

이 논문은 1990년도 교육부 지원 한국학술진흥재단의 지방대육성 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

## 레이저 산란광을 이용한 미소표면 결함의 측정평가법에 관한 연구

姜 永 準\*

### A Study on the Measurement of Fine Scratches by Scattering of Laser Light

Young-June Kang \*

#### ABSTRACT

This paper is studied about the method to measure the fine scratches on the mirror surfaces, such as the silicon wafer and magnetic memory disk by the optical measuring method.

The theoretical background of this analysis is based upon the light scattering theory developed by Beckmann.

In this analysis, the roughness in fine scratches is not considered because the average roughness is very small compared with the size of fine scratches.

Empasis is on quantitaive method of fine scratches by non-contact method.

Experiments are followed by the image processing system attached to the CCD Camera. As a results, I propose the new method to measure the size of the fine scratches from the parameters obtained by the computer simulation and experiments.

**Key Words** : Fine Scratch(미소결함), Depth and width of scratch(결함의 깊이와 넓이), Scattering intensity distribution(산란강도분포), Scattering angle(산란각), Computer simulation(컴퓨터시뮬레이션), Parameters(특정인자), Pattern matching(패턴매칭)

### 1. 서 론

최근 정밀가공 기술의 진보에 따라 알루미늄 합금이나 구리등의 연질금속을 이용한 고출력 레이저용 mirror, 전자계산기용 자기 disk기판, printer용 polygon mirror 등의 opto-electornics 부품이 경면 절삭가공에 의해, 또 LSI용 silicon wafer가공은 연마

가공에 의해 nm Rax의 표면조도로 마무리 가공 되고 있다.

이와같은 가공표면의 측정평가법 중에는 종래부터 이용되고 있는 접촉식 표면조도계를 이용하는 것이 일반적인 방법이었다. 그러나 이 방법은 접촉식이기 때문에 측정력에 의해 표면을 변형시키고, 연질금속이나 plastics 표면에 결함을 내고, 측정속도가 느리기 때문

\* 전북대학교 기계설계학과(정회원)

에 in-process 측정에 부적당하다<sup>5)</sup>. 그래서 비접촉에 의한 측정법 중에도 광학적인 측정법<sup>6,7)</sup>이 가장 많이 이용되고 있다. 이의 방법들에는 공간섭법<sup>12)</sup>, 광촉점법<sup>13)</sup>, speckle pattern법<sup>3,4,5)</sup>, 광절단법<sup>14)</sup>, 광회절법<sup>15)</sup> 등이 있다.

그러나 이 방법들은 정량적 측정과 in-process 측정을 하기 위해서는 여러가지 문제점들이 많다. 광측정법 중에서 특히 표면의 미소결함 측정법의 경우를 생각하면, 정성적측정에 관한 연구는 현재 2-3건의 보고<sup>12)</sup>가 있지만 정량적인 측정법에 관한 연구보고는 거의 없는 실정이다.

그러므로 본 연구는 고효율 레이저 mirror, 자기 disk기판, silicon wafer와 같은 경면에 존재하는 미소 표면 결함을 정량적이며, 고속측정이 가능한 방법인 새로운 측정법을 제안하고자 한다.

## 2. 이론해석

전자파 산란이론인 Beckmann의 Kirchhoff근사법은 입사파가 평면파이고 파장에 비하여 표면의 요철의 곡률 반경이 상당히 크고 관찰점이 Fraunhofer 영역인 경우, 거친 물체표면으로 터의 산란광의 복소진폭의 식을 간단히 하기 위하여 정규화하면, 아래와 같은 식<sup>16)</sup>으로 된다.

$$\rho(\theta_2) = \int_{-L/2}^{L/2} \exp \{ i [ V_x x + V_z \zeta(x) ] \} dx \quad \dots \dots \dots (1)$$

