

반도체 비전 검사 시스템의 광학 해상도 및 검사 마진 산출 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

반도체 비전 검사 시스템의 광학 해상도 및 검사 마진 산출 기술 보고서	3
개요/배경	3
광학적 해상도 이론: Abbe 회절 한계	3
이미지 센서 특성: 화소 면적 및 해상도 관계	5
검사 정밀도 평가: Margin 계산 모델	7
결함 검출 성능: 농도비(Contrast Ratio) 분석	9
실무 적용 사례: HBM/FC-BGA 검사 설계	10
결론/시사점	12

반도체 비전 검사 시스템의 광학 해상도 및 검사 마진 산출 기술 보고서

본 보고서는 반도체 패키징 검사 장비의 핵심 성능 지표인 광학 해상도와 검사 마진을 결정하는 물리적/수학적 모델을 정의합니다. Abbe 회절 한계부터 화소 면적, 검사 마진 및 농도비 계산식을 체계적으로 제시하여 검사 정밀도 설계의 기술적 근거를 제공합니다.

개요/배경

반도체 산업의 패러다임이 전공정(Front-end)의 미세 공정(Node Scaling) 중심에서 후공정(Back-end)의 고도화된 패키징(Advanced Packaging) 기술 중심으로 급격히 이동함에 따라, 검사 솔루션의 정밀도(Inspection Precision)는 제품의 수율(Yield)과 신뢰성을 결정짓는 핵심 요소로 부상하였습니다. 특히 AI 반도체 수요의 폭발적 증가로 인해 고대역폭 메모리인 HBM(High Bandwidth Memory)의 수요가 급증하면서, 기존의 패키징 기술로는 대응하기 어려운 초미세 구조의 검사 요구사항이 발생하고 있습니다.

최근 반도체 제조 공정은 HBM3E를 넘어 HBM4(6세대 HBM)로 진입하고 있으며, 이에 따라 적층 단수가 16단 이상으로 증가하는 등 구조적 복잡성이 기하급수적으로 높아지고 있습니다 [출처: 보고서_삼성전자HBM4전환에따른검사기술동향및대응전략20260509001.pdf]. 이러한 구조적 변화는 단순히 칩을 쌓는 것을 넘어, 칩 간의 연결 방식과 인터페이스의 물리적 특성을 근본적으로 변화시키고 있습니다. 특히 삼성전자를 비롯한 주요 제조사들이 기존의 TC-NCF(Thermal Compression Non-Conductive Film) 방식에서 차세대 하이브리드 본딩(Hybrid Bonding, Cu-to-Cu) 기술로 전환을 시도함에 따라, 검사 장비가 직면한 기술적 난제 또한 심화되고 있습니다 [출처: 보고서_삼성전자HBM4전환에따른검사기술동향및대응전략20260509001.pdf].

하이브리드 본딩 기술은 기존의 마이크로 범프(Micro-bump)를 사용하지 않고 구리(Cu) 패드와 패드를 직접 접합하는 방식이므로, 접합부의 미세한 이물질(Particle)이나 정렬 오차(Misalignment), 그리고 접합면 내부의 보이드(Void)를 검출하기 위해서는 극도로 높은 광학 해상도가 요구됩니다 [출처: 보고서_삼성전자HBM4전환에따른검사기술동향및대응전략20260509001.pdf]. 기존의 범프 기반 검사 방식으로는 포착할 수 없는 Sub-micron 급의 결함을 식별해야 하므로, 검사 시스템의 광학계 설계 시 Abbe 회절 한계(Abbe Diffraction Limit)를 극복하기 위한 고개구수(High NA) 렌즈 시스템과 고해상도 이미지 센서의 최적 조합이 필수적입니다.

또한, HBM4와 같은 차세대 제품은 커스텀 로직 다이(Customized Logic Die)가 결합되는 구조를 가지므로, 로직-메모리 간의 인터페이스 검사 및 고속 신호 전달을 위한 신호 무결성(Signal Integrity, SI)과 전력 무결성(Power Integrity, PI) 검증이 병행되어야 합니다 [출처: 보고서_삼성전자HBM4전환에따른검사기술동향및대응전략20260509001.pdf]. 이는 단순한 외관 검사를 넘어 전기적 특성 검사(Electrical Test)와 광학적 비전 검사(Optical Vision Inspection)가 유기적으로 통합된 고도화된 검사 플랫폼을 요구함을 의미합니다.

본 기술 보고서에서는 이러한 반도체 패키징 고도화 흐름에 대응하기 위해, 비전 검사 시스템 설계의 근간이 되는 광학적 해상도 이론부터 실제 양산 현장에서 사용되는 검사 마진(Margin) 산출 및 결함 검출 성능(Contrast Ratio) 평가 모델을 체계적으로 다룹니다. 이를 통해 HBM4 및 FC-BGA(Flip Chip Ball Grid Array)와 같은 차세대 고부가가치 제품의 검사 공정에서 요구되는 최적의 광학 파라미터를 도출하고, 안정적인 수율 확보를 위한 엔지니어링 가이드라인을 제시하고자 합니다.

