

BCB 수지로 본딩한 웨이퍼의 본딩 결합력에 관한 연구

권용재[†] · 석종원* · Jian-Qiang Lu** · Timothy Cale** · Ronald Gutmann**

인하공업전문대학교 화공환경과
402-752 인천시 남구 용현동 253
*중앙대학교 기계공학부
156-756 서울시 동작구 흑석동 221
**포커스 센터-뉴욕 렌슬리어
미국 뉴욕주 12180 트로이시 렌슬리어 폴리테크닉 인스티튜트
(2007년 5월 20일 접수, 2007년 7월 2일 채택)

A Study on the Bond Strength of BCB-bonded Wafers

Yongchai Kwon[†], Jongwon Seok*, Jian-Qiang Lu**, Timothy Cale** and Ronald Gutmann**

Department of Chemical and Environmental Technology, Inha Technical College, 253, Yonghyun-dong, Nam-gu, Incheon 402-752, Korea

*School of Mechanical Engineering, College of Engineering, Chung-Ang University,
221, Heukseok-dong, Dongjak-gu, Seoul 156-756, Korea

**Focus Center - New York, Rensselaer: Interconnections for Hyperintegration, Rensselaer Polytechnic Institute,
Troy NY 12180-3590 USA

(Received 20 May 2007; accepted 2 July 2007)

요 약

BCB 수지를 이용하여 본딩한 웨이퍼의 BCB 두께, 본딩 촉진제의 사용여부 및 이웃하는 적층 물질의 종류에 따른 본딩 결합력에 대한 영향을 4점 굽힘방법을 이용하여 규명한다. 실험결과 본딩 결합력은 BCB 두께에 선형 비례하는데, 이는 BCB의 소성 변형의 정도가 두께에 비례하는 반면에 BCB의 항복 강도에는 영향을 미치지 않기 때문이다. 본딩한 BCB의 두께가 각각 2.6 μm 및 0.4 μm 인 경우에 대하여 본딩 촉진제를 사용 했을 때, 본딩 촉진제와 본딩된 물질의 표면에서는 공유 결합이 형성되기 때문에 본딩 결합력이 증가한다. 산화 규소막이 증착된 실리콘 웨이퍼와 BCB 사이 계면에서의 본딩 결합력은 글래스 웨이퍼와 BCB 사이의 계면에서 보다 약 3배 정도 높다. 이러한 본딩 결합력의 차이는 각 계면에서 Si-O 본드의 본딩 밀도 및 본드 파단 에너지의 차이에 기인한다. PECVD 산화 규소막을 증착한 실리콘 웨이퍼와 BCB 사이 계면의 경우, 기 측정된 18 J/m^2 및 22 J/m^2 의 본드 파단 에너지를 얻기 위해 각각 약 12~13 bonds/nm^2 및 15~16 bonds/nm^2 의 Si-O 본드 밀도가 필요하다. 반면에, 글래스 웨이퍼와 BCB 사이 계면의 경우에는 기 측정된 5 J/m^2 의 본드 파단 에너지를 얻기 위해 약 7~8 bonds/nm^2 의 Si-O 본드 밀도가 필요하다.

Abstract – Four point bending is used to study the dependences of bond strength of benzocyclobutene(BCB) bonded wafers and BCB thickness, the use of an adhesion promoter, and the materials being bonded. The bond strength depends linearly on BCB thickness, due to the thickness-dependent contribution of the plastic dissipation energy of the BCB and thickness independence of BCB yield strength. The bond strength increases by about a factor of two with an adhesion promoter for both 2.6 μm and 0.4 μm thick BCB, because of the formation of covalent bonds between adhesion promoter and the surface of the bonded materials. The bond strength at the interface between a silicon wafer with deposited oxide and BCB is about a factor of three higher than that at the interface between a glass wafer and BCB. This difference in bond strength is attributed to the difference in Si-O bond density at the interfaces. At the interfaces between plasma enhanced chemical vapor deposited (PECVD) oxide coated silicon wafers and BCB, and between thermally grown oxide on silicon wafers and BCB, 12~13 and 15~16 bonds/nm^2 need to be broken. This corresponds to the observed bond energies, G_0 , of 18 and 22 J/m^2 , respectively. Maximum 7~8 Si-O bonds/nm^2 are needed to explain the 5 J/m^2 at the interfaces between glass wafers and BCB.

Key words: BCB, 4 Point Bending, Bond Strength, Wafer Bonding, Plastic Dissipation Energy

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: kwony@inhac.ac.kr

1. 서 론

반도체 칩(chip)을 구성하는 집적회로(integrated circuit; IC)에서 전기 배선의 신호 지연은 비록 back-end-of-the-line(BEOL) 배선 기술이 구리/저유전체 다마신(damascene) 패터닝 기술의 등장과 함께 개선되고는 있지만, IC의 성능 향상을 위한 궁극적인 해법으로는 한계가 있을 것으로 예상된다[1, 2]. 칩 성능에 관한 여러 분석 결과들에 비추어 보면, 이러한 배선의 신호 지연은 현재 2차원(2D) IC에서 사용하고 있는 수평 방향의 긴 전기 배선을 웨이퍼들의 적층을 통한 3차원(3D)의 짧은 수직 방향 전기배선으로 전환함으로써 감소시킬 수 있을 뿐 아니라, 웨이퍼 레벨(WL)의 3차원 구조(3D architecture)를 형성함으로써 기능성(functionality)을 향상시키고 시스템의 설계를 유연하게 할 수 있다[1, 3-5]. 비록 3차원 집적회로의 제조를 위해 필요한 요소기술들은 설계 및 공정을 제한하는 여러가지 조건들에 의존하지만, 저유전체 폴리머를 웨이퍼 간 본딩을 위한 본딩 수지(adhesive)로 이용하는 것은 웨이퍼들의 3차원 적층을 위한 바람직한 방법 중의 하나로 알려져 있다[3-5].

이러한 본딩 수지의 후보 물질로서 네가지의 저유전체 폴리머들(benzocyclobutene(BCB), FlareTM, methylsilsequioxane(MSSQ) 및 parylene-N)이 제안되었고, 광학 검사 및 본딩 결합력 테스트 결과를 바탕으로 BCB를 이용한 표준 웨이퍼 본딩 공정이 개발되었다[6]. BCB의 우수한 흐름성 때문에, 이를 본딩 물질로 이용하는 경우, 가교 반응 밀도가 우수하고 및 동공(void)이 없는 본딩 결과를 얻을 수 있음이 밝혀졌으며 특히 200 mm 웨이퍼들의 본딩에서 BCB를 본딩물질로 사용하는 경우, 거의 100%의 본딩 영역을 얻을 수 있었다[7, 8]. Fig. 1은 3차원 회로 집적을 위한 하나의 시험 구조를 보여준다. 이 그림은 패터닝된 웨이퍼들을 정렬(align)한 후 BCB로 본딩 하고, 상단에 위치한 웨이퍼의 이면을 박층화시킨 다음 웨이퍼 간 전기배선을 형성하는 공정을 보여준다[3, 5].

후속 공정들이 진행되는 동안 우수한 본딩 안정성을 유지하는 것은 3차원 칩의 회로들을 성공적으로 집적하기 위해 매우 중요하다. 본딩된 웨이퍼들은 후속 공정 동안 화학-기계연마(chemical mechanical planarization; CMP), 기계적 연삭 및 열 순환(thermal cycle)과 같은

가혹한 열적/기계적 충격이 가해진다[9]. 따라서 적층된 웨이퍼들의 계면은 상기 가혹조건하에서 견딜 수 있을 정도로 충분히 높은 본딩 결합력을 가지고 있어야 한다.

