볼브레이커시험에 의한 실리콘 다이의 표면조건에 따른 파단강도 평가

변재원[†]

서울과학기술대학교 신소재공학과

Evaluation of Fracture Strength of Silicon Die with Surface Condition by Ball Breaker Test

Jai-Won Byeon[†]

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

Abstract The effects of thickness and surface grinding condition on the fracture strength of Si wafer with a thickness under 100 μm were investigated. Fracture strength was measured by ball breaker test for about 330 dies (size: 4 mm $\times$ 4 mm) per each wafer. For statistical analysis of the fracture strength, scale factor was determined from Weibull plot. Ball breaker fracture strength was observed to increase with decreasing thickness of silicon die. For the silicon dies of different surface conditions, ball breaker fracture strength was high in the order of polished, ground (#4800), and ground (#320 grit) specimen. Probabilistic fracture strength (i.e., scale factor) increased with decreasing surface roughness of silicon die.

(Received May 27, 2013; Revised June 7, 2013; Accepted June 17, 2013)

Key words : Silicon die, Fracture strength, Ball breaker test, Surface condition, Weibull plot

1. 서 론

전자기기의 경량화, 박형화, 소형화 추세에 따라 관련 회로 부품의 고집적화가 매우 중요한 기술로 인식되고 있다. 고집적화를 위한 접근 방법의 하나로 반도체 칩의 기반이 되는 실리콘 웨이퍼의 두께를 최소화 시켜, 최종 완성된 칩을 소형화 시키는 방법이 사용되고 있다[1, 2]. 이전에는 주로 수백 μm 두께의 실리콘 웨이퍼가 사용되었으나, 최근에는 3차원 패키지나 적층 다이 패키지 기술 등이 적용됨에 따라 두께가 100 μm 또는 그 이하의 얇은 웨이퍼를 사용하는 경우가 증가하고 있다. 그러나 최근 보고에 의하면 두께 100 μm 이하의 초박형 웨이퍼의 사용 증가로 인해 제조 공정 및 사용 과정에서 반도체 부품 파손 현상은 점점 더 증가하고 있으며, 공정 중의 실리콘 다이 파손은 생산 수율 및 신뢰성을 감소시키는 주요 요인이 된다[3, 4].

실제 반도체 공정에서는 실리콘 웨이퍼는 두께 감

소를 위해 기계적 그라인딩, 화학적 연마, 플라즈마 에칭 등의 공정을 적용하고 있으며, 실리콘 다이(die)의 제작을 위해 웨이퍼의 기계적 절단(dicing) 공정이 필요하다. 이러한 공정 중에서 표면 균열 등의 결함이 도입되며, 균열은 취성 재료인 실리콘 다이의 파괴특성에 치명적인 영향을 준다. 수직 방향의 다이 균열은 솔더링 등의 생산 공정 시에 패키지의 주요한 파손 이유가 된다[5]. 웨이퍼 절단 시에 도입될 수 있는 다이 가장자리의 수직 균열은 다이의 중앙부로 전파하여 파단을 일으키기도 한다. 따라서 반도체 패키지의 기계적 신뢰성 향상을 위해서는, 반도체에 사용되는 실리콘 다이의 파괴특성 평가가 매우 중요하다[6, 7]. 실리콘 다이는 전형적인 취성재료로서 확률적 파단이 일어나므로, 파단강도 평가 시에 파단확률을 고려된 통계적 파단강도 해석법을 적용할 필요가 있다[8].

실리콘 다이의 파괴 신뢰성 관련 연구로서 표면조건의 영향, 다이 크기의 영향, 강도측정법의 영향 등

[†]Corresponding author. E-mail : byeonjw@seoultech.ac.kr
Copyright © The Korean Society for Heat Treatment

이 보고된 바 있다[4-14]. 본 연구자들의 이전 연구 [4]에서 두께 300 μm ~150 μm 의 실리콘 다이(크기: 62 mm $\times$ 4 mm)에 대해 4점굽힘시험을 통해 시험편 두께가 파단특성에 미치는 영향을 분석하였으며, 시험편의 두께가 100 μm 이하가 되면 너무 flexible하여 4점굽힘시험을 통해서 파단강도 측정이 불가능하였음을 보고하였다.

