

用于MTF评价的复消色差准直物镜的设计

提要 最近几年人们把许多注意力放在设计和制造大相对孔径物镜上,这种物镜被用于灵敏度扩展到近红外波段的探波器上。不太完善的MTF测量装置上作为标准部件配备的折射式准直物镜,物镜结构比较简单,而且光谱校正也受到限制。因而在直接测定大相对孔径物镜的多色MTF值和轴上色差时,就会产生误差。

文中详细讨论了一个焦距1500mm的复消色差准直物镜,实际上它具有只受衍射限制的性能和很小的二级光谱($\approx 0.0001\text{EFL}^{(1)}$),从而使上述误差的产生减到最小的程度。

引言

很多在市场上所能买到的 MTF 测量装置,装备的准直物镜结构比较简单,多数情况下是一个简单的双胶合组。这些准直物镜一般地只在小于100nm宽的波段里性能是理想的(只受衍射限制),并且只在480和650nm之间校正色差。虽然对多数型式的光学系统的测试完全适用,但用于现代的大相对孔径物镜的评价就出现问题,这些物镜多数是设计用于 $S_{20}\text{ER}$ 型的探波器。将来使用镱砷光电探测器就必将更加强调整进准直物镜红波段校正的必要性。

Stephens[1]曾说明过一个典型的 BK_7 、 SF_{12} 双胶合组的色差。由此可见这种物镜在550到850nm波长之间的焦点位移是0.0026EFL,假定准直物镜的焦距是1000mm,被测物镜的焦距是100mm,那么被测物镜焦平面上的焦点位移等于 $26\mu\text{m}$ 。

图1是三个典型的大相对孔径物镜单色波长的MTF随像面位置变化的曲线,其中两个物镜是折反射式结构,MTF值是在Odetta 2型MTF分析器上用一块中心波长643nm的滤光片测定的,显然 $25\mu\text{m}$ 的焦点位移将导致严重降低测得的MTF值,当在扩展的光谱范围内进行“白光”测量时,这一点可能是特别重要的。正如以前所指出

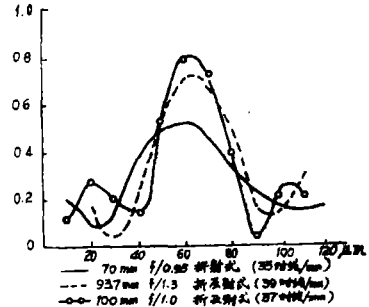


图1 三个大相对孔径物镜波长643nm的MTF随像面位置变化的曲线

的[2],如果用加适当权重的单色光值作轴外多色光MTF测量的话,位相方面的数据(即PTF)是必不可少的,但是只有少数市面上的装置具有这个能力。因此,必须用适当的滤光片直接进行这种多色光的MTF的测量[2]。为了获得准确的MTF值,就必须减少准直物镜的色差影响。

如果用MTF装置测量被测物镜的轴上色差,在测试中,由于准直物镜的色差影响,就会产生误差。对国家物理研究实验室(NPRL)制造的两种不同型式的100mm折反射式物镜测量了轴上色差,这两种情况都观测到理论值和测量值之间有相当大的差别(图2)。这两种情况所出现的差别都可以直接归因于准直物镜的色差,它们在波长550和850nm之间大致为0.0011EFL,在这个特定的情况下,准直物镜对被测物镜的焦比是