또한 웨이퍼 레벨(WL) 3D IC 공정에서 본딩 접착층은 수직으로 웨이퍼들끼리 연결된 전기 배선용 비아(via)의 중형비를 낮게 유지하기 위해 가능한 한 얇아야 하는데, 이러한 얇은 접착층은 낮은 본딩 결합력 및 결함(defect)에 의한 동공의 형성을 초래할 수 있기 때문에 각각의 적층된 계면은 충분히 높은 본딩 결합력을 가져야 한다[7]. 본딩에 영향을 미치는 인자들을 변화시켜 웨이퍼를 적층하여 회로들을 3차원으로 집적할 수 있는 충분한 본딩 결합력을 확보하기 위해서는 재현성 있고 정량적인 측정 방법을 찾는 것은 필수적이다. 기존에 주로 사용되던 ScotchTM tape, peel 그리고 stud pull 테스트와 같은 전통적인 시험방법들은 예측이 불가능한 박막 응력의 완화(relaxation)현상 때문에 표준 측정방법으로는 한계를 가지고 있고, 결국 시험 결과의 재현성이 떨어지는 문제점이 있다[6-11].

본 논문에서는 혼성 모드(mixed mode)를 기본으로 한 4점 굽힘(four point bending) 방법을 이용하여 BCB로 본딩한 웨이퍼들의 본딩 결합력을 측정하였다. 탄성을 가지는 두 웨이퍼들 사이에 연성의 폴리머 박막을 삽입하는 샌드위치 구조로 만든 후 상기 방법을 이용하면, 예측이 불가능한 폴리머 박막의 잔류응력이 완화되는 것을 최소화 할 수 있는 장점이 있다. 또한 본 논문에서는, (1) BCB 두께, (2) 본딩 촉진제(adhesion promoter)의 사용 여부, 및 (3) BCB로 본딩하는 물질에 따른 웨이퍼들의 본딩 결합력을 정량화하는 연구를 수행하였다. 이러한 연구를 통해, BCB로 본딩한 다양한 계면에서의 본딩 결합력과 소성 변형 에너지(plastic dissipation energy), 본드 파단 에너지(bond breaking energy) 사이의 정량적인 관계를 설정할 수 있고, BCB로 본딩한 각 계면에서의 본딩 밀도를 본딩 결합력과 본드 파단 에너지와의 관계로부터 계산할 수 있다.

2. 실 험

2-1. BCB 및 BCB- 이웃 물질의 코팅

본 논문에서는 패터닝 되지 않은 네가지 다른 종류의 200 mm 웨이퍼들을 이용하여 본딩 결합력을 시험하였다. 이때 네종류의 웨이퍼들은 (1) 실리콘 웨이퍼, (2) 실리콘 웨이퍼와 열팽창 계수가 상대적으로 잘 일치하는 글래스 웨이퍼(실리콘 웨이퍼의 열팽창 계수: 2.6 ppm/°C, 글래스 웨이퍼의 열팽창 계수: 3.78 ppm/°C), (3) 2 μm 두께의 고온 증착에 의해 생성된 산화 규소막(thermal oxide layer)을 적층한 실리콘 웨이퍼, (4) 플라즈마 강화 화학 증착법(plasma enhanced chemical vapor deposition; PECVD)을 이용하여 증착한 두께 1 μm의 산화규소를 적층한 실리콘 웨이퍼이다. PECVD 법에 의해 증착된 산화 규소막은 Plasmatherm 73(Plasma-Therm Inc.)을 이용하여 25 W의 RF 파워 및 300 °C, 0.9 Torr의 온도와 압력 조건 하에서 실란(SiH₄)과 아산화 질소(N₂O) 가스를 이용하여 실리콘 웨이퍼 위에 적층하였다.

BCB 박막은 FlexiFabTM 스핀 코터를 이용하여 도포하였으며 본딩 결합력을 향상시키기 위해 본 코팅 전에 본딩 촉진제를 먼저 코팅하였다. 이때 본딩 촉진제로는 Dow Chemical사의 AP3000을 사용하였고 BCB 수지의 두께를 변화시키기 위해 용제(1,3,5-trimethyl benzene)를 혼합하였다[12]. 웨이퍼에 BCB를 스핀 코팅 한 후에는, 이를 질소 환경하에서 170 °C의 hot plate에 위치시킴으로써 BCB

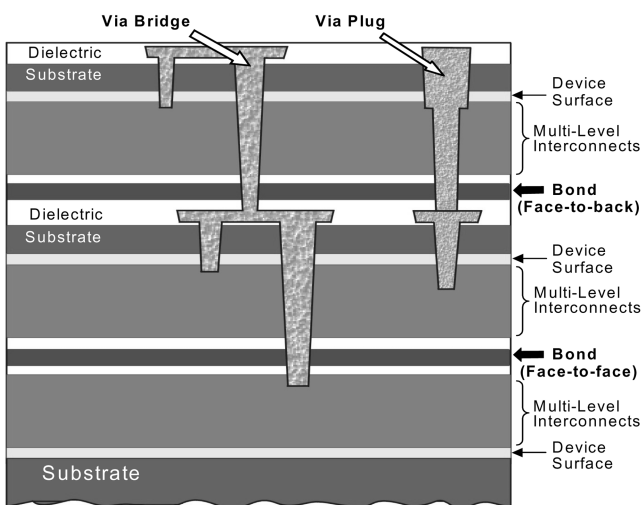


Fig. 1. 3D integration concept using wafer-bonding, showing dielectric adhesive bonding interface, vertical vias (plug- and bridge-type), and bonding approaches of "face-to-face" and "face-to-back".

내부의 휘발성 성분을 제거하였다. 한편, 각각의 BCB 두께를 측정하기 위해 spectroscopic reflectometry와 ellipsometry를 사용하였고, 그 결과 두께에 대한 표준편차는 1% 미만임을 알 수 있었다.

2-2. 웨이퍼 본딩

웨이퍼 접촉과 본딩은 미리 정해진 표준 본딩 레시피(recipe)에 따라 EVG EV501 웨이퍼 본딩(EVGroup Inc., Austria)를 이용하여 수행하였다[8]. BCB가 코팅된 두 웨이퍼(상부 및 하부 웨이퍼)에 다단계의 본딩 공정을 적용하였다. 우선 챔버를 10⁻⁴ mbar까지 진공화하고, 32 °C/min의 속도로 미리 결정된 최종 본딩 온도(250 °C)까지 웨이퍼들을 가열한다. 이러한 최종 본딩 온도는 BCB의 큐어(cure) 반응 온도와 관련이 있다. 이렇게 결정된 본딩 온도에 도달한 후에 초기 접촉점을 얻기 위해 상부 웨이퍼의 중간 지점을 압착하고, 이후 전체 웨이퍼에 일정한 압착력(200 mm 웨이퍼에서 10 kN)을 한시간 동안 가한다. BCB 본딩 공정의 큐어 반응이 끝난 후 압착 작업을 종료하고, 본딩 된 웨이퍼들을 서서히 냉각한다.

