

광학 검사 시스템 핵심 성능 지표(KPI) 및 수식 정의 기술

문서번호 CRSM-AI-2026-AUTO

작성일 2026-06-09

작성 Cressem AI 시스템 (자동 생성)

보안등급 사내 비밀 (Confidential)

버전 v1.0

목 차

광학 검사 시스템 핵심 성능 지표(KPI) 및 수식 정의 기술 보고서	3
개요/배경	3
광학 해상도(Resolution) 산출 원리	4
이미지 센서 화소 면적(Pixel Area) 정의	5
검사 마진(Inspection Margin) 산출식	7
명암비 및 농도비(Contrast Ratio) 분석	9
신호 대 잡음비(SNR) 및 신뢰성 평가	10
결론/시사점	12

광학 검사 시스템 핵심 성능 지표(KPI) 및 수식 정의 기술 보고서

반도체 검사 장비의 광학 엔진 설계 및 성능 검증에 필수적인 해상도, 화소, Margin, 농도비, SNR의 수학적 정의와 물리적 의미를 기술합니다. 본 보고서는 고정밀 검사 솔루션의 신뢰성을 확보하기 위한 엔지니어링 가이드를 제공합니다.

개요/배경

1.1 반도체 후공정 미세화와 광학 검사의 패러다임 변화

최근 반도체 산업은 전공정(Front-end)의 미세화 공정 한계를 극복하기 위해 후공정(Back-end)에서의 고도화된 패키징 기술인 어드밴스드 패키징(Advanced Packaging)으로 패러다임이 급격히 전환되고 있습니다. 특히 AI 가속기 및 고성능 컴퓨팅(HPC) 시장의 폭발적인 성장으로 인해 HBM(High Bandwidth Memory), 2.5D/3D 적층 구조, 그리고 FC-BGA(Flip Chip Ball Grid Array)와 같은 고밀도 기판의 수요가 급증하고 있습니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

이러한 기술적 진보는 반도체 칩을 수직으로 쌓는 TSV(Through Silicon Via) 기술의 정밀도 요구사항을 높였으며, 칩 간의 정렬(Alignment) 및 미세 범프(Micro Bump)의 형성 상태를 검증해야 하는 과제를 안겨주었습니다 [출처: 매뉴얼HBMAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf]. 패키징 기술이 고도화될수록 결함(Defect)의 크기는 작아지고, 검사 대상의 복잡도는 기하급수적으로 증가함에 따라, 기존의 단순 육안 검사나 Rule-based 방식의 검사로는 미세 결함을 식별하는 데 한계가 발생하고 있습니다. 따라서 초미세 패턴을 정밀하게 포착할 수 있는 고해상도 광학 검사(Optical Inspection) 솔루션의 중요성이 그 어느 때보다 강조되고 있습니다.

1.2 광학 성능 지표(KPI) 산출의 기술적 중요성

광학 검사 시스템의 성능은 단순히 '결함을 찾는다'는 개념을 넘어, 시스템이 물리적으로 구현할 수 있는 최소 단위의 해상도, 이미지의 선명도, 그리고 신호의 신뢰성을 정량적으로 정의할 수 있어야 합니다. 검사 장비의 성능을 결정짓는 핵심 성능 지표(Key Performance Indicator, KPI)를 정확히 산출하고 관리하는 것은 장비 개발 및 양산 공정 최적화의 핵심입니다.

첫째, **해상도(Resolution)**는 검사 시스템이 물리적으로 구분할 수 있는 최소 패턴의 크기를 의미하며, 이는 레일리 한계(Rayleigh Criterion)와 같은 광학적 이론을 바탕으로 시스템의 한계를 규정합니다. 둘째, **화소 면적(Pixel Area)** 및 센서의 특성은 획득된 이미지가 실제 물리적 크기와 어떻게 매핑되는지를 결정하며, 이는 검사 정밀도(Precision)와 직결됩니다. 셋째, **검사 마진(Inspection Margin)**은 설계 규격(Specification) 대비 실제 측정값의 여유치를 수치화하여, 공정의 산포(Variation)를 관리하고 잠재적인 불량 발생 가능성을 예측하는 엔지니어링 데이터로 활용됩니다 [출처: pdfHBMHighBandwid20260508002.pdf].

넷째, **농도비(Contrast Ratio)** 및 **신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)**는 이미지 품질을 결정하는 결정적인 요소입니다. 결함(Defect)과 배경(Background) 간의 명암 차이가 충분하지 않거나, 센서에서 발생하는 노이즈가 신호 강도에 비해 높을 경우, 미세 결함은 노이즈에 묻혀 검출되지 못하는 미검(Escape) 현상이 발생하게 됩니다. 이는 곧 고객사의 수율(Yield) 저하로 이어지는 치명적인 결과를 초래할 수 있습니다.

1.3 보고서의 목적 및 범위

본 기술 보고서는 크레셈(CRESSEM)의 차세대 고정밀 광학 검사 시스템 개발 및 운용에 있어 필수적인 핵심 성능 지표들의 수학적 정의와 산출 원리를 체계적으로 정리하는 데 목적이 있습니다.

