

新型偏振干涉成像光谱仪中 Savart 偏光镜透射率的研究*

彭志红^{1)†} 张淳民¹⁾ 赵葆常²⁾ 李英才²⁾ 吴福全³⁾

1) 西安交通大学理学院, 西安 710049)

2) 中国科学院西安光机所, 西安 710068)

3) 曲阜师范大学激光研究所, 曲阜 273165)

(2006 年 1 月 17 日收到, 2006 年 6 月 20 日收到修改稿)

Savart 偏光镜是自行研制的新型稳态偏振干涉成像光谱仪中的核心部件, 阐述了该 Savart 偏光镜的分光机理. 基于电磁场边值条件, 分析了入射面与 Savart 偏光镜左板主截面重合及垂直时, 光透过 Savart 偏光镜各界面的反射和折射, 得出了各界面透射系数的表达式以及 Savart 偏光镜透射率的理论计算公式. 采用计算机模拟, 给出了 Savart 偏光镜透射率随视场角和波长的变化曲线, 并与研制的 Savart 偏光镜实验测试结果进行了分析比较, 两者变化规律相符. 表明该 Savart 偏光镜具有大视场、高通量的显著特点, 适宜作为静态干涉仪和稳态偏振干涉成像光谱仪的高效横向剪切分束器. 这为新型偏振干涉成像光谱技术的研究以及仪器研制提供了重要的理论依据.

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

PACC: 4210Q, 4110H, 0765

1. 引 言

20 世纪 90 年代中期, 国际上出现了偏振干涉成像光谱技术. 美国华盛顿大学于 1996 年研制了基于 Wollaston 棱镜角剪切的数字阵列扫描干涉成像光谱仪^[1,2]. 它是一种静态的空间调制型干涉成像光谱仪, 其缺点一是含有由空间分辨率决定的狭缝, 从而对远距离目标和微弱信号的探测受到限制; 二是远场条纹为双曲线, 不利于光谱复原. 2000 年, 张淳民等^[3-8]提出了一种新型的基于双折射晶体 Savart 偏光镜的稳态偏振干涉成像光谱仪和稳态大视场偏振干涉成像光谱仪. 该仪器无狭缝、无运动部件, 从而具有稳态、高通量、高探测灵敏度和高分辨率等显著特点.

由于光在各向异性晶体中的传播规律十分复杂^[9,10], 目前, 国际上有关 Savart 偏光镜的报道仅限于 o 光和 e 光传播规律的研究、光程差和横向剪切量的计算^[11,12]以及单个 Savart 板的简单应用^[13], 而

有关 Savart 偏光镜透射率的计算尚未见报道.

本文根据电磁场边值条件^[14], 按照光在晶体内可能存在的本征模式^[15], 在简要论述自行研制的 Savart 偏光镜分光机理基础上, 分析了光在透过 Savart 偏光镜各界面时的反射和折射, 得出了 Savart 偏光镜透射率的理论计算公式, 并与研制的 Savart 偏光镜实验测试结果进行了分析比较, 两者变化规律相符.

2. Savart 偏光镜的分光机理

Savart 偏光镜的结构如图 1 所示. 它由两块厚度均为 t 的负单轴晶体(方解石)使用光学玻璃元件胶粘剂(冷杉胶)粘接制成. 左板主截面在纸平面(XZ 平面)内, 光轴与 X, Z 轴正向均成 45° 角; 右板主截面垂直于左板主截面, 光轴与 Y, Z 轴正向均成 45° 角. 自然光经过前置光学系统射入起偏器 P_1 后, 变为沿 P_1 偏振化方向振动的一束线偏振光, 入射到 Savart 偏光镜左板后分成寻常光(o 光)和非寻

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 40537031) 国家自然科学基金(批准号: 40375010, 60278019) 和陕西省科技攻关项目(批准号: 2005K04-G18) 资助的课题.

† E-mail: pengzhihong@stu.xjtu.edu.cn

常光(e光)两束线偏振光, o光沿原入射方向传播, e光偏折. 进入右板时, 原o光变为e光, 原e光变为o光, 出射光为振动方向互相垂直的平行于原入射光传播方向有横向剪切量^[4]的两束线偏振光. 通过检偏器 P_2 后变成振动方向完全一致的两束线偏振光, 经成像镜后在探测器上相遇, 形成干涉图样和目标像.

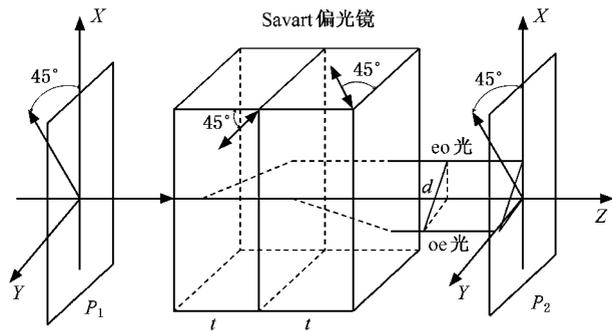


图1 Savart 偏光镜原理图

3. Savart 偏光镜透射率的计算

当入射线偏振光的入射面与 Savart 偏光镜左板主截面夹角不同时, 其在 Savart 偏光镜中的传播情况也不相同. 本文分别就入射面与 Savart 偏光镜左板主截面重合和垂直两种情况进行讨论.