본 연구에서는 초박형 실리콘 웨이퍼의 두께 (150 μm ~30 μm 범위) 및 표면 그라인딩 조건이 파단강도에 미치는 영향을 분석하기 위해, 실리콘 다이 시험편을 제작하여 볼브레이커시험(ball breaker test)을 통해 파단강도를 측정하였다. 또한 표면조건이 파단강도에 미치는 영향을 분석하였으며, 특히 파단확률이 고려된 통계적 파단강도 해석을 위해 Weibull 선도로부터 크기인자(scale factor)를 구하여 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편 준비

실리콘 웨이퍼의 강도 평가를 위해 직경이 6인치이고 두께가 625 μm 인 (100) 방향 p-형 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. 웨이퍼의 두께에 따른 파단 특성을 알아보기 위해 공급받은 웨이퍼를 기계적 연마(그라인딩)를 통해 두께 150 μm , 100 μm , 50 μm , 30 μm 로 다르게 만든 후, 각각의 웨이퍼를 기계적 폴리싱 하였다. 또한 웨이퍼 표면조건이 파단강도에 미치는 영향을 알아보기 위해 두께 100 μm 의 웨이퍼에 대해서는 그라인딩(#320 grit 및 #4800 grit)만 된 시험편도 준비하였다.

2.2 실리콘 다이(die)의 볼브레이커 파단강도 측정

두께 수백 μm 이상의 실리콘 다이는 ASTM에서 벌크 재료의 굽힘강도 평가법으로 정의되어진 4점굽힘시험[15]을 이용하여 파단강도를 측정하는 것이 일반적이나, 최근에 사용되고 있는 두께 150 μm 이하의 초박 시험편은 너무 유연(flexible)하여 굽힘강도의 실험적 측정이 어렵다[4]. 두께가 얇은 초박형 웨이퍼의 파단강도를 측정하는 방법은 아직까지 표준 시험규격으로 정의되어 있지 않으며, 압입 방식의

ball breaker test[9]와 point load test[10] 등이 제안되어 사용되고 있으며, 본 연구에서는 볼브레이커 시험법을 사용하여 파단강도를 구하였다. 웨이퍼를 4 mm $\times$ 4 mm 크기로 절단(dicing)하여 한 장의 웨이퍼에서 약 330개의 실리콘 다이(볼브레이커 강도 측정 시험편)를 준비하였다. 웨이퍼 절단 시 반도체 제조 공정에서 사용되는 UV-테이프를 사용하여 웨이퍼를 접착 후 auto dicer를 이용해 기계적으로 절단하였다.

볼브레이커 시험을 위해 소프트 패드 위에 실리콘 다이 시험편을 올려 놓고, 상부에서 직경 1/4인치의 테프론 볼을 이용해 1 mm/min의 속도로 가압하여 변위-하중 곡선을 얻었다. 이 곡선에서 구한 파단하중으로부터 식 (1)[8]을 사용하여 볼브레이커 파단강도를 계산하였다.

$$\sigma = \frac{3w}{2\pi mt^2} \left[(m+1) \ln\left(\frac{a}{r_0}\right) + (m-1) \left(1 - \left(\frac{r_0}{a}\right)^2\right) \right] \quad (1)$$

여기서, σ (MPa), w (N), r_0 (mm), a (mm), t (mm), m 은 각각 볼브레이커 파단강도, 파단하중, 로드 영역 반경, 시험편의 반경, 시험(실리콘 다이)의 두께, 포아송비의 역수이다. 계산을 위해 시험편의 반경은 2 mm (정사각형 시험편 길이의 반)를 사용하였으며, 실리콘 다이의 포아송비는 0.28을 사용하였다.

