

집속된 레이저빔을 이용한 미소변화의 실시간 관찰에 관한 연구

장희성* 이혁
서울대학교 전기공학과

A study on the Real time Observation of
Microscopic Change with Focused Laser Beam

Heui sung Jang Hyuk Lee
Dep. of Electrical Eng. Seoul National Univ.

ABSTRACT

With a focused laser beam, we make a microscopic change on a thin film, and organize the overall system that can observe the change with a microscope.

This system utilizes the energy of a laser beam which is focused by a simple lens system. That is a laser beam which has its waist at working distance of a lens. The microscopic change induced by the energy of laser beam focused through a lens can be observed in real time.

The experiment with this system shows that the 10mW He-Ne 632.8nm laser can change the black vinyl instantaneously.

1. 서론

공정기술은 하루가 다르게 발전되었다. 이 기술의 진보는 선풍의 미세화로 가늠될 수 있는데, 이는 이제 거의 물리적 한계에 도달할 정도로 발전하였다. 또한 그뿐만 아니라 이 기술은 여러 방면에서 많이 응용되고 있다. 특히 마이크로 구조물과 액추에이터가 그 대표적 예로서 리가처리방식 (LIGA Process) 이나 스테레오 리소그래피 (Stereo Lithography) 등의 방법으로 제작되고 있다. 이러한 응용들은 소형로봇의 상용화를 앞당기는데 기여하였다. [1] [2] [3]

이런 공정기술도 좀더 다른 작업에 응용하거나 좀더 미세한 작업을 하는데에는 한계가 있다. 공정기술중에서 꽃이라고 볼 수 있는 포토리소그래피 (Photo Lithography) 는 단 한번의 노출을 통해 이미지를 얻기 때문에 그 미세한 변화를 관찰할 수 없다. 단지 노출 후에 현미경이나 알파스텝 (α-step) 등을 이용해 관찰할 수 있을

뿐이다. 그러나 이는 실시간 관찰이 아니기 때문에 포토리소그래피공정과정에서 미세한 변화과정을 지켜볼 수 없다.

본 논문에서는 포토리소그래피공정의 단점을 현미경으로써 해결하려 했다. 집속된 레이저 빔을 이용하여 박막에 작은 변화를 일으키고 이를 현미경으로 관찰할 수 있는 통합시스템을 개발하였다. 렌즈를 사용하여 가장 작은 크기의 레이저 빔을 만들면 이 작은 크기의 빔은 원래의 빔과 같은 에너지를 가지므로 훨씬 강한 세기를 갖게 된다. 이 빔으로 미소변화를 일으키면서 현미경의 실시간 관찰 시스템을 이용해 관찰한다.

2. Gaussian Beam [5] [6]

Plane wave는 Maxwell's equation의 해로 널리 알려져 있고, 또한 많이 쓰이기도 하지만, 경우에 따라서는 이 형태가 Maxwell's equation을 해석하는데 적합하지 못한 경우가 있다. 레이저 빔은 진행형태나 빔 Profile의 해석에 가우시안 빔 (Gaussian Beam)을 쓰면 훨씬 용이하게 해석할 수 있다.

이를 Maxwell's equation에서 유도하면 식(1)을 얻을 수 있다.

$$\nabla^2 \psi - 2ik \frac{\partial \psi}{\partial z} - k^2 r^2 \psi = 0 \quad (1)$$

$k_2 = 0$ 인 Homogeneous medium의 경우에서

식(1)의 해를 구하면

$$\psi = \exp\left(-i \ln\left(1 + \frac{z}{q_0}\right) + \frac{k}{2q(z)} r^2\right) \quad (2)$$

$$q(z) = z + q_0 \quad (3)$$

$$q_0 = \frac{2\pi n}{\lambda Q(0)} = i \frac{\pi w_0^2 n}{\lambda}$$

$$\therefore E = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left(-i\left[kz - \eta(z) - r^2\left(\frac{1}{w^2(z)} + i \frac{k}{2R(z)}\right)\right]\right) \quad (4)$$

$$w^2(z) = w_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2 n} \right)^2 \right]$$

단 $R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2 n}{\lambda z} \right)^2 \right]$

$$\eta(z) = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2 n} \right)$$

가 되는데 이 식(4)는 Plane Wave와 마찬가지로 Maxwell's equation의 해이지만 Plane Wave와는 많은 차이를 가진다. 이 빔의 Profile은 z축을 중심으로 가운데의 Intensity가 세다. 또한 이 빔은 가우시안 함수의 꼴로 감소하므로 가우시안 빔 (Gaussian Beam)이라 한다. 또한 빔의 세기가 빔단면의 중심보다 e^{-1} 만큼 감소할 때까지를 빔 다이아미터 (Beam diameter) 라 한다.

