

稳态大视场偏振干涉成像光谱仪中视场 补偿型 Savart 偏光镜透射率研究^{*}

杜娟¹⁾ 张淳民^{1)†} 赵葆常²⁾ 孙尧¹⁾

1) 西安交通大学理学院, 西安 710049)

2) 中国科学院西安光学精密机械研究所空间光学研究室, 西安 710119)

(2008 年 1 月 27 日收到, 2008 年 3 月 24 日收到修改稿)

论述了基于视场补偿型 Savart 偏光镜的稳态大视场偏振干涉成像光谱仪的分光机理. 依据电磁场边值条件, 分析了光在视场补偿型 Savart 偏光镜中各晶体分界面上的透射情况, 得出了透射率的理论计算公式. 采用计算机模拟, 分析了在半波片为不同材料时, 透射率随入射波长、视场角及半波片厚度的变化关系. 研究表明, 视场补偿型 Savart 偏光镜具有大视场、高通量、高探测灵敏度的显著特点. 此研究可为新型干涉成像光谱技术的研究和新型偏振干涉成像光谱仪的设计、研制提供重要的理论指导.

关键词: 偏振干涉成像光谱仪, 视场补偿型 Savart 偏光镜, 透射率, 电磁场边值条件

PACC: 4225B, 4110H, 4280B, 0765

1. 引言

20 世纪 80 年代后期, 国际上出现了干涉成像光谱技术. 干涉成像光谱仪可分为时间调制型和空间调制型两种. 前者的分光部件绝大部分为迈克耳逊干涉仪^[1-3], 这类仪器需要高精度的动镜驱动系统, 实时性不好, 不适合快速变化的光谱测量; 后者的分光部件大多数为横向剪切(或角剪切)干涉仪, 属于此类的有 Sagnac 干涉仪, Wollaston 棱镜干涉仪等^[4,5]. 它们都采用入射狭缝来获得高空间分辨率, 但却限制了光通量的摄入. 鉴于此, 张淳民等人^[6-19]提出了基于 Savart 偏光镜的稳态偏振干涉成像光谱仪(SPIIS)和稳态大视场偏振干涉成像光谱仪(SLPIIS), 这类仪器无入射狭缝, 而采用视场光阑, 从而具有高通量、大视场、高稳态等显著特点, 因此在航空航天遥感、军事侦察、农业科学、生物医学等许多领域都具有广阔的应用前景.

信噪比为验证干涉成像光谱仪性能的一个重要指标, 要想获得高信噪比就必须提高系统的透射

率^[18], 而目前国际上对 SLPIIS 透射率的研究尚未见报道. 本文依据电磁场边值条件^[20], 研究了 SLPIIS 的核心部件, 视场补偿型 Savart 偏光镜中各晶体分界面上的透射情况, 得出了透射率的计算公式. 采用计算机模拟, 分析了在半波片为不同材料时, 透射率随入射波长、视场角及半波片厚度的变化关系, 以期新型干涉成像光谱技术的研究和新型偏振干涉成像光谱仪的设计、研制提供理论指导.

2. 稳态大视场偏振干涉成像光谱仪的分光机理

图 1 是 SLPIIS 原理图^[13], 主要由前置光学系统 L_0 , L_1 , 起偏器 P_1 , 视场补偿型 Savart 偏光镜, 检偏器 P_2 , 成像镜 L_2 , 面阵探测器 CCD 及数据图像处理系统组成. SLPIIS 的核心部件是视场补偿型 Savart 偏光镜, 其原理如图 2 所示. 它是由两块厚度相等的单轴负晶体(方解石), 中间加入单轴正晶体(石英或鱼眼石)而制成半波片, 再使用冷杉树脂胶粘接所制

^{*} 国家自然科学基金重点项目(批准号: 40537031), 国家高技术研究发展计划(863)项目(批准号: 2006AA12Z152), 国防基础科学研究项目(批准号: A1420080187), 国家自然科学基金(批准号: 40375010, 60278019), 陕西省科技攻关项目(批准号: 2001K06-G12, 2005K04-G18)和西安交大 985 二期工程资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn

成.偏光镜左右两板光轴均在纸平面(xoz 平面)内,左板光轴与 x, z 轴正向均成 45° 角,右板光轴与 x, z 轴正向分别成 $45^\circ, 135^\circ$ 角,半波片光轴与 x, y 轴正向均成 45° 角.

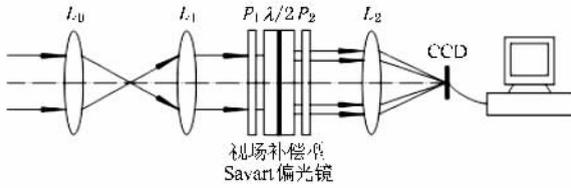


图1 稳态大视角偏振干涉成像光谱仪原理图

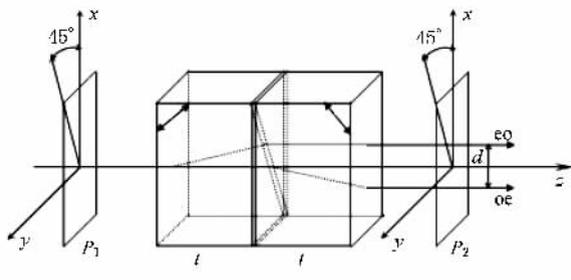


图2 视场补偿型 Savart 偏光镜原理图

如图 1 和图 2 所示,自然光经过前置光学系统 L_0, L_1 射入起偏器 P_1 ,变为沿 P_1 偏振化方向的线偏振光,出射光经过视场补偿型 Savart 偏光镜左板,分成寻常 o 光、非常 e 光两束折射光, o 光电矢量振动方向垂直于左板主截面, e 光电矢量振动方向在左板主截面内,折射 o 光经过半波片后出射光为椭圆 e 光,其电矢量长轴振动方向与折射 e 光相同,折射 e 光经过半波片后出射光为椭圆 o 光,其电矢量长轴振动方向与折射 o 光相同.两束光通过偏光镜

右板,共得到四束折射光(oo' 光, oe' 光, eo' 光和 ee' 光)这四束折射光通过检偏器 P_2 后,变为沿 P_2 偏振化方向的线偏振光,经过成像镜 L_2 ,成像于面阵探测器 CCD 上,再经过数据图像处理系统,便得到了所需目标的空间信息和光谱信息.

