

## Wafer Hybrid Bonding을 위한 Upper Wafer Handling 모듈 설계 및 제어

김태호<sup>\*</sup> · 문제욱<sup>\*</sup> · 최영만<sup>\*\*</sup> · 안다훈<sup>\*\*\*</sup> · 이학준<sup>\*†</sup>

<sup>\*†</sup> 한국생산기술연구원, <sup>\*\*</sup> 아주대학교, <sup>\*\*\*</sup> 서울과학기술대학교

### Upper Wafer Handling Module Design and Control for Wafer Hybrid Bonding

Tae Ho Kim<sup>\*</sup>, Jea Wook Mun<sup>\*</sup>, Young Man Choi<sup>\*\*</sup>, Daho An<sup>\*\*\*</sup> and Hak-Jun Lee<sup>\*†</sup>

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

<sup>\*\*\*</sup>Seoul National University of Science and Technology

#### ABSTRACT

After introducing Hybrid Bonding technology into image sensors using stacked sensors and image processors, large quantity production became possible. As a result, it is currently used in most of the CMOS image market in smartphones and other image-based devices worldwide, and almost all stacked CIS manufacturing sites have focused on miniaturization using hybrid bonding. In this study, an upper wafer handling module for Wafer to Wafer Hybrid Bonding developed to increase the alignment and precision between wafers when wafer bonding. The module was divided two parts to reduce error of both the alignment and degree of precision during wafer bonding. Wafer handling module developed both new Tip/Tilt system controlling  $\Theta_x$ ,  $\Theta_y$  of upper wafer and striker to push upper wafer. Based on this, it was confirmed through the stability evaluation that the upper wafer handling module can be controlled without any problem during W2W hybrid bonding.

**Key Words :** Tip/Tilt stage, Hybrid bonding, Piezo actuator, striker

#### 1. 서 론

Hybrid Bonding 기술을 스택 형 센서와 이미지 프로세서를 사용하는 이미지 센서에 도입 한 후 대량 생산이 가능하게 되었다. 이로 인해 현재 전 세계 스마트 폰 및 기타 이미지 기반 장치에서 CMOS 이미지 시장 대부분에 사용되고 있으며, 거의 모든 스택 형 CIS 제조현장에서는 hybrid bonding을 사용하여 보다 제품의 소형화를 달성하게 되었다.

현재 Hybrid Bonding 기술은 CIS 제품에서 확장하여 Memory/System 반도체 제품에 적용하려는 노력이 이어지

고 있다. 이는 반도체 칩 내 구성요소의 증가와 다양한 수요에 대응하고 무어의 법칙의 한계를 극복하기 위한 해결책으로 다중 다이 스택이 제안되면서 발달해 왔다. Hybrid bonding은 현재까지도 차세대 후 공정 중 가장 주목을 받고 있으며 많은 연구가 진행되고 있는 기술이다[1,2].

기존 bump bonding 방식[5,6]으로는 열 압착 본딩으로 진행되었으나 bonding시 가해지는 열로 인해 패턴들에 변형이 생겨 정밀한 정렬을 못하는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 hybrid bonding 공정으로 진화하고 있는 추세이며, 현재 많은 분야에서 Hybrid bonding을 이용한 Advanced packaging기술의 연구가 활발히 진행되고 있다. [7,8] Wafer to wafer hybrid bonding은 상온에서 bonding이 진행되기에 열로 인한 정밀성 저하 및 chip 손상을 방지할 수 있으며,

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

Bumpless bonding으로써 wafer to wafer hybrid bonding은 현재까지 정밀성 및 정렬도를 높이는 많은 연구가 진행되어 왔다 [9,10,11].

본 연구에서는 반도체 패키징의 새로운 기술인 Wafer to Wafer Hybrid Boning기술에 접목시키기 위해 wafer bonding 시 wafer간의 정렬도 및 정밀성을 높이기 위한 upper wafer handling module을 개발하였다. Hybrid bonding 시 Alignment error를 확인하게 줄일 수 있는 Tip/Tilt system[3,4]과 새로운 Striker개발을 위해 설계를 통해 타당성을 확인하였으며, 이를 기반으로 제품 제작 및 안정성 실험 결과에 대해 서술하고자 한다.

