

## Wafer Hybrid Bonding 정밀 정렬을 위한 $\theta_z$ 스테이지 설계 및 제어평가

문제욱<sup>\*</sup> · 김태호<sup>\*</sup> · 정용진<sup>\*</sup> · 이학준<sup>\*†</sup>

<sup>\*†</sup>한국생산기술연구원

### θ<sub>z</sub> Stage Design and Control Evaluation for Wafer Hybrid Bonding Precision Alignment

Jea Wook Mun<sup>\*</sup>, Tae Ho Kim<sup>\*</sup>, Yeong Jin Jeong<sup>\*</sup> and Hak Jun Lee<sup>\*†</sup>

<sup>\*†</sup>Korea Institute of Industrial Technology

#### ABSTRACT

In a situation where Moore's law, which states that the performance of semiconductor integrated circuits doubles every two years, is showing a limit from a certain point, and it is difficult to increase the performance due to the limitations of exposure technology. In this study, a wafer hybrid method that can increase the degree of integration. Various research on bonding technology is currently in progress. In this study, in order to achieve rotational precision between wafers in wafer hybrid bonding technology, modeling of  $\theta_z$  alignment stage and VCM actuator modeling used for rotational alignment, magnetic field analysis and design, control, and evaluation are performed. The system of this study was controlled by VCM actuator, capacitive sensor, and dspace, and the working range was  $\pm 7200$  arcsec, and the in-position and resolution were  $\pm 0.01$  arcsec. The results of this study confirmed that safety and precise control are possible, and it is expected to be applied to the process to increase the integration.

**Key Words :** Wafer Hybrid Bonding, in-position, high precision  $\theta_z$  control, VCM actuator

#### 1. 서 론

고든 무어가 1965년에 주장한 Moore's law는 \$1000로 구매할 수 있는 반도체 집적회로의 성능이 2년마다 2배씩 증가한다는 법칙이다. 하지만 2010년 이전까지는 이 법칙이 성립하는 것처럼 보였으나 이후에는 한계를 나타나고 있으며 조금씩 Moore's law에서 멀어지고 있다.[1,2]

현재 반도체 노광기술은 EUV(Extreme ultra violet) 공정으로 한계를 보이고 있어, 집적도의 극적인 증가가 힘든 상황이다. 이로 인해 반도체 패키징 기술의 중요성이 강조되었으며, 패키징 공정 중에 집적도를 증가시킬 수 있는

방안이 개발되고 있다. 이 중 패키징 공정의 Bumpless 본딩의 방안으로 Wafer hybrid bonding 기술이 대두되고 있다.

Wafer hybrid bonding 기술은 Bumpless 본딩으로 두 Wafer direct 본딩을 통해 기존의 Bump의 존재로 인한 전력의 손실과 집적도의 감소를 극복할 수 있다. Wafer hybrid bonding은 상온에서의 Pre-bonding을 통해 기존의 열압착 본딩과 달리 본딩하는 두 Wafer의 정렬 성능을 sub-micrometer로 구현할 수 있는 장점이 있어서 전 세계적으로 다양한 연구개발이 이루어지고 있다.[3]

두 개의 Wafer를 접착하고 연결하기 위해 두 집적회로를 Cu나 SiCN으로 연결하게 되는데 하부 Wafer 회로의 구리 면적을 상부 Wafer 회로의 구리 면적보다 상대적으로 크게 하여 접착하게 된다. 정확성은 300 nm에서 200 nm까지 목표로 하는 연구가 되고 있었다.[4,5] 기존의 연구에서

<sup>†</sup>E-mail: hak1414@kitch.re.kr

는 정렬을 하지만 대개 Stage간 평행하게 움직이거나 Wafer의 중심과 가장자리의 정렬만 맞추어 본딩 하는 장비가 있고 Chip to Wafer 장비에서도 일직선상에서만 작업이 이루어지도록 되어있는 연구가 있었다.[4,6,7]