본 보고서에서는 다음의 내용을 중점적으로 다룹니다:

1. **광학적 한계 정의:** 파장(λ)과 개구수(Numerical Aperture, NA)를 이용한 해상도 산출식의 물리적 의미 분석.
2. **이미지 센서 정밀도 분석:** 화소 크기와 실제 검사 영역 간의 상관관계 규명.
3. **공정 안정성 평가 방법론:** Spec 대비 Margin 산출을 통한 데이터 기반의 품질 관리 체계 제시.
4. **이미지 식별력 정량화:** 농도비와 SNR 수식을 통한 검출 한계(Detection Limit) 및 신뢰성 평가 기준 확립.

이러한 정량적 지표의 명확한 정의는 장비의 설계 단계부터 양산 현장의 품질 관리(Quality Control) 단계에 이르기까지, 엔지니어가 객관적인 데이터를 바탕으로 의사결정을 내릴 수 있는 기술적 근거를 제공할 것입니다. 특히 HBM4 및 Hybrid Bonding과 같이 초미세 공정이 요구되는 차세대 반도체 시장에서, 크레셈의 검사 솔루션이 가진 기술적 우위를 입증하고 최적의 검사 환경을 구축하기 위한 가이드라인으로 활용될 것입니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

광학 해상도(Resolution) 산출 원리

반도체 패키징 기술이 HBM(High Bandwidth Memory)과 같이 수천 개의 미세한 TSV(Through Silicon Via) 및 Bump를 적층하는 구조로 진화함에 따라, 이를 검사하는 광학 시스템의 해상도(Resolution) 성능은 검사 신뢰성을 결정짓는 가장 근본적인 물리적 한계치로 작용합니다. 광학 검사 시스템에서 해상도란 단순히 '이미지가 선명하게 보이는 정도'를 넘어, 인접한 두 개의 미세 패턴(Feature)을 별개의 객체로 분리하여 인식할 수 있는 최소한의 물리적 거리를 의미합니다. 본 섹션에서는 광학계의 성능을 규정하는 핵심 이론인 레일리 한계(Rayleigh Criterion)를 중심으로, 해상도 산출식의 구성 요소와 그 물리적 상관관계를 심도 있게 분석합니다.

1. 레일리 한계(Rayleigh Criterion)와 해상도의 정의

광학계는 빛의 회절(Diffraction) 현상으로 인해 아무리 정밀한 렌즈를 사용하더라도 이론적인 해상도의 한계에 직면하게 됩니다. 두 개의 점광원(Point Source)이 매우 가까이 있을 때, 한 점의 회절 패턴(Airy Disk)이 다른 점의 회절 패턴 중심에 위치하게 되면 두 점은 하나의 흐릿한 점으로 보이게 됩니다. 레일리 한계는 이 두 점을 물리적으로 구분할 수 있는 최소한의 각도 또는 거리를 정의하는 기준입니다.

반도체 검사 장비의 성능을 평가할 때 사용하는 해상도 산출식은 다음과 같습니다.

$$R = (0.61 \lambda) / (NA)$$

여기서 각 변수가 갖는 물리적 의미와 검사 시스템에 미치는 영향은 다음과 같습니다.

- **R (Resolution):** 분해 가능한 최소 거리 또는 각해상도(Angular Resolution)를 의미하며, 이 값이 작을수록 더 미세한 결함을 검출할 수 있는 고해상도 시스템임을 뜻합니다.
- **λ (Wavelength):** 사용되는 광원의 파장입니다. 파장이 짧을수록 회절 현상이 줄어들어 해상도가 향상됩니다.
- **NA (Numerical Aperture):** 개구수라고 하며, 렌즈가 빛을 모으는 능력을 나타내는 무차원 수치입니다. $NA = n \sin \alpha$ (여기서 n 은 매질의 굴절률, α 는 빛이 렌즈로 들어오는 최대 각도)로 정의됩니다.

2. 파장(λ)과 해상도의 상관관계 분석

해상도 식에서 파장(λ)은 분자와 위치합니다. 이는 파장이 짧아질수록 해상도(R) 값이 감소하여 성능이 향상됨을 의미합니다.

반도체 검사 공정에서 미세 패턴의 크기가 수 μm 단위에서 수백 nm 단위로 축소됨에 따라, 가시광선(Visible Light) 영역의 파장(약 400 ~ 700 nm)만으로는 해상도 확보에 한계가 있습니다. 따라서 고정밀 검사를 위해서는 단파장 영역의 광원을 선택하는 것이 필수적입니다. 예를 들어, 청색광(Blue Light)은 적색광(Red Light)보다 파장이 짧기 때문에 동일한 NA 조건에서도 더 높은 해상도를 제공할 수 있습니다. 최근 HBM의 미세 Bump 및 TSV 결함 검사에서는 이러한 파장 제어 기술이 검사 정밀도를 결정하는 핵심 요소로 작용합니다.

3. 개구수(NA)와 해상도의 상관관계 분석

개구수(NA)는 분모에 위치하며, NA가 커질수록 해상도(R)는 작아져(개선되어) 더 미세한 패턴을 볼 수 있게 됩니다. NA를 높이기 위해서는 렌즈의 크기를 키우거나, 렌즈의 곡률을 조절하여 빛을 더 넓은 각도(α)로 받아들여야 합니다.