3.1. 线偏振光入射面与 Savart 偏光镜左板主截面重合时透射率的计算

当入射面与 Savart 偏光镜左板主截面重合时, 线偏振光在 Savart 偏光镜中的传播可以分为四个步骤. 首先, 从起偏器 P_1 出射的线偏振光由空气入射到 Savart 偏光镜左板(光轴方向为 $\hat{C}_1 = (\sqrt{2}/2, 0, \sqrt{2}/2)$) 这束线偏振光将分成一束反射光和两束折射光^[16](o光和e光). 两束折射光从左板分别射入到胶粘剂中, 由于胶粘剂是各向同性的, 因此, 对于入射到其中的o光将产生一束反射o光和一束折射光, 而对于入射到其中的e光将产生一束反射e光和另一束折射光. 上述两束折射光分别由胶粘剂入射到 Savart 偏光镜右板(光轴方向为 $\hat{C}_2 = (0, \sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2)$), 产生一束反射光和两束折射光(即oo光、oe光或eo光、ee光). 最后, oo光、oe光以及eo光、ee光分别透过 Savart 偏光镜右板出射到空气中.

3.1.1. 由空气入射到 Savart 偏光镜左板

1) 光线在 Savart 偏光镜左板晶体内的传播

取图1所示的坐标系, 设一束入射到 Savart 偏光镜的偏振光 S 的方向矢量为

$$\hat{S} = (-\sin\varphi_i, 0, \cos\varphi_i),$$

则根据反射定律, 反射光 S_r 的方向矢量为

$$\hat{S}_r = (-\sin\varphi_i, 0, -\cos\varphi_i).$$

折射o光波矢的方向矢量为

$$\hat{K}_{o1} = (-\sin\theta_o, 0, \cos\theta_o).$$

折射e光波矢的方向矢量为

$$\hat{K}_{e1} = (-\sin\theta_e, 0, \cos\theta_e).$$

这里, φ_i 为入射角, θ_o 和 θ_e 分别为o光和e光的波矢折射角.

由推广的 Snell 定律得到

$$n\sin\varphi_i = n_o\sin\theta_o = n'_e(\theta_1)\sin\theta_e,$$

式中, n 为空气折射率, n_o, n_e 为晶体主折射率; $n'_e(\theta_1)$ 是相应的e光波矢折射率, $n'_e(\theta_1) = n_o n_e \times (n_e^2 \cos^2 \theta_1 + n_o^2 \sin^2 \theta_1)^{-1/2}$; θ_1 是e光波矢与 Savart 偏光镜左板光轴的夹角, $\cos\theta_1 = \hat{K}_{e1} \cdot \hat{C}_1 = \sqrt{2}/2 \cos\theta_e - \sin\theta_e$.

2) 入射光、反射光、折射o光和折射e光的电矢量沿界面分量的表达式

设入射光经起偏器 P_1 后的电矢量为 E , 由 P_1 的偏振化方向可知, XY 方向电矢量的单位矢量 $\hat{E}_{XY} = (\sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2, 0)$.

经分析,

$$\hat{E} = (\hat{S} \times \hat{E}_{XY}) \times \hat{S}.$$

所以

$$E = E(1 + \cos^2\varphi_i)^{1/2}(\cos^2\varphi_i, 1, \sin\varphi_i \cos\varphi_i).$$

由于在晶体内产生了o光、e光, 故假设反射光 S_r 有两个方向相互垂直的电矢量 E_{rp} 和 E_{rs} , 则反射光 S_r 的电矢量

$$E_r = (-E_{rp} \cos\varphi_i, E_{rs}, E_{rp} \sin\varphi_i).$$

因为o光电矢量振动方向与o光主平面垂直, e光电矢量振动方向与e光主平面平行, 所以折射o光电矢量

$$E_{o1} = E_{o1}(0, 1, 0).$$

折射e光电矢量

$$E_{e1} = E_{e1}(\cos\theta_e, 0, \sin\theta_e).$$

3) 对应磁矢量沿界面分量的表达式

根据电磁场矢量间的关系

$$\hat{H} = \hat{K} \times \hat{E},$$

线偏光 S 的磁矢量、反射光 S_r 的磁矢量、折射 o 光的磁矢量、折射 e 光的磁矢量分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= H(1 + \cos^2 \varphi_i)^{-1/2}(-\cos \varphi_i, \cos \varphi_i, -\sin \varphi_i), \\ \mathbf{H}_r &= H_r(E_{rp}^2 + E_{rs}^2)^{-1/2}(E_{rs} \cos \varphi_i, E_{rp}, -E_{rs} \sin \varphi_i), \\ \mathbf{H}_{o1} &= H_{o1}(-\cos \theta_o, 0, -\sin \theta_o), \\ \mathbf{H}_{e1} &= H_{e1}(0, 1, 0). \end{aligned}$$

4) 应用电磁场边值条件求折射 o 光、 e 光的透射系数^[17]

根据电磁场边值条件, 各个电场、磁场分量 \hat{E}_x , \hat{E}_y , \hat{H}_x , \hat{H}_y 分别为

$$H(1 + \cos^2 \varphi_i)^{-1/2} \cos^2 \varphi_i - E_{rp} \cos \varphi_i = E_{e1} \cos \theta_e, \quad (1)$$

$$H(1 + \cos^2 \varphi_i)^{-1/2} + E_{rs} = E_{o1}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &-H(1 + \cos^2 \varphi_i)^{-1/2} \cos \varphi_i \\ &+ H_r(E_{rp}^2 + E_{rs}^2)^{-1/2} E_{rs} \cos \varphi_i = -H_{o1} \cos \theta_o, \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &H(1 + \cos^2 \varphi_i)^{-1/2} \cos \varphi_i \\ &+ H_r(E_{rp}^2 + E_{rs}^2)^{-1/2} E_{rp} = H_{e1}. \quad (4) \end{aligned}$$