3. 视场补偿型 Savart 偏光镜透射率的计算

本文分别讨论了入射面与视场补偿型 Savart 偏光镜左板主截面重合和垂直时,光在视场补偿型 Savart 偏光镜中的传播情况.

3.1. 入射面与视场补偿型 Savart 偏光镜左板主截面重合时透射率的计算

3.1.1. 光线通过视场补偿型 Savart 偏光镜左板

如图 2 所示,出射起偏器 P_1 的光线通过空气到达视场补偿型 Savart 偏光镜左板第一界面,从此界面出射的 o 光和 e 光电矢量分别表示为 E_o 和 E_e .当两束折射光到达左板第二界面时, e 光相对于 o 光产生光程差 $\Delta_1, \Delta_1 = nt \sin i (\cot \theta_e - \cot \theta_o)^{[16]}$,其中 t 为左板厚度, i 为入射角, n 为空气折射率, θ_o, θ_e 分别为 o 光 e 光的波矢折射角.从而得到 e 光相对于 o 光的位相差为 $\delta_1 = 2\pi\Delta_1/\lambda$, o 光 e 光此时的电矢量分别表示为 $\tilde{E}'_o = E_o \exp(i\delta_o), \tilde{E}'_e = E_e \exp(i\delta_e)$,且 $\delta_e - \delta_o = \delta_1^{[21]}$.应用电磁场边值条件进行计算^[19, 22],得到光线通过左板出射到胶粘剂的 o 光, e 光的振幅透射率分别为

$$\tilde{t}'_o = \frac{4nn_o \cos i \cos \theta_o (1 + \cos^2 i)^{-1/2}}{(n \cos i + n_o \cos \theta_o) [n' \cos i' + n_o \cos \theta_o]} \exp(-i\delta_o), \tag{1}$$

$$\tilde{t}'_e = \frac{2n \cos^2 i (1 + \cos^2 i)^{-1/2} [n'_e(\theta'_1) \cos \theta_e + n'_e(\theta_1) \cos \theta'_{er}]}{[n \cos \theta_e + n'_e(\theta_1) \cos i] [n' \cos \theta'_{er} + n'_e(\theta'_1) \cos i']} \exp(-i\delta_e), \tag{2}$$

式中 i' 为出射到胶粘剂的折射角, n' 为胶粘剂折射率, n_o, n_e 是晶体主折射率, $n'_e(\theta_1)$ 是 e 光波矢折射率, θ'_{er} 是 e 光反射光波矢与入射面法线的夹角, $\theta'_e(\theta'_1)$ 是 e 光反射光波矢折射率, θ_1 是 e 光波矢与偏光镜左板光轴的夹角, θ'_1 是 e 光反射光波矢与左板光轴的夹角,且

$$n'_e(\theta_1) = n_o n_e (n_e^2 \cos^2 \theta_1 + n_o^2 \sin^2 \theta_1)^{-1/2},$$

$$n'_e(\theta'_1) = n_o n_e (n_e^2 \cos^2 \theta'_1 + n_o^2 \sin^2 \theta'_1)^{-1/2},$$

$$\cos \theta_1 = \sqrt{2} \chi (\sin \theta_e + \cos \theta_e),$$

$$\cos \theta'_1 = \sqrt{2} \chi (\sin \theta'_{er} - \cos \theta'_{er}).$$

3.1.2. 光线通过半波片

折射 o 光和 e 光通过半波片后,分别得到两束线偏振光(oo' 光, oe' 光和 eo' 光, ee' 光),其中 oo' 光和

eo 光的电矢量振动方向垂直于半波片主截面, oe 光和 ee 光的电矢量振动方向在半波片主截面内. 类似

于上节的分析, 可得到这四束光通过半波片后的透射系数分别为

$$\tilde{t}'_{oo} = \frac{4An'n'_o \cos\theta'_o \cos i' \cos\theta'_e (1 + \cos^2 i')^{1/2} [n' \cos\theta'_e + n'_e(\theta_2) \cos i'] [B \cos\theta'_e + C \cos\theta'_o]}{B \cos\theta'_e (n'_o \cos i' + n' \cos\theta'_o) + C \cos i' (n' \cos i' + n'_o \cos\theta'_o)} \times \exp(-i\delta'_o), \quad (3)$$

$$\tilde{t}'_{oe} = \frac{4An'n'_e(\theta_2) \cos i' \cos\theta'_e (1 + \cos^2 i')^{1/2} (n'_o \cos i' + n' \cos\theta'_o) [B \cos\theta'_o + C \cos\theta'_e]}{B \cos\theta'_o [n' \cos i' + n'_e(\theta_2) \cos\theta'_e] + C \cos i' [n' \cos\theta'_e + n'_e(\theta_2) \cos i']} \exp(-i\delta'_e), \quad (4)$$

