

文章编号: 0253-2239(2004)07-965-5

用伪色差概念和 PW 方法设计双折射透镜初始结构*

张蕊 闫聚群 柳忠尧 毛文伟 殷纯永

(清华大学精密仪器与机械学系 精密测量技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 双焦点干涉显微镜因其高稳定性和高分辨率的特点而受到重视,其核心元件双折射透镜由一片双折射晶体和一片光学玻璃胶合而成。为了双折射透镜的设计工作方便,引入“伪色差”概念,定义“伪色散倒数”,从而可以借用现有的初级像差理论,运用 PW 方法,给出满足不同设计要求的三种双折射晶体和三种玻璃配对的双胶合透镜的初始结构表格,在不同的应用场合,可用 OSLO 软件进行像差计算和优化设计,取得需要的结果。为了便于评价这种特定的结构,定义紧凑因子 γ 作为一个评价指标。给出采用方解石和 ZF1 作材料的设计实例,该设计结构紧凑($\gamma=0.25$)。

关键词: 应用光学; 光学设计; 伪色散; 伪色差; PW 方法; 双折射透镜

中图分类号: TH74 文献标识码: A

Design of the Primary Structure of the Birefringent Lens with the Concept of Pseudo-Chromatic Aberration and the PW Method

Zhang Rui Yan Juqun Liu Zhongyao Mao Wenwei Yin Chunyong

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology & Instrumentation,
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 17 February 2003; revised 19 September 2003)

Abstract: The dual-focus interference microscope is applied in various areas because of its characteristics of high stability and resolution. The birefringent lens, consisting of a piece of birefringent crystal and a piece of optical glass, is a key component in the dual-focus interference microscope. In order to design the birefringent lens easily and promptly, not only the concept of “pseudo-chromatic aberration” introduced but also “the reciprocal of pseudo-chromatic dispersion” is defined. Thereby, with the use of the primary aberration theory and the PW method, a useful table of the primary structure of the birefringent lens is given, with the couple of three kinds of birefringent crystals and optical glasses, according to different demands; the calculation of aberration and optimum design are carried out by OSLO, an optical software, and the desired result is obtained. For the sake of evaluating the specific structure, the compact factor γ is defined as a criteria. As a concrete example, calcite and ZF1 are used as materials, the compact factor γ is 0.25.

Key words: applied optics; optical design; pseudo-chromatic dispersion; pseudo-chromatic aberration; PW method; birefringent lens

1 引 言

近年来,共焦显微镜受到广泛的重视^[1~3]。如果把共焦系统和干涉系统集成起来,可以得到很好

的效果。双焦点干涉显微镜因其参考光束和测量光束满足共路原则,表现出优越的性能^[4,5],可以作为集成的对象。1980年,英国国家物理实验室申请了一项“表面形貌干涉仪”的专利^[6];20世纪80年代末,浙江大学卓永模等成功研制出双焦点干涉显微镜^[7]。这些研究中的关键元件是形成双焦点的双折射透镜。在透镜的初始结构满足焦距要求的基础

* 国家自然科学基金(50027002)资助课题。

E-mail: r-zhang02@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期:2003-02-17;收到修改稿日期:2003-09-19

上,张为权等^[8]采用光线追迹法设计了三片胶合的双折射透镜。然而,双折射透镜初始结构的设计方法至今未见文献报道。

本设计用于外差共焦干涉显微系统中,放在显微物镜的前方。显微物镜采用无穷大筒长结构,光阑位于其物方焦点处。双折射透镜是一种共路偏振分束器,入射的线偏振光经双折射透镜后被分为偏振方向正交的寻常光(以下简称 o 光)和非寻常光(以下简称 e 光),o 光平行出射,e 光会聚于显微物

