

고배율 광학현미경의 초점밀 능동 자동초점방법

이호재 · 이상윤 · 김승우
한국과학기술원 기계공학과

(1995년 10월 23일 받음)

최근들어 반도체 산업의 자동검사장비에 고배율 광학현미경이 많이 사용되고 있다. 이러한 고배율 광학현미경에 있어서 선결과제가 물체를 광학현미경에 사용된 대물렌즈의 초점심도 내에 위치시키는 초점맞춤작업이다. 본 논문에서는 광삼각법을 기본구성으로하고, 수광부에 2개의 2분할소자를 사용하여 물체의 표면상태에 둔감하면서 물체의 초점오차량에는 매우 민감한 초점오차신호를 만들어줄 수 있는 새로운 자동초점방법을 소개하였다. 얻어진 실험결과에 의하면 이 방법의 신호분해능은 5 nm이며, 반복능은 0.5 μm 이다.

I. 서 론

일반적으로 현미경에 사용되는 대물렌즈의 초점심도(depth of field)는 매우 작은 값을 갖는다. 이것은 현미경의 영상분해능(image resolution)을 높이기 위하여 개구수(NA; Numerical Aperture)의 값이 큰 값을 갖도록 대물렌즈가 설계되기 때문이다. 이와 같이 현미경의 영상분해능 R 과 초점심도 Δz 는 비간섭조명(incoherent illumination)의 경우에 다음의 식과 같이 이론적으로 표시될 수 있다.^[1]

$$R = 0.61 \frac{\lambda_0}{NA} \quad (1)$$

$$\Delta z = (\pm) 0.5 \frac{\lambda_0}{NA^2} \quad (2)$$

여기서 λ_0 는 조명광원의 중심파장을 의미한다. 결국 위의 식에서와 같이 NA 값이 증가하면 영상의 분해능은 향상되지만 초점심도는 매우 작아지게 된다. 예를들어 중심파장이 0.55 μm 인 백색광을 조명으로하는 경우에 대물렌즈의 NA 값이 0.9이면 영상분해능과 초점심도는 각각 0.37 μm 와 0.68 μm 의 값을 갖는다. 따라서 물체의 표면영상을 계속해서 관찰하는 경우에 수동으로 물체를 초점심도내에 위치시키는 작업, 즉 초점맞춤(focusing)은 매우 힘든 작업이 된다. 따라서 자동초점맞춤(auto-focusing)이 필요하게 된다.

현재까지 현미경의 자동초점맞춤에 사용되고 있는 방

법으로는 공초점방법(confocal principle)^[2]과 LEITZ Autofocus System(LAF) 방법^[3]을 들 수 있다. 이외에도 물체의 표면형상을 비접촉으로 측정하는데 사용되는 비접수차법^[4]과 임계각법^[5]에 사용된 광학계가 자동초점 장치의 광학계로 이용될 수 있다. 그러나 이러한 기존의 방법들은 물체의 반사율과 기울기 및 표면조도에 의하여 자동초점 성능에 크게 제한을 받는다. 따라서 본 연구에서는 고분해능의 광학현미경에 있어서 쉽게 적용이 가능하고, 물체의 초점오차량에 따라서 매우 민감한 신호를 발생시켜 줄 수 있으며, 또한 물체에 의한 오차요인을 최소화 시켜줄 수 있는 새로운 자동초점 광학계를 구성하고자 한다. 여기서 초점오차량이란 물체가 초점 위치로부터 벗어난 광축상의 변위로 정의된다.

II. 이론적 고찰

본 연구에서 자동초점맞춤 기능을 얻기 위하여 사용된 자동초점 광학계의 기본적인 구조는 그림 1과 같다. 현미경 광학계에 사용된 대물렌즈(objective lens)와 자동초점장치의 광원으로 사용된 레이저다이오드(laser diode) 및 수광센서로 사용된 2분할소자(bi-cell photodiode)들로 구성된다. 2분할소자는 중앙의 분할선을 경계로 상하에 활성면적(active area)을 갖는 PIN 형태의 수광소자로서 입사되는 빛의 광량(power: P)에 비례하는 전류신호 $A1$ 과 $A2$ 를 발생시킨다. 따라서 합신호(summation) S 는 입사광량 P 에 비례하고, 상점의 강도분포(intensity distribution)가 상점중심에 대하여 대칭적인

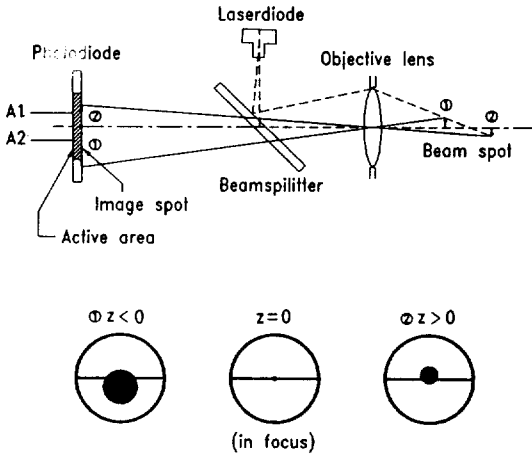


그림 1. 기본원리.

분포를 가지고 있으면 차신호(difference) D 는 상점중심의 위치에 따라서 단순히 결정된다.

그림 1에서와 같이 레이저다이오드에서 발생된 레이저빔은 광분할기를 거쳐서 경사(θ)지게 대물렌즈에 입사되고, 물체 위에 광점(Beam spot)을 형성시킨다. 이 광점은 다시 대물렌즈를 거쳐서 포토다이오드 위에 상점(Image spot)을 형성시킨다. 결국 물체가 초점위치에서 벗어남에 따라서 광점의 위치와 크기가 변화하고, 이것이 대물렌즈의 횡배율(transverse magnification: M)만큼 확대되어 상점의 이동 및 크기의 변화로 나타나게 된다. 따라서 물체가 초점위치에서 전후로 움직임에 따라서 차신호(D)가 변화하게 되고, 이것을 이용하여 자동초점 맞춤을 수행하게 된다. 즉 2분할소자의 상하에서 발생되는 신호를 $A1$ 과 $A2$ 라고 하면, 다음의 식 (3)과 같이 차신호 D 를 합신호 S 로 단위화(normalization)한 초점오차신호(F)는 물체의 초점오차량에 비례하게 되고, 이 초점오차신호가 영이 되도록 물체를 움직여 줌으로써 자동초점맞춤을 수행하게 된다.

$$F \equiv \frac{D}{S} = \frac{A1 - A2}{A1 + A2} \quad (3)$$

현미경에 사용되는 대물렌즈를 그림 2에서와 같이 유효구경(D)을 갖는 하나의 얇은 렌즈(thin lens)로 나타내고, 레이저다이오드에서 발생된 레이저빔의 최소빔반경(beam waist)이 위치하는 곳을 각각 L_1 과 L_2 로 나타내면, 렌즈의 횡배율(M)은 L_1 , L_2 에 의하여 식 (4)와 같이 정의된다.

