

고배율 현미경의 자동초점장치 (An Auto-focusing System for a High Resolution Microscope)

이 호재*, 이상유, 공 인복, 김 승우
(한국과학기술원 정밀공학과)

Ho-Jae Lee*, Sang-Youn Lee, In-Bog Kong, Seung-Woo Kim

Keywords : High resolution microscope(고배율현미경), Autofocusing(자동초점기능), Depth of focus(초점심도)

ABSTRACT : This study proposed a new autofocusing method for a high resolution microscope with a depth of focus of a submicron range. The experimental setup was characterized by nulling method for bi-cell photodiode which had two active areas on sensor surface. The optical systems used in this method had was very simple and was easily matched to microscopes which had used widely. It was shown that the resolution was very high (about 20 nm) by experimental results. This method can be used in the semiconduct industry because it can find defects on the silicon wafer.

1. 서론

최근들어 반도체 산업의 검사장비 분야에서 이루어지고 있는 연구동향을 보면, 고배율의 현미경 정비를 이용하여 반도체 소자를 생산하는 각각의 공정중에서 결합이 있는 부분을 다음 공정이 진행되기 전에 검출하여 공정의 효율을 높임으로써 생산성유를 향상시키려는 연구가 진행되고 있다.

여기서 고배율 현미경이란 기본적으로 고분해능의 대물렌즈를 통하여 얻은 회상정보를 영상면의 크기비 만큼 확대를 시키는 것을 의미하며, 현재 양산되고 있는 16M DRAM의 경우에는 대략 14" 모니터를 기준으로 하여 10,000배 이상의 영상을 얻어야 0.5 μm의 선폭을 갖는 패턴의 검사가 가능한 것으로 알려져 있다. 기본적으로 광학계를 통하여 얻어지는 영상의 분해능은 조명에 사용되는 광원의 파장(λ)과 대물렌즈의 집광능력을 나타내는 NA(Numerical aperture) 값에 의해서 다음과 같이 근사적으로 계산된다.

$$\text{분해능(Resolution)} = 0.6 \frac{\lambda}{(\text{NA})} \quad (1)$$

결국 현미경이 고분해능의 영상을 얻기 위해서는 짧은 파장의 조명광원과 NA값이 큰 대물렌즈를 사용하게 된다. 그러나 이와 같은 작업은 렌즈에 대하여 물체가 놓이는 위치에 대한 허용치로 사용되고, 식(2)와 같이 표시되는 초점심도(Depth of focus)의 값은 매우 작게 만든다.

$$\text{초점심도(Depth of focus)} = 0.5 \frac{\lambda}{(\text{NA})^2} \quad (2)$$

따라서 일반적으로 고배율현미경은 마이크로이하의 초점심도를 가지고 있다. 이런 이유에서 고배율 현미경으로부터 선명한 영상을 얻기 위해서는 광채를 자동적으로 대물렌즈의 초점심도 내로 위치시키기 위한 즉, 자동초점맞춤(Autofocusing)이 반드시 필요하게 된다.

자동초점맞춤 방법으로는 공압게이지를 이용하는 방법과 용광형 센서를 이용하는 방법 등이 있으나, 최근에는 마이크로이하의 측정분해능을 가지면서 구조가 간단하고, 진공중에서도 사용할 수 있는 광학식 자동초점방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

따라서 분해능이 마이크로이하인 자동초점맞춤 방법을 구현하기 위하여 본 연구에서는 광심각법과 2분할 포토다이오드를 이용하여 물체의 위치변화에 따라 2분할 포토다이오드의 상하에 있는 환성면적에서 만들어지는 전기신호의 차이값이 영(Null)이 되도록 물체를 이동시키면서 초점을 맞추는 방법을 채택하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 자동초점장치의 구성

