

4점굽힘시험에 의한 실리콘 다이의 두께에 따른 파단강도 평가

민윤기 · 변재원[†]

서울과학기술대학교 신소재공학과

Evaluation of Flexural Strength of Silicon Die with Thickness by 4 Point Bending Test

Yoon-Ki Min and Jai-Won Byeon[†]

Department of Materials Science & Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Seoul 139-743, Korea

(2011년 3월 5일 접수: 2011년 3월 21일 게재 확정)

초 록: 전자기기의 고집적화를 위해 실리콘 웨이퍼의 두께가 점점 얇아지고 있으며, 이로 인해 제조과정 중 균열이나 파손이 발생할 가능성이 높아지고 있다. 본 연구에서는 300 μm ~100 μm 두께의 반도체용 단결정 실리콘 웨이퍼의 파단 강도 및 파괴특성을 평가하였다. 기계적 연마를 통해 두께(300, 200, 180, 160, 150, 100 μm)가 다른 실리콘 웨이퍼를 준비하였다. 하나의 웨이퍼에서 40개의 실리콘 다이(크기: 62.5 mm \times 4 mm)를 얻어 4점 굽힘시험을 통해 평균 강도값을 구하였다. 강도분포의 통계적 해석을 위해 와이블 선도를 이용하여 형상인자(와이블 계수)와 크기인자(확률적 파괴강도)를 얻었다. 취성 실리콘 다이의 시편 크기(두께)효과와 파단 확률이 고려된 통계적 파단강도 값을 실리콘 다이 두께의 함수로 얻었다. 관찰된 파괴양상을 측정된 파단강도와 관련하여 고찰하였다.

Abstract: In this study, flexural strength and fracture behavior of silicon die from single crystalline silicon wafer were investigated as a function of thickness. Silicon wafers with various thickness of 300, 200, 180, 160, 150, and 100 μm were prepared by mechanical grinding and polishing of as-saw wafers. Flexural strength of 40 silicon dies (size: 62.5 mm \times 4 mm) from each wafer was measured by four point bending test, respectively. For statistical analysis of flexural strength, shape factor(i.e., Weibull modulus) and scale factor were determined from Weibull plot. Flexural strength reflecting both statistical fracture probability and size (thickness) effect of brittle silicon die was obtained as a linear function of die thickness. Fracture appearance was discussed in relation with measured fracture strength.

Keywords: silicon die, die thickness, flexural strength, four point bending test, Weibull plot

1. 서 론

집적회로 기술의 발달로 전자제품은 급격히 소형화 되어 가는 추세이다. 전자기기의 소형화 고집적화를 위해 반도체 칩의 최초 기반이 되는 웨이퍼의 두께를 최소화 시켜, 최종 완성된 칩의 크기를 줄이는 방법이 사용되고 있다.^{1,2)} 최근에는 3차원 패키지나 적층 다이 패키지 기술 등이 적용되고 있으며, 이러한 패키지를 위해서 실리콘 웨이퍼의 두께가 100 μm 또는 그 이하의 얇은 웨이퍼가 사용된다. 그러나 최근 연구에 따르면 초박형 웨이퍼의 사용으로 인해 제조 공정 과정 및 운송 과정에서 파괴현상은 점점 더 증가하고 있으며, 공정중의 다이 파손은 생산 수율을 감소시키는 주요 요인이 된다.^{3,4)}

실리콘 웨이퍼는 두께 감소를 위해 기계적 그라인딩, 화학적 연마, 플라즈마 에칭 등의 공정을 적용하며 실리콘 다이의 제작을 위해 기계적 절단(dicing) 공정이 필요하다. 이러한 공정 중에서 필연적으로 균열 등의 결함이

도입되며, 균열은 취성 재료인 실리콘 다이의 파괴특성에 치명적인 영향을 준다. 수직 방향의 다이 균열은 열 공정 시에 플립-칩 패키지의 주요한 파손 이유가 된다.⁵⁾ 웨이퍼 sawing 시에 도입될 수 있는 다이 가장자리의 수직 균열은 인장 하중 하에서 다이의 중앙부로 전파하여 파단을 일으키기도 한다.⁴⁾ 따라서 패키지의 신뢰성 향상을 위해서, 웨이퍼 공정 후 웨이퍼로부터 절단된 다이의 강도 평가가 필수적이다.^{6,7)}

실리콘 다이의 강도 평가 연구로서 표면조건의 영향, 다이 크기의 영향, 강도측정법의 영향 등이 보고된 바 있다.⁸⁻¹⁴⁾ 실리콘 다이는 전형적인 취성재료로서 확률적 파단이 일어난다. 따라서 강도 평가 시에 파단확률을 고려한 통계적인 파단강도법을 적용할 필요가 있다. 본 연구에서는 실리콘 다이 두께(300 μm ~100 μm 범위)가 파단강도에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 이를 위해 기계적 연마를 통해 두께가 다른 웨이퍼를 준비하였으며, 이로부터 실리콘 다이 시편을 제작하여 4점굽힘시험을 통해

