

특집 : 원자현미경을 이용한 계면강도측정

삼차원집적공정에서 원자현미경을 활용한 Wafer Bonding Strength 측정 방법의 신뢰성에 관한 연구

최은미² · 표성규^{1,2,†}

¹중앙대학교 융합공학부, ²중앙대학교 나노바이오에너지공학과

Reliable Measurement Methodology of Wafer Bonding Strength in 3D Integration Process Using Atomic Force Microscopy

Eunmi Choi² and Sung Gyu Pyo^{1,2,†}

¹School of Integrative Engineering, Chungang University, Seoul, 156-756, Korea

²Graduate School of Nanobio and Energy Engineering, Chungang University, Seoul 156-756, Korea

(2013년 6월 2일 접수: 2013년 6월 17일 수정: 2013년 6월 26일 게재확정)

Abstract: The wafer bonding process becomes a flexible approach to material and device integration. The bonding strength in 3-dimensional process is crucial factor in various interface bonding process such as silicon to silicon, silicon to metals such as oxides to adhesive intermediates. A measurement method of bonding strength was proposed by utilizing AFM applied CNT probe tip which indicated the relative simplicity in preparation of sample and to have merit capable to measure regardless type of films. Also, New Tool was utilized to measure of tip radius. The cleaned SiO₂-Si bonding strength of SPFM indicated 0.089 J/m², and the cleaning result by RCA 1(NH₄OH:H₂O:H₂O₂) measured 0.044 J/m², indicated negligible tolerance which verified the possibility capable to measure accurate bonding strength. And it could be confirmed the effective bonding is possible through SPFM cleaning.

Keywords: Atomic Force Microscopy, Bonding Strength, Cleaning, Wafer Bonding, SPFM

1. Introduction

3D integration은 Device의 소형화뿐만 아니라, 낮은 전력, 높은 성능과 시스템 확장의 경로를 제공 할 수 있어 nano-electronics 기술의 가장 유용한 접근이다.¹⁻³⁾ 3D integration process은 칩과 칩간에 수직으로 via를 형성하여 신호나 전원을 연결하는 방법인 TSVs 공법의 개발과 함께 소자의 신뢰성과 후속 공정의 안정을 높이기 위한 wafer bonding process의 안정과 wafer간의 bonding 층에 쓰일 수 있는 재료의 개발이 중요한 쟁점이 되고 있다.⁴⁻⁸⁾

다양한 wafer bonding의 interlayer에 사용되는 재료 중 Oxide을 사용 할 경우 Silicon-on insulator (SOI) bonding 이라고 하며, 절연체의 성질을 갖고 있어 DRAM, CMOS Image sensor, 다양한 MEMS 기술에 적용 가능 하다.⁹⁻¹⁰⁾ 따라서, 많은 선행 연구자들이 최적의 SOI bonding 기술과 신뢰 할 수 있는 bonding strength 측정 기술을 개발하고자 노력해 왔다. 그러나, 다양한 SOI bonding 기술이 연

구 개발된 것에 비하여 Bonding strength 측정 기술의 발전은 그 발전이 매우 미비한 상태이다.

본 논문에서는 기존의 Bonding strength 측정 방법의 단점을 극복하기 위한 Atomic Force microscopy(AFM)을 활용한 Bonding strength 측정 방법을 소개하고, 선행 연구의 단점을 보완하기 위한 Tool 개발에 대한 연구를 하고자 하며, 개발된 방법을 통해 측정된 Bonding strength의 신뢰성을 확인 하고자 한다.

2. Bonding Strength 측정 방법

Bonding Strength 측정 방법의 정확도나 신뢰도는 wafer bonding process의 신뢰도뿐만 아니라, 3D Integration 전체의 신뢰도에 큰 영향을 미친다. 그러나, 다양한 Bonding process의 연구 개발된 것과 비교하여 현재 주로 사용되는 bonding strength 측정 방법은 정밀한 측정을 할 수 없거나, 측정 재료의 제한이 있으며, 별도의 추가 공

[†]Corresponding author
E-mail: sgpyo@cau.ac.kr

© 2013, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

정이 요구 된다는 등의 단점을 갖는다. 그럼에도 아래에서 언급 되는 측정 방법이 주로 사용되는 이유는 비교적 sample 준비가 간단하고, 측정 시간이 짧기 때문이다.

