

FPD Exposure System 用 투영광학계 설계

배상신*, 정연욱, 김용래, 송청호(엔알티), 송준엽, 김동훈(한국기계연구원)

Design of Projection Optics System for FPD Exposure

S. S. Bae, Y. W. Jung, Y. R. Kim (NRT), J. Y. Song, D. H. Kim(KIMM)

ABSTRACT

Exposure System is used for printing a prescribed pattern on a printed board, a liquid crystal substrate or the like. In this paper we are trying to develop projection Optics Exposure System for manufacturing Color Filter of LCD Display. This paper explain the Projection Optics Design and Illumination Optics Design of Color Filter Exposure system.

Key Words : Exposure(노광), FPD(Flat Panel Display, 평판 표시 장치), Color Filter(칼라필터), Projection Optics(투영광학계)

1. 서론

노광 장비에 있어서 가장 핵심적인 모듈은 노광 광학계이다.

노광 장비의 주 용도는 어떤 회로 패턴을 원하는 위치에 전사 시켜 주는 역할을 하며 원회로 패턴이 가능한 한 광학적 특성의 변형 없이 그대로 어떤 기재(Substrate)상에 전사 되어야 하기 때문에 노광 광학계의 특성에 따라 회로 패턴의 영향을 가장 크게 받는다.

본 연구에서는 특히 FPD 분야에서 가장 두각을 나타내고 있는 TFT LCD 용 칼라필터(Color Filter)를 제작 하는데 사용 되는 노광 장비의 노광 광학계 개발을 목표로 하고 있는데 이 광학계의 특징은 다음과 같다.

- 해상도가 10 μm L/S 안팎으로 비교적 개발이 용이함.
- Photoresist 자체가 수십 μm 두께의 RGB Color Filter 를 구성하기 때문에 비교적 큰 노광 Power 를 요구함.

위와 같은 특성 때문에 현재까지 칼라필터 노광에 사용되고 있는 노광 장비는 대부분이 근접식 노광 방식(Proximity Exposure)을 갖는 노광 장비들이었다. 하지만 생산성 향상을 위하여 Glass 기판의 크기가 점차적으로 증가하여 최근에는 7,8 세대의 대형 Glass 기판을 생산 라인에 투입하려는 움직임이 강하게 일어나고 있는데 7세대 Glass 기판의 경우 그 크기가 대략 2m x 2m 정도가 되는데 이와 같은

대형 Glass 기판을 사용하여 칼라필터를 제작할 경우 기존의 Proximity 노광 장비를 이용하여 노광 공정을 수행할 경우 원 패턴이 있는 Mask 의 휨 현상 때문에 Mask 패턴의 중심부와 가장자리부에서 노광 Glass 기판 거리차이로 인하여 패턴의 왜곡이 발생한다.

7 세대 Glass 기판의 경우 이와 같은 왜곡에 의한 영향이 무시할 수 없는 정도로 발생하기 때문에 Glass 전체를 한번에 노광하는 것은 불가능하게 된다.

이와같은 문제점이 발생함에 따라 본 연구에서는 칼라필터 노광 공정에 기존의 근접식 노광 방식(Proximity Exposure)이 아닌 투영식 노광 방식(Projection Exposure)을 이용한 노광 광학계를 개발하고자 하는 개발 목표를 세우고 연구를 진행하였다.

Glass 기판의 대형화에 따른 높은 생산성을 실현하기 위하여 노광 장비 개발 초기단계에서 아래와 같은 광학적 사양 및 요구조건을 만족하는 노광 광학계의 개념을 정립해야 한다.

- 노광 면적 : 300 mm * 200 mm
- 최소 선폭 : 10 μm L/S
- 노광 강도 : 100 mW/cm^2 이상
- 초점 심도 : \pm 100 μm

노광 장비의 노광 광학계에서 가장 중요한 요소는 구현 가능한 최소 선폭(CD, Critical Dimension) 과 이 최소선폭을 기준으로 어느 정도의 초점 심도(Depth of Focus)를 갖는가 하는 점인데 이에 대한

기준은 아래와 같은 수식에 의해 정의된다.

$$\text{최소 선폭(L/S)} = k1 * (\lambda / \text{NA})$$

$$\text{초점 심도(DOF)} = k2 * (\lambda / \text{NA}^2)$$

$k1, k2$ 는 공정상수로서 0.4~8.0 정도의 값을 가지며 NA는 투영 광학계의 Numerical Aperture 값이다. 상기의 기준들은 회절한계 광학계에 해당하는 노광 광학계에 주로 적용되는 것으로서 반도체 및 FPD 노광 장비의 노광 광학계에 대부분 적용된다.

