

菲涅耳微透镜列阵衍射效率的测试与分析*

王植恒 陈 英

(四川大学物理系, 成都 610064)

杜春雷

(中国科学院成都分院光电研究所, 成都 610209)

摘 要 归纳了目前二元位相型菲涅耳微透镜列阵衍射效率测试中所用各种衍射效率的不同定义, 提出规范定义的建议。并设计了测量衍射效率的系统, 方法简单易行, 适于测试具有微小单元尺寸的非涅耳微透镜列阵的衍射效率。

关键词 菲涅耳微透镜列阵, 衍射效率, CCD 探测器。

1 引 言

二元光学元件的衍射效率是标志元件质量的关键指标, 是直接关系到设计和制造出的元件能否在实际光学系统中采用的一个至关重要的问题。因而对衍射效率进行精确测量是非常重要的。

二元位相型菲涅耳微透镜列阵(FLA)是由一系列阶梯形的同心圆环组成的周期性位相浮雕图形。1990年, 林肯实验室用离子束刻蚀方法在石英基片上制作了8阶菲涅耳微透镜列阵, 透镜 F 数为 $f/5$, 衍射效率为84%; 同年, AT&T 贝尔实验室以薄膜淀积的方法在石英基片上淀积SIO制作的8阶菲涅耳微透镜列阵, 透镜 F 数为 $f/31$, 衍射效率91%^[1]; 1995年上海技物所报道了他们1992年在石英基片上以离子束刻蚀方法研制的8阶菲涅耳微透镜列阵, 透镜 F 数为 $f/31$, 测得的衍射效率为77.3%^[2]; 1991年林肯实验室测得8阶菲涅耳微透镜列阵, 透镜 F 数为 $f/4.5$, 其衍射效率为85%^[3]; 1992年Rockwell International Science Center测得8阶菲涅耳微透镜列阵, 透镜 F 数为 $f/4.5$, 其衍射效率76%^[4]。从以上报道的衍射效率来看, 各实验室报道的相同位相台阶数的菲涅耳微透镜列阵其衍射效率有很大差异。经分析, 排除各自设计和工艺的不同而影响衍射效率的大小之外, 其差别部分来源于所采用的衍射效率的各自的定义、测试系统和测试方法的不同。这些结果既不同于严格理论定义的衍射效率, 也不能完全代表实际使用所关心的有效的能量利用率, 缺乏可比性。为了研究实际应用中不同制作工艺的制作误差对二元光学元件衍射效率的影响, 优化设计和工艺, 研制出高性能的菲涅耳微透镜列阵, 严格的具有可比性的定义和准确测量是非常必要的。因

* 中国科学院光电所微细加工光学技术国家重点实验室资助项目。

收稿日期: 1996-10-05; 收到修改稿日期: 1997-08-04

此, 本文对国内外报道的文献资料进行了归纳总结, 从目前人们习惯采用的方法的现状出发, 对菲涅耳微透镜列阵的衍射效率的测试提出了规范定义的建议, 并提出了相应的测试方法。

2 衍射效率的定义

2.1 理论定义

衍射效率定义为衍射波光强度和入射照明光强度之比。即 $\eta = SS^*/PP^*$, S 为衍射信号的复振幅, P 为入射照明波的复振幅^[5]。对于衍射光栅, 衍射效率的大小表征衍射光栅把入射光能量转化为所需要级次衍射光能量的能力。其定义为对特定的衍射级次, 该衍射光的光通量与入射光的总光通量之比($\eta_n = P_n/P_i$)^[6]。