하지만 NA를 무한정 높이는 데에는 다음과 같은 기술적 트레이드오프(Trade-off)가 존재합니다.

1. **초점 심도(Depth of Focus, DOF)의 감소:** 해상도와 초점 심도는 반비례 관계에 있습니다. $DOF \propto (\lambda)/(NA^2)$ 의 관계를 가지므로, NA를 높여 해상도를 극대화하면 초점이 맞는 깊이가 급격히 얇아집니다. 이는 웨이퍼의 휨(Warp)이나 적층 구조의 높이 편차가 발생하는 HBM 검사 시, 특정 높이에서만 초점이 맞고 나머지 영역에서는 이미지가 흐려지는 문제를 야기할 수 있습니다.

2. **광량(Light Intensity) 및 수차(Aberration) 문제:** NA가 큰 렌즈는 주변부 광선을 급격한 각도로 굴절시키기 때문에, 렌즈 설계가 매우 까다로우며 색수차 및 구면수차와 같은 광학적 왜곡을 제어하기 위한 고도의 설계 기술이 요구됩니다.

4. 종합 분석: 고정밀 검사 시스템 설계를 위한 최적화 전략

결론적으로, 광학 검사 시스템의 설계자는 레일리 한계 식을 기반으로 '해상도 향상'과 '초점 심도 확보' 사이의 최적의 균형점(Sweet Spot)을 찾아야 합니다.

구분	파장(λ) 감소	개구수(NA) 증가
해상도(R) 영향	개선 (값 감소)	개선 (값 감소)
초점 심도(DOF) 영향	개선 (깊이 증가)	악화 (깊이 급감)
주요 기술적 과제	단파장 광원(UV/Blue) 확보	렌즈 설계 및 수차 제어, 스테이지 정밀도

표 1.

HBM 및 차세대 패키징 검사 장비에서는 미세한 TSV 연결 상태와 Die-to-Die 정렬(Misalignment)을 검출하기 위해 고NA 렌즈와 단파장 광원을 조합한 고해상도 엔진을 사용합니다. 동시에, 적층 구조의 물리적 특성인 Warp을 고려하여 실시간으로 초점을 맞추는 자동 초점(Auto Focus) 기술 및 고속 광학 엔진 기술이 통합되어야만 실질적인 검사 수율(Yield) 향상에 기여할 수 있습니다. [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf]



그림 1.

이미지 센서 화소 면적(Pixel Area) 정의

반도체 패키징 검사, 특히 HBM(High Bandwidth Memory)이나 FC-BGA(Flip Chip Ball Grid Array)와 같은 고밀도 기판 검사에서 이미지 센서의 화소 면적(Pixel Area)은 시스템의 공간 해상도(Spatial Resolution)와 검사 정밀도를 결정짓는 물리적 기초 인자입니다. 검사 장비가 포착하는 시야(Field of View, FOV) 내에서 미세한 결함(Defect)을 식별하기 위해서는 센서의 물리적 화소 크기와 광학계의 해상도가 유기적으로 결합되어야 합니다.

1. 화소 크기(Pixel Size)와 검사 정밀도의 상관관계

이미지 센서의 화소 크기(PixelW Size)는 빛을 전기적 신호로 변환하는 광전 변환 소자(Photodiode)의 물리적 크기를 의미하며, 이는 일반적으로 단위인 μm 로 표기됩니다. 화소 면적(PixelW Area)은 화소의 가로와 세로 길이를 곱하여 산출되며, 화소 면적이 작을수록 동일한 면적 내에 더 많은 화소를 배치할 수 있어 높은 공간 해상도를 구현할 수 있습니다.

그러나 반도체 검사 공정에서 화소 크기를 무작정 줄이는 것은 기술적 트레이드오프(Trade-off)를 수반합니다. 화소 면적이 작아질수록 다음과 같은 특성 변화가 발생합니다.

- **신호 수집 능력(Light Collection Efficiency) 저하:** 화소 면적이 감소하면 개별 화소가 수용할 수 있는 광자(Photon)의 양이 줄어들어 신호 대 잡음비(SNR)가 낮아질 수 있습니다. 이는 어두운 배경이나 저조도 환경에서 결함 검출력을 약화시키는 원인이 됩니다.
- **풀 웰 용량(Full Well Capacity, FWC) 감소:** 화소가 담을 수 있는 최대 전하량이 줄어들어 동적 범위(Dynamic Range)가 제한될 수 있으며, 이는 명암 대비가 극명한 금속 Bump나 TSV(Through Silicon Via) 검사 시 데이터 왜곡을 초래할 수 있습니다.
- **공간 해상도(Spatial Resolution) 향상:** 반면, 화소 크기가 작아지면 샘플링 밀도(Sampling Density)가 높아져 미세한 패턴(Fine Pattern)이나 미세 결함(Bridge, Missing Bump 등)을 더 정밀하게 묘사할 수 있습니다.

2. 주요 수식 및 물리적 정의

검사 시스템의 정밀도를 설계할 때, 화소 면적과 관련된 핵심 수식은 다음과 같이 정의됩니다.

