

再现和记录波长不同时点源 全息透镜球差的计算

董裕国

(广州地质新技术研究所)

郝占珍 金中山

摘要: 本文用几何方法, 求出记录和再现波长不同时, 点源全息透镜纵球差、横球差及最小明晰圆直径的表达式。利用此式计算了4880Å 波长记录, 6328Å 波长再现的纵球差和横球差。纵球差计算与测量结果一致。讨论了在全息球面干涉仪中, 如用记录与再现波长不同的点源全息透镜, 对仪器性能产生的影响。

一、前 言

全息透镜和普通透镜一样, 会产生各种像差。某种情况下制作和使用的点源全息透镜(下缩略为 PHL), 可以产生几乎无像差的点源像。但若用不同于记录时用的波长光再现点源时, 虽然记录时用同轴光路, 再现光束和记录光束严格共轴, 也只能消除部份像差, 球差是无法消除的。

二、 PHL 球差及最小明晰圆直径计算式

离轴 PHL 不过是同轴 PHL 的特殊情况, 不失一般性, 只考虑同轴 PHL 。

设 PHL 是用如图1的光路制作的, 参考点光源 P_r 和物点光源 P_o 在记录介质 H 的同侧。 P_r, P_o 垂直交 H 平面于 O 点, $OP_r = \infty$, $OP_o = F_R$, 记录光波长为 λ_R 。如此制作的 PHL 为一费涅尔波带片。设 A, B 点分别表示 PHL 上第 n 和 $n-1$ 个波带, 它们对应的高分别为 H_n 和 H_{n-1} 。

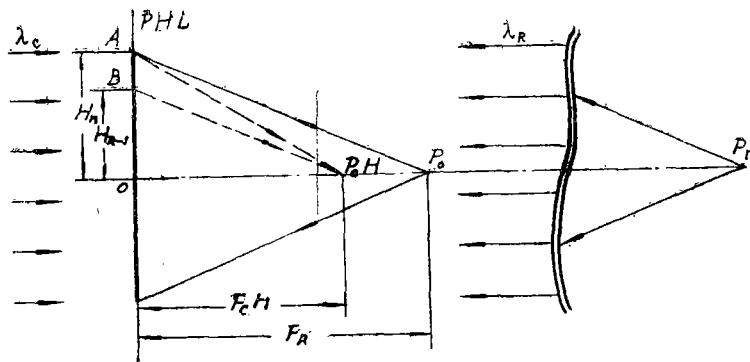


图1 PHL 记录光路及 A, B 环带一级衍射

现用波长为 λ_0 ，与记录参考光共轭的相干光入射到 PHL 上。设 A 、 B 环带的一级衍射焦点近似落在 PHL 轴上的 $P_0(H)$ 点， $OP_0 = F_0(H)$ 。由图1见

$$H_n^2 + F_0^2 = AP_0^2 \quad (1)$$

$$H_{n-1}^2 + F_0^2 = BP_0^2 \quad (2)$$

$$AP_0 - BP_0 = \lambda_0/2 \quad (3)$$

由(1)、(2)和(3)得

$$F_0 = \left[(H_n^2 - H_{n-1}^2) \lambda_0^{-2} + \frac{H_n^2 + H_{n-1}^2}{2} - H_n^2 + \frac{\lambda_0}{16} \right]^{1/2} \quad (4)$$

上述波带有

$$H_{n-1}^2 = (n-1)F_R\lambda_R + \frac{(n-1)^2\lambda_R^2}{4}$$

$$= H_n^2 + \frac{(1-2n)}{4}\lambda_R^2 - F_R \cdot \lambda_R$$

$$n = 2[(F_R^2 + H_n^2)^{1/2} - F_R]\lambda_R^{-1}$$

将 H_{n-1} 和 n 代入(4)式，略去 H_n 下算得

$$F_0(H) = [a - bH^2 + c(F_R^2 + H^2)^{1/2}]^{1/2} \quad (5)$$

$$\text{式中 } a = F_R^2 \left(\frac{\lambda_R}{\lambda_0} \right)^2; \quad b = 1 - \left(\frac{\lambda_R}{\lambda_0} \right)^2; \quad c = \frac{\lambda_R}{2} \left[1 - \left(\frac{\lambda_R}{\lambda_0} \right)^2 \right]$$