3. Transformation of the Gaussian Beam

가우시안 빔이 여러 물질속으로 진행할때 빔의 Profile은 그 물질에 따라 변하게 된다. 이를 구하기 위해서는 $k_2 \neq 0$ 인 Inhomogeneous medium에서의 해를 구해야 한다.

Inhomogeneous medium인 경우에는 다음과 같은 해를 얻을 수 있다.

$$\psi \propto \exp \frac{-ikr^2}{2q(z)} \quad (5)$$

$$q(z) = \frac{\cos(\sqrt{\frac{k_2}{k} z})q_0 + \sqrt{\frac{k}{k_2}} \sin(\sqrt{\frac{k}{k_2}} z)}{-\sin(\sqrt{\frac{k_2}{k} z})\sqrt{\frac{k_2}{k}}q_0 + \cos(\sqrt{\frac{k_2}{k} z})} \quad (6)$$

여기서 한가지 살펴 보아야 할 것이 있다. 식(6)와 식(3)은 homogeneous medium과 Inhomogeneous medium에서 빔의 $q(z)$ 를 나타낸다. 두 함수는 모두 복소수로 표현되는데 이를 실수부와 허수부로 나눌 수 있다.

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi n w^2(z)} \quad (7)$$

실수부 $\frac{1}{R(z)}$ 은 빔의 phase front를 나타내고 허수부 $i \frac{\lambda}{\pi n w^2(z)}$ 는 빔의 Intensity Profile을 나타낸다.

여기서 식(6)는 물질의 k_2 변화에 따른 해의 변화를 보여준다. 이를 간단히 아래와 같이 표현하면

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D} \quad (8)$$

$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$: ray matrix

또한 두가지 이상의 물질이 직렬로 배열되어 있는 경우에는 ray matrix의 곱으로 표현할 수 있다.

$$\begin{vmatrix} A_T & B_T \\ C_T & D_T \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{vmatrix} \quad (9)$$

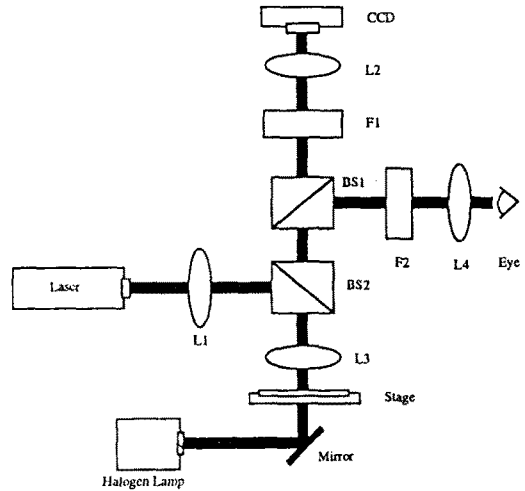


fig. 1. 레이저 조사용 현미경 전체구조

4. 레이저 조사용 현미경 내부 구조

fig. 2.은 레이저 조사용 현미경의 전체구조이다. 이는 크게 레이저 집광부, 조명부, 관측부 등 세부분으로 나눌 수 있다.

이중에서 레이저 집광부는 레이저에서 나온 빔을 피사체에 집속하는 역할을 한다. fig. 1.에서와 같이 레이저 발생기에서 나온 빔의 Profile은 가우시안 함수의 꼴을 띠는 가우시안 빔(Gaussian Beam)이다. 이 빔은 두개의 렌즈를 거쳐 현미경의 working distance에서 빔 크기가 가장 작은 waist를 형성한다. 현미경의 관측부에서는 working distance에 물체를 놓아야 관찰이 가능하고, 가장 강한 에너지를 피사체에 가하기 위해서는 레이저 빔의 waist에 물체를 둘때인데 working distance에서 waist를 가지므로 위의 두가지를 동시에 만족할 수 있다.

조명부에서는 koehlen 조명법을 채용했다. 이 방법으로 물체에 필요한 최소한의 광속을 균일하게 비추어 줄 수 있고 동시에 밝기와 촛점심도와 비추는 범위를 독립적으로 조절할 수 있다.

관측부는 빔을 두개로 나누어 사진건판과 눈을 이용해 관측할 수 있도록 한 부분이다. 또한 레이저의 강한 에너지를 감쇄시키기 위해서 레이저 파장을 걸러 낼 수 있는 필터를 설치했다.

5. 집광렌즈의 focal length와

위치선정

fig. 2.에서와 같이 설치했을 때 레이저 빔은 발생기에서 물체까지의 ray matrix를 아래 행렬의 곱들로써 나타낼 수 있다.