가. 화소 면적(Pixel Area) 산출식

화소가 정사각형 형태라고 가정할 때, 화소 면적(Apixel)은 화소의 한 변의 길이(Psize)의 제곱으로 정의됩니다.

$$\text{Apixel} = \text{Psize}^2$$

나. 센서 해상도와 FOV의 관계

검사 장비가 한 번에 관찰하는 영역인 시야(Field of View, FOV)와 센서의 화소 수(Resolution) 사이의 관계는 다음과 같습니다. 여기서 FOVwidth는 검사 영역의 가로 길이, Npixel은 센서의 가로 화소 수입니다.

$$\text{PixelW Size (Psize)} = (\text{FOVwidth})/(\text{Npixel})$$

이 수식은 검사 장비의 정밀도를 높이기 위해 두 가지 전략 중 하나를 선택해야 함을 시사합니다. 첫째는 광학계를 조절하여 FOV를 줄임으로써 동일 화소 수에서 Psize를 최소화하는 것이고, 둘째는 고해상도 센서를 채택하여 Npixel을 극대화하는 것입니다.

3. 검사 시스템 설계 시 고려사항: Sampling 및 Aliasing

광학 검사 시스템에서 화소 면적은 단순히 크기의 문제가 아니라, 광학계의 해상도(Optical Resolution)와 일치하는지가 핵심입니다. 나이퀴스트 샘플링 이론(Nyquist Sampling Theorem)에 따르면, 광학계가 구현할 수 있는 최소 해상도(Rayleigh Limit)를 물리적으로 재현하기 위해서는 화소의 크기가 광학 해상도보다 충분히 작아야 합니다.

구분	화소 크기 작음 (Small Pixel)	화소 크기 큼 (Large Pixel)
주요 장점	고해상도 구현, 미세 결함 검출 유리	높은 SNR, 넓은 Dynamic Range
주요 단점	낮은 SNR, 신호 민감도 저하	낮은 공간 해상도, 미세 패턴 식별 불가
적용 분야	TSV, Micro Bump, 미세 회로 패턴 검사	대면적 기판, 거시적 형태(Warpage) 검사

표 2.

만약 화소 크기가 광학 해상도에 비해 너무 크면, 실제 패턴의 미세한 정보가 화소 단위로 뭉개지는 **에일리어싱(Aliasing)** 현상이 발생하여 결함(Defect)을 놓칠 위험이 있습니다. 반대로 화소는 매우 작지만 광학계의 해상도가 낮다면, 센서는 높은 밀도로 데이터를 수집하지만 실제로는 노이즈가 섞인 저해상도 이미지를 얻게 되는 'Over-sampling' 상태가 됩니다.

따라서 크레셈(CRESSEM)의 고정밀 검사 솔루션은 고객사의 요구 사양인 TSV 연결성 및 Die-to-Die 정렬 정밀도에 맞추어, 광학계의 해상도와 센서의 화소 면적을 최적화(Optimization)하여 설계하는 것이 필수적입니다. [출처: 내부 기술 설계 가이드라인(추정)]

검사 마진(Inspection Margin) 산출식

반도체 검사 공정에서 **검사 마진(Inspection Margin)**은 설계 규격(Specification, 이하 Spec)과 실제 측정값(Measured Value) 사이의 수치적 차이를 의미하며, 이는 공정의 안정성(Process Stability)과 수율(Yield)을 예측하는 핵심적인 엔지니어링 지표로 활용됩니다. 검사 장비가 단순히 합격(Pass) 또는 불합격(Fail)을 판정하는 것을 넘어, 현재 공정이 설계된 허용 범위 내에서 얼마나 안정적으로 관리되고 있는지를 정량적으로 나타내는 '여유치'를 제공하기 때문입니다.

1. 검사 마진의 정의 및 공학적 의미

검사 마진은 검사 대상 제품(HBM, FC-BGA 등)이 물리적, 전기적 한계치에 얼마나 근접해 있는지를 나타냅니다. 마진이 크다는 것은 공정 변동(Process Variation)이 발생하더라도 제품이 불량으로 전이될 가능성이 낮음을 의미하며, 반대로 마진이 극도로 작다는 것은 미세한 환경 변화(온도, 압력, 진동 등)만으로도 즉각적인 불량이 발생할 수 있는 '위험 구간'에 진입했음을 시사합니다.

특히 HBM(High Bandwidth Memory)과 같이 수천 개의 TSV(Through Silicon Via)와 미세 Bump가 적층되는 고난도 패키징 공정에서는, 개별 소자의 특성뿐만 아니라 적층 과정에서 발생하는 **Warping(휨)**나 **Misalignment(정렬 오류)**가 누적되어 전체 시스템의 신뢰성을 저해합니다. 따라서 각 검사 항목별로 마진을 산출하여 관리하는 것은 차세대 공정(Hybrid Bonding 등)의 수율 확보를 위한 필수적인 전략입니다 [출처: pdfHBMHighBandwidth20260508001.pdf].

2. 마진 산출의 수학적 모델링

검사 마진은 검사 대상 파라미터의 성격(상한선 존재 여부, 하한선 존재 여부, 혹은 양방향 범위 존재 여부)에 따라 다음과 같이 세 가지 모델로 정의할 수 있습니다.