노광 광학계는 가장 핵심이 되는 투영 광학계, 조명 광학계 및 광원부로 구성되어 있는데 각각의 모듈은 적용되는 공정에 따라 나름대로의 특징을 가지고 있다. 다음 그림은 기초 설계된 노광 광학계의 개념도이다.

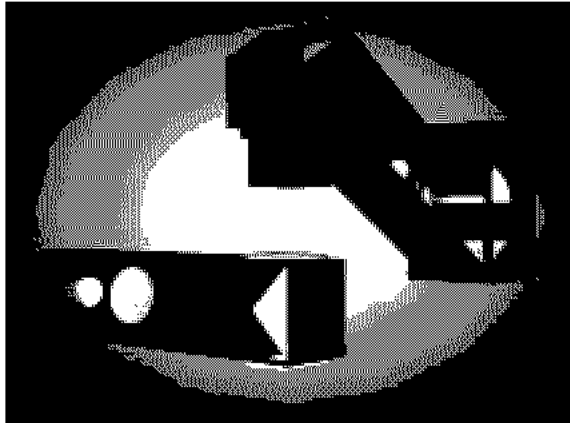


Fig. 1 Config. Of Exposure Optical System

다음 그림에서는 광원에서 발생된 노광 광이 여러 가지 광학 초차를 거쳐 결상 되어지는 것을 설명하고 있다.

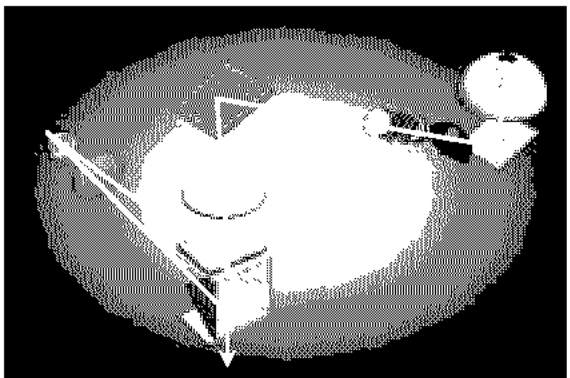


Fig. 2 Config. Of Exposure Optical System

2. 투영광학계의 설계

2.1 투영광학계의 개념 설계

본 연구에서 가장 핵심이 되는 투영 광학계는 기존의 굴절 광학계가 아닌 Catadioptric 광학계 방식을 가지고 있다.

