

웨이퍼 스텝퍼의 정렬정확도 측정에 관한 연구

이 종 현\*, 장 원 익\*\*, 이 용 일\*\*, 김 도 훈\*\*, 최 부 연\*\*  
 남 병 호\*\*\*, 김 상 철\*\*\*, 권 진 혁\*\*\*

Measurement methodology for the alignment accuracy of wafer stepper

Jong-Hyun Lee\*, Won-Ick Jang\*\*, Yong-Il Lee\*, Doh-Hoon Kim\*\*,  
 Boo-Yeon Choi\*\*, Byung-Ho Nam\*\*\*, Sang-Cheol Kim\*\*\*, Jin-Hyuk Kim\*\*\*

ABSTRACT

To meet the process requirement of semiconductor device manufacturing, it is necessary to improve the alignment accuracy in exposure equipments. We developed the excimer laser stepper and will describe the methodology for alignment measurement and experimental results. Our wafer alignment system consists of off-axis optics, TTL(Through The Lens) optics and high precision stage. Off-axis alignment utilizes the image processing and/or diffraction from the align marks of off-centered chip area. On the other hand, TTL alignment can be used for the die-by-die alignment using dual beam interferometry. When only off-axis alignment was used, the experimental alignment error ( $|m| + 3\sigma$ ) was 0.26-0.29 $\mu$ m, and will be reduced down to 0.15  $\mu$ m by adding TTL alignment.

**Key Words** : wafer stepper (웨이퍼 스텝퍼), alignment optics (정렬광학계), alignment accuracy (정렬정확도)

1. 서 론

반도체 기억소자의 급격한 발전추세에 대응하기 위해서는 가장 핵심적인 공정인 미세패턴 형성에 대한 기술 발전이 이루어져야 한다. 패턴형성을 담당하는 반도체 노광(exposure) 장비의 주류는 스텝퍼(stepper)이며 이 장비의 주요성능에는 해상도(resolution), 노광영역(field size) 및 중첩정확도(overlay accuracy) 등이 있다(1). 여러번의 패턴형성 과정이 필요한 반도체 제작공

정에서는 전자회로 패턴이 위아래로 정확하게 맞추어져 형성되는 것이 매우 중요하다. 이와 관련된 스텝퍼의 성능이 중첩정확도이며, 일반적으로 64M DRAM(Random Access Memory) 이상에서 최소 패턴의 1/4 이하의 중첩오차가 요구되고 있다(2).

이와 같이 정확한 중복노광을 위해서는 정렬 마크의 위치를 검출하는 정렬광학계와 웨이퍼를 정확하게 위치시킬 수 있는 웨이퍼 구동계가 필요하며, 중첩오차중 이 두요소에 의한 오차성분이 정렬오차 즉 정렬정확도

\* 한국전자통신연구소, 노광기술연구소(정회원)

\*\* 한국전자통신연구소, 노광기술연구소

\*\*\* 영남대학교, 물리학과

(alignment accuracy)가 된다. 정렬광학계로서 많이 사용되고 있는 현미경 시스템은 투영광학계와 무관하게 설계될 수 있다는 간편함이 있으나, 웨이퍼를 정렬한 후 다시 노광위치로 움직여야 하는 비축(off-axis)노광 방식이 된다. 따라서 이 경우에는 웨이퍼 구동계의 성능이 정렬정확도에 큰 영향을 주게 되므로 기억소자의 고집적화에 따라 웨이퍼 구동계의 위치정확도에 대한 요구규격이 보다 엄격해진다<sup>(3)</sup>. 이에 따라 정렬광이 투영광학계를 통과하는 (TTL : Through The Lens) 정렬방식을 이용하므로써 노광영역이 바뀔 때마다 다시 정렬을 수행하는(field-field 또는 die-die) 방식의 필요성이 대두되고 있다<sup>(4)</sup>.