$n=0$ 时，对应的焦距为旁轴光束焦距，以 F_0 表示，则纵球差和横球差分别表示为：

$$L \cdot SA = F_{00} - F_0(H) = (a - cF_R)^{1/2} - [a - bH^2 + c(F_R^2 + H^2)^{1/2}]^{1/2} \quad (6)$$

$$T \cdot SA = \frac{2H}{F_{00}} L \cdot SA = 2H \left\{ 1 - \frac{[a - bH^2 + c(F_R^2 + H^2)^{1/2}]^{1/2}}{(a + cF_R)^{1/2}} \right\} \quad (7)$$

利用(6)和(7)式，我们对 $\lambda_R = 4880\text{\AA}$ 记录， $\lambda_0 = 6328\text{\AA}$ 再现的 PHL 球差作了计算，计算结果列于表1中，并用图2表示。

表1

 $\phi = 50\text{mm}$ $F_R = 150\text{mm}$

PHL 高 $H(\text{mm})$	焦距 $F_0(H)(\text{mm})$	纵球差 $L \cdot SA(\text{mm})$	横球差 $T \cdot SA(\text{mm})$
0	115.68	0.00	0.00
1	115.68	0.00	0.00
5	115.63	0.05	0.00
10	115.50	0.18	0.02
15	115.28	0.40	0.10
20	114.97	0.71	0.28
25	114.58	1.10	0.48

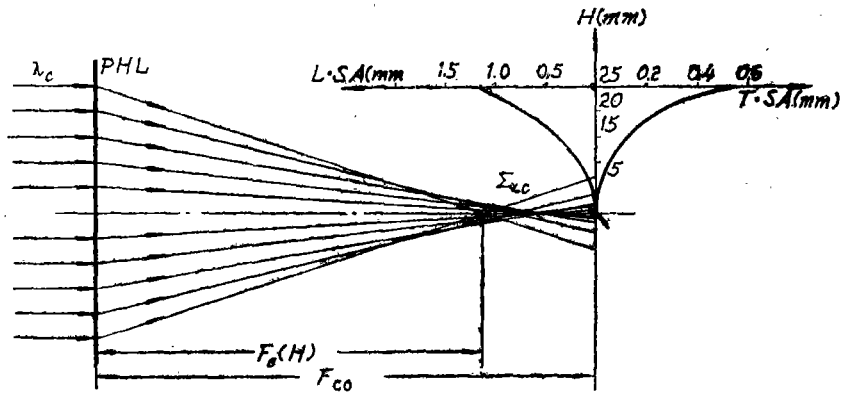


图2 表1数据画出的球差曲线

图2中的 Σ_{LC} 是最小明晰圆直径, $\Sigma_{LC} = 2y_{\max}(H_M)$, 其中 $y_{\max}(H_M)$ 是函数

$$y(H) = \frac{H_M H \{ [a - bH^2 + c(F_R^2 + H^2)^{1/2}]^{1/2} - F_M \}}{F_M H + H_M [a - bH^2 + c(F_R^2 + H^2)^{1/2}]^{1/2}} \quad (8)$$

的最大值, 依赖于PHL的孔径 ϕ ($\phi = 2H_M$), F_M 表示 H_M 环带对应的再现焦长。

按表1的参数, 对 $y(H)$ 作数值计算得 $\Sigma_{LC} = 0.12\text{mm}$ 。由表1见, 同一PHL参数下的 $L \cdot SA$ 是 0.48mm , 即 $\Sigma_{LC} = \frac{1}{4} T \cdot SA$, 和普通透镜最小明晰圆与横球差的关系类似。