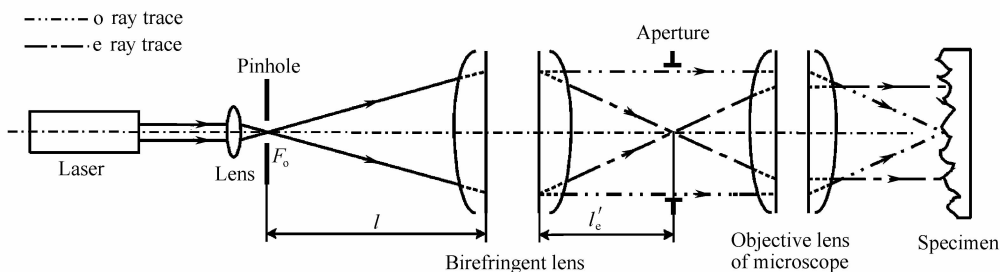


Fig. 1 Schematic diagram of optical paths of heterodyne interferometric confocal microscope

根据薄透镜系统的初级像差理论,在允许选择玻璃材料的条件下,一个双胶合薄透镜组除了校正色差外,还能校正两种单色像差。对于一般的光学玻璃,通常采用 PW 方法设计双胶合透镜:查双胶合薄透镜参量表^[9],找出需要的玻璃组合和所需的参量值,进一步计算透镜组的结构参量。

由于过去的双胶合薄透镜参量表中没有双折射晶体材料,按照传统的 PW 方法,无法设计双折射透镜的初始结构。采用 n_o 、 n_e 分别计算,可以得到需要的像质,但要同时满足结构紧凑的要求是非常困难的。本文提出将薄透镜系统的初级像差理论和伪色差概念相结合的方法,设计双折射透镜的初始结构;再利用光学设计软件 OSLO(高级版),对初始结构进行像差计算和优化设计。

2 PW 方法设计原理

设计实例中,双折射透镜的光路如图 1 所示, F_o 为待设计双折射透镜的 o 光焦点,为满足放大率要求,o 光焦距 $f_o = 180 \text{ mm}$,波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 的正交线偏光在 F_o 入射($NA = 0.025$),要求尽量减小 o 光的球差和彗差;同时要求紧凑因子尽量小。由物像关系易推知,紧凑因子 $\gamma = f_e/l$,其中, f_e 为 e 光的焦距。

通常意义下,色散、色差、双折射有其各自特定的内涵。色散与色差通常指各向同性媒质的折射率随波长变化的定量关系,而双折射现象仅在各向异

镜的物方焦点处,形成类似物方远心光路的结构(图 1)。经显微物镜,o 光聚焦在样品表面的被扫描点,e 光投射在样品表面呈一光斑。反射后,o 光反映被扫描点的信息,e 光作为参考信息,通过对 o 光、e 光的相位比较,得到被扫描点的相对位置。为了实现系统的高分辨率要求,要尽量减小 o 光像差。同时希望系统的结构紧凑,光路尺寸不至过大。为便于评价,定义紧凑因子 $\gamma = l'_e/(l+l'_e)$,其中 l'_e 和 l 分别为 e 光的像方截距和物方截距。

性的媒质中出现。本文从设计方法的需要出发,把单轴晶体在某一波长($0.6328 \mu\text{m}$)下的 o 光与 e 光的折射率差别假想为通常意义下的“色散”,称之为“伪色散”,这样就有可能转化概念,借用已有的理论解决设计问题,不必重新推导全部公式。定义相应的“伪色散倒数”:

$$\text{对正单轴晶体: } v = \frac{n_e - 1}{n_e - n_o},$$

$$\text{对负单轴晶体: } v = \frac{n_o - 1}{n_o - n_e},$$

$$\text{对玻璃: } v = \infty.$$

下文仅以负单轴晶体为例,对于设计以正单轴晶体作为双折射材料的双胶合透镜,只需和上述定义中的方法相似,将下文的 o 和 e 互换即可。

把在光学设计中表现出的双焦点特征称之为“伪色差”,把设计任务转化成设计一个“大色差系统”,使光束经系统后偏折角的差异尽量大,即 $f_o = 180 \text{ mm}$ 不变,而 f_e 尽量小,这样紧凑因子也小。

在上述定义下,可以借用已有的 PW 方法设计双胶合的双折射透镜。

对于一个薄透镜组来说,消色差的条件是伪色差系数 $C = 0$,即 $\sum \frac{\varphi}{v} = 0$,而大色差系统要求 $C = \sum \frac{\varphi}{v}$ 尽量大。

