

# 多边形棒状透镜出端辐射均匀性的研究

金新华<sup>1</sup> 郑晓东<sup>1,\*</sup> 王政<sup>2</sup>

(1 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江大学光及电磁波研究中心, 杭州 310027)

(2 Shibuya Optics Inc., 琦玉, 日本)

**摘要** 研究了用多边形棒状透镜产生高均匀性正方形和圆形照明的最佳结构参量。结果表明, 对于正方形棒状透镜, 输出端的照明均匀性随透镜的长度振荡变化, 在某些特定长度达到极小值。对于圆形照明面积, 比较了从三角到八角的六种多边形。利用三角形积分透镜可以获得最佳的照明均匀性, 但光能利用率相对较低, 六角形积分透镜可同时获得较高的照明均匀性和光能利用率。

**关键词** 积分透镜; 照明系统; 均匀性; 多边形

**中图分类号** TH74 **文献标识码** A

## 0 引言

照明系统是光学系统的重要组成部分, 在微细光刻设备及微电子器件的缺陷检测, 投影电视系统等许多领域都对照明均匀性有很高的要求。但是长期以来, 均匀照明系统的设计在很大程度上都还依赖于 Try and Error 的方法, 经常需要反复地实际测试和修正, 致使照明系统设计周期长。如何在设计阶段更有效地描述和优化设计是照明设计人员正在努力解决的问题<sup>[1]</sup>。

近年来投影光刻成像系统在集成电路生产以外的领域也获得了越来越广泛的应用。日益普及的大面积液晶彩电的生产以及精细印刷电路板生产等都开始运用投影光刻的方法取代原来的接近式曝光法。第八代液晶生产的基板尺寸达  $2.16 \times 2.4 \text{ m}^2$ , 需要数十个镜头同时曝光。这为系统的照明均匀性设计提出了更高的要求<sup>[3,4]</sup>。

为了研究进一步提高照明均匀性的方法, 本文设计了一套小型均匀曝光装置。光源采用日本 Phoenix Electric 公司生产的 SHP-165W 超高压汞灯。使用前, 新灯的电极间距为 1 mm。灯内部的工作压力高达 200 大气压。和传统的工作压力为 30 大气压左右的高压汞灯相比, 由于谱线的压力展宽效应使灯连续光谱成分大大增强。在同等辐照度下, 光刻胶的曝光时间可以缩短到约传统高压汞灯的四分之一。用照明设计软件 TracePro 对包括超高压短弧汞灯 SHP-165、椭球反光碗和多边形棒状透镜的组合参量对出射面均匀性的影响进行了详细研究, 为使用棒状积分透镜产生矩形和圆形均匀照明系统提供了设计依据。

## 1 棒状透镜的积分原理及仿真模型

用来产生均匀照明的棒状积分透镜通常和椭球反光镜及高压放电灯组合使用。光源发光点置于椭球反光碗前焦点  $F_1$  上, 在椭球后焦点  $F_2$  处产生会聚光斑。棒状积分透镜入射端面位于椭球后焦点附近, 如图 1。

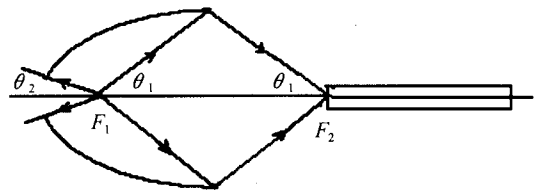


图 1 积分透镜和椭球反光碗组成的匀光结构  
Fig. 1. Integrating rod lens and elliptical reflector for uniformity illumination

棒状积分透镜可以是空心或实心的, 空心棒镜需要在其内表面镀高反射率膜层, 而实心棒镜则是利用光从光密介质到光疏介质时发生的全反射特性。不同孔径角的人射光束在棒内发生不同次数的反射后在出射面上相互叠加, 使出射面上的辐射出度变得均匀。不同反射次数的光可以理解为实际光源经过棒状透镜侧面多次反射形成的虚光源所发出的光<sup>[2]</sup>。因为膜层的反射率和光的入射角度有关, 很难在宽的人射角变化范围内均保持高的反射率。本文在装置中采用了熔融石英为材料的棒状积分透镜。一般来说, 棒的入射端面积越大, 从椭球反射镜第二焦点处进入方棒的光通量越大, 能量利用率越高。实际上, 因为投影物镜都是 Etendue 受限的系统<sup>[6]</sup>, 即接收系统和投影镜头都只能在一定的视场和数值孔径范围内有效工作。积分棒镜出射面的面积和光的出射立体角的乘积不能过大, 应和接收系统及投影物镜的相应参量相匹配。

