

MEMS 소자의 비아 홀에 대한 레이저 공정변수의 최적화[§]

박시범* · 이철재* · 권희준* · 전찬봉* · 강정호*[†]

*동아대학교 기계공학과

Optimization of Laser Process Parameters for Realizing Optimal Via Holes for MEMS Devices

Si Beom Park*, Chul Jae Lee*, Hui June Kwon*, Chan Bong Jun* and Jung Ho Kang*[†]

* Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.

(Received June 7, 2010 ; Revised August 26, 2010 ; Accepted August 27, 2010)

Key Words : Silicon Wafer(실리콘웨이퍼), Nd:YVO₄ Laser(Nd:YVO₄ 레이저), Via Hole Processing(비아홀가공), Design of Experiment(실험계획법), Chebyshev Orthogonal Polynomials(Chebyshev 직교다항식)

초록: MEMS 소자의 공정에서 가공된 비아 홀 품질은 소자의 성능에 가장 중요한 요소의 하나이다. Nd:YVO₄ 레이저로 가공한 비아 홀에 대한 레이저 미세가공의 일반적인 특징을 설명하고 그것의 측정에 대한 효율적인 최적화 방법을 소개한다. 본 논문의 최적화 방법은 직교다항식, 분산분석과 반응표면최적화는 최적 레이저 공정변수를 결정하고 주요 영향을 이해하는데 사용된다. 유의한 레이저 공정변수를 확인하고 이의 비아 홀 품질에 관한 영향을 고찰하였다. 레이저 공정변수의 최적 수준을 가지는 확인 실험은 최적화 방법의 유효성을 설명하기 위해 수행하였다.

Abstract: In the case of micro-electro-mechanical system (MEMS) devices, the quality of punched via hole is one of the most important factors governing the performance of the device. The common features that affect the laser micromachining of via holes drilled by using Nd:YVO₄ laser are described, and efficient optimization methods to measure them are presented. The analysis methods involving an orthogonal array, analysis of variance (ANOVA), and response surface optimization are employed to determine the main effects and to determine the optimal laser process parameters. The significant laser process parameters were identified and their effects on the quality of via holes were studied. Finally, an experiment in which the optimal levels of the laser process parameters were used was carried out to demonstrate the effectiveness of the optimization method.

1. 서 론

반도체 산업에서 엄격한 품질조건을 위한 고정밀의 가공공정(advanced machining process: AMP)이 요구된다. AMP 중 하나인 레이저 미세가공(laser micromachining)은 주로 1 mm 두께 이하의 극소형 부품에 엑시머 레이저(excimer laser) 및 Nd:YVO₄와 같은 단파동 고주파수 레이저를 이용한다. 레이저 미세가공은 LED, MEMS 제품에 폭넓게 사용된다. 특히, LED 상하부의 전기적 연결과 MEMS 소자를

적층하는 공정 및 패키징 기술(packaging technology)에서 기존의 예칭 또는 기계적 가공에 비해 공정비용과 정밀도를 향상시킬 수 있고, 비교적 간단한 공정으로 다양한 소재에 응용이 가능하다.⁽¹⁻³⁾

특히 MEMS 소자의 소형화 및 집적화를 위해 웨이퍼 레벨(wafer level) 패키징에서 비아 홀(via hole)^(2,4) 가공의 신뢰성은 매우 중요하다. 일반적인 MEMS 소자용 실리콘 웨이퍼(silicon wafer)는 절연층(insulation layer), 알루미늄(aluminum), 에폭시층(epoxy layer), 유리층(glass layer) 순서로 적층되어 있다. 이러한 다층구조는 비아 홀 가공에 의해 소자 상하부의 전기적 연결과 고밀도 패키징을 얻을 수 있다. 그러나 레이저를 이용한 비아 홀 가공은 레이저의 종류와 주사조건에 따라 가공될 부

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회(2010. 5. 27.-28., 전남대 컨벤션홀) 발표논문임.

† Corresponding Author, kangjh@dau.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

분의 인접 영역에 열변형이 확산되고 가공 품질을 저하시킬 수 있다.^(5,6) 또한 비아 홀은 유리층의 손상 없이 절연층과 알루미늄층만 같은 홀의 형상과 크기로 가공되어야 한다. 따라서 비아 홀 품질과 레이저 가공조건에 효율적인 평가방법이 필요하다.