注(i): EFL表示有效焦距,下同。——译者

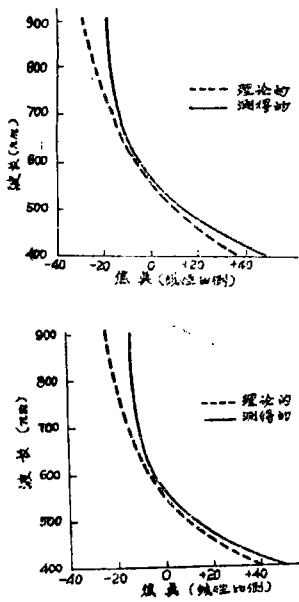


图2 100mmf/1.0物镜轴上色差(a)F73
(b)A73

12:1, 减少这个比值就会使被测物镜实测色差的误差增加。

本研究是因为要在现有的MTF装置上评价大相对孔径物镜就必须有一个适用的准直物镜这一要求提出来的。

在国家物理研究实验室(NPRL)中,现有的准直物镜焦距最长的是1200mm,口径大为100mm。为了提高实验室的能力,已经设计了一个名义焦距为1500mmf/11的新物镜,希望在波长404.7和852.1nm之间校正色差,并且在这个光谱范围内波差小于 $\lambda/4$,为使准直物镜尽可能有多用途,要求二级光谱小于 $\pm 0.0001EFL$ 。准直物镜对被测物镜的焦比是10.1:1,因而在被测物镜的焦面上误差只有 $1.5\mu m$ 。正如多数的MTF测定,准直物镜的视场很小,半视场角定为 0.4° 。全部设计工作和理论评价都是用光学设计程序Accos V完成的。

很明显,上述问题的解决办法是采用离轴式反射型准直物镜。现在的情况是不想用这种解决办法,因为这要对现有的MTF评价装置进行大量的机械结构上的修改。为了保持这个装置的直线外形需要用一折射式

准直物镜。

关于消色差或复消色差的双胶合组、三片结构等等的玻璃选择,已经发表了很多论文[1,3—12],其中大多数文章看来主要研究一些假设的问题,玻璃厚度和性能除了对二级光谱校正的影响外,其它的问题则没有考虑。正如Nefedov[11]所指出,要求一个物镜的复消色差,仅仅减小二级光谱是不充分的,而正确的定义必须包括波差特性的研究。

Lessing[6]、Stephens[1]和Herzberger[3]各自提出的方法都可以用来决定复消色差三片结构的玻璃选择。Herzberger还发表了一个这种三片结构的可能的418种玻璃组合的表[12]。但是,为达到所要求的性能,必须同时用两个或三个三片结构组合成最后设计,而每个单元本身是各自复消色差的。

用一个准对称的双胶合组设计代替三片结构,二级光谱也是能校正的。物镜的这种原理Jamieson[10]、Nefedov[11]和Gaj[9]已经叙述过。

Gaj曾指出,在最后性能方面无论双胶合组还是三片结构,都不能说那一个更优越些。

在上述的多数例子中,最流行的作法是至少选择萤石来做一个单元。本研究决定避免使用萤石,因为使用这种材料会引起其它一些问题。

这个设计是采用类似于Nefedov的方法完成的。就双胶合组而言,共轭距无穷大时的二级光谱可以表示为:

$$f' = \frac{(P_2^{**} - P_1^{**})}{\nu_2 - \nu_1}$$

这里 P^{**} 和 ν 分别是玻璃的部分色散和阿贝数,而 f' 是焦距。因而为了使二级光谱减小到最小,必须使部分色散接近相等,同时阿贝数的差别尽可能大。部分色散的定义依光谱的校正范围而定,用Herzberger的定义[3]:

$$P^{**} = \frac{n_s - n_f}{n_f - n_c} \text{ 和 } P^* = \frac{n_i - n_f}{n_f - n_c}$$

这里下标具有通常的意义。这两个关系对肖特目录上的几种玻璃以 ν_d 的函数表示在图 3 中。“正常线”选为穿过玻璃 F_2 和 K_7 的直线。双胶合组典型的玻璃组合包括下表所列。

玻璃1	P^{**}	玻璃2	P^{**}
FK ₅₁	1.54409	SK ₁₄	1.54323
FK ₅₁	1.54409	K ₇	1.54356
FK ₅₂	1.54209	K ₇	1.54356
萤石	1.53187	KF ₃	1.53164
萤石	1.53187	KZFS ₁	1.53019
BaK ₁	1.53004	KZFS ₁	1.53019
BaK ₂	1.53806	KZF ₂	1.53664