[†]Corresponding author

E-mail: byeonjw@seoultech.ac.kr

파단강도를 측정하였다. 또한 웨이퍼 한 장 내에서의 위치에 따른 파단강도 분포를 분석하였으며, 파단강도의 통계적 해석을 위해 Weibull 선도로부터 형상인자(와이블 계수)와 크기인자를 구하여 두께가 이들 파라미터에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1. 실리콘 다이 시험편 준비

반도체용 실리콘 웨이퍼의 강도평가를 위해 (100) 결정 배향의 단결정을 절단(sawing)하여 얻은 650 μm 두께의 직경 6인치 P-형 실리콘 웨이퍼를 두 개의 제조사(A사 및 B사)로부터 각각 공급받았다. A사의 웨이퍼를 기계적 연마를 통해 두께 300 μm , 250 μm , 200 μm , 150 μm , 100 μm 로 다르게 준비하였고, B사의 웨이퍼도 동일한 조건으로 기계적 연마하여 두께 180 μm , 160 μm 의 웨이퍼를 준비하였다. 모든 웨이퍼는 기계적 연마를 통해 두께를 맞추고 양면 폴리싱된 상태로 준비하였으며 최종 웨이퍼 내에서의 두께 편차는 2 이내였다.

두께별로 준비된 실리콘 웨이퍼의 파단강도를 4점굽힘 시험으로 측정하기 위해 표준 규격에 해당되는 크기(62.5 mm×4 mm)로 절단(dicing)하여 강도 측정 시편(실리콘 다이)을 준비하였다. 웨이퍼 절단 시 접착성이 뛰어난 UV-테이프를 사용하여 웨이퍼를 접착 후 auto dicer-saw를 이용해 시편을 기계적으로 절단하여, 한 장의 웨이퍼에서 40개의 실리콘 다이를 얻었다.

2.2. 실리콘 다이의 4점굽힘 강도 측정

10 N 용량의 로드셀을 장착한 만능인장시험기(Instron 5848)를 이용하여 crosshead speed를 1 mm/min으로 설정하여 실험하였다. 시편 장착용 지그는 하부 span 길이가 40 mm, 상부 span 길이가 20 mm가 되도록 제작하여 사용하였다. 변위-하중 곡선을 얻었으며, 이 곡선에서 구한 파단하중으로부터 식 (1)을 사용하여 파단강도를 계산하였다.

$$\sigma = \frac{3p(L-l)}{2wt^2} \quad (1)$$

여기서, $\sigma(\text{MPa})$ 는 4점굽힘 파단강도, $p(\text{Kgf})$ 는 파단하중, $L(\text{mm})$ 은 하부 span 거리, $l(\text{mm})$ 은 상부 span거리, $t(\text{mm})$ 는 시편(실리콘 다이)의 두께, $w(\text{mm})$ 는 폭이다.

2.3. 파단강도의 통계적 해석(Weibull 이론) ¹¹⁾

금속과 같이 연성파괴를 일으키는 재료는 결함의 크기가 어떤 분포를 이루고 있다 해도, 결함의 주위에 전위이동에 의한 소성변형이 일어나 동일 금속재료의 강도는 거의 일정한 값을 가진다. 그러나 취성 파괴 거동을 보이는 재료는 미세 균열 등 재료 내의 가장 약한 부분에서 파괴가 일어나기 쉬우며, 그 부분의 강도가 전체의 강도를 결

정하게 된다. 따라서 실리콘 웨이퍼 같은 취성재료의 파괴강도 평가를 위해서는 단순한 평균의 개념이 아닌 파괴 확률의 개념이 포함된 통계적 파단해석 방법이 유용하게 적용될 수 있다.