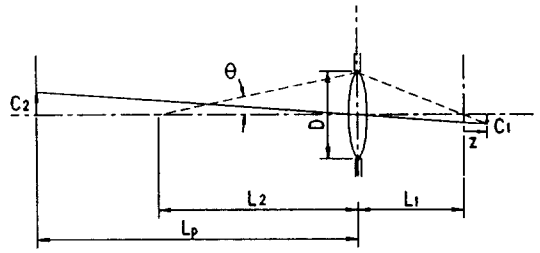


그림 2. 좌표계 설정.

$$M = \frac{L_2}{L_1} \quad (4)$$

또한, 기하학적인 관계로부터 L_2 는 레이저빔의 입사각(θ)과 유효구경에 의하여 다음과 같이 표시된다.

$$L_2 = \frac{D}{2 \tan \theta} \quad (5)$$

결국 렌즈에서 광점까지의 거리 L_1 은 다음과 같이 계산된다.

$$L_1 = \frac{L_2}{M} = \frac{D}{2M \tan \theta} \quad (6)$$

따라서 물체가 광축을 따라서 이동할 때 물체 위에 생기는 광점의 크기(S_1)는 물체의 초점오차량 z 에 따라서 기하학적인 관계로부터 다음과 같이 구해진다.

$$S_1(z) = -\frac{D/2}{L_1} z = -M \tan \theta z \quad (7)$$

이때 렌즈로부터 거리 L_p 만큼 떨어진 위치에 놓여있는 2분할소자 위에 형성되는 상점중심의 위치(C_2)는 다음과 같이 표시된다.

$$C_2(z) = -\frac{L_p}{L_1 + z} \frac{S_1}{2} = K \frac{z}{L_1 + z} \quad (8)$$

$$K = \frac{L_p M \tan(\theta)}{2} \quad (9)$$

여기서 K 는 시스템상수로서 초점오차신호 F 의 민감도(Sensitivity)를 결정짓는 상점의 위치변화율을 나타낸다. 물체의 초점오차량 z 가 L_1 에 비하여 매우 작을 때, 상점중심의 변위는 z 에 따라서 선형적으로 변화함을 그림 3에서와 같이 알 수 있다. 식 (8)에서 첫번째 항에 해당하는 부분은 광점의 이동에 대한 상점의 이동을 나타내는

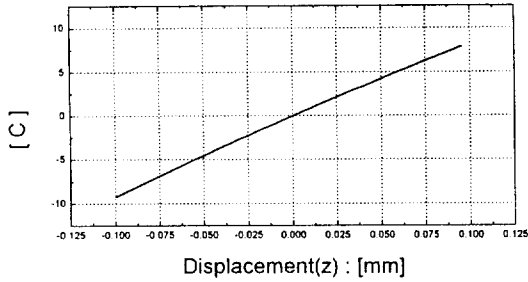


그림 3. 변위와 상점 중심의 위치관계.

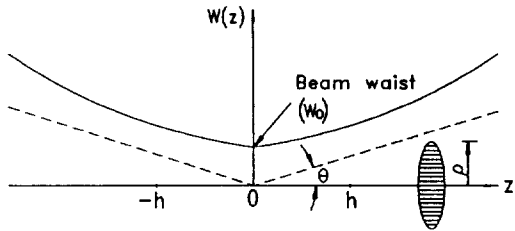


그림 4. Gaussian beam.

자동초점 광학계의 배율에 해당된다. 결국 현미경의 대물렌즈가 가지는 횡배율(M)에 관계없이 자동초점 광학계에 추가로 배율을 증가시켜 줌으로써 신호의 민감도를 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

자동초점장치의 광원으로 사용된 레이저다이오드는 빛의 진행방향에 대하여 수직한 단면에서의 강도분포가 정규분포를 갖는 가우시안 빔(Gaussian beam)의 특성을 가지고 있다. 이러한 가우시안 빔의 크기는 빔반경(beam radius)에 의하여 다음과 같이 표시된다⁵⁾.

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{z}{h} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

여기에서 최소 빔반경(beam waist) w_0 와 Rayleigh 영역 h 는 레이저빔의 경계조건에 따라서 결정되는 상수이다. 이 때 그림 4에서와 같이 최소빔반경 w_0 가 있는 위치로부터 z 만큼 떨어져 있는 반지름 ρ 인 원의 내부를 통과하는 광량은 아래의 식으로 표현된다.

$$P(z) = P_i \left(1 - \exp \left[- \frac{2\rho^2}{w(z)^2} \right] \right) \quad (11)$$

여기서 P_i 는 수직한 단면에서의 전체광량(total power)을 나타낸다.

그림 5와 같이 레이저빔이 대물렌즈를 통과하여 물체에 반사된 후, 다시 대물렌즈에 의하여 2분할소자에

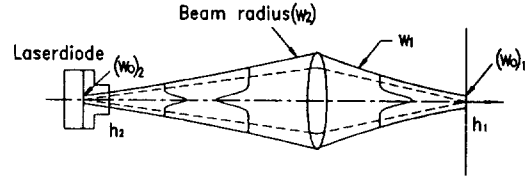


그림 5. 렌즈를 통한 Gaussian beam의 전파.

입사되는 경우에 있어서, 대물렌즈를 중심으로 물체가 놓여 있는 쪽과 2분할소자가 놓여 있는 쪽을 각각 하첨자 1과 하첨자 2로 표시하기로 한다.

