한국정밀공학회지 제 16 권 제 2 호 (1999 년 2 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16. No. 2. February 1999.

발광다이오드를 이용한 초정밀 변위 측정용 마이크로 엔코더 칩 제작

김근주*, 김윤구*

Fabrication of Optical Micro-Encoder Chips for Sub-Micron Displacement Measurements

Keunjoo Kim* and Yun Goo Kim*

ABSTRACT

The integrated chip of optical micro-encoder was fabricated and the feasibility as displacement measurement device was confirmed. The geometry of micro-encoder was designed to utilize the optical interference effect on the second order of diffracted beams. The hybrid-type micro-encoder consisted with light emitting diode, photodiode, polyimide wave-guide and micro-lens provides stable micro-encoding results for high speed displacements. The measurement shows the resolution of displacement of 1.00 +/- 0.02 μm for the grating with scale pitch of 2.0 μm.

Key Words : Micro-Encoder (초정밀변위측정기), Optical Interferometer (광학간섭계), Semiconductor Microlithography (반도체미세가공기술), RIE (건식식각장치), LED (발광다이오드), PD(수광다이오드), Waveguide (도파로), Grating (회절격자)

기호설명

$\vec{E}$ = electric field
$\vec{k}$ = wave vector
$\Delta\phi$ = phase shift
λ = wavelength
θ = diffraction angle
D = grating pitch

1. 서론

반도체공정이나 공장자동화의 초 정밀 제어 및 계측분야에서 변위, 속도, 가속도 및 압력 등 각종 지능형 집적센서(intelligent and integrated sensor)에 적용할 수 있는 마이크로 엔코더의 개발은 매우 관심있는 분야이다. 초고집적회로 (ULSI)의 가공에 필요한 미소거리제어, 기록밀도를 높이기 위한 트랙간 거리를 줄이는 고집적 광디스크 (DVD) 분야 및 정밀기계가공을 위한 자동선반의 초 정밀 변위 제어 메커니즘은 필수적이다.

이러한 고 분해능을 갖는 사물간의 거리를 측정하기 위한 광 센서에는 두 종류로 분류되는데, 레이저 파장에 의존하는 마이켈슨 간섭계 (Michelson interferometer) 와 회절 격자간의 스케일 피치 (scale pitch) 에 따라 변하는 엔코더(encoder) 가 있다.[1] 회절광 간섭계의 특징은 압력, 습도, 공기 조

* 광전자반도체㈜, 부설연구소

성 등 대기의존성이 없고, 적용온도에 따라 적절한 재료를 선정하여 측정 정밀도를 높일 수 있으며, 측정길이는 대략 1 m 이하의 물체에서 가능하다. 정밀변위측정이 가능한 엔코더의 크기를 소형화함으로써 압전소자, 소형 초음파모터, 미소 X-Y 스테이지 (stage), 소형 메니풀레이터 (manipulator) 및 고속장치등과 같은 미소 액츄에이터 (actuator)와 결합할 수 있는 많은 응용잠재력을 갖고 있다.[2]

엔코더의 소형화에 따른 광 소자 요소들을 Si 칩(chip) 위에 집적하고 있다. 광 요소들로는 광원인 레이저다이오드(LD)나 발광다이오드 (LED)가 있으며, 수광소자로는 포토다이오드(PD)가 있고, 광을 이송시키기 위한 도파로 (waveguide)와 스케일(scale)용 회절격자(grating)로 구성되어 있으며, 단일 칩으로 집적하기 위한 신호 처리용 집적회로(IC)가 첨가되어진다. 이러한 집적화된 변위센서는 노광 및 식각, 플라즈마 박막증착 및 결정 성장 등, 반도체공정기술의 향상과 더불어 급속한 발전을 거듭하고 있다.[3]

본 연구에서는 발광/수광 소자를 광전자반도체(Optel)의 850 nm AlGaAs LED와 Si p-i-n (p-Si/intrinsic-Si/n-Si) PD를 이용하여 하이브리드형 회절광 간섭 마이크로 엔코더를 설계 제작하려 한다. 도파로는 4 인치 크기의 c-Si 기판을 이용하여 리소그래피 공정을 도입하여 제작하고 증착한 실리콘 산화막 위에 고분자박막 (polyimide)를 스핀 코팅하며, LED와 PD는 부착시킨다. 제작된 엔코더는 2 μm 회절격자 피치 (grating pitch)을 사용하여 변위가 1.00 μm 주기로 측정할 수 있도록 회절격자의 선폭비를 0.5 로 하였다.