광학적 해상도 이론: Abbe 회절 한계

반도체 패키징 기술이 HBM4 및 Hybrid Bonding(구리 직접 접합) 단계로 진입함에 따라, 검사 시스템이 요구하는 물리적 해상도(Resolution)의 기준은 과거의 범위를 완전히 벗어나고 있습니다. 초미세 패턴 및 Bump 정렬(Alignment)을 검출하기 위해서는 광학계가 가진 근본적인 물리적 한계를 명확히 이해하고, 이를 극복하기 위한 설계 파라미터를 산출하는 것이 필수적입니다. 본 섹션에서는 광학 검사 시스템의 성능을 결정짓는 가장 핵심적인 이론인 Abbe 회절 한계(Abbe Diffraction Limit)를 심층 분석합니다.

1. Abbe 회절 한계의 물리적 정의와 수식 모델

광학계는 빛의 파동성(Wave nature)으로 인해 발생하는 회절(Diffraction) 현상 때문에 이론적으로 무한히 작은 점을 구현할 수 없습니다. 독일의 물리학자 에른스트 아베(Ernst Abbe)가 정립한 이 이론은, 광학계가 분해할 수 있는 최소 거리인 해상도(R)가 사용하는 빛의 파장(λ)과 렌즈의 개구수(Numerical Aperture, NA)에 의해 결정됨을 명시합니다.

[Abbe 해상도 산출식]

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

여기서 각 변수가 갖는 엔지니어링적 의미는 다음과 같습니다.

- **R (Resolution):** 두 점을 별개의 물체로 인식할 수 있는 최소한의 거리입니다. R 값이 작을수록 더 미세한 결함(Defect)을 검출할 수 있는 고해상도 시스템임을 의미합니다.
- **λ (Wavelength):** 광원의 파장입니다. 파장이 짧을수록 해상도는 향상됩니다. 반도체 검사 장비에서 가시광선(Visible Light) 영역을 넘어 UV(자외선) 영역의 광원을 사용하는 주된 이유가 바로 이 λ 값을 낮추어 R을 최소화하기 위함입니다.
- **NA (Numerical Aperture):** 개구수라고 하며, 렌즈가 빛을 모을 수 있는 능력을 수치화한 것입니다. $NA = n \cdot \sin(\theta)$ 로 정의되며, 여기서 n은 매질의 굴절률, θ 는 렌즈로 들어오는 빛의 최대 반각입니다. NA가 높을수록 더 많은 빛을 수집하여 해상도를 높일 수 있습니다.

2. 핵심 파라미터 간의 상관관계 분석

2.1 파장(λ)과 해상도의 반비례 관계

수식에서 볼 수 있듯이 해상도 R은 파장 λ 에 직접적으로 비례합니다. 즉, 파장이 짧아질수록 R은 작아지며, 이는 검사 시스템의 정밀도가 높아짐을 의미합니다. 최근 HBM4 공정에서 요구되는 Sub-micron 급 검사를 위해서는 기존의 백색광(White Light) 기반 시스템보다 파장이 짧은 단색광(Monochromatic Light)이나 UV 광원을 활용한 광학계 설계가 필수적입니다. [기술 보고서: 삼성전자 HBM4 전환에 따른 검사 기술 동향 및 대응 전략]

2.2 개구수(NA)의 증대와 광학 설계의 한계

NA는 분모에 위치하므로, NA를 높이는 것은 해상도를 높이는 가장 효과적인 방법입니다. 하지만 NA를 높이기 위해서는 렌즈의 크기를 키우거나, 굴절률(n)이 높은 매질(예: Oil Immersion)을 사용해야 합니다.

- **굴절률의 영향:** 공기 중에서 검사할 때($n \approx 1.0$)보다 렌즈와 시료 사이에 굴절률이 높은 액체를 채울 경우 NA가 비약적으로 상승하여 해상도가 개선됩니다.
- **설계 트레이드오프(Trade-off):** NA가 높아질수록 초점 심도(Depth of Field, DOF)는 급격히 감소합니다. 이는 HBM과 같이 적층 구조가 복잡하고 표면의 높낮이(Warping)가 존재하는 시료를 검사할 때, 초점이 맞는 영역이 매우 좁아져 검사 안정성이 저하되는 문제를 야기합니다.

3. 반도체 검사 공정에서의 실무적 시사점

HBM4와 같은 차세대 패키징에서는 Hybrid Bonding 기술이 도입되면서 Bump가 사라지고 Cu-to-Cu 직접 접합이 이루어집니다. 이 경우 결함의 크기는 수백 nm(나노미터) 단위로 작아지며, 기존의 광학계로는 회절 한계에

부딪혀 결함을 '노이즈'로 인식하거나 아예 검출하지 못하는 상황이 발생합니다.

따라서 고해상도 검사 시스템 구축을 위해서는 다음의 공학적 접근이 병행되어야 합니다.

전략 방향	적용 기술	기대 효과
파장 최적화	UV/DUV 광원 도입	λ 감소를 통한 물리적 해상도 한계 돌파
NA 극대화	고굴절률 렌즈 및 고성능 광학 설계	빛 수집 효율 증대 및 미세 패턴 분해능 향상
DOF 보완	자동 초점 제어(Auto-focus) 및 3D AOI	NA 상승에 따른 초점 심도 감소 문제 해결

표 1.