计算玻璃透镜 1 的光焦度:

$$\varphi_1 = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), \quad (1)$$

计算双折射透镜 2 的光焦度:

$$\varphi_2 = (n_o - 1) \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_3} \right), \quad (2)$$

计算伪色差系数

$$C = \frac{\varphi_1}{v_1} + \frac{\varphi_2}{v_2} = (n_o - n_e) \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_3} \right) \infty \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_3} \right), \quad (3)$$

C 与 $(1/R_2 - 1/R_3)$ 的值密切相关, 可通过增大 C , 即增大 $(1/R_2 - 1/R_3)$ 的值来达到减小 f_e 的目的。

为了说明问题, 选用常用的 K9 ($n_1 = 1.51466$) 和方解石 ($n_o = 1.6557, n_e = 1.4852$) 作材料, 晶轴方向平行于透镜主平面。在初始结构设计时, 暂时不考虑 e 光折射率随光线传播方向的变化。用 PW 方法设计步骤如下:

步骤 1:

根据光路可逆原理对 o 光从像方算到物方, 如图 2 所示, 理想情况是当平行光(o 光)入射时会聚在双折射透镜的焦点 F_o 上。平行光从 Glass 1 (即 K9 的折射率 $n_1 = 1.51466$) 入射, 从 Glass 2 (即方解石的折射率 $n_2 = n_o = 1.6557$) 射出。

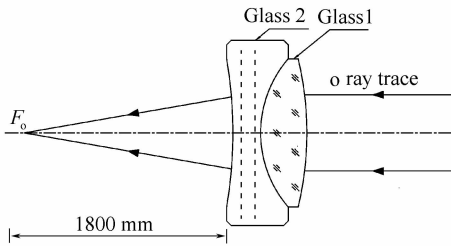


Fig. 2 Schematic diagram of ray trace for ordinary light

利用薄透镜系统的初级像差公式(4)~(10), 其中, (6)、(7)、(9) 式中 a 、 b 、 c 三参量的计算方法详见参考文献[9], 并将 C 逐渐加大, 计算出若干组符合 o 光焦距和像差要求的透镜结构参量。由于透镜的厚度对校正像差作用不大, 将透镜厚度取为 $d = 6$ mm, 最后在计算 r_1, r_2, r_3 时, 需考虑透镜厚度, 宜应用厚透镜公式(11)~(13)计算。

$$\bar{C} = C f_o, \quad (4)$$

$$\varphi_1 = \frac{\bar{C} - 1/v_2}{1/v_1 - 1/v_2} = 1 - 3.84 \bar{C}, \quad (5)$$

$$P_0 = c - b^2/(4a), \quad (6)$$

$$Q_0 = -b/(2a), \quad (7)$$

$$\bar{P}_\infty = \bar{P} = P/(h\varphi)^3, \quad (8)$$

$$Q = Q_0 + \sqrt{(P_\infty - P_0)/a}, \quad (9)$$

$$1/r_2 = \varphi_1 + Q, \quad (10)$$

$$\frac{1}{r_1} = \frac{\varphi_1 + (n_1 - 1)/r_2}{(n_1 - 1) - (n_1 - 1)^2/n_1 \cdot (d/f_o)/r_2}, \quad (11)$$

$$\frac{1}{r_3} = \frac{\varphi_2 + (n_2 - 1)/r_2}{-(n_2 - 1) - (n_2 - 1)^2/n_2 \cdot (d/f_o)/r_2}, \quad (12)$$

$$R_2 = f_o \cdot r_2, \quad R_1 = f_o \cdot r_1, \quad R_3 = f_o \cdot r_3. \quad (13)$$

步骤 2:

为了计算 e 光的焦距 f_e , 从物方算到像方, 因此, 透镜的次序要颠倒过来, 光从 Glass 2 入射 (即方解石的折射率 $n'_2 = n_e = 1.4852$), 从 Glass 1 (即 K9 的折射率 $n'_1 = 1.51466$) 射出, 如图 3 所示。再用步骤 1 求得的初始结构参量, 计算 e 光的焦距 f_e 。