2. 변위측정 원리

광을 이용한 정밀측정분야에 있어서는 기본적으로 광의 간섭 및 회절현상을 응용하여 광학계를 구성하고 측정대상에 적합한 형태로 변형할 수 있으며, 특히 레이저 및 반도체레이저 다이오드의 개발로 더욱 초 소형화 되어지고 있다.[2]

전자기파로서의 광은 전파방향 (propagation direction)에 수직한 방향으로 각각 전계와 자계를 형성하면서 진행할 때에 두개의 파가 다음과 같은 전계 E_1과 E_2의 파동을 형성하여[4] 회절격자의 이동에 의한 도플러효과의 위상차로 인한 간섭을 일으킨다.

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{01}\cos(\vec{k}_1\cdot\vec{r}-\omega t+\phi_1) \tag{1}$$

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_{02}\cos(\vec{k}_2\cdot\vec{r}-\omega t+\phi_2) \tag{2}$$

식(1), (2) 에서 $\boldsymbol{k}$는 파수벡터, ϖ는 진동수, ϕ는 위상을 나타낸다. Fig. 1 에서 식 (1), (2) 에서와 같이 임의의 점 P에서 교차되는 전계의 표현은 중첩의 원리에 의해서 다음의 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \tag{3}$$

식 (3)으로 표현되어지는 전계는 광 센서에 의한 광신호로 측정하기 위해서 전계 벡터의 스칼라 곱을 하여 시간에 대한 평균을 취하여 임의의 점 P에서 교차하는 두개의 전계에 의한 광 세기 변화를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} I &= \varepsilon_0 c < E^2 >= \varepsilon_0 c < \vec{E}\cdot\vec{E} > \\ &= \varepsilon_0 c < (\vec{E}_1+\vec{E}_2)\cdot(\vec{E}_1+\vec{E}_2) > \\ &= \varepsilon_0 c < E_1^2 + E_2^2 + 2(\vec{E}_1\cdot\vec{E}_2) > \\ &= I_1 + I_2 + I_{12} \end{aligned} \tag{4}$$

식 (4)에서 ε_0는 진공의 유전율이고 c는 광속도이며, I_1은 식 (1)의 E_1이 갖는 광 세기를 나타낸 것이며, I_2는 식 (2)의 E_2가 갖는 광 세기를 나타낸 것이다. I_{12}는 E_1 과 E_2간의 간섭효과로 나타난 광세기의 변화로 다음과 같이 표현된다.

$$I_{12} = \varepsilon_0 c\vec{E}_{01}\cdot\vec{E}_{02}\cos(\Delta\phi) \tag{5}$$

$$\Delta\phi = (\vec{k}_1-\vec{k}_2)\cdot\vec{r}+(\phi_1-\phi_2) \tag{6}$$

식 (6)은 두개의 전계 $\boldsymbol{E}_1$과 $\boldsymbol{E}_2$의 위상차를 나타낸 것이다. 두 광원의 세기가 동일한 경우, 즉 $I_1=I_2=I_0$ (또는 $|\boldsymbol{E}_{01}|=|\boldsymbol{E}_{02}|=|\boldsymbol{E}_0|$)인 경우, 식 (4)의 광세기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I &= 2I_0(1+\cos(\Delta\phi)) \\ &= 4I_0\cos^2(\frac{\Delta\phi}{2}) \end{aligned} \tag{7}$$

식 (7)은 진행하는 두개의 전계가 공간상의 임의의 점 P 에서 만드는 세기의 변화를 나타낸 것으로 이는 두 전계가 갖는 위상차이의 변화에 의해 결정된다.