2.1. Scanning Acoustic microscopy (SAM)

Scanning Acoustic microscopy는 1974년 R.A Lemons 에 의해 개발된 장비로 wafer 과 같은 매질에 일정한 파장을 갖는 음파 signer을 제공한 후 Substrat에 반사될 때 Substrat의 pores 와 cracks 와 같은 특성에 의한 파장의 변화를 detecting하는 장치로, 최근 발표되고 있는 wafer bonding 에 대한 연구 결과의 평가 방법으로 가장 많이 사용되는 방법이다.¹¹⁾

다음에 언급할 Bonding strength 측정 방법 중 유일한 비 파괴 방식이며, Bonding process의 성공 여부에 가장 큰 영향을 미치는 void의 발생 여부를 직접적으로 확인할 수 있다. 그러나 정성적인 분석이기 때문에 절대적 평가가 어려우며, 같은 공정에서의 재현성 떨어지고, 액체에 device를 담가 측정을 하기 때문에 device에 영향을 미칠 수 있으며 건조과정이 필요하다는 단점을 갖는다. 그럼에도 가장 많이 이용되는 이유는 측정이 간단하고, 비 파괴 방식이기 때문이다.

2.2. Crack opening method

Crack opening method은 1988년 W. P. Maszara에 의해 1988년 처음 소개 되었다. Blade를 일정한 세기로 bonding 계면에 삽입할 때 발생하는 Crack의 면적이나 길이로 평가하며 산출 방법이다.¹²⁾

빠르고 쉽게 측정이 가능하지만, 측정된 접합강도가 국부적인 결함과 blade 삽입 속도와 힘에 의해 약 20% 이상의 큰 오차가 발생되며, wafer의 두께가 얇아 부서지기 쉬운 상태라면 측정이 불가능하다. 또한, 높은 온도에서 annealed 된 silicon wafer 또는 bulk화 된 Metal-Metal 결합에서의 측정은 제한을 갖는다.¹³⁾

2.3. Pull Test

Abe et al에 의해 처음 사용된 방법으로 Pull Test는 이름에서 알 수 있듯이, 접착된 wafer pair의 양쪽에 glued를 이용하여 고정 시킨 후 wafer pair이 분리 될 때까지 힘을 가하는 측정 방법 이다.¹⁴⁾

Pull test은 작은 크기의 sample로 측정이 가능하고 wafer의 bonding strength maps을 측정 할 수 있는 장점을 갖는다. 그러나 Pull test는 강한 결합을 형성하고 있거나 부서지기 쉬운 wafer을 사용한 경우 crack opening method 보다 더욱 측정하기 힘들며, sample에 힘을 가하는 축에 작은 misalignment가 발생되면 결과에 큰 영향을 미친다는 단점을 갖는다. 또한, 가한 힘이 실제 접착하고 있는 힘보다 높은 힘이 가해져도 판단 할 수 없으며, 정밀한 접착에너지를 평가 할 수 없다.¹⁵⁾

2.4. Four-Point Bending

1989년 P. G. Charalambide et, al에 의해 처음 소개된 Four-point Bending은 결합된 wafer pair 사이의 interface에서의 박리는 crack의 진전에 의해 발생한다는 파괴역학을 기초로 제시된 방법이다.¹⁷⁾ 두 물질의 계면에서의 bonding strength은 사전에 준비된 pre-crack이 존재하는 beam 시편과 crack이 존재하는 않는 beam 시편 사이의 strain energy 차를 구함으로서 유도된다.¹⁷⁾

Four-Point Bending은 이전에 언급한 다른 방법들과 달리 시료 전체적으로 균일한 힘을 가하기 때문에 비교적 정확한 측정이 가능하며, 높은 온도에서 annealed 된 silicon wafer의 bonding strength 측정도 가능하다.¹⁸⁾

그러나, Sidewall의 grit가 있으면 정확한 측정이 되지 않아 grit를 제거하기 위한 별도의 공정이 필요하다는 단점을 갖는다.