实际测量表明, SHP-165 灯的发光主要集中在与电极轴的夹角为  $50^\circ$  (阴极方向为起点、 $0^\circ$ ) 到  $125^\circ$ , 约

\*Tel: 0571-87951681 Email: xiaodongzheng@zju.edu.cn  
收稿日期: 2005-08-22

75°的范围内。根据光源发光的空间分布特性,椭球反光碗的几何尺寸选定为长、短轴分别为 70 mm 和 35 mm,椭球碗出口端直径 63 mm。根据测量数据,在仿真模型中,光源的发光点被设定为半径为 0.3,长度为 1 mm 的柱状光源,空间发光特性符合余弦分布。以椭球体的顶点作为坐标原点,两焦点  $F_1, F_2$  距原点的距离分别为 9.38 mm 和 130.6 mm。第二焦点  $F_2$  处的 NA 值为 0.25。

积分透镜是通过光在其中反射一定次数使出射光达到均匀的,所以透镜需要有一定长度,但考虑到材料吸收和装置本身体积的限制,积分透镜的长度也不宜过长。如何选择一个最佳长度是本研究的内容之一。

照明分析类软件都有很多参量需要设置,只有合理设置各种相关参量,才能得到正确的结果。在用 TracePro 进行照明均匀性计算时,Map Count 值的选择是一个需要注意的问题。TracePro 显示的辐照度分布图为正方形,Map Count 是 TracePro 在显示计算结果时将目标面的边长分割成子线段的数量。如果 Map Count 的值设定为 10,整个正方形的辐照度分布图面即被分割成  $10 \times 10 = 100$  个面元,显示的结果是落在每个面元内所有光线所携带的辐照度之和。Map Count 值越大,需要计算的光线条数就越多,结果也更精确,但仿真所需要的时间也随之增加。如果 Map Count 值设置较小,即使所用光线条数很多,得出的结果经过平均后也不能反映目标面上精细的辐照度变化。R. John Koshel 等人对这个问题理论上做了一些分析<sup>[5]</sup>,这里分析中 Map Count 的设定值为 91。

本文均匀性的计算方法为:将棒镜的出射面分成 16 个大小相等的子面元,将每个子面元中心部分的平均辐照度作为该子面元的辐照度值,16 个子面元辐照度值的平均作为整个出射面的平均辐照度。16 个数值中最大值减去平均值得到的数值除以平均值得到正的均匀性偏差,最小值减去平均值得到的数值除以平均值得到负的均匀性百分比。实际测试时也是将照射面分割成  $4 \times 4 = 16$  个子面积,测量每个子面积中心处的辐照度作为该子面积的辐照度。

## 2 计算结果

在 TracePro 计算中,追迹光线的条数是一个需要合理设定的另一个重要参量<sup>[5]</sup>。为了实际验证光线条数对结果的影响,首先对计算所需要的光线条数进行了估算。图 2 为 Map Count 值为 91 时,方棒出射面均匀性随追迹光线的条数而变化的情况。方形棒镜的截面尺寸为:  $8 \times 8 \text{ mm}^2$ ,长度:120 mm,

材料为熔融石英。图中横轴为追迹光线的条数,单位为千条;纵轴为积分透镜出射面的辐照度均匀性。均匀性随光线条数的增加逐渐递减,当光线条数超过 150 万以后,结果趋于稳定。在以后的其他计算中均将追迹光线的条数设定为 150 万条。

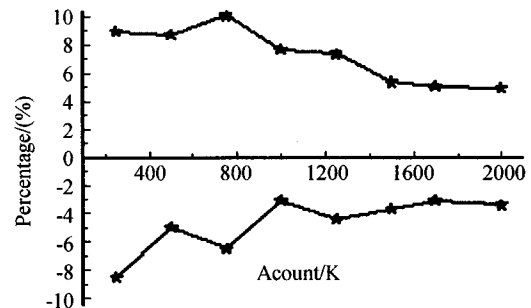


图 2 出射面均匀性随追迹光线条数的变化

Fig. 2 Illumination uniformity as a function of tracing light number

图 3 是在以上设定条件下,正方形棒状透镜出射端面照明均匀性随方棒长度的变化。文献[2]用解析的方法分析了当光源为圆盘形朗伯体面光源时矩形棒状透镜出射光均匀性随长度变化的情况是振荡衰减的曲线。从图 3 中可以看出,用 TracePro 分析得出的数据基本符合文献[2]解析的结果,在一定