将(1)–(4)式联立, 并利用 $H = (\sqrt{\epsilon/\mu})E$, 且 $\mu = \mu_o$, 可得到 o 光、 e 光的透射系数 t_o , t_e 分别为

$$t_o = \frac{E_{o1}}{E} = \frac{2n \cos \varphi_i (1 + \cos^2 \varphi_i)^{-1/2}}{n \cos \varphi_i + n_o \cos \theta_o}, \quad (5)$$

$$t_e = \frac{E_{e1}}{E} = \frac{2n \cos^2 \varphi_i (1 + \cos^2 \varphi_i)^{-1/2}}{n \cos \theta_e + n'_e(\theta_1) \cos \varphi_i}. \quad (6)$$

相应的能量透射率

$$T_o = \frac{t_o^2 n_o \cos \theta_o}{n \cos \varphi_i},$$

$$T_e = \frac{t_e^2 n'_e(\theta_1) \cos \theta_e}{n \cos \varphi_i}.$$

3.1.2. 从 Savart 偏光镜左板到胶粘剂的传播

设粘接左右两板的胶粘剂折射率为 n' , 光线射出到胶粘剂时的折射角都是 φ'_i , 其方向矢量均为

$$\hat{K}_a = (-\sin \varphi'_i, 0, \cos \varphi'_i).$$

类似于以上分析, 对于 o 光、 e 光分别得到入射光、反射光和折射光的电矢量、磁矢量沿界面分量的表达式, 再应用电磁场边值条件得

$$\begin{aligned} t_{oa} &= \frac{E_{oa}}{E_{o1}} \\ &= \frac{2n_o \cos \theta_o}{n' \cos \varphi'_i + n_o \cos \theta_o}, \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{ea} &= \frac{E_{ea}}{E_{e1}} \\ &= \frac{n'_e(\theta'_1) \cos \theta_e + n'_e(\theta_1) \cos r_e}{n' \cos r_e + n'_e(\theta'_1) \cos \varphi'_i}, \quad (8) \end{aligned}$$

式中, r_e 是反射 e 光波矢与入射面法线(Z 轴)的夹角, $n'_e(\theta'_1)$ 是相应的 e 光波矢折射率.

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

$$\cos \theta'_1 = \hat{K}_{re} \cdot \hat{C}_1 = -\sqrt{2}/2 (\cos r_e + \sin r_e).$$

相应的能量透射率

$$T_{oa} = \frac{t_{oa}^2 n' \cos \varphi'_i}{n_o \cos \theta_o},$$

$$T_{ea} = \frac{t_{ea}^2 n' \cos \varphi'_i}{n'_e(\theta_1) \cos \theta_e}.$$

3.1.3. 由胶粘剂到 Savart 偏光镜右板的传播

当光线由胶粘剂传播到 Savart 偏光镜右板时, 其入射光、反射光、折射 oo 光、 eo 光和折射 oe 光、 ee 光的方向矢量都分别对应相同. 同理可得

$$\begin{aligned} t_{oo} &= \frac{E_{oo}}{E_{oa}} \\ &= 2An' \cos \varphi'_i (1 + \sin^2 \theta'_o)^{1/2} \\ &\quad \times \sin \theta'_o [n' \cos \theta'_e + n'_e(\theta_2) \cos \varphi_i], \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{oe} &= \frac{E_{oe}}{E_{oa}} \\ &= 2An' \cos \varphi'_i (1 + \sin^2 \theta'_e)^{1/2} \\ &\quad \times (n_o \cos \varphi'_i + n' \cos \theta_o), \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{eo} &= \frac{E_{eo}}{E_{ea}} \\ &= -2An' \cos \varphi'_i (1 + \sin^2 \theta_o)^{1/2} \\ &\quad \times [n' \cos \varphi'_i + n'_e(\theta_2) \cos \theta'_e], \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{ee} &= \frac{E_{ee}}{E_{ea}} \\ &= 2An' \cos \varphi'_i (1 + \sin^2 \theta'_e)^{1/2} \\ &\quad \times \sin \theta'_e (n_o \cos \theta_o + n' \cos \varphi'_i), \quad (12) \end{aligned}$$

式中, θ'_e 是此时 e 光的波矢折射角, $n'_e(\theta_2)$ 是相应的 e 光波矢折射率.

$$n'_e(\theta_2) = n_o n_e (n_e^2 \cos^2 \theta_2 + n_o^2 \sin^2 \theta_2)^{-1/2},$$

$$\cos \theta_2 = \hat{K}_{oe} \cdot \hat{C}_2 = \sqrt{2}/2 \cos \theta'_e,$$

$$\begin{aligned} A &= \{\sin \theta_o \sin \theta'_e (n_o \cos \theta_o + n' \cos \varphi'_i) \\ &\quad \times [n' \cos \theta'_e + n'_e(\theta_2) \cos \varphi'_i] \\ &\quad + (n_o \cos \varphi'_i + n' \cos \theta_o) \\ &\quad \times [n' \cos \varphi'_i + n'_e(\theta_2) \cos \theta'_e]\}^{-1} \end{aligned}$$

相应的能量透射率

$$T_{oo} = \frac{t_{oo}^2 n_o \cos \theta_o}{n' \cos \varphi'_i},$$

$$T_{oe} = \frac{t_{oe}^2 n'_e(\theta_2) \cos \theta'_e}{n' \cos \varphi'_i},$$

$$T_{eo} = \frac{t_{eo}^2 n_o \cos \theta_o}{n' \cos \varphi'_i},$$

$$T_{ee} = \frac{t_{ee}^2 n'_e (\theta_2) \cos \theta'_e}{n' \cos \varphi'_i}.$$

3.1.4. 由 Savart 偏光镜右板出射到空气

无论是折射 oo 光、oe 光 还是折射 eo 光、ee 光, 从 Savart 偏光镜右板出射到空气时, 都将分别产生两束反射光(反射 ooo 光、oeo 光、反射 ooe 光、oee 光或反射 eoo 光、eoo 光、反射 eoe 光、eee 光)和一束折射光(出射 oo 光、oe 光或出射 ee 光、eo 光)^{16]}.