二元位相型菲涅耳微透镜列阵的设计依据是菲涅耳波带片(FZP)的近轴衍射原理, 当使用一平面波(波长 λ) 来照射菲涅耳波带片, 在波带片后会产生许多发散或会聚的球面波, 每个球面波代表其振幅与焦距已由菲涅耳波带片模型所决定的一个衍射级次, 在其中心轴上会产生多个会聚点。通常, 菲涅耳微透镜列阵的衍射效率定义为-1级衍射子波的强度 $|A_{-1}|^2$ 。即-1级衍射光强度与输入平面光强度的比值。

$$\eta = |A_{-1}|^2 = \left[\frac{\sin(\pi/L)}{\pi/L} \right]^2 \quad (1)$$

式中 L 为量化台阶数, 衍射效率与量化台阶数的关系如表 1 所示。

Table 1. Relations of η and number of phase level

L	2	4	6	8	10	12	14	16
η (%)	41	81	91	95	97	98	98	99

2.2 实际测试中使用的计算方法

理论上菲涅耳微透镜列阵衍射效率等于-1级衍射光能量与菲涅耳微透镜列阵入射平面光能量的比值。衍射元件材料的吸收和表面的反射会引起入射光能量损失, 降低衍射效率。不同的基底材料和表面状态产生的吸收和反射损失不同, 使得用同样设计方法设计的菲涅耳微透镜列阵器件按理论定义测试出的衍射效率不同, 不便于设计方案优劣的比较。由于菲涅耳微透镜列阵器件的设计者、制作者和使用者在研究中各自关心的问题的侧重点不同, 因而各自从方便于自己工作的角度出发, 选用了不同的衍射效率计算方法以比较设计方法、制造工艺和系统性能的优劣。比如在对基底的吸收和反射光损失的处理上, 有的采用了补偿, 有的不予补偿; 在补偿方法上, 有的用平面基板来补偿, 有的以透过器件的总光能作为入射光能来补偿; 在对菲涅耳微透镜列阵器件边缘口径衍射的处理上, 有的不补偿, 有的用同口径形状的理想透镜的衍射来补偿; 在对主衍射级能量的计算上, 有的直接测量和计算主衍射级范围内的光能量, 有的用背景扣除法间接确定主衍射级光能量, 本文将目前已报道的主要的几种计算方法归纳如下:

1) 衍射效率为衍射光场的主极大能量 E_d 与扣除平基板反射吸收后的出射平面总光能量 E_p 的比值。在测试出射平面总光能量 E_p 时, 在原菲涅耳微透镜列阵位置处插上一与菲涅耳微透镜列阵材料一样、厚度一样的平板基底, 来扣除菲涅耳微透镜列阵表面材料的反射和对光能的吸收。而此时不考虑表面形状不同存在反射光的差异的影响, 即

$$\eta_1 = E_d/E_p \quad (2)$$

2) 考虑经菲涅耳微透镜列阵衍射后焦平面上光能的能量聚集度。此方法直接以透过器件的后焦面上的总光能代替入射光能量以补偿器件的反射和吸收损失, 即焦面上衍射光场主极大能量 E_d 与后焦面的总光能量 E_s 之比。测量时, 只需摄入菲涅耳微透镜列阵的焦面光强分布即可,

$$\eta_2 = E_d/E_s \quad (3)$$

3) 衍射效率为照射到焦面上的光探测器实际有效面积上的衍射光的能量 E_a 与扣除平板基反射吸收后的出射光的能量 E_p 之比。测试除了以入射到光探测器的能量代替原中央主极大能量之外, 其余方法同 1), (其值与探测器面积大小有关), 即

$$\eta_3 = E_a/E_p \quad (4)$$

4) 衍射效率为经菲涅耳微透镜列阵衍射后的光场照射到放置在焦面上的光探测器实际有效面积上的衍射光的能量 E_a 与经透镜衍射后的焦面总光能量 E_s 之比。测试方法同 2), 即工程上的能量聚集度。此时的衍射效率随光探测器的有效面积的大小与透镜的焦距而变化,

$$\eta_4 = E_a/E_s \quad (5)$$

5) 采用背景扣除法的衍射效率算法。此方法在计算出射能量时, 不是直接测试主衍射级范围内的光能量, 而是用透射能量减去背景光能量间接计算主衍射级光能量, 即取 E_a 为透射光能量 E_p 减去背景噪声光能量 E_b 的差值。其衍射效率表示为:

$$\eta_5 = \frac{E_d}{E_p} = \frac{E_p - E_b}{E_p} = \frac{I_p S - I_b S}{I_p S} = \frac{I_p - I_b}{I_p} \quad (6)$$