$$\tilde{t}'_{eo} = \frac{-4An'n'_o \cos i' \cos\theta'_o (1 + \cos^2 i')^{1/2} [n' \cos i' + n'_e(\theta_2) \cos\theta'_e] [B \cos\theta'_e + C \cos\theta'_o]}{B \cos\theta'_e (n'_o \cos i' + n' \cos\theta'_o) + C \cos i' (n' \cos i' + n'_o \cos\theta'_o)} \exp(-i\delta'_o), \quad (5)$$

$$\tilde{t}'_{ee} = \frac{4An'n'_e(\theta_2) \cos i' \cos\theta'_o \cos\theta'_e (1 + \cos^2 i')^{1/2} (n'_o \cos\theta'_o + n' \cos i') [B \cos\theta'_e + C \cos\theta'_o]}{B \cos\theta'_o [n' \cos i' + n'_e(\theta_2) \cos\theta'_e] + C \cos i' [n' \cos\theta'_e + n'_e(\theta_2) \cos i']} \times \exp(-i\delta'_e), \quad (6)$$

式中 θ'_o 是半波片 o 光波矢折射角, n'_o 是 o 光波矢折射率, θ'_e 是半波片 e 光波矢折射角, $n'_e(\theta_2)$ 是相应的 e 光波矢折射率(其中 $n'_e(\theta_2) = n'_o n'_e \times$

$(n'^2_e \cos^2 \theta_2 + n'^2_o \sin^2 \theta_2)^{-1/2}$, 其中 $\cos \theta_2 = \sqrt{2}/2 \sin \theta'_e$), $\delta'_e - \delta'_o = \delta_{\parallel}$ (δ_{\parallel} 为半波片中 e 光相对于 o 光所产生的位相差^[23]),

$$\begin{aligned} \delta_{\parallel} &= 2\pi t' (n'_e - n'_o) [1 + n'^2 \sin^2 i' (n'_o - n'_e) 4n'_e n'_o] \lambda, \\ A &= \{ \cos\theta'_o \cos\theta'_e (n'_o \cos\theta'_o + n' \cos i') [n' \cos\theta'_e + n'_e(\theta_2) \cos i'] \\ &\quad + (n'_o \cos i' + n' \cos\theta'_o) [n' \cos i' + n'_e(\theta_2) \cos\theta'_e] \}^{-1}, \\ B &= n'_o \cos\theta'_o \cos\theta'_e + n'_e(\theta_2), \\ C &= n'_o + n'_e(\theta_2) \cos\theta'_e \cos\theta'_o, \end{aligned}$$

t' 为半波片厚度, λ 为入射光波长.

通过理论计算^[15, 16] 得 oo 光和 oe 光出射半波片后的横向剪切量为

$$d = \frac{t'}{2} \sqrt{\left(1 - \frac{n'^2_e}{n'^2_o}\right)^2 \tan^2 \theta'_e + \left[\left(1 + \frac{n'^2_e}{n'^2_o}\right) \tan \theta'_e - 2 \tan \theta'_o\right]^2 \cos^2 i'}.$$

假设半波片为石英晶体时, 当波长 $\lambda = 589.3 \text{ nm}$, 晶体折射率 $n'_o = 1.54424$, $n'_e = 1.55335$, $i' = 5^\circ$, $\delta_{\parallel} = 61\pi$ 时, 得到 $t' = 1.973 \text{ mm}$, oo 光, oe 光之间的横向剪切量为 $d = 644.1 \text{ nm}$. 可以看出 d 与 λ 的数量级相同, 在此数量级范围内^[24], 光向散射过渡, 从几何光学角度看, 这两束光可认为是重合的. 将其电矢量进行叠加, 得到椭圆 e 光, 其电矢量长轴振动方向与折射 e 光相同.

同理将 eo 光和 ee 光电矢量叠加, 得到椭圆

o 光, 其电矢量长轴振动方向与折射 o 光相同.

3.1.3. 光线通过视场补偿型 Savart 偏光镜右板

椭圆 o 光和椭圆 e 光通过视场补偿型 Savart 偏光镜右板, 共得到四束线偏振光(oo' 光, oe' 光, eo' 光和 ee' 光), 其中 oo' 光和 eo' 光的电矢量振动方向垂直于右板主截面, oe' 光和 ee' 光电矢量振动方向在右板主截面内, 类似于 3.1.1 节的分析, 得这四束光通过偏光镜右板后的透射系数分别为

$$\tilde{t}'_{oo'} = \frac{4n'n_o \cos i' \cos\theta_o (1 + \cos^2 i')^{1/2} (\tilde{t}'_{eo} \cos i' + \tilde{t}'_{ee} \exp(i\delta_{\parallel}))}{(n' \cos i' + n_o \cos\theta_o) [n \cos i + n_o \cos\theta_o] [\tilde{t}'_{eo} + \tilde{t}'_{ee} \exp(2i\delta_{\parallel})]^{1/2}} \exp(-i\delta''_o), \quad (7)$$

$$\tilde{t}'_{oe} = \frac{2n' \cos i' (1 + \cos^2 i')^{-1/2} [n'_e(\theta'_3) \cos \theta''_e + n'_e(\theta_3) \cos \theta''_{er} \mathbb{I} - \tilde{t}_{eo} + \tilde{t}_{oe} \cos i' \exp(i\delta_{\parallel})]}{[n \cos \theta''_{er} + n'_e(\theta'_3) \cos i \mathbb{I} n' \cos \theta''_e + n'_e(\theta_3) \cos i' \mathbb{I} \tilde{t}_{eo}^2 + \tilde{t}_{oe}^2 \exp(2i\delta_{\parallel})]^{1/2}} \times \exp(-i\delta''_e), \quad (8)$$