본 연구실에서는 64M DRAM 제조에 사용가능한 스텝퍼 시스템을 개발하였으며, 이 중에서 웨이퍼 정렬계는 off-axis 및 TTL 광학계와 이들 정렬신호에 따라 움직이는 웨이퍼 구동계로 구성되어 있다. 개발된 스텝퍼의

정렬특성 평가는 PR을 입힌 웨이퍼의 노광 및 현상공정(exposure and developing process)을 통하여 측정이 가능하다. 이와 같은 정렬실험에 있어서는 마스크 제조오차, 레티클 위치오차 및 배율오차 등 다른 요인에 의한 오차가 제거된 순수한 정렬오차만을 측정하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 개발된 웨이퍼 정렬계의 특성평가를 위하여 이에 대한 정렬정확도 측정방법 및 그 실험결과에 대하여 기술한다.

## 2. 장비의 구성

개발된 노광장비는 KrF엑시머 레이저(excimer laser)를 광원으로 사용하며, 이것을 마스크에 비추면 이위에 있는 미세한 전자회로 패턴이 투영광학계에 의하여 1/5로 축소되어 웨이퍼 위의 감광막(PR : photo resist)에 새겨진다. 이때의 레티클 및 웨이퍼의 정확한

Table 1 개발된 엑시머 레이저 스텝퍼의 구성 요소

모 들 명	구 성 요 소	내 용 설 명
노광계	광원계 빔 전송계 조명광학계 투영광학계	파장 248.4 nm의 KrF 엑시머 레이저임. attenuator, dose sensor 레이저 빔 위치 조정을 위한 반사경 3개로 구성되어 있음. 레티클 위에 균일한 조명을 할 수 있도록 빔 expander, Kaleidoscope, zoom lens, fly's eye lens, condenser lens로 구성되어 있음. 마스크의 레티클 패턴을 1/5로 축소투영하여 웨이퍼 위에 전사함.
정렬광학계	레티클광학계 웨이퍼광학계 초점/수평광학계	레티클의 x, y, $\theta$ 방향에 대한 위치를 측정함. 웨이퍼의 x, y, $\theta$ 방향에 대한 위치를 측정하며, off-axis와 TTL의 두가지 정렬방법이 가능함. 웨이퍼의 수직(z) 및 기울어짐( $\alpha, \beta$ )을 측정함.
구동계	레티클구동계 웨이퍼구동계 웨이퍼운송계	레티클의 평면방향(x, y, $\theta$ )과 수직방향(z, $\alpha, \beta$ )의 위치조정이 가능함. 웨이퍼의 평면방향(x, y, $\theta$ )과 수직방향(z, $\alpha, \beta$ )의 위치조정이 가능함. 웨이퍼 정렬을 위한 전정렬(pre-align)을 수행한 후, robot에 의하여 웨이퍼 구동계로 반송됨.
제어계	제어 H/W 제어 S/W	각 모듈에 대한 신호처리를 함. 자동노광, 웨이퍼 정렬, 웨이퍼 반송을 수행함.
기타	시스템 frame 환경 챔버	각 모듈을 구조적으로 연결함. 투영광학계와 측정계의 안정화를 위하여 온도, 습도, 압력을 측정/조절하며, 청정도를 올리기 위하여 공기여과기가 설치되어 있음.

위치조정은 정렬광학계의 측정을 웨이퍼 구동계의 움직임으로 이루어지며, 이와같은 과정이 반복(step & repeat) 됨으로써 웨이퍼 전체에 대한 노광공정을 수행한다

구체적인 스텝퍼 제작내용 및 구성요소를 Table 2.에 설명하였으며 Fig.1, Fig.2에 개발된 스텝퍼의 외관 및 제어계의 구조를 보였다.

