

광학 검사 시스템 핵심 파라미터 및 수식 정의 기술 보고서

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 파라미터 및 수식 정의 기술 보고서	3
개요/배경	3
광학 해상도(Resolution) 산출 원리	3
이미지 센서 화소 면적(Pixel Area) 분석	5
검사 마진(Inspection Margin) 산출식	6
이미지 농도비(Contrast Ratio) 및 명암비 분석	8
신호 대 잡음비(SNR) 및 영상 품질 평가	10
결론 및 검사 시스템 설계 시사점	12

광학 검사 시스템 핵심 파라미터 및 수식 정의 기술 보고서

반도체 검사 장비의 광학 성능을 결정하는 5대 핵심 수식(해상도, 화소 면적, Margin, 농도비, SNR)을 정의하고, 각 수식의 물리적 의미와 검사 정밀도에 미치는 영향을 분석합니다.

개요/배경

반도체 산업의 패러다임이 전공정(Front-end)의 미세화를 넘어 후공정(Back-end)의 고도화, 즉 첨단 패키징(Advanced Packaging) 기술로 급격히 이동함에 따라, 검사 공정의 요구 정밀도 또한 기하급수적으로 높아지고 있습니다. 특히 HBM(High Bandwidth Memory)과 같이 수천 개의 TSV(Through Silicon Via)를 통해 수직으로 적층되는 구조나, FC-BGA(Flip Chip Ball Grid Array)와 같이 미세한 솔더 볼(Solder Ball) 및 회로 패턴을 포함하는 고밀도 기판 검사에서는 미세 결함(Defect)을 놓치지 않는 고해상도 및 고신뢰성 광학 검사 시스템의 확보가 수율(Yield) 관리의 핵심 요소로 부상하였습니다 [출처: 분석_크레셈 CRESSEM20260509001.pdf].

이러한 고난도 패키징 검사 환경에서는 단순히 육안이나 일반적인 영상 분석을 넘어, 물리적·광학적 한계를 정의하는 핵심 파라미터(Key Parameters)에 대한 정밀한 산출과 수식 기반의 정량적 평가가 필수적입니다. 검사 시스템의 광학 해상도(Optical Resolution)는 검출 가능한 최소 결함 크기를 결정하며, 이미지 센서의 화소 면적(Pixel Area)과 신호 대 잡음비(SNR, Signal-to-Noise Ratio)는 검사 데이터의 신뢰성과 결함 식별력을 보장하는 기초 지표가 됩니다. 또한, 공정의 안정성을 평가하기 위한 검사 마진(Inspection Margin) 및 결함과 배경을 구분하는 농도비(Contrast Ratio) 분석은 과검(Over-kill)을 방지하고 검사 정확도를 높이는 데 결정적인 역할을 합니다 [출처: 기업 분석 보고서 (주)크레셈 (CRESSEM): 차세대 반도체 패키징 검사 솔루션의 선두주자].

따라서 본 기술 보고서에서는 광학 검사 시스템 설계 및 운용의 핵심이 되는 5가지 주요 수식—해상도 산출식, 화소 면적식, Margin식, 농도비식, SNR식—을 정의하고, 각 파라미터가 반도체 검사 정밀도와 데이터 신뢰성에 미치는 물리적 의미를 심도 있게 분석하고자 합니다. 이를 통해 고해상도/고신뢰성 검사 장비 설계를 위한 공학적 가이드라인을 제시하는 데 그 목적이 있습니다.

광학 해상도(Resolution) 산출 원리

반도체 패키징 공정이 HBM(High Bandwidth Memory)과 같은 고단 적층 구조 및 FC-BGA(Flip Chip Ball Grid Array)의 미세 회로 패턴으로 진화함에 따라, 검사 장비가 물리적으로 구별할 수 있는 최소 크기인 광학 해상도(Optical Resolution)의 확보는 검사 정밀도를 결정짓는 가장 근본적인 요소입니다. 광학 시스템의 해상도는 단순히 카메라의 화소(Pixel) 수에 의해 결정되는 것이 아니라, 광원(Light Source)의 파장과 렌즈의 집광 능력인 개구수(Numerical Aperture, NA)에 의해 물리적 한계가 정의됩니다.

1. 레일리 한계(Rayleigh Criterion)와 해상도의 정의

광학계에서 두 개의 인접한 점광원(Point Source)을 관찰할 때, 각 광원에서 발생하는 회절 패턴인 에어리 원반(Airy Disk)이 서로 중첩되어 나타나게 됩니다. 이때 두 점을 별개의 물체로 인식할 수 있는 최소한의 거리를 정의하는 물리적 기준을 **레일리 한계(Rayleigh Criterion)**라고 합니다.

만약 두 점광원의 회절 패턴이 너무 많이 중첩되면, 검사 시스템은 이를 하나의 커다란 점으로 인식하게 되어 미세한 결함(Defect)을 놓치는 미검(Under-kill)의 원인이 됩니다. 반대로, 두 점의 중심이 한 점광원의 에어리 원반의 첫 번째 암부(First Minimum) 위치에 놓일 때, 인간의 눈이나 센서가 두 점을 분해할 수 있는 최적의 상태로 간주합니다.