2-3. Four point bending 이용을 위한 시편 준비 및 측정

본 연구에서는 4점 굽힘시험을 통해 본딩 결합력(bond strength 혹은 strain energy release rate)을 정량적으로 평가하였다. 두 물질 사이 계면에서의 본딩 결합력은 사전에 만들어진 크랙(pre-crack)이 존재하는 보(beam) 시편과 크랙이 존재하지 않는 보 시편 사이의 변형 에너지(strain energy)를 구함으로써 유도할 수 있다[13]. 계면에서의 화학 결합, 연성 폴리머의 소성 변형, 계면 잔류 응력 등이 본딩 결합력에 미치는 영향에 대한 연구는 다른 연구그룹에서도 활발히 진행되고 있다[11, 14-15].

4점 굽힘시험에 사용되는 시편들은 우선 본딩 공정이 끝난 웨이퍼들을 보 형상으로 절단하고, 절단면을 연삭 한 후, 사전에 만들어진 크랙을 형성하는 공정을 거쳐 완성된다. 이러한 보 시편은 각각 40 mm의 길이와 4 mm의 폭을 가진다. 특별히 고안한 four-point bending fixture(Zwick T1-FR005TN Material Testing Machine)에 보 시편을 위치시킨 후, 10 μm/min의 변위율로 하중과 변위 사이의 관계를 측정하고 기록하였다. 이때 가해진 하중(load)은 로드 셀(load cell)을 이용하여 측정하였으며, 변위(displacement)는 액추에이터(actuator)를 이용하여 측정하였다.

하중이 보 시편에 가해짐에 따라, 초기 선형탄성영역(linear elastic region)이 나타나는데 이는 프리크랙이 존재하는 보(beam) 시편 및 크랙이 존재하지 않는 보 시편 두 시편 모두에서의 순수 굽힘(pure bending) 때문이다. 초기 프리크랙에 존재한 크랙팁이 약한 계면으로 이동하면 킥(kink)가 발생되며 약한 계면을 따라 크랙이 진전하면서 평형 하중(load plateau)이 나타나는 영역이 존재한다. 2차 선형 탄성 영역은 평형 하중 값이 나타나는 영역 이후 크랙이 존재하지 않는 보 시편에서의 순수 굽힘 때문에 발생한다. 한편, 이렇게 얻어진 평형 하중값은 단위 면적당 이완된 변형 에너지나 크랙 길이에 영향을 받지 않는다. 보 시편에서 크랙의 진전을 보여주는 전형적인 하중과 변위의 관계를 Fig. 2에 도시하였다.

본딩 결합력 G_c는 보의 굽힘원리를 기초로 다음과 같은 형태로 구할 수 있다[14].

$$G_c = \frac{3(1-\nu_2^2)P_c^2 L^2}{2E_2 b^2 h^3} \left[\frac{1}{\lambda_2^3} - \lambda \left(\eta_1^3 + \lambda \eta_2^3 + 3\lambda \frac{\eta_1 \eta_2}{\eta_1 + \lambda \eta_2} \right) \right] \quad (1)$$

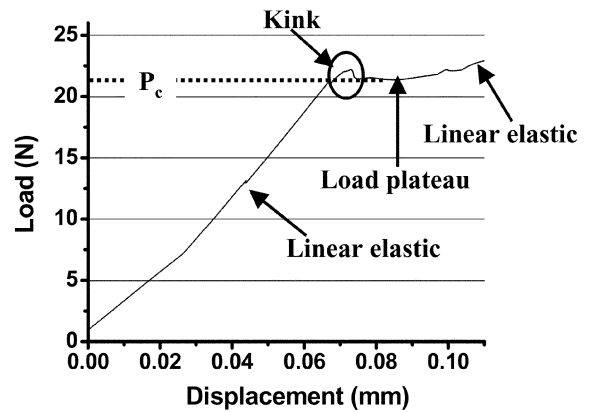


Fig. 2. A typical load-displacement curve for measuring saturation load value.

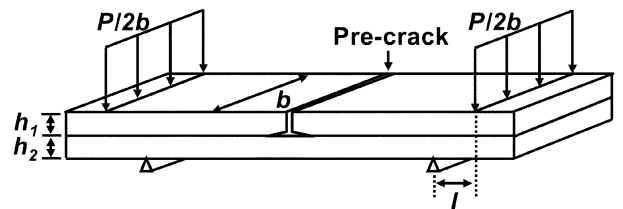


Fig. 3. Beam specimen geometry for the experiments using four-point bending method.

여기서 E₁과 ν₁은 각각 프리크랙이 있는 웨이퍼의 영률(Young's modulus)과 푸아송비(Poisson's ratio)이고, E₂와 ν₂는 각각 크랙이 없는 웨이퍼에 대한 영률과 푸아송비를 나타낸다. 또한 λ는 E₂(1-ν₁²)/E₁(1-ν₂²)로 표현되는 유효 탄성 계수(effective modulus)이고, P_c는 평형 하중값, L은 내측과 외측 핀들 사이의 거리, b와 h는 각각 보 시편의 폭과 두께이다. 이때 h는 h₁+h₂로서 나타낼 수 있으며, 이때 h₁은 프리크랙이 있는 웨이퍼의 두께, h₂는 크랙이 없는 웨이퍼의 두께를 나타내고, h_i는 h_i=h_i/(h₁+h₂)(i=1, 2)로 표현되는 상대 두께를 의미한다. Fig. 3에 시편 구조를 나타내었다.

로드셀에 의한 외부 하중을 보 시편에 가하면 보 시편은 프리크랙의 진전없이 탄성적으로 휘어진다. BCB와 실리콘 혹은 글래스 웨이퍼의 탄성굽힘 때문에 외부 하중에 의한 변형 에너지는 내부에 축적된다. 미리 만들어진 크랙의 선단 응력이 임계값에 도달하면, 크랙은 축적된 변형에너지를 방출하며 상대적으로 약한 계면을 따라 진전한다. 이렇게 이완된 변형 에너지는 일단 가장 약한 계면에서의 잔류 응력과 BCB의 소성 변형을 위해 소비되고, 마지막으로 약한 계면을 따라 본드들의 파단을 이끌며 박리를 발생시킨다. Fig. 4에 이러한 굽힘에 의한 시편의 변화 및 실험에 의한 실제 사진을 나타내었다. 이러한 원리를 바탕으로 본딩 결합력 G_c는 다음식으로 표현할 수 있다[15, 16].

$$G_c = G_0 + G_{residual} + G_p \quad (2)$$

여기서, G₀는 계면에서 본드들을 파단하기 위해 필요한 에너지이고, G_{residual}은 계면 잔류 응력에 의한 변형을 위해 필요한 에너지이며[15, 16], G_p는 연성 물질의 소성 변형을 위해 소비되는 에너지이다[17]. 본 연구의 결과들은 적어도 5개의 시편을 테스트하여 얻었으며, 4점 굽힘시험법을 이용하여 측정된 본딩 결합력의 표준편차는 평균값의 10% 이내로 이들 값들은 충분히 신뢰할 수 있다고 판단된다.