2.5. AFM을 활용한 측정법

SAM을 제외한 방식은 파괴 방식으로 시료의 낭비나, 재현성의 부족 등의 문제를 해결하고 좀더 정밀한 Bonding strength 측정을 위해 2007년 Rahappa Tadepalli 와 Carl V. Thompson에 의해, AFM을 이용한 bonding strength 측정 할 수 있는 장치가 개발 되었다.¹⁹⁾

Bonding strength 측정은 Johnson-Kendall-Roberts의 Contact mechanics model을 기본으로 한다.

$$W = \frac{F}{1.5\pi R} \quad (\text{식 2})$$

W는 bonding strength, F은 F/D curve 에서 측정된 Adhesion force, 그리고 R은 probe의 반지름 이다. 이때 wafer의 surface은 tip 반지름과 비교할만한 형상학적 특징을 갖는다. Substrate surface shape는 이차원 배열로 모델화 되므로 tip-substrate interaction은 two spheres의 감소하는 반지름 Ra라 정의되며 R을 Ra로 대체되어 SEM으로 측정되는 tip의 반지름에 대한 오차를 감소 시켜준다. (식 3)

$$Ra = \frac{RR_s}{R + R_s} \quad (\text{식 3})$$

이 때 Rs는 $Rs = (h^2 + r^2)/2h$ 으로 정의되며, h은 grain의 평균 높이 r은 곡선의 반지름을 나타낸다. 정확한 grain의 h 와 r을 얻기 위해 STM을 사용한다. AFM을 활용한 Bonding strength 측정 방법은 비 파괴 방식으로 시료의 낭비를 막을 수 있고, 전체 Process 진행 전 박막의 특성을 이용하여 평가되는 방법이기 때문에 Process 개발에 비교적 유리한 방식이다. 그러나, AFM 외에도 SEM, STM 등의 장비가 요구 된다는 단점을 갖는다. 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위해 SEM을 대신하여 Tip의 반지름을 측정 할 수 있는 Tool 개발과, STM 대신