## 2. Upper Wafer Handling 모듈 Design

본 연구에서는 Hybrid bonding 시 wafer간에 발생되는 void 현상을 방지하고자 Upper wafer Handling Module을 design하였으며, module은 총 2개의 part로 나뉠 수 있으며, 각 part는 Fig. 1 과 같이 각 위치해 있는 3개의 piezo actuator와 flexure 부품을 통해  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  를 조절할 수 있는 flexure 기반의 Tip/Tilt stage와 Fig. 2 와 같이 wafer bonding 시 wafer를 눌러줄 수 있는 striker로 나뉜다. Fig.1의 actuators와 flexures는 서로 대칭 구조이며, piezo actuator 구동 시  $\theta_x$ ,  $\theta_y$ 를 조절 할 수 있게 설계하였다.

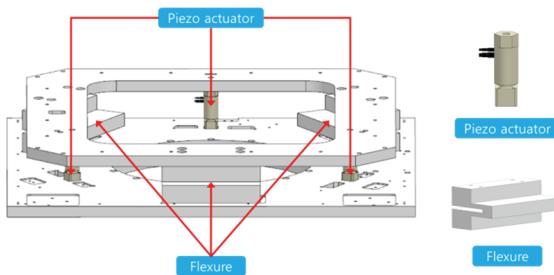


Fig. 1. Tip/Tilt stage.

Fig. 2와 같이 striker 구조로는 bonding 시 wafer를 정밀하게 수직으로 눌러줄 필요가 있으며, 5~20N정도의 힘을 이용하여 push가 필요하기에 Arkribis사의 VCM type인 MGV41 구동기와 bonding 시 upper wafer를 push하며, 정밀하게 접촉하기 위해 soft material인 peek 재질을 사용한 striker와 striker tip으로 구성 되어있다. 구동기와 striker는 서로 LM guide로 연결되어 있어 linear하게 작동되며, Striker tip은 upper wafer와 직접적인 접촉이 이뤄지기에 wafer의 손상을 방지하고자 반구형으로 제작하였다. 추가적으로 bonding 시 Tip/Tilt stage와 striker의 위치 및 힘을 보상하기 위해 rotary encoder가 장

착되어 있는 MX45S ball screw motor와 guide bush가 장착된다.

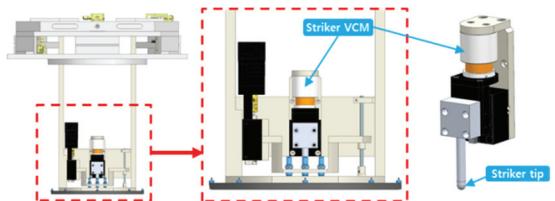


Fig. 2. Striker Module.

최종적으로 Tip/Tilt stage와 striker module을 조립했을 시 구동 방식은 Fig. 3과 같은 두 가지 방식으로 구동하게 되어 있으며, 실험 조건은 2가지로 진행할 수 있도록 설계 하였다. Case1은 Hybrid Bonding 시 Tip/Tilt 제어를 하지 않은 일반적인 bonding이며, Case2는 Tip/Tilt 제어가 적용된 bonding이다. 이와 같은 design을 토대로 Tip/Tilt Stage를 적용할 시 일반적인 hybrid bonding 조건일 경우 align mark의 위치 정렬도 및 반복도 성능을 항상 시킬 수 있다. Case1과 Case 2에서의 bonding 작업 시 wafer push는 striker module을 통해 진행된다.

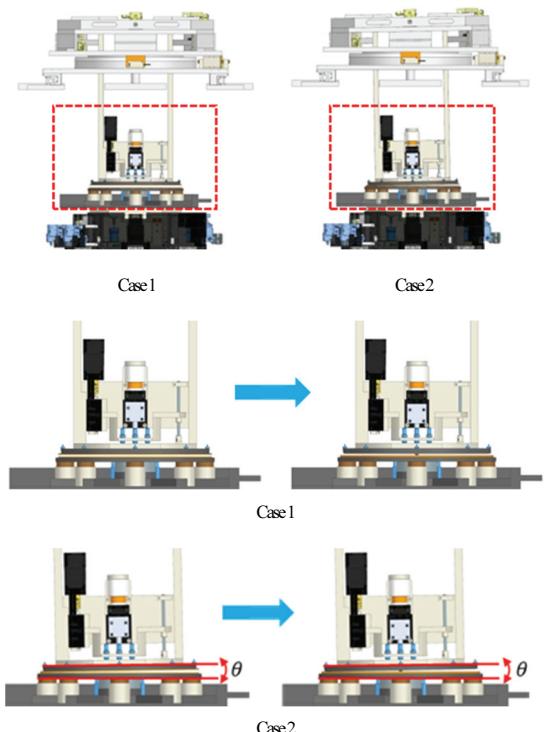


Fig. 3. The driving method of Tip/Tilt stage.

