

대 용량 데이터를 사용한 실리콘 웨이퍼 제조공정의 품질특성 불량원인분석 사례

권 유진, 권 혁무
부산시 남구 용당동 산 100, 부경대학교 시스템경영공학과
전화) 051-620-1549 email) iehmkwon@pknu.ac.kr

이 종경
충남 천안시 성거읍 오목리 27번지, (주)MEMC 코리아
전화) 041-550-4351 email) jkleee@memc.co.kr

Case study of analysing the manufacturing process of silicon wafers based on a large set of data to identify the causes of nonconformities

You Jin Kwon, Hyuck Moo Kwon
Dept. of Systems Management and Engineering, Pukyong National University
San 100 Yongdang-dong Nam-gu Busan 608-739

Jong Kyong Lee
MEMC Korea Co., Ltd.
27 Ohmok-Ri, Sunggeo-Eup, Chonan City, Chungchongnam-do, 330-831 Korea

Abstract

본 연구는 M사의 제조공정에서 얻어진 대 용량 데이터를 사용하여 실리콘 웨이퍼의 중요 품질특성 중 하나인 Warp 불량원인을 분석한 사례이다. 이론적으로는 많은 양의 데이터를 확보하고 있을 경우 검출력의 향상으로 공정의 미세한 변화를 보다 민감하게 탐지할 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 현실적으로는 불필요한 정보 혹은 많은 잡음 요인들의 개입으로 인하여 공정에 대한 올바른 이해가 더 어려울 수도 있다. 본 연구는 공정에 대한 경험과 기술적인 지식을 활용하여 분석의 기본 방향을 설정하고 많은 양의 데이터를 체계적으로 분석한 후 분석 결과를 실질적인 측면에서 재검토하여 의미 있는 결과를 도출하는 순서로 진행되었다. 데이터 분석의 과정 및 결과는 공정의 자동화로 수많은 데이터가 실시간으로 기록되는 상황에서 잡음요인들로 인한 영향을 배제하고 핵심요인에 의한 영향을 파악하는데 참고할 수 있을 것으로 사료된다.

1. 서론

최근 컴퓨터 및 센서기술이 발달함에 따라 많은 데이터가 실시간으로 수집되는 공정이 늘어나고 있다. 이와 같은 공정에서 얻어진 대용량 데이터를 통계적으로 분석하여 공정의 상태에 대한

유용한 정보를 얻고자 할 경우, 검출력의 향상으로 공정의 미세한 변화를 보다 민감하게 탐지할 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 현실적으로는 불필요한 정보 혹은 많은 잡음 요인들의 개입으로 인하여 공정에 대한 올바른 이해가 더 어려울 수도 있다.

본 사례에서 이용된 데이터는 크기가 수만 혹은 십만 이상으로 많은 수치적인 자료를 기록하고 있었지만 통계적인 분석에는 비효율적인 형태였고 막상 필요한 정보가 결여된 경우도 많았다. 또한 데이터의 신뢰성도 문제되어 적절한 클리닝 절차를 거쳐야 하는 상황이었다. 이와 같은 과정을 거쳐 불필요하거나 의미 없는 데이터 집합을 따로 분리해 내고 분석된 결과라 하더라도 현실적으로 의미를 부여하기에 미흡하거나 일관성이 없는 경우도 많았다. 이와 같은 상황에서는 통계적인 분석결과와 공정의 작동 메커니즘에 대한 기술적인 지식을 통합하여 해석함으로써 공정에 대한 보다 의미 있는 사실을 밝혀낼 수 있다.

본 연구에서는 제조공정에서 얻어진 대용량 데이터에 대한 통계적인 분석과 함께 공정에 대한 기술적인 지식을 활용하여 공정에 대한 의미 있는 정보를 얻는 과정을 사례를 통해 살펴본다.