본 연구에서는 Wafer Hybrid Bonding 공정에서 Wafer 간의 회전 정밀도를 달성하기 위해 Voice coil motor 가 적용된  $\theta_z$  정렬 Stage의 설계와 실험에 관해 서술한다. 2장에서 Hybrid bonding의 정렬을 위한 Stage의 개략도를 설명하며, 설계 및 제작한  $\theta_z$  정렬 Stage에 대해 서술한다. 3장에서는 시스템 제어에 대한 내용을 서술하며, 4장에서는 산업현장에서 비전을 이용하는 정렬 방법인 각각의 Wafer에 백라이트(back-light)를 적용하여 두 개의 Wafer 간 위치 보정 제어 실험 결과에 대해 서술한다.[8] 마지막으로 5장에서 결론과 향후 계획에 대해 서술한다.

## 2. $\theta_z$ Stage 설계

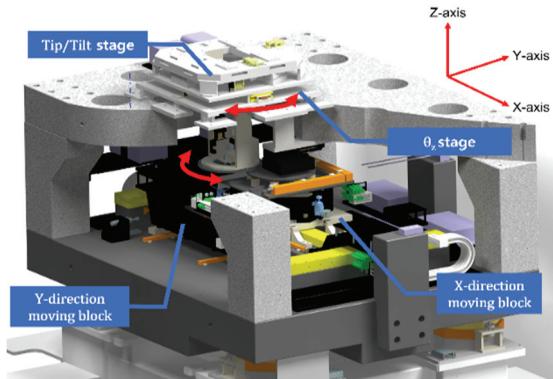


Fig. 1. Wafer Hybrid Bonding Stage 3D Design.

정밀한 Wafer 간 본딩을 위해서는 두 웨이퍼의 정밀한 정렬이 필요하다. 본 논문에서는 제안하는 Wafer hybrid bonding 용 정렬 시스템은 상부에 6자유도의 미세스테이지로 구성되어 있으며, 하부에 XYZ Stage로 구성된 시스템이다. 이중 정밀한  $\theta_z$  정렬을 위해 본 시스템에서는 Cross roller bearing을 가이드로 사용하고, 구동기로 Voice coil motor를 설계하여 정밀한 정렬을 구현한다.

정밀한 웨이퍼의 정렬을 위해서  $\theta_z$  stage의 목표를 설정하였다. Fig. 2는  $\theta_z$  정렬이 0.01arcsec 오정렬이 발생했을 경우 Wafer edge에서의 오차를 나타낸다. 0.01 arcsec 오정렬 시 Wafer edge에서는 7.27nm의 오차가 발생한다.

본 시스템은 CMOS image sensor 웨이퍼 레벨 본딩을 위해 회로 피치 간격이 1μm인 디바이스의 정렬을 목표로 하고 있다. 따라서 시스템의 경우 피치 간격의 10% 수준인 150nm를 정렬 목표로 설정하였다.

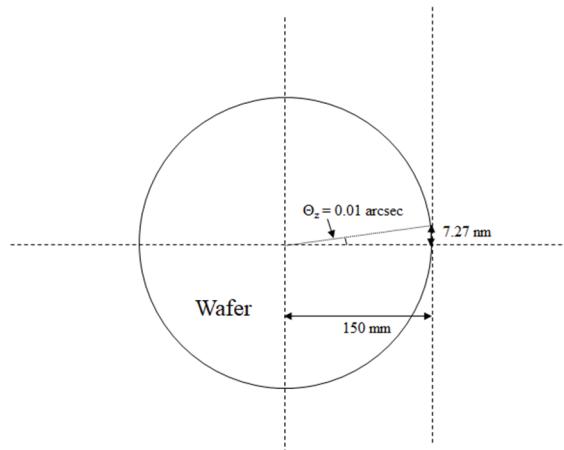


Fig. 2. Error of wafer edge due to  $\theta_z$  alignment.