여기서  $\zeta(x)$ 은 표면의 요철의 형상을 나타내는 함수이고,  $\theta_1$ 는 입사각,  $\theta_2$ 는 산란각이다. 또

$$V_x = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin\theta_1 - \sin\theta_2)$$

$$V_z = \frac{2\pi}{\lambda} (\cos\theta_1 + \cos\theta_2)$$

은 표면요철의 형상을 나타내는 표면함수이다. 일반적으로 표면결함이 미소인 경우에는 3각형 형태의 결함으로 근사시킬 수 있다는 것이 전 연구보고<sup>13,14)</sup>의 시뮬레이션 해석으로부터 알았으므로 3각형 형태의 표면

결함에 대해서만 이론을 전개한다. 즉, 결함의 크기를 넓이 B와 깊이 H로 나타낸다. 3각형 형태의 결함에 대하여 산란광의 복소진폭을 식(1)을 이용하여 연구한다. 먼저 강도는  $I(\theta_2) = |\rho(\theta_2)|^2$  이므로 3각형 결함에 대하여 산란광 강도를 구하면

$$\begin{aligned} I(\theta_2) &= |\rho(\theta_2)|^2 \\ &= \left[ A + \int_{-B/2}^0 \cos \left\{ \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) \left( S_x - \frac{2HC_x}{B} \right) CH \right\} \right. \\ &\quad \left. dx + \int_0^{B/2} \cos \left\{ \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) \left( S_x + \frac{2HC_x}{B} \right) CH \right\} dx \right]^2 \\ &+ \left[ \int_{-B/2}^0 \sin \left\{ \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) \left( S_x - \frac{2HC_x}{B} \right) CH \right\} dx + \int_0^{B/2} \right. \\ &\quad \left. \sin \left\{ \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) \left( S_x + \frac{2HC_x}{B} \right) CH \right\} dx \right]^2 \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (2)$$

여기서  $A = (\sin(\pi Ls/\lambda) - \sin(\pi BS/\lambda))$ ,  $S = \sin\theta_1 - \sin\theta_2$ ,  $C = \cos\theta_1 + \cos\theta_2$ 이고, L은 입사각의 Spot의 크기, B는 결함의 폭, H는 결함의 깊이이다.

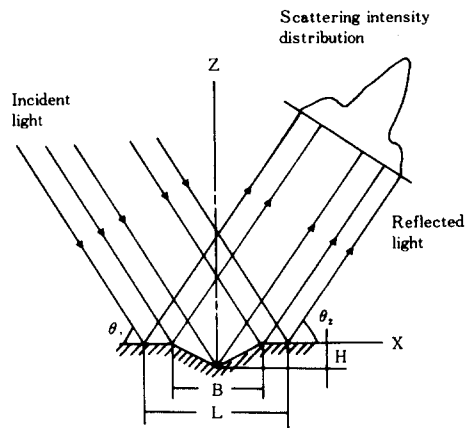


Fig. 1 General scattering geometry of triangle scratch.

그림 1은 3각형 형태의 미소결함에 대한 산란광이론의 기본 모델이며, 그림과 같이 결함의 정보를 포함하고 있는 산란광이 Fraunhofer 영역에서 상을 형성한다. 컴퓨터 시뮬레이션은 식(2)를 이용하여 했다. 여기서 표면조도는 아주적어서 (Rax 10nm) 이하 실험결과에 거의 영향을 주지 않기 때문에 고려하지 않았다.

### 3. 실험방법

#### 3.1 시료 제작

NC Milling M/C의 Bed에 3차원 동력계를 올려놓고, 시료를 그 위에 고정한다. 한편 주축에 다이아몬드 바이트를 고정하여 X축 방향이므로 이동하면서 결함을 제작한다. 제작된 시료 표면을 표면조도계로 결함의 단면형상을 측정했다. 또한 Block Gauge 상에 존재하는 자연적인 표면결함을 시료로써 이용했다.

#### 3.2 측정 장치

그림 2는 산란광강도와 산란각을 얻기 위한 광학계 개략도이다. 직선편광으로 Beam 직경이 2mm의 He-Ne Laser광을 Autocollimator에 의해 20mm의 Beam 직경으로 확대시켜, 공간적 Coherence을 떨어뜨리고, 그후 Aperture와 수광렌즈에 의해 Spot Size를 변화시키면서 시료에 대하여 입사각 10로 조사시켰다. 이때 시료로부터 반사되어온 산란광은 Fourier 변환렌즈를 통해 렌즈 초점면에 상을 맺는다. 이상면에 놓여진 CCD Camera에 의해 검출되어 컴퓨터에 보내져 처리된다.