$$\tilde{t}'_{eo} = \frac{4n'n_o \cos i' \cos \theta_o (1 + \cos^2 i')^{-1/2} (\tilde{t}_{oo} \cos i' + \tilde{t}_{oe} \exp(i\delta_{\parallel}))}{(n \cos i + n_o \cos \theta_o \mathbb{I} n' \cos i' + n_o \cos \theta_o \mathbb{I} \tilde{t}_{oo}^2 + \tilde{t}_{oe}^2 \exp(2i\delta_{\parallel}))^{1/2}} \exp(-i\delta''_o), \quad (9)$$

$$\tilde{t}'_{oe} = \frac{2n' \cos i' (1 + \cos^2 i')^{-1/2} [n'_e(\theta'_3) \cos \theta''_e + n'_e(\theta_3) \cos \theta''_{er} \mathbb{I} - \tilde{t}_{oo} + \tilde{t}_{oe} \cos i' \exp(i\delta_{\parallel})]}{[n \cos \theta''_{er} + n'_e(\theta'_3) \cos i \mathbb{I} n' \cos \theta''_e + n'_e(\theta_3) \cos i' \mathbb{I} \tilde{t}_{oo}^2 + \tilde{t}_{oe}^2 \exp(2i\delta_{\parallel})]^{1/2}} \times \exp(-i\delta''_e), \quad (10)$$

式中 θ''_e 是偏光镜右板 e 光波矢折射角, $n'_e(\theta_3)$ 是相应 e 光波矢折射率, θ''_{er} 是 e 光反射光波矢与入射面法线的夹角, $n'_e(\theta'_3)$ 是 e 光反射光波矢折射率, 计算得 $n'_e(\theta_3) = n'_e(\theta'_1)$, $n'_e(\theta'_3) = n'_e(\theta_1)$, $\theta''_e = \theta'_{er}$, $\theta''_{er} = \theta_e$, $\delta''_e - \delta''_o = \delta_{\parallel}$ 其中 δ_{\parallel} 为右板中 e 光相对于 o 光的位相差, 且 $\delta_{\parallel} = 2\pi n t \sin i (\cot \theta''_e - \cos \theta_o) \lambda$.

3.1.4. 整个视场补偿型 Savart 偏光镜出射光的透射率

从起偏器 P_1 出射的线偏振光通过视场补偿型 Savart 偏光镜后, 分成 oo' 光, oe' 光和 eo' 光和 ee' 光四束线偏振光. 通过理论推导, 得出这四束光的光强和能量透射率在数值上相同, 统称其为透射率. 则这四束光的透射率分别表示为

$$\begin{aligned} T_{oo} &= |\tilde{t}_o \tilde{t}'_{eo}|^2 (|\tilde{t}_{oo}|^2 + |\tilde{t}_{oe}|^2), \\ T_{oe} &= |\tilde{t}_o \tilde{t}'_{ee}|^2 (|\tilde{t}_{oo}|^2 + |\tilde{t}_{oe}|^2), \\ T_{eo} &= |\tilde{t}_e \tilde{t}'_{oo}|^2 (|\tilde{t}_{eo}|^2 + |\tilde{t}_{ee}|^2), \\ T_{ee} &= |\tilde{t}_e \tilde{t}'_{oe}|^2 (|\tilde{t}_{eo}|^2 + |\tilde{t}_{ee}|^2). \end{aligned} \quad (11)$$

3.2. 入射面与视场补偿型 Savart 偏光镜左板主截面垂直时透射率的计算

当入射面与视场补偿型 Savart 偏光镜左板主截面垂直时, 计算透射率所需理论与重合时基本相似, 采用类似于 3.1 节的分析方法, 得到垂直时出射视场补偿型 Savart 偏光镜后的 oo' 光, oe' 光, eo' 光和 ee' 光的透射率分别表示为

$$T_{oo} = \left| \frac{16n \cos i [(1 + \sin i \mathbb{I} 1 + \sin^2 i')]^{1/2} (F \sin \theta_e + G \cos i \mathbb{I} H - I \sin \theta_o \sin \theta_e)}{[(1 + \cos^2 i \mathbb{I} 1 + \cos^2 i')]^{1/2} (DG + EF \sin \theta_o \sin \theta_e \mathbb{I} HK - IJ \sin i' \sin \theta_e)} \right|^2 \times \left| \frac{n'n_o^2 \cos i' \cos^2 \theta_o [\tilde{t}'_{oo}(L + M \sin \theta_e \cos i') + \tilde{t}'_{oe} \exp(i\delta_{\parallel}) \mathbb{I} L \cos i' - M \sin \theta_e]}{(LG + JM \sin \theta_o \sin \theta_e \mathbb{I} DH - EI \sin i' \sin \theta_e)} \right|^2, \quad (12)$$

$$T_{oe} = \left| \frac{16n n_o \cos i \cos \theta_o \cos \theta_o [(1 + \sin^2 i \mathbb{I} 1 + \sin^2 i')]^{1/2} (F \sin \theta_e + G \cos i \mathbb{I} H - I \sin \theta_o \sin \theta_e)}{[(1 + \cos^2 i \mathbb{I} 1 + \cos^2 i')]^{1/2} (DG + EF \sin \theta_o \sin \theta_e \mathbb{I} HK - IJ \sin i' \sin \theta_e)} \right|^2 \times \left| \frac{n'n'_e(\theta_1) \cos i [\tilde{t}'_{oo}(J \sin \theta_o - K \cos i') + \tilde{t}'_{oe} \exp(i\delta_{\parallel}) \mathbb{I} J \cos i' \sin \theta_o + K] \mathbb{I} H \sin \theta_e \sin \theta_o - I)}{(LG + JM \sin \theta_o \sin \theta_e \mathbb{I} FH \sin i' \sin \theta_o - GI)} \right|^2, \quad (13)$$

