

엑시머 레이저 스텝퍼 개발

정해빈 이각현 김도훈 이종현 유형준

한국전자통신연구소 반도체연구단

대전광역시 유성우체국 사서함 106호 (우 305-600)

한국전자통신연구소에서 개발된 바 있는 KrF 엑시머 레이저 스텝퍼의 개발 과정과 그 결과를 보이고, 동시에 현재 개발중인 ArF 엑시머 레이저 스텝퍼의 진행 상황을 보고한다. 본 논문에서는 스텝퍼의 주요 구성요소인 조명계, 투영광학계, 웨이퍼 자동초점 및 자동정렬 시스템을 중심으로 설명하며, KrF와 ArF 엑시머 레이저 스텝퍼간의 차이점과 그 특성들을 상호비교한다

I. 서 론

우리 나라 반도체 산업이 기억소자 분야에서 생산량 및 기술적 측면 모두에서 세계적 수준에 도달함에 따라 반도체 제조공정에 사용되는 장비 개발에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 경향은 집적회로의 확대된 원판을 5:1로 축소 복사하여 미세한 패턴을 형성시키는 데 사용되는 스텝퍼 장비에서 더욱 현저하게 나타나고 있다. 일반적으로 스텝퍼로 패턴형성이 가능한 최소 선폭은 다음과 같은 식^[1]으로 나타내진다.

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA} \quad (1)$$

위의 식에서 R은 분해 가능한 최소선폭, λ 는 노광에 사용되는 빛의 파장, NA는 광학계의 개구수이다. 한편, 상수 k_1 은 리소그래피의 모든 공정 파라미터들이 해상력에 미치는 영향을 뭉뚱그려 나타낸 경험적인 값으로 일반적으로 실험실 수준에서는 0.6을, 반도체 소자의 양산을 위한 생산라인 수준에서는 0.8을 적용한다. 한편, 투영광학계를 사용해서 원본, 즉, 마스크의 축소된 상을 웨이퍼 위에 맺게 할 때, 웨이퍼 위치 조정상의 오차(focus error), 웨이퍼 자체의 기울어짐(tilting)이나 휨(warpage), 회로의 형상(topology), 상면만곡(field curvature), 웨이퍼 척의 편평도(flatness)등에 의해서 이상적인 상점에서 벗어난 위치에 웨이퍼가 놓이게 된다. 따라서 일정 수준의 상질(image quality)이 유지되는 범위라 할 수 있는 초점심도 (DOF : Depth Of Focus)가 가급적 깊어야만 실제생산에 유리하게 된다. 이러한 초점심도 DOF는 다음의 식^[1]으로 나타내진다.

$$DOF = k_2 \frac{\lambda}{(NA)^2} \quad (2)$$

이때 상수 k_2 는 실제 리소그래피 공정 파라미터들에 의한 값이며, 통상 0.5를 적용한다. (1)식을 살펴보면 파장이 짧아질수록, 또한, NA가 커질수록 분해능이 좋아짐을 알 수 있다. 한편, (2)식에서 보면 파장이 짧아지는 경우와 NA가 커지는 두 경우 모두 초점심도가 알아지지만 파장을 짧게 해주는 경우가 보다 완만하게 초점심도가 알아지므로 상대적으로 깊은 초점심도를 유지할 수 있는 방법이 된다. 이때문에 광학 스텝퍼의 개발은 점차 짧은 파장의 빛을 사용하는 방향으로 나아가고 있다. 즉, 수은등의 g(436nm)선에서 i선(365nm)으로, 다시 KrF 엑시머 레이저(248nm)로 조명광원이 바뀌어왔고, 현재는 ArF 엑시머 레이저(193nm)를 광원으로 한 스텝퍼의 개발이 진행되고 있다.

II. KrF 엑시머 레이저 스텝퍼

한국전자통신연구소(ETRI)에서의 KrF 엑시머 레이저 스텝퍼 개발^{[2],[3]}은 전체 시스템 구성 기술의 확보라는 측면에 중점을 두면서 주요 핵심 모듈에 대한 기반기술의 개발이 병행되었다.