2. 제품 및 공정소개

실리콘 웨이퍼는 반도체 칩의 핵심 소재로서 다결정의 실리콘을 원재료로 하여 만들어진 결정 실리콘 박판을 말한다. 실리콘은 반도체 산업에 매우 안정적으로 공급될 수 있는 재료일 뿐 아니라 독성이 전혀 없어 환경적으로 매우 우수한 재료이다. 또한, 실리콘으로 만들어진 웨이퍼는 비교적 고온에서도 소자가 작동하는 장점이 있다. 이러한 장점 때문에 실리콘 웨이퍼는 반도체 산업에서 DRAM, ASIC, HTR(Transistor), CMOS, ROM 등 다양한 형태의 반도체 소자를 만드는데 이용되며, 이들 소자는 컴퓨터, 전자제품, 산업용 기계 등 산업분야에 없어서는 안 될 중요한 부품들이다.

실리콘 웨이퍼의 제조공정은 그림 1에서 보는 바와 같이 크게 Crystal Pulling, Modification, Polishing & Cleaning의 세 부분으로 구성되어 있다.

Crystal Pulling은 ingot을 형성하는 공정으로 Chunk Poly와 Lite Poly를 석영도가니에 담은 후 소량의 dopant를 첨가하여 섭씨 1400도 이상의 고온에서 녹인 후 ingot을 생성하게 된다.

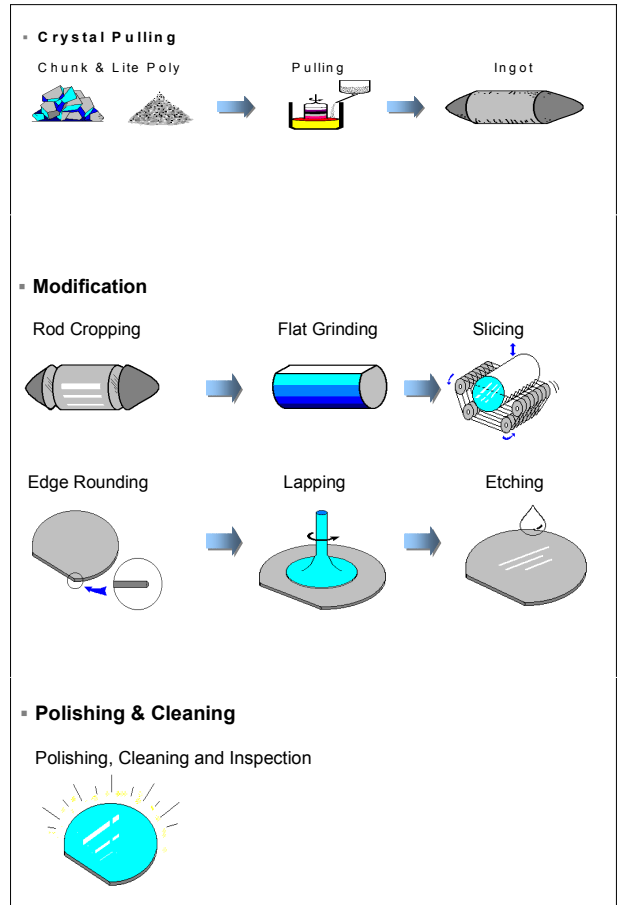


그림 1. 실리콘 웨이퍼의 제조공정

Modification공정은 다시 Rod Cropping, Flat Grinding, Slicing, Edge Grinding, lapping, Etching 등 여러 세부 공정으로 나누어진다. Rod Cropping은 ingot의 불필요한 부분을 잘라내어 Rod를 만드는 공정이며, Flat Grinding은 Rod의 표면을 Grinding한 후 결정 방향성을 알 수 있도록 flat을 형성하는 공정이다. 이렇게 얻어진 Rod는 Slicing공정을 통해 얇게 절단됨으로써 비로소 웨이퍼의 형태를 가지게 된다. 절단된 웨이퍼는 테두리를 둥글게 연마하는 Edge Grinding 공정을 거쳐 Lapping공정에서 표면의 saw mark와 scratch 등을 제거하게 된다. 마지막으로 Etching 공정을 통해 Lapping공정에서 발생한 미세한 기계적 결함을 화학적 식각을 통해 제거한다.