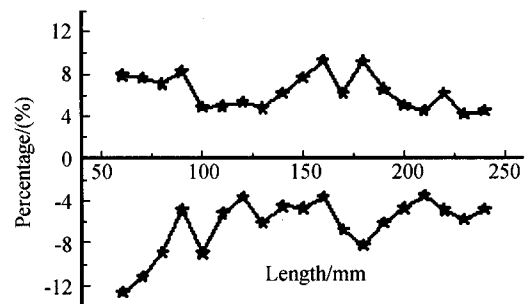


图 3 均匀性与积分透镜长度的关系

Fig. 3 Illumination uniformity as a function of rod lens length

程度上具有振荡特征。基本参量确定后,在某些特定长度上,即 120 mm 和 240 mm 处可获得最佳的照明均匀性。将选定的参量代入文献[2]中提出的无量纲量。

$$\Delta = \frac{l \tan \phi_{\max}}{\sqrt{h^2 + w^2}} = 0.0152l$$

式中, $l$ 为积分透镜长度; $\phi_{\max}$ 为棒镜中光源的最大孔径角,实际为

$\phi_{\max} = \sin^{-1}(\text{NA}/n) = \sin^{-1}(0.25/1.47454)$ , NA 为椭球镜第二焦点处空气中的数值孔径; $n$ 为石英材料在 365 nm 处的折射率。 $l \tan \phi_{\max}$ 代表数值孔径最大的边缘光线在棒镜内多次反射后所产生的虚光源和入射面中心的距离; $\sqrt{h^2 + w^2}$ 为积分棒镜端面的对角线长度。这两个最佳长度对应的  $\Delta$  值

分别为 1.824 和 3.648. 这和文献[2]中预测的结果相当接近. 鉴于 120 mm 和 240 mm 的均匀性基本相同, 均为约±4%. 选择了 8×8×120 mm<sup>3</sup> 为正方形积分透镜的设计尺寸.

### 3 用多边棒状透镜获得圆形均匀照明

因为集成电路生产用硅片的形状一般为圆形, 对于光刻系统需要产生目标面为圆形的均匀照明. 圆形均匀照明可以首先通过棒状透镜产生一多角形均匀光斑, 然后经圆形视场孔阑限光来实现. 下面来具体分析比较各种形状的棒状透镜在得到均匀圆形照明时的优缺点. 这里 TracePro 模型中光源、椭球反光碗参量与前面分析方形棒镜时的设置相同. 目的是在棒镜输出端获得直径为 8 mm 的圆形均匀照明. 人们首先想到的可能是使用圆柱形积分透镜, 但遗憾的是计算和实验均表明圆柱形棒镜不具有匀光作用, 需要通过其他多边形积分棒镜来获得均匀圆形照明. 图 4 是内切圆直径相等的情况下不同形状的棒状透镜的示意图.

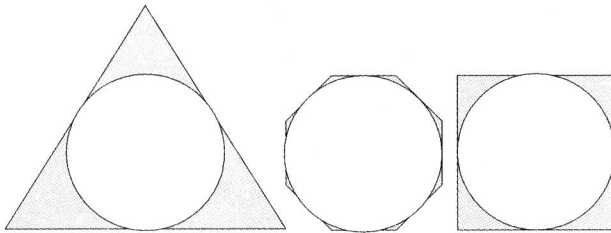


图 4 具有相同直径内切圆的多边形  
Fig. 4 Polygons with the same diameter inscribed circle

照明均匀性的计算通过采集棒状透镜出射端面内切圆内 16 个数据点的辐照度值来进行计算. 经计算, 从三到八边形限光获得圆形照明的光能利用率的百分比分别为: 53.9(三), 70.4(四), 77.5(五), 81.5(六), 83.8(七), 85.4(八), 括号中的数字为多边形的边数.

图 5 是用正三、四和六边形棒状透镜产生相同直径的圆形照明时输出面均匀性和透镜长度的关系. 三种积分透镜的均匀性均具有振荡衰减的特征. 其中六角形棒镜的均匀性收敛最快, 在长度为 110 mm 处出现第一个最佳点, 均匀性为+4.15%和-4.38%. 直径 8 mm 圆的外切六边形的对角线长度为 9.24 mm, 110 mm 长棒镜所对应的  $\Delta$  值为 2.05. 比较三种多边形, 三角形棒镜得到的结果是最好的, 在 120 mm 处, 三角形棒镜的不均匀性为+4.23%, -2.56%. 和正方形时的情况相同, 正方形棒镜在 120 mm 处出现第一个最低点+5.35%, -3.68%. 虽然三角形的光能利用率较低, 只有约 54%, 但是在照明均匀性要求非常高的场合, 仍不失为一种合适的选择.