$$T_{eo} = \left| \frac{16n n_o \cos i \cos \theta_o \cos \theta_o [(1 + \sin i \mathbb{I} 1 + \sin^2 i')]^{1/2} (D - E \cos i \sin \theta_o \mathbb{I} H \sin \theta_o \sin \theta_e - I)}{[(1 + \cos^2 i \mathbb{I} 1 + \cos^2 i')]^{1/2} (DG + EF \sin \theta_o \sin \theta_e \mathbb{I} HM \sin i' \sin \theta_o - LI)} \right|^2 \times \left| \frac{n'n'_e(\theta_1) \cos i [\tilde{t}'_{oo}(L + M \sin \theta_e \cos i') + \tilde{t}'_{oe} \exp(i\delta_{\parallel}) \mathbb{I} L \cos i' - M \sin \theta_e] \mathbb{I} H - I \sin \theta_o \sin \theta_e}{(LK + JM \sin \theta_o \sin \theta_e \mathbb{I} DH - EI \sin \theta_e \sin i)} \right|^2, \quad (14)$$

$$T_{ee} = \left| \frac{16n [n'_e(\theta_1)] \cos^2 \theta_o [(1 + \sin^2 i \mathbb{I} 1 + \sin^2 i')]^{1/2} (D - E \cos i \sin \theta_o \mathbb{I} H \sin \theta_o \sin \theta_e - I)}{[(1 + \cos^2 i \mathbb{I} 1 + \cos^2 i')]^{1/2} (DG + EF \sin \theta_o \sin \theta_e \mathbb{I} HM \sin i' \sin \theta_o - LI)} \right|^2 \times \left| \frac{n' \cos i' \cos i [\tilde{t}'_{oo}(J \sin \theta_o - K \cos i') + \tilde{t}'_{oe} \exp(i\delta_{\parallel}) \mathbb{I} J \cos i' \sin \theta_o + K] \mathbb{I} H \sin \theta_e \sin \theta_o - I}{(LK + JM \sin \theta_o \sin \theta_e \mathbb{I} FH \sin i' \sin \theta_o - GI)} \right|^2, \quad (15)$$

式中

$$\begin{aligned} \tilde{t}_{oo}'' &= \frac{4n'n'_o \cos i' \cos \theta'_o (1 + \sin^2 i')^{1/2} (1 + \cos^2 i')^{1/2} (Q - P \sin i' \cos \theta'_e) \{ C \cos \theta'_o + B \cos \theta'_e \}}{(NQ + PO \cos \theta'_o \cos \theta'_e) \{ BN \cos \theta'_e + CO \cos i' \}} \\ &\quad \times \exp(-i\delta'_o), \\ \tilde{t}_{oe}'' &= \frac{4n'n'_e (\theta_2) \cos i' \cos \theta'_e (1 + \sin^2 i')^{1/2} (1 + \cos^2 i')^{1/2} (N \sin i' + O \cos \theta'_o) \{ B \cos \theta'_o + C \cos \theta'_e \}}{(NQ + PO \cos \theta'_o \cos \theta'_e) \{ BQ \cos \theta'_o + PC \cos i' \}} \\ &\quad \times \exp(-i\delta'_e), \\ \tilde{t}_{eo}'' &= \frac{-4n'n'_o \cos i' \cos \theta'_o (1 + \sin^2 i')^{1/2} (1 + \cos^2 i')^{1/2} (P \cos \theta'_e + Q \sin i') \{ C \cos \theta'_o + B \cos \theta'_e \}}{(NQ + PO \cos \theta'_o \cos \theta'_e) \{ BN \cos \theta'_e + CO \cos i' \}} \\ &\quad \times \exp(-i\delta'_o), \\ \tilde{t}_{ee}'' &= \frac{4n'n'_e (\theta_2) \cos i' \cos \theta'_e (1 + \sin^2 i')^{1/2} (1 + \cos^2 i')^{1/2} (N - O \cos \theta'_o \sin i') \{ B \cos \theta'_o + C \cos \theta'_e \}}{(NQ + PO \cos \theta'_o \cos \theta'_e) \{ BQ \cos \theta'_o + PC \cos i' \}} \\ &\quad \times \exp(-i\delta'_e), \\ D &= n \cos \theta_o + n_o \cos i, E = n \cos i + n_o \cos \theta_o, F = n \cos \theta_e + n'_e (\theta_1) \cos i, \\ G &= n \cos i + n'_e (\theta_1) \cos \theta_e, H = n_o \cos \theta_o - n'_e (\theta_1) \cos \theta_e, I = n_o \cos \theta_e - n'_e (\theta_1) \cos \theta_o, \\ J &= n' \cos i' + n_o \cos \theta_o, K = n' \cos \theta_o + n_o \cos i', L = n' \cos i' + n'_e (\theta_1) \cos \theta_e, \\ M &= n' \cos \theta_e + n'_e (\theta_1) \cos i', N = n'_o \cos i' + n' \cos \theta'_o, O = n'_o \cos \theta'_o + n' \cos i', \\ P &= n' \cos \theta'_e + n'_e (\theta_2) \cos i', Q = n' \cos i' + n'_e (\theta_2) \cos \theta'_e. \end{aligned}$$

4. 视场补偿型 Savart 偏光镜透射率的变化规律

选取视场补偿型 Savart 偏光镜左右两板为厚度相同的方解石晶体, 胶粘剂为冷杉树脂胶(折射率范围为 1.52—1.54), 考虑所使用半波片对应的光波波长为 $\lambda = 589.3 \text{ nm}$, 材料分别选用石英、鱼眼石晶体, 表 1 为这两种晶体材料的双折射^[25].