이러한 관점에서 본 논문은 Nd:YVO₄ 레이저를 이용한 실리콘 웨이퍼에서 비아 홀에 대한 가공성과 정밀도를 향상시키기 위한 최적화 방법의 응용을 설명한다. 웨이퍼의 열손상 최소화와 절연층과 알루미늄층의 비아 홀의 정밀도를 개선하기 위해서 Nd:YVO₄ 레이저의 출력 특성을 결정하는 공정변수를 최적화 하였다. Nd:YVO₄ 레이저의 기본적인 출력 특성을 결정하는 전류(current), 가공 주파수(frequency), 조사시간(shot time)을 공정변수로 설정하였고 반응표면법(response surface method)⁽⁷⁻¹⁰⁾을 이용하여 비아 홀 직경에 대한 평가모델을 구성하였다. 반응표면법은 n 개($n>1$)의 설계변수에서 예측된 응답 y 의 관계를 근사한 것으로 최적화(optimization) 또는 실험예측에 효율적으로 이용한다. 공정변수 최적화 결과에 대해 재현성 실험을 수행하고 Nd:YVO₄ 레이저의 비아 홀의 응용과 최적 가공조건을 검토하였다.

2. 레이저 실험 장치 및 최적화 방법

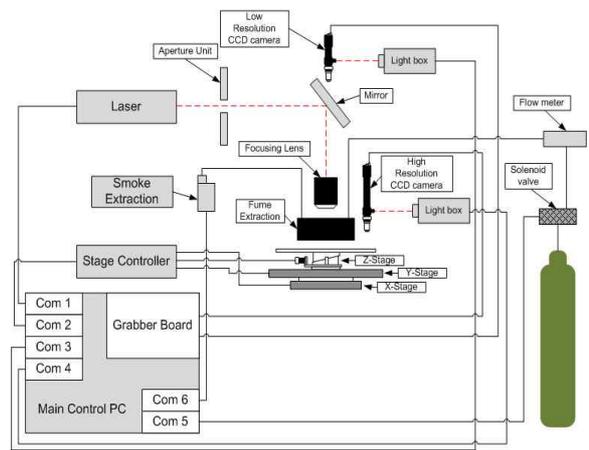
2.1 비아 홀 가공의 과정

레이저 비아 홀 가공에 사용된 장비는 Yuco optics 사⁽¹¹⁾의 DPSS(diode-pumped solid state) Nd:YVO₄ 레이저로 Table 1은 장비의 사양을 나타낸 것이다. DPSS는 엑시머 레이저에 비해 출력이 안정되고 펄스 반복율이 높아 벡터 스캐닝 방식의 가공방법에 적합하다. Fig. 1(a)는 다층 웨이퍼 가공을 위한 레이저 실험장치의 계략도이다. Fig. 1(b)는 다층 웨이퍼 재료가 가공되는 정밀 xyz 작업대의 장치 구성이다. 레이저 발진기에서 나온 빛은 반사경에 의해 90°로 집광렌즈에 도달하고 다층 웨이퍼를 가공한다.

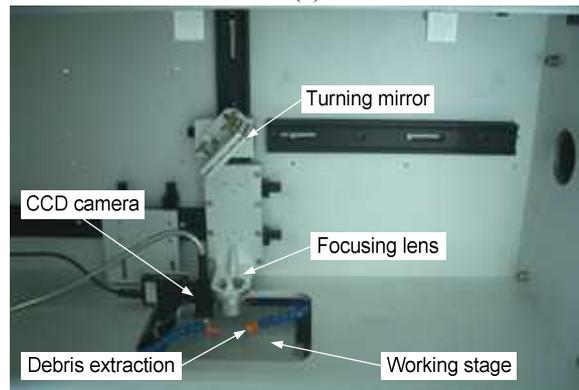
Fig. 2는 본 논문에 사용된 실리콘 웨이퍼의 구조를 나타낸 것이다. 제작 과정은 실리콘 웨이퍼에 알루미늄 패드와 유리층을 에폭시(epoxy)를 이용하여 접합한 후 실리콘 웨이퍼의 패턴을 건식식각(dry etching)을 이용하여 결정하였다. 절연층은 실리콘 웨이퍼 위에 전기영동 코팅(electrophoretic coating)으로 증착시켰다.⁽¹²⁾ 실리콘 웨이퍼의 비아 홀의 가공은 절연층을 가공후에 정밀한 z축 제어로 알루미늄을 가공하였다. Nd:YVO₄ 레이저의 출

Table 1 Experimental conditions of Nd:YVO₄ laser

Laser source	Nd:YVO ₄
Wave length (nm)	532
Pulse energy (mJ)	0.21
Average power (W)	8 (at 40kHz)
Beam Diameter (mm)	1.2
Beam mode	TEM ₀₀ Gaussian



(a)



(b)

Fig. 1 (a) System layout of multilayer wafer micro machining (b) Experimental setup of Nd:YVO₄ laser