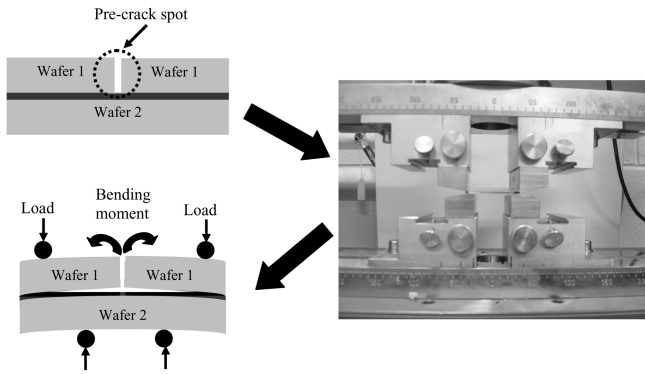


Fig. 4. Schematics of four point bending test procedure and the picture of test rig.

3. 결과 및 토론

3-1. BCB 두께 변화에 따른 본딩 결합력의 변화 효과

BCB 두께는 (1) 3차원 집적회로 구조에서 웨이퍼 간 수직 방향의 배선 형성을 위한 비아의 중첩비와, (2) 본딩 계면의 결합력에 영향을 미친다. 일반적으로 3차원 집적회로 구조를 위해서는 얇은 BCB 본딩 접착층이 바람직하지만 이는 약한 본딩 결합력을 초래하는 것으로 알려졌기 때문에 본딩 결합력을 BCB 두께의 함수로 정량화하여 표현하는 것은 중요하다. Fig. 5와 Table 1은 세가지의 다른 BCB를 포함한 본딩 계면에 대한 BCB 두께에 따른 본딩 결합력의 변화를 보여주고 있는데 계면(a)는 PECVD 산화 규소막이 1 mm 두께로 증착된 실리콘 웨이퍼 사이에 있는 BCB(Table 1에서 시편 1, 2, 3)이고, 계면(b)는 고온 산화 규소막이 2 mm 두께로 실리콘 웨이퍼 사이에 증착되어 있는 BCB(Table 1에서 시편 4, 5)이며, 계면(c)는 실리콘 웨이퍼와 글래스 웨이퍼 사이에 있는 BCB(Table 1에서 시편 6, 7, 8, 9)를 나타낸다. 모든 본딩된 웨이퍼들에서 박리는 BCB와 BCB에 이웃하는 물질의 계면에서 발생한다. Fig. 5에서와 같이 본딩 결합력은 BCB의 두께가 증가함에 따라 같이 증가한다. 이러한 BCB의 두께와 본딩 결합력 사이에서 나타나는 명백한 선형 관계는 유사한 다른 폴리머 물질을 이용한 연구결과들과 잘 일치하는 경향을 보여준다[15, 18]. 예를 들면, SiLK™ 폴리머의 두께 증가에 따른 폴리머와 산화 규소막의 계면에서의 본딩 결합력은 선형적으로 증가하며 이러한 경향은 Fig. 5에 잘 표현되어 있다[18].

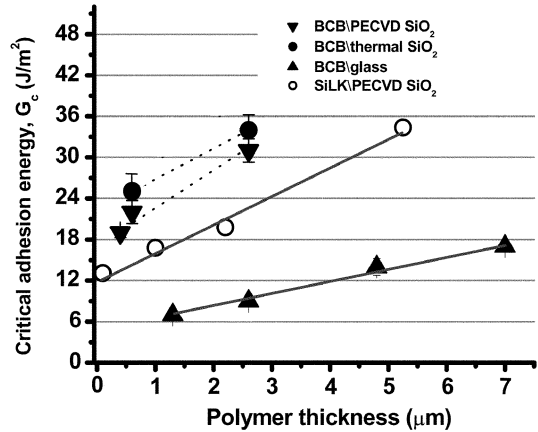


Fig. 5. CAEs for different BCB thicknesses and material stacks (this work) and at the interface between SiLK and PECVD SiO₂ [18]: (a) BCB layer is sandwiched by PECVD SiO₂ deposited on Si wafers, (b) BCB layer is sandwiched by thermally grown oxide on Si wafers, (c) BCB is sandwiched by one Si wafer and one glass wafer, and (d) SiLK is sandwiched by PECVD oxide deposited on Si wafers.

본딩 결합력은 주로 두가지 요소에 의해 결정된다. 첫 번째가, 계면에 형성된 본드들을 파단하기 위해 필요한 에너지, 즉 점착일(work of adhesion) G_0 이며, 다른 하나는 해당 연성물질(여기서는 BCB)의 소성 변형에 의해 소비되는 에너지 G_p 이다[18, 19]. 한편, 다른 형태의 에너지, 예를 들면 잔류 응력의 변형을 위해 필요한 에너지인 $G_{residual}$ 또한 G_c 를 구성하는 요소가 될 수 있다[17]. 본 논문에서는 $G_{residual}$ 이 G_c 에 미치는 영향을 평가하기 위해 두개의 실리콘 웨이퍼를 2.6 μm 두께의 BCB로 본딩된 구조에서 순수 굽힘(pure bending) 원리를 이용하여 변형 에너지를 계산하였다. 실제로 두개의 실리콘 웨이퍼와 BCB 두께들의 합은 시편의 길이에 비해 충분히 얇으므로 본딩된 시편들은 얇은 보(thin beam)로 가정할 수 있고, 따라서 얇은 보의 굽힘원리를 적용할 수 있다.

BCB 두께와 G_p 사이의 선형 관계는 BCB의 소성 변형 영역의 높이(plastic zone height) R_p 가 BCB의 두께보다 더 두꺼울 때(소위, 대규모 항복 조건(large scale yielding)) 발생한다[19]. 이러한 R_p 는 탄성을 지니는 기관 사이에 놓여진 소성 특성을 가지는 박막의 특성에 의존한다. 소성 박막의 영률(Young's modulus)이 이웃하는 적층 물질의 영률보다 많이 낮고, 소성 박막의 항복 응력(yield stress)

Table 1. Four point bending results for different chemical and geometrical parameters

Sample #	Geometric configuration of beam specimen	AP	BCB thickness	n	Mean G_c (J/m ²)	S.D. (J/m ²)
1	Si/PECVD SiO ₂ /BCB/PECVD SiO ₂ /Si	Yes	2.6 μm (double layer)	6	31	1.7
2	Si/PECVD SiO ₂ /BCB/PECVD SiO ₂ /Si	Yes	0.4 μm (single layer)	7	19	0.7
3	Si/PECVD SiO ₂ /BCB/PECVD SiO ₂ /Si	Yes	0.6 μm (double layer)	5	24	1.7
4	Si/Thermal SiO ₂ /BCB/Thermal SiO ₂ /Si	Yes	2.6 μm (double layer)	6	34	2.2
5	Si/Thermal SiO ₂ /BCB/Thermal SiO ₂ /Si	Yes	0.6 μm (double layer)	6	25	2.3
6	Glass/BCB/Si	Yes	7 μm (double layer)	7	17	0.6
7	Glass/BCB/Si	Yes	4.8 μm (double layer)	7	14	1.2
8	Glass/BCB/Si	Yes	2.6 μm (double layer)	7	9	0.9
9	Glass/BCB/Si	Yes	1.3 μm (single layer)	7	7	0.1
10	Si/PECVD SiO ₂ /BCB/PECVD SiO ₂ /Si	No	2.6 μm (double layer)	6	13	0.5
11	Si/PECVD SiO ₂ /BCB/PECVD SiO ₂ /Si	No	0.4 μm (single layer)	6	10	0.4
12	Si/Native SiO ₂ /BCB/AP/Native SiO ₂ /Si	Yes	2.6 μm (double layer)	6	30	1.4

