

다구찌 방법을 이용한 레이저 포토리소그래피 미세패턴가공 기술의 최적화

백남국*·김대은**

Optimization of Laser Photolithography Micromachining Technique based on Taguchi Method

Nam-Kook Baek, Dae-Eun Kim

Key Words: laser photolithography (레이저 포토리소그래피), micro actuator (마이크로 액츄에이터), photoresist (포토레지스트), Taguchi method (다구찌방법)

Abstract

Laser photolithography technique is useful for fabricating micro-patterns of silicon wafers. In this work, the laser photolithography micromachining technique is optimized based on Taguchi method. Sensitivity analysis was performed using laser scanning speed and laser power level as the parameters. The results show that for the photoresist used in this work, a laser scan speed of $70\mu\text{m/s}$ at 50mW laser power gives the best result.

기호설명

- SN : 신호대 잡음비
- n : 측정값의 수
- y_i : 측정된 특성값

1. 서론

최근 반도체가공 공정에서 생산성을 향상하고 비용을 줄이기 위한 여러 가지 기술들이 나오고 있다. 이 중 레이저와 광학을 이용한 마스크가 필요 없는 포토레지스트 가공 기술은 비용절감과 프로세스 시간을 절약 할 수 있으며 다품종 소량 생산에 적합한 기술로 인식되고 있다. 레이저 포

토리소그래피에서는 초점(spot size)크기가 가공 선폭을 좌우하기 때문에 초점크기를 줄이는 것이 기술의 핵심이다. 광학기술을 이용한 레이저가공은 회절한계 때문에 파장보다 작은 선폭은 가공이 불가능하다고 인식 되어 왔으나 최근 실렌즈(solid immersion lens)를 이용한 고집적광학기술은 이를 가능하게 하고 있다. 근접장을 이용한 기록 기술은 차세대 하드디스크드라이브기술로 연구되고 있으며 마스크가 필요 없는 레이저 포토리소그래피에서 최소 선폭을 가공할 수 있는 가장 유력한 방법으로 인식되고 있다.^(1,2)

본 연구는 레이저와 광학기술을 이용하여 고비용의 장치산업으로 여겨지는 반도체가공기술에서 저비용으로 앞으로 요구되는 다품종 소량생산과 설계변경에 빠르게 대처할 수 있는 새로운 개념의 포토리소그래피 기술을 개발하는데 궁극적인 목적이 있다. 이러한 기술개발을 위하여 설계된

* 연세대학교 기계공학과대학원

** 연세대학교 기계공학과

장치에서 최적의 패턴을 형성하기 위한 조건을 찾기 위해서 수많은 제어 가능한 설계인자와 제어할 수 없는 잡음인자 중에서 일정한 패턴을 만들 수 있도록 잡음에 강건하고 최소의 패턴을 얻기 위한 조건을 보다 합리적이고 빠르게 찾는 방법으로 다구찌방법을 이용한 실험계획법을 이용하였다.^(3,4)

2. 실험장치 및 실험방법

실험에 사용된 시편은 1.2 μ m의 두께로 포토레지스트가 코팅된 실리콘웨이퍼가 사용되었다. 실험장치는 크게 두 부분으로 나뉘어져 있다. 첫째는 532nm의 파장과 50mW의 출력을 가지는 반도체 레이저(DPSS green laser)와 CD-ROM의 광픽업 부분을 응용한 광학계가 있고, 둘째는 시편의 정밀한 이송을 위해 60nm의 해상도를 가지는 정밀이송 액추에이터로 구성된 xyz축 스테이지가 있다. Fig. 1은 전체적인 실험장치를 보여주고 Fig. 2는 PC를 통한 정밀이송 액추에이터의 제어부를 보여주고 있다.^(5,6)

실험은 레이저광이 대기 중에서 Collimating Lens와 Objective Lens를 거쳐 시편에 조사된다. 정밀이송 액추에이터는 z방향으로는 시편과 렌즈와의 거리를 조정하고 x, y방향으로는 일정한 속도를 유지하며 프로그램된 패턴을 따라 움직이게