다음 그림은 투영광학계의 개념도이다

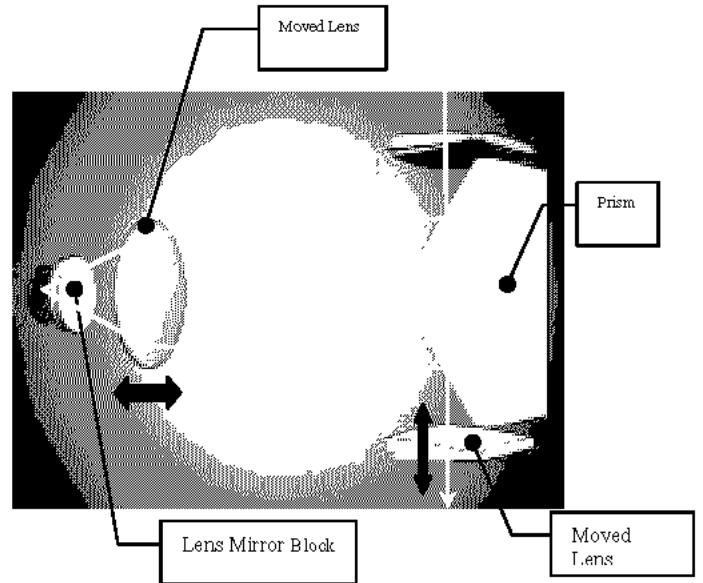


Fig. 3 Config. Of Projection Optics system

이와 같은 구성을 갖는 투영 광학계는 기존의 굴절 광학계에 비해 여러가지 다른 특징점을 가지고 있다. 즉, 기존의 굴절 광학계의 경우 요구하는 광학적 특성을 만족하기 위해서는 20 여대 이상의 단렌즈가 필요하며 이로 인해 노광 광원(UV)의 손실이 많이 발생한다. 본 연구를 통해 채택된 Catadioptric 투영 광학계의 경우 적은 수의 광학 부품만으로 구성이 가능함에 따라 최소 80%의 광 투과율을 보증할 수 있다. 또 다른 특징은 굴절 광학계의 경우 Mask 에서 Substrate 면(결상면)까지의 거리가 최소 1.5~2m 정도가 요구된다. 이는 System 구조상 Mask 탑재가 매우 힘든 상황이 발생하는데 본 연구를 통하여 고안된 Catadioptric 광학계의 경우에는 Mask 와 Substrate 간의 거리가 1m 이내로 구성이 가능하기 때문에 전체 System 구조 측면에서도 유리하다.

2.2 투영광학계의 상세 설계

초기 설계 단계에서 투영 광학계가 만족해야 할 기본 조건이 있는데 10 um L/S 의 해상도와 DOF 200 um 이상을 달성하기 위하여 투영 광학계의 NA 는 0.04 정도의 값을 가져야 하며 각각의 Filed 에 대해 최대 1 degree 이하의 Telecentricity 특성을 가져야 한다. 본 투영 광학계는 1:1 배율을 가지며

Mirror 의 위치에 Stop 이 존재하는 거의 완벽한 대칭구조를 가지고 있다.

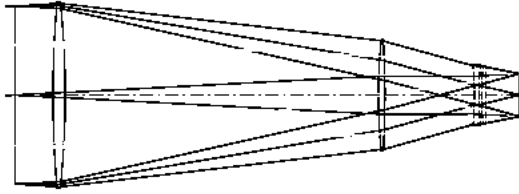


Fig. 4 Ray Tracing. Of Projection Optics system

본 투영 광학계의 또 다른 특징은 노광 공정 시 칼라필터 Glass 기판의 수축, 팽창에 의한 크기 변화를 보상해 주기 위한 배율 보정 장치가 설치되어 있는데 이 장치는 S/W 에 의해 실시간으로 제어된다. 배율 보정은 최대 노광 영역 대비 $\pm 1.5\%$ 로 보정 가능하다.

이번 연구에서 새롭게 설계된 Catadioptric 투영 광학계의 설계 Data 및 1st order Optical parameter 는 여러 단계의 Simulation Test 를 거친 후 최종적으로 공차 분석 작업을 수행하게 된다. 공차분석 작업이 종료된 후에 비로소 최종 구입할 초자들의 사양을 결정하고 초자 발주를 내게 된다. 본 투영광학계에 사용 되는 초자는 Fused Silica(SiO₂), BK7 및 FK5 세 종류를 사용하고 있다.

보통 노광 광학계에 사용되는 초자들은 굴절율 균질도(Refractive Index Inhomogeneity)는 H3 급 이상의 품질을 갖는다. (H3 급은 굴절율 균질도가 2×10^{-6} 인 초자를 의미함.)

설계된 Catadioptric 투영 광학계의 성능은 여러 가지 방법으로 평가가 가능하다.

다음 그림은 투영광학계의 결상 특성을 가장 신뢰성 있게 나타내어 주는 MTF 특성 곡선이다.

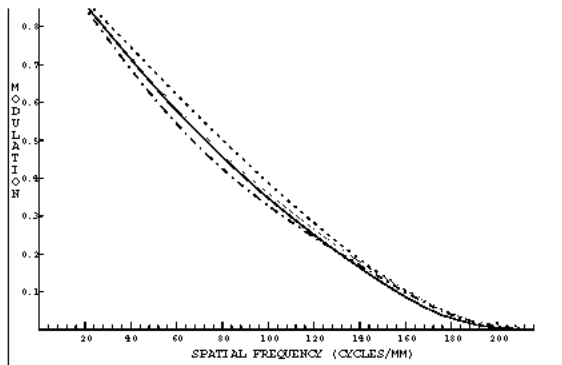


Fig. 5 MTF Graph Of Projection Optics system

그림에서 알 수 있듯이 설계된 투영광학계는 거의 회절 한계 광학계의 특성을 보여주고 있다.

MTF 특성 곡선보다는 부정확하지만 직관적으로 투영광학계의 결상 특성을 나타내어 주는 것이 3rd Order Ray Aberration Data 및 Spot Diagram 이며 특히 특정 Point 에서의 회절특성을 고려한 결상 특성을 나타낼 수 있게 해 주는 것이 Point spread Function 이다.