조명계의 형태는 (그림1)과 같다. KrF 레이저 공진기로부터 나오는 레이저 광이 직사각형 형태이므로 이를 2쌍의 실린드릭 렌즈를 이용하여 레이저 광의 단면이 정사각형이 되게 한다. 그 다음 회전하는 확산판을 사용하여 조명광의 간섭성을 제거하고, 칼레이도스코프(kaleidoscope)를 써서 확산된 빔을 다시 한번 뒤섞어 줌으로써 레이저 빔이 가지는 위

상에 관한 정보를 좀 더 불규칙하게 한다. 칼레이도스코프를 통과해 나오는 빛을 줌렌즈인 텔레이 광학계를 써서 파리는 렌즈(fly's eye lens)로 구성된 인테그레이터(integrator)의 개구에 입사시켜주게 된다. 조명광의 간섭도를 조정하기 위해 인테그레이터의 개구 크기를 바꿔줄 때, 즉, 조명광이 지나가게 되는 파리렌즈 갯수를 바꿔 줄 때 줌렌즈를 써서 인테그레이터에 입사하는 조명광속의 크기를 조정해 줌으로써 조명광의 손실을 최소화하게 된다. 파리렌즈들에 의해 결상된 2차광원들은 콘덴서 렌즈에 의해서 투영광학계의 입사동에 전달되고 투영광학계의 telecentricity와 결합하여 Köhler 조명계를 구성하게 된다.

이와같은 구조로 만들어진 조명계를 사용하여 웨이퍼 위에서 $\pm 2.5\%$ 이내에 들어오는 조명균일도를 얻을 수 있었으며, 제작된 스텝퍼의 웨이퍼 위에서 측정한 조명광 강도의 실제 공간적 분포는 x, y 방향 각각에 대하여 (그림2)와 같다. 조명 균일도의 측정은 웨이퍼 스테이지상에 UV 센서를 설치한 후 스테이지를 움직여 가면서 측정하였다.

투영광학계는 (그림3)과 같이 24장의 렌즈로 구성되어 있다. 재료는 모두 용융석영이며, 한가지 재질만을 사용할 때 발생하는 색수차 문제들 해결하기 위하여 3pm이하의 좁은 대역폭을 갖는 헤파대역 레이저가 사용된다. 광원인 KrF 엑시머 레이저의 평균출력과 반복 주파수는 각각 3W, 200Hz이며 출력 스펙트럼의 대역폭을 좁혀 주기 위한 수단으로써 에너지 효율이 높은 패브리-페로 에탈론이 사용된다.

완성된 스텝퍼를 사용하여 L/S(Line and Space) 형태의 패턴에 대한 해상력과 초점심도에 관한 실험 결과는 (그림4)와 같다. 이러한 실험 결과는 (1)식과 (2)식에 의한 해상력 및 초점심도 예상치와 잘 일치하고 있다.

한편, 리소그래피에 있어서는 해상력을 높이기 위하여 위상변이마스크(phase shift mask), 변형조명(modified illumination), 동필터(pupil filter) 등 이른바 초해상 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. ETRI에서는 이러한 초해상 기법의 하나로 DDM(dummy diffraction mask)를 개발한 바 있으며^{[4][5]}, 위의 엑시머 스텝퍼에 이러한 DDM 기법을 적용하면 (그림5)에 나타난 바와 같이 $0.20\mu\text{m}$ 의 최소 선폭을 얻을 수 있다.

한편 노광시 웨이퍼를 축소투영렌즈의 초점심도 내에서 유지하는 자동초점 시스템(auto focus system)으로서는 (그림6)에 보인 바와 같이 웨이퍼 표면에서 반사된 프로브 빔의 상이 PSD(position

sensitive detector)위에 맺히는 위치를 검출함으로써 웨이퍼 위치를 판독하는 광학적 방식이 사용되었다. PSD를 이용한 광학적 자동초점 장치의 위치 검출 원리는 입사각 θ 로 웨이퍼 면에 입사한 프로브 빔이 웨이퍼의 위치가 z축 방향으로 Δz 만큼 이동함에 따라 빔의 경로가 바뀌게 되고, 이때 웨이퍼의 위치 변화로 생긴 PSD상에서의 광점의 위치 변화 ΔP 를 측정 함으로써 실제 웨이퍼의 변위 Δz 를 구하는 것이며 광점의 변위 ΔP 는 다음의 식으로 계산되어진다.

$$\Delta P = 2 \Delta z \sin \theta \quad (3)$$

실제 스텝퍼에 적용된 자동초점 장치는 $100\mu\text{m}$ 의 신호 검출범위에서 $0.1\mu\text{m}$ 의 분해능을 가짐을 알 수 있었다.