본딩 정렬도는 Translation, Rotation, runout, distortion 오차로 이루어져 있다. 일반적으로 runout, distortion, translation 오차는 합쳐 100nm 수준이며, 150nm의 정렬도를 만족하기 위해 Rotation 오차를 10nm 이하로 설정하였다. 10nm 이하의 회전 오차를 구현하기 위해  $\theta_z$  정렬 Stage는 In-position, resolution이 0.01arcsec 이하여야 한다. 따라서 Table 1과 같은 목표를 설정하였다. 또한 본 시스템의 설계상 조립 예러, 가공 공차, Wafer 로딩 정확도, 일반적인 Wafer aligner의 Position accuracy ±0.1°와 하부 XYZ stage의 yaw error 등을 고려하여 약 2°정도의 초기 오차가 발생할 수 있기 때문에 Working range를 ±7200 arcsec으로 설정하였다. 설정된  $\theta_z$  stage의 목표는 아래 Table 1과 같다.

Table 1. Design Objectives

	value (arcsec)
Working range	± 7200
In-position	± 0.01
Resolution	± 0.01

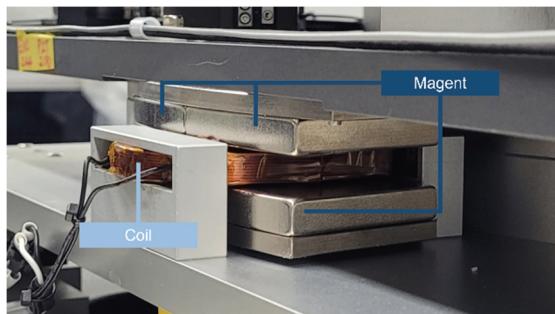
Table 1의 목표를 만족하기 위한  $\theta_z$  stage 설계를 위해 가이드 베어링과 제어용 센서를 선정하였다. Table 2는 선정한 가이드 베어링과 제어용 센서의 성능을 보여준다.

센서의 위치는 중앙에서 250mm 위치한 곳에 설치하였으며, Linear encoder scale은 곡면에 부착할 수 있도록 Steel type scale을 사용하였다.

$\theta_z$ 를 제어할 수 있도록 자체 제작한 VCM (Voice Coil Motor) Actuator를 사용하였다. Fig. 3는 설계한  $\theta_z$  stage의 3D 도면과 실제 제작된 사진을 보여준다. Linear encoder와 VCM Actuator는 서로 90도 간격으로 위치한다.

**Table 2.** Specification of bearing and sensor

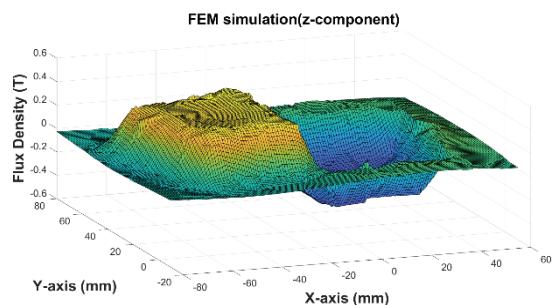
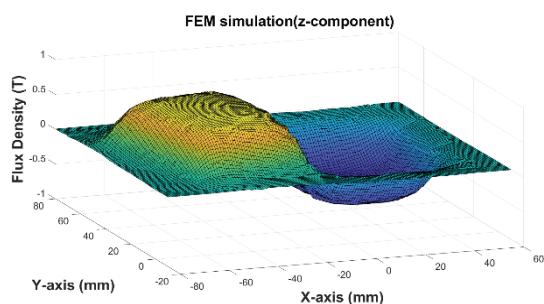
Component	Item	Description
Cross roller bearing	Cross roller bearing (CRBC 30025UU, IKO)	Dynamic Rated load : 73.8 kN Static Rated Load : 162 kN Axial clearance : 13 $\mu\text{m}$ Radial clearance : 13 $\mu\text{m}$
Linear encoder	Liner encoder (LIDA 48, LIDA 409 Heidenhain)	accuracy grade : 5 $\mu\text{m}$