2. 해상도 산출 수식 및 물리적 변수 분석

광학 해상도(R)를 산출하는 핵심 수식은 다음과 같습니다.

$$R = 0.61 \times \frac{\lambda}{NA}$$

이 수식은 해상도가 결정되는 두 가지 핵심 물리량인 파장(λ)과 개구수(NA) 사이의 반비례 관계를 명확히 보여줍니다.

(1) 파장 (λ , Wavelength)

파장은 광원의 빛이 가진 물리적 성질로, 수식에서 분자에 위치하므로 **파장이 짧을수록 해상도(R) 값은 작아집니다(즉, 더 미세한 분해능을 가집니다).**

- **반도체 검사 적용:** 가시광선 영역(약 400nm ~ 700nm)을 사용하는 일반 광학 검사보다, 파장이 더 짧은 UV(자외선) 영역의 광원을 사용할 경우 이론적으로 훨씬 높은 해상도를 얻을 수 있습니다. 이는 HBM의 TSV(Through Silicon Via)나 미세 Bump 검사 시 미세 간극을 정밀하게 측정하기 위한 핵심 전략입니다.

(2) 개구수 (NA, Numerical Aperture)

개구수는 렌즈가 빛을 모으는 능력을 나타내는 무차원 수로, 수식의 분모에 위치하여 **NA가 클수록 해상도(R)는 개선됩니다.** NA는 다음과 같이 정의됩니다.

$$NA = n \times \sin(\theta)$$

- **n (굴절률, Refractive Index):** 빛이 통과하는 매질의 굴절률입니다. 공기 중($n \approx 1$)에서 검사할 때보다 굴절률이 높은 액체(Immersion)를 매질로 사용할 경우 NA를 높여 해상도를 극대화할 수 있습니다.
- **θ (반각, Half-angle):** 렌즈로 들어오는 빛의 최대 입사각을 의미합니다. 렌즈의 크기가 크거나 설계가 정밀하여 더 넓은 각도의 빛을 수용할 수 있을수록 NA가 커집니다.

3. 검사 장비 설계 시의 트레이드오프(Trade-off) 관계

실제 크레셈(CRESSEM)의 고정밀 검사 시스템을 설계할 때는 단순히 R 값을 낮추는 것(해상도 향상) 외에도 다음과 같은 공학적 상충 관계를 반드시 고려해야 합니다.

변수 변화	해상도(R) 영향	심도(Depth of Field, DOF) 영향	비고
파장(λ) 감소	개선 (작아짐)	증가 (깊어짐)	UV 광원 사용 시 유리하나 광원 비용 상승
개구수(NA) 증가	개선 (작아짐)	감소 (얕아짐)	고해상도 구현 시 초점 심도가 매우 얕아짐

표 1.

초점 심도(Depth of Field, DOF)의 제약:

해상도를 높이기 위해 NA를 키우면, 초점이 정확히 맞는 수직 범위인 DOF가 급격히 감소합니다. HBM과 같이 적층 높이가 있거나 표면 거칠기(Roughness)가 존재하는 시료를 검사할 때, NA가 너무 높으면 시료의 미세한 높이 변화에도 초점이 흐려져 이미지 품질이 저하될 수 있습니다. 따라서 고해상도 광학 엔진 설계 시에는 '해상도-심도-조명 강도' 사이의 최적의 균형점(Optimization Point)을 찾는 것이 기술적 핵심입니다.

4. 결론: 고정밀 검사를 위한 광학적 시사점

결론적으로, 차세대 반도체 패키징 검사 장비의 성능은 레일리 한계 수식을 극복하기 위한 기술력에 달려 있습니다. 미세한 Bump나 TSV의 연결성을 확보하기 위해서는 1) 단파장 광원의 안정적인 공급, 2) 고NA 렌즈 설계, 3) 얇아진 DOF를 보완할 수 있는 정밀 스테이지 및 자동 초점(Auto-focus) 기술이 통합적으로 구현되어야 합니다. 이는 단순한 광학 성능을 넘어, 장비의 전체적인 수율(Yield) 향상과 직결되는 핵심 파라미터입니다.

광학 해상도 결정 메커니즘 및 설계 흐름

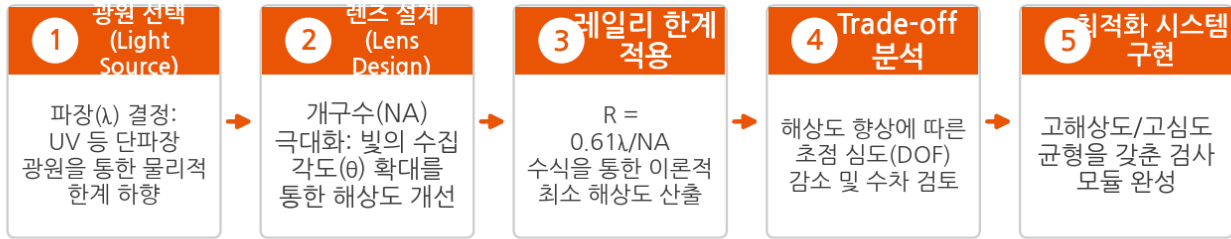


그림 1.