Table 2. Plastic zone height in different beam specimen geometries

Geometric configuration of beam specimen	BCB thickness	BCB plastic zone height (μm)
Si/PECVD SiO ₂ /AP/BCB/AP/PECVD SiO ₂ /Si	2.6 μm (double layer)	69
Si/PECVD SiO ₂ /AP/BCB/AP/PECVD SiO ₂ /Si	0.4 μm (single layer)	42
Si/PECVD SiO ₂ /AP/BCB/AP/PECVD SiO ₂ /Si	0.6 μm (double layer)	53
Si/Thermal SiO ₂ /AP/BCB/AP/Thermal SiO ₂ /Si	2.6 μm (double layer)	75
Si/Thermal SiO ₂ /AP/BCB/AP/Thermal SiO ₂ /Si	0.6 μm (double layer)	55
Glass/AP/BCB/AP/Si	7 μm (double layer)	16
Glass/AP/BCB/AP/Si	4.8 μm (double layer)	13
Glass/AP/BCB/AP/Si	2.6 μm (double layer)	9
Glass/AP/BCB/AP/Si	1.3 μm (single layer)	7
Si/Native SiO ₂ /AP/BCB/AP/Native SiO ₂ /Si	2.6 μm (double layer)	66

이 막 두께에 영향을 받지 않을 때, R_p 는 다음 식을 통해 계산할 수 있다[20].

$$R_p = \frac{E_s}{1-\nu^2} \left(\frac{A^2+B^2+C^2}{4\pi} \right) \frac{G_c}{\sigma_{YS}^2}$$

$$A = \frac{1}{1-\nu^2} \left[(1-\nu-2\nu^2) - \frac{E}{E_s} (1-\nu_s-2\nu_s^2) \right]$$

$$B = \frac{1}{1-\nu^2} \left[(1-\nu-2\nu^2) - \frac{E}{E_s} \nu(1-\nu_s-2\nu_s^2) \right]$$

$$C = \frac{1}{(1+\nu)E_s} (1-\nu_s-2\nu_s^2) \quad (3)$$

여기서 E_s 와 ν_s 는 각각 기판의 영률 및 푸아송 비, E 와 ν 는 각각 BCB의 영률 및 푸아송 비이며, σ_{YS} 는 BCB의 항복 응력을 나타낸다.

BCB와 이웃하는 실리콘 혹은 글래스 웨이퍼 사이의 영률의 불일치 정도가 크고(실리콘의 영률: ≈ 131 GPa, 글래스 ≈ 63 GPa, BCB의 영률 ≈ 3 GPa), BCB의 항복 응력(≈ 48 GPa)은 BCB 두께의 영향을 받지 않으므로[11, 21], 본 연구에서는 소성 변형의 높이를 계산하기 위해 식 (3)을 이용하였다.

Table 2는 식 (3)을 이용하여 계산한 BCB의 R_p 값들을 보여준다. 모든 경우에서, BCB의 R_p 는 BCB의 두께보다 크고, 따라서 전술한 대규모 항복 조건을 적용할 수 있다. BCB와 탄성을 지니는 적층 물질 사이의 영률의 차이가 커지는 것은 BCB의 큰 R_p 값을 초래하는 원인이다[19]. 본 논문에서 사용한 모든 본딩 시편에서 R_p 는 항상 BCB 두께보다 크므로, BCB 두께를 줄이는 것은 R_p 의 선형적인 감소를 야기하고 이는 차례로 G_p 와 G_c 의 감소를 초래한다. 상기 이론은 아래 설명하는 실험 결과를 통해 실증하였다.

앞서 언급한 계면 a, b, c에 대해, Table 1의 동일한 계면에서의 각 시편의 G_c 와 BCB 두께, t 의 관계를 선형화 하면 다음과 같이 표현된다.

$$G_c \sim 18 + 5.5t = 18(1 + 0.3t)(\text{J/m}^2) \quad 0.4 \mu\text{m} \leq t \leq 2.6 \mu\text{m} \quad (4)$$

$$G_c \sim 22 + 6.6t = 22(1 + 0.3t)(\text{J/m}^2) \quad 0.6 \mu\text{m} \leq t \leq 2.6 \mu\text{m} \quad (5)$$

$$G_c \sim 5 + 1.7t = 5(1 + 0.3t)(\text{J/m}^2) \quad 1.3 \mu\text{m} \leq t \leq 7 \mu\text{m} \quad (6)$$

식 (4-6)의 계면 a, b, c에 대해, 점착일 G_0 는 다음과 같이 표현된다.

$$\text{계면 a에서, } G_0 = 18 (\text{J/m}^2) \quad (7)$$

$$\text{계면 b에서, } G_0 = 22 (\text{J/m}^2) \quad (8)$$

$$\text{계면 c에서, } G_0 = 5 (\text{J/m}^2) \quad (9)$$

식 (4)와 (7)은 각각 Table 1의 시편 1~3에 대해 각 시편의 G_c 와 BCB 두께, t 로부터 얻어진 관계식과 y 방향의 절편이고, 식 (5)와 (8)은 Table 1의 시편 4와 5에 대해 각 시편의 G_c 와 BCB 두께, t 로부터 얻어진 관계식과 y 방향의 절편이며, 식 (6)과 (9)는 Table 1의 시편 7~10에 대해 각 시편의 G_c 와 BCB 두께, t 로부터 얻어진 관계식과 y 방향의 절편이다.

식 (4-6)을 통해 알 수 있는 것 처럼, BCB와 이웃하는 층의 종류가 다름에도 불구하고 BCB 두께에 대한 G_c 의 의존성은 세 계면에서 모두 같은 경향을 나타내었다. 이를 바탕으로, 식 (2)를 식 (4-6)과 비교할 때, G_c 와 BCB 두께 t 와의 선형 관계는

$$G_c \sim G_0(1 + 0.3t) (\text{J/m}^2) \quad 0.4 \mu\text{m} \leq t \leq 7 \mu\text{m} \quad (10)$$

이고 식 (2)와 (10)을 비교할 때 G_p 는 G_0 및 BCB 두께 t 와 다음의 관계를 갖는다.

$$G_p \sim 0.3 \cdot G_0 \cdot t (\text{J/m}^2) \quad 0.4 \mu\text{m} \leq t \leq 7 \mu\text{m} \quad (11)$$

이러한 결과는 G_0 가 본딩 계면에서 형성된 본딩 밀도에 의존하는 반면, G_p 는 BCB 두께에 선형적으로 비례함을 나타낸다. 여기에서 이용된 BCB의 두께가 0.4 μm 정도로 얇은 경우에도, 이러한 BCB를 이용해 본딩된 웨이퍼들의 본딩 결합력은(글래스 웨이퍼와 실리콘 웨이퍼가 본딩된 경우를 제외하고는) 다공질 저유전체 및 구리 배선 구조 계면에서의 본딩 결합력(~ 6 J/m²)보다 높다[7].