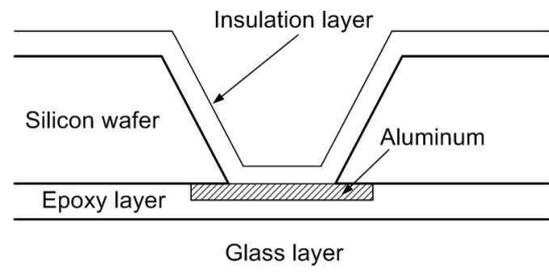


Fig. 2 Schematic of micro hole for silicon wafer

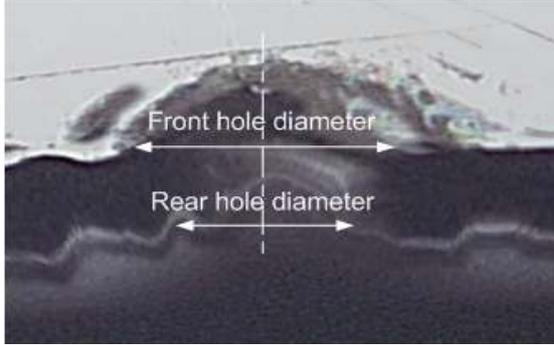


Fig. 3 Optical micrographs of micro hole in silicon wafer using Nd:YVO₄ laser (experiment condition; current: 30A, frequency: 30kHz, shot time: 1s)

력이 낮을 경우 알루미늄이 가공되지 않고, 출력이 높을 경우 알루미늄과 에폭시층을 지나 유리층에 영향을 미친다. Fig. 3은 Nd:YVO₄ 레이저 장비의 기본 조건에 대한 실리콘 웨이퍼의 전면 및 후면 비아 홀의 가공 형태를 나타낸 것이다. 본 논문에서 비아 홀 가공의 목표는 유리층의 손상 없이 1 μm의 알루미늄에 비아 홀 지름이 45 μm이다. 광학 현미경 사진에서 비아 홀의 품질을 높이기 위해 Nd:YVO₄ 레이저 가공의 공정변수 또는 비아 홀의 원형도에 대한 최적가공범위를 결정하는 것이 필요하다. 따라서 본 논문은 Nd:YVO₄ 레이저의 기본적인 출력 특성을 결정하는 전류(current), 가공 주파수(frequency), 조사시간(shot time)을 레이저 공정변수로 결정하였다.

2.2 Chebyshev 직교다항식⁽¹⁰⁾

본 논문에서 레이저 공정변수의 최적화 방법은 반응표면방법론이 포함된 실험계획법으로 구성된다. 반응표면모델에 대한 전통적인 접근의 두가지 중요한 부분은 어떤 설계점의 값이나 미분값을 이용하는 테일러(taylor series) 전개와 적분법을 이용하는 직교다항식 전개(orthogonal polynomial series)가 있다. 테일러 전개 형태는 직교다항식 전개 형태의 반응표면모델에 비해 설계변수의 범위와 응답의 변동이 작은 변화에 대해서만 적합하다.

설계변수가 직교한다는 것은 어떤 변수의 효과가 다른 변수의 효과에 영향을 미치지 않는다는 것이다. 따라서 응답의 변동크기를 해석하는 경우 (예를 들면 실험의 불확실성, 분포) 설계변수를 직교시킨 실험계획이 효율적이다. 또한 직교다항식은 각항이 서로 독립적이기 때문에 계수의 추정을 저차항에서 고차항으로 축차적으로 구한다. 이것은 고차항의 계수를 모르거나 계수차이가 크게 되더라도 기저(base)를 정규화(normalize)할 수 있

어 효율적인 회귀식의 표현이 가능하다.^(7,9,10)

본 논문의 다층 웨이퍼의 전면 및 후면 홀직경에 대한 반응표면모델은 설계변수 x 의 차수가 n 인 Chebyshev 직교다항식 $p_n(x)$ 을 이용한다. 2차 다항회귀모델 형태로 나타내면 아래의 식 (1)로 전개된다.

$$y = b_0 + b_1(x - \bar{x}) + b_2 \left[(x - \bar{x})^2 - \frac{a^2 - 1}{12} h^2 \right] + b_3 \left[(x - \bar{x})^3 - \frac{3a^2 - 7}{20} (x - \bar{x}) h^2 \right] + b_n p_n(x) + \Lambda \quad (1)$$

$$p_0(x) = 1, \quad n = 0$$

$$p_1(x) = x - \bar{x}, \quad n = 1$$

$$p_2(x) = (x - \bar{x})^2 - \frac{(a^2 - 1)}{12} h^2, \quad n = 2$$

$$p_n(x) = p_{n-1}(x)p_1(x) - (n-1)\{a^2 - (n-1)^2\} h^2 p_{n-1}(x) / [4\{4(n-1)^2 - 1\}], \quad n = 3, 4, 5, \Lambda$$