2.1. 단방향 마진 (One-sided Margin)

특정 임계값(Threshold)을 기준으로 한쪽 방향으로만 규격이 설정된 경우입니다. 예를 들어, TSV 저항(TSV Resistance)이나 공급 전압(Supply Voltage, VDD)의 최대 허용치가 설정된 경우에 사용됩니다.

- **최대 허용치 기준 (Upper Limit Type):** 측정값이 규격보다 작아야 하는 경우

$$\text{Margin} = \text{Specmax} - \text{Measured Value}$$

- **최소 허용치 기준 (Lower Limit Type):** 측정값이 규격보다 커야 하는 경우

$$\text{Margin} = \text{Measured Value} - \text{Specmin}$$

2.2. 양방향 마진 (Two-sided Margin / Window Margin)

가장 일반적인 형태의 마진으로, 설계된 중심값(Nominal Value)을 기준으로 상한(Upper Spec Limit, USL)과 하한(Lower Spec Limit, LSL)이 모두 존재하는 경우입니다. Signal Integrity(신호 무결성)의 Eye Height나 Bump의

위치 정렬(Alignment) 검사 시 주로 적용됩니다.

이때, 공정의 안정성을 평가하기 위해 단순히 차이값을 구하는 것을 넘어, 규격 범위 대비 현재 측정값이 차지하는 상대적 위치를 나타내는 **마진율(Margin Percentage, %)**을 산출하는 것이 엔지니어링 관점에서 더욱 유효합니다.

$$\text{Margin Ratio (\%)} = \left(\frac{\text{Measured Value} - \text{Specmin}}{\text{Specmax} - \text{Specmin}} \right) \times 100$$

위 식을 통해 산출된 값이 50%에 근접할수록 공정이 설계 중심값(Nominal)에 안정적으로 위치함을 의미하며, 0% 또는 100%에 근접할수록 규격 경계선(Spec Boundary)에 인접하여 공정 위험도가 높음을 의미합니다.

2.3. 상대적 마진 (Relative Margin / Deviation)

전압(Voltage)이나 저항(Resistance)과 같이 기준값 대비 변화율이 중요한 파라미터의 경우, 백분율(%) 단위의 상대 마진을 사용합니다. [출처: pdfHBMHighBandwidt20260508001.pdf]

$$\text{Relative Margin (\%)} = \left(\frac{\text{Measured Value} - \text{Specnominal}}{\text{Specnominal}} \right) \times 100$$

3. 검사 마진 기반의 공정 안정성 평가 (Process Window Analysis)

산출된 마진 데이터는 단순한 수치를 넘어 **공정 윈도우(Process Window)** 분석의 기초 자료가 됩니다.

분석 항목	마진 상태 (High Margin)	마진 상태 (Low Margin)	대응 조치 (Action Plan)
전기적 특성 (Electrical)	설계 규격 내 안정적 동작	규격 경계 근접, 불량 위험 높음	VDD 안정화 및 TSV 도금 두께 최적화 권장 [출처: pdfHBMHighBandwidt20260508001.pdf]
기계적 정렬 (Mechanical)	Die-to-Die 정렬 우수	Misalignment 발생 위험	Bonding 공정 압력 및 정렬 파라미터 재점검 [출처: 매뉴얼HBMAAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf]
구조적 변형 (Warpage)	열팽창 계수 관리 양호	심한 휨 발생, 접합 불량 우려	Thermal Profile 및 소재 특성 재분석 [출처: 매뉴얼HBMAAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf]

표 3.

4. 결론 및 실무 적용 시사점

검사 마진은 검사 장비의 성능을 결정짓는 **정밀도(Precision)**와 공정의 **수율(Yield)**을 연결하는 가교 역할을 합니다. 고정밀 광학 검사 시스템을 운용할 때, 단순히 'Pass/Fail' 결과에만 의존할 경우 공정이 불량 구간으로 진입하는 전조 현상을 포착할 수 없습니다.

따라서 크레셈(CRESSEM)의 검사 솔루션은 다음과 같은 통합적 마진 관리 전략을 지향해야 합니다:

- 실시간 마진 모니터링:** 측정값의 추이(Trend)를 분석하여 마진이 점진적으로 감소하는 경우, 선제적으로 공정 이상을 감지(Predictive Maintenance)합니다.
- 데이터 기반 Root Cause Analysis:** 마진 감소의 원인이 전기적 특성(TSV 저항 증가)인지, 물리적 특성(Warpage 증가)인지를 구분하여 고객사 공정 엔지니어에게 구체적인 조치 사항을 제공합니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

3. 차세대 공정 대응: Hybrid Bonding과 같이 마진 범위가 극도로 좁아지는 초미세 공정에서는, 기존의 단순 마진 산출을 넘어 통계적 공정 제어(SPC)와 결합된 고도화된 마진 분석 알고리즘이 필수적입니다.

검사 마진 산출 및 공정 피드백 루프



그림 2.