Polishing & Cleaning 공정에서는 경면 연마 공정(Polishing)과 세정공정(Cleaning) 및 최종 검사(Inspection)를 거쳐 제품을 완성하게 된다.

3. Warp 불량원인 분석

3.1 Warp의 정의

Warp는 웨이퍼가 휘어진 정도를 말하며 그림 2와 같이 여러 형태가 있을 수 있다. 그림에서 (a), (b)는 심하게 휘어진 경우이며 (c)는 이상적으로 편평하게 절단된 경우이다. 현장에서는 Warp의 측도로서 그림 3의 웨이퍼의 메디안 표면과 레퍼런스 평면 사이의 거리 중 최대값(a)과 최소값(b)의 차이를 사용한다.

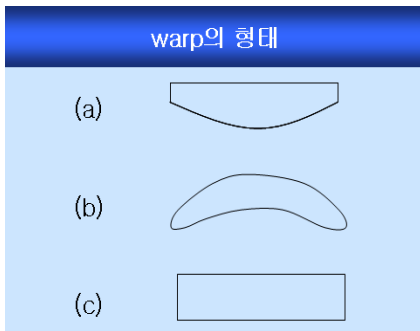


그림 2. warp의 형태

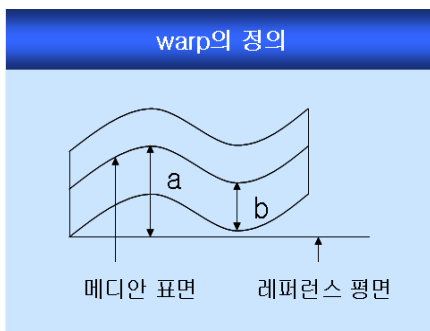


그림 3. warp의 정의

3.2 Warp불량의 잠재원인 도출

Warp에 직접적인 영향을 주는 공정은 Slicing 공정으로서 Rod를 절단할 때 각 웨이퍼의 두께가 균일하게 유지되도록 하는 것이 중요하다. 절단방식은 예전에는 다이아몬드를 사용한 Blade Type의 절단 방식을 사용하였으나 절단시간의 감소, 두께 편차의 감소, Warp감소 등 여러 가지 장점으로 인해 Wire를 이용한 절단방식이 사용되고 있다.

Slicing 공정에서 Rod를 절단하는 작업은 Multi-wire saw 장비에 의해 이루어지므로

Warp 불량 발생 메커니즘을 이해하기 위해서는 장비의 구성과 작동원리를 알 필요가 있다. 그림 4는 장비의 구성 요소를 보여 주며, Rod는 감겨지는 Wire와 Wire위에 뿌려진 Slurry의 마찰을 이용하여 여러 개의 웨이퍼로 잘려진다.

공정과 장비에 대한 이해를 바탕으로 특성요인도, XY matrix, FMEA 등의 도구를 이용하여 Warp 불량의 잠재적인 중요원인들을 도출하였다.