여기서 \bar{x} : 설계변수의 평균, a : 수준수, h : 수준 간격계수이다. 차수 n 은 수준수 a 보다 작아야 하며, 각 설계변수의 최대 차수는 $a-1$ 이 된다. b_0, b_i 는 회귀계수로 식 (2)로 나타낸다.

$$b_0 = T / lm = \bar{y}$$

$$b_i = \sum_{k=1}^a p_i(x_k) y_k / \sum_{k=1}^a p_i^2(x_k), \quad k = 1, 2, \Lambda, a \quad (2)$$

여기서 $p_i(x_k)$ 의 x_k 는 x 의 각 수준수, y_k 는 각 수준에 대한 해석의 평균을 나타낸다. 직교다항식을 이용하는 장점은 분산분석(analysis of variance)에 있다. 분산분석을 이용한 직교다항식은 응답의 총 변동을 1차, 2차, $n-1$ 차의 성분으로 분해하는 것이 용이하다. 따라서 각 차수의 상관관계와 민감도 평가에 의해 어떤 차수까지 표현하는 것이 적절한가의 판단을 할 수 있다.

3. 실험 결과 및 요약

3.1 실험계획법의 적용

Table 2는 레이저 공정변수와 그 수준값을 나타낸 것이다. 공정변수는 예비 실험을 통해 비아 홀 가공에 영향을 크게 미치는 전류(x_1), 주파수(x_2),

Table 2 Design variables and their levels

Variable	Description	Level 1	Level 2	Lever 3	Level 4
x_1	Current (A)	24	26	28	30
x_2	Frequency (kHz)	10	40	70	100
x_3	Shot time (s)	0.001	0.01	0.1	1

Table 3 Layout and experimental results for $L_{16}4^5$ orthogonal arrays

Exp.	x_3	x_2	x_1	Front hole d (μm)	Rear hole d (μm)
1	10	0.001	24	29.7	23.09
2	40	0.01	26	34.13	28.02
3	70	0.1	28	43.71	102.76
4	100	1	30	50.79	164.46
5	40	0.1	30	50.08	122.67
6	10	1	28	51.53	58.9
7	100	0.001	26	0	0
8	70	0.01	24	0	0
9	70	1	26	42.22	79.14
10	100	0.1	24	0	0
11	10	0.01	30	50.91	58.9
12	40	0.001	28	28.59	41.18
13	100	0.01	28	43.31	45.83
14	70	0.001	30	44.31	53.36
15	40	1	24	0	0
16	10	0.1	26	45.79	51.98

조사시간(x_3)이다. 공정변수의 수준은 레이저 장비의 성능범위에 대한 최대 및 최소값이다.

Table 3은 레이저 공정변수 3개에 대한 $L_{16}4^5$ 직교 배열표의 시험배치(design matrix)와 그 해석결과를 나타낸 것이다. Nd:YVO₄ 레이저로 가공된 홀직경의 크기 측정은 3회 실험의 평균값으로 결정하였다. Fig. 4는 $L_{16}4^5$ 의 실험결과에 대한 광학 현미경 관찰 사진을 나타낸다. 비아 홀 직경에 대한 반응표면모델은 분산분석에 유의하다고 판단되는변수와 차수항을 선택하고 Chebyshev 직교다항 계수(orthogonal polynomial coefficient)^(13,14)를 이용한다. Chebyshev 직교다항식은 저차항이 우선된 각 차수의 항이 서로 독립하고 있는 특징을 가지고 있기 때문에 고차항의 계수를 모르거나 계수차이가 크게 되더라도 계수의 추정은 저차항에서 고차항으로 축차적으로 구한다. 예를 들면, Table 4는 전면부 홀 직경에 대한 분산분석 결과를 나타낸다. 여기서 분산분석은 각 변수가 응답에 미치는 민감도를 다항식 성분으로 직교분석해서 평가한다. 같은방법으로 설계변수의 교호작용도 정량적으로 평가할 수 있다. 전면부 홀 직경에 지배적인 영향을