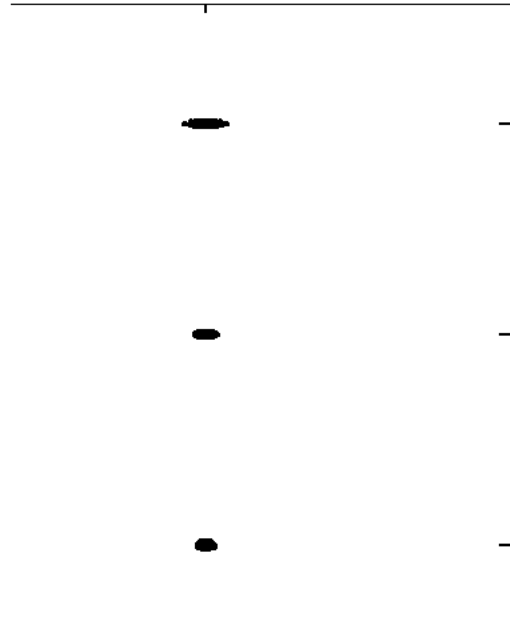


Fig.6 Point spread Function

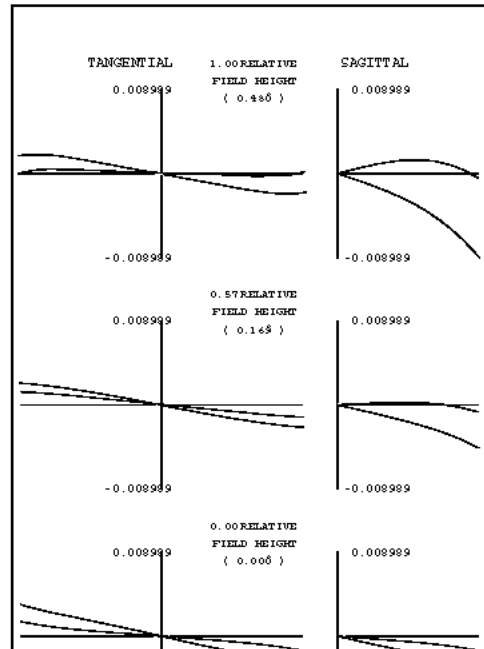


Fig.7 Ray aberration Plot

3. 조명광학계의 설계

3.1 조명광학계의 개념 설계

FPD 노광 장비는 생산성 향상을 위하여 특성상 넓은 노광 면적을 요구하는데 특히 칼라필터를 노광할 경우에는 특히 넓은 노광 면적과 높은 노광 강도를 요구한다. 본 연구에서의 조명계 및 광원부는 칼라필터를 대상으로 하기 때문에 조명계 및 광원부의 성능이 매우 중요하다. 노광 장비에서 채택하고 있는 대부분의 조명계는 Kohler Illumination 방식을 사용하고 있는데 이 조명방식은 어떤 광원을 Object 로 간주할 경우 그 Image 상이 조명 광학계 다음에 설치되어 있는 투영 광학계의 입사동(Entrance Pupil) 이 존재하는 위치에 결상 되도록 구성되어 있다. 결론적으로는 투영 광학계의 Stop 이 존재하는 위치에 광원이 결상 된다. 실제적으로 이와 같은 특성을 이용하여 노광 광학계를 조립, 조정할 때 투영 광학계의 Stop 이 위치하는 Mirror 면에서의 Flyeye' s lens Ass' y 의 형상을 판측하는 방법을 사용하기도 한다.

다음은 본 연구에서 설계된 조명광학계 및 광원부의 광학적 System Layout 이다.

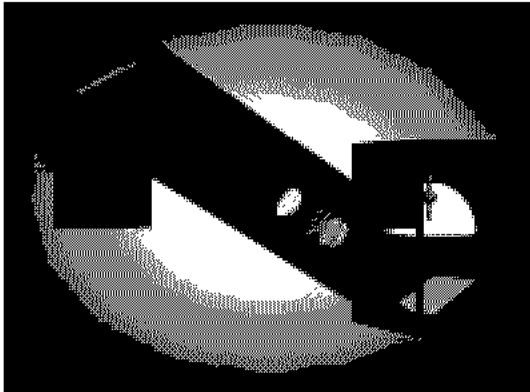


Fig. 8 Config. Of Illumination Optical System

3.2 조명광학계 광원부의 개념 설계

현재 설계된 조명 광학계의 중요한 요소로서 광원이 있는데 광원은 초고압 수은등(Short Arc Mercury Lamp)를 사용하며 보통 대면적을 노광을 하기 때문에 5kW 이상의 Lamp 를 사용한다.