出射 oo 光、oe 光和 eo 光、ee 光的波矢方向相同, 为 $\hat{S}' = \hat{S} = (-\sin \varphi_i, 0, \cos \varphi_i)$.

注意到出射 ee 光、oe 光电矢量的方向矢量

$$\hat{E}'_{oe} = (\hat{S}' \times \hat{C}_2) \times \hat{S}',$$

出射 oo 光、eo 光电矢量的方向矢量

$$\hat{E}'_{eo} = \hat{S}' \times \hat{C}_2,$$

应用电磁场边值条件, 得此界面上出射 oe 光的透射系数

$$t'_{oe} = \frac{E'_{oe}}{E_{oe}} = \frac{2 \cos \theta'_e (1 + \sin^2 \varphi_i)^2 (1 + \sin^2 \theta'_e)^{1/2} [n'_e (\theta_2) B + 2C]}{nB(D \cos \theta'_e + \cos \varphi_i) + 2A(D \cos \varphi_i + \cos \theta'_e)}, \quad (13)$$

式中

$$B = \cos \theta_o + \sin \theta_o \sin \theta'_e \cos \theta'_e,$$

$$C = \frac{n_o}{2} (\cos \theta'_e + \sin \theta'_e \sin \theta_o \cos \theta_o),$$

$$D = \frac{n_o n_o}{n} \left(n_o^2 - \frac{1}{2} (n_o^2 - n_e^2) \cos^2 \theta'_e \right)^{-1/2}.$$

此界面上出射 ee 光的透射系数

$$t'_{ee} = t'_{oe}.$$

出射 eo 光的透射系数

$$t'_{eo} = \frac{E'_{eo}}{E_{eo}} = \frac{2 n_o \cos \theta_o (\sin^2 \theta_o \sin^2 \theta'_e - 1) (1 + \sin^2 \varphi_i)^2 (1 + \sin^2 \theta_o)^{-1/2}}{n \sin \varphi_i \sin^2 \theta'_e \sin(\varphi_i + \theta_o) + \frac{1}{2} \sin 2 \theta'_e (n_o \sin \varphi_i - n \sin \theta_o) - (n_o \cos \varphi_i + n \cos \theta_o)}. \quad (14)$$

此界面上出射 oo 光的透射系数

$$t'_{oo} = t'_{eo}.$$

相应的能量透射率

$$T'_{oe} = \frac{(t'_{oe})^2 n \cos \varphi_i}{n'_e (\theta_2) \cos \theta'_e},$$

$$T'_{ee} = \frac{(t'_{ee})^2 n \cos \varphi_i}{n'_e (\theta_2) \cos \theta'_e},$$

$$T'_{eo} = \frac{(t'_{eo})^2 n \cos \varphi_i}{n_o \cos \theta_o},$$

$$T'_{oo} = \frac{(t'_{oo})^2 n \cos \varphi_i}{n_o \cos \theta_o}.$$

3.1.5. 出射 oe 光和 eo 光的总体透射率

一束线偏振光经过 Savart 偏光镜后, 将分成四束与入射光线方向平行的线偏振光: oo 光、oe 光和 ee 光、eo 光. 经计算, 这四束光透过 Savart 偏光镜的光强和能量透射率在数值上相同, 此时统称为透射率.

oo 光的透射率为

$$T_{oet} = T_o T_{oa} T_{oo} T'_{oo} = \frac{1 + \sin^2 \varphi_i}{1 + \cos^2 \varphi_i} \left\{ \frac{16 A n n' n_o^2 \cos \varphi_i \cos \varphi'_i \cos^2 \theta_o \sin \theta'_e}{(n \cos \varphi_i + n_o \cos \theta_o) (n_o \cos \theta_o + n' \cos \varphi'_i)} \right\}^2 \times \left\{ \frac{(1 - \sin^2 \theta_o \sin^2 \theta'_e) [n' \cos \theta'_e + n'_e (\theta_2) \cos \varphi'_i]}{n \sin \varphi_i \sin^2 \theta'_e \sin(\varphi_i + \theta_o) + \sin \theta'_e \cos \theta'_e (n_o \sin \varphi_i - n \sin \theta_o) - (n_o \cos \varphi_i + n \cos \theta_o)} \right\}^2. \quad (15)$$

oe 光的透射率为

$$T_{oet} = T_o T_{oa} T_{oe} T'_{oe} = \frac{1 + \sin^2 \varphi_i}{1 + \cos^2 \varphi_i} \left\{ \frac{16 A n n' n_o \cos \varphi_i \cos \varphi'_i \cos \theta_o \cos \theta'_e}{nB(D \cos \theta'_e + \cos \varphi_i) + 2A(D \cos \varphi_i + \cos \theta'_e)} \right\}^2 \times \left\{ \frac{(n' \cos \theta_o + n_o \cos \varphi'_i) [n'_e (\theta_2) B + 2C]}{(n \cos \varphi_i + n_o \cos \theta_o) (n_o \cos \theta_o + n' \cos \varphi'_i)} \right\}^2. \quad (16)$$