Table 4 Analysis of variance for front hole diameter

Design variable		Sum of Squares	DOF	Variance	F-ratio	Effective ratio(%)
x_1	Linear	3701.51	1	13.36	9.01	0.8
	Quadratic	251.51	1	13.32	8.98	0.8
	Cubic	11.8	1	13.27	8.95	0.8
x_2	Linear	684.74	1	1.79	1.21	0.1
	Quadratic	52.33	1	2.51	1.69	0.2
	Cubic	238.65	1	1.51	1.02	0.1
x_3	Linear	101.64	1	47.55	32.06	3
	Quadratic	94.3	1	245.87	233.21	21.8
	Cubic	178.59	1	342.66	231.05	21.6
x_1x_2	Interaction	493.86	1	5.54	3.74	0.3
x_1x_3	Interaction	66.2	1	360.79	243.27	22.7
x_2x_3	Interaction	14.1	1	76.48	51.57	4.8
$x_1^2x_2$	Interaction	2.27	1	9.67	6.52	0.6
$x_1^2x_3$	Interaction	354.01	1	354.01	238.7	22.3
Error		1.48	1	1.48		
Total		6247.01	15		1070.98	100

Table 5 Analysis of variance for rear hole diameter

Design variable		Sum of Squares	DOF	Variance	F-ratio	Effective ratio(%)
x_1	Linear	18557.1	1	84.7	2.79	1.7
	Quadratic	14.1	1	66.4	2.18	1.3
	Cubic	134.8	1	50.1	1.65	1
x_2	Linear	114.4	1	956.2	31.44	18.7
	Quadratic	36.9	1	933.4	30.69	18.2
x_3	Linear	3639	1	36.5	1.2	0.7
	Quadratic	3175.2	1	33.7	1.11	0.7
	Cubic	72.9	1	28.6	0.94	0.6
x_1x_2	Interaction	2909.8	1	924.5	30.4	18.1
x_1x_3	Interaction	2192.7	1	168.4	5.54	3.3
x_2x_3	Interaction	1275.6	1	841	27.66	16.4
$x_1^2x_2$	Interaction	1127.7	1	875.3	28.78	17.1
$x_1^2x_3$	Interaction	112.5	1	122.5	4.06	2.4
Error		60.8	1	60.8		
Total		33433.5	14		1070.98	100

미치는 설계변수는 조사시간(x_3)으로 전면부 홀 특성에 미치는 영향은 46.6%이다. 또한 전류나 주파수보다는 전류와 조사시간의 교호작용 x_1x_3 의 영향이 45%로 매우 높다. 이와 반대로, 후면부 홀 직경(See Table 5)에 영향을 많이 미치는 공정변수는 주파수(x_2)로 36.9%의 크기를 가진다. 교호작용도 x_2 와 관련된 x_1x_2 의 영향이 35.2%이고 x_1x_3 의 영향이 16.4%의 크기를 가진다. 분산분석을 기반

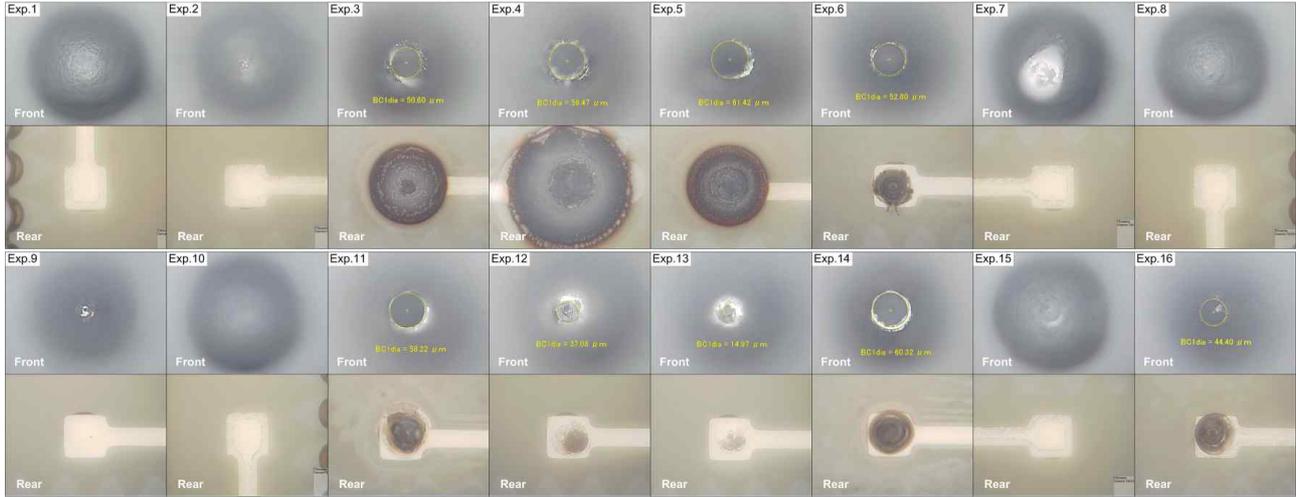


Fig. 4 Optical Micrographs and experimental results for $L_{16}4^5$ orthogonal arrays