### 3. Upper Wafer Handling 모듈 해석

최적설계를 위해 정적 해석 및 Modal해석을 통하여 설계타당성을 확인하였으며, 정적 해석을 통해 Z축 방향에 대한 강성을 추정하고자 유한요소해석을 통해 50N 간격으로 Stage에 힘을 가했을 시 발생하는 변위를 확인하였다. 결과는 Fig.4와 같으며,  $K_{sys,z}(avg)$ 는 11.368N/ $\mu\text{m}$ 로써 결과적으로 Piezo actuator의 강성이 225N/ $\mu\text{m}$ 인 것에 비해 system의 강성은 약 20배 이하로 안정적인 결과를 확인할 수 있었다.

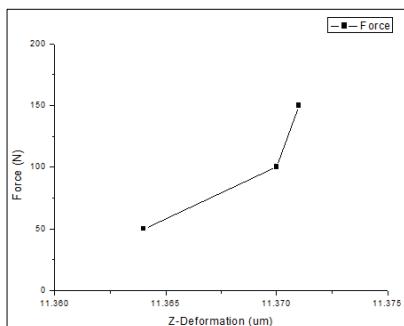


Fig. 4. Stiffness graph.

Piezo actuator의 Full stroke는 14.3 $\mu\text{m}$ 으로써  $F_z$ 는 162.32N의 힘이 적용되며 구동에 있어 문제는 없는 것을 확인하였으며, actuator의 장착위치는 stage 중심점으로부터 220mm에 위치해 있으며 Fig. 5와 같다. Fig. 6은 정적 해석 결과로써 θz stage와 체결되는 부분을 fixed point로 설정하였으며, force point는 piezo actuator동작 부분에 힘을 입력하여 해석한 결과이다. 정적 해석 이후 설계한 시스템에 대해 Modal 해석을 진행하였으며 해석 결과로써 1차 고유진동수는 48.642Hz에서 시작되며 2차 고유 진동수는 88.645Hz로 보여진다. 1차는 X축 방향과 2차는 Y축 방향의 Mode shape이 나타나는 것을 확인하였다. 시스템의 원치 않는 회전하는 Mode shape는 148.66Hz에서부터 나타나는 것을 확인하였다. Fig. 7은 해당 Modal 해석에 대한 결과를 나타낸다.

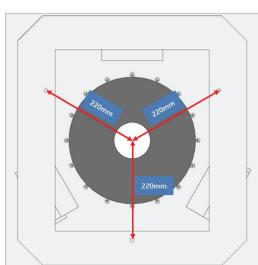


Fig. 5. Position of piezo actuator.

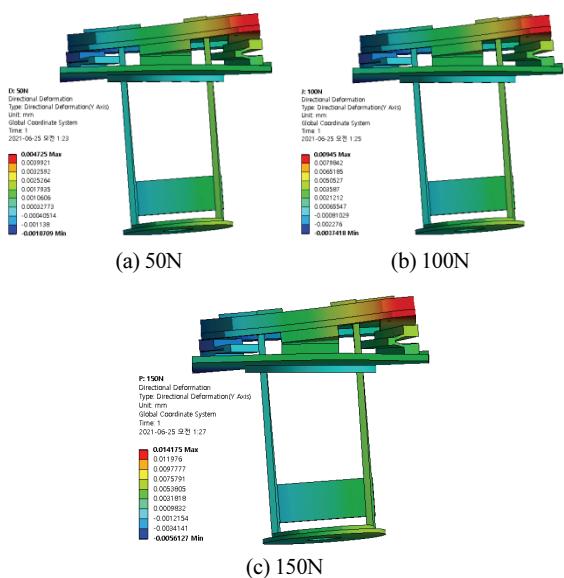


Fig. 6. Linear static analysis.