ee 光的透射率为

$$\begin{aligned}
 T_{\text{eet}} &= T_e T_{\text{ea}} T_{\text{ee}} T'_{\text{ee}} \\
 &= \frac{1 + \sin^2 \varphi_i}{1 + \cos^2 \varphi_i} \left\{ \frac{8Ann'n_o \cos^2 \varphi_i \cos \varphi'_i \sin \theta_o \cos \theta'_e [n'_e(\theta'_1) \cos \theta_e + n'_e(\theta_1) \cos r_e]}{[n \cos \theta_e + n'_e(\theta_1) \cos \varphi_i] [n'_e(\theta'_1) \cos \varphi'_i + n' \cos r_e]} \right\}^2 \\
 &\quad \times \left\{ \frac{[n_o \cos \theta_o + n' \cos \varphi'_i] [n'_e(\theta_2) B + 2C]}{nB(D \cos \theta'_e + \cos \varphi_i) + 2C(D \cos \varphi_i + \cos \theta'_e)} \right\}^2. \quad (17)
 \end{aligned}$$

eo 光的透射率为

$$\begin{aligned}
 T_{\text{eot}} &= T_e T_{\text{ea}} T_{\text{eo}} T'_{\text{eo}} \\
 &= \frac{1 + \sin^2 \varphi_i}{1 + \cos^2 \varphi_i} \left\{ \frac{8Ann'n_o \cos^2 \varphi_i \cos \varphi'_i \cos \theta_o}{[n \cos \theta_e + n'_e(\theta_1) \cos \varphi_i] [n'_e(\theta'_1) \cos \varphi'_i + n' \cos r_e]} \right\}^2 \\
 &\quad \times \left\{ \frac{(1 - \sin^2 \theta_o \sin^2 \theta'_e) [n'_e(\theta'_1) \cos \theta_e + n'_e(\theta_1) \cos r_e] [n' \cos \varphi'_i + n'_e(\theta_2) \cos \theta'_e]}{n \sin \varphi_i \sin^2 \theta'_e \sin(\varphi_i + \theta_o) + \sin \theta'_e \cos \theta'_e (n_o \sin \varphi_i - n \sin \theta_o) - (n_o \cos \varphi_i + n \cos \theta_o)} \right\}^2. \quad (18)
 \end{aligned}$$

3.2. 线偏振光入射面与 Savart 偏光镜左板主截面垂直时透射率的计算

当入射面与 Savart 偏光镜左板主截面垂直时, 线偏振光在 Savart 偏光镜中传播的反射、折射情况和入射面与 Savart 偏光镜左板主截面重合时基本相

似, 也可以分为四个步骤. 不同的是, 从 Savart 偏光镜左板出射的两束折射光射入到胶粘剂中时, 将各自产生两束反射光(反射 o 光、反射 e 光)和一束折射光.

采用与上述类似的分析方法, 可得 oo 光、oe 光、ee 光和 eo 光的透射率.

oo 光的透射率为

$$\begin{aligned}
 T_{\text{oot}} &= \left[\frac{16nn'n_o \cos \varphi_i \sin \varphi'_i \cos \varphi'_i \cos^2 \theta_o}{(1 + \cos^2 \varphi_i)^{1/2} (A'B' \sin \theta_o \sin \theta'_e + C'D' \wedge F_1 G_1 - F_2 G_2 \sin \varphi'_i \sin \theta'_e)} \right]^2 \\
 &\quad \times \left[\frac{(A' \sin \theta'_e + D' \cos \varphi_i) \wedge F_1 - F_2 \sin \theta_o \sin \theta'_e}{(n' \cos \varphi'_i + n_o \cos \theta_o) \wedge n \cos \varphi_i + n_o \cos \theta_o} \right]^2. \quad (19)
 \end{aligned}$$

oe 光的透射率为

$$\begin{aligned}
 T_{\text{oet}} &= \left[\frac{8nn'n_o \cos \varphi_i \cos \varphi'_i \cos \theta_o (n'_e(\theta'_1) \cos \theta_e + n'_e(\theta_1) \cos r_e)}{(1 + \cos^2 \varphi_i)^{1/2} (A'B' \sin \theta_o \sin \theta'_e + C'D' \wedge F_1 G_1 - F_2 G_2 \sin \varphi'_i \sin \theta'_e)} \right]^2 \\
 &\quad \times \left[\frac{(A' \sin \theta'_e + D' \cos \varphi_i) \wedge F_1 - F_2 \sin \theta_o \sin \theta'_e}{(n' \cos r_e + n'_e(\theta'_1) \cos \varphi'_i) \wedge n \cos \theta_e + n'_e(\theta_1) \cos \varphi_i} \right]^2. \quad (20)
 \end{aligned}$$

ee 光的透射率为

$$\begin{aligned}
 T_{\text{eet}} &= \left[\frac{8Inn'n_o \cos \varphi_i \sin \varphi'_i \cos \varphi'_i \sin \theta'_e \cos \theta'_e}{(1 + \cos^2 \varphi_i)^{1/2} (A'B' \sin \theta_o \sin \theta'_e + C'D' \wedge G_1 I \sin \varphi'_i + F_2 G_2 \sin \theta'_e)} \right]^2 \\
 &\quad \times \left[\frac{(B' \sin \theta_o \cos \varphi_i - C' \wedge n'_e(\theta'_1) \cos \theta_e + n'_e(\theta_1) \cos r_e)}{(n' \cos r_e + n'_e(\theta'_1) \cos \varphi'_i) \wedge n \cos \theta_e + n'_e(\theta_1) \cos \varphi_i} \right]^2. \quad (21)
 \end{aligned}$$