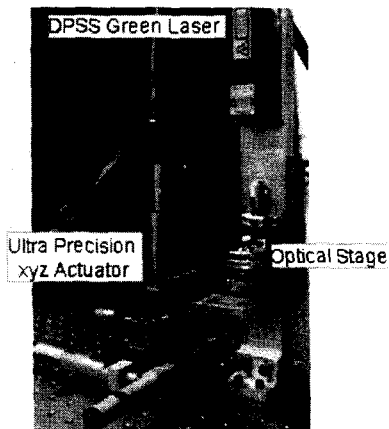


Fig. 1 Experimental setup of laser photolithography

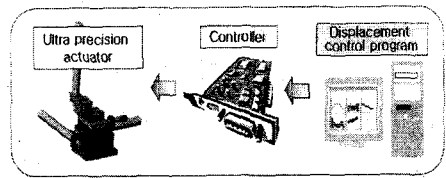


Fig. 2 Schematic diagram of the ultra precision linear xyz-actuator setup

된다.

3. 다구찌 방법을 이용한 실험

3.1 인자 및 수준의 선정

포토리소그래피에서 가공되는 패턴의 품질을 좌우하는 인자들의 영향을 정량적으로 파악하기 위하여 모든 인자들을 고려하여 실험할 경우 실험횟수는 크게 늘어나게 된다. 따라서, 실험횟수를 최소화하고 외부교란 인자가 작용해도 일정한 패턴이 가공되도록 할 필요가 있다. 다구찌 방법에서는 교란 인자의 영향으로부터 품질을 강건하게 유지하기 위하여 SN비(signal to noise ratio)를 사용한다. SN비는 신호 대 잡음의 비율을 뜻하는 것으로 신호 입력의 힘과 잡음이 주는 영향의 힘의 비율로서 나타난다. 즉 각각의 조절 인자의 SN비를 크게 만드는 값을 그 인자의 값으로 결정하면 이렇게 선정된 값은 잡음에 대하여 강건해진다.

SN비는 목적 함수, 즉 특성치에 의해 그 정의가 달라지게 되는데 특성치는 망목(normal is best), 망소(lower is better), 망대(higher is better)특성으로 나뉘어진다. 본 연구에서 적용한 방법은 패턴폭은 작으면 작을수록 좋은 망소특성이므로 망소 특성 분석에 준하여 실행하였으며 패턴깊이의 경우는 깊으면 깊을수록 좋으므로 망대 특성 분석에 준하여 실행하였다.

망소특성의 경우 SN비는⁽⁴⁾

$$SN = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

이고 식 (1)에서 기대값은 $E(y^2)$ 가 된다. SN비의 진수부분 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2$ 은 $E(y^2)$ 의 추정치라 볼 수 있다. 따라서 진수부분의 감소(기대값의 감소)는 SN비의 증가를 가져온다.

망대특성의 경우 SN비는

$$SN = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2)$$

이고 망대특성의 경우에도 진수부분인 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}$ 은 $E(y^{-2})$ 의 추정량이라 볼 수

있고 $E(y^{-2})$ 은 망대특성의 경우 기대값이 되므로 결국 기대값의 최소화는 SN비의 최대화와 관계가 있다. 이와 같이 SN비 값이 큰 경우가 패턴 폭이 좁고 깊게 가공되는데 바람직한 방향으로 기여함을 알 수 있다.

예비실험을 통하여 레이저 포토리소그래피에서 패턴제작에 영향을 미칠 수 있는 인자선정 및 수준의 결정을 Table 1에 하였다. 패턴형성에 영향을 미치는 인자는 시편이송속도(scanning speed)와 레이저광의 세기(light intensity)가 있다. 빛의 세기는 레이저에 부착되어있는 조리개로 조절하여주었다.