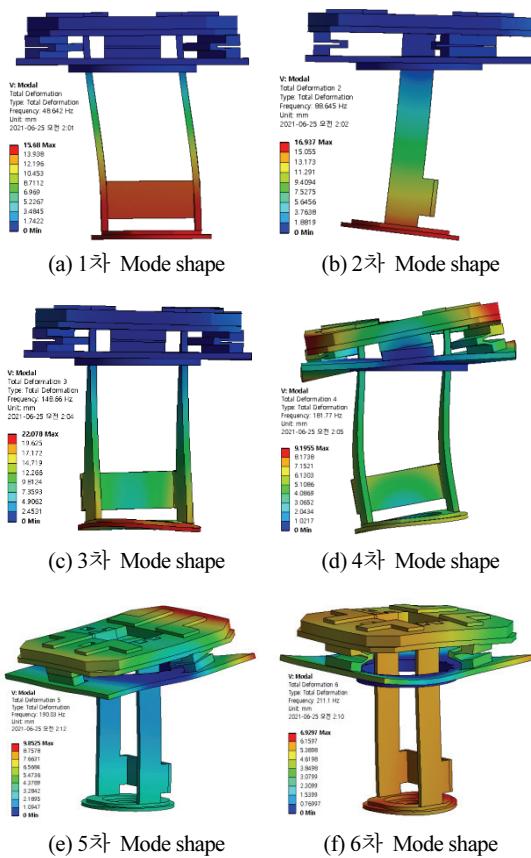


Fig. 7. Modal analysis.

resonance frequency는 Modal analysis를 통해 적합성을 확인하였으며, 위치 안정성을 위한 In-position은 실험 결과에서 측정 결과를 확인할 수 있다.

#### 4. Tip/Tilt Stage 제작 및 제어

본 Tip/Tilt system의 구성은 Fig. 8과 같으며, Tip/Tilt Stage의  $\theta_x$ 와  $\theta_y$ 를 제어할 수 있도록 세 지점에 Piezo Actuator를 사용함과 함께 보다 정밀한 제어를 위해 Piezo Actuator와 동일한 방향의 위치에 Linear Encoder를 설치하였다. Piezo Actuator의 구동에 따라 Tip/Tilt Guide와 연결된 Wafer Vacuum Plate의  $\theta_x$ 와  $\theta_y$ 를 자유롭게 제어 할 수 있도록 제작되었으며, 부품 및 제어기의 사양은 Table 1와 같다.

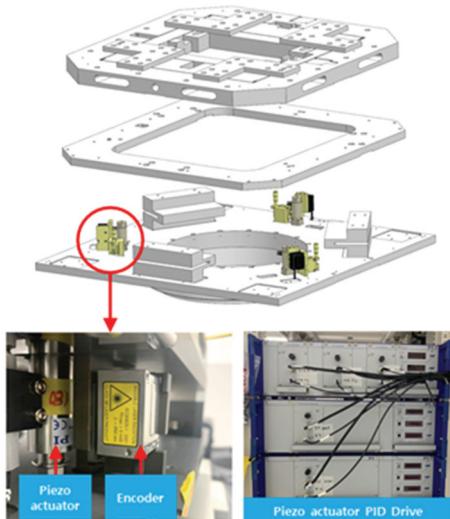


Fig. 8. Tip/Tilt Parts.

Table 1. Description of the devices used in the Tip/Tilt system

No.	Parts	Description
1	Piezo actuator (P-844.10)	Travel range : 15μm Static large signal stiffness : 225N/μm
2	PZT Amplifire (E-505.00)	Control input voltage : -2V ~ +12V Output voltage : -30V ~ +130V
3	PMAC(ACC24E)	$\pm 10V$ (16bit DACs) provides 2 or 4 channels of axis interface in a 1 or 2slot
4	Linear encoder (LIP281)	Accuracy grade : $\pm 3\mu m$ Signal Period : 0.512 μm

Bonding 시 upper wafer의 void 발생을 저감시키며 runout 보정을 위한 striker module은 Fig. 9와 같이 제작하였으며, striker spec은 Table 2와 같다.