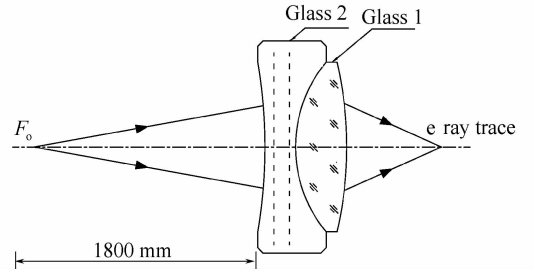


Fig. 3 Schematic diagram of ray trace for extraordinary light

分别用 QK1 ($n = 1.4704$)、ZF1 ($n = 1.6475$) 代替 K9, 重复上述计算过程, 三种玻璃材料作出的 C - γ 曲线图如图 4 所示。三条曲线几乎重合在一起, 即只要伪色差系数 C 值相同, 紧凑因子 γ 就几乎相同; C 值越大, 紧凑因子 γ 就越小, 结构就越紧凑。

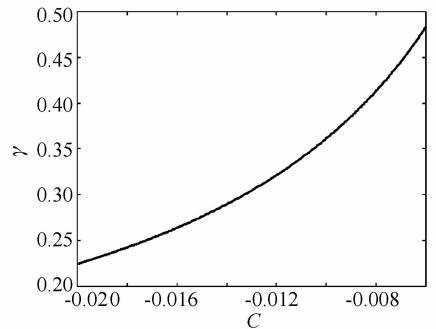


Fig. 4 The relationship between C and γ (C : the coefficient of pseudo-chromatic aberration, γ : the compact factor)

3 初始结构表格编制

用双折射晶体方解石, α -BBO ($n_o = 1.6700, n_e = 1.5307$), YVO₄ ($n_o = 1.9929, n_e = 2.2154$), 和 QK1、K9、ZF1 三种玻璃分别配对, 在不同 C 值下求解其初始结构。将三种双折射晶体和三种玻璃配对的双胶合透镜的初始结构列于表 1 中。

Table 1 Original parameters of structure

Birefringent material	No.	C	γ	QK1($n=1.4704$) /mm				K9($n=1.51466$) /mm				ZF1($n=1.6475$) /mm			
				R'_1	R_1	R_2	R_3	R'_1	R_1	R_2	R_3	R'_1	R_1	R_2	R_3
CaCO ₃	1	-0.006	0.48	29.38	29.64	-39.36	96.57	33.45	33.91	-40.67	89.26	88.00	95.23	-30.44	402.69
	2	-0.008	0.41	23.46	23.62	-31.09	62.88	26.66	26.99	-32.18	58.72	65.00	71.96	-24.51	149.05
	3	-0.010	0.36	19.62	19.69	-25.73	46.08	22.25	22.46	-26.68	43.21	52.80	59.84	-20.31	94.64
	4	-0.012	0.32	16.92	16.92	-21.97	36.02	19.14	19.27	-22.83	33.85	44.40	51.48	-17.34	68.50
	5	-0.0014	0.29	14.91	14.87	-19.18	29.34	16.84	16.91	-19.97	27.60	38.17	45.20	-15.14	52.86
	6	-0.016	0.26	13.37	13.29	-17.03	24.59	15.09	15.09	-17.77	23.15	33.30	40.27	-13.46	42.41
	7	-0.018	0.24	12.14	12.04	-15.32	21.05	13.69	13.64	-16.01	19.82	29.46	36.29	-12.13	34.97
	8	-0.020	0.22	11.15	11.02	-13.93	18.30	12.56	12.47	-14.58	17.24	26.32	33.01	-11.06	29.41
α BBO	1	-0.006	0.48	24.36	24.49	-33.37	70.81	27.56	27.82	-34.71	65.26	52.00	55.78	-29.59	98.98
	2	-0.008	0.42	19.36	19.38	-26.16	47.30	21.86	21.98	-27.27	43.92	40.40	44.03	-23.26	62.09
	3	-0.010	0.36	16.15	16.10	-21.54	35.03	18.20	18.23	-22.51	32.64	32.86	36.35	-19.24	44.16
	4	-0.012	0.32	13.92	13.82	-18.33	27.51	15.66	15.61	-19.20	25.68	27.60	30.91	-16.47	33.59
	5	-0.014	0.29	12.28	12.14	-15.96	22.44	13.80	13.69	-16.75	20.98	23.76	26.86	-14.44	26.67
	6	-0.016	0.27	11.02	10.85	-14.14	18.81	12.38	12.22	-14.87	17.60	20.84	23.74	-12.89	21.82
	7	-0.018	0.24	10.04	9.83	-12.69	16.07	11.26	11.05	-13.38	15.06	18.56	21.27	-11.66	18.26
	8	-0.020	0.23	9.24	9.01	-11.52	13.94	10.36	10.11	-12.16	13.08	16.73	19.26	-10.67	15.54
YVO ₄	1	-0.006	0.48	18.80	18.21	-41.61	313.68	20.30	19.68	-46.65	168.09	25.10	24.12	-61.92	87.55
	2	-0.008	0.41	14.98	14.34	-32.41	176.09	16.18	15.49	-36.32	107.93	20.04	18.95	-48.28	61.13
	3	-0.010	0.36	12.55	11.88	-26.53	120.73	13.56	12.83	-29.74	78.59	16.83	15.65	-39.60	46.56
	4	-0.012	0.32	10.86	10.18	-22.46	90.73	11.74	10.98	-25.17	61.18	14.60	13.37	-33.59	37.33
	5	-0.014	0.29	9.62	8.93	-19.47	71.90	10.40	9.63	-21.82	49.65	12.96	11.70	-29.18	30.97
	6	-0.016	0.26	8.68	7.97	-17.18	58.98	9.38	8.59	-19.26	41.46	11.71	10.42	-25.79	26.32
	7	-0.018	0.24	7.93	7.22	-15.37	49.56	8.57	7.77	-17.24	35.33	10.72	9.40	-23.12	22.78
	8	-0.020	0.22	7.32	6.61	-13.91	42.39	7.92	7.11	-15.60	30.59	9.93	8.59	-20.95	20.00