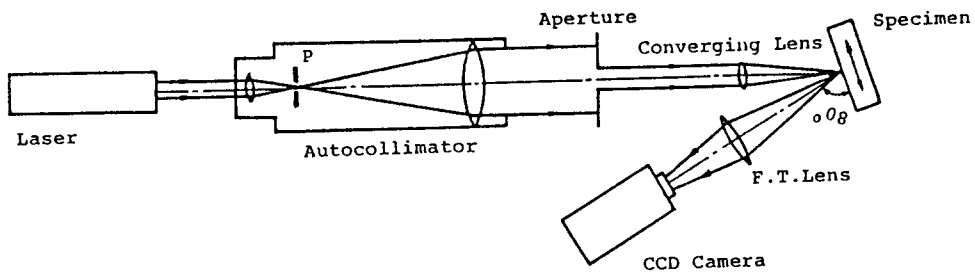


Fig. 2 Experimental arrangement for measuring size of scratch.

#### 3.3 측정 시스템

그림 3은 본 측정 시스템의 구성을 나타낸 것이며, Fourier 변환렌즈의 초점면에 형성된 결함의 산란광의 상이 CCD Camera에 의해 검출되어 그의 산란광 강도 분포는 Image Memory (256×256×8 bit)에 일시적으로 기억된다. 일시 기억된 강도 분포는 Personal Computer에 의해 처리되어 결함의 깊이와 넓이에 관계되는 특징적인 인자가 구해진다.

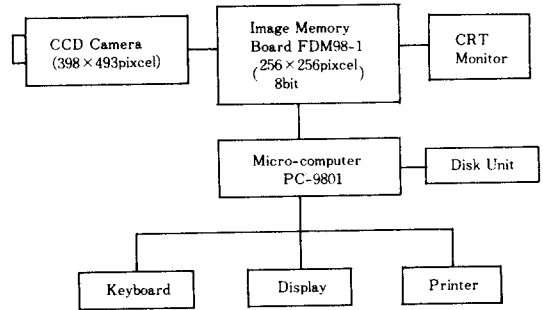


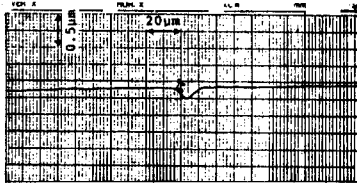
Fig. 3 Block diagram of a measuring and data processing system.

### 4. 컴퓨터 시뮬레이션과 실험결과 비교

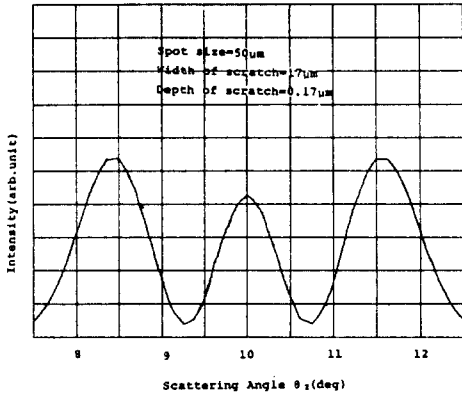
그림 4는 자기 Disk상에 제작한 시료이고, 그림 5는 Block Gauge상의 시료이다. 각각의 시료에 대하여 본 측정장치에 의해서 측정된 산란광 강도 분포와 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 것이다. 그림 4의 (a)는 표면조도계로 측정한 Profile이며, 대략 결함의 깊이 0.17μm.