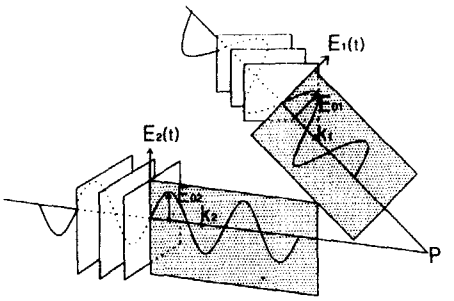

Fig. 1 The superposition principle of two diffracted light beams at a point, P

또한 두 광원이 동일한 파장을 갖는 경우 ($|k_1|=|k_2|$)에 대해서 광을 회절격자 (grating)에 입사시킴으로써 만들어진 회절광은 회절격자의 이동으로 인한 도플러효과 (Doppler effect)로 슬릿(slit) 간격 (scale pitch)의 위상변화가 $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ 만큼 생긴다. 도플러효과에 의한 위상변화는

$$\Delta\phi = \int \Delta\omega dt \tag{8}$$

과 같이 나타낼 수 있으며, $\Delta\varpi$는 다음과 같이 도플러효과에 의한 주파수 변화량으로 표현된다.

$$\Delta\omega = \frac{\omega}{c}(2v\sin\theta) \tag{9}$$

여기에서 ϖ는 광 주파수이며, $v = dx/dt$ 는 회절격자 스케일의 이동속도, θ는 입사광의 회절각 또는 입사각이고, c 는 광속도을 나타낸다. 회절 격자점에서의 입사광의 각도와 파장과의 관계식은 다음과 같은 브래그 (Bragg) 조건식으로 나타낼 수 있으며, 이동변위가 회절격자간격 D 만큼 변위가 발생된 경우이다.

$$2D\sin\theta = \lambda \tag{10}$$

식 (8-9)로부터 회절광의 빔 1, 2 의 중첩원리에 의해 도플러효과에 따른 위상변화는 다음과 같다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{D}\Delta x \tag{11}$$

즉 위상변화는 스케일의 이동변위 Δx 와 회절격자의 간격 D 로 제어된다.

3. 변위 측정용 회절광 하이브리드형 엔코더 제작

회절광의 간섭효과를 이용하여 하이브리드 (hybrid)형 엔코더를 Fig. 2 의 개략도에서와 같이 설계하였다. 실리콘 반도체 기판 위에 습식 식각 공정을 이용하여 Si 결정의 <100>면을 따라 V-groove 홈을 파고,[5] 광원으로는 발광파장이 850 nm 인 AlGaAs 발광다이오드을 이용하였다. 검출기로는 Si p-i-n 포토다이오드 (photodiode:PD)를 이용하였으며 광 도파로는 식각 후 고분자 (polymer)을 이용하였다.

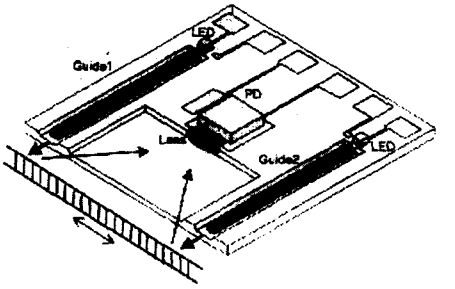

Fig. 2 The schematic of a hybrid-type micro-encoder.

Fig. 3 은 회절광 간섭을 이용한 hybrid 형 광 마이크로 엔코더 칩(chip) 설계공정을 나타내었다. 먼저 포토레지스트 (photoresist; P/R)를 코팅하여 Si 릿지 (ridge)을 형성하기 위해 노광 및 패턴 (pattern)을 형성한 다음, PH 농도 13 의 30% 의 강염기성 KOH 용액으로 노출된 Si 기판을 230 μm 깊이로 식각한다. 습식 식각은 비교적 에너지 밴드

갭이 작은 Si 반도체에 수용액의 에너지분포함수가 비교적 넓은 강염기의 산화/환원 (red-oxidation) 과정을 거치면서 정공 (hole)의 교환으로 인해 화학적 분자결합이 분해된다(Fig. 3-a). 식각 경사면은 각도가 54.7° 정도로 기울어지며 이는 원자밀도가 높은 <111>면을 나타내고 양호한 거울 반사면으로 이용될 수 있다.[5] 잔류 P/R 을 제거한 후 식각된 면에 다시 플라즈마 증착 (PECVD) 공정을 통해 전기적으로 절연하기 위한 SiO_2 산화막을 증착하고, 그 위에 다시 PD 나 LED 의 n-면 전극용 Al 금속패턴 (metal pattern)을 열 증착 방법으로 형성하였다(Fig. 3-b).