3-2. BCB 본딩 촉진제 사용에 따른 본드 결합력의 변화 효과

본 논문에서는 BCB를 생산하는 Dow Chemical사에서 추천한 본딩 촉진제인 AP3000이 BCB와 적층 물질간 본딩 결합력에 미치는 영향을 평가하여, 그 결과를 Table 1에 요약하여 나타내었다. 전체 두께를 2.6 μm 로 형성하기 위해 1.3 μm 두께의 BCB를 본딩되는 두개의 웨이퍼에 각각 코팅하였다(Table 1에서 시편 1과 10). 시편 1 구조에서, 상부와 하부 웨이퍼 모두 BCB의 스펀 코팅 전에 AP3000으로 코팅하고 시편 10 구조에서 두개의 웨이퍼는 AP3000을 이용하지 않고 BCB로만 코팅하였다. 상기 두 시편에서, 1 μm 두께의 PECVD 산화 규소막이 증착된 두 실리콘 웨이퍼 사이에 BCB를 코팅하였다. 이를 위해 미리 정해진 표준 베이킹 및 본딩 공정을 이용하였다[8]. 시편 2와 11은 0.4 μm 두께의 얇은 BCB 층을 가지고 있다. 시편 2에서, 하부 웨이퍼에는 단지 AP3000만 코팅하는 반면, 상부 웨이퍼에는 AP3000과 BCB를 모두 코팅하였다. 한편, 시편 11에는 AP3000과 BCB를 상부 웨이퍼에만 도포하였다. 이

경우, BCB와 하부 웨이퍼 사이에는 AP3000을 코팅하지 않았다.

Table 1의 시편 6-9로부터 글래스 웨이퍼와 BCB 계면에서, AP3000을 사용한 경우에 대해 예측한 G_0 는 $\sim 5 \text{ J/m}^2$ (식 9)이다. 또한, Table 1의 시편 10 및 11로부터 AP3000을 사용하지 않았을 때의 PECVD 산화 규소막을 증착한 웨이퍼와 BCB 계면에 대해, 그 계면의 G_0 와 BCB의 두께와의 관계를 대규모 항복 조건(large scale yielding)을 적용, 이를 선형화하여 예측한 G_0 는 $\sim 9 \text{ J/m}^2$ 이다. 시편 1~3으로부터 AP3000을 사용한 경우 PECVD 산화 규소막을 증착한 웨이퍼와 BCB 계면에서 예측한 G_0 는 $\sim 18 \text{ J/m}^2$ (식 7)이다.

이러한 실험 결과로부터 글래스 웨이퍼/BCB 계면, PECVD 산화 규소막/BCB 계면에 대해, AP3000을 사용했을 경우의 G_0 가 AP3000을 사용하지 않았을 경우의 G_0 보다 최대로 각각 약 5 J/m^2 , 9 J/m^2 높은 것을 알 수 있다(AP3000을 사용하지 않았을 경우 최소로 나올 수 있는 G_0 값은 0 J/m^2 이므로, AP3000의 사용 여부에 의해 변할 수 있는 G_0 의 최대값은 각 경우에 대해 얻은 G_0 의 값이다). 따라서, AP3000의 사용에 따라 최대로 가능한 G_0 에서의 차이는 글래스 웨이퍼/BCB 계면이 PECVD 산화 규소막/BCB 계면보다 적으며, 이는 PECVD 산화규소막을 증착한 웨이퍼와 BCB 사이 계면에 본딩 촉진제를 사용했을 경우에 비해, 글래스 웨이퍼와 BCB사이 계면에 본딩 촉진제를 사용하는 경우 본딩 결합력의 향상되는 정도는 작다는 것을 의미한다.

Fig. 6은 상기 언급한 BCB를 이용해 본딩된 웨이퍼들의 보 시편 구조 및 본딩 결합력값을 보여준다. $2.6 \mu\text{m}$ 나 $0.4 \mu\text{m}$ 두께의 BCB와 본딩된 웨이퍼들인 경우, AP3000을 이용해서 본딩한 웨이퍼들에 대해 측정된 본딩 결합력은 AP3000을 이용하지 않고 본딩한 웨이퍼들에서 측정된 그것보다 2배 이상 높았다. AP3000을 이용해 본딩된 웨이퍼들의 높은 본딩 결합력은 AP3000, BCB 그리고 PECVD 산화 규소막간의 화학적 반응에 기인하는 것으로 판단된다. AP3000은 4개의 반응기를 가진 사일렌(silane)을 기본으로 해서 한쪽 면에 비닐(vinyl, CH_2CH)기를, 다른 면에는 세개의 아세톡시(acetoxy, OCOCH_3)기로 구성된다[12]. AP3000에 있는 비닐기는 BCB의 비닐기와 결합하는 반면, 아세톡시기는 강한 실록산 본드(Si-O-Si)를 생성하기 위해 산화 규소막 표면의 매달린(dangling) 실라놀 기(Si-OH)와 반응한다. 이러한 화학 본딩에 의한 본드들의 연결은 본딩 결합력의 상승을 초래한다. AP3000이 없는 경우, BCB는 주로 물리적 얽힘상태(physical entangle)의 형태로 산화 규소막과 결합한다[22].

3-3. 결합된 계면에 따른 본드 결합력의 변화 효과

BCB는 3차원 IC 기술을 이용한 다양한 제품에 포함되는 다양한

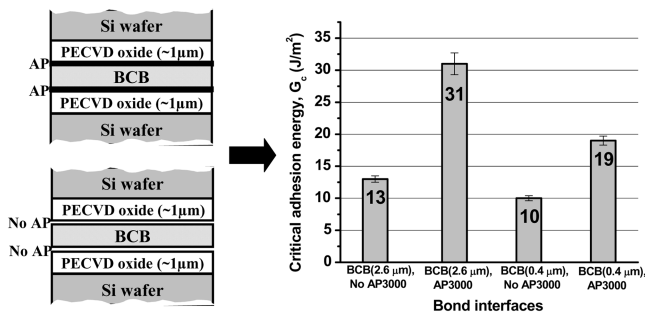


Fig. 6. Beam specimen configurations and CAEs of bonded wafer pairs including those formed using BCB on one or both surfaces, with and without AP.

형태의 박막이 적층된 실리콘이나 글래스 웨이퍼와의 본딩을 위해 사용 할 수 있다. BCB 두께 변화에 따른 본딩 결합력의 변화를 예측하기 위한 모델은, 본딩 결합력이 BCB의 두께가 고정된 경우 G_0 에만 의존하는 결과를 보여준다. 이러한 G_0 는 BCB가 이웃 계면과 결합된 본드 구조를 판단하는 데 사용되는 에너지와 관련 있다.

산화 규소막이 코팅된 Si 웨이퍼와 달리 글래스 웨이퍼는 다양한 화학적 구조를 가진 PG&O 1737 알루미늄 실리케이트이다[21]. 산화 규소막이 코팅된 웨이퍼들의 표면이 거의 100%의 매달린 실라놀 기로 구성되어 있는 반면, 글래스 웨이퍼의 표면은 약 50%의 매달린(dangling) 실라놀 기로 구성되어 있다[22]. 알루미늄 실리케이트 웨이퍼 표면의 다른 성분들은 Al-OH, Ca-OH, B-OH, Ba-OH, Mg-OH, Sr-OH 그리고 As-OH와 같은 히드록실(hydroxyl)기로 구성된다. 글래스 웨이퍼를 포함한 본딩된 웨이퍼들에서, 반응 촉진제의 트리아세톡시실란(triacetoxysilane)기는 약 50%의 실록산 본드(Si-O-Si) 및 Al-O-Si, Ca-O-Si, B-O-Si, Ba-O-Si, Mg-O-Si, Sr-O-Si, As-O-Si 등의 본드들을 형성하기 위해 글래스 웨이퍼의 매달린 본드들과 결합한다[23, 24]. 반면에, 코팅된 산화 규소막을 포함한 본딩된 웨이퍼들은 큐어 반응이 일어나는 동안 거의 100%의 실록산 본드를 형성한다. 글래스 웨이퍼의 표면에서 발생할 수 있는 두원자 본드(diatomic bond) 및 관련된 계면들에서 예측된 본드 구조를 Fig. 7에 나타내었다. 본드 판단 에너지는 글래스 웨이퍼와 본딩 촉진제 사이 계면에서 보다 산화 규소막이 코팅된 실리콘 웨이퍼와 본딩 촉진제 사이의 계면에서 3배 이상 더 높게 나타난다. 이러한 본드 판단 에너지에서의 차이는 높은 본딩 에너지를 가지는 실록산 본드의 차이에 기인하는 것으로 생각된다. 상기 설명을 위해서 본딩 촉진제의 아세톡시기가 코팅된 산화 규소막을 포함한 실리콘 웨이퍼나 글래스 웨이퍼에 1대 1로 반응하는 것으로 가정한다. 본딩 결합력 중 화학적 본딩 요소의 정량화를 위한 모델을 세우기 위해, 계면에서의 G_0 를 다음식과 같이 제안하였다[25, 26].