또한 off-axis 방식의 웨이퍼 자동정렬 시스템(auto alignment system)으로서는 (그림7)에 보인 것과 같이 현미경을 사용한 영상처리 방식과 레이저 빔 회절 방식을 동시에 적용한 이중정렬 방식이 채용되었다. 이것은 웨이퍼 기판의 반사도, 기판상의 topology 등에 따라 자동정렬 시스템의 감도(sensitivity)나 정확도(accuracy)에 많은 차이가 발생하기 때문이며 통상적으로 스텝퍼에서는 정밀도와 신뢰도를 확보하기 위해 복수의 자동정렬 시스템이 장착된다^[6]. (그림 7)에 나타난 것 처럼 영상처리 방식은 웨이퍼 정렬마크의 확대상을 이용하는 방식으로 웨이퍼 정렬마크에 광을 조명하고 정렬마크의 영상을 대물렌즈를 통하여 확대시켜 CCD카메라와 영상처리 시스템에 의하여 모니터에 나타나는 정렬마크의 영상과 컴퓨터가 계산한 특정한 기준점광의 상대적 위치를 비교함으로써 웨이퍼를 정렬하는 방법이다. 반면에 레이저 빔 회절방식은 회절격자 역할을 하는 웨이퍼 정렬마크에 슬릿 형태의 레이저 빔을 입사시켜 정렬마크에서 발생하는 회절광 중에서 0차와 고차 회절광들을 공간 필터를 사용하여 제거한 후, 1차 회절광 만을 신호로 검출하여 정렬을 하는 방법이다. off-axis 정렬 시스템의 위치 검출 분해능은 영상처리 방식에서 $0.2\mu\text{m}$, 회절광 방식에서는 $0.1\mu\text{m}$ 이며 광축방향으로의 정렬신호 검출영역은 $20\mu\text{m}$ 이다.

III. ArF 엑시머 레이저 스텝퍼

ArF 엑시머 레이저를 조명광으로 사용하는 경우에는 자외선 영역에서 투명하다고 알려진 용융석영

조차도 1cm당 2.7% 정도의 흡수^[7]가 일어나기 때문에 빛이 투과해서 지나가는 매질의 두께를 가급적 얇게 해야 한다. 이 때문에 KrF와 ArF 엑시머 레이저 스텝퍼 사이에 많은 차이가 나타나게 된다.

조명계의 경우에는 투과형 칼레이도스코프의 사용이 흡수로 인해 불가능해지므로, 대신에 사각형(또는 팔각형이나 원형)단면을 갖는 내부반사면이 사용된다. 파리넨렌즈의 경우에도 가급적 투과 매질의 두께를 얇게 하기 위하여 2개의 얇은 렌즈로 구성된 형태가 사용된다. 이밖에도 인테그레이터의 광량 손실을 최소화하기 위한 연구도 병행되고 있다.

투영광학계의 경우에는 위에서 언급한 흡수문제 때문에 렌즈만으로 광학계를 구성하기 어렵다. 따라서 반사경에 의해 필요한 대부분의 굴절능을 얻고, 거의 굴절능이 없는 렌즈들을 써서 잔류수차를 보정하는 이른바 catadioptric system을 사용한다. 현재 연구되고 있는 광학계는 (그림8)과 같은 형태로 자외선 현미경에 널리 사용되고 있는 Schwarzschild system에서 1차거울로 만진 거울(Mangin mirror)을 사용하고, 잔류 수차의 보정을 위해 몇 개의 보정렌즈를 도입한 것이다. 광학계는 현재 조립중에 있으며, 실제 데이터 상으로 분석된 성능은 (그림9)와 같다.