최약 link(결함) 개념과 크기효과를 고려하면 강도는 가장 약한 부분이 존재할 확률로써 나타낼 수 있는데, 이러한 개념들을 사용한 이론을 Weibull 이론이라 한다. 통계적으로 균일한 재료에서 어떤 결함에 의해서 파괴가 일어나면 그와 동시에 전체가 파괴된다는 가정 하에, σ 의 응력을 가할 때 파괴가 일어날 확률 $P(f)$ 는 식 (2)와 같이 나타내어 진다.

$$P(f) = 1 - \exp[-V((\sigma - \sigma_u)/\sigma_0)^m] \quad (2)$$

여기서, V : 시편의 부피

σ : applied stress

σ_u : threshold stress ($P(f)=0$ 일때의 강도)

σ_0 : scale factor ($P(f)=0.632$ 일때의 강도, 크기인자)

m : weibull modulus (i.e., shape factor, 형상인자)

$P(f)$: 파괴될 확률(N개의 시편 중 응력 σ 에서 n개가 파괴하면 $P(f) = n/(N+1)$)

Weibull 이론을 적용한 통계학적 파괴 강도를 구하기 위하여 식(2)에서 σ_u 는 0으로 하고 양변에 log함수를 두 번 취하면 식 (3)과 같다.

$$\ln \ln \left[\frac{1}{1-P(f)} \right] = m \ln \sigma - m \ln \sigma_0 + \ln V \quad (3)$$

즉, $\ln \sigma$ 와 $\ln \ln [1/(1-P(f))]$ 를 plot하면 직선이 되며 그 기울기가 weibull 계수 m 이 된다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 4점굽힘 시험 양상

Fig. 1은 두께가 다른 웨이퍼에서 준비한 실리콘 다이 시험편을 이용하여 4점굽힘시험을 하여 얻은 전형적인 변위-하중 곡선을 보여준다. 300 μm ~150 μm 두께의 시험편에서는 변위의 증가에 따라 하중이 거의 선형적으로 증가한 후 파단되는 양상을 보였으며 이러한 양상은 소성변형이 거의 없이 파단되는 전형적인 취성 재료의 변위-하중 곡선이다.

그러나 두께 100 μm 의 시험편은 최대 하중에서 파단이 일어나지 않고 지속적으로 변위가 증가하는 양상이 관찰되었다. Fig. 2는 두께 100 μm 의 시험편에 대한 4점굽힘 시험 과정을 보여주는 사진으로 시험 시에 실리콘 다이 시험편이 하부 지지대에서 미끄러지는 현상이 나타났다. 4점굽힘시험은 하부지지대에서 시편이 선접촉을 하며 시편의 양끝이 구속되지 않은 상태로 위치하고 있어야 하나, 본 실험에서 사용된 두께 100 μm 시험편은 너무

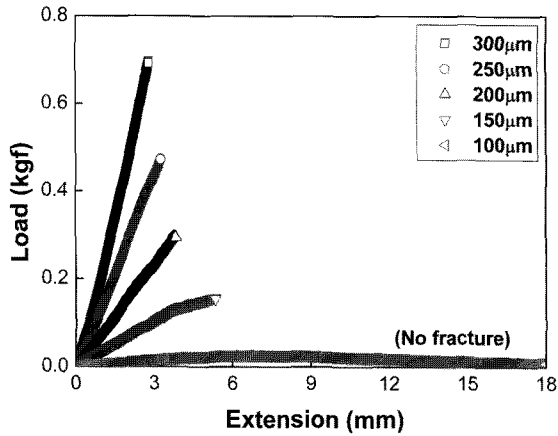


Fig. 1. Typical extension-load curve obtained by four point bending test for silicon die of various thickness.

flexible하여 굽힘강도 측정이 불가능하였다. 기본적으로 4점굽힘시험은 deflection이 적은 벌크 재료에 주로 적용될 수 있는 표준 강도시험법으로 두께 100 μm 초박형 실리콘 웨이퍼 강도 측정을 위해서는 ball breaker 시험, point

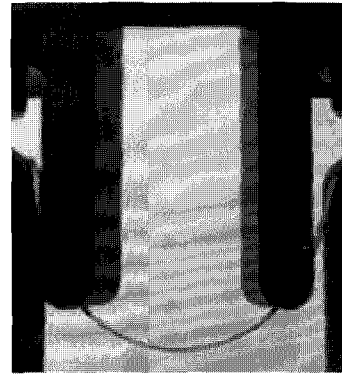


Fig. 2. Photograph of unbreaking 100-thin silicon die during four point bending test.

load 시험 등의 평가법을 적용하는 것이 적합할 것으로 사료된다.