본 연구에서 자동초점맞춤 기능을 얻기 위하여 사용된 광학계의 기본적인 구조는 Fig. 1과 같다. 이 구조는 물체의 거리를 측정하는데 사용되어져 왔던 기존의 광학계의 구조와 매우 유사함을 알 수 있다. 그러나 물체위에 광점(Beam spot)을 형성시키는 발광부(Projector)의 기능과 광센서 위에 상점(Image spot)을 형성시키 주는 수광부(Receiver)의 역할을 하나의 대물렌즈가 동시에 수행하게 함으로써 광심각법에서 측정능을 불가능하게 만드는 그림자효과(Shadow effect)가 발생하

지 않으며, 광센서로 2분할 포토다이오드를 사용함으로써 마이크로이하의 측정분해능을 얻고자 한다. 이외에도 자동초점 장치의 광원으로 사용된 레이저다이오드(Laser diode)와 광분할기(Beam splitter)가 Fig. 1과 같이 배치되어 있다.

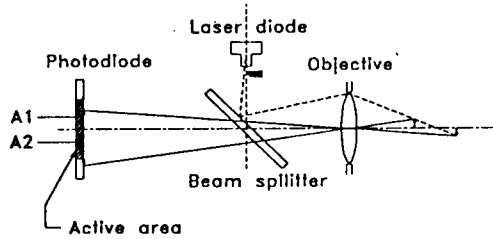


Fig. 1 Auto-focusing devices

2.2 기본 원리

본 연구에서 자동초점맞춤을 위하여 사용된 원리는 다음과 같다. 먼저 물체의 변위에 따라 물체 위에 형성된 광점의 크기와 위치가 변화하면, 이것이 대물렌즈의 배율만큼 확대되어 활성면적 위에 상점의 크기와 위치변화로 나타나게 된다. 이때 2분할 포토다이오드상의 상하의 활성면적으로부터 발생하는 전기신호는 포토다이오드에 입사되는 레이저빔의 강도에 따라서 변화한다. 이로부터 얻어지는 검출신호(Detected signal)는 결국 물체의 변위에 따라서 변화하게 된다. 여기서 검출신호란 포토다이오드에 있는 상하의 활성면적으로부터 발생하는 전압신호를 각각 A1과 A2라고 할 때, 이 두 신호의 차신호(Difference)를 입사광량에 무관하게 하기 위하여 합신호(Summation)로 나눈 값으로 다음과 같이 정의된다.

$$\text{검출신호}(R) = \frac{A1-A2}{A1+A2} \quad (3)$$

결국 물체가 초점위치에 놓이게 되면 상하의 활성면적으로부터 얻어지는 전기적인 신호 A1과 A2는 같아지고, 그 결과 검출신호는 영(Null)의 값을 가지게 된다. 따라서 본 연구에서는 검출신호의 값이 영이 되도록 물체를 이동시킴으로써 자동초점기능을 수행하고자 한다.

2.2.1 변위와 상점의 관계

Fig. 2에서와 같이 대물렌즈를 D)의 구경스튜울 갖는 하나의 얇은렌즈로 나타내고, 레이저 다이오드의 입사각을 θ , 접선을 레이저빔의 최외곽선(Marginal ray)이라고 하면, 레이저 다이오드는 렌즈로부터 거리 L_2 만큼 떨어져 있는 집광원으로 생각할 수 있으며, 이 때 거리 L_2 는 아래와 같이 계산된다.

$$L_2 = \frac{D}{2 \tan(\theta)} \quad (4)$$

여기서 렌즈의 위치를 기준으로하여 물체가 놓이는 쪽을 물체 공간(Object space)이라고하고, 하첨자 [1]로 표시한다. 아울러 레이저다이오드가 놓이 있는 쪽은 상공간(Image space)이라고 하고, 하첨자 [2]로 표시하기로 한다. 렌즈로부터 광점까지의

거리 L_1 은 대물렌즈의 배율을 M이라고 할 때 배율의 정의에 따라서 다음과 같이 결정된다.