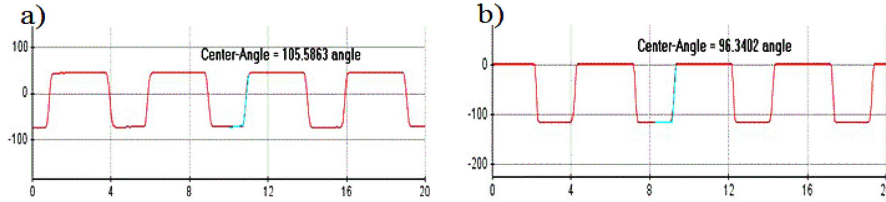


Fig. 1. Standard sample 측정결과 a) 일반 tip b) CNT tip

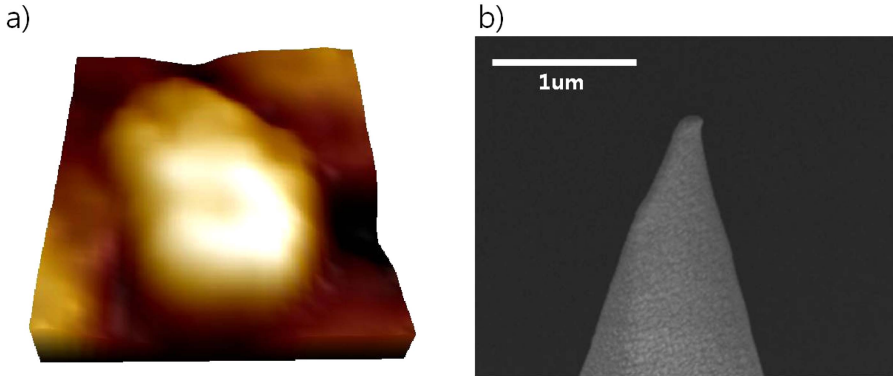


Fig. 2. Tip Radius a) AFM b)SEM

Langmuir-Blodgett technique으로 개선된 Resolution을 갖는 Carbon nanotube(CNT) Tip을 개발하여, 정확한 Surface 측정을 가능하게 하고자 한다.²⁰⁾

3. 실험방법

정확한 Wafer surface 측정을 위해 SWCNT Cantilever을 만든다. SWCNT 20 mg을 95% Sulfuric 와 60% ntric acid 을(62:23)섞은 혼합물을 만들어 55kHz로 70°C에서 4시간 동안 Sonication 한다. 이때 SWCNT는 길이가 단축되고 Carboxylated 작용기가 만들어 진다. Sonication 된 SWCNT를 DI wafer로 pH5.8까지 여과 후 solution 300 ml 에 triton X-100 0.5 ml을 넣고 1시간 동안 sonication한다. 다음으로 triton X-100 세척을 위해 99.85% methanol 100 ml을 넣고 30분 동안 다시 sonication 해준다. 만들어진 용액을 용기에 떨어뜨려 약 1시간 methanol을 증발시키고 용액에 Cantilever을 담근 후 SWCNT가 정렬 될 수 있도록 장벽을 밀어준다. 다음 Cantilever을 1mm/min으로 이동시켜 CNT를 부착하고 30분 동안 Tip을 아래로 향하게 건조시킨다.

SOI-Si bonding strength 측정을 위해 P-type Si(100) wafer (4inch)을 0.5% HF, RCA-1(25% NH₄OH : H₂O : 30% H₂O₂), SPM(97% H₂SO₄ 와 30% H₂O₂ :10ppm HF) 에 각각 Cleaning 한 후, AFM을 활용하여 Force-Distance (F-D) curve을 얻는다. F-D curve 측정에 사용된 Cantilever 은 개발된 Tool을 활용하여 Tip Radius을 측정하고, 시료의 표면은 만들어진 CNT Tip을 이용하여 분석한다.

4. 결 과

Fig. 1은 일반 Tip와 CNT-Tip을 이용하여 Standard Sample을 측정한 결과로 향상된 Resolution을 갖는 것을 확인 할 수 있으며, 정확한 surface 을 분석하기에 충분한 resolution 을 갖는 것으로 확인 된다.

반면, Tip의 증가한 반지름을 측정하기 위한 Tool을 활용하여 측정한 AFM image은 Fig 2a 와 같다. 이는 동일한 Tip을 SEM을 사용하여 측정한 결과 (Fig 2b)와 비교하여 실제 3차원으로 Tip의 반지름을 확인 할 수 있기 때문이 보다 정밀한 측정이 가능함을 확인 할 수 있으며, 측정 위치에 따라 약 10%정도의 오차가 발생된다. 그러나 Tip의 반지름 R은 약 30%정도의 오차 범위 안에서 Bonding strength에 미치는 영향이 매우 미비하기 때문에 측정 위치에 다른 오차 범위는 무시할만함 값을 갖는다.

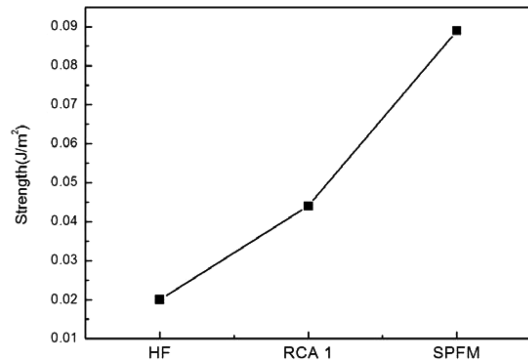


Fig. 3. Cleaning 용액에 따른 Bonding strength

반면, Cleaning 용액에 따른 Bonding strength 값을 비교하면 Fig 3과 같다.