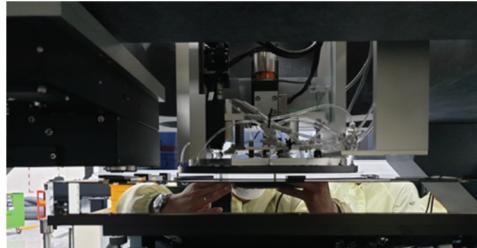


Fig. 9. Striker module.

Table 2. Specification of the striker module

No.	Feature	Specification
1	Size	48 x 58 x 130 mm
2	Force	58.1N
3	Straightness	$\pm 3 \mu m$
4	Stroke	25 mm

제어 방식으로는 Fig. 10과 같은 제어 루프를 적용하여 위치 제어를 위해 적용한 Linear Encoder로부터 실시간으로 측정되는 Input 값을 바탕으로 PID제어를 통해 실시간으로 정밀한 위치 보정 및 이동이 가능하도록 구성되어 있다.

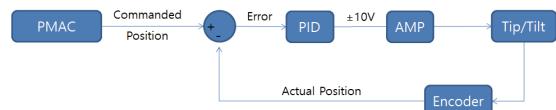
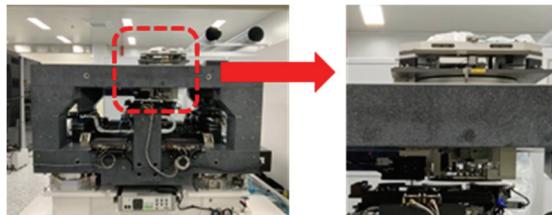
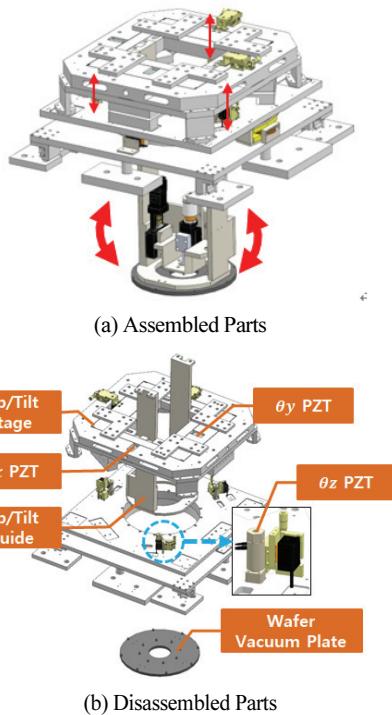


Fig. 10. PMAC Servo Close Loop.

구동 방식으로는 Bottom Wafer와 Upper Wafer는 각 위치에서 Vacuum 상태로 잡아주고 있으며, 각 Wafer의 align mark는 광학렌즈로부터 입력되는 이미지 상에서 Wafer 간의 오차 범위를 image Processing을 통해 계산된 후 보정 값을 바탕으로 Wafer Hybrid Bonding이 진행되며 Tip/Tilt의 모션 제어는 제어루프를 통해 진행된다. 적용된 Tip/Tilt System은 wafer bonding 작업 시 발생되는 Void 문제를 해결 할 수 있으며, 비용 절감 및 시간 단축 방면으로도 큰 효과를 얻을 수 있도록 설계되었다. Fig. 11의 (a)와 (b)는 3D modeling이며, (c)는 실제 제작하여 Setup이 완료된 실제 장비이다.

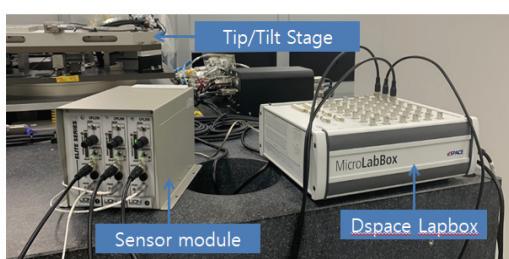
실험에 사용할 장치로는 Fig. 12와 같다. gap sensor로는 upper wafer vacuum plate에 흐르는 전압을 측정하여 probe와 도체 사이의 거리에 반비례한 전압 signal이 BNC cable을 통해 Dspace로 전해지게 된다. Dspace와 simulink를 연동하여 계산되도록 설정한 loop를 통해 gap sensor에서 전달되

는 Data 값을 계산하여 Tip/Tilt의 위치안정성을 확인 할 수 있도록 구성하였다. Fig. 13은 gap sensor들의 각 position들을 나타내고 있으며, piezo actuator의 구동 시  $\theta_x$ ,  $\theta_y$ 에 대해 계산될 수 있도록 gap sensor는 3개를 사용하였다.