$$L_1 = \frac{L_2}{M} = \frac{D}{2 M \tan(\theta)} \quad (5)$$

따라서 물체가 광축을 따라서 이동할 때 물체 위에 생기는 광점의 크기 S_1 은 물체의 변위(z_1)에 따라서 다음과 같이 구해진다.

$$S_1 = -\frac{D/2}{L_1} z_1 = -M z_1 \tan(\theta) \quad (6)$$

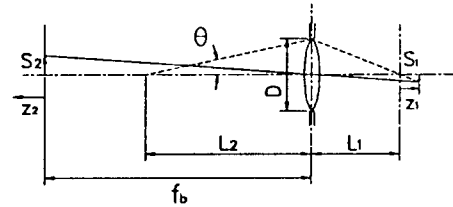


Fig. 2 Coordinate systems

여기서 변위 z_1 는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 레이저다이오드의 초점위치에 대한 값으로 정의된다. 이때 렌즈로부터 거리 f_b 만큼 떨어진 위치에 놓여있는 포토다이오드 위에 형성되는 상점의 크기 S_2 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_2 &= -\frac{f_b}{(L_1+z_1)} S_1 = f_b M \tan(\theta) \frac{z_1}{(L_1+z_1)} \\ &= C \frac{z_1}{(L_1+z_1)} \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서 $C = f_b M \tan(\theta)$ 으로 자동초점장치의 설계시에 결정되는 값으로 시스템상수라고 정의한다. 광점과 상점의 이동방에 해당하는 각각의 중심 위치를 C_1 , C_2 라고 하면, 위의 식들로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{S_1}{2} \\ C_2 &= \frac{S_2}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

2.2.2 변위와 광량사이의 관계

본 연구에서 자동초점장치의 광원으로 사용되는 레이저다이오드는 Fig. 3에서와 같이 빛의 진행방향에 대하여 수직인 단면에서의 강도분포가 정규분포(Gaussian distribution)를 갖는 Gaussian beam의 특성을 가지고 있다. 일반적으로 Gaussian beam은 한 단면에서의 광량이 특정한 영역내에 집중되어 있다. 이것을 Gaussian beam의 빔반경(Beam radius)이라고 하고 다음의 식으로 나타내어 진다.

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{z}{h} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

여기에서 w_0 는 최소반경(Beam waist)이고, h 는 Rayleigh range로 빔의 경계조건에 따라서 결정되는 상수이다. 이 때 Fig. 3에서와 같이 최소반경이 있는 위치로부터 빔의 z 만큼 떨어져 있는 반지름 ρ 의 원내부를 통과하는 광량은 아래의 식으로 표현된다.

$$P(z) = P_0 \left(1 - \exp\left[-\frac{2\rho^2}{w(z)^2}\right] \right) \quad (10)$$

여기에서 P_0 는 빔의 최대광량이다.

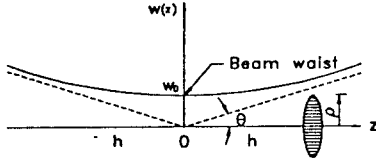


Fig. 3 Gaussian beam

2.3 시뮬레이션

2.3.1 물체의 변위와 입사광량의 관계

Fig. 4에서와 같이 레이저빔이 배율이 M 인 렌즈를 통과하여 물체에 반사된 후에, 다시 렌즈를 통과하여 광센서에 입사되는 경우에 있어서 상공간에 놓여있는 반지름이 ρ 인 포토다이오드가 물체에 움직이기에 따라서 받는 광량의 비(Power ratio)는 물체공간에 놓여 있는 반지름이 $\frac{\rho}{M}$ 인 포토다이오

드가 움직이면서 받는 광량의 비와 동일하다. 따라서 식(9)과 식(10)에 따라서 아래의 식이 성립된다.