웨이퍼 자동초점 및 자동정렬 시스템은 본질적으로 KrF와 ArF 엑시머 레이저 스텝퍼에서 차이가 없다. 따라서 이 분야에서는 종전의 경험을 살려 시스템을 보강하는 방향으로 연구가 진행되고 있다. 즉, 자동초점 시스템의 경우 노광하고자 하는 칩의 전체 영역에 걸쳐 자동초점 프로브 빔을 scan mirror를 통해 주사해 줌으로써 종래방식에서의 문제점이었던 자동초점 프로브 빔이 topology가 있는 부분에 입사할 때 생기는 위치 측정상의 부정확성 등을 개선하고자 하고 있다. 즉, 주사되는 전체영역에서 측정신호를 평균해주는 효과로 웨이퍼 topology에 대한 영향이 줄어든다.

ArF 엑시머 레이저 스텝퍼에서의 자동정렬 시스템에 대해서는 (그림11)과 같은 제만(Zeeman) 레이저를 사용한 광-헤테로다인(optical-heterodyne)방식에 의한 정렬방법이 연구되고 있다. 광-헤테로다인 정렬방법^[8]은 상이한 주파수를 가진 두 광파를 웨이퍼 정렬마크에 입사시키고 회절된 정렬광 신호와 레이저 기준광 신호의 AC 위상을 상호 비교함으로써 높은 분해능을 가지는 정렬신호를 추출하는 정렬방법이다. 이는 정렬광의 강도를 감지하는 것이 아니라 위상 변화를 감지함으로써 정렬 광원 자체의 강도변화, 혹은 정렬마크의 형상과 공정 layer에 따

른 정렬신호의 영향을 거의 받지 않는다는 장점을 가진다. 또한 레이저 광 회절방식에서 처럼 웨이퍼 스테이지나 광원 자체를 주사할 필요가 없기 때문에 오프셋 오차(offset error)를 제거할 수 있다는 장점도 있다. 이러한 광-헤테로다인 정렬방법을 사용함으로써 0.001 μ m의 정렬신호 분해능과 0.01 μ m(3 σ)의 중첩 정밀도를 달성할 수 있다.

정렬 시스템을 살펴보면 (그림 11)에서 처럼 광원으로는 1.8MHz의 주파수 차이를 가지며 상호 수직 선편광된 제만 레이저를 사용하였다. 제만 레이저는 자기장에 의한 에너지 띠의 미세분리효과(Zeeman effect)를 이용한 레이저로서 상용화 된 제품을 사용하였다. 제만 레이저 광원이 빔 스플리터에 의해서 축소 투영렌즈를 통과하여 웨이퍼상의 정렬 마크에 입사하고, 마찬가지로 회절된 레이저광은 다시 광 경로를 되돌아와서 빔 스플리터를 통해서 렌즈 L1 으로 입사한다. 여기에서 1차 회절광은 1.8MHz의 주파수 차이와 편광 차이를 여전히 가지고 있으며, 두개의 편광프리즘 PBS에 의해서 회절 신호광의 편광 방향에 따라 선별된 레이저 광을 렌즈 L2와 선 편광자를 통과시키고 광증배관으로 광신호를 전기 신호로 변환한다. 1.8MHz의 beat 주파수를 가지는 변환된 정렬 신호는 위상 비교기에서 제만 레이저에서 나오는 1.8MHz의 기준 신호와 위상을 비교하고 주연산기에서 처리하여 위상차를 웨이퍼의 변위로 계산하여 웨이퍼 스테이지를 구동한다.