Factors & symbols	Level				
	1	2	3	4	5
Scanning speed ($\mu\text{m/s}$) A	10	30	50	70	100
Light intensity (%) B	10	30	50	70	100

Table 1. Levels of selected factors

3.2 인자의 할당 및 실험결과

실험계획법의 목적은 재현성, 바람직한 최적조건 결정 및 안정성에 대한평가 등을 들 수 있다. Table 1에는 시편이송속도와 빛의 세기라는 두 개의 인자를 설정하고 다섯 개의 수준을 정하였으며 Table 2의 1열에 시편이송속도 (A)를 할당하고, 2열에 빛의 세기 (B)를 할당하였다. 인자

Table 2. Assignment of factors and results

Exp. No.	A	B	upper width (μm)	lower width (μm)	depth (μm)
1	1	1		*	
2	1	2	44	12	0.9
3	1	3	35	4	0.9
4	1	4		*	
5	1	5		*	
6	2	1		*	
7	2	2		*	
8	2	3	37	3	0.4
9	2	4	42	25	1.2
10	2	5		*	
11	3	1		*	
12	3	2		*	
13	3	3	36	16	1.1
14	3	4	31	2	0.75
15	3	5	41	20	1.1
16	4	1		*	
17	4	2		*	
18	4	3	32	13	1.2
19	4	4	37	10	0.4
20	4	5	36	7	1
21	5	1		*	
22	5	2		*	
23	5	3		*	
24	5	4	35	3	0.35
25	5	5	33	5	0.6

* : no pattern

의 할당과 결과표는 Table 2와 같다. Table 2의 결과는 AFM(atomic force microscope)를 이용하여 측정하였으며 측정부위의 예는 Fig. 3과 같다.

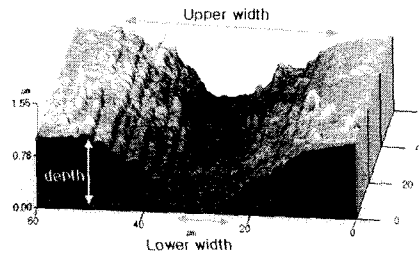


Fig3. AFM image of micro-pattern obtained at scan speed of $70\mu\text{m}$ and 100% laser power

Exp. No.	upper width	lower width	depth
2	-32.87	-21.58	-0.92
3	-30.88	-12.04	-0.92
8	-31.36	-9.54	-7.96
9	-32.46	-27.96	1.58
13	-31.13	-24.08	0.83
14	-29.83	-6.02	-2.50
15	-32.26	-26.02	0.83
18	-30.10	-22.28	1.58
19	-31.36	-20.00	-7.96
20	-31.13	-16.90	0
24	-30.88	-9.54	-9.12
25	-30.37	-13.98	-4.44

Table 3. SN ratio of the results

가공되지 않은 실험은 제외하고 가공된 실험만을 추출하여 SN비를 Table 3.에 구하였다. 패턴형성에 영향을 미치는 A인자의 수준1의 효과는 Table 2.에서 실험번호 2,3에 해당하며 Table 3.의 윗폭(upper width)의 SN비를 더한 다음 평균을 취했다. 즉,

$$A_{1\text{eff}} = \frac{(-32.87) + (-30.88)}{2} = -31.88$$

이 되며 같은 방법으로 수준 2,3,4,5를 구해주며 한편, 수준차는 A인자의 수준별 효과의 최대값과 최소값의 차이가 되며 기여율은 전 수준차의 합에 대한 백분율로 나타낸다. 이와 같이 계산한 인자 및 수준의 효과를 Table 4., Table 5., Table 6에 나타내었다.

factor	effect					deviation	PC (%)
	1	2	3	4	5		
A	-31.88	-31.91	-31.07	-30.86	-30.63	1.28	24.45
B		-32.87	-28.91	-31.13	-31.25	3.96	75.55
total						5.24	100

· PC : percentage contribution

Table 4. Factors affecting the upper width

4. 최적화 실험

factor	effect					deviation	PC (%)
	1	2	3	4	5		
A	-16.81	-18.75	-18.71	-19.73	-11.76	7.97	58.30
B		-21.58	-16.99	-15.88	-18.97	5.70	41.70
total						13.67	100