### 3. 웨이퍼 정렬광학계의 구성

정렬계는 마스크의 위치를 제어하는 레티클 정렬계와 웨이퍼의 위치를 제어하는 웨이퍼 정렬계로 분류되며, 각 정렬계는 위치측정을 위한 정렬광학계, 위치조정을 위한 구동계 및 제어계로 구성된다. 본 장에서는 웨이

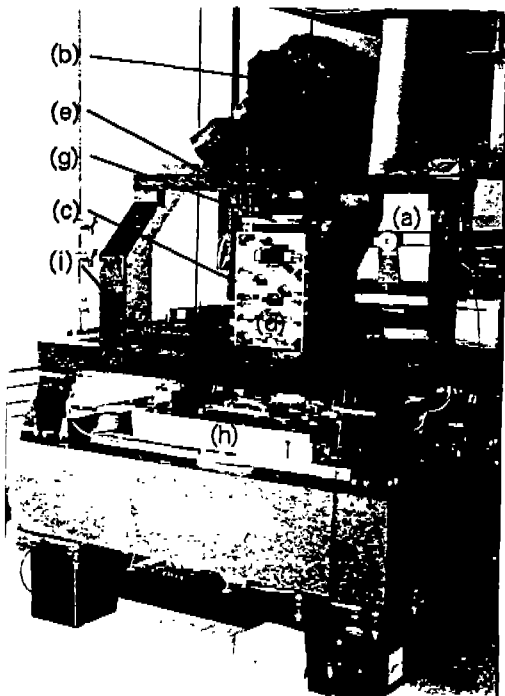


Fig.1 Overall picture of the developed excimer laser stepper

- (a) KrF laser, (b) illumination optics, (c) projection optics, (d) off-axis optics, (e) TTL optics, (f) focus/level optics, (g) reticle stage, (h) wafer stage, (i) system frame

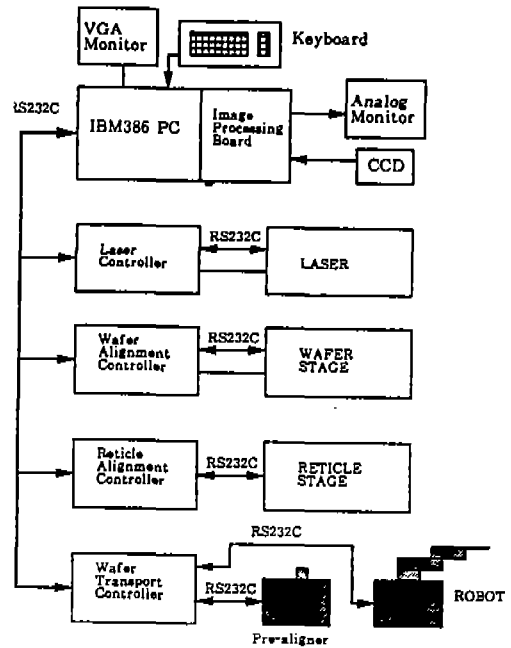


Fig.2 Structure of the controllers for the developed excimer laser stepper

퍼 정렬광학계로서 개발된 off-axis 및 TTL정렬광학계의 구조 및 특성등에 관하여 기술한다. 제작된 정렬광학계는 웨이퍼 스텝퍼에 실제로 장착되어 실험되었으며, 정렬광학계에서 추출된 광신호는 photo diode 등에 의하여 전기적 신호로 변환된다. 각 전기적 신호는 아날로그 증폭회로를 거친 후 A/D 변환되며, 최종적으로 정렬용 PC와 연결되어 웨이퍼 구동계가 움직이도록 설계되었다.

#### 3.1 off-axis 정렬광학계

Off-axis 정렬계는 Fig.3과 같이 화상처리와 회절의 두 가지 방식이 가능하도록 설계 제작되었다. 화상처리 방식은 fiber를 통하여 조명된 정렬마크의 형상이 CCD camera에 의하여 측정되고 있으며, Fig.4에 정렬되지 않은 상태(왼쪽)와 정렬된 상태(오른쪽)를 보였다. 반면 회절 방식은 He-Ne laser로 조명된 정렬 마크에서 회절신호가 반사된 후 photo diode에 신호가 검출되는 원리를 이용하고 있다. 이와같이 화상정보에 의한 정렬 방법은 정렬마크의 대칭성, 표면조건 등에 비교적 영향을 적게 받는 반면, 회절방식은 정렬 신호의 S/N 비가

큰 장점을 가지므로 상호 보완적인 장점을 갖는다. 정렬계의 위치검출 분해능을 측정된 결과 화상처리방식과 회절광 방식에서 각각  $0.2\mu\text{m}$ ,  $0.15\mu\text{m}$ 이하를 보였으며, 이때 정렬광학계의 초점심도는  $\pm 10\mu\text{m}$  정도였다. 이상의 off-axis 정렬은 자체로서 독립적인 정렬방법으로 사용될 수 있지만, 정렬정확도를 개선하기 위한

TTL 정렬에서 TTL 정렬마크가 측정범위에 들어가기 위한 전정렬(pre-align)에도 이용될 수 있다.