렌즈의 횡배율(M)이 물체의 미소변위 z_1 에 대하여 일정하다고 가정하면 변위 z_1 에 따르는 2분할소자 위에 입사되는 광량과, 물체는 고정되어 있고 2분할소자가 z_2 만큼 이동하면서 받는 입사광량은 서로 비례하게 된다. 먼저 반지름이 ρ 인 2분할소자가 받는 입사광량의 비(比)는 식(11)에 따라서 아래와 같이 표시된다.

$$\frac{P(z_2)}{P_i(r)} = 1 - \exp \left[- \frac{2\rho^2}{w_2(z_2)^2} \right] \quad (12)$$

여기에서 전체광량 P_i 는 대부분이 물체표면의 반사율(r : reflectivity)에 의하여 결정된다. 좌표계^[1]과 좌표계^[2] 사이에는 미소변위에 대하여 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$w_2(z_2) = M w_1(z_1) \quad (13)$$

따라서 물체의 변위(z_1)에 따르는 입사광량의 비(比)를 얻을 수 있다.

$$\frac{P(z_1)}{P_i(r)} = 1 - \exp \left[- \frac{2 \left(\frac{\rho}{M} \right)^2}{(w_1(z_1))^2} \right] \quad (14)$$

$$w_1(z) = (w_0)_1 \left[1 + \left(\frac{z_1}{h_1} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

위의 두 식으로부터 물체의 변위(z_1)와 광량의 비(比) 사이의 관계식을 구하면 다음과 같이 간단히 표시된다.

$$\frac{P(z_1)}{P_i(r)} = 1 - \exp \left[- \frac{\alpha}{h_1^2 + z_1^2} \right] \quad (16)$$

$$\alpha = 2 \left(\frac{h_1 \cdot \rho}{M(w_0)_1} \right)^2$$

그러나 그림 6에서와 같이 레이저빔의 진행방향이 광축에 대하여 기울어진 경우에는 h_1 과 α 의 값을 정확히 구하기는 매우 어려운 상황이다. 따라서 h_1 과 α 의 값을

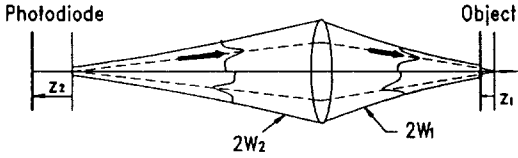
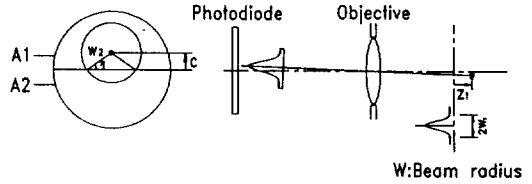


그림 6. 비축광선의 전파.



(a) 대칭적인 강도분포

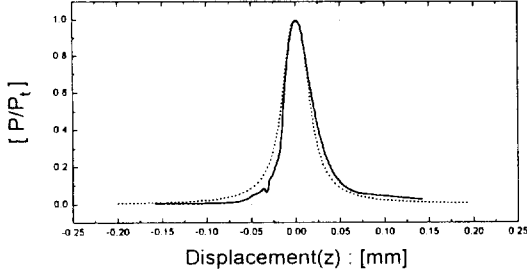
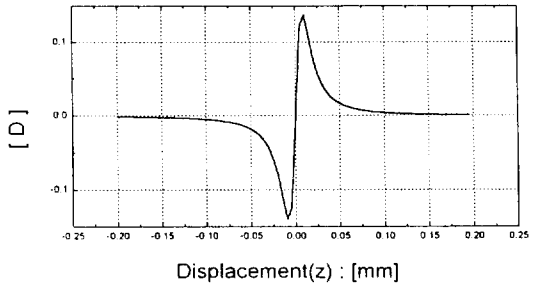


그림 7. 곡선맞춤 결과.



(b) 차신호.

그림 8. 이상적인 경우

최소자승법에 의하여 다음과 같이 추정하기로 한다.

$$\begin{bmatrix} \sum Y_i^2 & \sum Y_i \\ \sum Y_i & \sum 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1^2 \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum Y_i^2 Z_i \\ -\sum Y_i Z_i \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기에서 $Y_i = \ln\left[1 - \frac{P(z_i)}{P_1(r)}\right]$, $Z_i = [z_i]^2$ 이다. 반지름

(ρ)이 6 mm 되는 2분할소자를 사용하여 얻은 합신호(S)로부터 최소자승법에 의하여 추정된 h_1 과 α 의 값은 다음과 같다.

$$h_1 = 0.006125 \text{ mm}$$

$$\alpha = 0.000233 \text{ mm}^2 \text{ 또는 } (w_0)_1 = 0.0340 \text{ mm}$$

그림 7은 이제까지의 계산 결과를 보여준다. 실선이 최소자승법에 의하여 구한 결과이고, 점선은 최소자승법을 사용하는데 이용된 데이터를 보여준다. 향후 본문에서 계속해서 예로 제시되는 계산값들은 위에서 얻은 값을 사용해서 계산한 결과들이다.

III. 장치구성시 고려사항

물체가 초점위치 근방에서 광축을 따라서 미소하게 이동할 때에는 그림 8(a)와 같이 2분할소자 위에 입사되는 레이저빔의 강도분포가 상점중심에 대하여 대칭성을 유지한다. 따라서 차신호 D 의 크기를 결정짓는 광량의 중심은 상점중심과 일치하게 된다. 그 결과 각각의 활성면적 위에서 만들어지는 신호 $A1$ 과 $A2$ 의 차신호 D 는 단순히 상점의 전체면적에 대한 차면적의 비로서 표시될

수 있다. 따라서 기하학적인 관계로부터 2분할소자의 상하에 생긴 상점의 면적차를 구하고, 이로부터 차신호를 나타내면 다음과 같다.

$$D(z_1, r) = A1 - A2 = k \frac{2(w_2 \eta + C_2 \cos \eta)}{\pi w_2} P(z_1, r) \quad (18)$$

여기에서 k 는 최종적인 출력신호까지의 비례상수를 의미한다. 그림 8(b)는 차신호의 결과를 보여준다.

일반적으로 자동조점장치가 연속적으로 물체의 표면에 대한 자동조점맞춤을 수행하는데 있어서, 성능에 영향을 미치는 요인으로 물체의 반사율과 기울기 및 표면조도를 들 수 있다. 이들요인은 자동조점맞춤을 수행하는 도중에 계속적으로 변화하는 값으로 자동조점장치의 성능을 결정짓게 된다. 이밖에도 자동조점장치를 구성하는 요소들의 설치에 따르는 정렬오차를 고려하여야 한다.