이미지 센서 화소 면적(Pixel Area) 분석

반도체 패키징 검사, 특히 HBM(High Bandwidth Memory)의 TSV(Through Silicon Via)나 FC-BGA의 Micro Bump를 검사하는 공정에서는 광학계가 결정하는 물리적 해상도(Optical Resolution)만큼이나, 이를 디지털 신호로 변환하는 이미지 센서(Image Sensor)의 화소 특성이 결정적인 역할을 합니다. 본 섹션에서는 검사 해상도와 화소 크기 간의 상관관계를 분석하고, 샘플링(Sampling) 이론에 근거한 화소 면적 산출 및 그 물리적 의미를 정의합니다.

1. 화소 크기(Pixel Size)와 샘플링(Sampling)의 관계

광학 시스템을 통해 집광된 빛은 이미지 센서의 각 화소(Pixel)에 도달하여 전기적 신호로 변환됩니다. 이때 화소의 물리적 크기인 화소 크기(Pixel Size)는 디지털 이미지의 공간 해상도를 결정하는 핵심 요소입니다. 광학계가 아무리 미세한 결함을 구분할 수 있는 해상도(Resolution)를 갖추었다하더라도, 이미지 센서의 화소 크기가 너무 크다면 광학적 정보를 충분히 담아내지 못하는 언더샘플링(Undersampling) 현상이 발생하게 됩니다.

반도체 검사 장비의 고정밀 검사를 위해서는 나이퀴스트 샘플링 이론(Nyquist Sampling Theorem)을 준수해야 합니다. 즉, 검출하고자 하는 대상의 공간 주파수(Spatial Frequency)보다 최소 2배 이상의 샘플링 밀도를 확보해야 결함의 형상을 왜곡 없이 재현할 수 있습니다. 만약 화소 크기가 광학 해상도에 비해 과도하게 클 경우, 인접한 두 결함이 하나의 화소에 뭉쳐 보이는 에일리어싱(Aliasing) 현상이 발생하여 검사 신뢰도가 급격히 저하됩니다.

2. 화소 면적(Pixel Area) 산출식 정의

이미지 센서의 성능을 정량화할 때, 개별 화소가 차지하는 물리적 면적은 광학적 수광 능력(Light Gathering Capacity) 및 신호 대 잡음비(SNR)와 직결됩니다. 화소 면적은 화소의 가로(Width)와 세로(Height) 길이를 곱하여 산출하며, 일반적으로 다음과 같이 정의합니다.

[화소 면적 산출식]

$$A_{pixel} = P_w \times P_h$$

여기서 각 변수의 의미는 다음과 같습니다.

- A_{pixel} : 화소 면적 (Pixel Area, 단위: μm^2)

- Pw: 화소의 가로 길이 (Pixel Width, 단위: μm)
- Ph: 화소의 세로 길이 (Pixel Height, 단위: μm)

대부분의 최신 CMOS 이미지 센서(CIS)는 정방형(Square) 화소를 채택하고 있으므로, $Pw = Ph = p$ 로 가정할 경우 식은 다음과 같이 단순화됩니다.

$$A_{pixel} = p^2$$

검사 장비 설계 시, 화소 면적이 커질수록 단위 면적당 수광량이 증가하여 저조도 환경이나 고속 스캔(High-speed Scanning) 시 유리하지만, 반대로 화소 크기가 커지면 공간 해상도가 낮아지는 트레이드오프(Trade-off) 관계가 존재합니다. 따라서 HBM의 미세 Bump 검사와 같은 고해상도 공정에서는 μm 단위 이하의 미세 화소(Small Pixel) 기술이 필수적입니다.

3. 검사 해상도와 화소 크기의 상관관계 분석

광학계의 이론적 해상도(R)와 이미지 센서의 화소 크기(p) 사이에는 밀접한 상관관계가 존재합니다. 검사 시스템이 설계된 성능을 온전히 발휘하기 위해서는 이미지 센서의 화소 크기가 광학 해상도보다 충분히 작아야 합니다.

구분	물리적 특성	검사 시스템에 미치는 영향
광학 해상도 중심 설계	$R < p$ (Undersampling)	광학계는 미세 결함을 볼 수 있으나, 센서가 이를 표현하지 못해 결함이 소실됨.
센서 화소 중심 설계	$R \gg p$ (Oversampling)	결함의 형상이 매우 정밀하게 표현되나, 데이터량이 급증하고 Tact Time이 증가함.
최적 설계 (Optimal)	$R \approx (p)/(2)$ (Nyquist)	해상도와 검사 속도 간의 균형을 맞춘 최적의 샘플링 상태.

표 2.