### 3.2 TTL 정렬광학계

기존의 TTL 정렬방식은 노광광의 단파장화에 따라 정렬광과의 파장차이에 의한 색수차가 심해져 더이상 상(image)의 전송방식에 의한 정렬방법이 어려워진다. 이에 따라 색수차에 영향을 받지 않는 정렬방법으로 홀로그래피 방식에 의한 위상공액파(phase conjugate wave)를 정렬광으로 이용하는 방법등이 제안되고 있다

(5) 본 연구에서의 TTL 정렬광학계의 구성은 Fig. 5와 같으며, He-Ne laser로 조명된 두 정렬광중 왼쪽 조명광의 +1차 회절광과 오른쪽 조명광의 -1차 회절광이 일치하도록 함으로써, 두 정렬광의 간섭(interference) 패턴과 정렬마크의 상대적인 위치에 따라 정렬신호가 검출되는 원리를 이용하고 있다. Fig. 6에 개발된 스텝

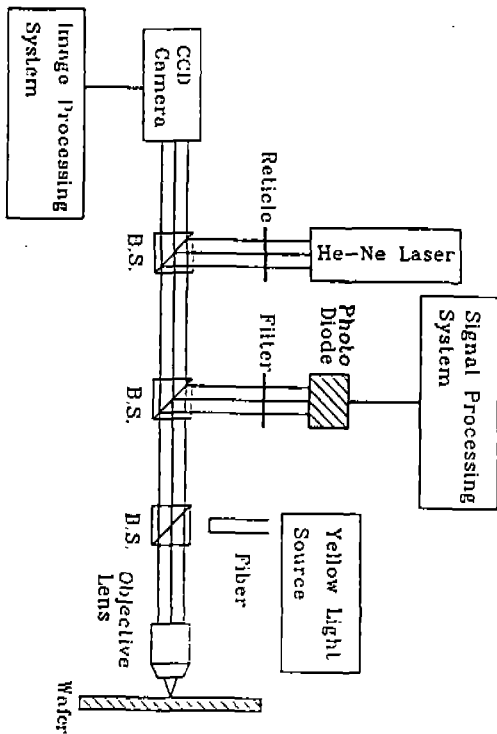


Fig.3 The schematics of off-axis alignment optics

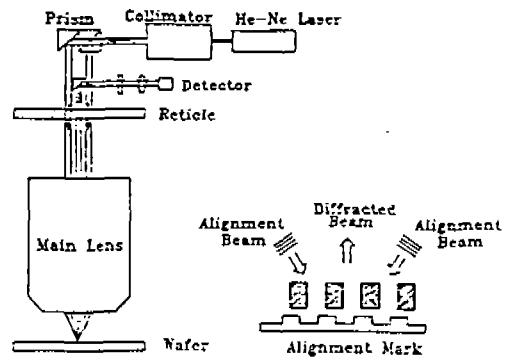


Fig.5 The schematics and principle of TTL alignment optics

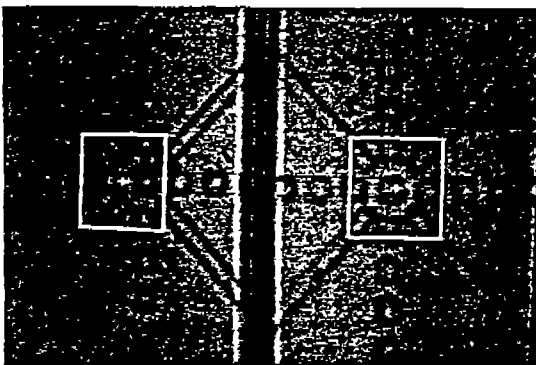


Fig.4 The microscope image of off-axis image processing (1 pixel =  $0.2\mu\text{m}$ )