$$\frac{P(z_1)}{P_0} = 1 - \exp\left[-\frac{2\left(\frac{\rho}{M}\right)^2}{\left(w_1(z_1)\right)^2}\right] \quad (11)$$

$$w_1(z) = (w_0)_i \left[1 + \left(\frac{z}{h_1}\right)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

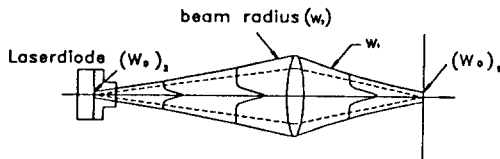


Fig. 4 Laser beam

위의 식에서 $(w_0)_i$ 와 h_1 은 레이저빔의 경계조건에 따라서 물체공간에서 결정되는 상수이다. 위의 두 식으로부터 변위 (z_1) 와 광량의 비(比) 사이의 관계식을 구하면 다음과 같이 간단히 표시된다.

$$\frac{P(z_1)}{P_0} = 1 - \exp\left[-\frac{\alpha}{h_1^2 + z_1^2}\right] \quad (13)$$

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

그러나 본 연구에서와 같이 레이저빔의 진행방향이 광축에 대하여 기울어진 경우에는 변위에 따라서 포토다이오드에 입사하는 광량의 분포를 정확히 구하기는 매우 어려운 문제이다. 따라서 h_1 와 α 의 값을 최소자승법(Least square method)에 의하여 다음과 같이 추정하기로 한다.

$$\begin{bmatrix} \sum Y_i^2 & \sum Y_i \\ \sum Y_i & \sum 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1^2 \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum Y_i^2 Z_i \\ -\sum Y_i Z_i \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기에서 $Y_i = \ln\left[1 - \frac{P(z_1)_i}{P_0}\right]$, $Z_i = [(z_1)_i]^2$ 이다.

2.3.2 변위와 광센서에서의 출력과의 관계

Fig. 5(a)와 같이 광축에 대해서 대칭적인 강도분포를 갖는 광원(P)이 광축 근방에서 광축을 따라서 이동할 때에는 포토다이오드 위에 입사되는 레이저빔의 강도분포도 역시 대칭성을 유지한다. 따라서 입사광량의 중심과 상점의 면적중심이 일치하게 된다. 따라서 2분할 포토다이오드의 크기를 매우 크다고 가정하면 각각의 활성면적 위에서 만들어지는 신호 A_1 과 A_2 의 차신호(D)는 단순히 입사광량의 상점의 전체면적에 대한 차면적의 비로서 표시된다. 따라서 식(8), 식(9) 및 식(10)을 이용하여 면적의 차이를 구하면 차신호(D)를 아래와 같이 유도할 수 있다(Fig. 5(b)).

$$D(z_1) = A_1 - A_2 = k \frac{2(w_2 \theta + C_2 \cos \theta)}{\pi w_2} P(z_1) \quad (15)$$

여기에서 k 는 출력신호에 대한 단위한산계수이다.

이 차신호를 입사광량의 변화에는 영향을 받지 않게 하기 위해서 전체광량으로 나누어 주면 다음과 같이 입사광량에는 무관하고 단순히 물체의 변위에 따르는 기하학적인 관계로 검출신호(R)가 얻어진다.

$$R(z_1) = \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2} = \frac{2(w_2 \theta + C_2 \cos \theta)}{\pi w_2} \quad (16)$$

결국 검출신호란 입사되는 레이저빔의 강도분포가 광축에 대하여 대칭적이고, 포토다이오드의 크기가 무한히 크면 단순히 상점의 전체면적에 대한 차면적의 비(比)로 표시됨을 알 수 있다. 이 결과를 Fig. 5(c)에 나타냈다. 여기에서의 결과는 배율이 100배이고, $L_1=1.8$ mm, $\theta=1^\circ$, $f_0=200$ mm인 고배율현미경에 대하여 $h=0.0119$ mm, $\alpha=0.00075$ mm²을 가정하고 계산한 값들이다.