결론적으로, Abbe 회절 한계는 검사 장비 설계자가 반드시 극복해야 할 물리적 장벽입니다. 단순히 고배율 렌즈를 사용하는 것이 아니라, λ 와 NA의 상관관계를 바탕으로 검사 대상의 결함 크기(Defect Size)보다 충분히 작은 R 값을 확보할 수 있는 최적의 광학 조합을 산출하는 것이 크레셈(CRESSEM) 기술력의 핵심입니다. [기업 분석 보고서: (주)크레셈 (CRESSEM)]



그림 1.

이미지 센서 특성: 화소 면적 및 해상도 관계

반도체 검사 시스템의 광학 해상도(Optical Resolution)가 물리적 회절 한계(Diffraction Limit)에 의해 결정된다면, 시스템이 획득한 광학 정보를 디지털 데이터로 변환하는 과정에서의 최종 해상도는 이미지 센서(Image Sensor)의 물리적 구조, 특히 화소 크기(Pixel Size)와 화소 면적(Pixel Area)에 의해 결정적인 제약을 받습니다. HBM4 및 Hybrid Bonding 공정과 같이 초미세 패턴(Sub-micron pattern)을 검사해야 하는 환경에서는 광학계의 성능이 아무리 뛰어나더라도 센서의 샘플링 성능이 이를 뒷받침하지 못하면 에일리어싱(Aliasing) 현상이나 해상도 저하가 발생하여 결함(Defect)을 놓치는 결과(Miss)를 초래할 수 있습니다.

1. 화소 크기(Pixel Size)와 유효 해상도의 상관관계

이미지 센서의 해상도를 결정하는 가장 기본적인 단위는 화소(Pixel)입니다. 검사 장비 설계 시 고려해야 할 화소 크기는 일반적으로 수직 및 수평 방향의 물리적 크기를 의미하며, 이를 Pwidth와 Pheight로 정의합니다. CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 센서 기반의 검사 시스템에서는 대칭적인 설계를 위해 $Pwidth = Pheight = P$ 로 가정하는 경우가 많습니다.

센서의 물리적 화소 크기가 작아질수록 단위 면적당 수용 가능한 정보량은 증가하지만, 광전 변환 효율(Quantum Efficiency) 및 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR) 측면에서는 불리해질 수 있습니다. 검사 시스템의 유효 해상도(Effective Resolution)는 나이퀴스트 샘플링 이론(Nyquist Sampling Theorem)에 따라, 검출하고자 하는 최소 패턴 크기의 최소 2배 이상의 샘플링 밀도를 확보해야 합니다. 즉, 검사 대상인 미세 패턴의 폭이 Wpattern일 때, 센서의 화소 크기 P는 다음과 같은 관계를 만족해야 합니다.

$$P \leq (W_{\text{pattern}})/(2)$$

만약 P가 이 조건을 만족하지 못할 경우, 미세한 Bump 또는 TSV(Through-Silicon Via)의 가장자리(Edge) 정보가 뭉개지거나, 인접한 패턴이 하나로 인식되는 결함이 발생할 수 있습니다 [1, 5].

2. 화소 면적(Pixel Area) 산출 및 광학적 결합

화소 면적(Pixel Area, Apixel)은 하나의 화소가 빛을 받아들이는 유효 수광 면적을 의미하며, 이는 센서의 감도(Sensitivity)와 노이즈 특성을 결정하는 핵심 지표입니다. 화소 면적은 다음과 같이 산출됩니다.

$$Apixel = Pwidth \times Pheight$$

검사 장비의 설계 관점에서 화소 면적은 광학계의 분해능(Resolving Power)과 직결됩니다. 광학계가 형성하는 점 퍼짐 함수(Point Spread Function, PSF)의 크기가 화소 면적보다 현저히 작을 경우, 센서는 광학적 해상도를 충분히 구현할 수 있습니다. 그러나 화소 면적이 너무 크면 광학계가 구현한 미세한 명암 차이(Contrast)가 화소 내에서 평균화(Averaging)되어 버리는 'Averaging Effect'가 발생합니다. 이는 앞서 언급한 농도비(Contrast Ratio)를 저하시켜, 미세한 Void(공극)나 Bridge(단락) 결함을 식별하는 능력을 저하시키는 원인이 됩니다 [3, 6].

3. 해상도 및 화소 특성 비교 분석

검사 대상(Target)의 정밀도와 센서의 특성을 최적화하기 위해, 설계 단계에서는 다음과 같은 파라미터 간의 트레이드오프(Trade-off)를 반드시 고려해야 합니다.