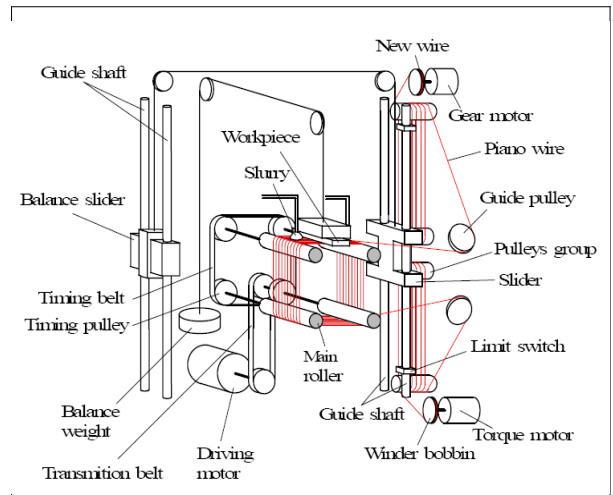


그림 4. Multi wire saw 기계

3.3 데이터 분석

잠재 원인들이 Warp 불량률의 참 원인인지 확인하기 위해서는 데이터를 기초로 한 객관적인 검증 절차를 거쳐야 한다. 현장으로부터 얻은 가용한 데이터는 2005년 5월부터 7월까지의 데이터이며 크기 약 12만 정도의 대용량 데이터이다. 이와 같이 많은 데이터를 이용하여 통계적인 분석을 실시할 경우, 많은 정보를 확보하고 있다는 장점도 있지만 다음과 같은 문제점들도 있다.

첫째, 많은 데이터들이 모두 신뢰할 수 있는 데이터인지 확신이 없을 경우, 어떤 데이터를 배제해야 할 것인지 결정하기 어렵다. 둘째, 실제로는 별 의미 없는 작은 차이들을 통계적인 분석결과로는 매우 유의한 차이가 있는 것으로 나타나게 된다. 실제로 두 종류의 장비에 대해 6만개 이상의 데이터를 기초로 Warp평균과 표준편차 및 차이에 대한 가설 검정을 실시한 결과 p값은 모두 0.000으로 나왔지만 실제 차이는 의미를 부여할 수 있는 정도의 값이 아니었다.

셋째, 안정되지 않은 공정에서 나온 수많은 데이터들이 뒤섞임으로써 전체적인 모양은 마치 정상적인 공정에서 나온 데이터처럼 보일 수 있다. 그림 5는 전술한 Warp 데이터를 히스토그램으로 나타낸 것으로 모양이 품질 특성에 한쪽규격이 주어져 있는 경우의 정상적인 공정에서 나온 데이터의 전형적인 형태를 취하고 있다. 그러나 평균에 비해 표준편차가 지나치게 큰 것으로 미루어 적정 크기의 부분군으로 나누어 관리도를 작성하여 공정을 해석하면 공정에 이상이 있는 것으로 나타날 가능성이 크다.

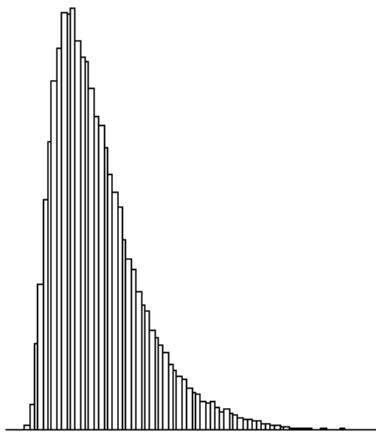


그림 5. Warp 데이터의 히스토그램

산포가 지나치게 큰 공정의 변동을 구성 요소별 부분군으로 분해해보면 그림 6과 같이 부분군간 평균의 변동이 표준편차의 크기에 반영되어 있을 경우가 많다. 문제는 어떤 기준으로 부분군을 구분해야 의미 있는 변동의 패턴을 식별할 수 있는가 이며, 이것은 현장의 경험과 기술적인 지식을 기초로 여러 가지 각도에서 데이터를 분석해봄으로써 알아낼 수밖에 없다.

여기서 분석 대상으로 하는 Slicing 공정의 경우 현장에서 두 모델의 장비를 사용하고 있으나, 모델별로는 실질적인 유의차를 보여주지 않았으므로 장비별로 차이를 분석해 보았다. 결과 장비별로 상당한 차이를 보였으나 월별로 일관성 있는 결과를 보여주지는 않았다. 즉, 제일 좋은 결과 혹은 제일 좋지 않은 결과를 주는 장비가 매월 달라지므로 변동의 원인이 장비에 있는 것이 아니라 주기적으로 교환해 주는 소모품들과 작업

조건에 있을 것으로 추정되었다. 따라서 Slurry, Main Roller, Wire 등 장비에 장착되는 소모품들에 의한 영향을 순서대로 분석하였다.