HBM 검사 시 발생하는 미세한 Misalignment(정렬 오류)나 Bridge(단락) 결함을 검출하기 위해서는, 광학적 해상도 R을 달성함과 동시에 화소 면적(Apixel)을 최소화하여 샘플링 밀도를 높여야 합니다. 이는 결과적으로 검사 마진(Inspection Margin)을 확보하고, 결함의 위치 정밀도(Positioning Accuracy)를 향상시키는 결과로 이어집니다.

결론적으로, 고정밀 반도체 검사 장비의 설계 단계에서는 단순히 높은 배율의 렌즈를 사용하는 것에 그치지 않고, 목표로 하는 결함 크기에 맞추어 [광학 해상도 → 샘플링 이론 → 화소 크기 → 화소 면적]으로 이어지는 수치적 정합성을 반드시 검토해야 합니다.

검사 마진(Inspection Margin) 산출식

반도체 검사 공정에서 **검사 마진(Inspection Margin)**은 제품이 설계 규격(Specification, 이하 Spec) 내에 존재하면서도, 공정 변동(Process Variation)이나 측정 오차(Measurement Error)로부터 얼마나 자유로운지를 나타내는 핵심적인 엔지니어링 지표입니다. 특히 HBM(High Bandwidth Memory)과 같이 수천 개의 TSV(Through Silicon Via)와 미세 Bump가 적층되는 고밀도 패키징 구조에서는, 단순한 Pass/Fail 판정을 넘어 측정값이 Spec 경계면에 얼마나 근접해 있는지를 수치화하여 공정의 안정성을 선제적으로 관리하는 것이

필수적입니다.

1. 검사 마진의 정의 및 목적

검사 마진은 설계자가 설정한 허용 오차(Tolerance) 범위 내에서 실제 측정된 값(Measured Value)이 차지하는 위치를 정량화한 것입니다. 이는 크게 두 가지 관점에서 활용됩니다.

- **공정 능력 평가(Process Capability Assessment):** 측정값이 Spec의 중심(Nominal Value)에서 멀어져 경계값(Limit)으로 이동하고 있다면, 이는 공정 드리프트(Process Drift)가 발생하고 있음을 의미하며, 잠재적인 불량 발생 가능성을 경고하는 신호로 사용됩니다 [출처: pdfHBMHighBandwidt20260508001.pdf].
- **측정 신뢰성 확보(Measurement Reliability):** 검사 장비 자체의 정밀도(Precision)와 반복성(Repeatability)을 고려했을 때, 현재의 마진이 측정 불확도(Uncertainty)를 포함하고도 안전한 수준인지를 판단합니다.

2. 마진 산출 수식의 유형

검사 대상 파라미터가 상한값(Upper Specification Limit, USL)을 갖는지, 혹은 하한값(Lower Specification Limit, LSL)을 갖는지에 따라 산출 방식이 달라집니다.

2.1. 단방향 마진 (Single-sided Margin)

특정 파라미터가 한쪽 방향의 한계치만을 기준으로 관리될 때 사용합니다. 예를 들어, TSV 저항(Resistance)이나 Supply Voltage(VDD)의 최대 허용치를 관리할 때 적용됩니다.

- **상한 규격 기준 (Upper Limit Case):** 측정값이 규격보다 작아야 하는 경우 (예: TSV Resistance < [Value])

$$\text{Margin} = \text{Spec}_{\text{upper}} - \text{MeasuredValue}$$

- **하한 규격 기준 (Lower Limit Case):** 측정값이 규격보다 커야 하는 경우 (예: Min. Eye Height > X mV)

$$\text{Margin} = \text{MeasuredValue} - \text{Spec}_{\text{lower}}$$

2.2. 양방향 마진 (Double-sided Margin)

공급 전압(VDD)과 같이 중심값(Nominal)을 기준으로 상하한 오차 범위(±)가 설정된 경우에 사용됩니다. 이 경우 마진은 상한과 하한 중 더 좁은 쪽(Worst-case)을 기준으로 산출하여 보수적으로 관리합니다.

$$\text{Margin}_{\text{total}} = \min(|\text{Spec}_{\text{upper}} - \text{MeasuredValue}|, |\text{Spec}_{\text{lower}} - \text{MeasuredValue}|)$$

3. 마진의 백분율 환산 및 공정 안정성 지표

엔지니어링 리포트에서는 절대적인 수치(Unit value)뿐만 아니라, Spec 대비 여유치를 비율(%)로 표기하여 공정의 변동성을 직관적으로 비교합니다. 이는 서로 다른 단위(V, Ω, mV 등)를 가진 파라미터 간의 공정 안정성을 통합적으로 비교할 때 매우 유용합니다 [출처: pdfHBMHighBandwidt20260508001.pdf].