测试时先以单色平面波照射微透镜列阵, 记录下菲涅耳衍射透镜的焦面光强分布, 由计算机图像处理系统对光强分布信号数据进行处理, 得出其后焦面上焦点间的背景平均强度 I_b , 然后移去微透镜列阵, 插入相应的平板基片, 以补偿反射损失, 在原焦平面位置上测入射光强 I_p , 设光照面积为 S , 通过计算而得到衍射效率。其原理如图 1 所示。

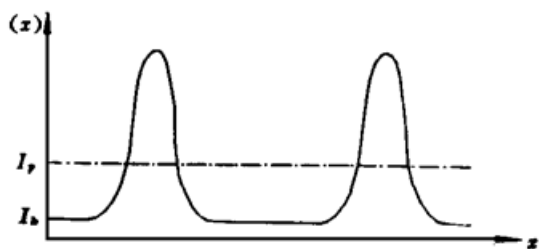


Fig. 1 The principle draft of diffractive efficiency measurement

上海技物所^[2]和 AT&T 贝尔实验室^[1]的数据均是用该方法测得的。但是此方法计算 I_b 时所取范围可以有不同的理解, 比如是否考虑高级次旁瓣的衍射对 I_b 的取值影响, 会使最后结果有很大不同。如果计算 I_b 时背景范围取第一极小外的全部范围的, 那么计算出来的衍射效率近似为方法 1) 测的 η 。

6) 斯特内尔效率(Strehl efficiency)。Michael Holz 在文献[3]中将菲涅耳微透镜列阵效率取为菲涅耳微透镜列阵的轴上辐照度比率 η_r 与理想衍射受限的微透镜的轴上辐照度比率 η_l 的比值。

$$\eta_6 = \eta_r/\eta_l \quad (7)$$

实验中多采用衍射远场的中央主瓣能量 E_m 与入射能量 E_i 的比值来决定 η_r , 即只考虑主瓣的 $\eta(0) = E_m/E_i$ 。也可计算主瓣与第一旁瓣的衍射效率, 由中央主瓣加上第一旁瓣的能量 E_{m+1} 与 E_i 的比值来决定 $\eta_r(0+1) = E_{m+1}/E_i$ 。对于具有方形单元形状的非涅耳微透镜列阵, 由于方形微透镜远场衍射分布为 sinc^2 形式, 与之对应的主瓣和主瓣加旁瓣的理想方形孔径衍射的 η_l 为 $\eta_l(0) = 0.815$, $\eta_l(0+1) = 0.902$ 。所以

$$\eta_6 = \eta_r(0)/0.815 \quad (8)$$

或

$$\eta_6 = \eta_r(0 + 1)/0.902 \quad (9)$$

某些文献所报道的微透镜衍射效率通常是指斯特内尔效率。此定义扣除了菲涅耳微透镜列阵口径衍射对衍射效率的影响。在比较不同的设计方案和制作水平的菲涅耳微透镜列阵的效率时,比较适用,但与实际获得的光能量利用率相比,显然斯特内尔效率值偏大。

7) 直接以入射光强计算衍射效率的方法。此法,在测得器件主衍射级能量 E_d 后,移去菲涅耳微透镜列阵器件,直接测定入射光总能量 $E_i^{[7]}$, 得

$$\eta_7 = E_d/E_i \quad (10)$$

2.3 分类定义

以上 7 种计算方法都有各自的适用范围,为了便于比较归类,作者建议作如下分类:

1) 理论严格定义 衍射主极大光能量与入射到器件的入射光能量之比,即方法 7) 的计算法,这种定义表示了菲涅耳微透镜列阵器件的总光能利用率。即既考虑了菲涅耳微透镜列阵的理论衍射分布,又考虑了所用器件材料的反射和吸收损失,按此定义在计算 E_d 时,既可直接测 E_d ,也可用背景扣除法间接测 E_d ,如计算方法 5)。