P^* 值用来区别按 P^{**} 值选择的玻璃对中哪个更合适。例如FK₅₁既可以用K₇也可以用SK₁₄配对,但从 P^* 值看,显然选择SK₁₄更好。

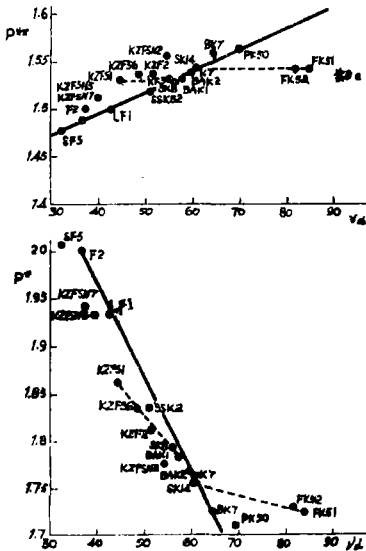


图 3 肖特目录的几种玻璃的部分色散特性曲线

使用两种玻璃的设计

我们考虑的第一个准直物镜是用两种玻璃采用两个双胶合的形式。

找到了一个十分合适的玻璃组合SK₁₄、FK₅₁玻璃对, P^{**} 值相差 0.00086, 这两种玻璃的折射率差也是合适的, 由于这两种玻璃膨胀系数差别大, 胶合是不可能的, 然而

在后面的双胶合中留有一个小的空气间隙, 对整个物镜的性能并没有影响。表 I 给出了最后设计的参数, 而这个物镜的结构在图 4 中给出。图 5 表示出光谱范围300到1000nm

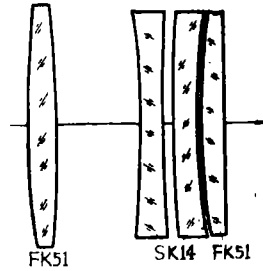


图 4 用两种玻璃SK₁₄和FK₅₁设计的准直物镜

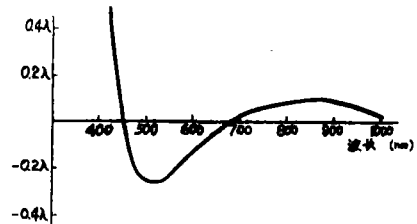


图 5 SK₁₄/FK₅₁的准直物镜全口径时的波差

之中的波差值。可以看出在 400nm和1000nm之间的任何波长, 波差小于 $\lambda/4$ 。二级光谱由图 6 表示, 由此可见, 设计波长 656.3nm与从435.8到1000nm范围内的任何波长之间, 焦距的差别小于 0.0001EFL。元件的公差已经计算过, 计算结果表明物镜的公差是不过

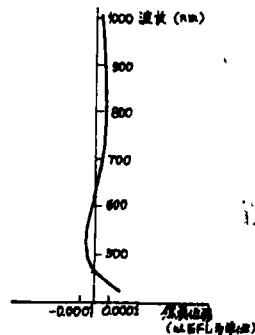


图 6 SK₁₄/FK₅₁准直物镜的二级光谱

于敏感的。

图7是空间频率10、30和50对线/mm的轴上点MTF随波长变化的曲线，图中还表示出了理论上只受衍射限制时的MTF值。10对线/mm的MTF与只受衍射限制的理想情况相符，MTF是很好的，但较高的空间频率在500nm附近则发生偏离，在这里我们

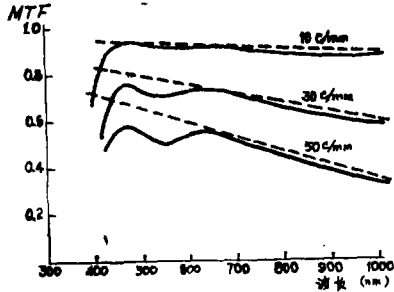


图7 SK₁₄/FK₅₁准直物镜空间频率10、30和50对线/mm的轴上MTF随波长变化的曲线

表I SK₁₄/FK₅₁准直物镜的设计参数

面序	曲率半径 (mm)	轴上间隔 (mm)	介质	折射率 (n _c)
0	∞	∞	空气	1
1	642.400	14.0	FK ₅₁	1.484798
2	-886.988	45.97	空气	1
3	-742.200	14.0	SK ₁₄	1.600073
4	1150.930	5.0	空气	1
5	886.988	14.0	SK ₁₄	1.600073
6	421.300	0.5	空气	1
7	421.300	13.0	FK ₅₁	1.484798
8	-1863.200	1353.26	空气	1
9	∞		空气	1

有效焦距: 1473.28mm

相对孔径: 1:10.99

也观测到较大的波差值。三个波长的全视场(0.4°)的MTF值在图8中给出，MTF曲线在波长486.1nm处下降的特别多，表明波差有很大增加。但这并不特别严重，因为准直物镜和被测物镜的焦距通常有一个大的比值，准直物镜一般用于空间频率范围0到10对线/mm之中。