3.1 물체의 반사율에 대한 고려

먼저 물체의 반사율은 식 (12)에서와 같이 2분할소자에 입사되는 광량의 크기에 영향을 미친다. 따라서 초점맞춤을 하기 위하여 사용되는 신호가 입사광량의 변화에는 영향을 받지 않게 하기 위해서 차신호를 전체광량으로 나누어 주면, 아래와 같이 물체의 변위(z_1)에만 관계되는 초점오차신호(F)가 얻어진다.

$$F(z_1) = \frac{A1 - A2}{A1 + A2} = \frac{2(w_2 \eta + C_2 \cos \eta)}{\pi w_2} \quad (19)$$

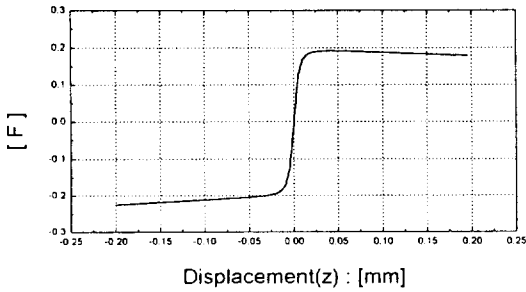


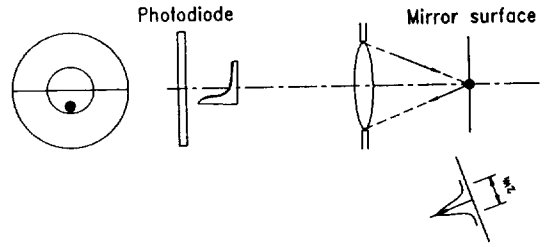
그림 9. 반사율에 의한 효과 (초점오차신호).

이 결과를 그림 9에 도시하였다. 그러나 실제의 경우에 있어서 2분할소자의 크기가 유한함에 따라 광량의 손실이 발생하고, 이로 인해 초점오차신호(F)는 영(null)으로 접근하게 된다. 또한 입사되는 레이저빔의 강도분포가 물체 표면에서의 산란으로 인하여 불균일하게 변화함으로써 2분할소자에 입사하는 광량의 분포가 그림 8(a)와 같은 특정한 모양을 나타내지는 않는다. 즉, 표면조도에 따라 반사와 산란에 의한 영향으로 입사광량의 중심과 상점중심이 일치하지 않게 된다. 따라서 초점오차신호(F)가 단순히 물체의 변위(z_1)에 의해서만 결정되지 않는 문제점을 갖게 된다.

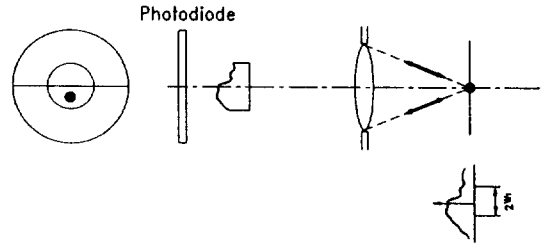
3.2 기울기에 대한 고려

물체에서 반사되는 레이저빔의 강도는 그림 10(a)에서와 같이 물체의 기울기와 레이저빔의 물체표면으로의 입사각에 따라서 어느 한 방향으로 집중되게 된다. 따라서 물체가 초점위치에 놓여 있음에도 불구하고 입사광량의 중심은 어느 한 쪽으로 치우치게 된다. 즉 초점오차신호(F)의 값은 영이 아닌 값을 가지게 되고, 따라서 초점오차가 발생하게 된다. 이러한 기울기에 의한 변화 요인은 크게 두 가지로 나누어서 생각할 수 있다. 하나는 물체가 가지고 있는 표면의 거시적 기울기(waviness)에 의한 요인과 그림 6과 같이 레이저빔 자체가 물체의 표면에 대하여 경사지게 입사함으로써 생기는 요인이다. 그러나 후자의 경우에는 자동초점맞춤을 수행하는 동안에 일정한 값을 가지고 있음으로 시스템의 초기값을 적절히 설정함으로써 해결될 수 있다. 그러나 물체의 거시적 기울기에 의한 효과는 자동초점맞춤을 수행하는 동안에 연속적으로 변화하여 입사광량의 중심이 계속해서 변화하고, 따라서 시스템의 초기값 설정을 불가능하게 만든다.

3.3 표면조도에 대한 고려



(a) 물체의 기울기에 의한 경우

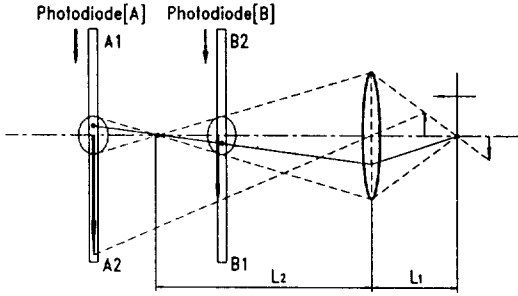


(b) 물체의 표면조도에 의한 경우.

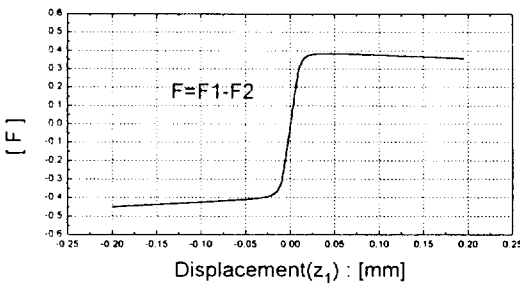
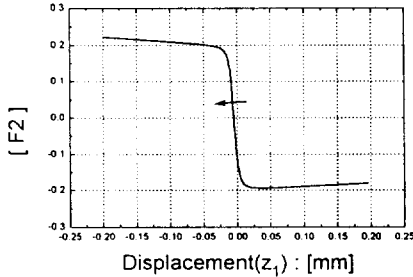
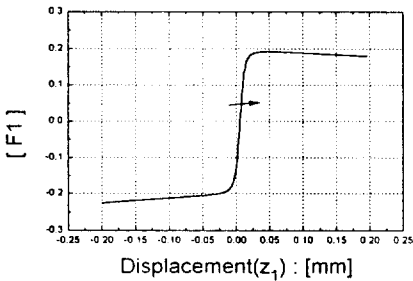
그림 10. 비대칭적인 강도분포

물체표면의 기울기와 더불어 물체의 표면조도 또한 입사광량의 중심과 상점중심을 불일치하게 만든다. 하나의 예로 물체가 웨이퍼인 경우에는 페턴의 모양이 표면조도에 해당된다. 웨이퍼 위에 노광된 페턴은 슬릿(Slit)과 같은 효과를 발생시킨다. 따라서 물체 위에 입사된 레이저빔은 물체의 표면에서 산란되고, 이에 따라서 2분할소자 위에 입사하는 레이저빔의 강도분포는 불규칙하게 변화하고 그 결과 입사광량의 중심과 상점중심이 불일치하게 된다(그림 10(b)).