PMMA (polymethylmethacrylate)를 6 μm 정도의 두께로 코팅하여 렌즈 및 광 도파로를 형성하였다 (Fig. 3-c).[6] PD 나 LED 를 솔더 범퍼 (solder bumper)로 장착하고 와이어 본딩 (wire bonding) 하였으며(Fig. 3-d), 칩 (chip) 크기는 1cm x 1cm 이다.

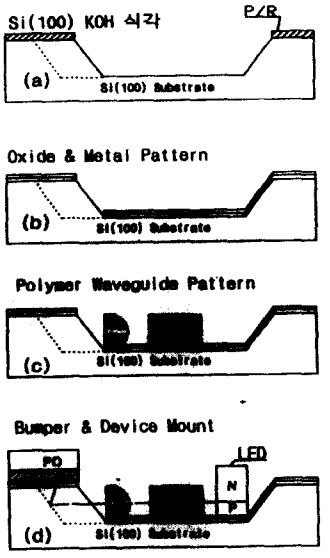

Fig. 3 Lithographic design processes of the hybrid-type micro-encoder

하이브리드 (Hybrid) 엔코더 광원용 측면발광 (edge emitting) LED 를 Fig. 4 와 같이 제작하였다. 광전자반도체 (Optel)의 AlGaAs LED (OPA 8512) 박막을 이용하여 $SiCl_4/N_2/Ar$ 가스분위기에서 RIE (reactive ion etching) 건식 식각을 한 후 (Fig. 4-a),[7] 다시 습식 식각을 통해 23 μm 정도로 식각함으로써 (Fig. 4-b) p-n 접합이 노출되고 발광출력은 1 mW 정도가 되도록 부하를 인가하였다.

AlGaAs DH (double heterostructure) 구조는 GaAs (100) 기판 위에 n-형 $Ga_{0.67}Al_{0.33}As$ 층을 150 μm 두께로, p-형 $Ga_{0.84}Al_{0.16}As$ 층을 0.7 μm, 그리고 다시 p-형 $Ga_{0.84}Al_{0.16}As$ 층을 18 μm 높이를 갖고 있다. 전자 운반자 농도는 3.3 x $10^{17}/cm^3$ 이고 정공농도는 1.6 x $10^{18}/cm^3$ 으로 도핑 되었으며 광 출력은 50 mA 의 전류 인가시에 11.4 mW 를 나타내었다. 피크파장은 862 nm 이고 발광응답시간은 6-9 nsec 의 분포를 나타내었다.

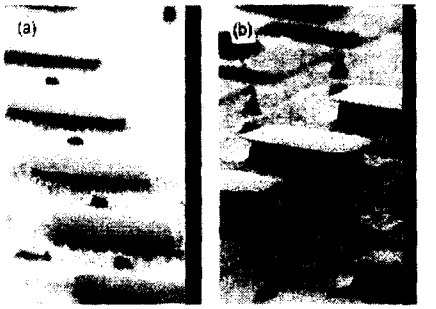

Fig. 4 SEM images of (a) RIE dry etching process of edge emitting LED at p-n junction area and (b) wet etching process with the KOH solution.

Fig. 5 은 PD 전극 형성시에 PD 에 입사하는 광신호량의 효율을 증대하기 위해 Sn/Pb 물질의 솔더 범퍼 (solder bumper)를 183 °C 에서 60 μm 정도의 높이로 형성하여 Si PD 를 장착하였다. PD 의 구조는 p-i-n 구조를 갖고 있으며 응답 파장영역은 700-1050 nm 로 필터를 코팅하여 가시영역의 응답을 제거하였다 (Optel 사 HPI-2CR2 모델). 솔더링 (soldering) 되지 않은 부위의 마이크로 렌즈를 통해 들어온 회절광이 Si (111)의 식각된 면에 반사되어 p-i-n PD 의 p-면에 입사 되도록 하였다.