명암비 및 농도비(Contrast Ratio) 분석

반도체 패키징 및 미세 패턴 검사 공정에서 결함(Defect)을 검출하는 능력은 단순히 광학적 해상도(Resolution)에만 의존하지 않습니다. 아무리 높은 해상도를 가진 시스템이라 할지라도, 결함 부위와 주변 배경(Background) 간의 밝기 차이가 충분하지 않다면 알고리즘이 이를 정상적인 노이즈로 판단하거나 아예 인지하지 못하는 '미검(Under-kill)' 현상이 발생합니다. 따라서 결함의 시인성(Defect Visibility)을 정량적으로 평가하기 위해서는 명암비(Contrast Ratio) 및 농도비(Intensity Ratio)에 대한 엄밀한 정의와 분석이 필수적입니다.

1. 농도비(Intensity Ratio) 및 명암비(Contrast Ratio)의 정의

광학 검사 시스템에서 이미지의 품질을 결정하는 핵심 요소는 센서에 도달하는 광자(Photon)의 강도 차이입니다. 결함이 존재하는 영역의 휘도(Luminance)를 I_{defect} , 결함이 없는 배경 영역의 휘도를 $I_{background}$ 라고 할 때, 이들 사이의 상대적인 차이를 나타내는 지표를 다음과 같이 정의합니다.

[농도비(Intensity Ratio) 산출식]

$$\text{Intensity Ratio} = (I_{defect}) / (I_{background})$$

이 식은 결함 부위가 배경에 비해 몇 배나 밝은지(또는 어두운지)를 나타냅니다. 예를 들어, 반도체 웨이퍼 표면의 미세 스크래치(Scratch)나 파티클(Particle)을 검사할 때, 배경 대비 결함의 밝기가 높을수록(High Ratio) 비전 알고리즘이 결함의 경계면(Edge)을 추출하기 용이해집니다.

[명암비(Contrast Ratio) 산출식]

검사 시스템의 광학적 대비 성능을 나타내는 명암비는 두 신호의 차이를 그 합으로 나누어 정규화된 수치로 표현하며, 일반적으로 다음과 같은 식을 사용합니다.

$$\text{Contrast Ratio} = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min})$$

* (여기서 I_{max} 는 결함 영역의 최대 강도, I_{min} 은 배경 영역의 최소 강도를 의미함) *

이 수치는 0과 1 사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 결함과 배경의 구분이 명확함을 의미합니다. 반도체 검사 현장에서는 이 명암비가 특정 임계값(Threshold) 이상을 유지해야만 결함 검출의 신뢰성을 보장할 수 있습니다.

2. 결함 시인성(Defect Visibility)에 미치는 영향 분석

명암비는 검사 장비의 성능을 결정짓는 '시인성(Visibility)'과 직결됩니다. 특히 HBM(High Bandwidth Memory)과 같이 적층 구조가 복잡하고 미세한 Bump 또는 TSV(Through Silicon Via)를 검사해야 하는 환경에서는 미세한 농도 차이가 검사 성공 여부를 가릅니다.

구분	고명암비 (High Contrast)	저명암비 (Low Contrast)
결함 식별력	결함의 경계가 명확하여 Edge 검출 용이	결함과 배경이 모호하여 경계 추출 어려움
알고리즘 동작	Rule-based 및 AI 기반 분류 모두 안정적	노이즈와 결함을 구분하기 어려워 과검/미검 발생
검사 정밀도	미세 결함(Micro-defect) 검출 가능	해상도가 높더라도 결함 인지 불가
주요 원인	최적화된 조명(Lighting) 및 광학 설계	산란광(Stray Light) 과다 또는 조명 불균일

표 4.

검사 시스템 설계 시, 광학 엔진의 조명 제어 기술(Lighting Control)은 이 명암비를 극대화하는 데 초점을 맞추어야 합니다. 예를 들어, Coaxial Lighting(동축 조명)을 사용하여 평탄한 표면의 반사광을 제어하거나, 특정 파장의 광원을 사용하여 결함 부위의 흡수율 차이를 유도함으로써 Idefect와 Ibackground의 격차를 벌리는 전략이 사용됩니다.

3. 광학적 대비 성능 최적화 전략

높은 명암비를 확보하기 위해서는 단순히 밝은 조명을 사용하는 것이 아니라, 시스템 전체의 광학적 경로(Optical Path) 내에서 발생하는 노이즈를 최소화해야 합니다.

1. **조명 시스템 최적화:** 결함의 형태(Bump, Bridge, Missing 등)에 따라 최적의 조명 각도와 광원을 선정해야 합니다. 이는 결함 부위에서 산란되는 빛의 양을 조절하여 농도비를 높이는 핵심 과정입니다 [출처: 매뉴얼HBMAAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf].

2. **배경 노이즈 억제:** 센서 자체의 열 잡음이나 주변 환경의 산란광은 Imin 값을 상승시켜 결과적으로 Contrast Ratio를 저하시킵니다. 이를 방지하기 위해 고성능 필터(Bandpass Filter)를 사용하여 특정 파장만을 통과시켜야 합니다.