2) 物理原理定义 此类定义适用于从衍射理论上研究菲涅耳微透镜列阵的设计和制造误差对衍射效率的影响。本定义扣除基底的反射和吸收损失,如计算方法 1) 和计算方法 2)。还可扣除菲涅耳微透镜列阵有限口径的衍射损失,如计算方法 6)。采用此类定义对比较不同的设计方法对衍射效率的影响特别方便。

3) 工程实用定义 在工程中应用菲涅耳微透镜列阵器件时,主要考虑入射到置于菲涅耳微透镜列阵焦平面的光探测器口径上所吸收到的光能量的大小,因菲涅耳微透镜列阵常用作传感的光能耦合器,这时的探测器口径往往大于主衍射级的范围,并不太强调只局限于主衍射级的能量利用率,此种定义得到的衍射效率除开与菲涅耳微透镜列阵的设计制作有关外,还在一定程度上决定于探测器的口径大小和菲涅耳微透镜列阵的焦距。这种定义在学术上缺乏比较意义,但在工程上表征光利用率有很大的实用意义,如计算方法 3) 和 4)。

以上分类实际上也存在交叉,目前很难统一,但为了比较各自报道的衍射效率值,建议在文献中不仅报道衍射效率值,还应说明各自的测试方法和计算方法。

3 衍射效率的测试

本文针对现有的微透镜列阵,基于实验室的现有设备提出了衍射效率的测试方法,建立了测试系统,实际测试了微透镜阵列的衍射效率。

3.1 测试系统

采用计算机辅助,用 CCD 摄像机来测量光场的能量分布,从而可计算求得衍射效率。被测光场能量分布成像于 CCD 面阵探测器,探测器产生的电信号经摄像机处理电路完成二维扫描读出、放大和制式转换等处理,形成标准信号,然后又经图像板进行数字化,并与计算机通讯,采用计算机图像处理系统进行各种处理。其系统如图 2 所示。

在图 2 中,采用 He-Ne 激光器作为测试光源(波长 632.8 nm),输出光束由一分束镜分成两路,一路照射到照度计上,用于监测由于市电起伏和激光功率波动而引起的激光输出功率的波动,另一路经针孔滤波,再准直后,得到一均匀的平行光束,再照射到待测的菲涅耳微透镜列阵上,调整 CCD 的位置,使微透镜列阵的后焦面刚好落在 CCD 摄像机的输出像面

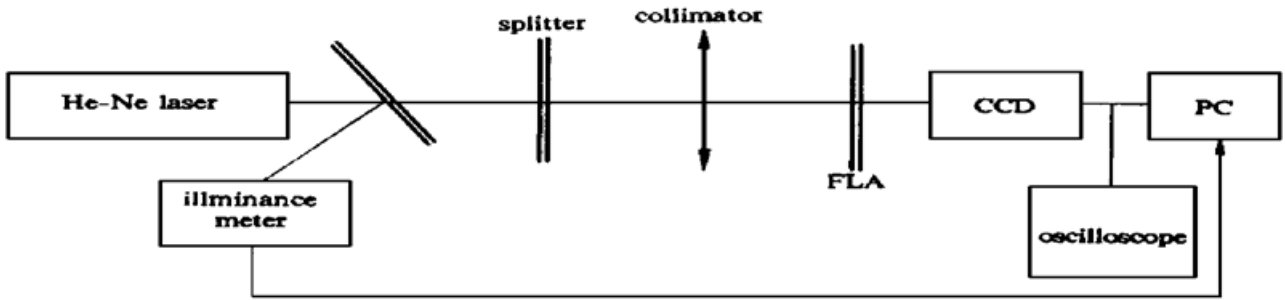


Fig. 2 The diffractive efficiency measurement system by using of CCD

上, CCD 完成光电探测, 摄入经菲涅耳微透镜列阵衍射后的焦平面光强分布。然后由计算机的图像采集将视频图像经数字转换器转换成一幅数字化图像并存储于帧存储体内。图像处理系统对输入的信号数据进行处理, 采用积分法计算各种定义中的不同能量值, 进而得到不同定义的衍射效率。

