한국정밀공학회지 제19권 제7호 (2002년 7월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 19, No. 7, July 2002.

다구찌 방법을 이용한 레이저 리소그라피 미세패턴 가공조건의 최적화

백남국*, 김대은**

Optimization of Laser Lithography Micropatterning Technique based on Taguchi Method

Nam-Kook Baek*, Dae-Eun Kim**

ABSTRACT

Laser lithography technique is useful for fabricating micro-patterns of silicon wafers. In this work, the laser lithography micromachining technique is optimized based on Taguchi method. Sensitivity analysis was performed using laser scanning speed, laser power level, developing time and mixture ratio between developer and Di-water as the parameters. The results show that for the photoresist used in this work, 70㎛/s scan speed, 50㎽ laser power, 60sec. developing time and 6:1 mixture ratio gives the best result. This work shows the effectiveness of laser lithography technique in fabricating patterns with a few micrometer in width.

Key Words : Laser Lithography(레이저 리소그라피), Micro-actuator(마이크로 액츄에이터), Photoresist(포토레지스트), Taguchi Method(다구찌방법)

1. 서론

오늘날 반도체가공은 초미세가공공정의 집약체라 할 수 있다. 지금도 가공비용을 줄이고 가공품위를 높이기 위한 노력은 계속 되고 있다. 이렇게 제안되는 여러 기술들 중에 레이저와 광학계를 이용한 마스크가 필요 없는 포토레지스트 직접 가공기술은 비용절감, 공정감소, 쉬운 설계변경등의 이유로 다품종 소량생산에 적합한 기술로 인식되고 있다.[1] 레이저 리소그라피에서 가공선폭을 좌우하는 인자는 여러 가지가 있을 수 있다. 중요한 인자들로는 초점크기, 레이저광의 세기, 노광량, 디벨롭 시간, 베이크시간 등이 있다. 이러한 인자들은 어떤 수식이나 이론으로 최적화 시킬 수 있는 것이 아니라 실험을 통한 시행착오로 최적의 조건을 도출한다. 따라서, 효과적인 실험방법을 통하여 실험횟수를 줄이면서 최적의 가공조건을 도출하는 것이 중요하게 된다.

본 연구는 레이저와 광학계를 이용하여 고비용의 장치산업으로 여겨지는 반도체 가공기술에서 저비용으로 앞으로 요구되는 다품종 소량생산을 효과적으로 만족시킬 수 있는 새로운 개념의 리소그라피 기술을 개발하는데 궁극적인 목적이 있다.[2]

이러한 의도로 새롭게 설계된 장치에서 최적의

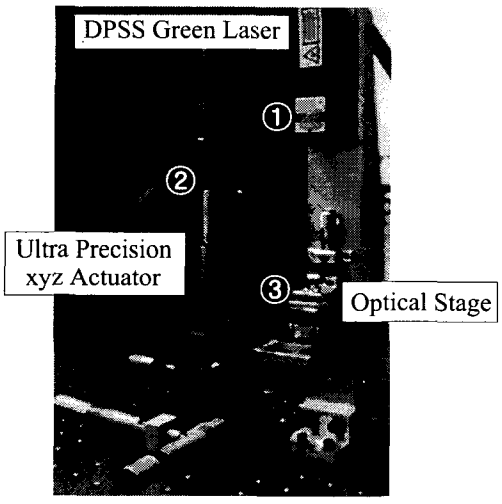
☞ 2001년 10월 29일 접수
* 연세대학교 기계공학과 대학원
** 연세대학교 기계공학부

가공조건을 찾기 위해서는 여러 개의 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]

2. 실험장치 및 실험방법

실험장치는 레이저 광원부, 광학계, 정밀 시편 이송부 이렇게 세가지부분으로 나누어 볼 수 있다. 레이저 광원부는 파장이 532㎚이고 50㎽의 출력을 가지는 반도체 레이저(DPSS green laser)와 레이저 전원공급부가 있으며 광학계는 CD-ROM의 광픽업 부분을 응용하였으며 초점거리조절과 틸팅(tilting)이 용이하게 제작되었고 정밀 시편이송부는 xyz축으로 60㎚의 해상도를 가지는 액츄에이터로 구성되었다. Fig. 1은 전체적인 실험장치를 보여주고 있고 Fig. 2는 정밀이송 액츄에이터의 제어흐름을 보여주고 있다.[4,5]

실험은 레이저광이 대기 중에서 collimating lens와 objective lens를 거쳐 시편에 조사되고 정밀이송 액츄에이터는 z방향으로는 시편과 렌즈와의 거리를 조정하고 x, y방향으로는 일정한 속도를 유지하