넓이 17μm인 시료이다. 그림 4의 (b)는 컴퓨터 시뮬레이션이고, (c)는 본 측정장치로 측정한 실험결과이다. 컴퓨터 시뮬레이션과 측정결과를 비교해보면, 산란각 10에서의 강도(0차 산란광 강도)와 산란각 8.5와 11.6는 산란광 강도(1차 산란광 강도)가 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

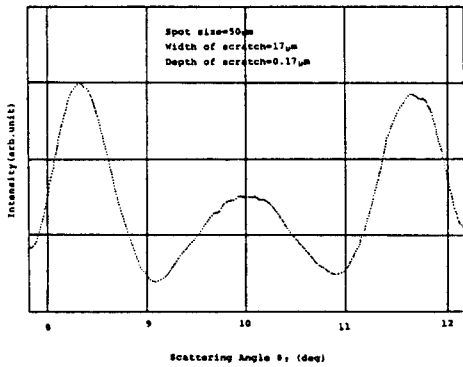
그림 5에서도 컴퓨터 시뮬레이션과 실험결과가 0차 및 1차 산란광 강도가 대체로 잘 일치하고 있으나, Noise와 같은 것이 들어가 있는 것은 결함 주위에 있



(a) Profile measured by a diamond stylus profilometer.

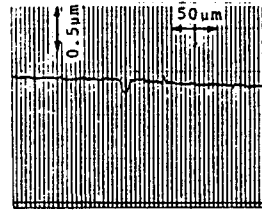


(b) Scattering intensity distribution from profile in the case incident by Gaussian beam.

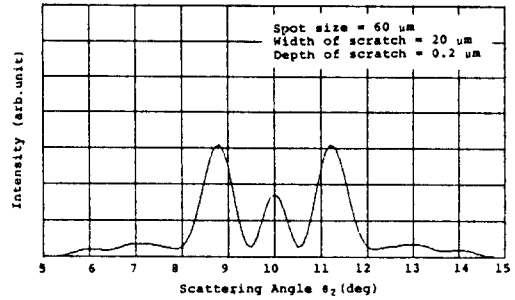


(c) Experimental results of scattering intensity distribution from profile.

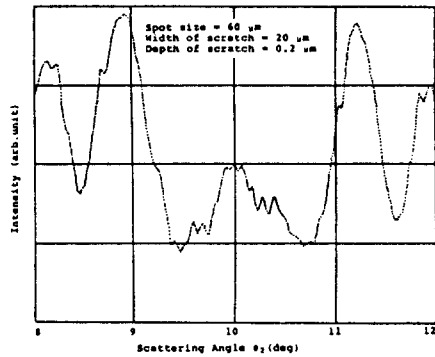
Fig. 4 Comparison of scattering intensity distribution.



(a) Profile measured by a diamond stylus profilometer.



(b) Scattering intensity distribution from profile in the case incident by Gaussian beam.



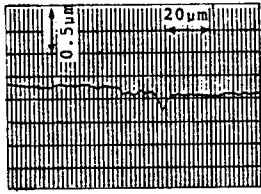
(c) Experimental results of scattering intensity distribution from profile.

Fig. 5 Comparison of scattering intensity distributions.

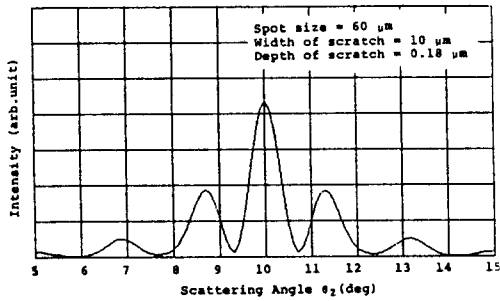
는 요철부분 때문이다. 그림 6은 결함의 넓이  $10\mu\text{m}$ , 깊이  $0.18\mu\text{m}$ 의 사료에 대한 것이며, 실험결과에 있어서 산란분포가 좌우 비대칭인 것은 그림 (a)에서 보이는 바와같이 Profile이 비대칭이기 때문이다. 그림 7은 결함이 큰 사료에 대한 것이며 지금까지의 강도 분포가 많이 다르다. 즉 0차 산란강도는 아주적고, 1차 산란광

강도는 아주 크게 나타나서 결함의 크기를 쉽게 예측할 수 있다.