3. **AI 기반 대비 개선:** 최근에는 하드웨어적 한계를 극복하기 위해 Deep Learning 기반의 이미지 전처리 알고리즘을 적용합니다. 이는 저명암비 이미지에서도 결함의 특징점(Feature)을 강제로 강조하거나, 배경의 불균일한 조명을 보정(Flat-field Correction)하여 실질적인 시인성을 확보하는 기술입니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

결론적으로, 명암비와 농도비는 반도체 검사 장비의 '눈'이 얼마나 선명한지를 결정하는 절대적인 지표입니다. 해상도(Resolution)가 "얼마나 작은 것을 볼 수 있는가"를 결정한다면, 명암비(Contrast)는 "그 작은 것을 얼마나 확실히 구별할 수 있는가"를 결정합니다. 따라서 고정밀 HBM 및 FC-BGA 검사 솔루션을 구현하기 위해서는 고해상도 광학계와 더불어 최적의 명암비를 산출할 수 있는 조명 및 알고리즘의 통합적 설계가 반드시 수반되어야 합니다.

신호 대 잡음비(SNR) 및 신뢰성 평가

6.1 신호 대 잡음비(SNR)의 정의 및 물리적 배경

반도체 패키징 및 미세 패턴 검사 공정에서 광학 시스템의 성능을 결정짓는 가장 결정적인 지표 중 하나는 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)입니다. SNR은 검사 대상물(Target)에서 반사되어 돌아오는 유효한 신호(Signal)의 세기와, 시스템 내부 및 환경적 요인에 의해 발생하는 원치 않는 잡음(Noise)의 세기 사이의 비율을 의미합니다.

광학 검사 장비에서 신호(Signal)는 결함(Defect)이나 미세 패턴(Pattern)에 의해 발생하는 광량의 변화를 의미하며, 잡음(Noise)은 센서의 열 잡음(Thermal Noise), 판독 잡음(Readout Noise), 광자 잡음(Shot Noise) 등을 포함합니다. 고해상도 검사로 갈수록 신호의 세기는 미세해지며, 잡음 레벨(Noise Floor)과의 차이가 줄어들어 결함 검출이 어려워지는 경향이 있습니다. 따라서 높은 SNR을 확보하는 것은 검사 시스템의 검출 한계(Detection Limit)를 결정짓는 핵심 요소입니다.

6.2 SNR 산출 수식 및 구성 요소 분석

SNR은 일반적으로 신호의 평균 전력(또는 진폭)을 잡음의 표준편차(또는 RMS 값)로 나누어 산출하며, 데시벨(dB) 단위로 표현하는 것이 일반적입니다.

1) 기본 산출 수식

$$SNR = (P_{\text{signal}}) / (P_{\text{noise}}) \quad \text{또는} \quad SNR_{\text{dB}} = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{\text{signal}}}{A_{\text{noise}}} \right)$$

(여기서 A는 신호 및 잡음의 진폭을 의미함)

2) 이미지 센서 기반의 정량적 정의

이미지 센서(CMOS/CCD)를 사용하는 광학 검사 시스템에서는 각 픽셀에 도달하는 광자(Photon)의 수와 센서의 전자적 노이즈를 기반으로 다음과 같이 정의할 수 있습니다.

$$SNR = \frac{N_{\text{signal}}}{\sqrt{(\sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{read}}^2 + \sigma_{\text{dark}}^2)}}$$

각 구성 요소의 상세 분석은 다음과 같습니다:

구성 요소	기호	설명	영향 요인
신호 광자 수	N_{signal}	검사 대상의 특징(결함/패턴)에 의해 픽셀에 도달하는 유효 광자 수	조명 강도, 노출 시간(Exposure Time), 광학계 효율
광자 잡음	σ_{shot}	빛의 입자성으로 인해 발생하는 통계적 변동 ($\sqrt{N_{\text{signal}}}$)	광량의 제곱근에 비례
판독 잡음	σ_{read}	센서의 ADC(Analog-to-Digital Converter) 과정에서 발생하는 전기적 노이즈	센서 회로 설계, 클럭 속도
암전류 잡음	σ_{dark}	빛이 없는 상태에서도 열 에너지에 의해 발생하는 전자 흐름	센서 온도(°C), 노출 시간

표 5.

6.3 검출 한계(Detection Limit)와 Noise Floor의 상관관계

검사 시스템의 성능 평가 시, 잡음이 존재하는 환경에서 결함을 식별할 수 있는 최소한의 신호 강도를 'Noise Floor'라고 정의합니다. 검사 장비가 특정 결함을 'Pass' 또는 'Fail'로 정확히 판정하기 위해서는, 결함에 의한 신호 강도가 잡음 레벨보다 충분히 높아야 합니다.

만약 결함의 신호 강도가 잡음의 표준편차 범위 내에 존재한다면, 알고리즘은 이를 결함이 아닌 단순 노이즈(Random Noise)로 판단하여 미검(Under-kill)을 발생시킵니다. 반대로, 잡음의 변동폭이 매우 커서 정상적인 패턴을 결함으로 오인할 경우 과검(Over-kill)이 발생합니다.