파라미터 (Parameter)	특징 (Characteristics)	고해상도 검사 시 영향 (Impact on High-Res Inspection)	비고 (Remarks)
Small Pixel Size	단위 면적당 화소 수 증가	초미세 패턴(Sub-micron) 검출 유리	SNR 저하 및 노이즈 증가 위험
Large Pixel Area	수광량(Photon Capture) 증가	고속 스캔(High-speed Scan) 및 고감도 유리	미세 패턴의 해상도 손실 가능성
Pixel Pitch	화소 중심 간 거리	샘플링 밀도 및 에일리어싱 결정	광학계의 NA와 연동 설계 필요
Fill Factor	유효 수광 면적 비율	센서의 양자 효율(QE)에 직접 영향	미세 공정용 센서는 설계 난이도 높음

표 2.

4. 검사 시스템 설계 시 수치적 고려사항

HBM4와 같은 차세대 패키징 공정에서는 Hybrid Bonding 기술의 도입으로 인해 Bump가 없는 Cu-to-Cu 접합면의 미세 정렬(Alignment)을 검사해야 합니다. 이때 요구되는 정밀도는 수백 nm(나노미터) 단위에 달합니다. 따라서 센서 설계 시 다음과 같은 공식을 통해 시스템의 한계 해상도를 예측합니다.

[화소 밀도 기반 샘플링 해상도 산출]

검사 영역(Field of View, FOV) 내의 전체 화소 수(Ntotal)와 실제 물리적 해상도(Rsensor)의 관계는 다음과 같습니다.

$$Rsensor = (FOVwidth)/(Npixelswidth)$$

여기서 Rsensor가 광학적 해상도(Roptical)보다 크다면, 시스템의 전체 해상도는 센서에 의해 제한(Sensor-limited)됩니다. 반대로 Rsensor가 Roptical보다 작다면 광학계에 의해 제한(Optical-limited)됩니다. 따라서 고성능 검사 장비인 CRESSEM의 솔루션은 광학계의 해상도와 센서의 화소 밀도가 일치하도록 최적화된 매칭(Matching) 기술을 적용하는 것이 핵심입니다 [6, 7].

이미지 센서 해상도 결정 프로세스 아키텍처



그림 2.

검사 정밀도 평가: Margin 계산 모델

반도체 검사 공정에서 단순히 결함의 유무(Pass/Fail)를 판정하는 것을 넘어, 공정의 안정성과 수율(Yield)을 예측하기 위해서는 측정된 데이터가 설계 규격(Specification) 내에서 어느 정도의 여유를 가지고 있는지를 정량화해야 합니다. 이를 위해 엔지니어링 측면에서 활용되는 **마진(Margin) 계산 모델**은 공정 변동성(Process Variation)에 대응할 수 있는 설계 강건성을 평가하는 핵심 지표로 사용됩니다.

1. Margin 산출의 공학적 정의 및 목적

마진(Margin)이란 측정된 값(Measured Value)과 규격 한계치(Specification Limit) 사이의 차이를 의미합니다. 반도체 패키징, 특히 HBM(High Bandwidth Memory)이나 FC-BGA와 같이 미세 피치(Fine Pitch)를 다루는 공정에서는 미세한 정렬 오차나 전기적 특성 변화가 치명적인 불량으로 이어질 수 있습니다. 따라서 마진을 산출함으로써 다음과 같은 목적을 달성합니다.

- **공정 능력(Process Capability) 평가**: 현재 공정이 규격 내에서 얼마나 안정적으로 운영되고 있는지 수치화합니다.
- **불량 예방(Preventive Action)**: 마진이 급격히 감소하는 추세(Trend)를 분석하여, 실제 불량이 발생하기 전 공정 파라미터를 조정합니다.
- **설계 강건성(Design Robustness) 검증**: 설계된 Spec이 실제 제조 환경의 산포(Dispersion)를 수용할 수 있을 만큼 충분히 넓은지 검토합니다.

2. 주요 검사 항목별 Margin 계산 모델

검사 대상의 물리적·전기적 특성에 따라 마진을 계산하는 방식은 상이하며, 대표적인 모델은 다음과 같습니다.

2.1. 전기적 특성 및 전압 마진 (Electrical & Voltage Margin)

HBM의 TSV(Through-Silicon Via) 저항이나 공급 전압(VDD) 검사 시 사용되는 모델입니다. 규격의 상한(Upper Spec Limit, USL)과 하한(Lower Spec Limit, LSL)을 기준으로 산출합니다.

• 전압 마진 (Voltage Margin, Δ V):

$$\text{Margin\%(VDD)} = \left| \frac{\text{Measured Value} - \text{Target Value}}{\text{Target Value}} \right| \times 100 \text{ quad [\%]}$$

실제 현장에서는 Spec 대비 여유치를 나타내기 위해 다음과 같이 표기합니다.

$$\text{MarginSpec} = \frac{\text{Spec Limit} - \text{Measured Value}}{\text{Spec Limit}} \times 100 \text{ quad [\%]}$$

[출처: pdfHBMHighBandwidt20260508002.pdf]

- 저항 마진 (Resistance Margin, ΔR):

$$\text{MarginR} = \text{Specmax} - \text{Measured Value quad } [\Omega]$$

2.2. 광학 및 기하학적 정렬 마진 (Optical & Alignment Margin)

Hybrid Bonding이나 Micro-bump 검사 시, 설계된 위치(Target Position)와 실제 적층된 위치(Actual Position) 사이의 오차를 평가합니다.