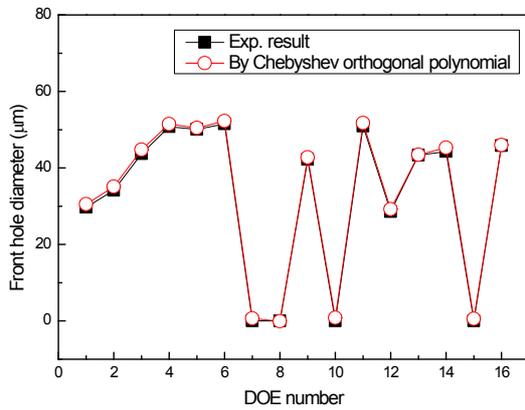


Fig. 5 Relation Between rear hole diameter and run number in DOE

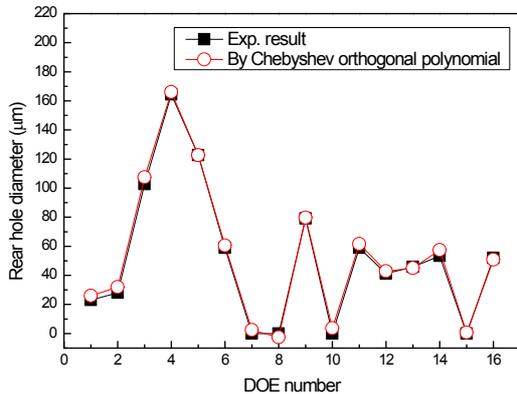


Fig. 6 Relation between rear hole diameter and run number in DOE

으로 설계변수의 유의한 차수와 교호작용을 고려해서 전면 및 후면부 홀 직경, 전후면부 직경 차이에 대한 근사모델을 나타내면 식 (3)~(5)와 같다.

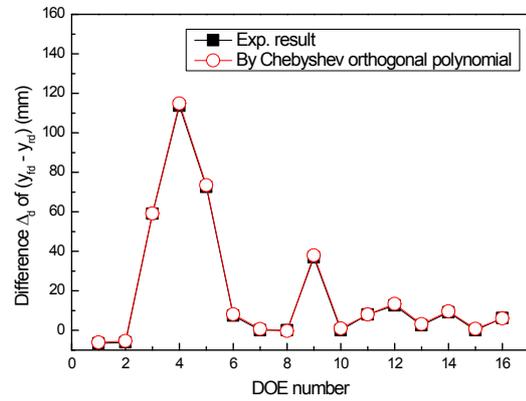


Fig. 7 Relation between difference Δ_d and run number in DOE

$$y_{fh} = 3979 - 442.7x_1 + 16.51x_1^2 - 0.20459x_1^3 + 2.626x_2 + 0.005064x_2^2 - 0.000024x_2^3 - 1457.5x_3 - 21837x_3^2 + 19691x_3^3 - 0.3468x_1x_2 + 269.17x_1x_3 + 0.25032x_2x_3 + 0.008539x_1^2x_2 - 4.9951x_1^2x_3 \quad (3)$$

$$y_{rh} = 10956 - 1107.7x_1 + 36.67x_1^2 - 0.3958x_1^3 - 60.17x_2 - 0.011565x_2^2 - 942.5x_3 - 6752x_3^2 + 5633x_3^3 - 4.47x_1x_2 + 136.01x_1x_3 + 0.8149x_2x_3 - 0.08101x_1^2x_2 + 2.18x_1^2x_3 \quad (4)$$

$$y_{\Delta_d} = 10572 - 1139.4x_1 + 40.535x_1^2 - 0.47634x_1^3 - 28.198x_2 - 0.006184x_2^2 - 2233.2x_3 - 12911x_3^2 - 12030x_3^3 - 2.1801x_1x_2 - 284.02x_1x_3 + 7.573x_2x_3 - 0.04086x_1^2x_2 + 6.0954x_1^2x_3 - 0.07135x_2^2x_3 \quad (5)$$

Fig. 5~7은 식 (3)~(5)의 근사모델과 실험결과를 비교한 것이다. 근사값의 오차는 존재하지만 근사값의 위치와 실험값이 효과적으로 근사되고 있다.