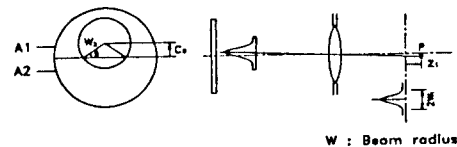


Fig.5(a) Symmetric intensity distribution

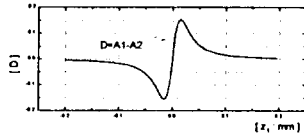


Fig.5(b) Difference signal

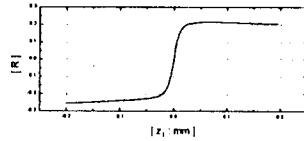


Fig.5(c) Detected signal

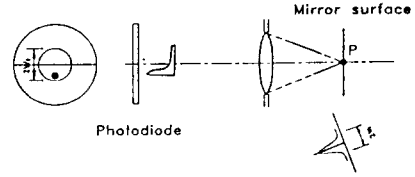


Fig.6(a) Unsymmetrical distribution by specular reflection

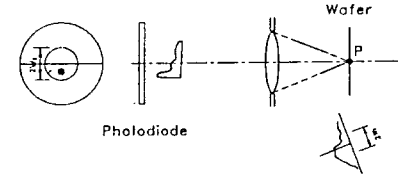


Fig.6(b) Unsymmetrical distribution by surface roughness

2.4 고려사항

앞의 절에서 구한 차신호에 영향을 미치는 요인을 살펴보면 다른 것 같이 크게 두 가지를 들 수 있다. 하나는 입사되는 레이저빔의 강도분포가 물체의 기윤기 및 물체의 표면조도에 의하여 변화함으로써 상점의 인적중심과 실제로 포토다이오드에 입사한 광량의 중심이 불일치하게 되고 이로 인해 초점오차가 발생하는 문제와 실제로 사용된 포토다이오드의 설치위치가 렌즈의 수차문제(Aberation) 또는 정렬오차 등으로 자동 초점장치의 광원으로 사용된 레이저다이오드의 초점위치와 일치하지 않음으로써 생기는 문제점을 고려하여야 한다.

먼저 Fig. 6(a)에서와 같이 물체에서 반사되는 레이저빔의 강도는 물체의 기윤기와 레이저빔의 입사각에 따라서 어느 한 방향으로 치우치게 된다. 여기에서 레이저빔의 입사각에 의한 강도분포의 변화는 시스템의 초기값을 설정함으로써 해결할 수 있다. 그러나 Fig. 6(b)와 같이 물체의 기윤기에 따른 강도분포의 변화는 계속적인 광량중심의 이동을 가져오고 결국 초점오차를 발생시킨다. 물체의 표면조도에 따르는 효과는 회절현상으로 나타나고 물체의 기윤기와 같이 초점오차를 발생시킨다. 이것은 결국 상점이 포토다이오드의 중심에 있지만 차신호의 값은 영이 아닌 값을 가지게 됨을 의미한다. 이와 같은 현상은 Fig. 6(c)에서와 같이 차신호의 좌표이동으로 설명될 수 있다. 즉 차신호가 영의 값을 가질 때의 변위값이 바로 초점오차에 해당된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 Fig. 7(b)와 같이 차신호의 이동방향이 서로 반대인 또 하나의 차신호가 필요함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 7(a)와 같이 두 개의 포토다이오드를 사용함으로써 초점오차를 해결하고자 한다. 즉 레이저다이오드의 광축상에서의 위치(L2)를 정점으로 하여 앞뒤에 2분할 포토다이오드를 위치시키고, 각각의 활성면적에 상점의 이동방향을 고려하여 Fig. 7(a)와 같이 전입신호를 정의하면 포토다이오드 A와 B에서 만들어지는 각각의 차신호 D_1 과 D_2 는 변위에 대하여 서로 반대의 부호를 가지게 된다. 또한 표면조도의 변화에 따르는 강도의 집중현상은 정점을 중심으로 각각의 2분할 포토다이오드의 반대쪽에 생기게 된다. 따라서 포토다이오드 A에서 얻어지는 차신호(D_1)이 Fig. 7(b)에서와 같이 우측으로 이동하면 포토다이오드 B에서 얻어지는 차신호(D_2)는 좌측으로 이동한다. 따라서 이 두 신호 D_1 과 D_2 의 차이로 얻어지는 최종적인 차신호(D)는 Fig. 7(c)와 같이 초점오차를 가지지 않게 된다. 이 때 포토다이오드의 정확한 위치는 사용하는 렌즈의 수차문제와 관련되어 정확히 알 수는 없다. 그러나 실험결과를 바탕으로 적절한 위치를 선정할 수 있다.