RCA1으로 cleaning 된 wafer pair의 bonding strength은 0.044 J/m^2 이고, SPMF으로 cleaning된 wafer pair은 0.089 J/m^2 이다. 이는 Crack opening method 와 비교하여 약 12%정도의 오차를 가지며, Crack opening method가 갖는 오차 범위가 20%임을 생각하면 보다 정밀한 결과라고 여겨진다.

이때, 0.5% HF와 RCA-1과 비교하여 SPMF가 높은 Bonding strength 값을 갖는 이유는 표면 위에 SPMF cleaning 후 DI water Rinse 과정에서 -F 가 -OH 로 치환되며 보다 많은 Dangling bonding 이 형성 되기 때문이다.²¹⁾

5. 결 론

기존의 bonding strength 측정 방법의 단점을 보완하기 위한 AFM 을 활용한 측정법을 소개하고, 선행 연구의 단점을 보완하고자 정확한 surface 분석을 위한 향상된 resolution을 갖는 CNT Tip과 Tip의 radius를 측정 할 수 있는 새로운 Tool을 개발하였다. 개선된 AFM을 활용한 측정법의 신뢰성은 기존의 crack open method 와 비교하여 최대 12% 오차를 가지며, 이는 crack open method가 약 20% 오차를 갖는 것을 고려하면 비교적 정확한 수치로 여겨진다. 반면, SOI bonding은 wafer의 Cleaning에 따라서 다른 Bonding strength을 가지며, SPMF을 이용하여 cleaning 할 때 향상된 bonding strength을 갖는다. 이는 SPMF cleaning 할 때 다른 cleaning 용액과 다르게 surface 에 다량 형성되는 -OH의 영향으로 때문이다. 향후 원자 현미경을 이용한 다양 계면에서의 용이하게 결합강도를 측정하는 정량화를 구현하여 이를 이용한 산업체 상용화가 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. F. Niklaus, M. Lapis, S. J. Bleiker, V. Dubois, N. Roxhed, A. C. Fischer, F. Forsberg, G. Stemme, "Wafer-level heterogeneous 3D integration for MEMS and NEMS", Low Temperature Bonding for 3D Integration, 3rd., pp.247-252, Wiley: Tokyo (2012).
2. W.L. Chow, C.C. Yap, D. Tan, M. Shakerzadeh, M.K. Samani, C. Brun, E.H.T. Teo, D. Baillargeat and B.K. Tay, "Carbon based multi-functional materials towards 3D system integration", IEEE MTT-S., pp.1-3, Montreal, QC, Canada (2012).
3. J.H. Lau, "Recent Advances and New Trends in Nanotechnology and 3D Integration for Semiconductor Industry", 3D Systems Integration Conference (3DIC), 2011 IEEE International (2012).
4. Y. Ohara, L. Kangwook, T. Fukushima, T. Tanaka and M. Koyanagi, "Novel detachable bonding process with wettability control of versatile chip level 3D integration", 3DIC., 3(2), 1 (2011).
5. J. Y. Kwon, D. J. Lee and K. B. Kim, "Review Paper Transparent Amorphous Oxide Semiconductor Thin Film Transistor", Electronic Materials Letters., 7(1), 1 (2011).
6. K. Watanabe, K. Wada, H. Kaneda, K. Ide, M. Kato, and T. Wada, "Microscopy and Electrical Properties of Ge Ge Interfaces Bonded by Surface-Activated Wafer Bonding Technology", Jpn J. Appl. Phys., 50. pp.015701-015701-5 (2010).
7. J.N. Kuo and Y. K. Lin, "Fabrication of 20 nm Shallow Nanofluidic Channels Using Coverslip Thin Glass-Glass Fusion Bonding Method", Jpn J. Appl. Phys., 51, pp.095202-095202-5 (2011).
8. Y. Uryu and T. Asano, "CMOS Image Sensor Using SOI-MOS/Photodiode Composite Photodetector Device", Jpn J. Appl. Phys., 41, pp. 2620-2624 (2002).