볼브레이커 시험에서의 파단강도 계산을 위한 식 (1)은 시험편의 형상 및 시험편에 가해지는 하중 분포를 단순하게 가정한 axisymmetric circular plate bending model의 잘 알려진 응력 해이다. 이 연속체 응력 모델에서는 균일한 하중 분포로 아래 쪽에서 지지되고 있는 원형 평판(시험편)이 있고, 이 평판의 윗 면 원형 영역에서 균일하게 하중을 가함으로써 원형 평판 시험편이 굽혀지는 것처럼 거동한다는 가정을 하고 있다. 식 (1)은 반경이 정해진 원형 시험편에서의 균일 응력 분포를 가정하여 얻은 식으로, 실리콘 다이와 같은 정사각형 시험편에 적용할 경우 시험편 내 응력 분포 차이 및 시험편 반경 값을 정의하기 어려운 한계점을 갖을 수 있다. 그러나 식 (1)은 현재까지 볼브레이커 파단강도를 측정한 이전 연구들 [8, 9]에서 사용되고 있는 식으로, 본 연구에서도 동일한 식을 적용하였다.

Fig. 1. Example of extension-load curve obtained by ball breaker test of silicon die.

3. 결과 및 고찰

3.1 실리콘 다이 두께의 영향

Fig. 1은 실리콘 다이 시험편에 대해 볼브레이커 시험을 하여 얻은 변위-하중 곡선의 예를 보여준다. 모든 시험편에서 변위의 증가에 따라 하중이 거의 선형적으로 증가한 후 파단되는 전형적인 취성 재료의 특징을 보였다.

단일 웨이퍼 내에서의 각 실리콘 다이의 강도 분포를 평가하기 위해서, 약 330개의 실리콘 다이에 대해 측정된 파단하중을 50 N 간격으로 구간을 나누어 음영이 다르게 표시하였다(Fig. 2). 한 장의 웨이퍼에서 얻은 다이 시험편으로 부터 측정된 파단강도는 매우 넓은 범위의 값을 가졌다. 웨이퍼 내의 위치에 따른 파단강도 분포 특이성을 확인하기 위해 중앙부/가장자리 간 차이 및 특정 위치에서의 강도 편차 여부를 비교 검토하였으며, 위치에 따른 파단강도는 무작위로 분포함을 확인하였다.

Fig. 3 (a), (b), (c)는 볼브레이커 파단하중의 크기에 따른 파단 양상을 비교하여 보여주는 사진이다. 파단하중이 낮게 측정된 시험편(a, 파단하중 = 23 N)은 균열이 수직 또는 수평 방향으로 전파하여 2~4개의 적은 수의 조각으로 파단되는 전형적인 저에너지 파단 양상을 나타내었다. 파단하중이 평균 정도인 시험편(b, 파단하중 = 105 N)은 5~8개의 조각으로 파단되었으며, 파단하중이 높게 나타난 시험편(c, 파단하중 = 225 N)은 시험편의 중앙부로부터 여러 방향으

Fig. 2. Distribution of ball breaker fracture strength in a wafer with a thickness of 50 μm .

로 균열이 전파하여 매우 많은 조각으로 파단되는 전형적인 고에너지 파단 양상을 보였다.

Fig. 4는 웨이퍼의 두께의 함수로서의 평균 파단강도 변화를 보여주고 있다. 측정된 실리콘 다이의 파단강도 값은 다이 두께와 표면거칠기 영향이 동시에 반영된 값이다. 이 파단강도 값은 본 연구에서 사용된 시험편의 특정한 표면거칠기 조건(양면 폴리싱, 표면거칠기 0.9 nm)에 대해 얻어진 값이며, 모든 두께의 시험편이 동일한 표면거칠기 조건에서 실험되었으므로 Fig. 4에서 보여주는 시험편 간의 파단강도의 차이는 시험편의 두께 차에 의한 영향으로 볼 수 있다.