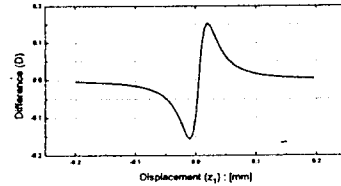


Fig.6(c) Translated difference signal

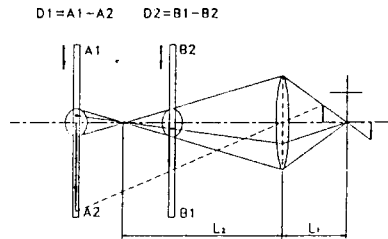


Fig.7(a) Used two photodiodes

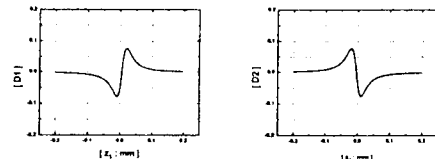


Fig.7(b) Result : each difference

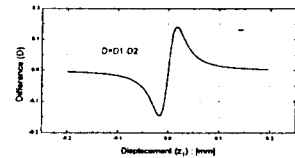


Fig.7(c) Result

마지막으로 고려해야 할 요인으로 사용되는 포토다이오드의 설정위치와 자동초점장치에 사용되는 레이저 다이오드의 초점 위치가 일치하지 않음으로서 생기는 영향이다. 이것은 결국 레이저다이오드의 초점위치와 입사광량에 대한 관계를 나타내는 식(10)에서 두 위치의 차이 만큼에 해당하는 좌표이동유의미한다. 이 결과를 Fig. 8에 나타냈다. 그림에서 보듯이 하나의 포토다이오드를 사용하는 경우와 두 개의 포토다이오드를 사용하는 경우에, 양쪽 모두 초점오차는 발생하지 않으나 하나를 사용한 경우에는 차신호의 범위가 비대칭적으로 얻어지고 있음을 알 수 있다(Fig. 8(b)). 두 개를 사용하는 경우에는 각각의 포토다이오드에 대한 좌표이동이 서로 반대방향이므로 최종적으로 얻어지는 차신호의 범위는 대칭적으로 얻어짐을 알 수 있다(Fig. 8(c)).

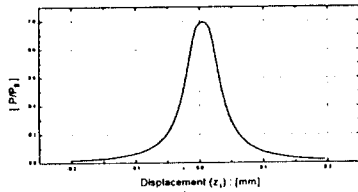


Fig.8(a) Translation of power ratio

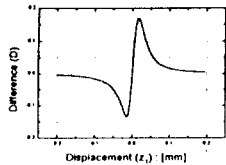


Fig.8(b) Distorted signal

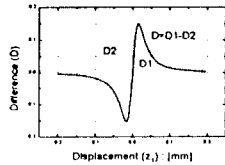


Fig.8(c) Undistorted signal

3. 실험장치의 구성 및 실험방법

3.1 광학계의 구성

본 연구의 실험을 위하여 사용된 광학계의 구성을 Fig. 9에 나타 냈다. 사용된 대물렌즈의 NA값은 0.9이고, 백색광의 평균파장을 550 nm로 보면, 식(1)에 따라 사용된 대물렌즈의 근사적인 초점심도는 다음과 같다.

$$\text{초점심도} = 0.5 \frac{\lambda}{(NA)^2} \approx 0.34 \mu\text{m}$$

대부분의 고배율 렌즈와 마찬가지로 마이크로이하의 초점 심도를 가지고 있음을 알 수 있다.