구분	산출식 (Formula)	의미 및 활용
상대적 마진 (%)	$(\text{Margin}) / (\text{Spec Range}) \times 100$	전체 허용 오차 범위 중 현재 확보된 여유 비중
Spec 대비 편차 (%)	$(\text{Measured Value} - \text{Nominal}) / (\text{Nominal}) \times 100$	설계 중심값으로부터의 이탈 정도

표 3.

$$\text{Margin} = \text{Spec}_{\text{upper}} - \text{Spec}_{\text{lower}}$$

4. 검사 결과 분석 사례 (Case Study)

HBM 검사 결과 보고서의 데이터를 바탕으로 마진을 산출하는 실제 프로세스는 다음과 같습니다.

Test Parameter	Specification (Spec)	Measured Value	Margin (Absolute)	Margin (%)	Status
Supply Voltage (VDD)	1.1V ± 5%	1.102V	+0.002V	+0.18%	Pass
TSV Resistance	< 100Ω	85Ω	15Ω	15%	Pass

표 4.

[출처: pdfHBMHighBandwidt20260508001.pdf]

위 표에서 VDD의 경우, Spec 범위가 1.045V ~ 1.155V라고 가정할 때, 측정값 1.102V는 중심값에서 매우 안정적인 위치에 있으며, Spec 경계까지의 여유(Margin)가 +0.18% 수준으로 매우 높음을 알 수 있습니다. 만약 마진이 0%에 근접한다면, 이는 설비의 전압 제어 능력(Voltage Regulation)이나 웨이퍼의 전기적 특성이 Spec 경계에 도달했음을 의미하므로 즉각적인 공정 점검이 필요합니다.

5. 결론: 마진 관리를 통한 수율(Yield) 최적화

검사 마진은 단순한 결과값이 아니라, 수율 예측 모델(Yield Prediction Model)의 핵심 입력 데이터입니다. 마진이 지속적으로 감소하는 추세(Trend)를 보이는 파라미터를 조기에 발견함으로써, 실제 불량(Defect)이 발생하기 전(Before Failure)에 공정 조건을 최적화하거나 설비를 보정(Calibration)할 수 있습니다. 따라서 고정밀 검사 시스템 설계 시에는 측정값의 불확도를 최소화하여, 실제 공정의 마진을 왜곡 없이 정확하게 산출할 수 있는 고해상도/고신뢰성 광학 및 전기적 측정 환경 구축이 선행되어야 합니다.

이미지 농도비(Contrast Ratio) 및 명암비 분석

반도체 패키징 검사, 특히 HBM(High Bandwidth Memory)의 TSV(Through-Silicon Via)나 FC-BGA의 Micro Bump를 검사할 때, 결함(Defect)을 물리적으로 발견하는 것만큼 중요한 것은 발견된 결함을 배경(Background)으로부터 얼마나 명확하게 분리하여 인식할 수 있느냐 하는 '식별력(Discriminability)'의 문제입니다. 이미지 농도비(Contrast Ratio)는 광학계가 포착한 이미지 내에서 인접한 두 영역, 즉 검사 대상인 결함부와 그 배경부 간의 밝기 차이를 수치화한 지표입니다. 이 값이 충분히 확보되지 않으면, 아무리 해상도(Resolution)가 높은 광학 시스템이라 할지라도 결함과 배경을 구분하지 못하는 '미검(Under-kill)' 현상이 발생하게 됩니다.

1. 농도비(Contrast)의 물리적 정의와 중요성

광학 검사 시스템에서 농도비는 단순히 밝기의 차이를 의미하는 것이 아니라, 신호(Signal)와 배경(Background) 사이의 변별력을 결정하는 핵심 파라미터입니다. 반도체 표면의 미세한 스크래치, Missing Bump, 또는 Solder Bridge와 같은 결함은 주변의 정상적인 패턴과 매우 유사한 반사율(Reflectance)을 가질 수 있습니다. 이때 조명 시스템(Lighting System)과 광학 렌즈의 성능이 결함부와 배경부 사이의 광도(Luminance) 차이를 극대화해야만 머신비전 알고리즘이 이를 유효한 결함으로 판정할 수 있습니다.

특히 HBM과 같이 적층 구조가 복잡한 제품의 경우, 다층 구조에서 발생하는 산란광(Scattered Light)이 배경의 밝기를 불균일하게 만들어 농도비를 저하시키는 주요 원인이 됩니다. 따라서 고정밀 검사를 위해서는 단순한 밝기 측정을 넘어, 다음과 같은 정량적 산출식을 통해 시스템의 식별 성능을 관리해야 합니다.

2. 농도비(Contrast Ratio) 산출식 및 유형

검사 목적과 알고리즘의 특성에 따라 농도비를 산출하는 방식은 다양하게 정의될 수 있습니다. 본 보고서에서는 실무에서 가장 널리 사용되는 세 가지 핵심 산출식을 정의합니다.