$$G_0 = \sum S_i \cdot D_i / N_A \tag{12}$$

여기서 $G_0(\text{J/m}^2)$ 는 계면에서 본드들을 판단 시키기 위해 필요한 에너지, $S_i(\text{J/mol})$ 는 4-점 굽힘시험 동안 판단되는 i 종류 본드들의 결합력, $D_i(\text{bonds/mm}^2)$ 는 i 종류 본드들의 본드 밀도, 그리고 N_A 는 아보가드로 계수를 각각 나타낸다. 따라서, 산화 규소막이 있는 실리콘 웨이퍼와 본딩 촉진제를 포함한 BCB 사이 계면에서의 G_0 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_0 = \sum \alpha_{Si-O} \cdot S_i \cdot D_i / N_A \sim 1.33 D_{Si-O} (\text{J/m}^2) \tag{13}$$

여기서 α_{Si-O} 는 Si-O 본드의 몰분율(식 13의 구조에서 Si-O 본드의 몰분율은 100%임), D_{Si-O} 는 본드 밀도라 불리는 단위면적(nm^2)당

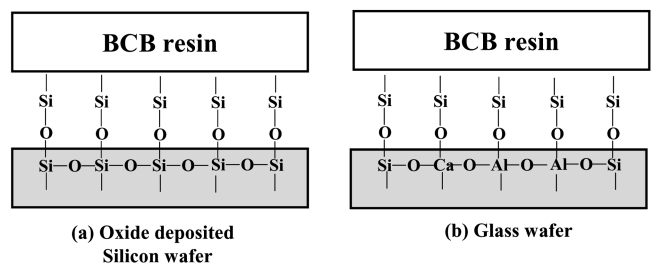


Fig. 7. Anticipated bond structure: (a) between glass wafer and AP and (b) between oxide deposited on a Si wafer and AP.

형성된 Si-O 본드들의 갯수, S_{Si-O} 는 Si-O 본드의 이중 본딩 결합력(diatomic bond strength)을 각각 나타내며, 이는 약 800 kJ/mol 이다[27].

글래스 웨이퍼와 본딩 촉진제를 포함한 BCB 사이의 계면에서의 G_0 를 다음식과 같이 표현할 수 있다[23, 24].

$$G_0 = \sum \alpha_i \cdot S_i \cdot D_i / N_A = 0.7D_{Si-O} + 0.14D_{Al-O} + 0.11D_{B-O} + 0.08D_{Ba-O} + 0.03D_{Ca-O} + 0.03D_{As-O} + 0.03D_{Mg-O} \quad (J/m^2) \quad (14)$$

여기서 α_i 는 Table 3에 나와 있는 i 종류 본드들의 몰분율, D_i 는 단위면적(nm^2)당 형성된 i 종류 본드들의 갯수, S_i 는 i 종류 본드들의 이중 본딩 결합력(diatomic bond strength)을 각각 나타낸다[27]. 식 (13)과 (14)로부터, 산화규소막이 있는 실리콘 웨이퍼와 본딩 촉진제를 포함한 BCB 사이 그리고 및 글래스 웨이퍼와 본딩 촉진제를 포함한 BCB 사이 계면들에서의 본드 파단 에너지와 다양한 화학적 본드의 밀도와의 관계를 구할 수 있다.

실험을 통해 구한 PECVD 산화 규소층과 BCB 사이의 계면에서의 본드 파단 에너지 G_0 는 약 18 J/m^2 이기 때문에, 이는 약 13~14 Si-O bonds/ nm^2 에 해당한다. 한편, 열화 산화 규소층과 BCB 사이 계면에서의 G_0 는 약 22 J/m^2 이고 이는 약 16~17 Si-O bonds/ nm^2 에 해당한다. 이 값들은 이론적으로 산화 규소막 표면에서 단위 면적당 결합할 수 있는 활성점의 수와 거의 일치한다. 반면, 글래스 웨이퍼 표면의 다양한 성분들 때문에, G_0 와 본드 밀도에 대한 정확한 관계를 얻기는 힘들다. 다만, 만일 본딩 결합력이 크고 몰분율이 높은 실록산 본드의 본딩 결합력만 고려하고 본딩 결합력이 낮은 다른 본드들의 본딩 결합력을 무시한다면, 5 J/m^2 의 G_0 를 얻기 위해서는 약 7~8 Si-O bonds/ nm^2 가 필요하다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 3차원 집적회로 제품들에 대한 본딩 표준을 세우기 위해, 본딩 촉진제의 사용여부, BCB의 두께 및 접촉 계면의 종류에 따른 본딩 결합력의 변화를 연구하였다. 이러한 연구를 위해 3가지 다른 종류의 본딩된 웨이퍼 들(PECVD 산화 규소막 혹은 열산화 규소막이 증착된 실리콘 웨이퍼, 글래스 웨이퍼)을 고려하였으며, 이때 BCB의 소성 변형 에너지는 BCB 두께에 대해 선형적인 비례 함수가 되는 것을 밝혀내었다. BCB의 두께가 감소하면서, BCB의 소성 변형을 위해 허용된 높이가 BCB 두께보다 높고, BCB의 항복응력이 두께 변화에 무관하므로 계면에서의 본딩 결합력 및 소성 변형 에너지는 감소한다. BCB의 소성 변형 에너지 G_p 와 화학적 본드들의 파단에 사용되는 에너지 G_0 , 그리고 BCB의 두께 t(단위는 마이크로미터) 사이의 관계는 $G_p \sim 0.3 \cdot G_0 \cdot t$ 와 같고, 본딩 결합력 G_c 는 $G_c \sim G_0(1 + 0.3t)$ 으로 표현 할 수 있다.

BCB와 이웃하는 층에서 나타나는 차이는 G_0 와 G_c 의 변화에 영향을 미친다. 제조사가 추천한 본딩 촉진제를 사용할 때, 실리콘 웨이퍼 위에 증착된 PECVD 산화 규소막과 BCB 사이의 계면에서의 G_c 는 본딩 촉진제를 사용하지 않았을 때 보다 약 2배 증가하였다.