eo 光的透射率为

$$\begin{aligned}
 T_{\text{eot}} &= \left[\frac{16Inn'n_o \cos \varphi_i \cos \varphi'_i \cos \theta_o \sin \theta'_e \cos \theta'_e}{(1 + \cos^2 \varphi_i)^{1/2} (A'B' \sin \theta_o \sin \theta'_e + C'D' \wedge G_1 I \sin \varphi'_i + F_2 G_2 \sin \theta'_e)} \right]^2 \\
 &\quad \times \left[\frac{B' \sin \theta_o \cos \varphi_i - C'}{(n' \cos \varphi'_i + n_o \cos \theta_o) \wedge n \cos \varphi_i + n_o \cos \theta_o} \right]^2. \quad (22)
 \end{aligned}$$

这里,

$$A' = n'_e(\theta_2) \cos \varphi_i + n \cos \theta'_e,$$

$$B' = n \cos \varphi_i + n_o \cos \theta_o,$$

$$C' = n_o \cos \varphi_i + n \cos \theta_o,$$

$$D' = n \cos \varphi_i + n'_e(\theta_2) \cos \theta'_e,$$

$$F_1 = n_o \cos \theta_o - n'_e(\theta_2) \cos \theta'_e,$$

$$F_2 = n_o \cos \theta'_e - n'_e(\theta_2) \cos \theta_o,$$

$$G_1 = n_o \cos \varphi'_i + n' \cos \theta_o,$$

$$G_2 = n_o \cos \theta_o + n' \cos \varphi'_i,$$

$$I = n_o \cos \theta_o + n'_e(\theta_2) \cos \theta'_e.$$

4. Savart 偏光镜透射率的变化规律

考虑入射光波长为 546 nm, 两块 Savart 板用冷杉胶粘接的情况, 透射率是视场角的函数. 计算机模拟 oo 光和 ee 光透射率随视场角的变化关系如图 2 所示. 从图 2 可以看出, oo 光和 ee 光的透射率都非常小, 其数值在 10^{-3} 甚至 10^{-4} 量级. 由于 oo 光和 oe 光的能量非常低, 通常不予考虑, 认为只有 oe 光和 eo 光透射.

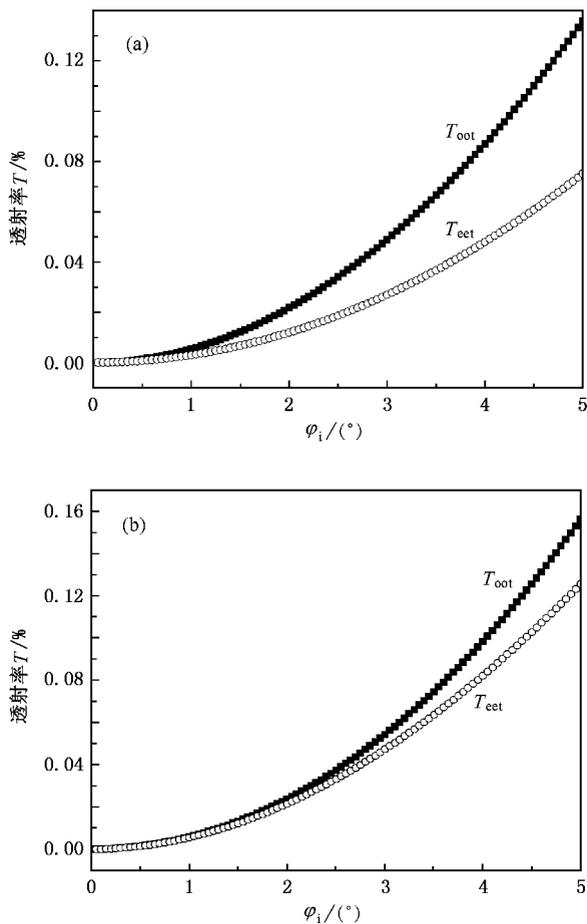


图 2 入射面与 Savart 偏光镜左板主截面重合及垂直时 T_{oot} 和 T_{eet} 随 φ_i 的变化曲线 (a) 重合 (b) 垂直

Savart 偏光镜对入射线偏振光的透射率 $T = T_{oot} + T_{eet}$, 图 3 是 Savart 偏光镜透射率随视场角和波长变化的三维图. 由图 3 可知, 在 3° 视场角时, 对于波