(그림12)는 광-헤테로다인 정렬 시스템에서 검출된 신호의 한 예로써 정렬 신호광과 레이저 기준신호를 각각 전기적 신호로 변환하였을 때의 시간에 따른 전압변화를 보인다. 그림에서 정렬마크의 위치변화에 따른 회절신호광의 원래 기준 광파에 대한 상대적 위상차 $\Delta\phi$ 는 위상 비교회로와 컴퓨터를 통해서 웨이퍼의 위치변화로 변환되어 전체적인 웨이퍼 정렬을 수행하게 되며 웨이퍼 정렬위치변화 Δx 와 위상차 $\Delta\phi$ 사이의 상호관계는 다음의 식에 의해 계산되어진다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi\Delta x}{P} \quad (3)$$

이 식에서 P는 웨이퍼 정렬마크 격자의 피치를 나타낸다. 따라서 이들 두신호의 위상차 $\Delta\phi$ 를 비교하여 신호처리 회로를 통해 전압으로 변환하고 다시 주 연산기를 통해서 웨이퍼 변위에 관한 값 Δx 를 계산하여 웨이퍼 정렬을 수행할 수가 있다.

VI. 결 론

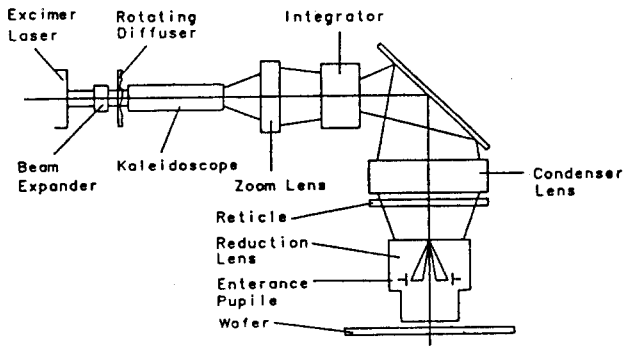
개발된 KrF 엑시머 레이저 스텝퍼는 초점심도 1.5 μm 범위에서 한계 해상력 0.34 μm 를 나타내었다. 해상력과 초점심도 측면에서는 좋은 결과를 나타내었으나, 시스템의 안정성 및 기판 변화의 대응성등에서는 약간의 개선해야 할 점이 있는 것으로 나타났다. 개발중인 ArF 엑시머 레이저 스텝퍼에서는 조명계, 투영광학계, 웨이퍼 자동초점 및 자동정렬 시스템 등의 주요 모듈이 연구되고 있으며, 필요로 하는 사양을 만족시킬 수 있을 것으로 예상되고 있다. 최종적으로는 이들 모듈들을 결합하여 해상력 0.25 μm , 노광영역 3mm ϕ 를 가지는 스텝퍼를 개발할 예정이다.

참 고 문 헌

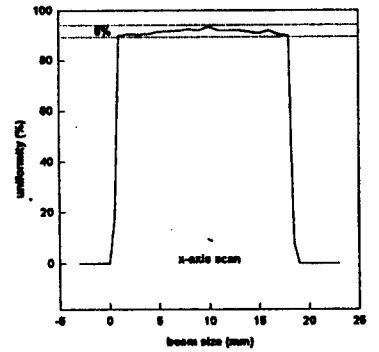
1. L. F. Tompson, et al., "Introduction to Microlithography", ACS Prof. Ref. Book, 2nd Edition, (1994).
2. 한국전자통신연구소, "엑시머 레이저 스텝퍼 기술 개발", 연차연구보고서, 2SM11400522430F, (1993).
3. D. H. Kim et al, Proc. of SPIE, Vol. 1927, 892 (1993).
4. Y.-H. Oh et al, Proc. of SPIE, Vol. 1927, 214 (1993).
5. H. J. Yoo et al., Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 32, 5903(1993).
6. N. Magome et al., Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 29, NO. 11, Nov., 2577(1990).
7. M. Sasago, et al., Proc. of SPIE, Vol. 1264, 466 (1990).
8. K. Yamashita et al., Proc. of SPIE Vol. 1264, 219(1990).