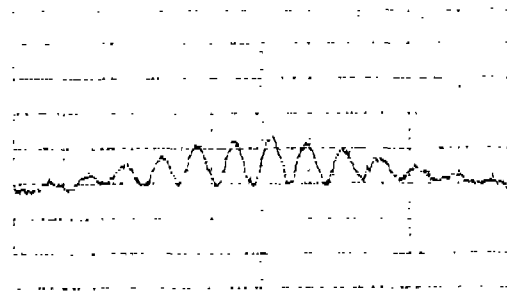


Fig.6 Alignment signal of TTL optics ( $x : 1\mu\text{m}/\text{div}$ ,  $y : 5\text{mV}/\text{div}$ )

퍼 시스템에 부착되어 실험된 정렬신호를 보였으며, 정렬마크의 주기성에 따라 정렬신호가 반복적으로 측정되고 있다. 정렬신호의 왜곡이 도포된 PR의 상태에 따라 나타나고 있으나, 신호의 주기성을 이용한 평균치를 계산함으로써 이를 개선할 수 있다.

#### 4. 측정방법

##### 4.1 시험 레티클 설계

설계제작된 시험 레티클은 정렬노광을 위한 어미자(main scale), 아들자(vernier scale)로 이루어져 있다. 그밖에 마스크 및 웨이퍼 정렬을 위한 마크들도 같이 배치되어 있으며, 측정항목에 따라 어미자, 아들자를 선택하여 사용할 수 있다. 제작된 시험 레티클의 크기는 5inch, 두께는 2mm이며, 패턴은 chrome으로 만들어져 있다. 개발된 스텝퍼(모델명 : ELS-1000/1542K)에서 노광이 가능한 영역은 레티클상에서 106mm(웨이퍼상에서 21.2mm)이며, 실제의 소자영역을

나타내는 테두리의 크기는  $50 \times 100 \text{mm}^2$ (웨이퍼상에서는  $10 \times 20 \text{mm}^2$ )이다.

어미자 및 아들자의 구조는 Fig. 7과 같으며, x, y방향으로  $0.1 \mu\text{m}$ 이하의 정렬정확도를 측정할 수 있다. 마스크의 어미자는 Fig. 8에 보인 바와 같이 4mm를 주기로 횡방향 3줄, 종방향 5줄, 모두 15개가 배치되어 있으며, 아들자는 좌측으로 1.5mm 치우쳐 있다. 이상의 시험 레티클은 패턴이 음각 즉 투명하게 제작되어 있으므로 양성감광제(positive PR)를 사용하면, 어미자와 아들자의 패턴형성이 동일 감광제위에서 이루어질 수 있다. 따라서 이 실험방법은 마스크 제작오차 및 레티클 정렬오차가 배제된 상태에서 순수하게 정렬계의 특성만을 평가하는 경우에 이용될 수 있으며, 이때는 레티클의 교체가 없어도 무방하다. 제작된 시험 레티클은 그밖에 레티클과 웨이퍼의 구동 및 정렬 특성의 평가에도 사용될 수 있으며, 투영광학계에 대해서는 왜곡(distortion)을 측정할 수 있다.

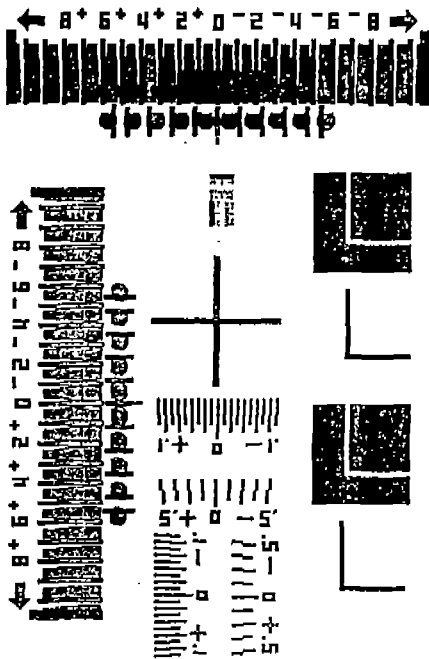


Fig. 7 Design of main and vernier scales for alignment measurement  
(main scale period :  $12 \mu\text{m}$ , vernier scale period :  $11.9 \mu\text{m}$ )