3.2. 웨이퍼 내의 파단강도 분포

한 장의 웨이퍼 내에서 위치별로 파단 특성이 다른 경우가 있어, 본 연구에서는 웨이퍼 내에서의 강도 분포에

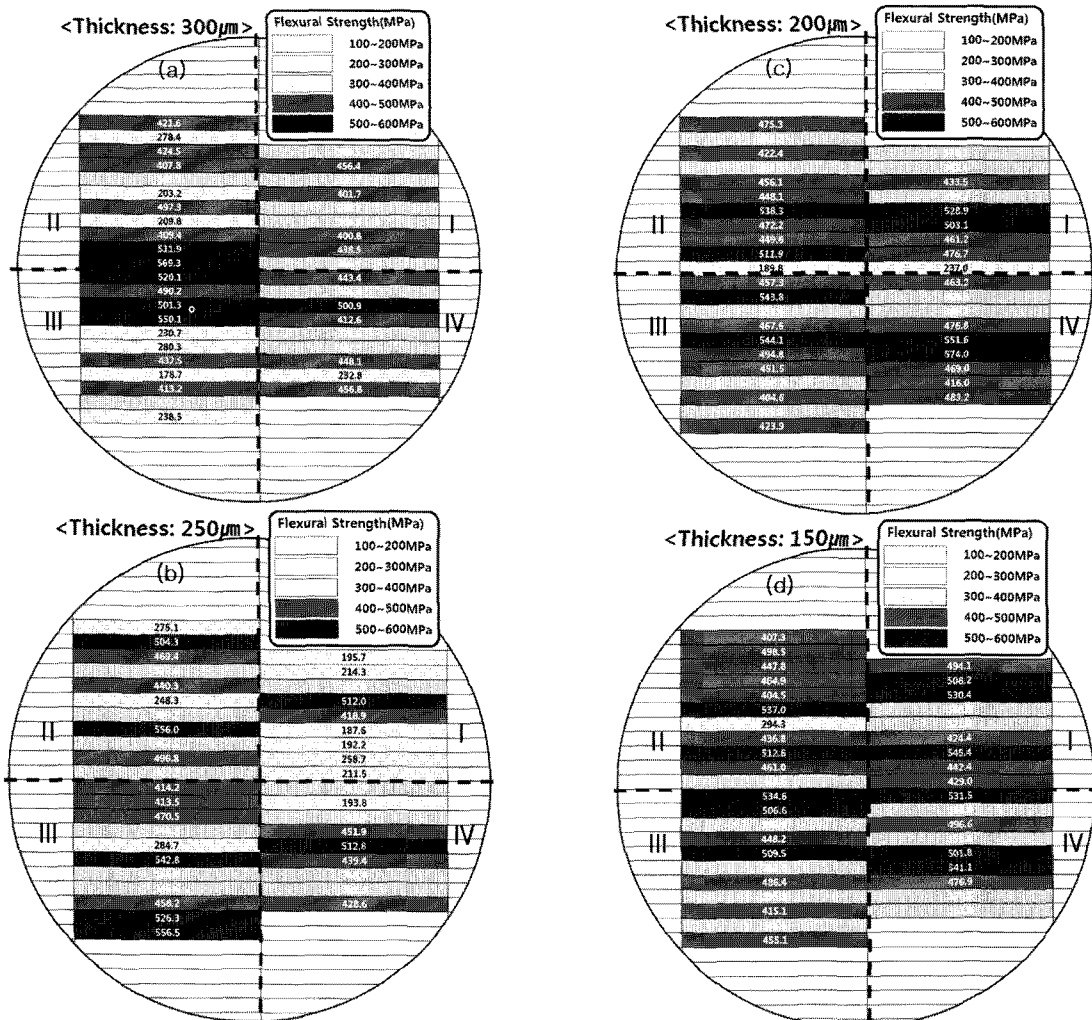


Fig. 3. Distribution of flexural strength in each wafer with different thickness: (a) 300 μm, (b) 250 μm, (c) 200 μm, (d) 150 μm.

특이성이 있는지를 검토하고자 하였다. Fig. 3(a)~(d)에 여러 두께의 실리콘 웨이퍼에 대해서 측정된 각각의 실리콘 다이의 파단강도를 100 MPa 간격의 5개 등급으로 나누어 음영이 다르게 표시한 후 그 분포의 특이성을 검토하였으나 파단강도 분포의 특이성은 관찰되지 않았다. 또한 한 장의 웨이퍼를 4개의 영역(I, II, III, IV 사분면)으로 나누어 Fig. 3(a)~(d)에 표시한 각 영역별 평균파단강도를 비교하였으나 네 영역에서 거의 유사한 값을 나타내었다(Fig. 4). 이러한 분석으로부터 한 장의 웨이퍼 내에서의 파단강도는 위치와는 무관하게 무작위로 분포함을 확인하였다.

Fig. 5(a)~(d)는 각 두께의 웨이퍼에서 파단강도 구간에 따른 파단 빈도 분포도를 나타낸 것이다. 파단 빈도 분포의 양상은 웨이퍼 두께에 관계없이 유사한 분포 경향을 보였으며, 웨이퍼 한 장 내에서의 파단강도는 모든 두께의 웨이퍼에서 매우 넓은 편차를 보였다. 실리콘 다이의 파단강도는 웨이퍼의 절단 및 기계연마 과정 그리고 dicing 과정에서 도입된 표면과 가장자리 결함의 크기와 분포에 영향을 받는다. 4점굽힘시험 시 시험편에 가해지는 응력 분포는 loading pin 범위 내에서 균일하므로 본 실험에서 관찰된 넓은 파단강도 분포는 시험편에 무작위로 분포하는 결함에 의한 확률적 파단과 관련된 것이다.