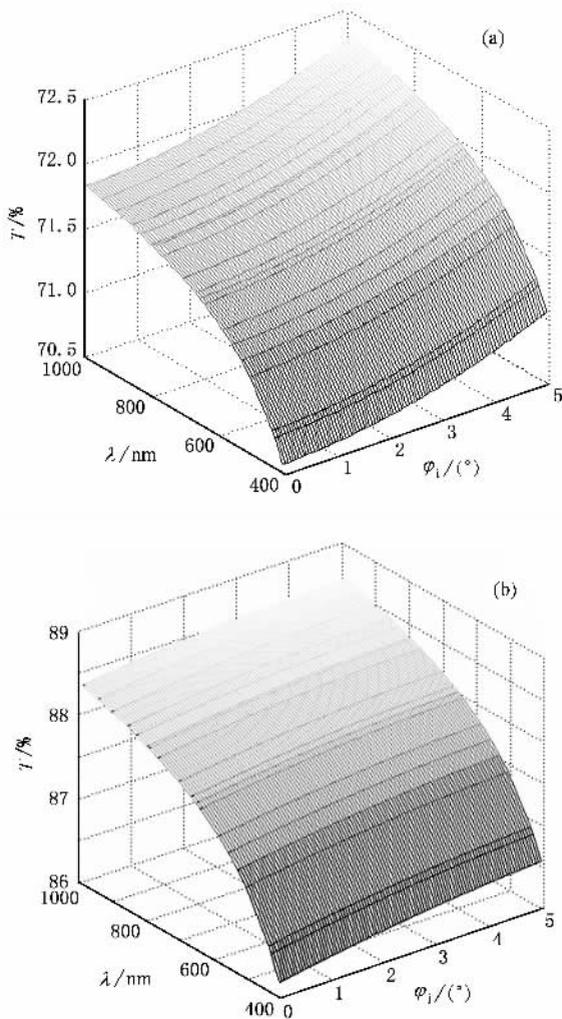
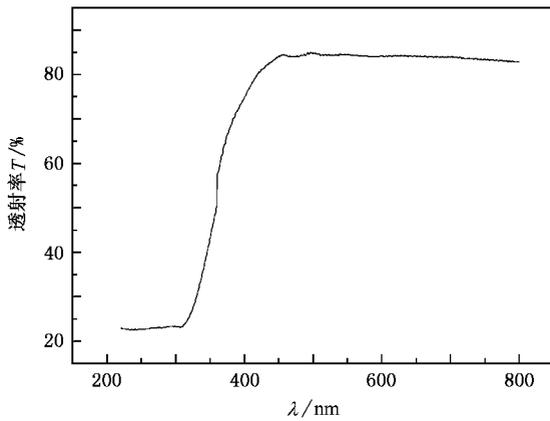
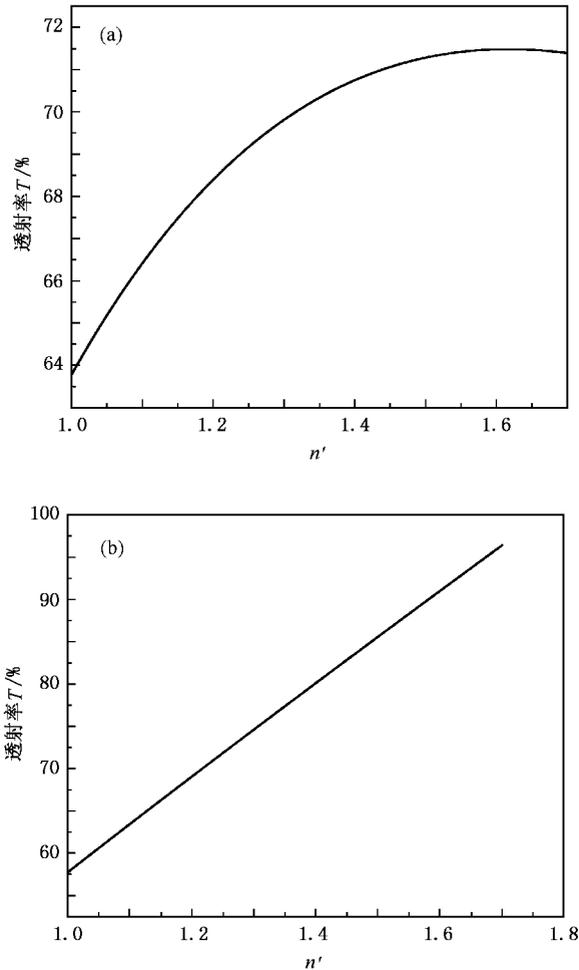


图 3 入射面与 Savart 偏光镜左板主截面重合及垂直时 Savart 偏光镜透射率随视场角和波长变化的三维图 (a) 重合 (b) 垂直

长在 500—1000 nm 范围内的入射光, 当入射面与 Savart 偏光镜左板主截面重合时, Savart 偏光镜理论透射率在 71.2%—72.0% 之间平稳变化; 当入射面与 Savart 偏光镜左板主截面垂直时, 透射率在 86.4%—88.6% 之间平稳变化. 图 4 是用岛津 UV2501 型分光光度计测得的 Savart 偏光镜在 3° 视场角时透射率随波长的变化曲线. 由图 4 可见, 对于波长在 500—1000 nm 谱段范围的入射光, Savart 偏光镜的透射率在 80% 左右. 在 UV-2501 型分光光度计中, 照射在 Savart 偏光镜的是具有一定立体角的、包含沿着各个方向振动的电矢量的光束, 所以实际测量的 Savart 偏光镜的透射率应该是入射面与 Savart 偏光镜左板主截面的夹角在 0° — 360° 范围内透射率的平均值, 也可以认为是入射面与 Savart 偏光镜左板主截面重合和垂直两种情况下的透射率的

图 4 $T-\lambda$ 的测试曲线图 5 入射面与 Savart 偏光镜左板主截面重合及垂直时 T 随 n' 的变化曲线 (a)重合 (b)垂直

平均值. 因而, 在 3° 的立体角内, Savart 偏光镜的理论透射率是入射面与 Savart 偏光镜左板主截面重合和垂直两种情况下的透射率的平均值. 由以上计算可知, Savart 偏光镜的理论透射率大约是 80%. 综合比较图 3 和图 4 Savart 偏光镜透射率随波长的变化规律, 理论与实验基本相符.

在 Savart 偏光镜中, 不同的胶粘剂对应有不同的折射率 n' . 当视场角为 3° 、入射光波长为 546 nm 时, 计算机模拟得到 Savart 偏光镜透射率随 n' 变化的关系曲线如图 5 所示.