이와 같은 현상은 초점오차신호(F)의 좌표이동을 의미한다. 즉 전체 입사광량(P)의 크기에는 변화가 없지만, A1 또는 A2의 어느 한 값이 증가함으로써 초점오차신호(F)가 수평방향으로 이동하게 되고, 결국 초점오차신호(F)가 영의 값을 가질 때의 물체의 변위(z_1)가 초점오차량에 해당됨을 알 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 초점오차신호(F)의 이동방향이 서로 반대인 또 하나의 초점오차신호가 필요함을 알 수 있다. 따라서 그림 11(a)와 같이 두 개의 2분할소자를 사용함으로써 초점오차량을 제거하고자 한다. 즉 광점에 대한 영상면의 위치에 해당되는 L_2 를 상점의 초점위치로 정하여 앞뒤에 2분할소자를 위치시키고, 각각의 활성면적에 나타나는 상점의 이동방향을 고려하여 그림 11(a)와 같이 신호를 각각 A1, A2, B1, B2로 정의하면 2분할소자 [A]와 [B]에서 만들어지는 각각의 초점오차신호 F1과 F2는 물체의



(a) 신호의 정의



(b) 시뮬레이션 결과.

그림 11. 두 개의 포토다이오드를 사용했을 때의 결과

변위(z_1)에 대하여 서로 반대의 부호를 가지게 된다. 또한 그림 11(a)에서 나타냈 듯이 초점위치 근방에서 생기는 물체의 기울기와 표면조도의 변화에 따르는 강도의 집중현상은 상점의 초점위치(L_2)를 중심으로 각각의 2분할소자의 상하에 생기게 된다. 따라서 그림 11(b)에서의

같이 2분할소자 [A]에서 얻어지는 초점오차신호($F1$)가 우측으로 이동하면 2분할소자 [B]에서 얻어지는 초점 오차신호($F2$)는 좌측으로 이동한다. 따라서 이 두 신호 $F1$ 과 $F2$ 의 차이로 얻어지는 최종적인 초점오차신호(D)는 초점오차를 가지지 않게 된다. 이 때 상점의 초점위치(L_2)는 사용된 자동초점 광학계에 의하여 결정된다.

3.4 정렬오차에 대한 고려

정렬오차란 대물렌즈에 대한 물체의 초점위치와 자동 초점장치에 사용되는 레이저빔의 초점위치가 일치하지 않음으로서 생기는 오차를 말한다. 이것은 물체의 변위 (z_1)와 입사광량에 대한 관계를 나타내는 식 (16)에서 두 위치의 차이 만큼에 해당하는 좌표이동을 의미하는 것으로, 하나의 2분할소자를 사용하는 경우와 두 개의 2분할소자를 사용하는 경우에 그림 12에서 볼 수 있듯이 양쪽 모두 초점오차는 발생되지 않으나, 전자의 경우에는 초점오차신호($F1$)의 형태가 원점에 대하여 비대칭적으로 얻어지고 있지만, 후자의 경우에는 각각의 2분할소자에 대한 좌표이동이 서로 반대방향이기에 때문에 최종적으로 얻어지는 초점오차신호(F)의 형태는 대칭적으로 얻어짐을 알 수 있다.

IV. 실험장치의 구성 및 실험방법

본 연구의 실험을 위하여 사용된 광학계의 구성을 그림 13에 나타냈다. 광축상에 고배율 현미경이 있고, 좌측으로 자동초점장치의 광학계가 부착되어 있다. 고배율의 영상을 얻기 위한 현미경의 조명은 백색광의 할로겐 램프를 사용하였고, 대물렌즈의 횡배율은 100배, NA 값은 0.9이다. 따라서 이론적으로 계산된 현미경의 초점심도는 약 $0.68 \mu\text{m}$ 이다. 본 연구에서 자동초점장치의 광원으로 사용된 레이저다이오드는 중심파장이 830 nm, 출력이 15 mW이다. 수광소자는 PIN 형의 실리콘 4분할소자로, +10 V의 역전압(Bias voltage)이 부가된 상태에서 사용하였으며, 2분할소자와 동일한 효과를 얻기 위하여 두 개의 활성면적을 묶어서 하나의 수광부로 사용하였다. 현미경의 광축상에 위치하는 광분할기는 레이저빔과 현미경의 조명광원을 분리시키고, 레이저빔의 손실을 막기 위하여 Dichroic type의 광분할기(BS2)를 사용하였고, 광분할기 BS1과 BS4는 적외선 영역(Infrared range)에서 전달율과 반사율이 각각 50:50을 갖는다.

실험장치의 전체적인 구성은 그림 14과 같다. 방진테이블 위에 초정밀 스테이지를 설치하고 스테이지의 Z축 방향으로 자동초점장치가 포함된 고배율 현미경이 장착