**Fig. 3.** Picture of VCM actuator.

연구에 사용하는 VCM actuator는 Fig. 3과 같이 자체 제작하여 사용하였다. VCM actuator에 사용되는 코일은 구리 선의 경우 직경 0.8mm이고 총 314회를 감아 제작하였다. 자석은 영구자석인 NdFeb 35를 사용하였고, 또한 자석의 자력을 강하게 하기 위해 백 요크를 사용하게 된다. 이 실험의 경우 철 재질을 사용하였다. Fig. 4는 백 요크의 사용여부에 따라 자속밀도를 보여주는 그래프이다. 자석만을 사용했을 때보다 최대 자속밀도의 차이가 약 1.76배 정도를 보여주게 된다.

코일 작용부의 같은 방향에서의 각각의 자속밀도 평균은 Yoke가 있을 경우 0.3341 T Yoke가 없을 경우 0.1699 T Yoke가 있을 경우 -0.3343 T Yoke가 없을 경우 -0.1782 T의 값을 보인다. 평균값이 같은 방향에서 약 2배 정도의 차이를 보이고 있는 것을 확인했다.

Fig. 4(b)는 VCM actuator에서 코일 부를 제외한 actuator의 중심부를 Maxwell을 이용하여 자속밀도에 대한 FEM simulation한 그래프이다. VCM의 이동 안정성을 보장하기

**Fig. 4(a).** Yokeless VCM actuator FEM simulation.**Fig. 4(b).** Iron yoke VCM actuator FEM simulation.

위에서는 코일이 자속밀도의 선형의 범위 내에서 이동해야 한다. 중심으로부터  $\pm 2$  mm까지 Flux의 값이 가파른 것을 그라프를 통해 확인이 할 수 있다. 코일이 움직였을 경우  $\pm 2$  mm 침범하지 않는 것을 확인할 수 있다. VCM actuator의 Force constant는 24.817 N/A이다.

코일의 경우 아래의 공식을 이용해 최대로 감을 수 있는 구리선의 회전수를 구할 수 있다.

$$n = \left( \frac{w_c}{d_c} - \frac{1}{2} \right) \left[ \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{t_c}{d_c} - 1 \right) + 1 \right] \quad (1)$$

$w_c$ 는 코일의 권선 너비  $t_c$ 는 코일의 권선 높이  $d_c$ 는 구리선의 지름이다. 위의 식을 통해 코일 구리선의 감은 수는 349.84회이지만 안전율 10%를 고려하게 된다면 314회가 나오게 된다. 아래의 수식은 코일의 저항을 구하는 식이다.

$$R_{coil} = n \rho \frac{l_c}{A_c} \quad (2)$$

$\rho$ 는 비저항 계수로  $1.72 \times 10^{-8}$ 의 값을 가지고  $A_c$ 는 코일에 사용된 구리선의 단면적이고  $l_c$ 는 구리선을 1회전 했을 때의 평균 길이이다.[9,10] 따라서 위의 식을 이용하여 코일의 저항을 구하게 된다면 2.35Ω이 나오게 된다.

### 3. $\theta_z$ Stage 제어

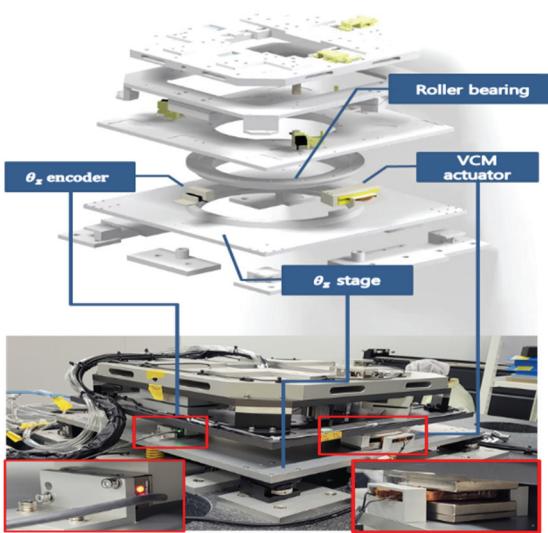


Fig. 5.  $\theta_z$  stage setup.