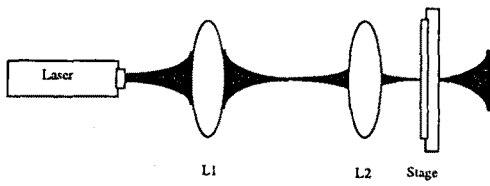


fig. 2. 레이저 집광부

$$\begin{pmatrix} A_T & B_T \\ C_T & D_T \end{pmatrix} \quad (10)$$

한편 레이저 빔은

$$E(x, y, z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left\{-i[kz - \eta(z)] - i \frac{kr^2}{q(z)}\right\}$$

$$\eta(z) = \tan^{-1}\left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2 n}\right) \quad (11)$$

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi n w^2(z)}$$

로 나타낼 수 있다.

여기서 ray matrix $\begin{pmatrix} A_T & B_T \\ C_T & D_T \end{pmatrix}$ 인 물질을 통과하면

$$q'(z) = \frac{A_T q + B_T}{C_T q + D_T} \text{가 된다.}$$

고로 계산하면

$$\frac{1}{q'(z)} = \frac{1}{A_T^2 q(z) + B_T^2} [B_T D_T + A_T C_T q^2(z) - i(A_T D_T - B_T C_T)q(z)] \quad (12)$$

그런데 여기서 beam waist가 working distance 에서 형성되기 위해서는

$$B_T D_T + A_T C_T q^2(z) = 0 \text{가 되어 한다.}$$

그리고 새로운 waist의 size는

$$w_0' = \left(\frac{\lambda}{\pi n w_0}\right) \sqrt{\frac{A_T^2 q^2 + B_T^2}{A_T D_T - B_T C_T}} \text{이 된다.}$$

6. 실험과정 및 결과

fig 2와 같이 시스템을 구성하고 L1을 옮기면서 현미경의 working distance에서 beam waist가 되는 위치를 찾았다. 이 과정에서는 alien이 상당히 중요한 요소가 되므로 L1을 움직이면서도 흐트러지지 않는 System을 구성했다. 적당한 focal length와 위치를 찾은 후 L1을 고정하고 시료를 stage에 올려놓은 후 레이저 빔을 조사하였다. 그 결과 아래의 사진을 얻을 수 있었다. 아래의 사진에서는 레이저가 지나간 흔적을 볼 수 있는데 이는 레이저 빔을 조사하는 중에 시료를 올려 놓은 stage를 움직

이므로 나타난 흔적이다. 이는 빔에 따라 시료의 변형되는 모습을 실시간 관찰을 할 수 있음을 나타내는 것이다.

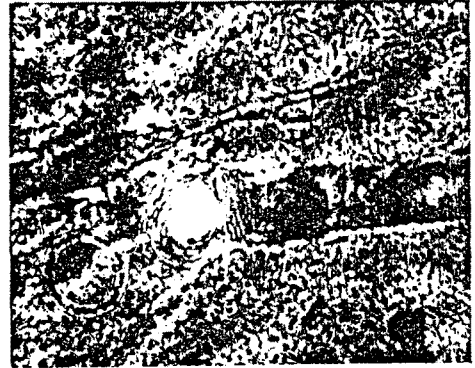


사진 레이저 빔으로 변형된 시료 배율:2000배

7. 결론

지금까지 레이저 빔을 이용한 미소변화의 실시간 관찰의 방법을 소개하였다. 레이저 빔의 다이아미터를 줄임으로 Intensity를 세게 할 수 있었으며 이것으로 시료들을 변형시킬 수 있었다. 또한 그와 동시에 그 변형되는 과정을 실시간으로 관찰할 수 있음을 보였다. 이 통합시스템은 기존의 포토리소그라피공정이나 Excimer Laser수술등의 개선에 응용될 수 있을 것이라 보이나 실제로 운용되려면 여러가지를 더 check해 보아야 할 필요성들이 있다.

참고 문헌

- [1]. Thompson 外 "materials for microlithography", P 11-38.
- [2]. W. Menz 外 "The LIGA Technique", IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop P 69-73 9/1991
- [3]. Koji Ikuta, "Real Three Dimensional Micro Fabrication using stereo Lithgraphy and Metal Moding " IEEE Micro Electro Mechanical Systems Work shop P 43-47 2/1993
- [4]. Maksymilian Pluta, "Advanced Light Microscopy", Vol 1. P 129-286
- [5]. Amnon Yariv, "Quantum Electronics", P 106-135
- [6]. Amnon Yariv, "Optical Waves in Crystals" P22-53