3.3. 웨이퍼 두께가 따른 파단강도에 미치는 영향

Fig. 6(a)은 각 웨이퍼에서 40개의 실리콘 다이로부터 얻은 평균파단하중을 웨이퍼 두께의 함수로 나타낸 그림이다. 다른 두께 제조사의 웨이퍼로부터 준비한 두 그룹의 시험편(A사: 300 μm , 250 μm , 200 μm , 150 μm , 100 μm , B사: 180 μm , 160 μm)을 4점굽힘시험 하여 얻은 평균파단

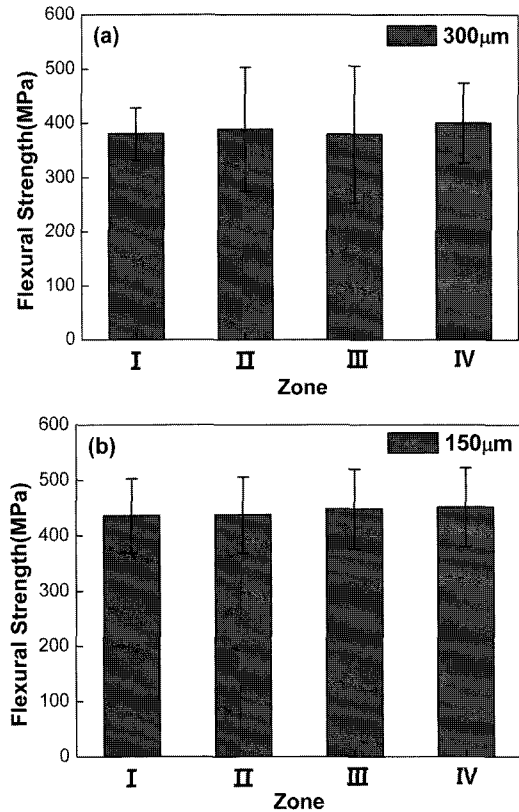


Fig. 4. Comparison of mean flexural strength within each quadrant: (a) 300 μm , (b) 150 μm .

하중을 유사한 두께의 시험편끼리 비교해보면, 두 제조사 시험편의 파단하중은 유사한 범위의 값을 나타내었다. 따라서 이후에 파단특성을 논의하는데 있어서 웨이퍼 제조사

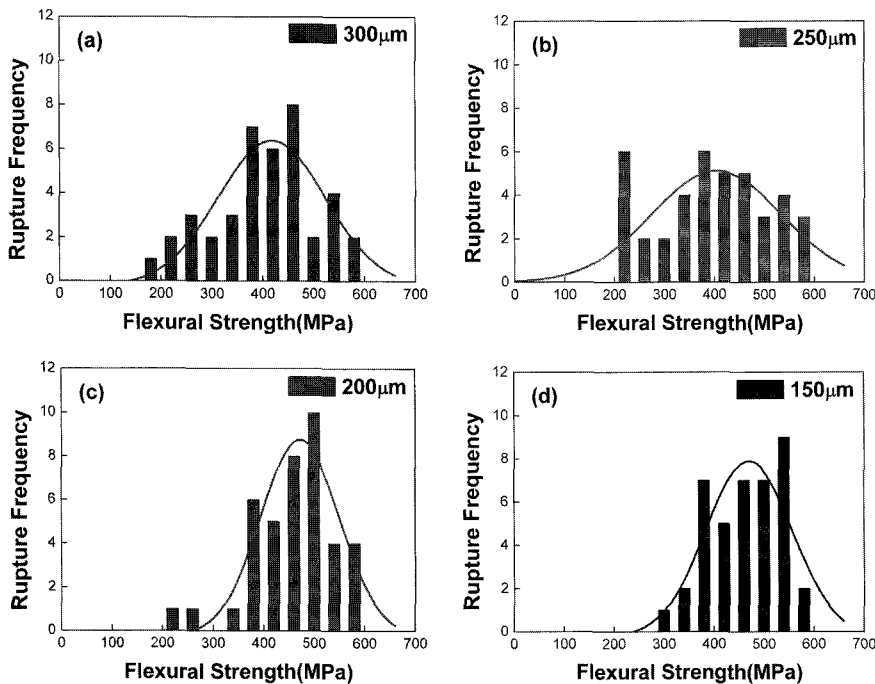


Fig. 5. Rupture frequency with measured flexural strength for various thickness of silicon die: (a) 300 μm , (b) 250 μm , (c) 200 μm , (d) 150 μm .