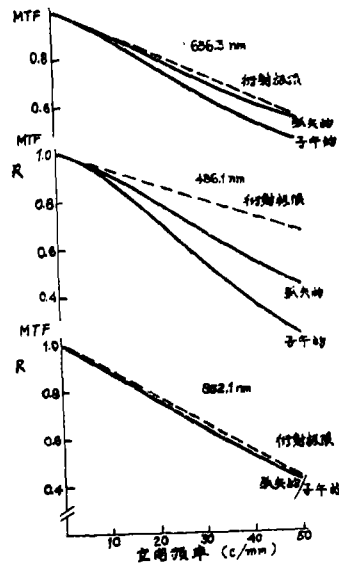


图8 准直物镜半视场为0.4°的MTF

使用三种玻璃的设计

Nefedov〔11〕所叙述的第二种途径是使用三种玻璃。他提出用一个胶合三片组（两个会聚透镜在外面）和一个双胶合组，它们的组合作为初始设计。三种玻璃是按Lessing〔6〕和Stephens〔1〕得出的结论选择的，即应该用冕牌、短火石和长火石玻璃。Nefedov提出的典型的玻璃安排是用两个冕牌和一个长火石作会聚单元，而短火石作两个发散单元。玻璃的实际选择主要依这些单元之间光焦度平衡的要求来确定。

在现在的情况下，所选择的玻璃是PK₅₀、SF₈和KZFSN₅。在设计期间，只要可能就将半径调整到这个实验室的光学车间现有样板的值。这样做并不导致性能的显著降低。表II给出了这个设计的参数，这个物镜的结构如图9，波差以及作为波长的函数的焦距在图10中给出。在435.8nm和980.0nm之间的各个波长，波差均小于λ/10，在波长435.8和980.0nm之间，二级光谱小于±0.00005EFL。

曾经研究过公差值，虽然发现曲率的公差比SK₁₄、FK₅₁的设计要严，但轴上厚度公

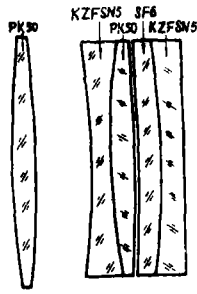


图9 用三种玻璃PK₅₀、SF₆和KZFSN₅设计的准直物镜

差仍然不难，在标准的光学加工数字之内。

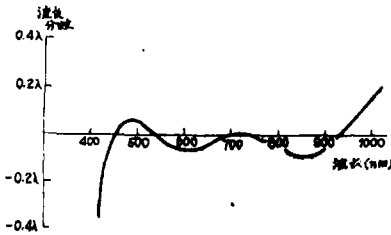


图10 PK₅₀/SF₆/KZFSN₅准直物镜的波差和二级光谱

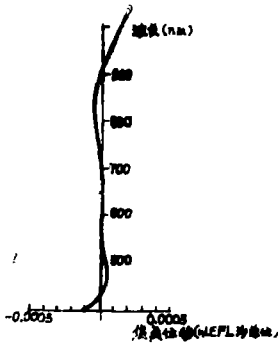


图11表示这个设计空间频率为10、30和50对线/mm 依波长为函数的MTF，虚线表

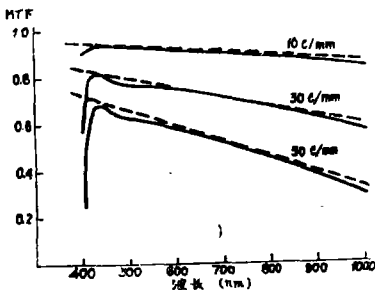


图11 PK₅₀/SF₆/KZFSN₅准直物镜空间频率10、30和50对线/mm依波长为函数的轴上MTF曲线

示这些空间频率的只受衍射限制的传递函数曲线。这个图说明在404.7到1014.0nm光谱范围，计算出来的性能与只受衍射限制的理想情况的MTF曲线符合得很好。这个物镜