① Laser, Power: 50㎽, Wavelength: 532㎚
② Micro-actuator, Resolution: 60㎚
③ Applied photo detecting parts of CD-ROM

Fig. 1 Experimental setup of laser lithography

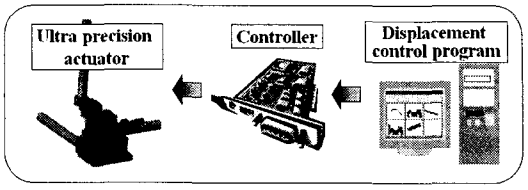


Fig. 2 Schematic diagram of the ultra precision linear xyz-actuator control

며 프로그램된 패턴을 따라 움직이게 된다. 이렇게 만들어진 시편은 디벨로퍼와 증류수가 일정한 비율로 혼합된 용액속에서 잘 저어주고 마지막으로 증류수로 세척하여 패턴을 형성하게 된다.

실험에 사용된 포토레지스트는 AZ-1512이고 디벨로퍼는 AZ500MIF이며 포토레지스트 코팅은 500rpm에서 10초 4000rpm에서 35초를 하였으며 소프트베이크(soft bake)는 컨벡션오븐에서 95℃로 30분간하였다. 코팅두께는 1.0~1.1㎛를 유지하였다. 상기 조건은 포토레지스트 제작사에서 제공하는 조건을 예비실험하여 채택하였다. 패턴형상 측정은 디벨롭후에 하드베이크(hard bake)를 하지 않은 상태에서 하였다.

3. 다구찌 방법을 이용한 실험

3.1 인자 및 수준의 선정

레이저 리소그라피에서 가공되는 패턴의 품위는 다양한 인자들에 의해 결정된다. 이러한 여러 인자들의 영향을 정량적으로 파악하기 위하여 모든 인자들의 조합을 고려하여 실험할 경우 실험횟수는 크게 늘어나게 된다. 따라서, 실험횟수를 최소화하고 외부교란 인자가 작용해도 일정한 패턴이 가공되도록 할 필요가 있다.

다구찌방법의 강건설계는 제어할 수 있는 영향력이 큰 인자를 찾아내어 이 인자들의 영향력을 최대로 하여 잡음의 영향력을 최소로 하는 것이다. 교란 인자의 영향으로부터 품질을 강건하게 유지하기 위하여 SN비(signal to noise ratio)를 사용한다. SN비는 신호대 잡음의 비율을 뜻하는 것으로 신호입력의 힘과 잡음이 주는 영향의 힘의 비율로서 나타낸다. 즉, 각각의 조절인자의 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 작을수록 좋은 망소 특성이므로 망소 특성 분석에 준하여 실행하였으며 패턴깊이의 경우는 깊을수록 좋으므로 망대 특성 분석에 준하여 실행하였다.

망소특성의 경우 SN비는[3]

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

이다. 식 (1)에서 n은 측정값의 수를 나타내고 y_i는 측정한 특성값을 나타내고 기대값은 $E(y^2)$가 된다. SN비의 진수부분은 $\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2$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.

Table 1 Levels of selected factors

Factor & symbol \ Level	1	2	3
Scanning speed (㎛/s) A	30	50	70
Light intensity (%) B	50	75	100
Developing time (sec) C	60	65	70
Mixture ratio (Developer : Di-water) D	5:1	6:1	7:1

예비실험을 통하여 레이저 리소그라피에 의한 패턴제작에 영향을 미칠 수 있는 인자 및 수준을 선정하였고 이를 Table 1에 나타내었다. 패턴형성에 영향을 미치는 인자는 시편이송속도(scanning speed), 레이저광의 세기(light intensity), 디벨롭시간(developing time), 디벨로퍼와 증류수의 혼합비(mixture ratio of developer to di-water)가 있다. 여기서 빠진 중요한 인자로 베이크시간과 온도를 들 수 있다. 이들은 포토레지스트의 솔벤트함량을 좌우하는 중요한 역할을 하지만 여기에서는 포토레지스트 공급자가 제공한 조건을 기초 실험을 통해 최적화된 조건을 적용하였다.