그림 설명

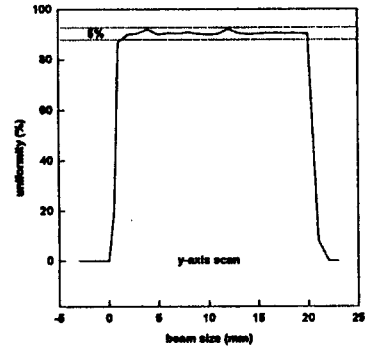
- (그림 1) KrF 엑시머 레이저 스텝퍼의 조명 광학계의 구성도.
- (그림 2) 웨이퍼 노광면에서의 (a) x축, (b) y축 방향에 따른 레이저 빔 조명 균일도 실험결과.
- (그림 3) 제작된 KrF 엑시머 레이저 투영광학계.
- (그림 4) L/S(Line and Space)형태의 패턴에 대한 스텝퍼의 해상력 및 초점심도에 관한 실험결과를 보여주는 SEM 사진. 1.5 μm 의 초점심도 영역에서 0.34 μm 의 해상력을 보여주고 있다.
- (그림 5) DDM을 적용한 경우 해상력 및 초점심도 실험결과. 이 경우 KrF 엑시머 레이저 스텝퍼의 최소선폭은 0.20 μm 까지 얻어진다.
- (그림 6) PSD를 이용한 광학적 자동초점 장치의 원리도.
- (그림 7) Off-axis 정렬 시스템의 개략도. 이중정렬 방식으로 영상처리 방식과 레이저 회절광 검출방식이 동시에 채택됨.
- (그림 8) ArF 엑시머 레이저 스텝퍼용 광학계.
- (그림 9) ArF 엑시머 레이저 스텝퍼용 광학계의 MTF 곡선.
- (그림 10) 프로브 빔 주사 방식에 의한 웨이퍼 자동초점 장치의 개략도.
- (그림 11) 제만 레이저를 이용한 광-헤테로다인 정렬 시스템의 개략도.
- (그림 12) 광-헤테로다인 정렬 시스템에서 검출된 정렬신호. 웨이퍼의 변위에 Δx 에 따른 정렬신호와 참조신호 사이의 위상차는 $\Delta\phi$ 가 됨.



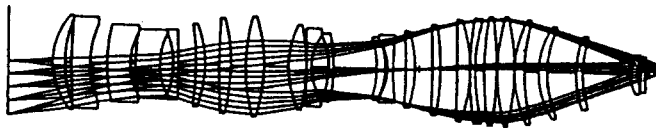
(그림 1)



(a)



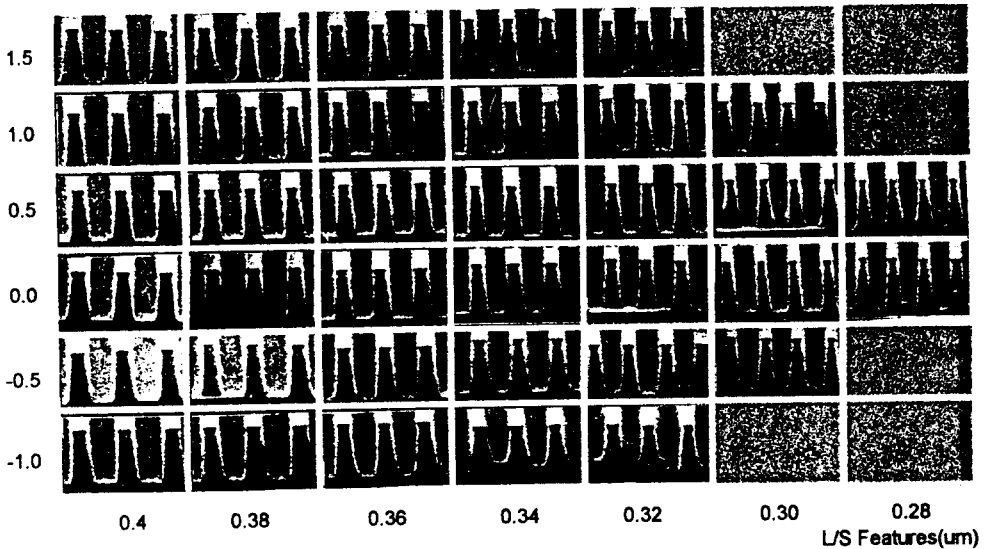
(b)