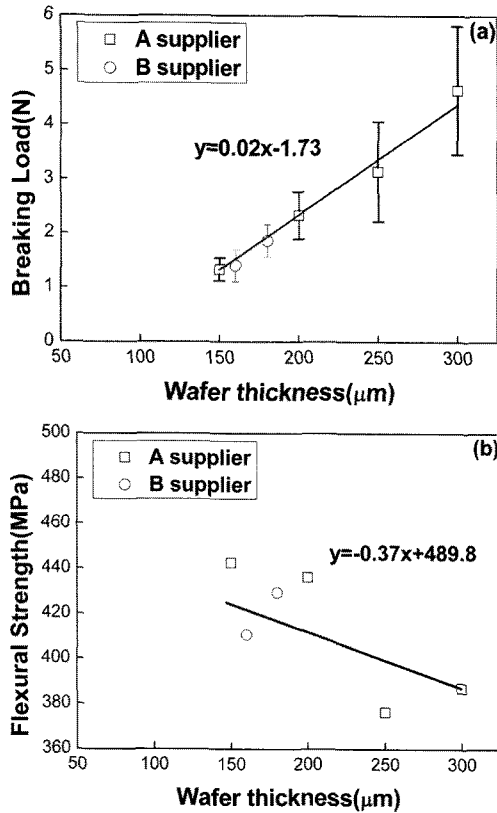


Fig. 6. (a) Breaking load and (b) flexural strength as a function of wafer thickness.

의 구분 없이 전체 실험 데이터를 같이 분석하였다.

웨이퍼 두께의 감소에 따라 파단하중은 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 Desmond 등¹⁵⁾이 약 400~150 μm 두께 범위에서 3점굽힘시험을 통해 얻은 실험 결과와 유사한 경향이다. 본 실험에서 얻은 웨이퍼 두께와 파단하중의 상관관계는 아래의 경험식 (4)로 나타낼 수 있다. 직선의 상관계수가 0.97인 선형적 경향성으로부터 4점굽힘시험이 어려운 두께 100 μm이하의 초박형 실리콘 다이의 파단하중을 예측할 수 있을 것으로 보인다.

$$\text{Breaking load(N)} = 0.02 * \text{wafer thickness}(\mu\text{m}) - 1.73 \quad (4)$$

Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)에서 보여준 평균파단하중을 식 (1)의 4점굽힘 파단강도 계산식을 이용하여 구한 후 웨이퍼 두께의 함수로 나타낸 것이다. 재료의 파단강도는 고유의 물성 값으로 두께에 관계없이 일정하여야 되나, 본 연구 결과에서 두께가 두꺼운 웨이퍼의 강도가 조금 낮게 나타났다. 이는 시험편의 크기에 관련된 크기효과로 설명된다. 시험편 내에 균열 등의 결함이 없다는 가정 하에 재료역학적 강도는 동일하여야 한다. 그러나 실제의 시험편 내부에는 결함이 존재하며, 시험편의 크기가 클수록 더 많은 결함을 포함하고 있을 가능성이 높아진다. 특히 금속과 같은 연성재료와는 달리 취성재료에 있어서는 균열 등의 결함은 강도를 크게 낮추는 역할을 하

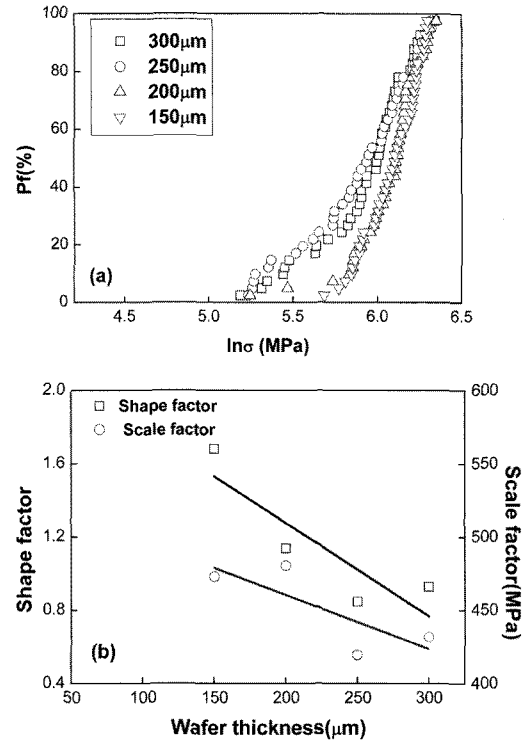


Fig. 7. (a) Weibull plot and (b) shape factor(Weibull modulus) and scale factor determined from plot (a) as a function of wafer thickness.