表 1 两种晶体材料的双折射

$\lambda/\mu\text{m}$	石英		鱼眼石	
	$n_e - n_o$	$\frac{n_e - n_o}{\lambda}/\mu\text{m}^{-1}$	$n_e - n_o$	$\frac{n_e - n_o}{\lambda}/\mu\text{m}^{-1}$
0.45	0.00937	0.021	0.0019	0.0042
0.50	0.00925	0.019	0.0022	0.0044
0.55	0.00917	0.017	0.0024	0.0044
0.60	0.00909	0.015	0.0026	0.0043
0.65	0.00903	0.014	0.0028	0.0043

使用计算机模拟入射面与视场补偿型 Savart 偏光镜左板主截面重合时, oo' 光, oe' 光, eo' 光和 ee' 光透射率随入射光波长 λ 的变化关系如图 3 所示. 当 λ 在可见光范围内, 视场角 $i = 5^\circ$, 半波片为石英时,

oe' 光和 eo' 光透射率的变化范围为 29.4%—44.6%, oo' 光和 ee' 光透射率的变化范围为 $3.24 \times 10^{-5}\%$ —14.9%; 半波片为鱼眼石时, oe' 光和 eo' 光透射率的变化范围为 44.7%—43.8%, oo' 光和 ee' 光透射率的变化范围为 $2.75 \times 10^{-5}\%$ —0.403%.

由图 3 可看出, 当半波片为石英时, 透射率随 λ 的变化幅度较大, 在 $\lambda = 450 \text{ nm}$ 附近时, 四束光的透射率数量级相同, 所以此时系统适用的波段范围较窄(大约在半波片所对应光波波长的 $\pm 10 \text{ nm}$ 左右). 由表 1 可看出, 鱼眼石晶体的双折射 $n_e - n_o$ 值与 λ 成正比的关系增加, 并且 $(n_e - n_o)\lambda$ 与 λ 无关. 所以, 这种晶体具有消色差性能^[26]. 以其为半波片材料时, 透射率变化幅度小, 并且 oo' 光和 ee' 光透射率数值很小, 可不予考虑. 因此, 认为只有 oe' 光和 eo' 光透射, 使用这种晶体的系统适用的波段范围较宽(450—650 nm).

视场补偿型 Savart 偏光镜的透射率为 $T = T_{oe} + T_{eo}$. 以鱼眼石为半波片材料, 且半波片所对应的光波波长为 $\lambda = 589.3 \text{ nm}$, 以此波长的光波入射, 分别得到透射率 T 随入射角 i 及半波片厚度 t 的变化关系, 如图 4 图 5 所示. 由图 4 可以看出, 在入射角 i 小于 5° 范围内, 当入射面与偏光镜左板主截面重合

时,透射率 T 在 89.16%—89.04% 之间平稳变化;当入射面与偏光镜左板主截面垂直时,透射率 T 在 89.12%—90.24% 之间平稳变化. 当取 $i = 5^\circ$ 时,由图 5 可以看出,在半波片厚度 t' 小于 12 mm 范围内,

无论入射面与偏光镜左板主截面重合还是垂直,透射率 T 的变化范围都很小,其数值在 10^{-4} — 10^{-5} 量级,并且透射率 T 都大于 85%.