Table 2 Table of orthogonal arrays and experimental results

Exp. No.	A	B	C	D	upper width (㎛)	lower width (㎛)	depth (㎛)
1	1	1	1	1	33.52	11.05	0.45
2	1	2	2	2	42.51	22.02	0.93
3	1	3	3	3	45.50	32.54	0.95
4	2	1	2	3	37.01	5.09	0.53
5	2	2	3	1	39.47	4.88	0.59
6	2	3	1	2	46.25	15.11	0.98
7	3	1	3	2	41.95	5.65	0.44
8	3	2	1	3	42.82	8.37	0.71
9	3	3	2	1	42.75	7.55	0.53

3.2 인자의 할당 및 실험결과

실험계획법에서 직교배열표를 사용하는 이유는 재현성, 바람직한 최적조건 결정 및 안정성에 대한 평가와 실험의 크기를 확대시키지 않고도 실험에 많은 인자를 넣을 수 있다는데 있다. 본 실험에서는 총 9번의 실험횟수를 가지는 4인자 3수준계 직교배열표($L_9 3^4$)를 적용하였다.

Table 2에는 시편이송속도, 레이저광의 세기, 디벨롭시간, 디벨로퍼와 증류수의 혼합비의 인자들을 배치하였고 세 개의 수준에 해당되는 값들을 정하여 나타내었으며 Table 2의 1열에 시편이송속도(A), 2열에 레이저광의 세기 (B), 3열에 디벨롭시간(C), 4열에 디벨로퍼와 탈이온수의 혼합비 (D)를 할당하였다. 각 실험의 결과는 인자할당 오른쪽에 나타내었다. 가공된 패턴의 폭 및 깊이는 AFM(atomic force microscope)을 이용하여 측정하였으며 Table 2의 측정 결과값은 측정값의 평균값이다. 가공된 패턴의 윗폭(upper width), 아랫폭(lower width), 깊이(depth)는 Fig. 3에 나타낸바와 같이 정의하였다. 이렇게 측정된 측정데이터로부터 SN비를 계산하여 Table 3에 나타내었다. 이렇게 구한 SN비를 이용하여 각 인자와 수준의 효과를 구한다. 예를 들어 윗폭(upper width)에서 A인자, 수준1의 효과 $A_{1_{eff}}$는 실험번호 1,2,3에 해당되므로 SN비의 평균으로 계산된다. 즉,

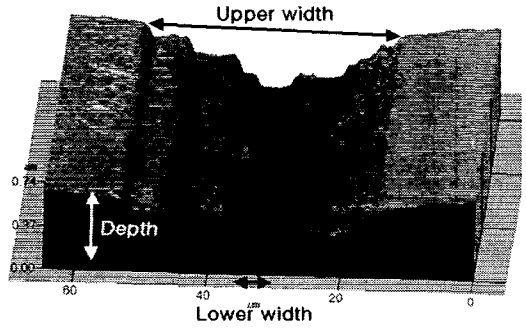


Fig. 3 AFM image of micro-pattern obtained at scanning speed of 50㎛/s, 75% laser power, 70sec. developing time and 5:1 mixture ratio

Table 3 SN ratio of the results

Exp. No.	Upper width (㎛)	Lower width (㎛)	Depth (㎛)
1	-30.51	-22.53	-8.42
2	-32.57	-26.93	-0.92
3	-33.17	-30.25	-0.48
4	-31.36	-14.28	-6.31
5	-31.93	-13.81	-4.52
6	-33.30	-23.60	-0.18
7	-32.47	-15.40	-7.14
8	-32.67	-18.59	-2.99
9	-32.62	-17.68	-6.02

$$A_{1_{eff}} = \frac{(-30.51)+(-32.57)+(-33.17)}{3} = -32.08$$

이 되며 같은 방법으로 모든 인자와 수준에 그 효과를 계산할 수 있다. 한편, 수준차(deviation)는 인자의 수준별 효과의 최대값과 최소값의 차이를 뜻하며 기여율(percentage contribution)은 전 수준차의 합에 대한 백분율로 나타낸다. 이와 같이 계산한 인자 및 수준의 효과를 Table 4-6에 나타내었다.