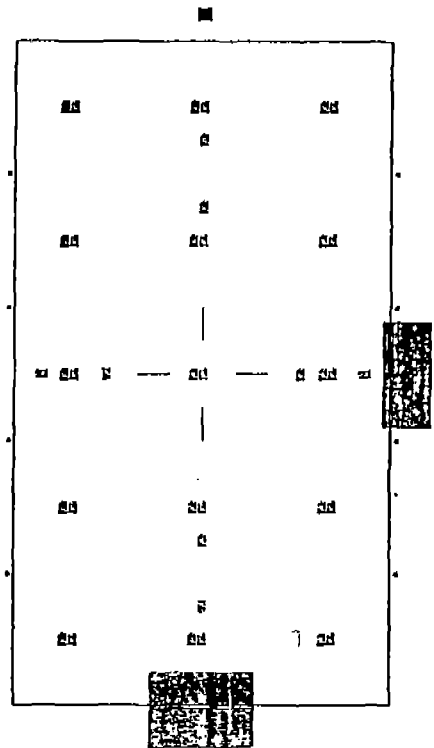


Fig. 8 The layout of main and vernier scales for alignment measurement

4.2 off-axis 정렬실험 순서

① 정렬마크 제작을 위한 노광

- PR이 입혀진 웨이퍼를 웨이퍼 척(chuck)에 얹는다.
- 정해진 두개의 위치에 정렬마크 제작을 위한 노광을 한 후, 현상(developing), 식각(etching)공정을 수행한다.

② 어미자 제작을 위한 노광

- 웨이퍼를 척위에 다시 얹는다.
- 스테이지 위치를 정렬마크가 보이는 기준위치로 이동한다.
- 기억된 왼쪽 및 오른쪽 정렬마크와 비교하여 맞춘 다음, 이때의 스테이지 좌표 AMS1(x, y)을 기억한다.
- 표준 노광화일에 따라 어미자 제작을 위한 노광을 한 후, 현상, 식각공정을 수행한다.

③ 아들자 제작을 위한 노광

- 스테이지 위치를 정렬마크가 보이는 기준위치로 이동한다.

- 기억된 왼쪽 및 오른쪽 정렬마크와 비교하여 맞춘 다음, 이때의 스테이지 좌표 AMS2(x, y)를 기억한다.
- $\delta_{AMS} = AMS_2(x, y) - AMS_1(x, y)$ 을 계산한다.
- $\delta_{AMS}$ -vernier 편이값(0.3mm) 만큼 이동된 노광 화일을 만든다.
- 새로 만들어진 노광 화일에 따라 아들자 제작을 위한 노광을 한 후, 현상, 식각공정을 수행한다.

5. 실험결과 및 분석

본 실험에서 시행된 정렬정확도 실험은 기본적으로 웨이퍼 정렬계의 특성분석을 위해 시행되었으며, 양성 감광막(positive PR)을 사용하면 시험 레티클 1장으로 실험이 가능하다. 정렬정확도에 대한 실험결과와 Fig. 9와 같으며, 각 노광영역에서 위에 있는 수치는 x방향, 아래 있는 수치는 y방향의 오차이다. 그림에서 알 수 있듯이, x방향의 최대 오차는  $-0.2\mu m$ , 최소 오차는  $-0.05\mu m$ 이며, y방향의 최대 오차는  $-0.2\mu m$ , 최소 오차는  $0\mu m$ 이다. 오차의 분포중심은 x방향으로  $-0.113\mu m$ , y방향으로  $-0.110\mu m$  만큼 이동되어 있으며, 분포의 99.7%를 나타내는  $3\sigma$  값은 x, y방향 각각에 대하여  $0.147\mu m$ ,  $0.182\mu m$ 로 계산된다.