3.2 测试结果

实验采用的微透镜列阵是“微细加工光学技术国家重点实验室”研制的, 如图 3 所示, 其中左图微透镜列阵的参数为: 设计波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 单元尺寸为 $0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ 的方形结构, 列阵数为 20×20 , 设计焦距 $f = 100 \text{ mm}$, 刻蚀位相深度为 4π , 实际衍射级 $m = -2$, 实际焦距 $f = 50 \text{ mm}$, 其 f 数为 $f/44$ (对角线)。刻蚀台阶数为 8 (相当于 -1 级 4 相位台阶), 理论衍射效率 $\eta = \text{sinc}^2(m/l) = 81.06\%$, 所采用的 CCD 为 MTV-1881Ex, 灵敏度为 0.02 lx 。实验分别测得 $\eta_1 = 43\%$, $\eta_2 = 48\%$, $\eta_3 = 60\%$, $\eta_4 = 68\%$, $\eta_5 = 75\%$, $\eta_6 = 59\%$, $\eta_7 = 41\%$, (其中 η_3 、 η_4 所用探测器面积为 0.228 mm^2)。



Fig. 3 The photograph of the surface of FLA

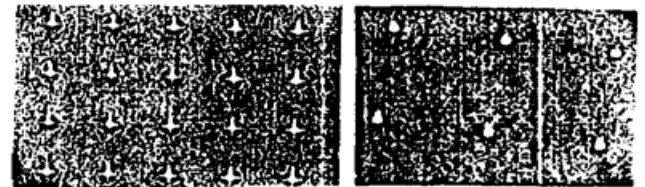


Fig. 4 The diffractive pattern on the focal plane

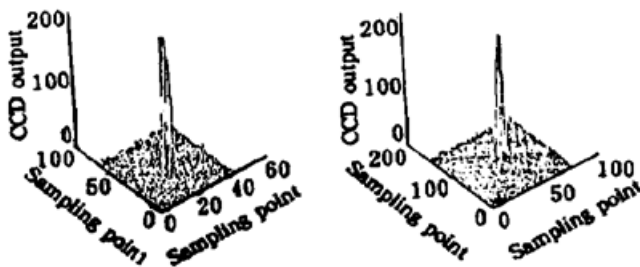


Fig. 5 The intensity distribution on the focal plane of FLA

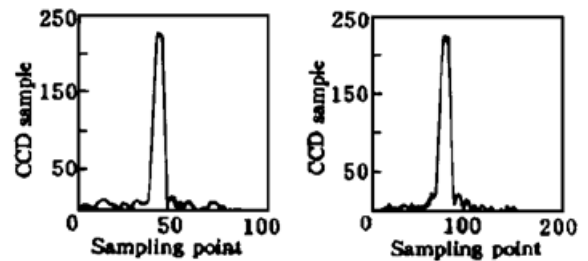


Fig. 6 Two-dimension profile of Fig. 5

图 3 右图微透镜的参数为: 设计波长 $\lambda = 500 \text{ nm}$, 单元尺寸为 $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 的方形结构, 列阵数 10×10 , 设计焦距 $f = 255 \text{ mm}$, 刻蚀位相深度为 2π , 实际衍射级 $m = -1$, 实际焦距 $f = 255 \text{ mm}$, 刻蚀台阶数为 8, 理论衍射效率为 $\eta = 96\%$, 测得其 $\eta_6 = 75\%$ 。该测试系统的测试重复精度为 1.0% 。

图 4、图 5、图 6 的左图分别代表图 3 左图 FLA 的焦平面光斑分布、三维光强分布和二维交强分布剖面图; 图 4、图 5、图 6 的右图分别代表图 3 右图 FLA 的焦平面光斑分布、三维

光强分布和二维光强分布剖面图:

本文对国际上普遍采用的定义(即斯特内尔效率 η_6) 进行了多帧测试, 并取平均值, 其结果如表 2 所示。

Table 2.