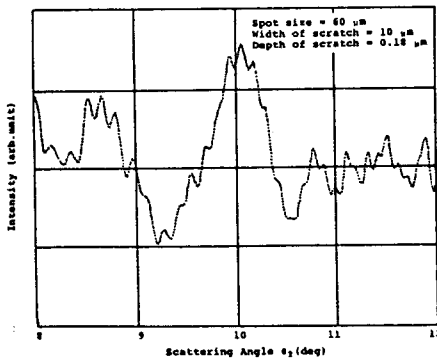
그러므로 Beckmann의 Kirchhoff 근사법에 의한 해석법은 미소표면 결함의 크리를 해석하는데 유효한 방법이다.



(a) Profile measured by a diamond stylus profilometer.



(b) Scattering intensity distribution from profile in the case incident by Gaussian beam.



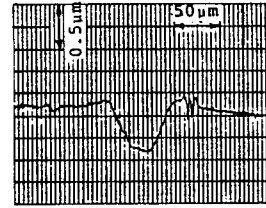
(c) Experimental results of scattering intensity distribution from profile.

Fig. 6 Comparison of scattering intensity distributions.

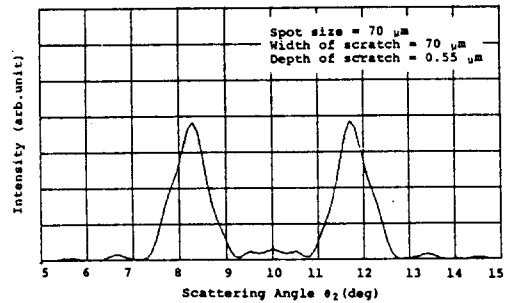
### 5. 표면결함의 Matching 실험

식(1)은 역변환이 불가능하기 때문에<sup>15)</sup> 특징적인 인자를 추출해서 이것을 parameter로 하는 Matching법의 실험을 한다. 그림 8은 In-process 측정을 위한 특징인자를 나타낸 것이다. 여러가지 형태의 강도 분포로부터 특징인자를 추출하여 평가기준을 정한다.

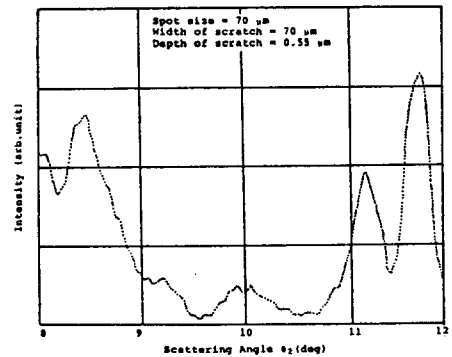
즉 그림 9에서 특징인자 A는 0차 산란광강도 $I(0)$ 를



(a) Profile measured by a diamond stylus profilometer.



(b) Scattering intensity distribution from profile in the case incident by Gaussian beam.



(c) Experimental results of scattering intensity distribution from profile.

Fig. 7 Comparison of scattering intensity distributions.

평균치 강도  $I(m)$ 로 나눈 값이며, B는 0차 이외의 최대강도 $I(\theta_p)$ 를 0차 산란광강도 $I(0)$ 로 나눈 값이다. 또 C는 1차 산란광강도 $I(\theta_1)$ 의 산란각의 간격이며, D는 0차 산란광강도 $I(0)$ 를 0차 산란광의 최소강도 $I(S)$ 로 나눈 값을 평균강도 $I(m)$ 로 나눈 값이다. 이와 같은 Factor 들은 컴퓨터 시뮬레이션으로부터 산출하였다.