중첩정확도에 영향을 주는 요소로는 마스크 오차, 정렬 마크의 형상오차, 웨이퍼 자체의 변형오차, 정렬광학계의 측정오차 및 구동계의 위치오차<sup>(6)</sup> 등을 들 수 있으나, 본 연구에서는 정렬광학계 및 구동계에 의한 오차만을 추출하였다. 이중에서 정렬광학계 자체의 움직임으로 인한 기준선 이동(baseline shift) 등은 정렬정확도의 분포에 전체적인 편이값(offset)을 주며, 이것은 Fig.9에서도 찾아 볼 수 있다. 이 오차는 시스템 구조물 및 주위환경의 변화를 제어하면 제거될 수 있으며, 이 경우 측정자료는 보다 정상적인 가우스(Gauss) 분포를 갖게 된다.

다음은 이와 같은 정렬정확도, 즉 inter-field 정렬정확도에 대한 측정자료를 분석하도록 한다. 먼저 x, y 및  $\theta$ 의 3방향에 대한 편이값 성분을 분리하기 위하여, 각 방향의 보정량을  $\delta x$ ,  $\delta y$  및  $\delta\theta$ 라고 하면 이때의 i번째 field에 대한 x, y방향의 정렬정확도  $\epsilon_{xi0}$ ,  $\epsilon_{yi0}$ 는 다음 (1), (2)식과 같이  $\epsilon_{xi1}$ ,  $\epsilon_{yi1}$ 으로 변화된다.

$$\epsilon_{xi1} = \epsilon_{xi0} - \delta\theta \cdot y_i + \delta x_i \quad (1)$$

$$\epsilon_{yi1} = \epsilon_{yi0} + \delta\theta \cdot x_i + \delta y_i \quad (2)$$

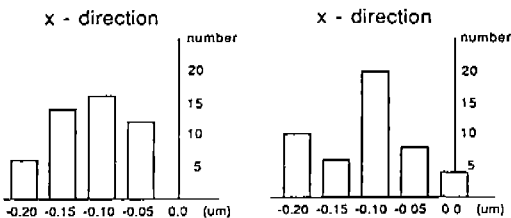
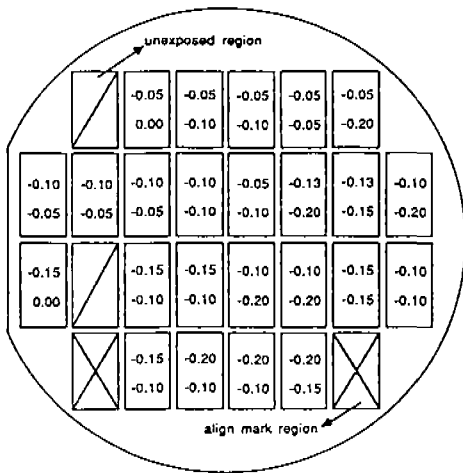


Fig.9 The x, y distribution of alignment error in case of off-axis alignment

여기서  $x_i, y_i$ 는 웨이퍼 중심을 기준으로 한  $i$ 번째 field의 좌표값이다. 따라서 각 field에 대한  $\epsilon_{xi1}, \epsilon_{yi1}$ 의 제곱합은 (3)식의 F값으로 표현되며,  $\delta x, \delta y$  및  $\delta\theta$ 를 F값이 최소가 되는 조건으로부터 구하기 위한 관계식은 (4), (5), (6)식이 된다.

$$F = \sum_{i=1}^n \{ \epsilon_{xi1}^2 + \epsilon_{yi1}^2 \} \quad (3)$$

$$\partial F / \partial \delta x = 0 \quad (4)$$

$$\partial F / \partial \delta y = 0 \quad (5)$$

$$\partial F / \partial \delta \theta = 0 \quad (6)$$

위와 같이 구한  $\delta x, \delta y$  및  $\delta\theta$ 를 다시 (1), (2)식에 대입하면 이로 인한 오차의 영향이 제거되며, 이와 같이 하여 남은 값은 잔류오차가 된다. 매 실험마다  $\delta x, \delta y$  및  $\delta\theta$  값이 일정하게 나타날 경우의 편이값은 제거가 가능하며, 이 과정 후의 잔류오차는 정렬광학계의 측정오차 및 배율오차 등에 의한 것이므로 웨이퍼 정렬에 관련된 s/w의 보정으로는 오차제거가 불가능하다.