(R'_1 denotes the modified value of R_1 , which meets the requirement of the value of f_0 to be about 180 mm)

将前述计算所得的 R_1, R_2 和 R_3 值作为透镜的初始结构参量,通过光路计算可以从中选出合适的结构参量。但是在实际透镜中,各组初始结构的 \circ 光焦距并不一致,为了看出像差变化的规律,并便于相互比较,在 OSLO 软件中对玻璃透镜的前表面 (R_1) 作适当调整,使得 \circ 光焦距约为 180 mm,又因为晶体透镜的两半径不作改变,所以伪色差系数不变。调整后的 R_1 值列于表 1 中,用 R'_1 表示。

在不同的应用场合,可选用不同的初始结构进行优化设计,取得需要的结果。

4 设计实例

根据表 1 中调整后的结构参量 (R'_1, R_2, R_3),分别用 QK1, K9 和 ZF1 三种玻璃和方解石胶合而成的双折射透镜作出 f_c - SA_3 (初级球差系数) 曲线图如图 5 所示, f_c - CMA_3 (初级彗差系数) 曲线图如图 6 所示。

从图 5 和图 6 可知,三种玻璃中,在 \circ 光焦距约为 180 mm 时,为达到相同的 f_c , ZF1 和双折射晶体

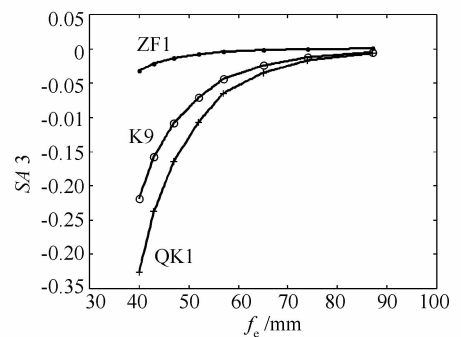


Fig. 5 The relationship between f_c and SA_3 . SA_3 denotes the third-order spherical aberration coefficient of ordinary ray