로 파괴역학적 파단강도는 시험편이 클수록 낮은 경향을 보이게 된다.

3.4. 파단강도의 통계적 분석(와이블 분석)

Fig. 7(a)는 각각의 실리콘 다이에서 얻은 파괴강도에 와이블 이론(2.2절)을 적용하여 계산한 와이블 선도를 나타내었다. Fig. 7(b)는 이 그래프로부터 와이블계수(형상인자)와 파괴확율이 고려된 특정수명강도값(크기인자)를 얻어 두께의 함수로 나타낸 것이다. 형상인자는 두께에 따라 0.8~1.7 사이의 값을 나타내었다. 소성변형이 많은 금속의 경우 20 정도, 취성파괴를 하는 세라믹의 경우 3 정도의 값을 갖는다는 것을 고려해볼 때¹¹⁾, 실리콘 다이의 4점굽힘시험에서 얻은 값은 매우 낮은 수치이다. 형상인자는 강도분포의 좁고 넓음을 통계적으로 나타내는 계수로 이 값이 클수록 균일한 결함의 크기 분포를 갖는다. 실리콘 웨이퍼 시편의 형상인자가 매우 낮은 것은 실리콘 다이에 존재하는 결함의 크기 분포가 매우 넓음을 의미하는 것이다. 또한 Fig 7(b)의 웨이퍼 두께와 형상인자의 상관관계에서 보여주었듯이 다이의 두께가 두꺼울수록 형상인자가 작은 값을 나타내었으며 이는 시편이 두꺼울수록 주어진 시편 크기 내에서 결함의 크기 분포가 더 넓기 때문이다.

Fig. 7(b)는 와이블 선도에서 얻은 크기인자를 실리콘 다이 두께의 함수로 나타낸 그림이다. 와이블 이론식을 적용하여 얻은 크기인자는 Fig. 6(b)에서 보여준 평균파단강

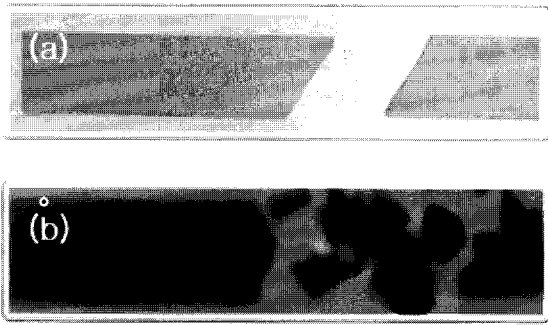


Fig. 8. Fracture appearance of the silicon die showing (a) low fracture strength and (b) high fracture strength.

도와 유사하였으며, 크기(두께) 의존성도 유사하게 나타났다. 그러나 크기인자는 파단 확률이 고려된 통계적 파단강도로 취성재료인 실리콘 다이의 신뢰성 평가에 적합할 것으로 생각된다. 취성 재료인 실리콘 다이 시험편의 두께 차이와 파단확률이 모두 고려된 통계적 파단강도는 아래의 선형적 경험식으로 나타낼 수 있다.

$$\text{Scale factor(MPa)} = -0.37 * \text{wafer thickness}(\mu\text{m}) + 534.1 \quad (5)$$

3.5. 실리콘 다이 시험편 파단 양상

Fig. 8은 4점굽힘시험 후에 파단된 실리콘 다이 시험편의 파단 양상을 보여주는 사진이다. Fig. 8(a)와 같이 두세 조각으로 파손되는 것은 전형적인 저에너지 파손 패턴으로 주로 파단하중이 낮은 시험편들에서 관찰되었으며, Fig. 8(b)와 같이 여러 조각으로 파손되는 것은 일반적으로 알려진 고에너지 파손패턴으로 주로 파단하중이 높은 시험편들에서 관찰되었다.

4. 결 론

4점굽힘시험을 통하여 300 μm ~100 μm 두께의 반도체용 실리콘 웨이퍼의 파단강도 및 파괴특성을 평가하는 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 4점굽힘시험을 이용하여 두께 300 μm ~150 μm 의 실리콘 다이의 파단강도를 측정하였으며, 두께 150 μm 미만의 웨이퍼는 너무 flexible하여 4점굽힘시험을 통해서 파단강도 측정이 불가능하였다.

2. 한 장의 웨이퍼 내에서 40개의 실리콘 다이의 파단강도를 부위에 따라 비교 분석한 결과, 부위에는 무관하게 무작위로 분포하였으며, 한 장의 웨이퍼 내에서 측정된 파단하중은 매우 넓은 범위의 값을 나타내었다.