· PC : percentage contribution

Table 5. Factors affecting the lower width

factor	effect					deviation	PC (%)
	1	2	3	4	5		
A	-0.92	-3.19	-0.28	-2.13	-6.78	6.50	64.48
B		-0.92	-1.62	-4.50	-1.20	3.58	35.52
total						10.08	100

· PC : percentage contribution

Table 6. Factors affecting the depth

선행실험에서 나온 결과를 보면 B인자가 윗폭(upper width)에서는 지배적이고 나머지 아랫폭(lower width)과 깊이(depth)에서는 A인자가 지배적이었다. 포토레지스트는 에칭에 대한 보호층 역할을 하는 것이므로 윗폭보다 아랫폭이 더 중요하며 깊이또한 A인자가 지배적이라 A인자의 수준을 중심으로 최적화 실험 변수를 추출하였다. 종합해서 추출한 변수는 A₄(70μm/s), B₅(100%)였다.

각 수준의 선정에 있어서 3장에서 실험이 실험횟수를 줄이면서 최적의 조건을 대략적으로 찾아가는 실험이었다면 이 장에서는 그렇게 찾아진 변수를 보다 세분화하여 외란에 보다 강건한 최적의 조건을 확인하는 실험이다. 실험조건과 결과는 Table 7.에 나타내었다.

5. 결론

본 논문에서는 레이저와 광학계를 이용한 포토리소그래피를 통해 실리콘웨이퍼위의 포토레지스트를 가공하는 연구를 수행하면서 행해야되는 수많은 실험을 효율적으로 줄이고 지배적인 인자는 무엇인지를 찾기위해 다구찌방법을 이용하였다. 시편이송속도와 레이저광의 세기라는 두 개의 인자에서 가공품위는 시편이송속도에 의해 더 많이 좌우된다는 것을 알았다. 일차적인 실험을 통해

Scanning velocity ($\mu\text{m/s}$)	upper width	lower width	depth
65	40	27	0.9
68	37	14	0.9
69	40	22	0.9
70	42	26	0.95
71	40	18	0.9
72	40	24	0.9
73	41	17	0.9
74	43	15	0.9
75	44	21	0.9
80	41	17	0.9
85	38	17	0.9
90	36	10	0.9

Table 7. Scanning velocity and results of micropattern machining

최적의 조건을 찾았으며 최적화 실험을 통해 시편이송속도 $70\mu\text{m/s}$ 부근과 레이저 광의 세기를 100%로 했을 때 잡음에 강건하게 일정한 가공품위를 유지한다는 것을 알았다.

새로운 개념의 포토리소그라피 기술을 개발하기 위해서는 해결해야 할 많은 문제점들이 있는데 이번 연구에 적용한 다구찌 방법은 이러한 문제들을 보다 효율적으로 해결하기 위한 방법으로 설계된 장치를 이용하여 최적의 가공조건을 찾는 수단이다.

후기

본 내용은 과학기술부 21세기 프론티어개발사업 중 "지능형마이크로시스템개발사업단"의 연구비 지원을 받아 수행한 연구결과이며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

(1) B. D. Terris, H. J. Mamin and D. Rugar, 1996, "Near-field optical data storage", *Applied Physics Letters*, Vol. 68, pp. 141~

143

(2) L. P. Ghislain, V. B. Elings, K. B. Crozier, S. R. Manalis, S. C. Minne, K. Wilder, G. S. Kino and C. F. Quate, 1999, "Near-field photolithography with a solid immersion lens", *Applied Physics Letters*, Vol. 74, pp. 501~503

(3) C. Schomburg, B. Hofflinger, R. Springer and R. Wijnaendts-van-Resandt, 1997, "Economic production of submicron ASICs with laser beam direct write lithography", *Microelectronic Engineering*, Vol. 35, pp. 509~512

(4) 박성현, 1990, "다구찌 방법을 중심으로 한 응용실험계획법", 영지문화사

(5) E. Hecht, 1997, "Optics", Addison Wesley

(6) 진원혁, 김대은, 1999, "마스크에 대한 기계적 가공을 이용한 단결정 실리콘의 미세 패턴 가공", *한국정밀공학회*, 제16권 제2호, pp.60~67