9. S.G. Pyo, S. H. Park, and S. Kim, "3D Interconnect Process Integration and Characterization of Back Side Illuminated CMOS Image Sensor with 1.75um Pixels", Journal of The Electrochemical Society., 156(6), J143 (2009).
10. X. Liu, A. Zia, M. R. LeRoy, S. Raman, R. Clark, R. Kraft and J. F. McDonal, "A three-dimensional DRAM using floating body cell in FDSOI devices", Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems (DDECS), 2012 IEEE 15th International Symposium on (2012).
11. C.F. QUATE, "Acoustic microscopy with mechanical scanning-A Review", Proceedings of the IEEE., 67(8), 1092 (1979).
12. Maszara, W. P, Goetz G, Caviglia A, McKitterick J B, "Bonding of silicon wafer for silicon-on-insulator", Journal of Applied Physics., 64(10), 4943 (1988)
13. T. Marhini, J. Steinkirchner, and U. Gosele, "The Crack Opening Method in Silicon Wafer Bonding : How Useful Is It?", Journal of The Electrochemical Society., 144(1), 354 (1997).
14. T. Abe, M. Nakano, T. Itoh. "Silicon wafer bonding process technology for SOI structures" In Proceedings of the Fourth International Symposium Silicon-On-Insulator Technology and Devices, edited by Dennis N. Schmidt. The Electrochemical Society (1990).
15. Ö. Vallin, K. Jonsson, and U. Lindberg, "Adhesion quantification methods for wafer bonding" Materials Science and Engineering R., 50(4), 109 (2005),
16. P.G. Charalambides, J. Lund, A. G. Evans and R. M. McMeeking "A Test Specimen for Determining the Fracture Resistance of Bimaterial Interfaces", J. Appl. Mech., 56(1), 77 (1998).
17. 권용재, 석종원, J. Q. Lu, T. S. Cale, R. J. Gutmann, "고온 순환 공정이 BCB와 PECVD 산화규소막 계면의 본딩 결합에 미치는 영향에 대한 연구", Korea Chem. Eng. Res., 46(2), 386 (2008). (in Korean)
18. 송오정, 이상현, "사점접합시험법에 의한 적층형 전자소자의 접합강도 측정", 정보기술연구소 논문집., 4, 55 (2002).
19. R. Tadepalli and C. V. Thompson, "Formation of Cu-Cu interfaces with ideal adhesive strengths via room temperature pressure bonding in ultrahigh vacuum", Appl. Phys. Lett., 90, pp.151919-151919-3 (2007).
20. J. H. Lee, W. S. Kang, B. S. Choi, S. W. Choi, J. H. Kim, "fabrication of carbon nanotube AFM probes using the Langmuir-Blodgett technique", Ultramicroscopy., 108, pp.1163-1167 (2008).
21. K. Ljungberg, A. Soderbarg and U. Jansson, "improved direct

bonding of Si and SiO₂ surfaces by cleaning in H₂SO₄: H₂O₂:HF”, Appl. Phys. Lett., 67, pp.650-652 (1995).



- 이름: 최은미 (崔恩美)
- 소속: 중앙대학교 나노바이오에너지 공학과
- 분야: 전자패키징, 원자현미경, 반도체공정
- e-mail: eunmi_86@naver.com



- 이름: 표성규 (表成奎)
 - 소속: 중앙대학교 융합공학부
 - 분야: 3D integration, AFM/TEM, 반도체공정, MEMS/Sensor, 태양전지 전자패키징
 - e-mail: sgpyo@cau.ac.kr
-