Table 6 History of optimal solution for laser micromachining

Iteration	x_1 (A)	x_2 (kHz)	x_3 (s)	Front hole diameter (μm)	Rear hole diameter (μm)	Difference Δ_d (μm)
1	8.3356	92.651	0.30477	43.049	834.92	3328.2
2	8.8082	100	0.29223	109.1	630.71	3086.7
3	8.5285	100	0.30045	45.967	606.47	3116.7
4	24.988	100	0.024089	29.361	1.2926	23.778
5	25.392	95.524	0.067308	48.095	42.925	12.508
6	25.376	95.613	0.072621	44.804	44.145	9.2601
7	25.376	95.612	0.072703	44.748	44.171	9.2007
8	25.376	95.611	0.072786	44.692	44.196	9.1411
9	25.376	95.610	0.072951	44.580	44.247	9.0215
10	25.376	95.609	0.073033	44.523	44.273	8.9615
11	25.377	95.608	0.073116	44.298	44.298	8.9013
Opt.	25.376	95.614	0.072456	44.093	44.093	9.3787

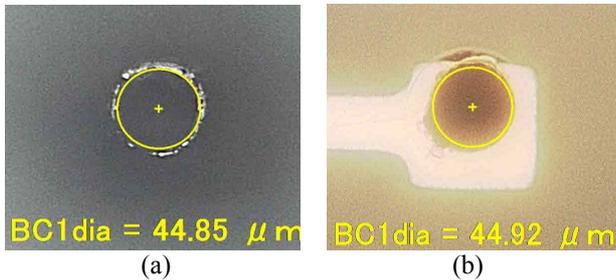


Fig. 8 Optical micrographs for optimal condition: (a) front hole diameter (b) rear hole diameter

이상의 과정에 대한 근사모델의 정확도는 수정결정계수 R_{adj}^2 으로 평가되는데 각각 99.98%, 99.82%, 99.99% 근사화는 좋은 품질을 나타낸다.

3.2 다층 웨이퍼의 비아 홀의 최적화

다층 웨이퍼의 비아 홀 가공의 가공품질은 전면부 직경과 후면부 직경의 크기가 동일해야 한다. 본 논문에서 실리콘 웨이퍼의 전면부 및 후면부 직경의 크기 차이 Δ_d 를 최소로 하는 공정변수의 최적설계를 다음과 같이 정식화 하였다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } \Delta_d \text{ of } |y_{fh} - y_{rh}| \\
 & \text{Subject to } y_{fh}(x_i) \leq 45 \mu\text{m} \\
 & \quad y_{rh}(x_i) \leq 45 \mu\text{m} \\
 & \quad x_i^{lower} \leq x_i \leq x_i^{upper}, \quad i=1,2,3
 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $y(x_i)$ 는 전면 및 후면 홀 직경이다. 첫 번째와 두 번째 제한조건은 비아 홀에 대한 목표값의 조건이다. 최적해는 유용방향법(feasible direction

method)⁽¹⁵⁾을 이용하여 계산하였다.

Table 6은 유용방향법을 이용한 최적해 결과를 요약한 것이다. 본 논문의 다층 웨이퍼의 경우 하부 유리층 손상 없이 다층 웨이퍼의 적정한 가공 영역은 전류 25 A, 주파수 95 kHz, 조사시간 0.072 s의 범위이다. 하지만 좀 더 정밀한 가공을 위해서는 각 공정변수의 소수점 이하 자리도 고려해서 공정변수의 조건을 결정할 필요가 있다.

Fig. 8은 공정변수의 최적조건(전류 x_1 : 25.376 A, 가공 주파수 x_2 : 95.614 kHz, 주사시간 x_3 : 0.072456 s)에 대한 비아 홀 직경의 광학 현미경 관찰 사진을 나타낸다. 전면 및 후면부 홀의 형상은 거의 원형에 가깝고 홀의 테두리도 정밀하게 가공되었다. LED 또는 MEMS 소자의 비아 홀 가공시 문제가 되는 홀 주변의 원하지 않는 열팽창이나 전면 및 후면부 홀 직경차이의 오차는 크지 않고 제작 신뢰성에도 유용한 것으로 평가된다.

본 논문에서, Nd:YVO₄ 레이저를 이용한 실리콘 웨이퍼의 비아 홀 가공에 대한 제한적인 결과로부터 전면 및 후면부 홀 직경 차이를 좀 더 줄이고 비아 홀 원형도를 향상시키기 위해서는 가공변수의 개별 조건보다는 조사시간과 전류, 조사시간과 가공 주파수의 상호작용을 고려한 적절한 조합이 더 중요하다고 판단된다.