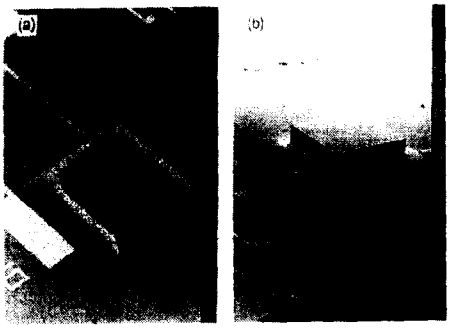

Fig. 5 (a) The solder solution for mounting the p-type electrode of PD and (b) the SEM image of the mounted PD.

Fig. 6 은 PMMA 광 도파로의 단면 및 마이크로 렌즈의 SEM 사진이다. 고분자 (polymer)의 일종인 PMMA 는 Si 이나 금속과의 부착력이 우수하고 다양한 노광 및 현상과 공정장비의 사용이 가능하고 평탄용 레지스트 (planarizing resist)에 유용하여 다층 (multilayer)공정 및 선형응답의 현상용 레지스트 (developing resist)특징을 갖는다.

광 도파로의 제작은 Si 기판 위에 SiO_2를 PECVD 방법으로 증착하고,[8] PMMA 를 스핀 코팅 (spin coating)한 후 다시 P/R 를 도포하여 패턴 (pattern)을 형성한 후 RIE 건식 식각 함으로써 폭은 40 μm 이고 높이가 2.5 μm 인 PMMA 도파로를 제작하였다. PECVD 장치를 이용한 SiO_2 박막은 SiH_4 가스와 O_2 가스분위기에서 RF 플라즈마를 이용하였으며 2-5 mTorr 의 압력과 300 ℃ 의 온도분위기에서 증착하였다. 두께는 2 μm 이고 엘립소메트리 (ellipsometry) 측정파장이 850 nm 인 영역에서 굴절률(refraction index)은 1.47 로 비교적 화학적 평형조성 (stoichiometric)의 박막을 형성하였다.

PMMA 코팅은 2500 rpm 에서 회전하였고, 180 ℃ 에서 1 시간동안 충분히 가열 (baking)하여 탈수시켰다. P/R(S9912PR) 코팅를 40 sec 동안 4000 rpm 에서 회전하여 예열 (prebaking)을 70 ℃ 에서 30 min 동안 한 다음 노광 및 현상을 각각 5 sec 와 7 sec 동안 하였다. 다시 70 ℃ 에서 20 min 동안 후열처리 (post-baking)하여 P/R 패턴 (pattern)을 형성하였고, PMMA 의 식각은 RIE 방식으로 Cl_2 가스분위기에서 수행하였다.

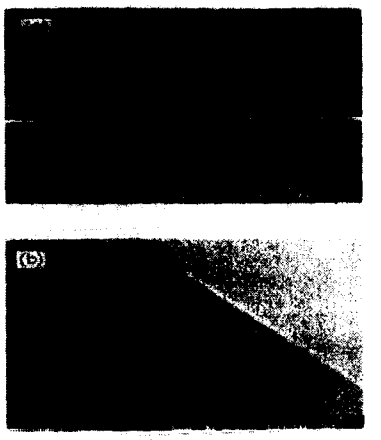

Fig. 6 (a) Cross-sectional SEM image for the waveguide structure of PMMA/SiO_2/c-Si and (b) SEM image of the fabricated PMMA micro-lens.

Fig. 7 은 제작된 회절격자 스케일(scale)의 평면도 및 단면도를 나타낸다. 스케일의 피치 (pitch)는 광원의 파장보다 긴 간격을 가져야 하며 파장 850 nm 에 대해서 2 μm 의 크기를 갖도록 설계하여 3 차 회절 피크세기 (peak intensity)까지 형성할 수 있도록 설계하였고, Si 기판 위에 SiO_2 산화막을 증착하였다.

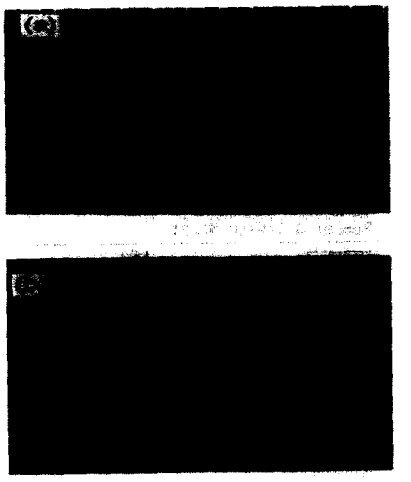

Fig. 7 (a) Plane view of SEM image for the linear grating with the scale pitch of 2μm and (b) the cross-sectional image.