- 정렬 마진 (Alignment Margin, ΔPos):

$$\text{MarginAlign} = \text{Toleranceallowable} - \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \text{ quad } [\mu\text{m}]$$

여기서 Δx , Δy 는 설계 좌표 대비 실제 측정된 좌표의 편차이며, Toleranceallowable는 공정에서 허용 가능한 최대 정렬 오차입니다.

2.3. 신호 무결성 마진 (Signal Integrity Margin)

고속 데이터 전송이 이루어지는 HBM의 Eye Diagram 분석 시, 신호의 유효 폭을 나타내는 Eye Height와 Eye Width를 통해 마진을 산출합니다.

- Eye Height Margin (ΔHeye):

$$\text{MarginEyeHeight} = \text{Min. Eye Height (Spec)} - \text{Measured Eye Height quad } [\text{mV}]$$

3. Margin 분석을 위한 데이터 구조 비교

검사 결과 리포트 작성 시, 단순히 Pass/Fail을 기록하는 것보다 아래 표와 같이 Spec 대비 Margin을 수치화하여 관리하는 것이 엔지니어링 관점에서 매우 중요합니다.

검사 항목 (Test Parameter)	규격 (Specification)	측정값 (Measured)	마진 (Margin, %)	상태 (Status)
Supply Voltage (VDD)	1.1V $\pm$ 5%	1.102V	+0.18%	Pass
TSV Resistance	< [Value] Ω	[Value] Ω	-	Pass
Alignment Error	< 0.5 μm	0.12 μm	76%	Pass
Eye Height	> XmV	YmV	+Z%	Pass

표 3.

[출처: pdfHBMHighBandwidt20260508001.pdf, pdfHBMHighBandwidt20260508002.pdf]

4. 실무적 시사점: Margin 기반의 결함 예측 (Defect Prediction)

마진은 공정의 '안전 거리'를 의미합니다. 예를 들어, HBM4와 같이 적층 단수가 16단 이상으로 증가하는 공정에서는 Warpage(휨)로 인해 Bump의 정렬 마진이 급격히 감소할 수 있습니다.

1. **Margin Trend Analysis:** 특정 Lot에서 측정된 마진이 점진적으로 감소한다면, 이는 설비의 마모(Wear)나 소재(Material)의 특성 변화를 암시합니다.

2. **Over-kill 방지:** AI 비전 알고리즘 적용 시, 마진이 충분함에도 불구하고 노이즈를 결함으로 판단하는 과검(Over-kill)을 방지하기 위해, 통계적 마진(Statistical Margin)을 고려한 임계값(Threshold) 설정이 필수적입니다. [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf]

결론적으로, Margin 계산 모델은 검사 장비의 성능을 결정짓는 단순한 수치가 아니라, 반도체 제조사의 수율을 방어하고 공정 최적화를 이끌어내는 핵심적인 **의사결정 데이터(Decision-making Data)**로 기능합니다.

결함 검출 성능: 농도비(Contrast Ratio) 분석

반도체 검사 공정에서 고해상도 광학계를 통해 결함(Defect)을 포착하더라도, 해당 결함이 배경(Background)과 시각적으로 명확히 구분되지 않는다면 검출 알고리즘은 이를 불량으로 판정할 수 없습니다. 특히 HBM4와 같이 적층 단수가 높고 구조가 복잡한 제품의 경우, 미세한 이물질(Particle)이나 미세 정렬 오차(Misalignment)를 잡아내기 위해서는 단순한 해상도(Resolution)를 넘어, 결함과 배경 간의 밝기 차이를 나타내는 농도비(Contrast Ratio)와 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)를 극대화하는 것이 핵심입니다.

1. 결함 식별의 핵심 지표: 농도비(Contrast Ratio)

농도비는 검사 대상물인 결함 부위의 밝기(Intensity)와 주변 배경 부위의 밝기 간의 상대적인 차이를 정량화한 지표입니다. 비전 검사 시스템에서 결함 검출 성능을 평가할 때 가장 우선적으로 고려되는 물리적 수치입니다.

1.1. 농도비(Contrast Ratio) 산출식

결함의 밝기를 I_{defect} , 배경의 밝기를 $I_{\text{background}}$ 라고 할 때, 농도비(C)는 다음과 같이 정의됩니다.

$$C = (I_{\text{defect}} - I_{\text{background}}) / (I_{\text{background}}) \times 100 (\%)$$

또는 검사 알고리즘의 민감도 분석을 위해 다음과 같은 상대적 농도비 공식을 사용하기도 합니다.