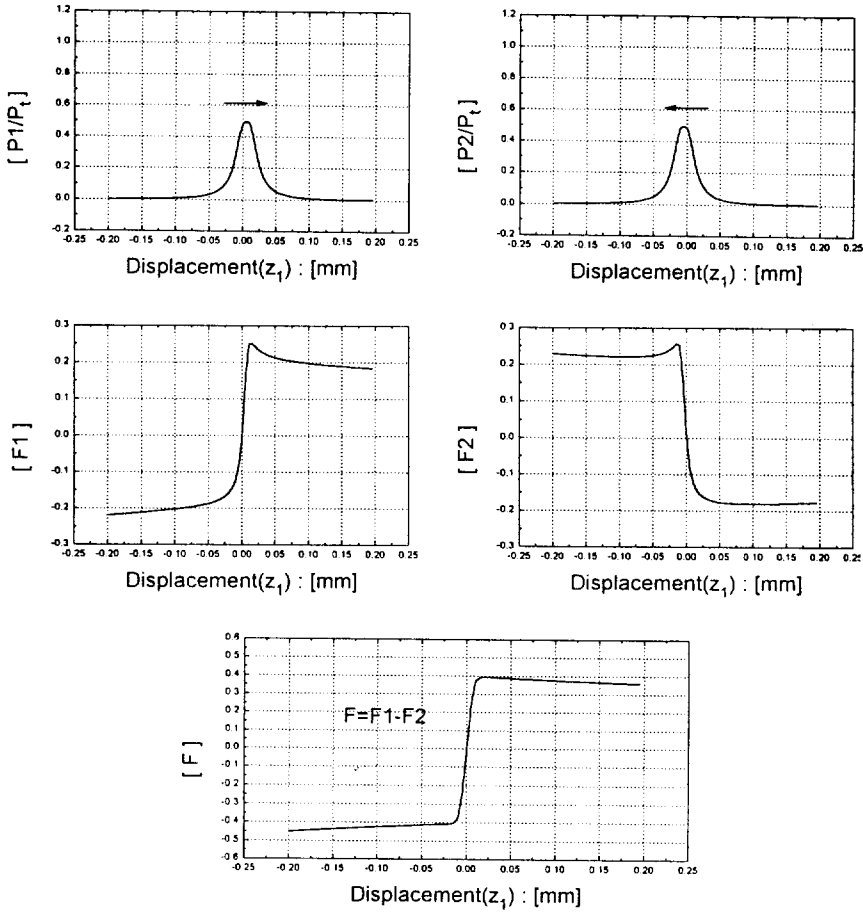


그림 12. 정렬오차에 의한 효과.

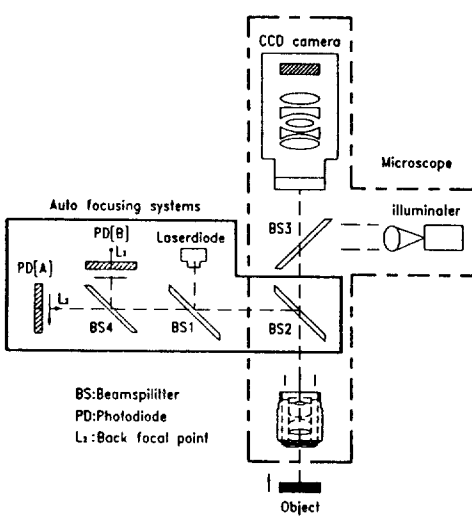


그림 13. 광학계의 구성.

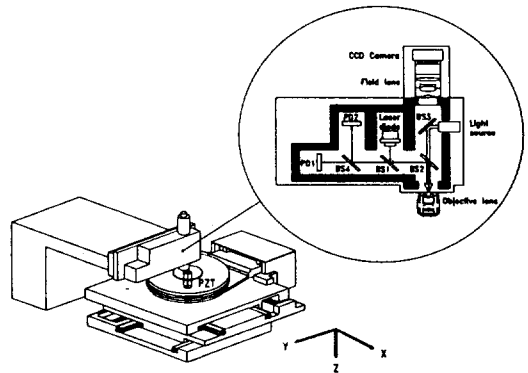


그림 14. 시스템 구성.

되어 있다. 시스템은 크게 광학부, 구동부 및 제어기 (Host PC)로 나뉘어 진다. 광학부는 웨이퍼의 표면형상을 모니터에 나타내 주는 현미경과 초점오차신호(F)를 만

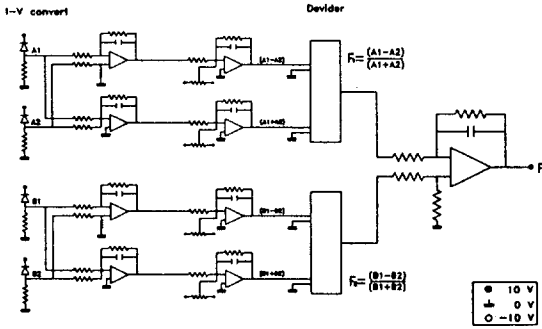
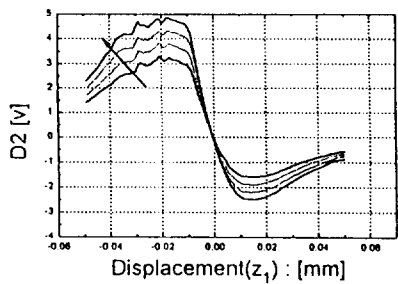
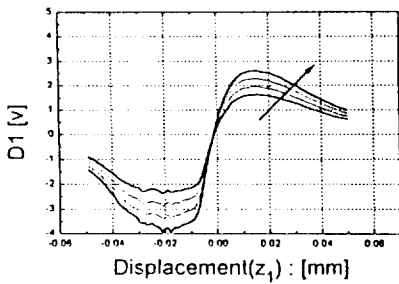
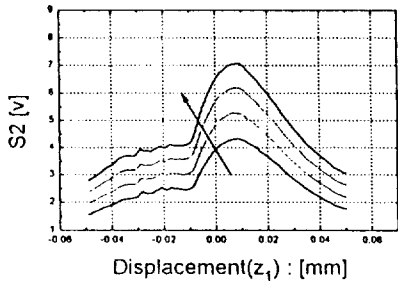
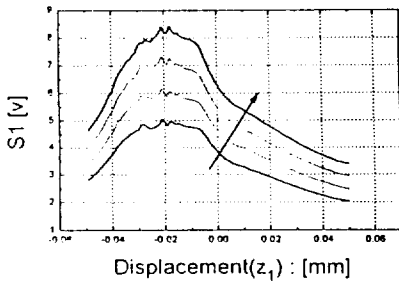


그림 15. 신호검출 회로의 구성.