表I PK₅₀/SF₆/KZFSN₅准直物镜的设计参数

面序	曲率半径 (mm)	轴上间隔 (mm)	介质	折射率 (n _c)
0	∞	∞	空气	1
1	554.66	12.0	PK ₅₀	1.518236
2	-642.40	30.19	空气	1
3	-554.66	12.0	KZFSN ₅	1.6492
4	444.25	12.0	PK ₅₀	1.518236
5	-1770.31	1.5	空气	1
6	-2081.50	13.0	SF ₆	1.796087
7	-498.35	13.0	KZFSN ₅	1.6492
8	-5657.00	1411.39	空气	1
9	∞		空气	1

有效焦距: 1525.0mm
相对孔径: 1:11.18

的轴外性能(半视场0.4°)由图12说明，它表明了656.3、486.1和852.1nm三个波长的弧矢曲线和子午曲线与只受衍射限制的理想情况的比较。偏离只受衍射限制情况的

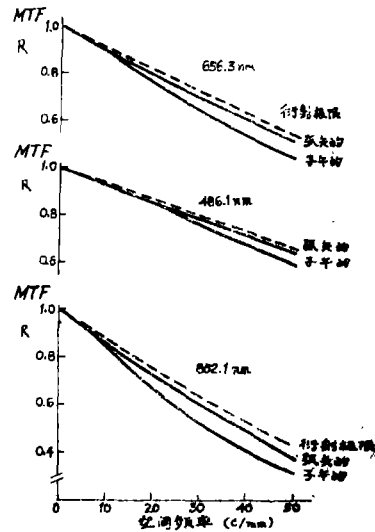


图12 准直物镜半视场0.4°的MTF

MTF 曲线的量仍然不超过由小的残余波差所予料的大小，而这对于其应用已是足够合适的了。

实际考虑

图4和图9所示的两种玻璃和三种玻璃的设计,实际上在一个宽的光谱范围内有只受衍射限制的MTF曲线。然而当比较这两个设计时,很明显,三种玻璃的设计性能更优越。因而我们选择了这一设计,它和前言中提出的要求最为接近。

以上所述的这个设计,使用的是肖特厂目录所给出的理论折射率和色散特性。遗憾的是

的是实际玻璃不能准确地等价于理论材料。我们可以对购买的偏离理论值的玻璃规定容许限度,但是这样会增加相当多的费用,有些时候甚至超过购买价格的50%。为了降低费用,准直物镜的玻璃可以不按照规定的等级来要求,而宁可接受能够交付使用并且供应得到保证的条件。所交付的材料性能概括在表Ⅲ中,肖特厂按照偏离理论值的大小把玻璃分成等级,4级代表最大的允许偏离量。从表Ⅲ中可以看出,虽然PK₅₀和SF₆属于最高的等级,但是KZFSN₅的色散特性

表Ⅲ 理论玻璃的性能与肖特厂实际玻璃的性能的比较

玻璃牌号	n _d (理论的)	(n _d 实际的)	差别	肖特等级	v _d (理论的)	v _d (实际的)	差别	肖特等级
PK ₅₀	1.52054	1.52032	0.00022	1	69.70	69.48	0.31%	2
KZFSN ₅	1.65412	1.65386	0.00026	2	39.63	39.80	0.42%	3
SF ₆	1.80518	1.80501	+0.00017	1	25.43	25.45	0.08%	1

与理论值差0.42% (3级)。当将熔炼出来的实际玻璃折射率取而代之用上面所叙述的设计中时,我们发现必须作某些重新设计。

表Ⅳ 准直物镜采用熔炼的折射率的最后设计参数

面序	曲率半径 (mm)	轴上间隔 (mm)	介质	折射率 (n _c)
0	∞	∞	空气	1
1	594.000	11.0	PK ₅₀	1.51802
2	-732.645	28.4	空气	1
3	-624.323	11.0	KZFSN ₅	1.64897
4	471.822	12.0	PK ₅₀	1.51802
5	-1454.000	5.35	空气	1
6	-2390.000	13.0	SF ₆	1.79593
7	-580.010	13.0	KZFSN ₅	1.64897
8	-6474.000	1370.896	空气	1
9	∞		空气	1