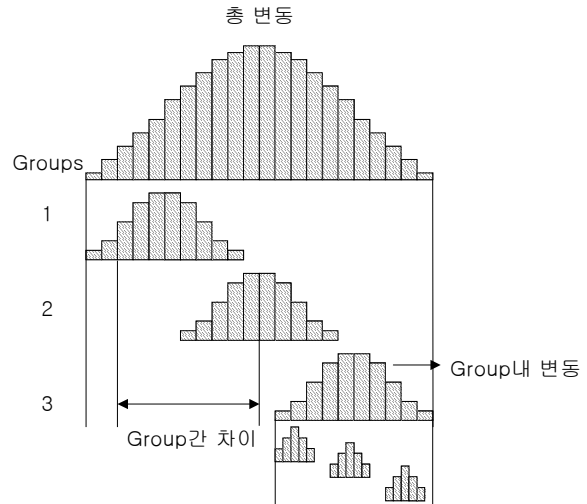


그림 6. 공정 총 변동의 구성

3.4 인자별 분석 결과

Slurry는 보통 SiC(실리콘카바이드)로 구성되어 있으며 그 크기는 지름 10~15 μ m 정도이다. 이러한 SiC알갱이는 연마제 역할을 하는 동안 점점 닳기 때문에 Slurry를 교체하거나 새로운 Slurry를 공급할 필요가 있다. 또한 Slurry는 Wire와의 마찰을 통해 Rod를 자르기 때문에 Slurry의 움직임이 중요하며 Slurry의 밀도와 온도는 이러한 움직임에 중요한 영향을 주는 요인이다. 최근 환경 문제가 대두되면서 사용한 Slurry를 재생하여 사용하고 있으며, 재활용 시 Slurry내 이물질을 제거하는 것이 중요하다. 분석 결과 Warp는 Slurry의 밀도, 사용횟수, 공급량, 온도에 영향을 받는 것으로 나타났으나 그 패턴에 일관성이 없어서 다른 변수에 의한 영향을 강하게 받고 있을 것이라는 유추 외에 의미 있는 정보를 얻을 수 없었다.

Main Roller의 패임과 샤프트 마모, Wire의 장력, 뒤틀림, 정렬 상태 등은 Main Roller의 부위별로 달라질 수 있으므로 이들 중 일부 요인이 Warp에 영향을 준다면 같은 Rod를 잘라 제작된 웨이퍼 간에도 큰 편차가 있을 것이다. 그림 7은 몇 개의 Rod에 대해 위치별로 Warp 변화를 살펴 보기 위해 Run Chart를 작성해 본 것이다. 그림

으로부터 알 수 있듯이 Warp는 동시에 작업된 같은 Rod 내에서의 차이가 Rod간 차이보다 훨씬 더 크다는 것을 알 수 있다.

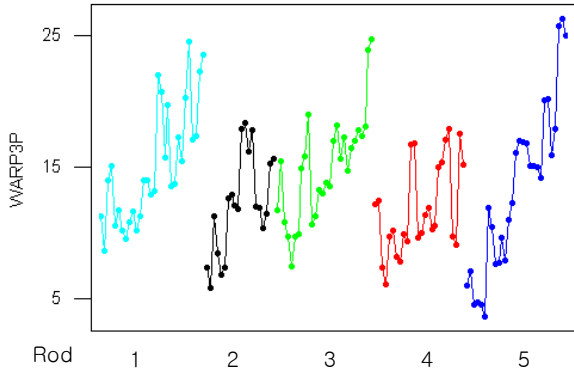


그림 7. Rod 위치별 Warp의 변화

이러한 변화를 확인하기 위해 몇 대의 장비에서 작업된 총 903개 Rod 대해 추가 분석하여 표 1에 정리하였다. 같은 Rod 내 Warp의 변화 패턴은 표 1에서 보는바와 같이 총 7가지로 나타났다. 그 중 증가 형이 제일 많이 나타났으며 그 다음으로 U자형이 많이 나타났다. 이러한 패턴이 생기는 근본 원인은 Wire Saw 장비의 작동 메커니즘을 검토하여 분석함으로써 어느 요인에 의한 것인지 규명할 수 있을 것으로 판단된다.