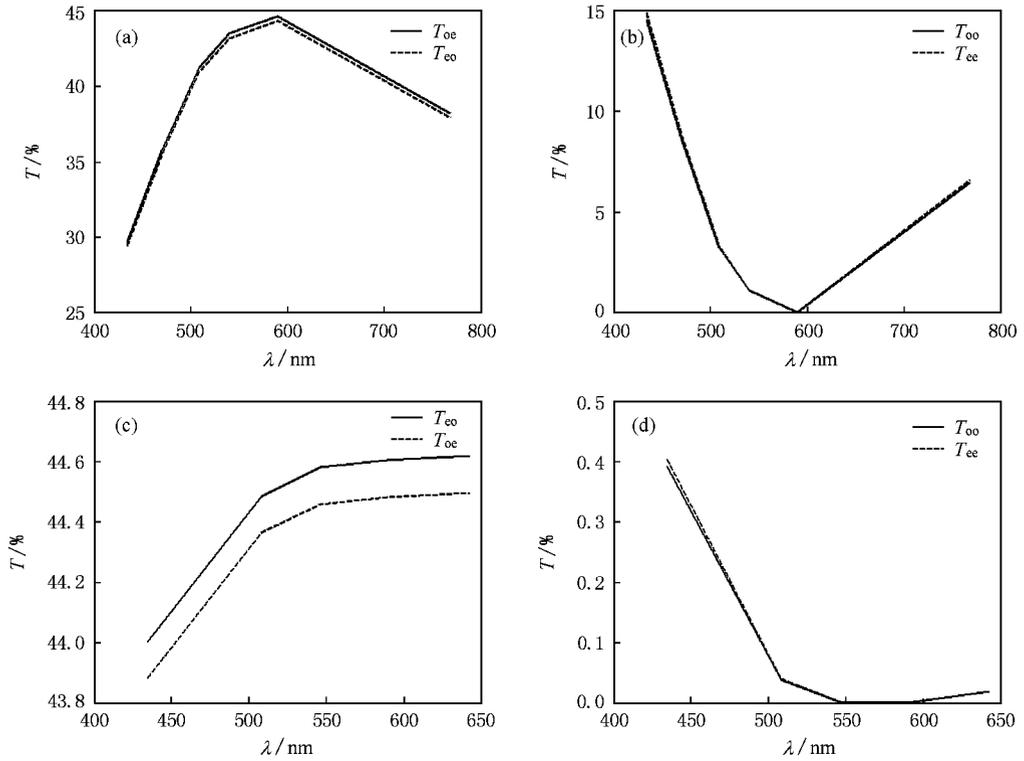


图 3 视场补偿型 Savart 偏光镜四束光透射率随 λ 的变化曲线 (a)(b)为石英 (c)(d)为鱼眼石

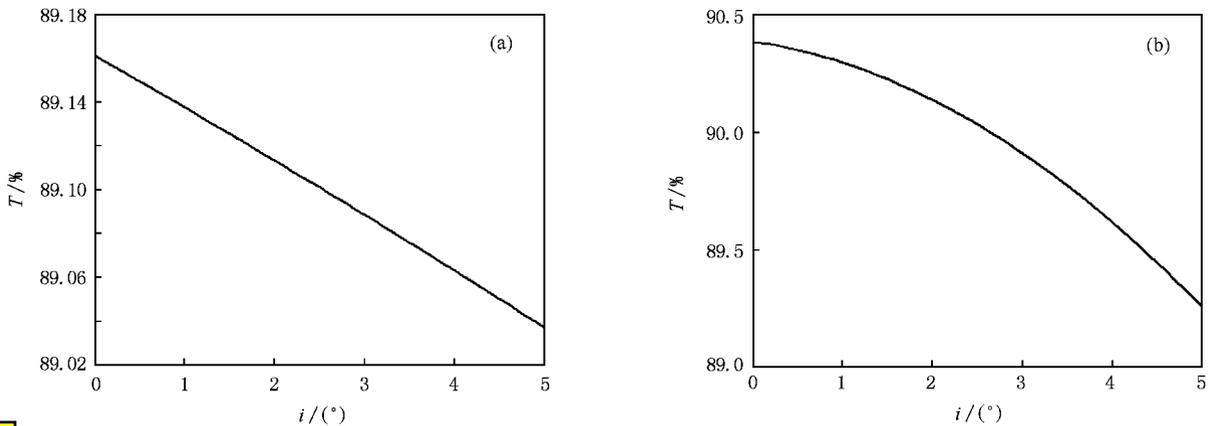


图 4 入射面与视场补偿型 Savart 偏光镜左板主截面重合时 (a) 和垂直时 (b) T 随 i 的变化曲线



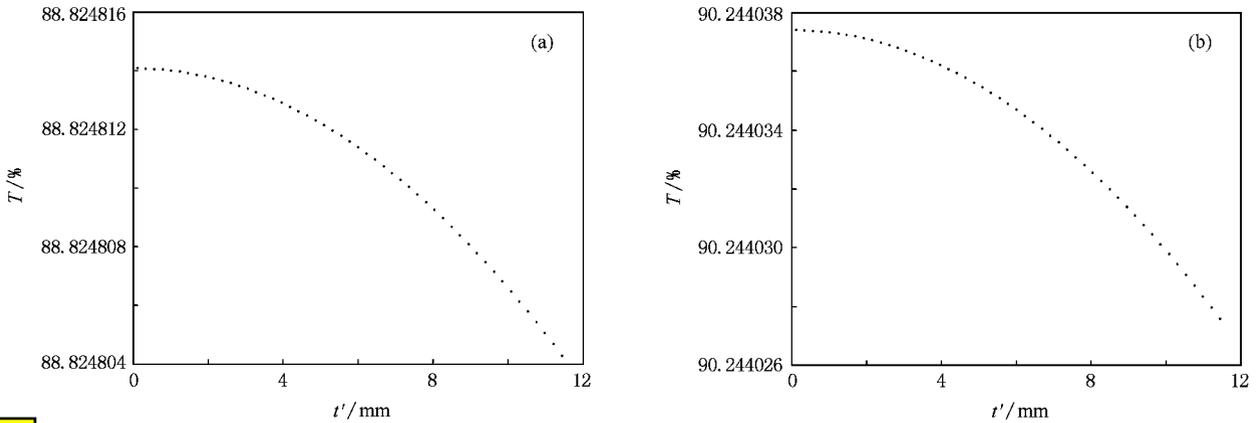


图5 入射面与视场补偿型 Savart 偏光镜左板主截面重合时(a)和垂直时(b) T 随 t' 的变化曲线

5. 结 论

1. 分析了基于视场补偿型 Savart 偏光镜的稳态大视场偏振干涉成像光谱仪的分光机理,应用电磁场边值条件,推导出了视场补偿型 Savart 偏光镜透射率的理论计算公式。

2. 采用计算机模拟,讨论了半波片分别为石英、鱼眼石两种晶体材料时,视场补偿型 Savart 偏光镜透射率随入射波长的变化关系。得出了半波片为石英晶体时,系统适用的波段范围较窄(为半波片所对应光波波长的 ± 10 nm 左右);而当半波片为鱼眼石时,系统适用波段范围较宽(450—650 nm)。可见,半波片采用鱼眼石晶体时优于石英晶体,并且系统透射率大于 85%,显示了视场补偿型 Savart 偏光镜

具有高通量的显著特点。

3. 理论分析发现,视场补偿型 Savart 偏光镜透射率 T 为视场角的函数,并随着视场角的增大而减小,在视场角小于 5° 范围内,透射率 T 大于 85%,显示了视场补偿型 Savart 偏光镜具有大视场的显著特点。

4. 视场补偿型 Savart 偏光镜透射率 T 为半波片厚度的函数,并且随半波片厚度的增大而减少,但变化范围很小,其数值在 10^{-4} — 10^{-5} 量级,因此可看出半波片厚度对透射率 T 的影响较小。

5. 理论证明在半波片厚度为毫米数量级时,半波片只起到旋转入射光线偏振方向的作用,而与系统整体的横向剪切量及光程差的计算无关。通过本文所得计算公式,可对视场补偿型 Savart 偏光镜各晶体的材料及尺寸参数的设计进行优化,给整体系统的设计、研制提供理论指导。