方解石胶合而成的双折射透镜对应的 \circ 光球差系数 SA_3 和彗差系数 CMA_3 最小。设计要求着重考虑 \circ 光的球差、彗差和紧凑因子 γ , 故选择 ZF1 的第 6、7、8 组数据做进一步的优化设计。在加入孔径光阑后,利用 OSLO 软件的偏振光追迹功能,在设定双折射晶体材料和晶轴方位后,通过输入具体的偏振环境,可以有选择地实现对 \circ 光或 e 光的光线追迹。最终的结构参量见表 2, \circ 光焦距 f_c 约为

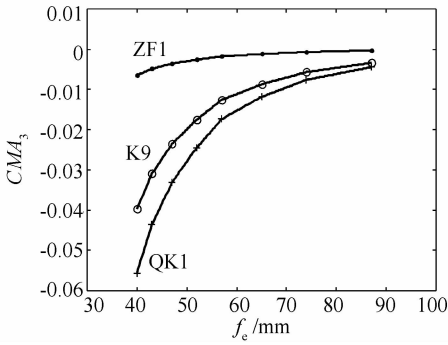


Fig. 6 The relationship between f_e and CMA_3 . CMA_3 denotes the third-order coma aberration coefficient of ordinary ray

180 mm, e 光焦距 f_e 约为 45 mm, 像方截距约为 60 mm。将紧凑因子 γ 、o 光和 e 光的正弦差、球差、以及球差公差列于表 3 中。

Table 2 The optimized parameters of structure

r / mm	d / mm	n	Material
35.00	6	1.6475	ZF1
-12.50	6	1.6557/1.4852	Calcite
46.20			

Table 3 The primary parameters

	γ	OSC	Spherical aberration/mm	Tolerance of spherical aberration/mm
o ray	0.25	0.0016	0.1	4.0
e ray		0.0095	3.9	0.5

可见, 紧凑因子 γ 较理想。测量光 o 光的球差完全满足公差要求, 正弦差也在公差允限 0.0025 之内。而参考光 e 光的球差、正弦差较大, 对于双胶合透镜本身是无法解决的, 由于此两项在本系统中是光阑球差和光阑彗差, 可以留到物镜系统中进行平衡, 在此不作赘述。

结论 本文引入伪色差概念, 把双折射透镜的双焦

点特征转化为“色差”要求, 从而顺利地借用薄透镜系统的初级像差理论进行初始结构设计。对于几种常用的材料组合计算了 PW 参量, 计算出若干组双折射透镜的初始结构, 在此基础上用商用光学设计软件进行优化设计, 很快得到了结构紧凑、满足测量光像差容限要求的结构, 给出的“初始结构参量列表”可供设计人员参考。

参 考 文 献

- 1 Yang Lisong, Wang Guiying, Wang Jiangang *et al.*. Fiber confocal scanning microscopy for the measurement of optical disk pregrooves. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(3): 384~388 (in Chinese)
- 2 Deng Xiaoqiang, Liu Li, Yang Lisong *et al.*. Super-resolution in 3-D confocal surface profilometry. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(7): 853~856 (in Chinese)
- 3 Zhang Jianhuan. Engineering slope measurement with confocal microscopy. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(4): 446~450 (in Chinese)
- 4 Downs M J, Mcgovern W H, Ferguson H J. Optical system for measuring the profile of super-smooth. *Precision Engng.*, 1985, **7**(4): 211~215
- 5 Yin Chunyong. *Modern Interference Measurement Technique* (现代干涉测量技术). Tianjin: Press of Tianjin University, 1999. 300~304 (in Chinese)
- 6 Downs M J, Birch K P, Cox M G *et al.*. Verification of a polarization-insensitive optical interferometer system with subnanometric capability. *Precision Engng.*, 1995, **17**(2): 84~88
- 7 Zhuo Yongmuo, Yang Yongying, Xu Min *et al.*. The double focus interference spherical profiler. *Chin. J. Scientific Instrument* (仪器仪表学报), 1995, **16**(3): 254~259 (in Chinese)
- 8 Zhang Weiquan, Zhuo Yongmo. Design and application of bifocus lens. *Appl. Opt.*, 1993, **32**: 4204~4208
- 9 Yuan Xucang. *Optical Design* (光学设计). Beijing: Press of Beijing Technical University, 1988. 396~426 (in Chinese)