다시 Al 금속 (metal)을 RF 스퍼터링 (sputtering) 방법으로 5 분 동안 증착하여 400 nm 의 두께를 확보하고 70 ℃ 로 가열 (baking)한 다음 P/R 를 회절격자 피치 (gating pitch)가 2 μm 이 되도록 패턴닝 (patterning)하였으며 Cl_2 가스분위기에서 RIE 식각한 후 다시 SiO_2 박막을 증착하였다.

Fig. 8 은 제작된 하이브리드형 마이크로 엔코더 칩 (chip)의 제작사진을 보인다. 두 개의 LED 에서 나온 광이 도파로를 통과하여 이동물체에 부착된 회절격자에서 회절되어 반사한 다음 다시 마이크로 렌즈에 집광되어 간섭을 일으키며 PD 에 수광된다. 수광된 빛이 역 방향으로 부하가 인가된 PD 에서 전자-정공 쌍을 형성하며 금속전극을 통하여 광 전류를 출력신호로 얻는다.

Fig. 8 The image of the fabricated hybrid-type micro-encoder.

4. 엔코더 특성분석

Fig. 9 에 폭 40 μm 의 Air/PMMA(2.5 μm)/SiO_2/c-Si 광 도파로의 특성을 단면적에 대해서 나타내었다. 세로축 방향의 길이에 따른 광량의 세기가 분산 (dispersion) 없이 매우 커서 양호한 광 도파 특성을 보임을 알 수 있다. PMMA 의 굴절율은 1.48 로 비교적 낮으며 Fig. 10 에서와 같이 400 nm 이상의 장파장 영역에서 투과도가 90% 이상으로 매우 양호하였다. 반면에 반사율은 10% 정도로 매우 낮아 광 도파로 렌즈제작 특성이 매우 양호함을 알 수 있다.

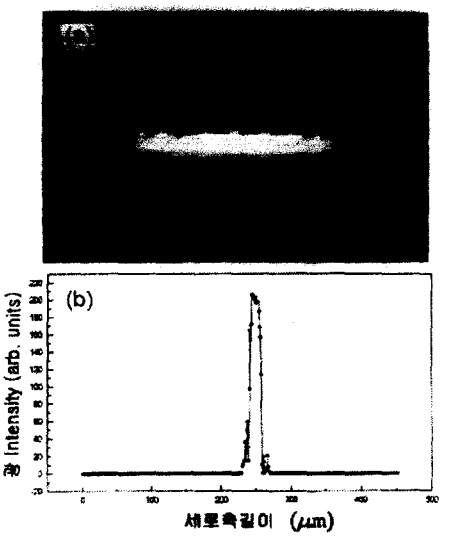

Fig. 9 The optical transport property of wave-guide of Air/PMMA (2.5 μm)/SiO_2/c-Si with a width of 40 μm: (a) optical image and (b) the transmitted light intensity.

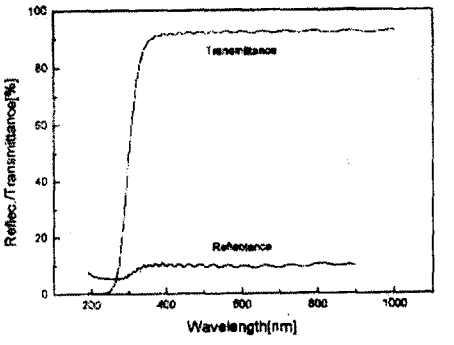

Fig. 10 The optical transmission and reflection rates of PMMA wave guide.