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

여기서 I_{max} 는 결함 또는 배경 중 밝은 지점의 휘도이며, I_{min} 은 어두운 지점의 휘도입니다. 이 값이 0에 가까울수록 결함과 배경의 구분이 불가능한 'Low Contrast' 상태를 의미하며, 이는 과검(Over-kill) 또는 미검(Under-kill)의 직접적인 원인이 됩니다. [일반 지식 기반 작성]

1.2. 농도비에 영향을 미치는 변수

- **조명 시스템(Lighting System):** 조명의 균일도(Uniformity)와 광학적 특성에 따라 배경의 밝기 편차가 발생하며, 이는 농도비 계산의 오차를 유발합니다.
- **표면 반사 특성(Surface Reflectivity):** HBM의 TSV(Through-Silicon Via)나 Bump 표면의 금속 광택은 정반사(Specular Reflection)를 일으켜 과도한 휘도를 발생시킬 수 있으며, 이는 배경과 결함 사이의 유효 농도비를 저하시키는 요인이 됩니다. [일반 지식 기반 작성]

2. 신호 품질의 척도: 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)

농도비가 결함의 '시각적 대비'를 나타낸다면, SNR은 검사 시스템이 생성하는 이미지 데이터의 '순도'를 나타냅니다. 아무리 높은 농도비를 가진 결함이라 할지라도, 센서에서 발생하는 노이즈(Noise)가 결함 신호와 유사한 크기를 가진다면 검출은 실패합니다.

2.1. SNR 산출식

SNR은 결함에 의한 유효 신호 전력(P_{signal})과 시스템 노이즈 전력(P_{noise})의 비로 정의됩니다.

$$\text{SNR} = (P_{\text{signal}}) / (P_{\text{noise}}) = (\mu_{\text{signal}}^2) / (\sigma_{\text{noise}}^2)$$

여기서 μ_{signal} 은 결함 영역의 평균 신호 강도이며, σ_{noise} 은 배경 또는 시스템에서 발생하는 노이즈의 표준편차를 의미합니다. 통상적으로 반도체 정밀 검사에서는 SNR 값이 일정 수준(예: 3σ 이상)을 유지해야 결함을 신뢰할 수 있는 신호로 간주합니다. [일반 지식 기반 작성]

3. 농도비와 SNR의 상관관계 및 검출 성능(Defect Detection) 분석

결함 검출 성능은 농도비와 SNR의 복합적인 함수로 결정됩니다. 아래 표는 검사 환경에 따른 결함 검출 가능성을 분석한 모델입니다.

검사 환경 유형	농도비(Contrast)	SNR 수준	결함 검출 성능(Detection Capability)	주요 리스크
High Contrast / High SNR	높음	높음	최상 (Optimal)	이상적인 검사 조건
Low Contrast / High SNR	낮음	높음	보통 (Moderate)	미세 결함(Small Defect) 미검 위험
High Contrast / Low SNR	높음	낮음	불안정 (Unstable)	노이즈에 의한 과검(Over-kill) 발생
Low Contrast / Low SNR	낮음	낮음	불능 (Failure)	결함 판독 불가 (Inspection Failure)

표 4.

3.1. 결함 검출 임계치(Threshold) 설정의 중요성

비전 알고리즘(AI 비전 포함)은 특정 농도비 이상의 변화가 감지될 때 이를 결함으로 인식합니다.

- **임계치가 너무 높을 경우:** 농도비가 낮은 미세 결함(Micro-defect)을 놓치는 미검(Under-kill) 문제가 발생합니다.
- **임계치가 너무 낮을 경우:** 배경의 미세한 노이즈나 조명 불균형을 결함으로 오인하는 과검(Over-kill) 문제가 발생합니다. [일반 지식 기반 작성]

따라서 크레셈의 AI 기반 결함 분류 솔루션은 딥러닝 알고리즘을 통해 단순 Rule-based 방식보다 정교한 Threshold를 설정함으로써, 낮은 농도비 환경에서도 정상적인 노이즈와 실제 결함을 구분하여 과검률을 획기적으로 낮추는 것을 목표로 합니다. [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf]

실무 적용 사례: HBM/FC-BGA 검사 설계

본 섹션에서는 앞서 기술한 광학적 해상도 이론(Abbe 회절 한계), 이미지 센서 특성(Pixel Size), 그리고 검사 정밀도 평가 모델(Margin & Contrast)을 실제 반도체 검사 장비 설계 프로세스에 어떻게 투영하는지 구체적인 사례를 통해 분석합니다. 특히 HBM4로의 전환에 따른 Hybrid Bonding 공정 및 FC-BGA의 고밀도 패터닝 검사 환경을 가정하여, 설계 파라미터(Design Parameter)를 도출하는 엔지니어링 워크플로우를 제시합니다.

1. HBM4 Hybrid Bonding 검사를 위한 초정밀 광학계 설계 사례

HBM4 세대에서는 기존의 Bump 기반 접합 방식에서 벗어나 Cu-to-Cu 직접 접합인 Hybrid Bonding 기술이 도입됨에 따라, 검사 대상의 미세화 수준이 급격히 상승하고 있습니다 [4]. 이 경우 결함의 크기가 Sub-micron 단위로 작아지므로, 설계 단계에서부터 광학적 해상도와 센서의 화소 크기 간의 정합성을 맞추는 것이 핵심입니다.