3. 웨이퍼의 두께가 감소함에 따라 파단하중은 선형적으로 감소하였다. 이러한 관계식을 이용하여 4점굽힘시험이 어려운 100 μm 이하의 초박형 웨이퍼의 파단하중을 예측이 가능하다. 파단하중 값으로부터 계산된 4점굽힘 파단강도는 실리콘 다이의 두께가 감소할수록 크게 나타

났다. 이러한 결과를 취성재료에서 나타나는 크기효과에 의한 영향으로 고찰하였다.

4. 파단강도의 통계적 해석을 위해 와이블 선도로부터 형상인자(와이블 계수)와 크기인자를 구하였다. 형상계수는 모든 시험편에서 매우 낮게(0.8~1.7) 나타났으며, 이는 실리콘 다이 내에서 결함 크기의 분포가 매우 넓은 의미를 나타내는 것이다. 또한 실리콘 다이가 두꺼울수록 형상인자가 작은 값을 나타내었으며, 이로부터 시험편이 두꺼울수록 결함의 크기 분포가 넓게 나타남을 추정할 수 있다. 와이블 선도로부터 실리콘 다이의 두께와 파단확률이 모두 고려된 통계적 파단강도(크기인자)를 얻을 수 있었다.

5. 시험편의 파단 양상을 살펴본 결과, 파단강도가 약한 시험편은 두 조각으로 파단되는 전형적인 저에너지 파괴 양상을 나타내었고, 파단강도가 강한 시험편은 여러 조각으로 파단되는 전형적인 고에너지 파괴양상을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술기획평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2008-N-PV12-P-09-0-000).

참고문헌

1. J. D. Wu, C. Y. Huang and C. C. Liao, "Fracture strength characterization and failure analysis of silicon dies", *Microelectronics Reliab.*, 43(2), pp.269-277 (2003).
2. H. H. Jiun and G. Omar, "Effect of wafer thinning methods towards fracture strength and topography of silicon die", *Microelectronics Reliab.*, 46(5), pp.836-645 (2006).
3. Z. Chen, J. B. Han and N. X. Tan, "The strength of the silicon die in flip-chip assemblies", *Journal of Electronic Packaging*, 125, pp.115-119 (2003).
4. C. Landesberger, G. Klink, G. Schwinn, and R. Aschenbrenner, "New dicing and thinning concept improves mechanical reliability of ultra thin silicon", *IEEE Proc. Int. Symp. on Advanced Packaging Materials*, Braselton, Georgia, pp.92-97 (2001).
5. J. N. Calata, J. G. Bai, X. Liu, S. Wen and G. Q. Lu, "Three-dimensional packaging for power semiconductor devices and modules", *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 28(3), pp.404-412 (2005).
6. P. A. Wang, "Industrial challenges for thin wafer manufacturing", *IEEE Proceedings of the Fourth World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, pp.1179-1182 (2006).
7. N. M. Lellan, N. Fan, S. Liu, K. Lau and J. Wu, "Effect of wafer thinning condition on the roughness, morphology and fracture strength of silicon die", *ASME J Electron. Packag.*, 126(1), pp.110-114 (2004).
8. G. Omar, N. Tamaldin, M. R. Muhamad, and T. C. Hock, "Correlation of silicon wafer strength to the surface morphology", *IEEE, Semiconductor Electronics Proceedings ICSE International Conference*, pp.147-151 (2000).
9. M. Y. Tsai, and C. H. Chen, "Evaluation of test methods for silicon die strength", *Microelectronics Reliab.*, 48(4), pp933-

- 941 (2008).
10. P. H. DeHoff, K. J. Anusavice, and P. W. Hathcock. "An evaluation of the four-point flexural test for metal-ceramic bond strength", *J. Dent. Res.*, 61(9), pp.1066-1069 (1982).
 11. J. Paul, B. Majeed, K. M. Razeed, and J. Barton, "Statistical fracture modelling of silicon with varying thickness", *Acta Materialia*, 54(15), pp.3991-4000 (2006).
 12. ASTM C 1161-02C, "Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramic at Ambient Temperature" (1990).
 13. T. K. Woo, Y. H. Kim, H. S. Ahn, and S. I. Kim, "A study of reflectance of textured crystalline Si surface fabricated by using preferential aqueous etching and grinding processes(in Kor.)", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 16(3), pp.61-65 (2009).
 14. M. K. Choi, and E. K. Kim, "Effect of Si wafer Ultra-thinning on the Silicon surface for 3D integration(in Kor.)", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 15(2), pp63-67 (2008).
 15. Y. Desmond, R. Chong, W. E. Lee, B. K. Lim, "Mechanical characterization in failure strength of silicon dice", *IEEE Inter. Society Conference on Thermal Phenomena*, pp203-210 (2004).