2.1. Michelson Contrast (미켈슨 농도비)

가장 고전적이고 직관적인 방식으로, 이미지 내에서 가장 밝은 부분(I_{max})과 가장 어두운 부분(I_{min})의 차이를 이용합니다. 광학계의 동적 범위(Dynamic Range)를 평가할 때 주로 사용됩니다.

$$Contrast = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

- **I_{max}** : 결함 또는 패턴의 최대 휘도 (Peak Intensity)
- **I_{min}** : 배경 또는 결함 내부의 최소 휘도 (Minimum Intensity)

2.2. Weber Contrast (웨버 농도비)

배경의 밝기가 일정한 환경에서, 배경 대비 신호의 상대적인 변화량을 측정할 때 사용됩니다. 이는 신호 대 배경비(Signal-to-Background Ratio)와 밀접한 관련이 있으며, 미세한 결함이 배경에 묻히지 않고 드러나는지를 평가하는 데 적합합니다.

$$Contrast_{Weber} = \frac{I_{signal} - I_{background}}{I_{background}}$$

- **I_{signal}** : 결함 부위의 측정 휘도
- **$I_{background}$** : 배경 영역의 평균 휘도

2.3. RMS Contrast (Root Mean Square Contrast)

실제 반도체 웨이퍼나 기판 표면은 완벽하게 균일한 밝기를 가질 수 없습니다. 따라서 국부적인 밝기 변동(Texture)이 존재하는데, RMS Contrast는 이미지의 통계적 변동성을 고려하여 결함의 식별력을 더욱 정밀하게 계산합니다.

$$Contrast_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(i, j) - \bar{I})^2}$$

- **$I(i, j)$** : (i, j) 위치의 픽셀 밝기 값
- **$\bar{I}$** : 해당 영역의 평균 밝기
- **M, N** : 분석 영역의 가로, 세로 픽셀 수

3. 결함 식별력 향상을 위한 분석 비교

검사 환경 및 결함의 특성에 따라 최적의 농도비 산출 방식과 관리 지표는 달라집니다. 아래 표는 주요 검사 시나리오별 농도비 적용 가이드를 정리한 것입니다.

분석 유형	주요 타겟 결함	권장 산출식	핵심 관리 요소
-------	----------	--------	----------

고대비 검사	Missing Bump, Solder Bridge	Michelson Contrast	조명 밝기(Intensity) 및 노출 시간(Exposure Time)
미세 결함 검사	Micro Scratch, Surface Defect	Weber Contrast	배경 노이즈(Background Noise) 및 광학적 산란 제어
패턴/텍스처 검사	Warping, Pattern Misalignment	RMS Contrast	이미지 센서의 화소(Pixel) 균일도 및 렌즈 왜곡

표 5.

4. 검사 신뢰성 확보를 위한 시사점

농도비의 확보는 단순히 '밝은 곳과 어두운 곳을 구분하는 것'을 넘어, 검사 장비의 **과검(Over-kill)** 방지와 **미검(Under-kill)** 방지라는 두 마리 토끼를 잡기 위한 필수 조건입니다.

1. **Signal-to-Background 최적화**: 결함의 신호 강도가 배경의 변동성(Noise)보다 압도적으로 높아야 합니다. 만약 배경의 불균일성으로 인해 Weber Contrast가 낮아진다면, 이는 조명 제어(Lighting Control)나 셰이딩 보정(Shading Correction) 알고리즘을 통해 해결해야 합니다.

2. **조명 시스템과의 상관관계**: 농도비는 광학계의 해상도와 더불어 조명 각도(Angle of Illumination)에 극도로 민감합니다. 예를 들어, Bump의 측면 결함을 검출하기 위해서는 Coaxial(동축) 조명보다는 Low-angle(저각) 조명을 사용하여 결함부에서 산란되는 빛의 농도비를 극대화하는 전략이 필요합니다.

3. **데이터 기반의 공정 관리**: 검사 결과 리포트에서 단순 Pass/Fail을 넘어, 검출된 결함의 농도비 데이터를 추적함으로써 공정 상의 변화(예: Solder 도포량 변화에 따른 반사율 변화)를 역추적(Root Cause Analysis)하는 지표로 활용할 수 있습니다. [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf]

신호 대 잡음비(SNR) 및 영상 품질 평가

반도체 후공정의 고도화, 특히 HBM(High Bandwidth Memory)과 같이 미세한 Bump 및 TSV(Through Silicon Via)를 검사해야 하는 환경에서는 광학 시스템이 획득한 이미지 데이터의 '순도'가 검사의 합격/불합격(Pass/Fail)을 결정짓는 핵심 요소가 됩니다. 아무리 높은 광학 해상도(Resolution)를 확보하더라도, 영상 내에 존재하는 노이즈(Noise) 수준이 높다면 미세 결함(Defect)을 유효한 신호로 인식하지 못하고 배경 노이즈와 혼동하는 과검(Over-kill) 또는 미검(Under-kill) 문제가 발생하게 됩니다. 따라서 검사 시스템 설계 및 운영 단계에서 신호 대 잡음비(SNR, Signal-to-Noise Ratio)를 정량적으로 산출하고 관리하는 것은 검사 데이터의 신뢰성을 보장하기 위한 필수적인 과정입니다.