실험치 A, B, C, D의 각각에 대하여 오차범위를 50% 허용하여, 이것들의 값과 미리 컴퓨터에 그림 10과 같

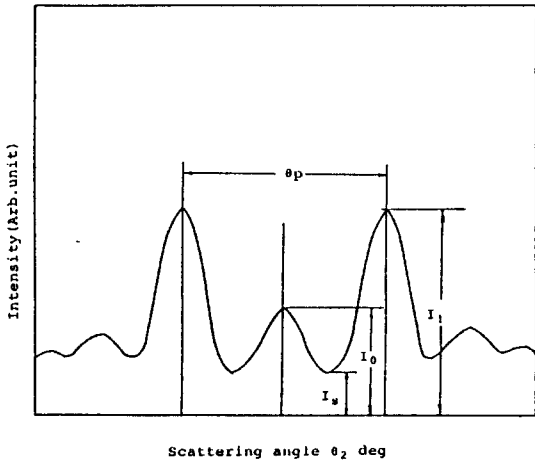


Fig. 8 Typical factors related to size scratch from scattering intensity distribution.

H(μm) B(μm)	0.1	0.17	0.18	0.2	0.55
10			A <sub>s</sub> = 3.4 B <sub>s</sub> = 0.5 C <sub>s</sub> = 2.5 D <sub>s</sub> = 3		
17		A <sub>s</sub> = 1.45 B <sub>s</sub> = 1.4 C <sub>s</sub> = 3.2 D <sub>s</sub> = 1.3			
20			A <sub>s</sub> = 1.7 B <sub>s</sub> = 1.98 C <sub>s</sub> = 2.4 D <sub>s</sub> = 1.3		
70					A <sub>s</sub> = 0.67 B <sub>s</sub> = 8.9 C <sub>s</sub> = 3.5 D <sub>s</sub> = 0.67

Fig. 10 Theoretical Feature Map.

은 행렬 Map 형태로 기억시킨 시뮬레이션 값과 비교하면, 실험치의 허용오차 범위내의 결함의 깊이와 넓이가 얻어진다. 만약 구하는 결함의 크기가 나오지 않을 경우는 평가기준 Parameter 가운데 어떤 하나의 Parameter가 부적당하다고 판단하며, 그의 Parameter를 제거하고 똑 같은 처리를 반복한다. 구하는 결함의 크기가 반드시 하나가 아닐 경우는 각각 실험치 Parameter와 이론치 Parameter의 상대오차를 구하여 오차의 합계가 최소의 것을 선택하면 구하는 Scratch의 크기가 얻어진다. 그림 10은 본 실험의 시료에 대한 이론치의 Parameter를 컴퓨터 Map 상태로 기억시킨 것을 표시한 것이다. 본 연구에서는 시료가 아직 부족하

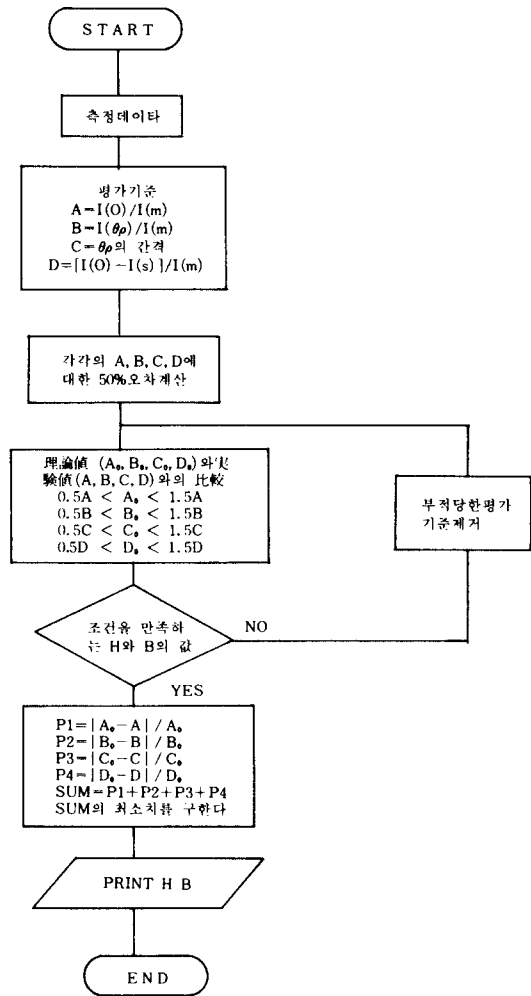


Fig. 9 Flow chart for measuring scratch size by comparing between features extracted from scattering intensity distribution and from experiments.