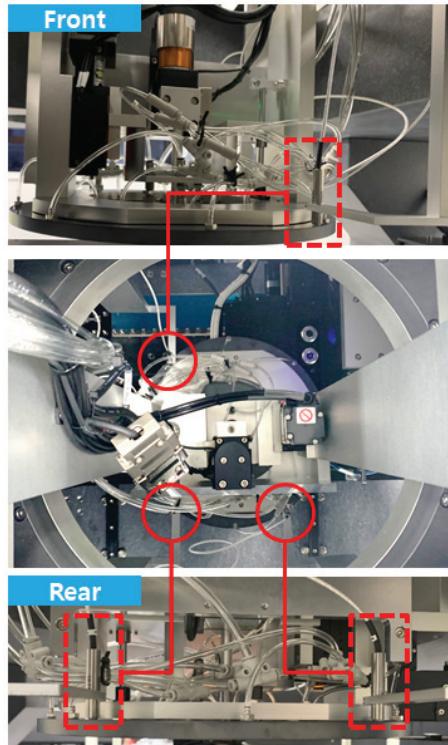


(c) Produced Upper wafer handling module

**Fig. 11. Upper wafer handling.**



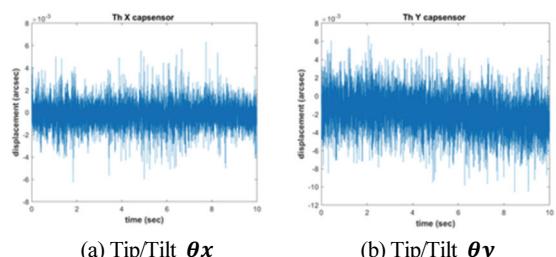
**Fig. 12. Measuring Equipment.**



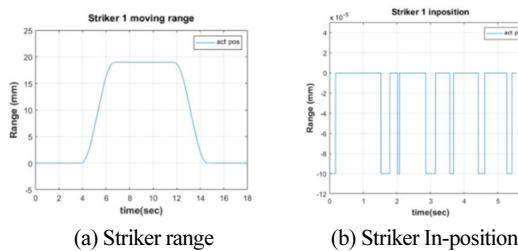
**Fig. 13. Gap Sensor Position for Measuring.**

## 5. 실험 결과 및 고찰

본 실험에서 hybrid bonding을 위해 upper wafer가 부착되는 upper chuck를 통해 Tip/Tilt stage의  $\theta_x$ ,  $\theta_y$ 의 in-position은 측정하였으며, 상온(20°C~22°C)에서의 환경조건에서 10초간 진동의  $\pm 3\sigma$ 값을 5회 측정한 평균 값 기준으로 측정하였다. Fig.14는 Tip/Tilt stage에 대한 in-position을 나타내고 있다. Fig.14의 (a)는  $\theta_x$ 값으로는  $\pm 0.00317 \text{arcsec}$ 이며, (b)는  $\theta_y$ 값으로  $\pm 0.0057 \text{arcsec}$ 로써 Tip/Tilt stage의 위치 안정성을 확인하였다. Upper wafer의 push module인 striker의 측정으로는 Fig.15의 (a)와 같이 0~19mm의 구동 범위를 확인하였으며, (b)와 같이  $\pm 50 \text{nm}$ 의 in-position을 확인하였다.



**Fig. 14. Tip/Tilt  $\theta_x$ ,  $\theta_y$ .**



**Fig. 15.** Striker measurement.

## 6. 결 론

본 연구를 통해 Hybrid bonding을 위한 Upper wafer handling module의 설계 및 제어를 함으로써 wafer bonding 공정을 위한 system 안정성을 확인 할 수 있었으며, 위와 같은 안정성 측정 결과를 통해 W2W hybrid bonding 시 upper wafer handling module을 제어하는데 있어 문제 없이 제어 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 추후 300mm glass wafer를 사용하여 정밀한 hybrid bonding을 수행할 것이며, 제어를 통해 보다 높은 정밀도와 정렬도를 갖출 수 있을 것으로 예상된다.

