 王红军, 等. 同步相移横向剪切干涉中偏振器件的误差建模[J]. *中国光学(中英文)*, 2024, 17(3): 640-647.
- ZHANG Y W, LIU B C, WANG H J, *et al.*. Error modeling of polarization devices in simultaneous phase-shifted lateral shearing interferometry[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(3): 640-647. (in Chinese).
- [17] 张智森, 王承邈, 谢冕, 等. 基于超构透镜的微型头戴式荧光显微镜设计[J]. *中国光学(中英文)*, 2024, 17(3): 512-520.
- ZHANG ZH M, WANG CH M, XIE M, *et al.*. Design of miniature head-mounted fluorescence microscope based on metalens[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(3): 512-520. (in Chinese).
- [18] 张旭, 李世杰, 刘丙才, 等. 凹非球面的非零位干涉检测技术[J]. *中国光学(中英文)*, 2024, 17(1): 140-149.
- ZHANG X, LI SH J, LIU B C, *et al.*. A non-null interferometry for concave aspheric surface[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(1): 140-149. (in Chinese).
- [19] 王同盟, 高芬, 李兵. 基于空洞空间卷积网络的点衍射干涉图像相位解包技术[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(2): 208-220.
- WANG T M, GAO F, LI B. Phase unwrapping technology about point diffraction interference fringe based on atrous spatial convolutional networks[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(2): 208-220. (in Chinese).
- [20] 周志鹏, 楼盈天, 王升帆, 等. 基于卡尔曼滤波的激光外差干涉位移测量误差补偿[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(3): 357-365.
- ZHOU ZH P, LOU Y T, WANG SH F, *et al.*. Error compensation for laser heterodyne interferometric displacement measurement based on Kalman filter[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(3): 357-365. (in Chinese).

作者简介:



李东风(1983—),男,河南濉溪人,正高级工程师,中国科学技术大学火灾安全全国重点实验室博士研究生在读,现任公司董事长、总经理、党支部书记,入选第二批合肥市学术和技术带头人后备人选、安徽省国资委第五批 538 英才工程人才计划、安徽军工集团第三批学术带头人。E-mail: lidf@ahxfw.com



陆守香(1962—),男,安徽合肥人,中国科学技术大学火灾安全全国重点实验室教授,博士生导师,主要从事应急技术理论,火灾科学与消防技术应用研究;先进火灾探测技术研究,高效环保灭火装备及核心部件研究;智慧消防物联网系统开发。先后发表 SCI 学术论文 200 余篇,合著《火灾风险评估方法学》,获授权专利 13 项、软件著作权 6 项。E-mail: sxlu@ustc.edu.cn

《光学 精密工程》(半月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- * 美国工程索引 EI 核心期刊
- * 中国出版政府奖期刊提名奖
- * 中国精品科技期刊
- * 中文核心期刊
- * 百种中国杰出学术期刊
- * 中国最具国际影响力学术期刊

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址:长春市东南湖大路 3888 号

邮编:130033

电话:0431-86176855

传真:0431-84613409

电邮:gxjmgc@sina.com

网址: <http://www.opee.net>

定价:100.00 元/册