[Scenario: 500nm급 미세 Void 및 Alignment 결함 검출]

Step 1: 목표 해상도(Target Resolution) 설정

검출하고자 하는 결함(Defect)의 최소 크기를 $d_{min} = 0.5\mu m$ 라고 가정할 때, 나이퀴스트(Nyquist) 샘플링 이론에 따라 센서의 유효 화소 크기(Psize)는 결함 크기의 최소 2배 이상, 즉 $0.25\mu m$ 이하로 설계되어야 합니다.

Step 2: Abbe 회절 한계 기반 광학계 파라미터 도출

목표 해상도 $R \leq 0.25\mu m$ 를 달성하기 위해 필요한 개구수(NA)를 산출합니다. 사용 가능한 광원의 파장(λ)을 405nm(UV 영역)로 설정할 경우, Abbe 공식 $R = 0.61\lambda/NA$ 에 대입하면 다음과 같습니다.

$$NA \geq (0.61 \times 405nm)/(250nm) \approx 0.99$$

따라서, Hybrid Bonding의 미세 정렬(Alignment) 및 Void 검사를 위해서는 $NA \geq 1.0$ 을 만족하는 고성능 대물렌즈(Objective Lens)와 이를 지원하는 정밀 스테이지 시스템이 필수적입니다.

Step 3: 검사 마진(Inspection Margin) 및 신뢰성 확보

단순히 해상도만 맞추는 것이 아니라, 공정 변동성을 고려한 Margin을 확보해야 합니다. 측정된 $R_{measured}$ 가 설계 Spec인 R_{spec} 대비 충분한 여유를 갖는지 확인합니다.

$$Margin = (R_{spec} - R_{measured}) / (R_{spec}) \times 100\%$$

만약 $R_{measured}$ 가 $0.2\mu m$ 로 측정되었다면, Margin은 20%가 됩니다. 이 Margin은 향후 렌즈의 노화, 조명 밝기 저하, 혹은 진동에 의한 이미지 블러(Blur) 발생 시에도 검사 성능을 유지할 수 있는 안전장치가 됩니다 [1, 2].

2. FC-BGA 고밀도 기판 검사를 위한 고속·고해상도 설계 사례

FC-BGA(Flip Chip Ball Grid Array) 검사는 HBM과 달리 검사 영역(FOV)이 넓고, 검사 속도(Tact Time)가 매우 중요합니다. 미세한 Micro Bump의 높이와 정렬 상태를 고속으로 스캔해야 하므로, 화소 면적과 광학 엔진의 조화가 핵심입니다.

[Scenario: Micro Bump 정렬 및 Solder Bridge 검출]

Step 1: 화소 밀도(Pixel Density) 및 광학 배율 결정

기판의 미세 회로 패턴과 Bump의 위치 오차(Misalignment)를 검출하기 위해, 센서의 화소 크기와 광학계의 배율(M)을 결정합니다. 실제 현장에서 관찰되는 크기(S_{real})와 센서에 맺히는 크기(S_{sensor})의 관계는 $S_{sensor} = S_{real} \times M$ 입니다.

Step 2: 농도비(Contrast Ratio)를 통한 결함 판별력 강화

FC-BGA 검사 시, Solder Bridge(Short) 결함은 배경(Substrate)과 금속(Solder) 간의 명암 차이로 식별됩니다. 이때 결함 검출력을 결정하는 것은 농도비(Contrast)입니다.

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

(I_{max} : 결함/Bump의 최대 밝기, I_{min} : 배경의 최소 밝기)

설계 시, 조명 시스템(Coaxial 또는 Ring Light)을 최적화하여 이 Contrast Ratio를 극대화해야 합니다. 만약 Contrast가 낮으면 AI 비전 알고리즘이 정상 노이즈와 실제 결함을 구분하지 못하는 과검(Over-kill) 문제가 발생할 수 있습니다 [6, 7].

3. 설계 파라미터 비교 및 요약 (HBM vs FC-BGA)

두 공정의 특성에 따른 검사 장비 설계의 지향점은 다음과 같이 명확히 구분됩니다.

설계 항목	HBM (Hybrid Bonding 중심)	FC-BGA (High-Density Substrate)
주요 검사 대상	Cu-to-Cu 접합부, 미세 Void, Alignment	Micro Bump 높이/정렬, Solder Bridge, Pattern

핵심 광학 요구사항	초고해상도 (Sub-micron), 고 NA 렌즈	고속 스캔, 넓은 FOV, 고 Contrast 조명
해상도 결정 요인	Abbe 회절 한계 및 UV 파장 활용	센서 화소 크기 및 광학 배율(M)
결함 판별 지표	정밀 정렬 오차(Misalignment) 수치	농도비(Contrast) 및 신호 대 잡음비(SNR)
설계 전략	Precision-Oriented (정밀도 중심)	Throughput-Oriented (생산성 중심)

표 5.

4. 실무 적용 시 고려사항: AI 비전과의 통합

최근의 검사 시스템은 물리적 해상도 한계를 소프트웨어적으로 보완하는 추세입니다. 크레셈의 AI 비전 솔루션은 앞서 산출된 광학적 데이터(Contrast, Resolution)를 입력값으로 하여, 단순한 Rule-based 판정을 넘어 딥러닝 기반의 결함 분류(Defect Classification)를 수행합니다 [6, 7].