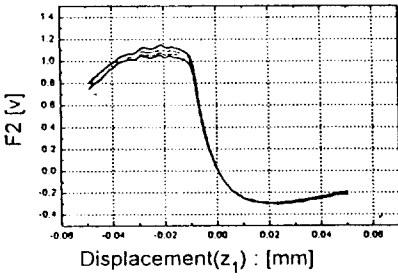
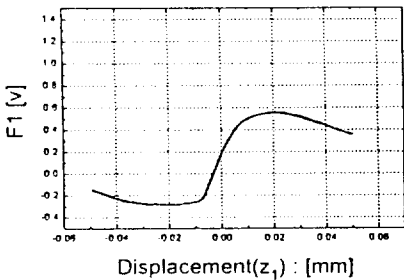
들어 주는 자동초점장치를 의미하고, 구동부는 광학부에서 만들어진 초점오차신호(F)를 이용하여 물체를 이동시키는 역할을 하는 것으로서 스테이지와 컨트롤러로 구성된다. 주제어기는 광학부를 통하여 얻어진 영상을 처리하고, 구동부를 동작시키기 위한 하드웨어와 소프트웨어로 구성된다. 사용된 스테이지는 x, y축의 경우에는 10000 [pulse/rev]의 엔코더(Encoder)를 갖는 피치(Pitch)가 2 mm인 볼스크류(Ball screw) 방식의 초정밀 스테이지로서 0.2 μm의 분해능을 가지고 있고, z축의 경우에는 피치가 1 mm인 볼스크류에 타이밍 벨트(timing belt)에 의한 감속 구동 방식으로 0.05 μm의 분해능을



(a) Difference signals



(b) Summation signals



(c) Focus error signals

그림 16. 초점오차신호의 단위화.

갖는다. 또한 구동범위가 $6\ \mu\text{m}$ 인 압전구동기(piezo-actuator)가 z축 스테이지 위에 장착되어 있어서, z축의 경우에는 이중제어(Dual-servo)방식의 초정밀 스테이지로 구성되었다.

신호를 처리하기 위한 전기회로는 그림 15에서와 같이 두 개의 2분할소자에서 만들어진 수 A의 미약한 전류 신호를 전압신호로 바꾸어 주기 위한 전류-전압 변환회로(I-V converter)와 전압신호의 가감산회로 및 나눗셈기(divider)로 이루어 진다. 아울러 차신호를 단위화하는데 있어서 정확한 합신호를 추정(estimation)할 수 있도록 가산회로를 추가하였고 실험결과를 분석하기 위하여 각각의 활성면적에서의 출력신호(A1, A2, B1, B2)와 각각의 초점오차신호(F1, F2) 및 최종적인 초점오차신호(F)를 AD변환기로 얻을 수 있도록 하였다.

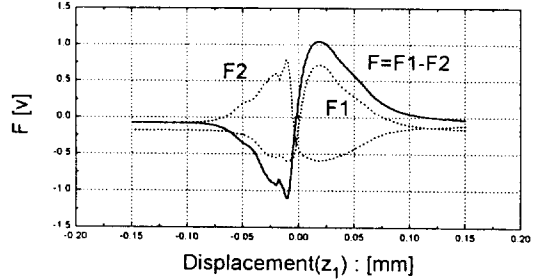
V. 실험 및 고찰

5.1 반사율의 변화에 따른 실험결과

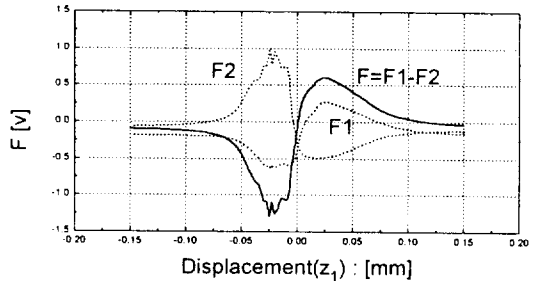
물체의 반사율은 입사광량의 크기를 변화시킨다. 이것은 레이저다이오드의 출력을 변화시키는 것과 동일한 효과이다. 따라서 각각의 실험에서 동일한 위치를 선정하기 위하여 광축에 수직인 방향으로 물체는 움직이지 않고, 레이저다이오드의 출력에 따라서 두 개의 2분할소자에서 나오는 합신호(S)와 차신호(D) 및 초점오차신호(F)를 물체의 광축상의 변위에 대하여 그림 16에 나타냈다. 레이저다이오드의 출력이 증가함에 따라서 차신호의 기울기가 변화하고 있음을 볼 수 있다[그림 16(a)]. 그러나 각신호의 교차점은 변화하지 않고 있기 때문에 초점오차는 발생되지 않는다. 그러나 구동부의 제어관점에서 보면 차신호는 레이저다이오드의 출력에 따라서 기울기가 변화하기 때문에 이득(Gain) 설정이 곤란하고, 경우에 따라서는 불안정해 질 수도 있다. 하지만 차신호를 합신호[그림 16(b)]로 단위화시킨 초점오차신호는 레이저다이오드의 출력변화에 대해서도 기울기가 거의 변화하지 않고 있음을 볼 수 있다[그림 16(c)]. 아울러 합신호가 최대값을 갖는 위치가 초점위치를 중심으로 좌우로 위치하고 있음을 볼 수 있고, 이것은 2개의 2분할소자의 위치가 이론적고찰에서 설정했듯이 상점의 초점위치를 전후로하여 설치되었음을 의미한다.

5.2 물체의 표면조도에 따른 실험결과

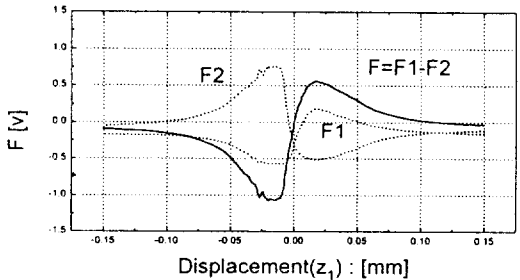
물체가 반도체 웨이퍼인 경우에는 웨이퍼 위에 노광되어 있는 페턴의 모양과 선폭이 표면조도에 관계된다. 따라서 표면조도에 의한 영향은 반도체 웨이퍼에 대하여



(a) Linewidth=40 μm



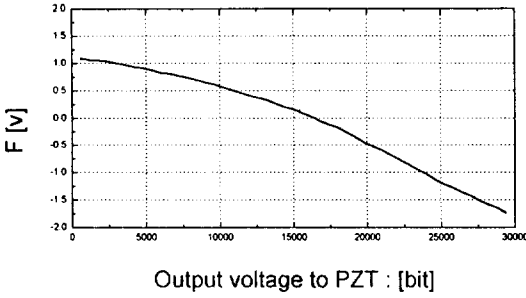
(b) Linewidth=1 μm (dense)



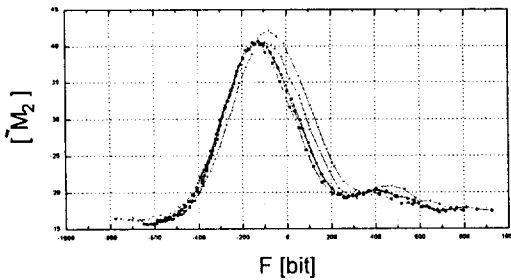
(c) Linewidth=1 μm (sparse)

그림 17. 표면조도에 의한 결과.