실험장치는 광학테이블 위에 Fig. 9와 같은 광학계를 설치하고 웨이퍼를 올려놓기 위한 스테이지(Stage) 및 데이터를 처리하기 위한 컴퓨터로 구성되어 있다. 이것을 Fig. 10에 나타냈다. 스테이지는 1 μm의 분해능을 갖는 마이크로미터(Micrometer)와 마이크로이하의 정밀 이송을 위한 압전구동기(PZT)에 의하여 이동된다.

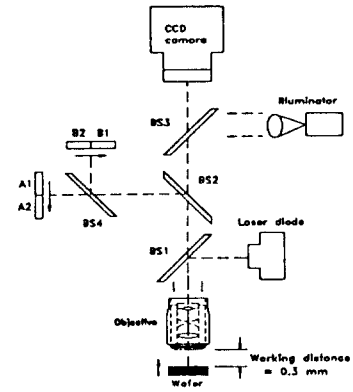


Fig.9 Configuration of optical systems

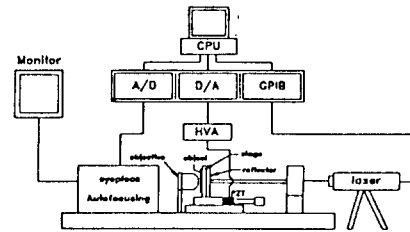


Fig.10 Experimental setup

3.2 전기회로의 구성

전기회로는 2분할 포토다이오드에서 만들어진 수 μA의 미약한 전류신호를 전압신호로 바꾸어 주기 위한 전류-전압 변환회로와 전압신호의 가감산을 위한 회로로 구성된다. 전기회로의 최종적인 출력신호는 각각의 포토다이오드에서 만들어지는 합신호(A1+A2, B1+B2)와 차신호(A1-A2, B1-B2)이다. 외부의 전기적인 노이즈를 고려하여 전기회로는 도체상자 내부에 고정시켰다. Fig. 11는 사용된 전기회로를 나타 낸다.

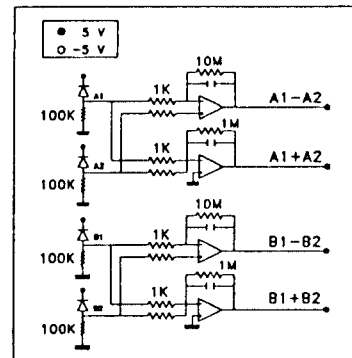


Fig.11 Electrical circuits

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 12은 웨이퍼를 이동시키면서 자동초점장치로부터 얻어진 전압신호와 검출신호의 예를 보여주고 있다. 각각의 2분할 포토다이오드에서 만들어지는 차신호 D1, D2의 모양이 앞서 이야기 했던 대로 서로 대칭적으로 나타남을 볼 수 있다 (Fig. 12(a)). 이 때 차신호의 범위가 서로 다른 이유는 2개의 포토다이오드 앞에 설치된 광분할기의 광분할비가 50:50이 아니기 때문에 나타나는 현상이다. 최종적인 차신호(D)는 단순히 얻어진 두 개의 차신호 D1과 D2를 뺀 결과이다. 또한 각각의 차신호의 범위가 비대칭적으로 나타나는 것은 레이저다이오드의 초점위치와 모니터 영상의 초점위치가 일치되지 않았기 때문이다. Fig. 12(b)는 각각의 포토다이오드에서 만들어지는 합신호 S1, S2를 나타낸다. 초점위치의 좌우측에서 가장 큰 값을 나타내고 있다. 각각의 폭대값이 초점위치를 중심으로 좌우측에 나타나는 것은 포토다이오드의 위치가 레이저다이오드의 초점위치를 정점으로 좌우측에 배치되었음을 의미한다. Fig. 12(c)는 포토다이오드 B에서 얻어진 신호만으로 계산된 검출신호(R1)와 이 신호의 분해능을 보기위하여 영직 부근을 확대한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 대략 7nm의 분해능을 나타냈을 수 있다. 그러나 측정결과가 20 nm의 간격으로 얻어진 것이므로 현 상태에서의 측정분해능은 20 nm 정도로 고려할 수 있다.