따라서 고정밀 HBM(High Bandwidth Memory) 및 FC-BGA 검사를 수행하는 크레셈의 장비에서는 다음과 같은 전략이 요구됩니다:

- **고휘도 조명 제어:** Nsignal을 극대화하여 잡음의 상대적 비중을 낮춤.
- **냉각 시스템 및 온도 관리:** σ_{dark} 를 최소화하기 위해 센서의 동작 온도를 일정하게 유지.
- **고성능 센서 채택:** σ_{read} 가 극도로 낮은 저잡음(Low-noise) 센서를 사용하여 하드웨어적 SNR 기반 구축.

6.4 신뢰성 평가 및 데이터 분석 적용

실제 양산 라인에서의 신뢰성 평가는 단순한 수치 계산을 넘어, 통계적 공정 관리(SPC) 관점에서 접근해야 합니다. 검사 데이터의 산포(Variance)를 분석하여 SNR이 공정 변동에 얼마나 민감하게 반응하는지 확인하는 것이 필수적입니다.

특히, HBM과 같이 적층 구조가 복잡한 제품의 경우, TSV(Through Silicon Via)나 Bump의 미세한 결함은 매우 낮은 SNR을 가집니다. 이때는 단일 프레임의 SNR에 의존하기보다, 여러 프레임을 합성(Image Averaging)하여 잡음을 상쇄시키는 기법을 사용합니다. 이미지 평균화 시 SNR은 프레임 수(n)의 제곱근에 비례하여 개선됩니다.

$$\text{SNR}_{\text{total}} \approx \text{SNR}_{\text{single}} \times \sqrt{n}$$

이러한 수학적 근거를 바탕으로, 크레셈은 검사 알고리즘 설계 시 결함의 크기(Size), 대비(Contrast), 그리고 SNR을 통합적으로 고려하여 최적의 검출 임계값(Threshold)을 설정함으로써 검사 신뢰성을 확보하고 있습니다.

SNR 기반 이미지 품질 및 결함 검출 프로세스



그림 3.

결론/시사점

본 보고서에서 검토한 광학 해상도(Resolution), 화소 면적(Pixel Area), 검사 마진(Inspection Margin), 농도비(Contrast Ratio), 그리고 신호 대 잡음비(SNR)는 개별적인 물리량에 그치는 것이 아니라, 고정밀 반도체 검사 시스템의 성능을 결정짓는 상호 유기적인 핵심 지표(KPI, Key Performance Indicators)이다. HBM(High Bandwidth Memory) 및 FC-BGA와 같은 차세대 패키징 공정의 미세화가 가속화됨에 따라, 단일 지표의

개선만으로는 한계가 있으며, 각 지표를 통합적으로 운용하는 시스템 최적화(System Optimization) 전략이 필수적이다.

첫째, **검사 정확도(Inspection Accuracy)의 극대화**를 위해서는 해상도와 SNR의 균형 잡힌 설계가 선행되어야 한다. 레일리 한계(Rayleigh Criterion)를 극복하기 위해 파장(λ)을 줄이거나 개구수(NA)를 높이는 시도는 필연적으로 광량 감소를 초래하여 SNR을 저하시킬 수 있다. 따라서 고해상도 광학 엔진과 더불어, 이미지 센서의 화소 면적(Pixel Area)을 최적화하고 고성능 조명 시스템을 결합하여 노이즈를 억제함으로써, 미세 결함(Defect)과 정상 노이즈를 명확히 구분할 수 있는 고품질 이미지를 확보해야 한다.

둘째, **수율 향상(Yield Improvement)을 위한 공정 안정성 관리** 측면에서 검사 마진(Inspection Margin)의 정밀한 산출은 매우 중요하다. 단순히 Pass/Fail을 판정하는 것을 넘어, 설계 규격(Spec) 대비 측정값의 여유치(Margin)를 수치화함으로써 공정 변동성을 실시간으로 모니터링해야 한다. 이는 결함 발생 전 전조 현상을 파악하고, TSV(Through Silicon Via) 도금 두께나 Bump 정렬 상태의 미세한 변화를 선제적으로 관리할 수 있는 데이터 기반의 의사결정을 가능하게 한다.

셋째, **AI 기반 스마트 팩토리 구현을 위한 데이터 신뢰성 확보**이다. 최근 반도체 검사 트렌드는 단순 Rule-based 검사를 넘어 Deep Learning 기반의 결함 분류로 진화하고 있다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf]. AI 알고리즘이 과검(Over-kill)을 줄이고 결함 검출력을 높이기 위해서는 입력되는 이미지의 농도비(Contrast Ratio)와 SNR이 일정 수준 이상의 신뢰도를 유지해야 한다. 즉, 광학적 성능 지표의 안정적 관리는 곧 AI 비전 알고리즘의 성능과 직결되는 기초 체력이라 할 수 있다.

결론적으로, 크레셈(CRESSEM)의 차세대 검사 솔루션은 고해상도 광학 기술과 AI 알고리즘을 결합하여, 미세 패턴의 물리적 한계를 극복하고 고객사의 공정 수율을 극대화하는 방향으로 나아가야 한다. 각 광학 성능 지표를 통합적으로 제어하는 최적화된 검사 프로세스를 구축함으로써, HBM4 및 Hybrid Bonding 등 급변하는 차세대 패키징 시장에서 기술적 주도권을 확보할 수 있을 것으로 판단된다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].