파단강도는 소재의 고유 물성 값으로 두께 차이에 큰 영향 없이 일정하여야 되나, 본 실험에서 두께가 얇을수록 파단강도가 매우 높게 측정되었다. 이는 취성 재료에서의 시험편 크기효과로 설명된다. 시험편 내에 균열 등의 결함이 없다는 가정 하에 강도는 동일하여야 한다. 그러나 실제의 시험편에서는 재료 내부 결함 및 다이싱 공정에서 도입된 결함이 존재할 수 있으며, 시험편의 크기가 클수록(두꺼울수록) 확률적으로 더 많은 결함을 포함할 수 있다. 연성 재료와는 달리 실리콘과 같은 취성재료의 파단강도는 결함에 매우 민감하므로 파괴역학적 파단강도는 시험편이 클수록 낮은 경향을 보이게 된다.

파단강도 변화 경향은 웨이퍼의 두께가 감소함에

Fig. 3. Typical fracture appearance of the silicon die with (a) low, (b) middle, and (c) high fracture strength.

Fig. 4. Ball breaker fracture strength of the silicon die with thickness.

따라 지수함수적으로 급격히 증가하였다. 본 연구자 [4]와 Desmond 등[14]이 약 400 μm~150 μm 두께 범위에서 4점굽힘시험을 통해 얻은 파단강도 측정 결과에서는, 웨이퍼 두께의 감소에 따라 파단강도는 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 이에 비해 150 μm 이하의 초박형 웨이퍼를 볼브레이커 시험을 통해 얻는 본 결과에서는 실리콘 다이의 두께 감소에 따라 매우 급격한 증가 경향을 보여, 시험편의 크기효과가 더 크게 나타났다. 크기효과가 고려된 실리콘 웨이퍼의 파단강도를 두께의 함수로 나타내기 위해 Fig. 4의 데이터를 지수함수로 적합화 피팅(fitting)한 결과, 아래의 경험적 상관관계 식을 얻을 수 있었다.

$$\text{Ball breaker fracture strength (MPa)} = 250 + 24870 \cdot \exp[-0.05 \cdot \text{thickness } (\mu\text{m})] \quad (2)$$

식 (2)의 결정계수(R^2)는 0.997로 나타났다.

3.2 표면조건에의 영향

표면 거칠기가 실리콘 다이의 파단강도에 미치는 영향을 확인하기 위해, 두께 100 μm의 웨이퍼에 대해 표면 상태를 그라인딩(#320 grit), 그라인딩(#4800 grit), 및 폴리싱 처리로 다르게 한 시험편을 준비하였다. 각 시험편의 표면 형상을 원자력현미경(AFM, atomic force microscope)을 이용하여 관찰한 3차원 이미지를 Fig. 5(a, b, c)에 나타내었다. 원자력현미경 이미지로부터 구한 표면거칠기는 그라인딩 (#320 grit), 그라인딩(#4800 grit), 및 폴리싱 시편에서 각각 145.6 nm, 10.4 nm 및 0.9 nm로 측정되었다.

볼브레이커 강도 측정 결과는 Fig 6(a)에서 보여준 바와 같이 폴리싱, 그라인딩(#4800), 그라인딩(#320)의 순으로 강도가 높게 나타났으며, 특히 표면 폴리싱에 의해 급격한 강도 증가가 나타났다. Fig. 6(b)는 각 시편에서 측정된 파단강도를 표면거칠기의 함수로 나타낸 것이다. 표면 거칠기가 낮을수록 파단강도는 급격한 증가를 보였으며, 실리콘 다이의 볼브레이커 파단강도는 동일한 두께라도 표면상태에 따라 매우 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 동일한 두께의 시편에서 표면거칠기에 따라 파단강도 측정값이 큰 차이를 보이는 것은, 볼브레이커 시험법에 의해 측정된 실리콘 다이의 파단강도는 결함 없는 실리콘 소재의 고유물성이 아니라 표면결 함의 존재를 반영한 파괴역학적 파단강도 값이라는 의미이다.

Fig. 4 및 Fig. 6에서 보여준 바와 같이, 볼브레이

Fig. 5. Surface morphology observed by atomic force microscope: (a) ground (#320 grit), (b) ground (#4800 grit) and (c) polished silicon die.

Fig. 6. Ball breaker fracture strength of the silicon die with (a) surface condition and (b) surface roughness.