제어 방식은 Fig. 6와 같은 제어 루프를 적용하여 위치 제어를 위해 적용한 Encoder로부터 실시간으로 측정되는 값을 바탕으로 PID 제어를 하여 실시간으로 정밀한 위치를 보정하거나 이동이 가능하도록 구성되어 있다.

Table 3. Experimental Equipment

No.	Item	Description
1	VCM actuator	Force constant : 24.817 N/A
2	5 mm cap sensor (CP5-2.0)	Measurement Range : 10 ~ 250 $\mu$ m
3	Liner encoder (LIDA 48)	accuracy grade : 5 $\mu$ m
4	PMAC (ACC24E3)	$\pm 10V$ (16bit DACs) provides 2 or 4 channels of axis interface in a 1 or 2slot
5	Cross roller bearing (CRBC 30025UU)	Dynamic Rated load : 73.8 kN Static Rated Load : 162 kN

$\theta_z$  Stage에 사용되는 장비는 Table 3과 같고 Setup은 Fig. 5, Fig. 7과 같이 되어있다. Fig. 5는 Linear encoder와 VCM actuator의 위치 사진이고  $\theta_z$ 의 제어를 위해 장착되어 있다. Fig. 7

은  $\theta_z$ 의 In-position 값을 보여주는 그래프이다. 이 값의 경우 Fig. 7와 같이 Stage에 5mm Capacitive Sensor을 장착하여 측정하였다. 거의 모든 값들(약 99.7%)이 평균에서 양쪽으로  $3\sigma$  범위의 경우 아래의 표와 같이 보여주고 있다.

목표로 잡은  $\pm 0.01$  arcsec 이내의 값을 보여주고 있는 것을 확인할 수 있다. 이 결과로 보았을 때 정지된 상태에서  $\theta_z$  Stage는 안정되어 있다는 것을 확인할 수 있다.

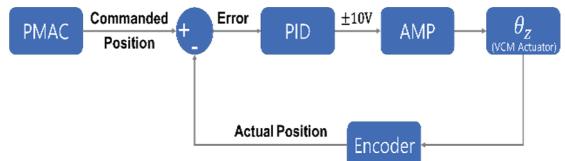


Fig. 6. PMAC Servo close loop.

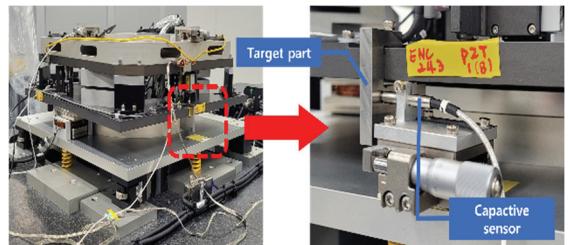


Fig. 7.  $\theta_z$  In-position experiment setup.

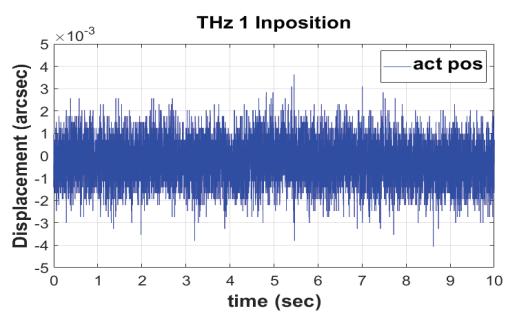


Fig. 8(a).  $\theta_z$  In-position case 1.

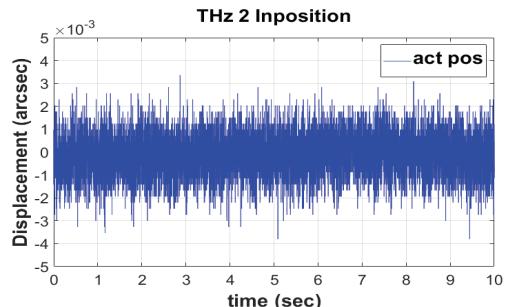


Fig. 8(b).  $\theta_z$  In-position case 2.