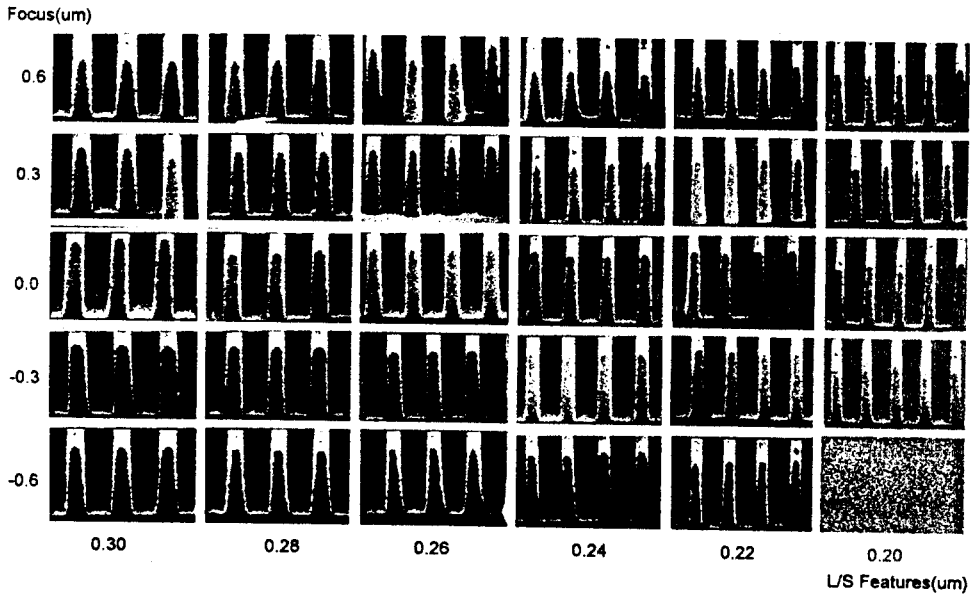
(그림 3)

(그림 2)

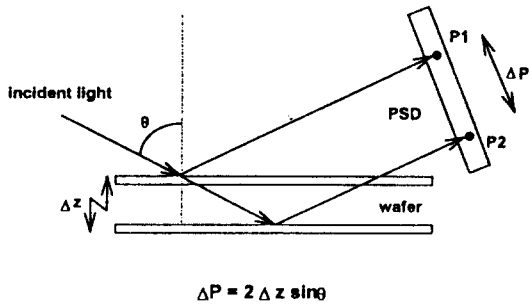
Focus(μm)



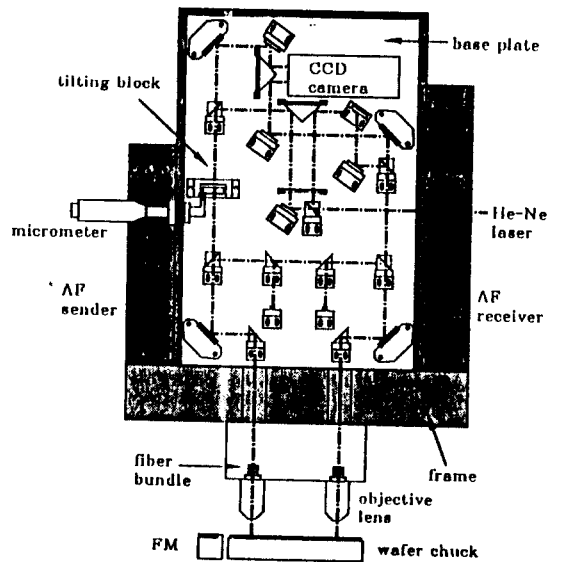
(그림 4)



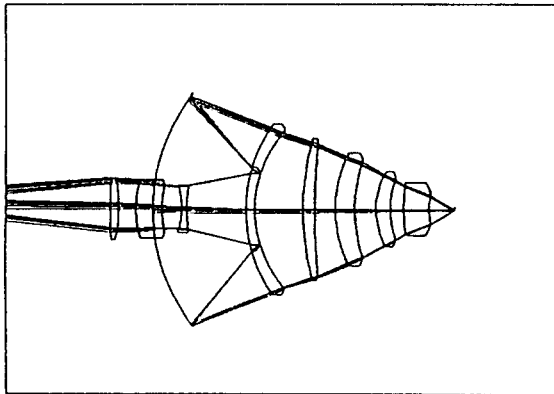
(그림 5)