커 파단강도 측정은 시편의 두께 및 표면조건에 크게 영향을 받는다. 따라서 시편의 형상이나 표면조건에 무관하게 일정해야 되는 재료의 고유물성인 재료 역학적 파단강도 값을 볼브레이커 시험으로 측정하는데는 한계가 있다. 그러나 실제 실리콘 다이 관련

공정에서의 표면결함(표면거칠기)의 존재를 반영한 파괴역학적 파단강도를 비교하는데는 유용하게 적용될 수 있을 것으로 보인다. 볼브레이커 시험에서 최대 응력은 다이 뒷면의 중앙부에 걸리고, 중앙부로부터 거리가 멀어짐에 따라 감소하는 응력 분포를 갖는다[9]. 이러한 시편 내의 응력 분포 특성을 고려하면 시편의 가장자리 결함보다는 중앙 부위 표면결함의 영향을 민감하게 분석하는데 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

3.3 파단강도의 와이블 통계 분석

연성파괴를 일으키는 금속 재료는 어떤 크기 분포를 갖는 미소 결함이 있어도, 결함의 주위에서 전위 이동에 의한 소성변형이 일어나 동일 금속재료의 강도는 거의 일정한 값을 가진다. 그러나 취성 파괴 거동을 보이는 재료는 미세 균열 등 재료 내의 가장 약한 부분에서 확률적 파괴가 일어나기 쉬우며, 그 부분의 강도가 전체의 강도를 결정하게 된다. 따라서 실리콘 웨이퍼 같은 취성재료의 파괴강도 평가를 위해서는 단순한 평균의 개념이 아닌 파괴확률의 개념이 포함된 통계적 파단강도를 얻는 것이 더 신뢰성 높은 평가법이 될 수 있다.

와이블(Weibull) 이론에 의하면, 어떤 결함에 의해서 파괴가 일어나면 그와 동시에 전체가 파괴된다는 가정 하에, σ 의 응력을 가할 때 파괴가 일어날 확률 $P(f)$ 는 식 (3)과 같이 나타내어진다[8].

$$P(f) = 1 - \exp[-V((\sigma - \sigma_u) / \sigma_0)^m] \quad (3)$$

여기서, V : 시편의 부피

σ : applied stress

σ_u : threshold stress (i.e., $P(f) = 0$ 일때의 강도)

Fig. 7. (a) Weibull plot as a function of surface roughness and (b) scale factor determined from plot (a).

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

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

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

와이블 이론을 적용한 통계학적 파괴 강도를 구하기 위하여 식 (3)에서 σ_u 는 0으로 하고 양변에 $\log$ 함수를 두 번 취하면 식 (4)와 같다.

$$\ln \ln \left[\frac{1}{1 - P(f)} \right] = m \ln \sigma - m \ln \sigma_0 + \ln V \quad (4)$$

여기서, $\ln \sigma$ 와 $\ln \ln [1 / (1 - P(f))]$ 를 그래프로 그리면 직선이 된다. 이 그래프의 기울기가 와이블 계수(형상인자)이며, 파괴확률이 0.632일때의 응력 값이 크

기인자 값이 된다.

표면조건이 다른 웨이퍼의 볼브레이커 파단강도 분포에 대해 와이블 통계 해석을 적용하였다. Fig. 7(a)는 표면조건이 다른 각각의 웨이퍼에 대해 약 330개의 파단강도 측정 결과로부터 구성된 와이블 선도(즉, 파단강도 vs. 파단확률 그래프)를 보여주고 있다. 이 그래프로부터 파괴확률이 고려된 특정수명 강도값(즉, 크기인자)을 얻었으며, 그 결과를 Fig. 7(b)에서 보여주고 있다. 폴리싱, 그라인딩(#4800), 그라인딩(#320)의 순으로 강도가 높게 나타났다. 이는 파단강도의 평균 및 표준편차 값을 사용하여 나타난 Fig. 6의 결과와 유사한 변화 경향이다. 그러나 Fig. 7에서 와이블 선도로부터 구한 크기인자는 파단 확률이 고려된 통계적 파단강도이므로 강도 분포가 넓은 취성 실리콘 재료의 파괴특성을 더 신뢰성 있게 평가할 수 있을 것으로 보인다.