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	average
η_6 (%)	59.5	59.8	58.7	59.0	59.2	58.9	59.3	59.7	59.9	59.3	59

3.3 激光光源稳定性考察

本文对系统中的激光器的稳定性进行了考察, 方法如下: 如图 2 所示, 用照度计监测激光经分束器分束后的反射光(每 10 分钟读一个数), 测试结果如下:

Table 3. The stability of laser

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
illuminance value	303	305	306	304	307	309	305	304

由上表表明激光光源的稳定性较好, 其波动范围在 2% 之内。

3.4 透过率的测试

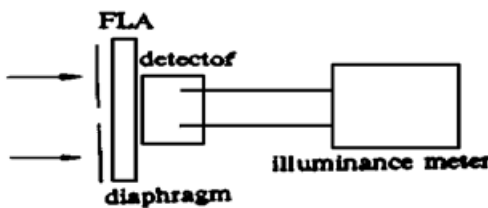


Fig. 7 The transmissibility measurement system by using of lumenmeter

本文测试了微透镜列阵的透过率。方法如下(图 7): 在贴近微透镜列阵的后面放置一照度计监测到达其上的光能量, 所用照度计通光孔径的直径为 12 mm, 照度计探头与透镜列阵距离约为 1 cm。依次在照度计前插入微透镜列阵的基底(补偿平板)、微透镜列阵、以及取出微透镜列阵(直透), 分别测得光能为 E_1 、 E_2 、 E_3 。

测试结果如下:

Table 4. Transmissibility

No.	1	2	3	4	5	average
E_1	24.4	24.1	24.8	24.6	25.2	24.6
E_2	22.5	22.9	23.5	23.2	23.9	23.2
E_3	26.5	27.0	27.6	27.3	28.0	27.3
E_1/E_3	0.92	0.89	0.90	0.90	0.90	0.90
E_2/E_3	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85

即透过率为: $t_1 = E_1/E_3 = 85\%$, $t_2 = E_2/E_3 = 90\%$ 。

$t_2 > t_1$, 究其原因, 主要是因为表面微结构的不同所引起的散射损失不同。关于减少此损失的问题, 现在常用的标量衍射理论是不能解决的, 应采用严格的矢量衍射理论来处理, 必须对此进行研究。

4 系统误差分析

一个理想的测试系统应该是无畸变和无噪声的线性空间不变系统, 入射光强 I 与图像板中对应像点的灰度数值 D 应有以下简单的线性关系:

$$D = kI \quad (11)$$

且比例因子 k 值与输入能量分布形式和位置无关。但实际系统各环节存在着畸变和噪声, 并非完全符合线性和空间不变性的要求, 这对测试能量分布影响较大。CCD 探测器的光电响应

不均匀性、光电响应非线性, 自动增益控制电路(AGC)、 r 校正电路、以及各环节不可避免存在的噪声, 都会对测试精确度产生影响, 详况在以后的文章中进行讨论。

4.1 背景扣除对测试精确度的影响

本文在测试衍射效率时, 必须进行暗背景的扣除, 而背景扣除的正确与否对测试结果的精确性有很大影响, 选取不同的背景值, 计算所得的衍射效率值会有明显的差异。在测试中对暗背景的扣除采用的方法如下: 将 CCD 的探测头遮盖起来, 测试 CCD 的响应值, 并取平均值, 以后就采用此平均值进行背景扣除。