실험결과를 살펴보면 기여율이 가장 높은 것이 B인자임을 알 수 있고 이는 B인자의 값이 조금만 바뀌어도 결과값에 영향을 많이 준다는 것을 뜻한다. Table 4-6에서 각 인자별 수준의 효과를 비교하여 최적의 인자별 수준을 찾으면 A3, B3, C1, D2가 된다. A3, B3, C1, D2의 가공조건으로 가공을 할 때 잡음에 강건하고 원하는 패턴을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Table 4 Factors affecting the upper width

Factor	Effect			Deviation	PC (%)
	1	2	3		
A	-32.08	-32.20	-32.59	0.51	14.41
B	-31.45	-32.39	-33.03	1.58	44.63
C	-32.16	-32.18	-32.52	0.36	10.17
D	-31.69	-32.78	-32.40	1.09	30.79
Total				3.54	100

· PC : percentage contribution

Table 5 Factors affecting the lower width

Factor	Effect			Deviation	PC (%)
	1	2	3		
A	-26.57	-17.23	-17.22	9.35	43.09
B	-17.40	-19.78	-23.84	6.44	29.68
C	-21.57	-19.63	-19.82	1.94	8.94
D	-18.01	-21.98	-21.04	3.97	18.29
Total				21.70	100

· PC : percentage contribution

Table 6 Factors affecting the depth

Factor	Effect			Deviation	PC (%)
	1	2	3		
A	-3.27	-3.67	-5.38	2.11	18.67
B	-7.29	-2.81	-2.23	5.06	44.78
C	-3.86	-4.42	-4.05	0.56	4.96
D	-6.32	-2.75	-3.26	3.57	31.59
Total				11.30	100

· PC : percentage contribution

4. 결론

본 논문에서는 레이저와 광학계를 이용한 마스크가 필요 없는 리소그라피 방법에 의해 실리콘 웨이퍼 위의 포토레지스트를 패턴가공 함에 있어 최적의 가공조건을 찾기 위해 행해야하는 수많은 실험을 효율적으로 줄이고 어떠한 인자가 가공품위를 유지하는데 지배적인지를 알기 위해 다구찌방법을 이용하였다. 시편이송속도, 레이저광의 세기, 디벨롭시간, 디벨로퍼와 증류수의 혼합비라는 네 가지의 인자에서 가공품위는 시편이송속도와 레이저광의 세기에 더 많이 좌우된다는 것을 알았다. 이는 인자의 값을 조금 바꾸어 주었을 때 가공되어 나오는 품위의 차이가 많음을 뜻한다. 기여율을 바탕으로 최적의 수준을 도출하면 시편이송속도 70㎛/s, 레이저광의세기 100%, 디벨롭시간 60초, 디벨로퍼와 증류수의 혼합비 6:1이 원하는 가공품위를 얻고 다른 잡음인자에 강건한 최적의 조건임을 알 수 있었다.

새로운 개념의 레이저 리소그라피 기술을 개발하기 위해서는 해결해야할 많은 문제점들이 있다. 이번 연구결과에서 만족할만한 포토레지스트의 가공품위를 얻기에는 부족했지만 적용한 다구찌방법은 이러한 문제들을 보다 효율적으로 해결하기 위한 방법으로 설계된 장치를 이용하여 최적의 가공조건을 찾는 효과적인 수단이라 할 수 있다.

최적화된 가공조건으로 응용 가능한 기술로는 micro-channel가공이나 미소마찰력 저감을 위한 기능성 표면 제작 등이 있으며 응용 범위를 넓히기 위해 앞으로의 연구는 초점크기를 줄이기 위한 SIL(solid immersion lens)을 이용한 근접장광학기술과도 같은 새로운 기술을 적용한 광학계설계가 필요할 것이다.[6]

후 기

본 내용은 과학기술부 21세기 프론티어 개발사업 중 "지능형 마이크로시스템 개발사업단"의 연구비 지원을 받아 수행한 연구결과이며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Becker, H., Caspary, R., Toepfer, C., Schickfus, M. V., Hunklinger, S., "Low-cost direct writing lithography system for the sub-micron range," Journal of Modern Optics, Vol. 44, No. 9, pp. 1715-1723, 1997.
2. Schomburg, C., Hofflinger, B., Springer, R., and Wijnaendts-van-Resandt, R., "Economic production of submicron ASICs with laser beam direct write lithography," Microelectronic Engineering, Vol. 35, pp. 509-512, 1997.
3. 박성현, "다구찌 방법을 중심으로한 응용실험계획법," 영지문화사, 1990.
4. Hecht, E., "Optics," Addison Wesley, 1997.
5. 진원혁, 김대은, "마스크에 대한 기계적 가공을 이용한 단결정 실리콘의 미세 패턴가공," 한국정밀공학회, 제16권, 제2호, pp. 60-67, 1999.
6. Ghislain, L. P., Elings, V. B., Crozier, K. B., Manalis, S. R., Minne, S. C., Wilder, K., Kino, G. S., and Quate, C. F., "Near-field photolithography with a solid immersion lens," Applied Physics Letters, Vol. 74, pp. 501-503, 1999.