有效焦距: 1471.28mm

相对孔径: 1:10.79

最后设计的参数在表Ⅳ中给出,其中有5个是现有的样板半径。两个胶合组元的间隔也增大了,使机械结构变得容易。

图13表明了这个最后设计的二级光谱和轴上波差。在400和1000nm之间二级光谱正如所要求的那样小于 ±0.0001 EFL, 与以

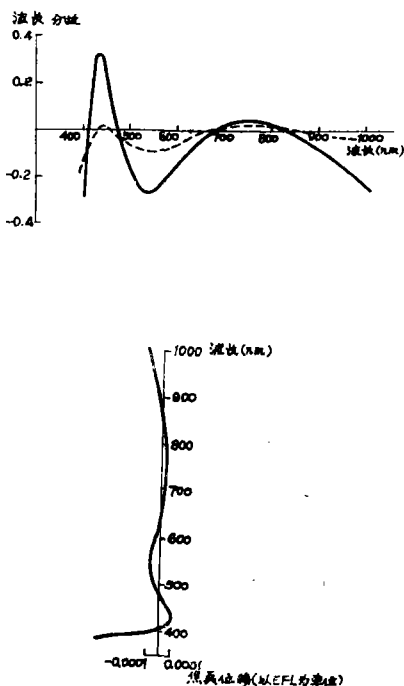


图13 PK₅₀/SF₆/KZFSN₅ 准直物镜用熔炼的折射率全口径(——)和半口径(---)的波差和二级光谱。

前其中采用理论折射率的设计比较,波差是相当大。在435.8和546.1nm波长附近稍微超出 $\lambda/4$ 判断,只是在625和905nm之间的各个波长波差小于 $\lambda/10$ 。

图14表示空间频率10、30和50对线/mm依波长为函数的MTF变化。高级波差的影响在波长435.8和546.1nm附近最显著,但是10对线/mm物镜的MTF值仍然几乎等于只受衍射限制的MTF。幸而绝大多数情况下准直物镜只用于0到10对线/mm的频率范围。

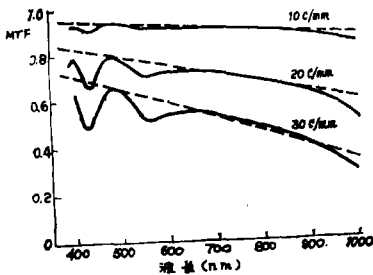


图14 PK₅₀/KZFSN₆/SF₆准直物镜用熔炼折射率的依波长为函数的轴上MTF曲线。

结 论

已经给出的复消色差准直物镜的参数适用于大相对孔径物镜在一个宽光谱范围内的MTF评价。这个最后设计的焦距是1471mm,可用口径136mm,由于现有玻璃光学特性的变化,实际设计比最佳化的理论设计的性能低得多。但是在波长400和1000nm之间,性能仍然是只受衍射限制的理想情况,在这个光谱范围内,以主波长焦点为准,焦点的偏离量小于0.0001EFL。这个准直物镜的制造现在仍在进行中。

我们并不认为这个准直物镜的性能已经达到了所能具有的最佳性能。不论何时设计者都必须记住费用和制造上的实际困难。也许采用某些进口玻璃会使校正得到改善。假如某几个面不必使用现有的样板半径,性能也可能得到改善。熔炼的玻璃与目录上的玻璃如果参数精确吻合,显然也能提高最后的性能,但是正如所指出的,这可能使费用大量增加。

译自“Optik”48(1977)491—506
〔冯秀恒译 蒋筑英校〕

上接15页

参 考 资 料

- 〔1〕王大衍著,彩色电视中的色度学问题,48,1973.
- 〔2〕L.郝兰著,林树加译,真空镀膜技术,159,19
- 〔3〕A.J.Vermuen, Optica Acta Vol. 18, 531, 1971.
- 〔4〕H.A.麦克劳德著,周九令、尹树伯译,光学薄膜技术,71,1974.
- 〔5〕U.S.P., 3712711, Vol.906, No.4, 1371, 1973,
- 〔6〕J.Cox, and G. Hass, Physics of Thin Films, Vol.2, 265, 1964.
- 〔7〕F.Stetter, R. Esselfom, Applied Optics, Vol.10, No.10, 1961, 1975.
- 〔8〕木村作义, 光学技术, ユンタクト, Vol.5, No.6.19, 1967.
- 〔9〕A.J. Vermuen, Optica Acta, Vol. 23, No.1, 71, 1976.
- 〔10〕Elrmar Ritter, Applied Optics Vol.15, No.10, 2315, 1976.