4.2 其他误差

除了上述两种误差外, 还有因激光光源光强的波动引起的误差, 微透镜列阵和 CCD 之间耦合时的对准误差及处理数据时的量化误差及空气流动误差等。

结 论 本文中的 η_1 与 η_2 , η_3 与 η_4 是扣除透镜表面的反射和材料对光能的吸收的效率, η_7 是不扣除反射和吸收的衍射效率。在同一系统中, 同样误差范围内测量的衍射效率, 差别如此之大, 其原因在于各自采用的衍射效率的定义不相同。实际工程中所关心的能量利用率, 应该是测试时不经过任何补偿, 衍射光场中使用级次的光能量与入射光能量之比(如使用级次为 -1 级, 则此能量利用率为严格理论定义的衍射效率, 即 η_7 的方法), 此利用率从使用微透镜列阵的角度讲更为合理, 作者认为为了增强文献和成果中报道的衍射效率的可比性, 在尚未得出大家所公认的衍射效率的定义和测试方法之前, 每个报道者都应该说明自己实际采用的测试方法和实际定义。建议在充分讨论的基础上, 逐步建立大家公认的衍射效率的定义和测试方法。本文测量中所用 CCD 测试系统 1 由于 CCD 的动态范围、背景噪音、线性性还尽不如人意, 关于它们的校正问题比较复杂, 本文所提供的结果只是说明在同等条件下, 不同定义的衍射效率的明显差异。

参 考 文 献

- [1] Jurgen Jahns, Susan J. Walker, Two-dimensional array of diffractive microlenses fabricated by thin film deposition. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(7): 931~ 936
- [2] 郭 晴, 王汝笠, 二元位相型菲涅耳透镜列阵器件的研制及其应用实验. *红外与毫米波学报*, 1995, **14**(1): 18~ 26
- [3] Michael Holz, Margaret B. Stern, Shirey S. Medeiros *et al.*, Testing binary optics: Accurate high-precision efficiency measurements of microlens arrays in the vision. *Proc. SPIE*, 1991, **1544**: 75~ 89
- [4] L. Hale, E. Motamedi, W. Gunning, Optical testing and characterization of microlens arrays. *Proc. SPIE*, 1992, **1751**: 47~ 51
- [5] H. Kogelnik, *Proceeding of the Symposium on Modern Optics*, New York, Polytechnic Institute of Brooklyn, 1967
- [6] 于美文, 光学全息及信息处理, 北京, 国防工业出版社, 1984
- [7] 罗风光, 曹明翠, 赵向军等, 菲涅耳微透镜列阵衍射效率的测试. *中国激光*, 1995, **22**(5): 343~ 346

Measurement and Analysis of Diffraction Efficiency of Fresnel Microlens Arrays

Wang Zhiheng Chen Ying

(*Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064*)

Du Chunlei

(*Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610205*)

(Received 5 October 1996; revised 4 August 1997)

Abstract The various definitions of diffraction efficiency of binary microlens arrays are summed up according to the practical measurement method in the reported papers, and the suggestions for the standard definition and the corresponding measurement method are presented. The measurement system of diffraction efficiency suggested in this paper is easy to operate and can be used to measure the diffraction efficiency of the Fresnel microlens arrays.

Key words Fresnel microlens arrays, diffraction efficiency, CCD detector.

会议消息

由我中国光学学会主办的国际光学委员会(International Commission for Optics ICO)的专题学术会议(Toptical Meeting)“信息高速公路中的光学”(Optics for Information Infrastructure)将于1998年8月3日~6日在天津南开大学举行。会议内容为:

光纤光学与器件; 信息基础设施用的新光学元件和新系统; 光通讯; 光显示、元件、系统和应用; 光学信息处理和光计算; 光学传感与控制; 光存储、材料和应用; 光电子学与光互连; 雷达和光雷达信号处理; 固体激光器与器件; 信息基础设施中的新技术; 现代全息术与应用。

第二轮会议征文通知已印出, 摘要的截稿时间为1998年1月15日。请尽快与会议秘书组联系。秘书组的通信地址为:

天津南开大学现代光学研究所, OII'98 秘书组

邮编: 300071 电话: (022)23505503

中国光学学会
1997年11月18日