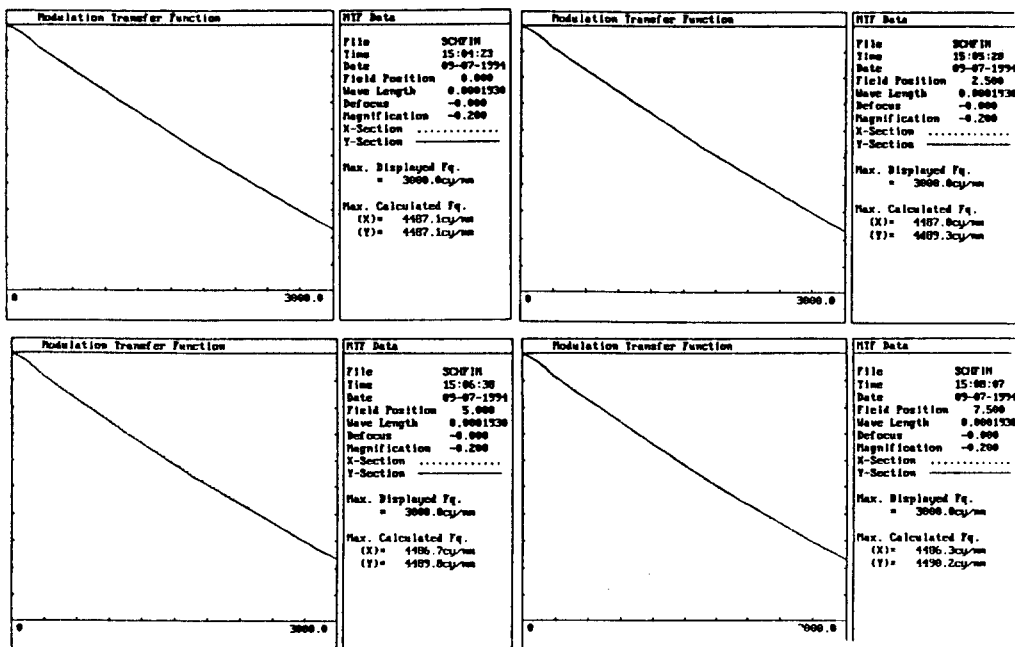
(그림 6)



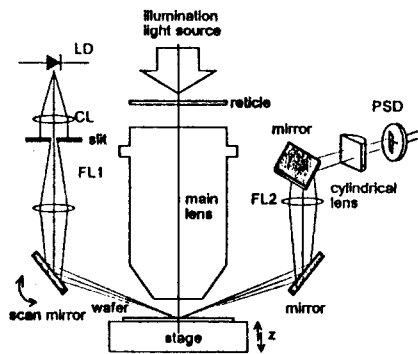
(그림 7)



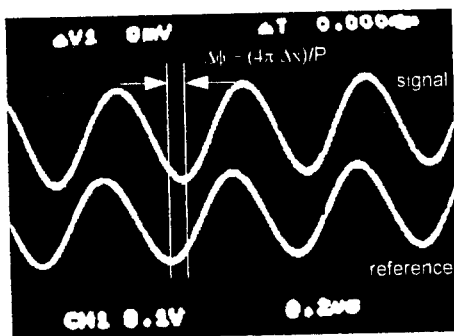
(그림 8)



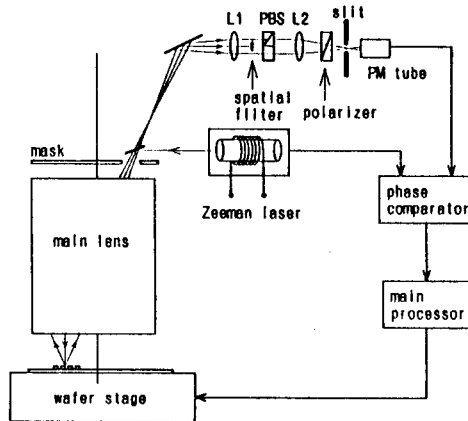
(그림 9)



(그림 10)



(그림 12)



(그림 11)