4. 요약 및 결론

볼브레이커시험을 통하여 $150 \mu\text{m} \sim 30 \mu\text{m}$ 두께의 실리콘 다이의 파단강도 및 파괴특성을 평가하는 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 볼브레이커 시험을 이용하여 두께 $150 \mu\text{m} \sim 30 \mu\text{m}$ 의 실리콘 다이의 파단강도를 측정하였다. 한 장의 웨이퍼 내에서 볼브레이커 파단강도 분포를 분석한 결과, 파단하중은 매우 넓은 범위의 값을 가졌으며, 웨이퍼 내에서 부위에 따라서는 강도분포 특이성 없이 무작위적으로 분포하였다. 파단하중이 낮게 측정된 실리콘 다이는 2~4개의 조각으로 파단되는 저에너지 파단 특성을 보인 반면, 파단하중이 높은 시험편은 여러 방향으로 균열이 전파하여 매우 많은 조각으로 파단되는 고에너지 파단 양상을 나타내었다.

2. 웨이퍼의 두께가 감소함에 따라 볼브레이커 파단강도는 두께의 지수함수적으로 급격하게 증가하였으며, 이를 취성재료에서 나타나는 크기효과에 의한 영향으로 고찰하였다.

3. 표면거칠기가 작을수록 파단강도는 급격히 증가하는 경향을 보여, 실리콘 다이의 파단강도는 표면상태에 매우 민감하게 영향을 받음을 확인하였다.

4. 표면조건에 따른 파단강도의 통계적 해석을 위해, 한 개의 웨이퍼에서 실험적으로 측정한 약 330

개의 다이 파단강도 데이터를 이용하여 와이블 선도를 구하였다. 이로부터 파괴확률이 반영된 통계적 특성수명강도값(와이블 크기인자)를 얻을 수 있었으며, 이를 이용하면 강도 분포가 넓은 취성 실리콘 재료의 신뢰성 있는 파괴특성 평가가 가능할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

References

1. J. D. Wu, C. Y. Huang and C. C. Liao : Microelectronics Reliab., **43** (2003) 269.
2. H. H. Jiun and G. Omar : Microelectronics Reliab., **46** (2006) 836.
3. Z. Chen, J. B. Han and N. X. Tan : Journal of Electronic Packaging, **125** (2003) 115.
4. Y. K. Min and J. W. Byeon : J. Microelectron. Packag. Soc., **18** (2011) 15.
5. J. N. Calata, J. G. Bai, X. Liu, S. Wen and G. Q. Lu : IEEE Transactions on Advanced Packaging, **28** (2005) 404.
6. P. A. Wang : IEEE Proceedings of the Fourth World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, (2006) 1179.
7. N. M. Lellan, N. Fan, S. Liu, K. Lau and J. Wu : ASME J Electron. Packag., **126** (2004) 110.
8. J. Paul, B. Majeed, K. M. Razeed, and J. Barton : Acta Materialia, **54** (2006) 3991.
9. G. Omar, N. Tamaldin, M. R. Muhamad, and T. C. Hock : IEEE, Semiconductor Electronics Proceedings ICSE International Conference (2000) 147.
10. M. Y. Tsai, and C. H. Chen : Microelectronics Reliab., **48** (2008) 933.
11. P. H. DeHoff, K. J. Anusavice, and P. W. Hathcock : J. Dent. Res., **61** (1982) 1066.
12. T. K. Woo, Y. H. Kim, H. S. Ahn, and S. I. Kim : J. Microelectron. Packag. Soc., **16** (2009) 61.
13. M. K. Choi, and E. K. Kim : J. Microelectron. Packag. Soc., **15** (2008) 63.
14. Y. Desmond, R. Chong, W. E. Lee, and B. K. Lim : IEEE Inter. Society Conference on Thermal Phenomena (2004) 203.
15. ASTM C 1161-02C (1990).