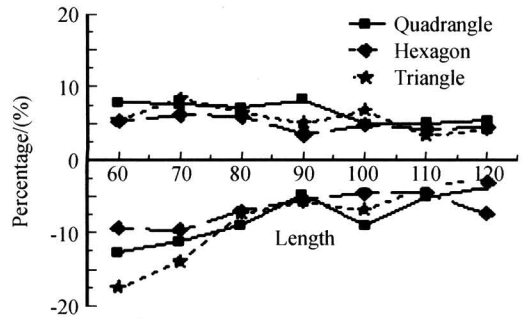


图 5 正三、四、六边形积分透镜长度和其照明均匀性  
Fig. 5 The results of quadrangle, hexagon and triangle rod integrating lens

图 6 是用五、七和八边形棒状透镜产生直径 8 mm 圆形均匀照明时的计算结果.

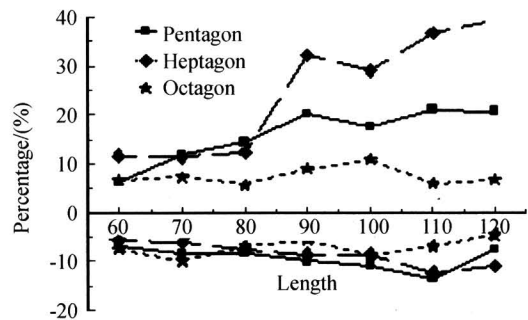


图 6 正五、七、八边形积分透镜长度和其照明均匀性  
Fig. 6 The results of pentagon, heptagon and octagon rod integrating lens

五角和七角棒镜均在 60mm 处获得第一个极小值+6.17%, -6.9%和+11.7%, -5.73%. 然后进入一个不均匀性上升阶段. 从结果看五边形和七边形明显不符合设计要求. 从输出端的辐照度分布看, 这两种透镜的输出结果缺乏对称性. 八角形棒镜在 120 mm 处获得在 60~120 mm 区间的最小值+6.75%, -4.72%, 和三角形及六角形相比仍有相当差距.

根据系统结构大小、加工成本及光在透镜中的能量吸收等因素考虑, 由于均匀性曲线是振荡衰减变化的, 合理选择长度可得到出射面光斑最均匀的结果. 均匀性最好的是三角形, 其次是六边形, 然后是四边形和八边形. 从能量利用率方面考虑, 八边形和六边形优于三角形. 综合考虑均匀性、光能利用率和加工方便, 选择 110 mm 六角棒镜作为圆形照明的匀光镜.

对系统工艺性的研究是设计工作的另一个重要方面. 图 7 是光源横向离轴误差引起的均匀性变化.

由图 7 可见, 在偏离 0.2 mm 范围内系统的均匀性基本保持不变, 超过 0.2 mm 后均匀性随光源离轴量的增加迅速变差. 所以在装校时光源中心位置的准确度要控制在 0.2 mm 范围内.

在 TracePro 的使用中, Map Count 值的设置对

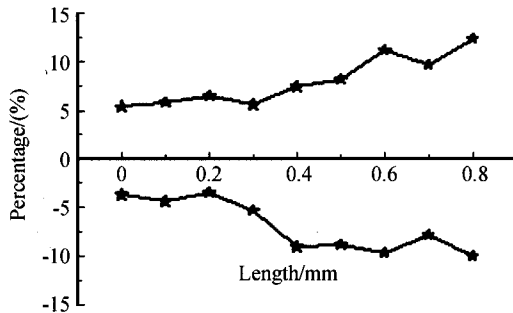


图7 光源横向离轴引起的均匀性变化

Fig.7 Light source offset introduced uniformity change

于统计噪音的影响非常重要,最好设置成奇数,这样可以使纵、横两条轴线通过子面元的中间,而不是在两个子面元的边界上.对于光能量、收集效率方面的计算可以用较少的光线进行,但对于光均匀性计算,必须要用足够多的光线数.但光线增加后,计算时间也会大大增加.可以考虑:1)采用 Simulate 模式,这种模式只记录预先设定目标上的结果,可以大大增加内存的利用效率、减少计算时间;2)把光源部分计算后制成光源文件,在以后的计算中只需调用光源文件,避免重复计算.