거나 4종류의 시료에 대해서는 이론과 실험이 잘 일치하는 것을 알았다.

## 6. 결론

자기 디스크상에 제작한 Scratch와 Block Gauge상에 존재하는 자연적인 Scratch에 대하여 Beckmann의 전자과 산란이론을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션과 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Beckmann의 잔자파 산란이론은 미소표면 Scratch의 크기를 해석하는데 유효한 방법이다.
2. 0차 및 1차 산란광 강도와 1차 산란광의 산란각의 간격으로부터 특징인자 A, B, C, D를 구하고 이론해석으로 부터 얻어진 이들 특징인자와 Matching 실험에 의해 결합의 크기를 정량적으로 측정할 수 있는 방법을 제안했다.

### 참 고 문 헌

1. Takahiko INARI and Mitsuhiro KAMEI, "Surface Inspection of Wire Using Diffraction Pattern Produced by Laser", 計測自動制御學會論文集, Vol. 17, No. 2, pp. 237-242, 1981. 4.
2. N. AKIYAMA, Y. OSHIMA, M. KOIZUMI, M. AKIBA AND H. MAGATOMO, "Automatic Inspection of Foreign Particles on Patterned Sample by Means of Polarized Laser", 計測自動制御學會論文集, Vol. 13, No. 1, pp. 64-68, 1976. 2.
3. Junji Ohtsubo and Toshimitsu Asakura, "Statistical properties of laser speckle produced in the diffraction field", Applied Optics, Vol. 16, No. 6, pp. 1742-1753, 1977. 6.
4. Full, T. Asakura and Y. Shido, "Measurements of Surface Roughness Properties by means of Laser Speckle Techniques", Optics Communications, Vol. 16, No. 1, pp. 68-72, Jan. 1976.
5. D. Leger, E. Mathieu and J. C. Perrin, "Optical Surface Roughness Determination Using Speckle Correlation Technique", Applied Optics, Vol. 14, No. 4, pp. 872-877, April, 1975.
6. 塚田 忠夫, "光學的非接觸方式による高精度測定技術", 精密工學會誌, Vol. 53, No. 8, 1987.
7. 吉澤 徹, 光技術應用システム, 精機學會編輯, 昭堂, 昭和 58年 2月.
8. Grady S. White and J. F. Marchiando, "Scattering from a V-shaped groove in the resonance domain", Applied Optics, Vol. 22, No. 15/1, pp. 2308-2312, August, 1983.
9. Daniel Mayster, "Electro-magnetic Scattering from Perfectly Conducting Rough Surfaces in the Resonance Region", IEEE, Vol. AP-31, No. 6, pp. 885-895, 1983. 11.
10. Yasuhiro TAKAYA, Takashi MIYOSHI and katsumasa SAITO, "Measurement of Ultra-fine Random Surface Roughness Based on Fraunhofer Diffraction", 日本精密工學會誌, Vol. 53, No. 5, pp. 736-742, 1987.
11. Peter Beckmann and Andre Spizzino, The Scattering of Electro-magnetic Waves from Rough Surfaces, Pergamon Press, New York, 1963.
12. Tanner L.H. "A Comparison between Talysurf 10 and Optical Measurement of Roughness and Surface Slope", Wear, Vol. 57, pp. 81-91, 1979.
13. 三好隆志, 姜 永準, 齊藤勝政, "散亂理論を用いた微小傷の測定評価に関する研究(第1報)", 日本精密工學會誌, Vol. 6, pp. 1095-1100, June, 1988.
14. 姜 永準, 三好隆志, 齊藤勝政, "近似フラウンホッフ回折傷による微小傷の測定評価(第4報)", 日本精密工學會學術大會學術講演論文集, pp. 273-274, 1988.
15. Koichi SHIMIZU and Aikira ISHIMARU, A solution for Inverse Scattering problems by Fourier Transform Technique, 日本應用物理, 第52卷 第4號, 1983. pp. 354-360.