三、纵球差计算结果和实测值的比较

我们用重铬酸铵胶作记录介质, 按表1参数和图1光路制作PHL。测量光路如图3。再现波长 $\lambda_c = 6328\text{\AA}$ 的相干光平行PHL光轴入射。PHL前有一环状光阑S, 环宽 1.5mm , 中心与PHL中心重合。用显微镜测量不同环带高H对应的焦距 $F_c(H)$ 的变化。测量结果列于表2。

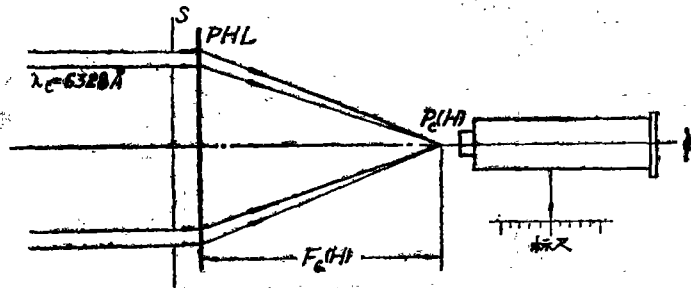


图3 纵球差测量光路

图4表示测量纵球差和实测纵球差的比较, 可以看出, 计算和实测结果是一致的。

表 2

PHL 球差实测值

实测区域 ϕ (mm)	对应环高 H (mm)	相邻环带 ΔF_c (mm)
2	0.7	0.04
15	5.4	0.44
30—36	16.5	0.40
42—48	22.5	0.18
48—50	24.5	

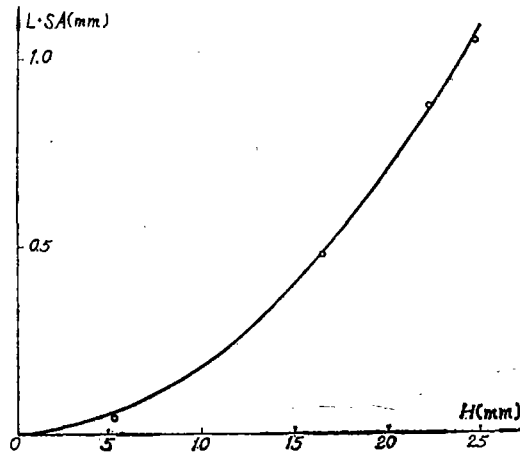


图 4 纵球差计算和测量结果的比较：曲线表示按表 1 计算结果；○点表示实测值

四、全息球面干涉仪中，若用记录和再现波长不同的 PHL 时对仪器性能的影响

全息球面干涉仪是测量球面面形和球径用的。如图 5 所示，此时在 PHL 不同点入射的光衍射后聚焦于光轴上不同的点。大孔径小 F 数的待测件，要用小 F 数的 PHL 来测量。从

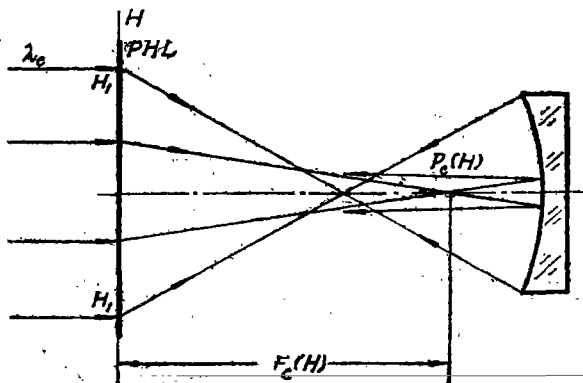


图 5 由于 PHL 产生球差，球径测量精度低，面形无法测量

(6) 式和 (7) 式见, F 数越小, PHL 产生的球差越大, 越难确定 “顶点”, 球径测量精度越低。

对于某一待测球面, 只有 PHL 上某一环带 (如图 5 中的 H_1H_1) 衍射光经球面反射后沿原路返回, 其他环带的衍射光经球面反射后不再沿原光路返回, 故面形无法测量。

本文部份计算得到周万治同志协助验算, 部分实验得到唐祝洲的协助, 谨致谢意。