표 1. rod의 패턴

pattern	기계				계
	1	10	11	14	
	20	10	45	25	100
	97	87	61	38	283
	43	49	49	74	215
	26	16	10	4	56
	7	23	36	25	91
	37	41	14	15	107
	11	18	12	10	51
계	241	244	227	191	903

3.5 Slicing 공정의 작동 메커니즘 분석

같은 Rod를 잘라 형성된 웨이퍼간 품질특성이 균일하지 못하다는 것은 Rod를 장비에 장착하여 작업을 진행하는 과정에 무언가 문제가 있음을 의미한다. 더구나 품질특성의 변화 패턴이 그림 7

과 같다는 것은 Rod 부위별로 다른 영향을 줄 수 있는 요소가 주된 원인임을 강하게 시사하고 있다. 절단작동 시 Rod 부위별로 달라질 수 있는 요소로는 Slicing 장비의 작동메커니즘작동원리로써 Main Roller의 패임, Wire 장력 및 마모정도, Wire 정렬상태 등이 있다. 이러한 요인들의 영향을 완충할 수 있도록 Main Roller를 다시 설계하여 시험하고 데이터를 수집, 분석한 결과 그림 8과 같은 결과를 얻을 수 있었다. Rod 위치별 웨이퍼의 품질 특성이 이전에 비해 훨씬 더 균일함을 보여주고 있다. 다만, 처음 부분에서 Warp가 다소 크게 나타나는 현상은 향후 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

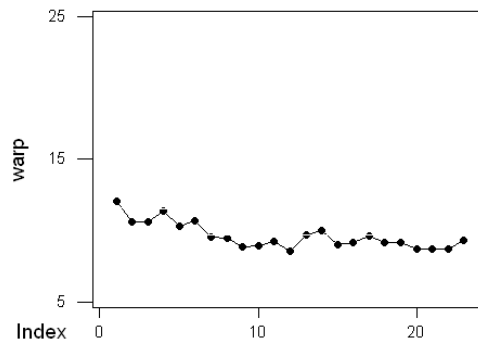


그림 8. Rod 위치별 warp의 변화

4. 결론

본 연구에서는 많은 데이터가 실시간으로 수집되는 공정을 진단하는 방법을 사례를 통해 보여주었다. 연구의 진행은 우선 공정에 대한 경험과 기술적인 지식을 활용하여 분석의 기본 방향을 설정한 후, 많은 양의 데이터를 체계적으로 분석하고 그 결과를 실질적인 측면에서 재검토하여 의미 있는 결과를 도출하는 순서로 진행되었다. 데이터 분석의 과정 및 결과는 공정의 자동화로 수많은 데이터가 실시간으로 기록되는 상황에서 잡음요인들로 인한 영향을 배제하고 핵심요인에 의한 영향을 파악하는데 참고할 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. 김미정(2004), Six Sigma 분석 및 개선을 위한 데이터마이닝 기법의 이용, 석사학위 논문, 부경대학교
2. 박재홍, 변재현(2002), 데이터 정제와 그래프 분석을 이용한 대용량 공정데이터 분석 방법, 품질경영학회지, 제30권, 제2호, pp.72-85
3. Eugene L. Grant, Richard S. Leavenworth(1988), Statistical Quality control, McGRAW-HILL
4. Jun Sugawara, Hiroshi Hara, Akira Mizoguchi(2004), Development of fixed-abrasive-grain wire saw with less cutting loss, SEI GECHNICAL REVIEW, NO.58, pp.7-11
5. Ken-ichi ISHIKAWA, Hitoshi SUWABE, Shun-ichi Itoh, Michio UNEDA(2003), A Basic Study on Behavior of Slurry Actions at Multi-Wire Saw, Key Engineering Materials, Vols.238-239, pp.89-92
6. Wayne A. Taylor(1991), Optimization and Variation Reduction in Quality, McGRAW-HILL