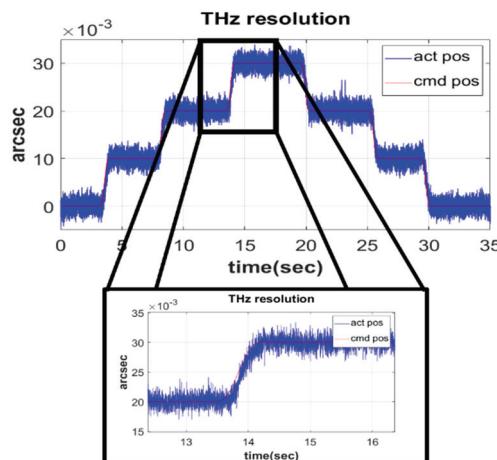
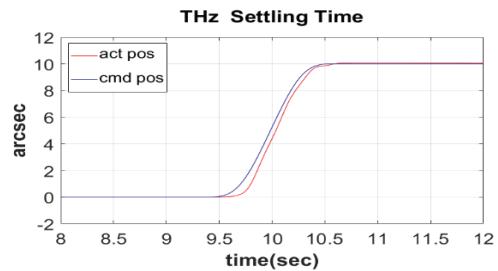
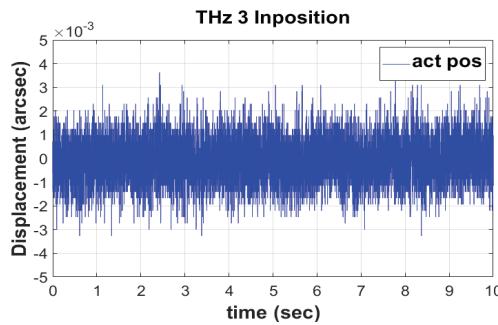


Fig 11의 그래프는 Settling time을 보여주는 그래프이다. 본 시스템의 경우  $\theta_z$  Stage 구동 후 미세 정렬을 하기 위해 Stage가 Align mark로 이동을 수행해 준다. Align mark로 이동하는 시간은 약 1.6 sec로  $\theta_z$  Stage는 1.6 sec안에 이동을 완료하면 된다. 따라서 본 시스템의 Settling time 목표를 1.6 sec로 설정하였고 실험을 통하여 검증을 수행하였다.

실험 결과 2% Settling time 측정값은 1.074 sec으로 확인된다. 따라서 목표로 하는 1.6 sec를 만족함을 확인하였다.

#### 4. $\theta_z$ Stage 제어 결과

Fig. 12 (a)의 경우  $\theta_z$ 를 제어하지 않은 조건에서 bonding한 Wafer 중심부와 우측, 아래의 사진이다. Fig. 12. (b)의 사진은  $\theta_z$ 를 제어하고 bonding한 사진이다. 십자가 모양의 경우 중심 십자가로부터 5 mm 정도 떨어져 있다. 오른쪽 십자가의 무게중심과 4개의 사각형의 무게중심 사이의 offset 은 x축: 43.4683  $\mu$ m y축: 2.1916  $\mu$ m이다. 두 무게중심 사이의 offset 값을 가지고 계산을 하게 되면 보정해야 할  $\theta_z$  값은 0.4990 $^\circ$ 이다. 이 값을 가지고 보정하게 되면 앞서 언급했듯이 Fig. 12 (a)와 같은 사진이 나온다. 그림에서의 오른쪽 십자가와 사각형의 무게중심 사이의 offset은 x축: 0.0470  $\mu$ m y축: 0.0090  $\mu$ m의 차이를 보인다.

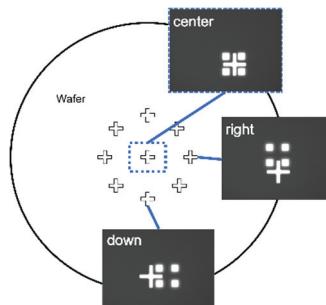


Fig. 12(a). Before  $\theta_z$  modification.