선폭과 페턴모양이 다른 곳에서 각각 초점맞춤작업을 수행하면서 실험하였다. 그림 17(a)는 선폭이 $40\ \mu\text{m}$ 정도되는 집적회로(IC circuit)에 대한 실험결과이고, 그림 17(b)와 그림 17(c)는 선폭이 $1\ \mu\text{m}$ 인 웨이퍼 상에서 페턴이 밀집해있는 곳과 산만하게 분포하고 있는 곳에 대한 실험결과이다. 페턴이 좁고, 조밀해질수록 신호에 있어서 불규칙성이 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 초점오차신호(F)의 선형구간에 있어서는 영향을 받지 않고 있음을 알 수 있다. 또한 각각의 초점오차신호 F1과 F2이 영의 값을 가지는 위치가 초점위치의 좌우에 존재하고 있음을 볼 수 있다. 즉 초점오차량이 발생한다. 그러나 두 개의 초점오차신호의 차로 이루어진 최종적인 초점



(a) 분해능



(b) 반복능.

그림 18. 자동초점기능의 성능평가

오차신호 F 는 초점위치에서 영의 값을 가지고 있음을 볼 수 있다.

5.3 신호의 분해능과 반복능

그림 18(a)는 자동초점장치에서 만들어지는 초점오차신호(F)의 분해능을 알아 보기 위하여 초점위치에서 압전구동기(PZT)를 사용하여 얻은 결과이다. 압전구동기(PZT)의 구동범위는 $6\ \mu\text{m}$ 로, 16 bit D/A변환기에 입력된 30000의 디지털 값은 D/A변환기와 고전압증폭기를 거쳐서 압전구동기(PZT)를 $6\ \mu\text{m}$ 까지 신장시킨다. y 축은 1.2 mV 분해능을 갖는 A/D 변환기에 의하여 측정된 초점오차신호(F)를 나타낸다. 이 결과로부터 약 5 nm 정도의 신호분해능이 얻어지고 있음을 알 수 있다. 그림 18(b)는 자동초점장치의 반복능(repeatability)을 알아보기 위하여 수행한 실험결과이다. 물체위의 동일한 지점에서 광축 방향으로 동일한 위치를 알아내기 위하여 사용된 기준신호는 현미경에서 얻은 영상정보로부터 얻어진다. 즉 CCD 카메라로 부터 얻은 영상정보를 처리하여 초점위치를 알아내는 수동자동초점법(passive autofocus)을 이용하였다^[7-9]. 그림 18(b)은 물체의 변위에 대하여 영상처리를 통해서 계산된 기준신호 $[M_2]$ 를

y 축에, A/D변환기를 통해서 얻은 초점오차신호(F)를 x 축에 나타냈다. 기준신호 $[M_2]$ 가 최대값이 되는 곳을 초점위치로 가정하고 초점오차신호(F)의 변화를 보면 변화폭이 약 100 bits에 해당되고 있음을 알 수 있다. 따라서 초점오차신호(F)의 분해능을 고려해 볼 때, $0.5\ \mu\text{m}$ 의 반복능을 가지고 있음을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 연구에서는 마이크로이하의 초점심도를 갖는 현미경 시스템에 있어서 모니터에 항상 선명한 영상을 제공하는데 필요한 자동초점장치에 사용될 수 있는 광학계를 개발하였다. 먼저 시뮬레이션을 통하여 광학계의 성능에 대한 예측을 하고, 이로부터 발생될 수 있는 문제점들에 대한 해결책을 제시하였고, 실험을 통하여 이를 확인하였다.

결과적으로 물체의 반사율에 대해서는 차신호를 단위화한 초점오차신호(F)를 사용하였고, 기울기 및 표면조도에 의한 영향은 두 개의 2분할소자를 사용함으로써 물체의 특성에 둔감하고, 초점오차량에는 매우 민감한 초점오차신호(F)를 얻을 수 있었다. 얻어진 초점오차신호의 분해능은 5 nm이고, 반복능은 $0.5\ \mu\text{m}$ 로 확인되었다.

참 고 문 헌

- [1] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, (Pergamon Press, 6th edition), pp. 370-458(1983).
- [2] Gordon S. Kino and Timothy R. Corle, "Confocal scanning optical microscope", *PHYSICS TODAY*, SEPTEMBER, 1989.
- [3] "LEITZ Autofocus System(LAF)", User manual No. 002/En.
- [4] 三井ほかね, *精密工學會誌*, 53(136), 1987.
- [5] Tsuguo Kohno, Norimitsu Ozawa, Kozo Miyamoto and Tohru Musha, "High precision optical surface sensor", *Appl. Opt.*, 27(1), pp. 103-108(1989).
- [6] B. E. A. Saleh, M. C. Teich, "Fundamental of photonics", Wiley-INTERSCIENCE, pp. 80-107.
- [7] Murali Subbarao, Tae Choi, Arman Nikzad, "Focusing technique", *Opt. Eng.*, 32(11), 2824-2836(1993).
- [8] Sabzali Aghagolzadeh, Okan K. Ersoy, "Transform edge detection", *Opt. Eng.*, 32(5), 933-943(1993).
- [9] E. Krotkov, "Focusing", *Int. J. Computer Vis.*, 1, 223-237(1987).

Active Auto-Focusing of High-Magnification Optical Microscopes

Ho-Jae Lee, Sang-Yoon Lee and Seung-Woo Kim

*Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,
Taejon 365-701, Korea*

(Received: October 23, 1995)

Optical microscopes integrated with CCD cameras are widely used for automatic inspection of precision circuit patterns fabricated on glass masks and silicon wafers. For this application it is important to position the object always in focus so that the image appears in good quality while the microscope scans the object. However, as the magnification of the microscope is taken large for fine resolution the depth of focus becomes small, often in submicron ranges, requiring special care in focusing. This study proposes a new auto-focusing method, which can be readily incorporated in existing optical configuration of microscope. This method is based on optical triangulation using a separate beam of laser and two photodiodes, eliminating focus errors caused by surface roughness and waviness. Experimental results prove that the method can produce focus error signals which are very sensitive with a resolution of 5 nm within 0.5 μm accuracy.