1. 신호 대 잡음비(SNR)의 정의 및 수학적 모델

신호 대 잡음비(SNR)는 검사 대상으로부터 반사되어 이미지 센서(Image Sensor)에 도달한 유효 신호(Signal)의 강도와, 시스템 내의 다양한 요인으로 인해 발생하는 불필요한 잡음(Noise)의 강도 간의 비율을 의미합니다. 반도체 검사 장비의 영상 처리 관점에서 SNR은 다음과 같은 수식으로 정의됩니다.

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} = \frac{\mu_{signal}}{\sigma_{noise}}$$

여기서 P_{signal} 은 신호의 평균 전력(또는 평균 밝기 값)을, P_{noise} 는 노이즈의 평균 전력(또는 노이즈의 표준편차)을 의미합니다. 일반적으로 이미지 센서의 픽셀 단위에서 측정할 경우, 신호의 평균 밝기(μ)를 노이즈의 표준편차(σ)로 나눈 값으로 표현하며, 단위는 데시벨(dB)을 사용하여 다음과 같이 로그 스케일로 나타내기도

합니다.

$$SNR_{dB} = 10\log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right) \approx 20\log_{10} \left(\frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right)$$

(A는 진폭을 의미함)

고해상도 검사 장비에서 높은 SNR을 유지한다는 것은, 결함(Defect)에 의한 미세한 광학적 변화가 배경(Background)의 불규칙한 변동성보다 압도적으로 크다는 것을 의미하며, 이는 곧 결함 검출 한계(Detection Limit)를 낮추는 결정적인 요인이 됩니다.

2. 영상 품질을 저해하는 주요 노이즈(Noise) 유형 분석

반도체 검사 환경에서 SNR을 저하시키는 노이즈는 크게 광학적 요인과 전자적 요인으로 구분할 수 있습니다.

- **샷 노이즈(Shot Noise):** 빛의 입자성(Photon)에 기인하는 근본적인 노이즈입니다. 광자가 센서에 도달하는 과정이 통계적인 포아송 분포(Poisson Distribution)를 따르기 때문에 발생하며, 신호의 세기(N)에 대해 $\sqrt{N}$ 에 비례하는 특성을 가집니다. 즉, 광량이 부족한 저조도 환경에서 상대적인 SNR이 급격히 하락하는 원인이 됩니다.
- **읽기 노이즈(Readout Noise):** 이미지 센서의 ADC(Analog-to-Digital Converter) 과정에서 발생하는 전자적 노이즈입니다. 센서의 회로 설계 및 신호 증폭(Amplification) 단계에서 유입되며, 이는 광량과 관계없이 일정 수준 존재하는 Floor Noise 역할을 합니다.
- **다크 커런트 노이즈(Dark Current Noise):** 센서가 빛을 받지 않는 상태에서도 열 에너지에 의해 전자가 생성되어 발생하는 노이즈입니다. 검사 장비의 동작 온도(°C)가 상승할수록 이 노이즈는 지수 함수적으로 증가하므로, 고온 환경에서의 열 관리(Thermal Management)가 SNR 유지에 매우 중요합니다 [출처: pdfHBMHighBandwidt20260508002.pdf].
- **양자 효율(Quantum Efficiency, QE) 및 센서 특성:** 센서가 입사된 광자를 전자로 변환하는 효율이 낮을수록 유효 신호(Psignal) 자체가 작아져 SNR이 저하됩니다.

3. 검사 신뢰성 향상을 위한 SNR 최적화 전략

검사 장비의 설계 엔지니어는 다음과 같은 파라미터 조절을 통해 목표로 하는 SNR을 확보해야 합니다.

최적화 요소	상세 내용	SNR에 미치는 영향
조명 강도 (Illumination Intensity)	광원의 밝기를 높여 입사 광자 수(N)를 증가시킴	$\sqrt{N}$ 비례하여 신호 강도 증가 및 상대적 노이즈 감소
노출 시간 (Exposure Time)	셔터 스피드를 조절하여 센서에 빛이 머무는 시간 증대	신호의 총량을 늘려 샷 노이즈의 영향을 상대적으로 상쇄
게인 제어 (Gain Control)	증폭기를 통해 신호를 전기적으로 증폭	신호와 노이즈를 동시에 증폭시키므로, 과도한 게인은 SNR을 악화시킴
냉각 시스템 (Cooling System)	센서 온도를 일정하게 유지하여 열 잡음 억제	다크 커런트(Dark Current) 감소를 통한 노이즈 Floor 하락

표 6.