- [1] Persky M J 1995 *Rev. Sci. Instrum.* **66** 4763
- [2] Denis S 1991 *SPIE* **1479** 127
- [3] Carter M R, Bennett C L, Fields D J, Lee F D 1995 *SPIE* **2480** 380
- [4] Rafert J B, Sellar R G, Holbert E, Blatt J H, Tyler D W, Durham S E, Newby H D 1994 *SPIE* **2198** 338
- [5] Hammer P D, Valero F P J, Peterson D L 1993 *SPIE* **1937** 244
- [6] Zhang C M, He J 2006 *Optics Express* **14** 12561
- [7] Zhang C M, Zhao B C, Xiangli B 2006 *OPTIK* **117** 265
- [8] Zhang C M, Xiangli B, Zhao B C 2000 *Proc. SPIE* **4087** 957
- [9] Zhang C M, Xiangli B, Zhao B C, Yuan X J 2002 *Opt. Commun.* **203** 21
- [10] Zhang C M, Zhao B C, Xiangli B 2003 *Opt. Commun.* **227** 221
- [11] Zhang C M, Xiangli B, Zhao B C 2004 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **6** 815
- [12] Zhang C M, Zhao B C, Xiangli B 2004 *Appl. Opt.* **43** 6090
- [13] Zhang C M, Zhao B C, Xiangli B, Gao Z 2000 *J. Xi'an Jiaotong University* **34** 98 (in Chinese) [张淳民、赵葆常、相里斌、高瞻 2000 西安交通大学学报 **34** 98]
- [14] Zhang C M, Yan X G, Zhao B C 2008 *Opt. Commun.* **281** 2051
- [15] Wu L, Zhang C M, Yuan Y, Zhao B C 2005 *Acta Opt. Sin.* **25** 885 (in Chinese) [吴磊、张淳民、袁艳、赵葆常 2005 光学学报 **25** 885]
- [16] Wu L, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Opt. Commun.* **273** 67
- [17] Jian X H, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 824 (in Chinese) [简小华、张淳民、赵葆常 2007 物理学报 **56** 824]
- [18] Yuan Z L, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6413 (in Chinese) [袁志林、张淳民、赵葆常 2007 物理学报 **56** 6413]

- [19] Peng Z H ,Zhang C M ,Zhao B C ,Wu F Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6374 (in Chinese) [彭志红、张淳民、赵葆常、吴福全 2006 物理学报 **55** 6374]
- [20] Max B ,Emil W 2005 *Principles of Optics* (Cambridge : Cambridge University Press) p3
- [21] Zhang W Q 1997 *Acta Opt. Sin.* **17** 1121 (in Chinese) [张为权 1997 光学学报 **17** 1121]
- [22] Xu L P ,Wen Y D 2000 *College Physics* **19** 13 (in Chinese) [许丽萍、温延敦 2000 大学物理 **19** 13]
- [23] Francon M ,Mallick S 1971 *Polarization Interferometers* (New York : Wiley Interscience) p136
- [24] Zhao K H ,Zhong X H 2001 *Optics* (Beijing : Peking University Press) p185 (in Chinese) [赵凯华、钟锡华 2001 光学(北京 : 北京大学出版社) 第 185 页]
- [25] Li J Z 1986 *Handbook of Optics* (Xi'an : Shanxi Science and Technology Press) p566 ,p1455 (in Chinese) [李景镇 1986 光学手册(西安 : 陕西科学技术出版社) 第 566 页 ,第 1455 页]
- [26] Francon M ,Mallick S ,Vulmiere J 1965 *J. Opt. Soc. Am.* **55** 1553

Analysis of the transmittance of modified Savart polariscope in the static large field of view polarization interference imaging spectrometer^{*}

Du Juan¹⁾ Zhang Chun-Min^{1)†} Zhao Bao-Chang²⁾ Sun Yao¹⁾

¹⁾ School of Science ,Xi'an Jiaotong University ,Xi'an 710049 ,China)

²⁾ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics ,Chinese Academy of Sciences ,Xi'an 710119 ,China)

(Received 27 January 2008 ; revised manuscript received 24 March 2008)

Abstract

The principle of beam splitting of modified Savart polariscope in the static large field of view polarization interference imaging spectrometer(SLPIIS) is described. The reflection and refraction in every uniaxial of modified Savart polariscope are analyzed , with the incident plane coincident or perpendicular to the principle section of the left plate ,based on the electromagnetic boundary conditions. Formulas for the transmittance of the modified Savart polariscope are given as functions of wavelength of the incident light angle and thickness of the half-wave plate ,which are analyzed through computer simulation with different half-wave plates. It is proved that the modified Savart polariscope has the advantages of having both large field of view and high flux ,and can be used as high performance lateral shearing beam splitter in SLPIIS. This theoretical study will provide guidance for the experimental study of new polarization interference imaging spectrometer.

Keywords : polarization interference imaging spectrometer , modified Savart polariscope , transmittance , electromagnetic boundary condition

PACC : 4225B , 4110H , 4280B , 0765

^{*} Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China(Grant No. 40537031) ,the National High Technology Research and Development Program of China(Grant No. 2006AA12Z152) ,the National Defense Basic Scientific Research of China(Grant No. A1420080187) ,the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 40375010 ,60278019) ,the Key Science and Technology Program of Shaanxi Province ,China (Grant Nos. 2001K06-G12 2005K04-G18) ,and the " 985 " Project of Xi'an Jiaotong University , China.

[†] Corresponding author. E-mail : zcm@mail.xjtu.edu.cn