다중 슬릿 (slit)에 의한 프라운호퍼 (Fraunhofer) 회절의 분포함수는 슬릿 (slit)의 수 N=15, 회절격자 피치 (grating pitch)와 슬릿 (slit)의 폭 $b=D/2$=1μm 에 대해서 입사광의 파장 λ=850μm 와 입사각도 θ_i=0 의 함수로 나타내어진다. 회절각도 θ 에 대하여 회절광의 전계에 의해 형성된 회절광 세기는 다음과 같이 나타낸다.[4]

$$I(\theta,\lambda) = I_0\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2\left(\frac{\sin(N\alpha)}{\sin\alpha}\right)^2 \quad (12)$$

$$\alpha(\theta,\lambda) = \frac{\pi D}{\lambda}(\sin\theta_i + \sin\theta) \quad (13)$$

$$\beta(\theta,\lambda) = \frac{\pi b}{\lambda}(\sin\theta_i + \sin\theta) \quad (14)$$

위의 식 (12)를 이용하여 시뮬레이션 (simulation)된 회절차수의 세기 비와 실제의 회절 차수 패턴 (pattern)을 Fig. 11 에서 비교하였다. 회절격자 피치가 2 μm 이고 선폭이 0.5 인 경우로 3 차 회절 피크세기 (peak intensity)까지 잘 일치함을 알 수 있다.

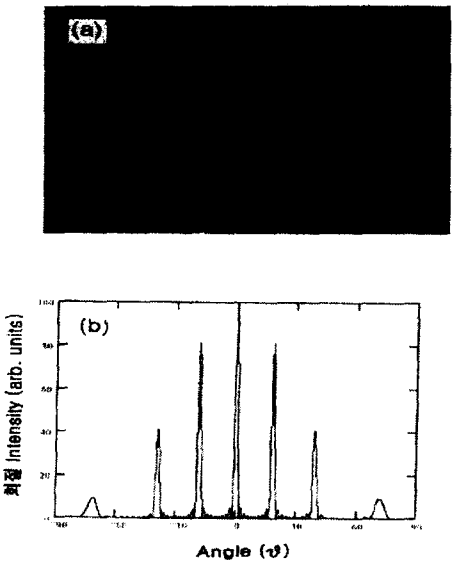

Fig. 11 (a) The diffraction pattern for the scale with the pitch of 2 μm and the line width ratio of slit to pitch of 0.5 and (b) the corresponding simulated intensity of diffracted beams.

Fig. 12 는 개발된 회절광 마이크로 엔코더 칩에 대한 오실로스코프 광출력 신호를 나타낸 것이다. Fig. 2 에서처럼 두 개의 발광다이오드 (LED)로 부터 나온 광은 도파로 (wave guide)를 통과하여 이동 물체에 부착된 회절격자의 scale 에서 각각 회절하여 반사된 광의 제 2 차 피크 (peak)가 40° 범위 안에서 마이크로 렌즈 (lens)를 통하여 수광 센서인 포토다이오드 (PD)에 입력됨으로써, 서로 간섭을 일으키고 광세기의 변화가 일어나며 광 전류 (photocurrent)로 변환되어 전류신호 또는 전기저항을 통한 전압신호로 오실로스코프 (oscilloscope)에 아날로그 (analog) 신호로 출력되어진다. 물체에 부착된 스케일 (scale)의 이동속도가 10 에서 200 μm/sec 로 증가함에 따라 주파수가 9.82 에서 204.1 Hz 로 각각 변화한다. 이러한 회절광 간섭계의 측정변위의 평균분해능은 1.00 +/- 0.02 μm 임을 알 수 있다.

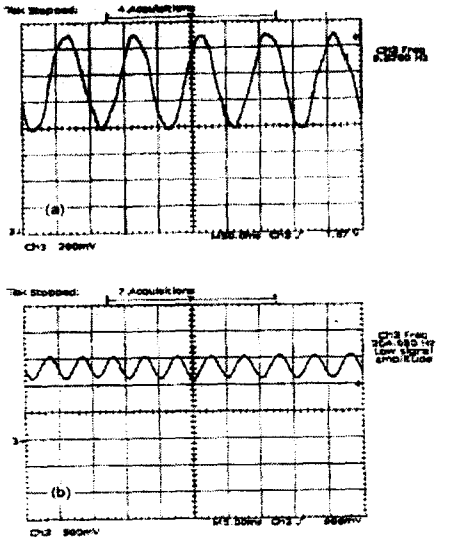

Fig. 12 Displacement measurements for translated speeds of grating scale: (a) 10 μm/sec and (b) 200 μm/sec.