특히, HBM과 같은 고단 적층 구조의 검사에서는 미세한 Bump 사이의 간격이나 TSV의 연결 상태를 확인해야 하므로, 매우 높은 SNR이 요구됩니다. 만약 SNR이 낮아 영상의 대비(Contrast)가 무너질 경우, 앞서 정의한 농도비(Contrast Ratio)가 낮아지게 되어 결함과 배경을 구분할 수 없는 물리적 한계에 봉착하게 됩니다. [출처:

분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf]

4. 결론: SNR 기반의 품질 지표 관리

결론적으로, 검사 시스템의 성능 평가는 단순한 해상도(Resolution)를 넘어, 그 해상도 내에서 얼마나 깨끗한 신호를 추출할 수 있는가인 SNR에 의해 완성됩니다. 검사 공정의 수율(Yield)을 높이기 위해서는 검사 데이터의 통계적 유의성을 확보해야 하며, 이를 위해 실시간으로 획득되는 영상의 SNR을 모니터링하여 장비의 광학계 오염(Lens Contamination)이나 조명 노후화(LED Degradation)를 역추적하는 알고리즘을 도입하는 것이 바람직합니다. 이는 크레셈이 추구하는 AI 기반 스마트 팩토리의 핵심인 '데이터 기반 불량 원인 역추적(Root Cause Analysis)'을 가능케 하는 기술적 토대가 됩니다. [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf]

SNR 기반 영상 품질 평가 프로세스

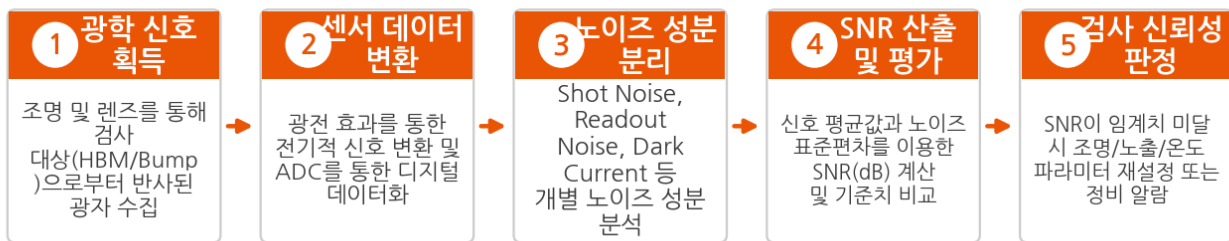


그림 2.

결론 및 검사 시스템 설계 시사점

본 보고서에서 다룬 광학 해상도(R), 화소 면적, 검사 마진(Margin), 농도비(Contrast Ratio), 그리고 신호 대 잡음비(SNR)의 수식 체계는 차세대 반도체 검사 장비의 성능을 결정짓는 핵심 물리량들이다. HBM(High Bandwidth Memory) 및 FC-BGA와 같이 패키징 기술이 고도화됨에 따라, 검사 시스템은 단순히 결함을 발견하는 수준을 넘어 공정의 수율(Yield)을 직접적으로 제어할 수 있는 정밀도를 확보해야 한다.

각 파라미터의 수식적 관계를 바탕으로 도출한 검사 시스템 설계의 핵심 방향은 다음과 같다.

첫째, **광학적 해상도와 센서 성능의 최적화(Optimization)**이다. 레일리 한계(Rayleigh Criterion)에 따라 해상도를 높이기 위해서는 파장(λ)을 줄이거나 개구수(NA)를 높여야 하지만, 이는 광량 감소와 심도(DOF) 저하를 야기한다. 따라서 고해상도 광학 엔진 설계 시, 수치해석적 모델을 통해 해상도(R)와 화소 면적 간의 균형을 맞추어 미세 결함(Defect)을 놓치지 않으면서도 데이터의 재현성을 확보하는 설계가 필수적이다.

둘째, **검사 신뢰성 및 마진(Margin) 확보를 통한 수율(Yield) 관리**이다. 측정된 데이터가 설계 규격(Spec) 내에 있더라도, 검사 마진이 극히 낮은 경우 공정 변동에 따라 불량(False Fail)이 발생할 가능성이 크다. 따라서 검사 시스템은 단순한 Pass/Fail 판정을 넘어, Spec 대비 Margin을 수치화하여 공정의 안정성을 실시간으로 피드백할 수 있는 데이터 분석 솔루션을 제공해야 한다. 이는 고객사의 공정 불량 원인을 역추적(Root Cause Analysis)하여 수율을 향상시키는 핵심 요소가 된다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

셋째, **영상 품질(Inspection Quality)의 극대화**이다. 고속 검사 환경에서 농도비(Contrast Ratio)와 SNR을 동시에 확보하는 것은 매우 난도가 높은 과제이다. 결함과 배경 간의 명암 차이를 극대화하는 조명 제어 기술과, 노이즈를 억제하여 유효 신호를 증폭시키는 AI 기반 비전 알고리즘의 결합은 검사의 과검(Over-kill)률을 낮추고 검사 속도(Tact Time)를 높이는 결정적인 역할을 한다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

결론적으로, 미래의 검사 장비는 개별 수식의 물리적 한계를 극복하기 위해 '**고정밀 광학 하드웨어**'와 '**AI 기반 지능형 소프트웨어**'가 통합된 형태의 솔루션으로 진화해야 한다. 특히 HBM4와 같이 Hybrid Bonding 기술이 도입되는 차세대 공정에서는 초미세 간극 측정이 가능하도록 위 수식들을 기반으로 한 극한의 최적화 설계가 요구된다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].