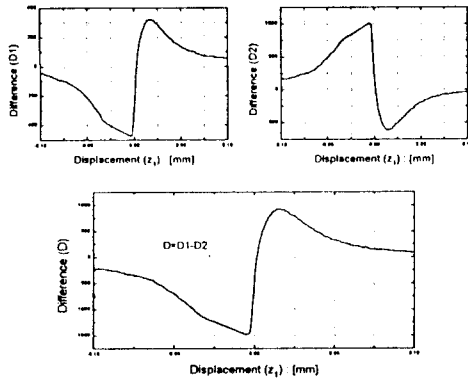


Fig.12(a) Difference signal

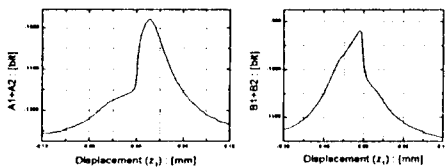


Fig.12(b) Summation signal

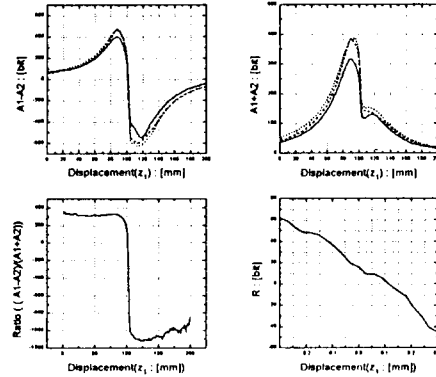


Fig.12(c) Resolution of only one photodiode

5. 결론

본 연구에서는 마이크로이하의 초정밀도를 갖는 일반적인 광학시스템에 사용할 수 있는 자동초점방법을 제안하였다. 실험을 하기에 앞서, 시뮬레이션을 통하여 제안된 자동초점장치의 광학계에 대한 성능을 예측하였고, 예상되는 문제점에 대한 해결방안을 제시하였다. 그 결과로서 20 nm 이하의 분해능을 갖는 광학식 자동초점장치를 구성하였다. 이러한 장치는 진술한 바와 같이 웨이퍼 상의 결함을 검출하는데 적용이 가능하므로 반도체 산업에 있어서 생산성을 향상시킬 수 있다.

[참고 문헌]

- 1) 황 명원, "자동초점기능을 갖는 비접촉 측정용 현미 경프로브의 개발", 한국과학기술원 석사학위논문, (1994).
- 2) Kanji Mashimo, "Optical & Noncontact Measuring Instrument for 3-D Shape," 精密工學會誌, 59/7/1993.
- 3) Marc Rioux, "Laser ranger finder based on synchronized scanners," Appl. Opt., 23, 21, (1984), 3837.
- 4) Tsuguo Kohno, Norimitsu Ozawa, Kozo Miyamoto, and Tohru Musha, "High precision optical surface sensor," Appl. Opt., 27, 1, (1988), 103.
- 5) Max Born & Emil Wolf, "Principles of optics", six edition, pp.418-445
- 6) 박기수, 남병호, 권진희, 김도훈, 김윤태, 박홍욱, "Galvanometer를 이용한 광학식 자동초점조정 시스템", 한국물리학회지, Vol. 6, No. 1, (1993) pp.1-6