회절격자의 스케일이 X-Y 스테이지에 부착되어 초당 10 미크론 움직일 경우 포토다이오드에 입력되어 오실로스코프에 기록되는 광 전류의 세기 변화가 9.82 회 정도 발생되고, 초당 200 미크론 이동하는 회절격자에 대해 광 전류의 세기변화는 204.1 회 정도 발생하게 된다. 따라서, 한 개의 광 전류 펄스 (pulse)에 의한 변화량은 마이크로 엔코더의 분해능에 해당하는 1 μm 정도이다.

이와 같은 광신호의 펄스 (pulse)를 제공하는 아날로그 신호의 광학계인 마이크로 엔코더 칩에, 광신호를 제어하여 디지털화 (digitization)하는 전자제어계가 첨부되어지고 분주회로 (subdividing electronic circuits)로 신호를 더욱 세분화하면 미크론 이하의 이동변위에 대한 정밀측정이 가능하게 된다.

5. 결론

발광다이오드를 이용한 회절광 간섭의 하이브리드형 마이크로 엔코더를 설계 및 제작하였고 특성을 분석하였다. 실리콘기판에 리소그래피하여 패턴을 식각하였으며 도파로 및 수/발광소자를 부착하였다. 제작된 850 nm 광원을 이용한 마이크로 엔코더는 2 μm 회절격자의 스케일 (scale)크기에 대하여 선폭비를 0.5 로 하였으며, 회절격자의 2 차 회절 피크 (peak)을 이용하여 간섭을 이르킨 빔을 마이크로 렌즈를 통해 포토다이오드에서 수광하였고 측정변위가 1.00 μm 로 양호한 변위측정특성을 보였다. 도파로는 고분자 (polymer)의 일종인 PMMA 를 이용하였으며 기판으로는 4 인치크기의 c-Si 반도체를 사용하였다. 제작된 엔코더는 크기가 1cm x 1cm 로 비교적 크게 제작되었으며, 차후에 더욱 소형화될 수 있고 또한 LED 광원 대신 레이저다이오드를 사용함으로써 향상되어 질 수 있다.

후 기

본 연구는 선도기술 개발사업 (G7 Projects)의 초소형 정밀기계 기술개발 (MEMS) 사업분야에 대한 광전자반도체㈜의 "광 마이크로 엔코더 개발" 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Lin, J-D. and Kuo, H-B., "Development of a New Optical Scale System by the Diffractive Phase Interference Method," Meas. Sci. Technol. Vol. 6, pp. 293-296, 1995.
2. Miyajima, H., Yamamoto, E., Ito, M., Hashimoto, S., Komazaki, I., Shinohara, S. and Yanagisawa, K., "Optical Micro Encoder Using a Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser," Sensors and Actuators A Vol. 57, pp. 127-135, 1996.
3. Sawada, R., "Integrated Optical Encoder," Transducer '95, Stockholm, Sweden, pp. 281-284, 1995.
4. Hecht, E., "Optics," 3rd ed. pp. 378-381 and 451-453, Addison-Wesley, New York, USA, 1998.
5. Sadler, D. J., Garter, M. J., Ahn, C. H., Koh, S. and Cook, A., "Optical Reflectivity of Micromachined {111}-Oriented Silicon Mirrors for Optical Input-Output Couplers," J. Micromech. Microeng. Vol. 7, pp. 263-269, 1997.
6. White, V., Ghodssi, R., Fish, G., Herdey, C., Liu, H., Denton, D. D. and McCaughan, L., "A New Method for Producing Graded Index PMMA Waveguides," IEEE Photonics Technol. Lett. Vol. 7, No. 7, pp. 772-773, 1995.
7. Shimokawa, F., Tanaka, H., Uenishi, Y. and Sawada, R., "Reactive-Fast-Atom Beam Etching of GaAs Using Cl_2 Gas," J. Appl. Phys. Vol. 66, No. 15, pp. 2613-2618, 1989.
8. Bazylenko, M. V., Gross, M., Allen, P. M. and Chu, P. L., "Fabrication of Low-Temperature PECVD Channel Waveguides with Significantly Improved Loss in the 1.50-1.55-Micron Wavelength Range," IEEE Photonics Technol. Lett. Vol. 7, No. 7, pp. 774-776, 1995.