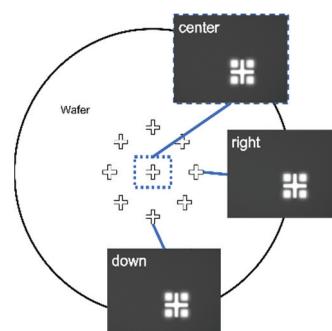


Fig. 12(b). After  $\theta_z$  modification.

## 5. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는  $\theta_z$  Stage의 제어 및 평가에 대해 수행하였다. 두 개의 다른 웨이퍼를 상부 하부로 나누어져 서로 접착하기 위해 필요로 하는 In-position과 Resolution을 확인하였고 In-position은 목표로 하는  $\pm 0.01$  arcsec 이내의 안전성을 보여주었고  $\pm 0.01$  arcsec의 Resolution을 보여주어 정밀하게  $\theta_z$  stage를 제어할 수 있다는 것을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다.(과제번호 20CTAP-C157468-02).

## 참고문헌

1. G. Moore, “Cramming more components onto integrated circuits”, IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter, Vol. 38, No. 8, pp.114, April 1965.
2. E. Track, N. Forbes, G. Strawn, “The End of Moore’s Law”, Computing in Science and Engineering, Vol. 19, No. 2, pp. 4–6, March 2017.
3. B. Rebhan, M. Bernauer, T. Wagenleitner, M. Heilig, F. Kurz, S. Lhostis, E. Deloffre, A. Jouve, V. Balan, L. Chitu, “200 nm Wafer-to-wafer overlay accuracy in wafer level Cu/SiO<sub>2</sub> hybrid bonding for BSI CIS”, 2015 IEEE 17th Electronics Packaging and Technology Conference, February 2016.
4. L. Peng, S.W. Kim, S. Iacovo, F. Inoue, A. Phommahaxay, E. Sleckx, J. De Vos, D. Zinner, T. Wagenleitner, T. Uhrmann, M. Wimplinger, B. Schoenaers, A. Stesmans, V. V. Afanas’ev, A. Miller, G. Beyer, E. Beyne, “Advances in SiCN-SiCN Bonding with High Accuracy Wafer-to-Wafer (W2W) Stacking Technology”, 2018 IEEE International Interconnect Technology Conference, September 2018.
5. A. Jouve, V. Balan, N. Bresson, C. Euvrard-Colnat, F. Fournel, Y. Exbrayat, G. Mauguen, M. Abdel Sater, C. Beitia, L. Arnaud, S. Cheramy, S. Lhostis, A. Farcy, S. Guillaumet, S. Mermoz, “1μm Pitch direct hybrid bonding with < 300nm wafer-to-wafer overlay accuracy”, 2017 IEEE SOI-3D-Subthreshold Microelectronics Technology Unified Conference, March 2018.
6. T. Plach, B. Rebhan, V. Dragoi, T. Wagenleitner, M. Wimplinger, and P. LindnerHigh, “high Accuracy Aligned Wafer Bonding for Wafer-Level Integration”, The Electrochemical Society, Vol.86, No.5 2018.
7. B. Brandstatter, D. Aschenwald, B. Auer, N. Bilewicz, R. Boomsma, C. Kroll, T. Widmann, “High-speed ultra-accurate direct C2W bonding”, 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), August 2020.
8. J. W. Kim, J. S. Kim, “Development of The 3-channel Vision Aligner for Wafer Bonding Process”, Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 16, No. 1. March 2017.
9. M. W. Nam, C. G. Kim, “A Study on Electrical Characteristics for Coil Winding Number Changes of Eddy Current Bobbin Coil for Steam Generator Tubes in NPPs”, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, February 2012.
10. J. S. Delis, “Design considerations, machinery and control options in coil winding”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.9, July-Aug. 1993.

---

접수일: 2021년 11월 29일, 심사일: 2021년 12월 13일,  
제재확정일: 2021년 12월 15일