이와 같은 편이값이 제거될 경우, x방향의 최대 오차는  $0.047\mu\text{m}$ , 최소 오차는  $-0.033\mu\text{m}$ , 그리고 y방향의 최대 오차는  $0.091\mu\text{m}$ , 최소 오차는  $-0.084\mu\text{m}$ 로 나타난다.  $3\sigma$  값은 x, y방향에 대하여 각각  $0.069\mu\text{m}, 0.127\mu\text{m}$ 이며, 평균값은 모두 0(zero)가 된다. Table 2.는 이상의 결과를 요약한 것이며, 같은 공정조건 아래에서 충분히 실험된 편이값이라면 s/w적인 보정을 통하여 정렬정확도를 개선할 수 있음을 보여준다.

Table 2. Analysis of alignment data (unit :  $\mu\text{m}$ )

direction	m	$3\alpha$	$ m  + 3\alpha$	residual error
x	-0.113	0.147	0.260	0.069
y	-0.110	0.182	0.292	0.127

## 6. 결 론

반도체 기억소자의 급격한 발전추세에 대응하기 위해서는 노광(exposure) 장비의 정렬정확도(alignment accuracy)가 같이 개선되어야 한다. 본 연구에서는 64MDRAM 제조를 목적으로 개발된 스텝퍼(stepper)

시스템의 성능평가 항목중에서 정렬정확도에 대한 측정 방법 및 현재까지의 연구결과를 기술하였다. 제작된 웨이퍼 정렬계는 off-axis 및 TTL 광학계와 이들 정렬신호에 따라 움직이는 웨이퍼 구동계로 구성되어 있다. off-axis 광학계는 화상처리와 회절의 두 가지 방식이 가능하도록 설계 제작되었으며, TTL 광학계는 HeNe 정렬광의 간섭원리를 이용하였다.

본 실험에서는 마스크 제작오차 및 레티클 정렬오차를 고려하지 않고 순수하게 정렬계의 특성만을 평가하였다. 현재까지 off-axis 정렬 방법만으로 얻은 정렬정확도는  $0.26\text{--}0.29\mu\text{m}$  ( $|m| + 3\sigma$ )이며, CCD(Charge Coupled Device)의 한계 해상도가  $0.2\mu\text{m}$ 이고 그밖의 다른 오차요소들을 감안할 때 웨이퍼 전체에 대한 실험 결과로서 만족할 만한 정확도임을 알 수 있다. 따라서 이미 제작되어 있는 TTL 정렬정확계를 추가로 사용하면  $0.15\mu\text{m}$  이하의 정확도를 달성할 것으로 예측된다.

\*본 연구는 상공부, 체신부, 파기처의 공동출연으로 이루어졌음을 밝힙니다.

## 참고문헌

1. 김도훈외, "Design and development of a proto-type excimer laser based stepper", SPIE, Vol. 1927, 1993
2. 이종현외, "Excimer laser를 이용한 노광기술(I. 광노기술의 추이 및 성능개선방안)", 전자통신, 제 11권, 4호, pp.128~138, 1990
3. S. Stalnaker et al., "System and metrology improvements to achieve 85 nm overlay", SEMICON Korea 91, Technical symposium, 1991
4. K. Yamashita et al., "Heterodyne holographic nanometer alignment for a half micron wafer stepper", SPIE Vol. 1264, pp.119~226, 1990
5. 김상철외, "KrF 엑시머 레이저 스텝퍼를 위한 위상 공액파를 이용한 TTL 정렬계", 한국물리학회지 '새 물리', Vol. 33, No. 1, pp.43~49, 1993
6. N. Nomura et al., 월간 Semiconductor World, pp.152~159, 1990