BCB와 이웃하는 적층 물질에 따라 본드 파단 에너지, 본딩 결합력, 그리고 본딩 밀도는 영향을 받는다. 산화 규소막이 증착된 실리콘 웨이퍼와 BCB 사이의 계면에서 G_c 는 글래스 웨이퍼와 BCB 사이 계면에서의 G_c 보다 3배 이상 높다. 이러한 G_c 에서의 차이는 G_0 에서의 차이에 기인하며 G_0 에서의 차이는 웨이퍼 표면에 있는 매달

린 본드의 종류와 갯수와 밀접한 관계가 있다. 100% 실라놀기가 매달린 상태에 있는 PECVD 산화규소막을 증착한 실리콘 웨이퍼와 BCB 사이의 계면의 경우, 기 측정된 18 J/m^2 의 G_0 를 얻기 위해서는 약 13~14 Si-O bonds/ nm^2 의 Si-O 본드 밀도가 필요하다. 본드 밀도 때문에, 열 산화 규소막을 증착한 실리콘 웨이퍼의 경우, 기 측정된 22 J/m^2 의 G_0 를 얻기 위해서는 약 15~16 Si-O bonds/ nm^2 의 Si-O 본드 밀도가 필요하다. 이 값들은 이론적으로 산화 규소층 표면에서 단위 면적당 결합할 수 있는 활성점 수와 매우 유사하다. 반면에 글래스 웨이퍼와 BCB 사이의 계면의 경우, 매달린 본드의 50%만이 실라놀기로 구성되고, 나머지는 다양한 본드들로 구성된다. 비록 글래스 웨이퍼의 표면 성분을 정확히 분석하기는 어렵지만, 만일 본딩 결합력과 몰분율이 낮은 다른 본드들의 본딩 결합력을 무시한다면, 5 J/m^2 의 G_0 를 얻기 위해서는 약 7~8 Si-O bonds/ nm^2 가 필요함을 알 수 있었다.

감 사

본 저자는 Interconnect Focus Center를 통해 이 프로젝트를 지원한 MARCO, DARPA, NYSTAR 담당자들에게 감사를 포함합니다.

참고문헌

1. *International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS): 2003 Edition*(Semiconductor Industry Association, 2003).
2. Davis, J. A., Venkatesan, R., Kaloyeros, A., Beylansky, M., Souri, S. J., Banerjee, K., Saraswat, K. C., Rahman, A., Reif, R. and Meindl, J. D., "Interconnect Limits on Gigascale Integration (GSI) in the 21st Century," *Proc. IEEE*, **89**(3), 305-324(2001).
3. Gutmann, R. J., Lu, J.-Q., Pozder, S., Kwon, Y., Jindal, A., Celik, M., McMahon, J. J., Yu, K. and Cale, T. S., "A Wafer-Level 3D IC Technology Platform," *Adv. Metall. Conf. (AMC)*, 19-22(2003).
4. Burns, J., McIlrath, J. L., Keast, C., Lewis, C., Loomis, A., Warner, K. and Wyatt, P., "Three-Dimensional Integrated Circuits for Low-Power, High-Bandwidth Systems on a Chip," *2001 IEEE Int'l Solid-State Circ. Conf.*, 268-270(2001).
5. Lu, J.-Q., Kwon, Y., Kraft, R. P., Gutmann, R. J., McDonald, J. F. and Cale, T. S., "Stacked Chip-to-Chip Interconnections using Wafer Bonding Technology with Dielectric Bonding Glues," *2001 IEEE Int'l Interconnect Technol. Conf.*, 219-221(2001).
6. Kuhr, M., Bauer, S., Rothhaar, U. and Wolff, D., "Coatings on Plastics with The PICVD Technology," *Thin Solid Films*, **442**(1), 107-114(2003).
7. Kwon, Y., Jindal, A., McMahon, J. J., Lu, J.-Q., Gutmann, R. J. and Cale, T. S., "Dielectric Glue Wafer Bonding for 3D ICs," *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **766**, 27-32(2003).
8. Kwon, Y., Lu, J.-Q., Kraft, R. P., Gutmann, R. J., McDonald, J. F. and Cale, T. S., "Wafer Bonding using Dielectric Polymer Thin Films in 3D Integration," *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **710**, 231-236(2002).
9. Lingk, C., Gross, M. E. and Brown, W. L., "Texture Development of Blanket Electroplated Copper Films," *J. Appl. Phys.*, **87**(5), 2232-2236(2000).
10. Rye, R. R. and Ricco, A. J., "Patterned Adhesion of Electrolessly Deposited Copper on Poly(tetrafluoroethylene)," *J. Electrochem. Soc.*, **140**(6), 1763-1768(1993).

11. Hohlfelder, R. J., Maidenberg, D. A. and Dauskardt, R. H., "Adhesion of Benzocyclobutene-Passivated Silicon in Epoxy Layer Structures;" *J. Mater. Res.*, **16**(1), 243-255(2000).
12. Im, J.-H., University of Texas, Austin, TX, private communication.
13. Charalambides, P. G., Lund, J., Evans, A. G. and McMeeking, R. M., "A Test Specimen for Determining the Fracture Resistance of Bimaterial Interfaces;" *J. Appl. Mech.*, **56**(1), 77-82(1989).
14. Kook, S.-Y. and Dauskardt, R. H., "Moisture-Assisted Subcritical Debonding of A Polymer/Metal Interface;" *J. Appl. Phys.*, **91**(3), 1293-1303(2002).
15. Volinsky, A. A., Moody, N. R. and Gerberich, W. W., "Interfacial Toughness Measurements for Thin Films on Substrates;" *Acta Met.*, **50**(3), 441-466(2002).
16. Kwon, Y., Seok, J., Lu, J.-Q., Cale, T. S. and Gutmann, R. J., "Thermal Cycling Effects on Critical Adhesion Energy and Residual Stress in Benzocyclobutene-Bonded Wafers;" *J. Electrochem. Soc.*, **152**(4), G286-G294(2005).
17. Suo, Z. and Hutchinson, J. W., "Steady-State Cracking in Brittle Substrates beneath Adherent Films;" *Int. J. Solids Struct.*, **25**(11), 1337-1353(1989).
18. Litteken, C. S. and Dauskardt, R. H., "Adhesion of Polymer Thin Films and Patterned Lines;" *Int. J. Fract.*, **119/120**(1-2), 475-485 (2003).
19. Tymiak, N. I., Volinsky, A. A., Kriese, M. D., Downs, S. A. and Gerberich, W. W., "The Role of Plasticity in Bimaterial Fracture with Ductile Interlayers;" *Metallurgical and Materials Transactions A*, **31**, 863(2000).
20. Varias, A. G., Suo, Z. and Shih, C. F., "Ductile Failure of A Constrained Metal Foil;" *J. Mech. Phys. Solids*, **39**(7), 963-986(1991).
21. PG&O 1737 Glass Wafer Technical Data Sheets, Precision Glass & Optics, Santa Ana, CA, 2002.
22. Jenkins, M. L., Dauskardt, R. H. and Bravman, J. C., "Important Factors for Silane Adhesion Promoter Efficiency: Surface Coverage, Functionality and Chain Length;" *J. Adhesion Sci. Technol.*, **18**(13), 1497-1516(2004).
23. Garbowski, B. J., *Corning Incorporates*, Corning, NY, private communication.
24. Doremus, R. H., *Glass Science*, John Wiley & Sons, New York(1994).
25. Garde, S., Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, Private Communication.
26. Israelachvili, J. N., *Intermolecular and Surface Forces*, Academic Press, London(1991).
27. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press LLC, Boca Raton(2001).