4. 결론

Nd:YVO₄ 레이저를 이용한 실리콘 웨이퍼의 비아 홀 가공에 대한 공정변수의 최적화를 수행하였다. 레이저 공정변수의 최적화 방법은 반응표면모델이 포함된 실험계획법을 적용하고 최적설계기법

을 응용해서 목표 직경 45 μ m의 비아 홀을 가공하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) Chebyshev 직교다항식과 최적화 방법을 이용해 전면 및 후면부 비아 홀 직경의 요구조건에 대한 효율적인 최적화가 가능하였다. 따라서 다양한 재질의 비아 홀 가공에 대해서도 최적화 방법을 응용해서 가공 영역과 특성을 분석하면 가공 정밀도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 실리콘 웨이퍼의 전면 홀 직경의 가공 정밀도에 영향을 미치는 영향은 주사시간이 46.4%로 매우 높고 전류와 주사시간의 교호작용도 45%로 영향이 크다. 후면 홀 직경은 주사시간은 2%로 영향이 거의 없고 가공 주파수가 36.9%로 영향이 가장 크다.

(3) 하부 유리층 손상 없이 본 논문의 실리콘 웨이퍼의 공정변수 최적조건은 전류 25A, 주파수 95kHz, 조사시간 0.072sec의 범위이다.

(4) 비아 홀 가공의 품질을 높이기 위해서는 가공변수의 개별 조건보다는 조사시간과 전류, 가공 주파수와 조사시간의 적절한 조합이 더 중요하다.

후 기

이 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Kim, N. S., Chung, Y. D. and Seong, C. Y., 2010, "Laser Micro-drilling of Sapphire/silicon Wafer using Nano-second Pulsed Laser," *J. KSPE*, Vol. 27, No. 2, pp. 13~19.
- (2) Hirogaki, T., Aoyama, E., Ogawa, K. and Matsutani, S., 2007, "Circuit Connection Reliability Analysis of Laser-Drilled Blind Via holes Using Data-Mining Method," *ASME 2007 InterPACK Conference*, Vol. 2, Vancouver, British Columbia, Canada, pp. 603~610.
- (3) Jin, J. K. and Kwon, S. J., 2009, "Fabrication and Performance Test of MEMS Catalytic Combustors Using Photosensitive Glass Wafer," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 33, No. 3, pp. 237~242.
- (4) Seo, W., Park, J. H., Lee, J. Y., Cho, M. K. and Kim, G. S., 2009, "Via Cleaning Process for Laser TSV Process," *J. Microelectron. Packag. Soc.*, Vol. 16, No. 1, pp. 45~50.
- (5) Han, E. K., Park, T. W., Lee, B. S., Lee, M. H. And Lim, H. S., 1992, "The Effects on Cutting Performance by Machining Parameters of Nd:YAG Laser," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 16, No. 1, pp. 1~12.
- (6) Kim, K. W., Lee, J. H., Suh, J. and Cho, H. Y., 2007, "Finite Element Analysis for Prediction of Based Shape of Nd:YAG Laser Fillet Welding," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 31, No. 8, pp. 839~846.
- (7) Yu, Q, Koizumi, N., Yajima, H. and Shiratori, M., 2001, "Optimum Design of Vehicle Frontal Structure and Occupant Restraint System for Crashworthiness (A Multilevel Approach Using SDSS)," *JSME Int. J. Ser A, Solid Mech Mater Eng*, Vol. 44, No. 4, pp. 594~601.
- (8) Baek, S. H., Hong, S. H., Cho, S. S. and Joo, W. S., 2004, "Multi-objective Optimization in Discrete Design Space using RSM-Based Approximation Method," *The Third China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems (CJK-OSM3)*, Japan, pp. 125~130.
- (9) Baek, S. H., Cho, S. S., Kim, H. S. and Joo, W. S., 2006, "Trade-off Analysis in Multi-objective Optimization Using Chebyshev Orthogonal Polynomials," *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 20, No. 3, pp. 366~375.
- (10) Baek, S. H., Cho, S. S. and Joo, W. S., 2009, "Response Surface Approximation for Fatigue Life Prediction and Its Application to Multi-Criteria Optimization With a Priori Preference Information," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 33, No. 2, pp. 114~126.
- (11) URL: www.yucooptics.com/
- (12) Wei, J., Qi, G. J., Wang, Z. F., Jin, Y. F., Lim, P. C. and Wong, C. K., 2003, "A Packaging Solution for Pressure Sensor MEMS," *ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2003)*, Washington, DC, USA, pp. 113~118.
- (13) Park, S. H., 1996 *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*, Chapman & Hall.
- (14) Baek, S. H., Hong, S. H., Joo, W. S., Kim, C. K., Jeong, Y. Y. and Shin, S. W., 2008, "Optimization of Process Parameters for Mill Scale Recycling Using Taguchi Method," *J. KSPE*, Vol. 25, No. 2, pp. 88~95.
- (15) ANSYS, 2007, *Release 11.0 Documentation*, SAS IP, Inc.