需要指出的是, 由于离散角(波矢方向与光线方向的夹角)引起的误差很小^[17], 所以本文未考虑离散角的影响.

5. 结 论

1) 分析了自行研制的新型稳态偏振干涉成像光谱仪中的核心部件——Savart 偏光镜的分光机理. 采用电磁场边值条件, 给出了入射面与 Savart 偏光镜左板主截面重合和垂直两种情况下的 Savart 偏光镜透射率的理论计算公式.

2) 理论证明, Savart 偏光镜的透射率是视场角和波长的函数. 在视场角 $\varphi_i \leq 3^\circ$ 时, 透射率随着视场角、波长的增大而增大.

3) 在可见光至红外谱段范围内(400—1000 nm) 理论计算和实验都证明 Savart 偏光镜透射率大于 80%, 充分显示了 Savart 偏光镜具有高通量、大视场的显著特点.

4) 在入射光线视场角和波长确定时, Savart 偏光镜透射率是胶粘剂折射率 n' 的函数. 胶粘剂的折射率越高(n' 越大) 透射率越高. 因此, 选择折射率较高的光学胶粘剂可得到较高的透射率.

5) 求解由电磁场边值条件确定的方程组, 不但可以得到各界面的透射系数, 还能得到其反射系数, 从而可精确计算光线通过 Savart 偏光镜的能量损失.

6) 该 Savart 偏光镜具有大视场、高通量的显著特点, 适宜作为静态干涉仪和稳态偏振干涉成像光谱仪的高效横向剪切分束器. 本文的研究工作为新型偏振干涉成像光谱技术的研究以及仪器研制提供了重要的理论依据.

- [1] William H S , Philip D H 1996 *Appl. Opt.* **35** 2902
- [2] Philip D H , Francisco P V , David L P *et al* 1993 *Proc. SPIE* **1937** 244
- [3] Zhang C M , Xiangli B , Zhao B C 2000 *Proc. SPIE* **4087** 957
- [4] Zhang C M , Xiangli B , Zhao B C *et al* 2002 *Opt. Commun.* **203** 21
- [5] Zhang C M , Zhao B C , Xiangli B *et al* 2003 *Opt. Commun.* **227** 221
- [6] Zhang C M , Xiangli B , Yang J F *et al* 2000 *J. Xi'an Jiaotong Univ.* **34** 93 (in Chinese) [张淳民、相里斌、杨建峰等 2000 西安交通大学学报 **34** 93]
- [7] Zhang C M , Xiangli B , Zhao B C 2004 *J. Opt. A : Pure Appl. Opt.* **6** 815
- [8] Zhang C M , Zhao B C , Xiangli B 2004 *Appl. Opt.* **43** 6090
- [9] Luo S R , Lü B D 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3061 (in Chinese) [罗时荣、吕百达 2003 物理学报 **52** 3061]
- [10] Luo H L , Hu W , Yi X N *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2947 (in Chinese) [罗海陆、胡巍、易煦农等 2004 物理学报 **53** 2947]
- [11] Wu L , Zhang C M , Yuan Y *et al* 2005 *Acta Opt. Sin.* **25** 885 (in Chinese) [吴磊、张淳民、袁艳等 2005 光学学报 **25** 885]
- [12] Peng Z H , Zhang C M 2006 *Acta Opt. Sin.* **26** 239 (in Chinese) [彭志红、张淳民 2006 光学学报 **26** 239]
- [13] Aldegonda L W , Hedser V B , Hans J F 1998 *Appl. Opt.* **37** 5150
- [14] Max B , Emil W 1999 *Principles of Optics* (Cambridge : Cambridge University Press) p3
- [15] Shen W M , Jin Y X , Shao Z X 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3049 (in Chinese) [沈为民、金永兴、邵中兴 2003 物理学报 **52** 3049]
- [16] Ren H X , Liu L R , Liu D A *et al* 2005 *J. Mod. Opt.* **52** 529
- [17] Xu L P , Wen Y D 2000 *College Phys.* **19** 13 (in Chinese) [许丽萍、温延敦 2000 大学物理 **19** 13]

The transmittance of Savart polariscope in polarization interference imaging spectrometer *

Peng Zhi-Hong^{1)†} Zhang Chun-Min¹⁾ Zhao Bao-Chang²⁾ Li Ying-Cai²⁾ Wu Fu-Quan³⁾

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 710068 , China)

³⁾ Laser Research Institute , Qufu Normal University , Qufu 273165 , China)

(Received 17 January 2006 ; revised manuscript received 20 June 2006)

Abstract

The Savart polariscope is the key spectroscopic component of the static polarization interference imaging spectrometer (SPIIS) that we have developed. The principle of beam splitting of Savart polariscope is described. This paper mainly studies the reflection and refraction of light incident from one medium to another when incident plane and the principle section of the left plate are coincident or perpendicular , according to electromagnetic boundary conditions. The transmission coefficient of each interface is deduced , and the total transmittance is given as a function of angle and wavelength of the incident light which is analyzed through computer simulation. It is proved in theory and by experiment that the Savart polariscope has the advantages of both high flux and large field of view , and can be used as high performance lateral shearing beam splitter in static interferometer and SPIIS. This will provide the theoretical basis for the development of new polarization interference imaging spectral systems.

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

PACC : 4210Q , 4110H , 0765

* Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40537031) , the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40375010 , 60278019) and the Science and Technology Program of Shaanxi Province , China (Grant No. 2005K04-G18) .

† E-mail : pengzhihong@stu.xjtu.edu.cn