## 4 结论

本文分析了用多角形棒状透镜实现均匀正方形和圆形照明时的优化设计.用 TracePro 分析了超高压短弧汞灯、椭球反光镜和不同参量的多角形棒状透镜组成的照明系统.研究了系统均匀性随积分透镜长度变化的情况,得出了出射光斑均匀性随长度振荡衰减的曲线.

对于正方形照明面积,将棒镜设计为  $\Delta = 1.824$ ,即  $8 \times 8 \times 120 \text{ mm}^3$  可以得到第一个最佳值,这时可获得的均匀性为  $+5.35\%$ ,  $-3.68\%$ ;对于圆形照明面,可以分为两种情况:1)对照明均匀性要求非常高时,可以考虑采用三角形.用  $120 \text{ mm}$  三角形棒镜可以在其内切圆内获得  $+4.23\%$ ,  $-2.56\%$  的照明均匀性,光能利用率为  $54\%$ ;2)对均匀性要求比较高时,六角形可以获得比较高的光能利用率

( $81.5\%$ )同时有不错的均匀性特性,在  $110 \text{ mm}$  处可以获得  $+4.15\%$ ,  $-4.38\%$  的均匀性.

按照优化的设计方案,对正方形棒状透镜实际进行了测试.测量仪器用 USHIO UIT-150 型紫外辐照计, S365 探头,测试时是将方棒出端面分割成  $4 \times 4 = 16$  个子面积,测量每个子面积中心处的辐照度作为该子面积的辐照度.采用上文中提到的均匀性的计算方法,测量的结果是  $+4.31\%$ ,  $-5.94\%$ .和计算的结果基本相符.

用 Monte Carlo 光线追迹法计算照明均匀性需要计算大量光线,150 万条光线的追迹结果仍有明显的统计噪音影响.如何利用比较少的光线进一步减少结果中的噪音是需要研究的重要问题.结果的信噪比提高之后,均匀性的最后结果有可能比现有的结果更好一点.

致谢 感谢迅技光电公司黄义忠先生的有益建议.

## 参考文献

- 1 Cassarly W J, Hayford M J. Illumination optimization: The revolution has begun. *Proc of SPIE*, 2002, **4832**: 258~269
- 2 Jacobson B A, Gengelbach R D, Ferr J M. Beam-shape transforming devices in high-efficiency projection systems. *Proc of SPIE*, 1997, **3139**: 141~150
- 3 马韬,沈亦兵.大视场投影光刻物镜的畸变特性检测.光子学报,2005,**34**(1):46~49  
Ma T, Shen Y B. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 46~49
- 4 郑臻荣.基于 etentue 量的液晶投影物镜相对照度分析.光子学报,2005,**34**(1):55~58  
Zheng Z R. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 55~58
- 5 Koshel R J. Aspects of illumination system optimization. *Proc SPIE*, 2004, **5529**: 206
- 6 郑臻荣.液晶投影显示复眼照明的容差模拟分析.光子学报,2004,**33**(5):593~597  
Zheng Z R. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 593~597

## Study on Illumination Uniformity of the End Surface's Radiation of Polygon Rod Integrating Lens

Jin Xinhua<sup>1</sup>, Zheng Xiaodong<sup>1</sup>, Wang Zheng<sup>2</sup>

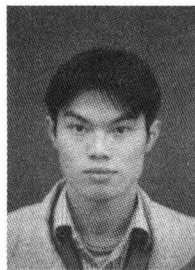
<sup>1</sup> State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027

<sup>2</sup> Shibuya Optics, Saitama, Japan

Received date: 2005-08-12

**Abstract** A effective way to transfer a symmetrical spot light to uniformity illumination by using polygon rod integrating lens was proposed. A detail study has been carried out to obtain square and circle uniform illumination by polygon rod lens. In some specific length, lenses have best uniformity performance. Triangle and hexangular lens are good choice for circle illumination. Triangle lens is best in uniformity, and hexangular lens has better light collecting efficiency. The illumination uniformity is affected sensitively by light source position offset from optical axis.

**Keywords** Illumination; Rod lens; Uniformity of light source; Polygon



**Jin Xinhua** was born on Feb. 1981 in Zhejiang Province of China. Now, he is a master student in Department of Optical Engineering of Zhejiang University. His research interests are optical engineering and optical telecommunications.