## 감사의 글

본 연구는 2021년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임 [S3143469-반도체 전공정 검사/계측/고진공 장비를 위한 초정밀 모션 스테이지 표준 플랫폼 개발].

## 참고문헌

- Fukushima, Takafumi; Iwata, Eiji; Ohara, Yuki; Noriki, Akihiro; Inamura, Kiyoshi; Lee, Kang-Wook; Jicheol Bea, ; Tanaka, Tetsu; Koyanagi, Mitsumasa (2009). [IEEE 2009 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) - Baltimore, MD, USA (2009.12.7-2009.12.9)] 2009 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) - Three-dimensional integration technology based on reconfigured wafer-to-wafer and multichip-to-wafer stacking using self-assembly method. 1–4.
- Arnaud, L.; Karam, C.; Bresson, N.; Dubarry, C.; Borel, S.; Assous, M.; Mauguen, G.; Fournel, F.; Gottardi, M.; Mourier, T.; Cheramy, S.; Servant, F. (2020). Three-dimensional hybrid bonding integration challenges and solutions toward multi-wafer stacking. MRS Communications, 1–9.
- Du, Z., Su, Y., Yang, W., & Dong, W. (2014). Note: A piezo tip/tilt platform: Structure, kinematics, and experiments. Rev. Sci. Instrum, 85(4), 046102-.
- Chen, G., Ding, Y., Zhu, X., Liu, P., & Ding, H. (2018). Design and modeling of a compliant tip-tilt-piston micropositioning stage with a large rotation range. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 095440621878140-.
- Maharbiz, M.M.; Cohn, M.B.; Howe, R.T.; Horowitz, R.; Pisano, A.P. (1999). [IEEE Technical Digest. IEEE International MEMS 99 Conference. Twelfth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (Cat. No.99CH36291) - Orlando, FL, USA (1999.01.21-1999.01.21)] Technical Digest. IEEE International MEMS 99 Conference. Twelfth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (Cat. No.99CH36291) - Batch micropackaging by compression-bonded wafer-wafer transfer, 482–489.
- Kim, Sarah Eunkyung; Kim, Sungdong (2015). Wafer level Cu-Cu direct bonding for 3D integration. Micro-electronic Engineering, 137, 158–163.
- JongWon Kim, and JinSeok Ko. (2017) Development of The 3-channel Vision Aligner for Wafer Bonding Process Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 16, No. 1.
- Cheng-Ta Ko, ; Zhi-Cheng Hsiao, ; Huan-Chun Fu, ; Kuan-Neng Chen, ; Wei-Chung Lo, ; Yu-Hua Chen, (2010). [IEEE 2010 3rd Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC) - Berlin, Germany (2010.09.13-2010.09.16)] 3rd Electronics System Integration Technology Conference ESTC - Wafer-to-wafer hybrid bonding technology for 3D IC. , 1–5.
- Jouve, A.; Balan, V.; Bresson, N.; Euvrard-Colnat, C.; Fournel, F.; Exbrayat, Y.; Mauguen, G.; Sater, M. Abdel; Beitia, C.; Arnaud, L.; Cheramy, S.; Lhostis, S.; Farcy, A.; Guillaumet, S.; Mermoz, S. (2017). [IEEE 2017 IEEE SOI-3D-Subthreshold Microelectronics Technology Unified Conference (S3S) - Burlingame, CA, USA (2017.10.16-2017.10.19)] 2017 IEEE SOI-3D-Subthreshold Microelectronics Technology Unified Conference (S3S) - 1μm Pitch direct hybrid bonding with <300nm wafer-to-wafer overlay accuracy, 1–2.
- Ji, L., Che, F. X., Ji, H. M., Li, H. Y., & Kawano, M. (2020). Wafer-to-Wafer Hybrid Bonding Development by Advanced Finite Element Modeling for 3-D IC Packages. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 10(12), 2106–2117.
- DeokWon Yun, Kangho Ahn, and ChangSoo Han. (2007) Development of ultra precision rotational stage using Semi-inchworm driving mechanism with PZT Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 6, No. 1.

접수일: 2022년 3월 12일, 심사일: 2022년 3월 18일,  
제재확정일: 2022년 3월 25일