이번 조명 광학계에는 5kW Lamp 를 사용하였다. 조명계 설계 시 중요한 설계 Parameter 인 Arc Gap 은 6.5-7 mm 정도가 된다. 이와 함께 Arc Gap 상에서의 휘도 분포특성 그리고 Light Intensity Profile 등 여러 가지 광원의 발광 특성들이 조명계 설계에 중요한 인자로 작용한다.

다음은 노광 광원으로 사용되는 초고압 수은등의 광학적 특성을 나타낸 그림이다.

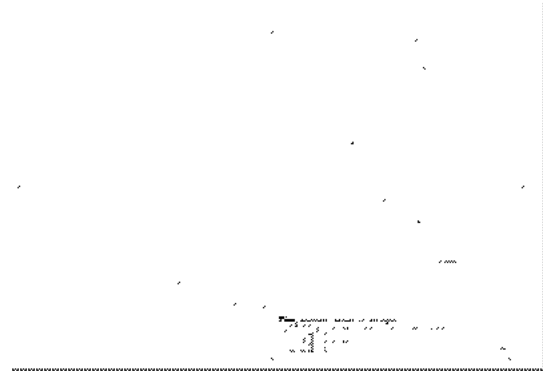


Fig. 9 Luminance Distribution of Mercury lamp

본 과제에서 설계된 조명 광학계의 특징은 두 쌍의 Flyeye' s Lens Ass' y 가 설치되어 있다는 점이다. Flyeye Lens ass' y 는 Condensing Lens 계에 대해 다수 광원요소로 작용하여 Mask 가 설치될 위치에 최적의 조도 균일도가 실현되도록 해 주는 역할을 한다. 본 조명 광학계에 의해 형성될 조명 영역은 투영광학계의 노광 영역보다 약간 큰 310 x 220 mm² 정도가 되며 Flyeye Lens Element 각각의 형상은 조명영역의 형태와 비례하는 모양을 갖는다.

Flyeye' s Lens Ass' y 와 Mask 면 사이에 존재하는 Condensing Lens 계 조명광학계에서 조도 균일도를 실현시켜 주는 중요한 역할을 하는데 보통 (-) Distortion 값을 갖도록 설계함으로써 노광 영역 주변부에서의 조도 균일도를 향상시켜 주는 효과를 나타낸다.

조명 광학계 설계는 투영 광학계에 비해 비교적 용이하게 설계가 이루어지나 실제 제작 완료 후의 실험 결과와 설계 단계에서의 Simulation 결과가 차이가 많다. 이와 같은 이유는 결상 광학계를 평가하는 S/W 는 오랜 기간에 걸쳐 개발되어 왔으나 조명계 평가를 위한 신뢰성 있는 S/W 는 그다지 많지가 않다.

4. 결론

위에서 살펴보았듯이 금번 설계된 Catadioptric 투영 광학계는 요구 사양에 부합되는 성능을 구현하고 있다. 이는 이론적인 Simulation 평가에 의한 결과이며 이 광학계의 성능을 실제 상황과 가장 유사하게 분석하기 위해서는 공차 분석 과정을 거쳐야 한다. 보통 노광 광학계의 공차 분석은 MTF Tolerancing 기법을 주로 사용하고 있으며 이를 통하여 투영 광학계를 구성하고 있는 각각의 광학단품이 만족해야할 다양한 공차값을 제공하고 있다.

이번에 설계된 Catadioptric 투영 광학계에 대해 MTF Tolerancing 기법을 사용하여 공차분석을 수행하였으며, 이를 토대로 제작 단계에서 각각의 광학 단품에 대한 제작공차 및 이들의 조립공차를 정량적으로 파악할 수 있다..

후 기

지금까지 이번 연구과제를 통하여 설계된 Catadioptric 투영 광학계에 대한 여러 가지 특징을 살펴 보았다. 공차 분석을 통하여 광학계의 설계 Data 가 결정되면 그 다음에 제작을 위한 여러 가지 Process 가 진행될 것이다.

참고문헌

1. Martellucci S. , Chester A.N. " Diffractive Optics and Optical Microsystems" , Kluwer Academic Pub
2. Pochi Yeh, "Optics of Liquid Crystal diplays" Wiley-Interscience
3. Warrne J. Smith, "Modern Optical Engineering" MCGRAW-HILL International Editions