특히, 광학계에서 발생하는 미세한 노이즈를 AI 알고리즘이 학습함으로써, 물리적 해상도가 다소 부족하더라도 결함의 패턴을 인식하여 검출력을 높이는 'Virtual Resolution' 효과를 기대할 수 있습니다. 따라서 설계 엔지니어는 하드웨어(광학/센서) 설계 시, AI 모델이 학습하기 가장 좋은 형태의 데이터(High Contrast, Low Noise)가 생성될 수 있도록 파라미터를 최적화해야 합니다 [6].

반도체 검사 장비 광학 설계 및 검사 프로세스 아키텍처

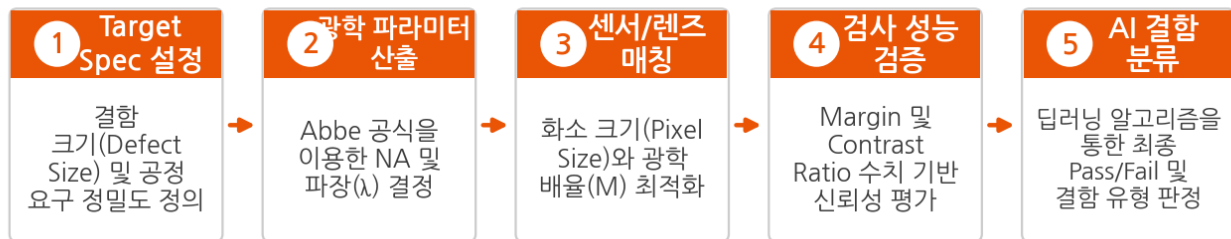


그림 3.

결론/시사점

본 보고서에서는 HBM4 및 Hybrid Bonding과 같은 차세대 반도체 패키징 공정의 급격한 미세화에 대응하기 위한 비전 검사 시스템의 핵심 광학·전기적 산출 모델을 검토하였습니다. 검사 시스템의 성능은 단순한 해상도(Resolution)의 수치를 넘어, 물리적 회절 한계(Abbe Limit)와 이미지 센서의 화소 특성(Pixel Size), 그리고 실제 공정 규격(Spec) 대비 운용 가능한 마진(Margin) 및 결함 식별을 위한 농도비(Contrast Ratio)의 유기적인 최적화(Optimization)에 의해 결정됨을 확인하였습니다.

고해상도 검사 시스템 구축을 위한 핵심 가이드라인을 다음과 같이 요약합니다.

1. 광학계와 센서의 정합성 최적화 (Optical & Sensor Integration)

단순히 높은 NA(개구수)를 가진 렌즈를 사용하는 것만으로는 부족하며, 렌즈의 회절 한계 해상도가 이미지 센서의 화소 크기(Pixel Size)보다 충분히 작도록 설계되어야 합니다. 만약 센서의 화소가 광학적 해상도보다 클 경우, 샘플링 이론에 따른 정보 손실이 발생하여 미세 결함(Micro-defect) 검출이 불가능해집니다. 따라서 하드웨어 설계

단계에서 Abbe 공식에 따른 이론적 해상도와 화소 면적 간의 매칭을 최우선적으로 고려해야 합니다.

2. 공정 마진 확보를 위한 엔지니어링 설계 (Margin-Centric Design)

HBM4와 같이 적층 단수가 증가하고 구조가 복잡해지는 공정에서는 Warpage(휨)나 Misalignment(정렬 오차)로 인해 검사 환경이 가변적입니다. 따라서 측정값(Measured Value)이 설계 규격(Spec)의 경계선에 위치하지 않도록, 산출된 Margin(여유치)을 기반으로 검사 시스템의 정밀도를 설정해야 합니다. 충분한 Margin 확보는 양품을 불량으로 판정하는 과검(Over-kill)을 방지하고, 공정 변동성 속에서도 안정적인 수율(Yield)을 확보하는 핵심 요소입니다.

3. AI 기반 검사 고도화를 위한 데이터 품질 확보 (Data Quality for AI)

차세대 검사 솔루션의 핵심인 AI 비전 알고리즘의 성능은 입력되는 이미지의 신호 대 잡음비(SNR)와 결함-배경 간의 농도비(Contrast Ratio)에 직접적인 영향을 받습니다. 높은 농도비는 AI 모델이 미세 결함과 정상적인 노이즈를 명확히 구분할 수 있는 기반을 제공하며, 이는 곧 결함 분류(Defect Classification)의 정확도로 직결됩니다.

4. 미래 대응 전략 (Future Strategy)

향후 Hybrid Bonding 도입에 따른 Cu-to-Cu 접합부 검사 등 초미세 공정 대응을 위해서는 기존의 광학 검사 한계를 극복할 수 있는 차세대 검사 모듈 개발이 필수적입니다. 크레셈은 현재의 광학 기술력을 바탕으로 AI 알고리즘을 통합한 맞춤형(Customized) 솔루션을 제공함으로써, 고객사의 공정 불량 원인을 역추적(Root Cause Analysis)할 수 있는 스마트 팩토리 구현의 핵심 파트너로서 역할을 강화해 나갈 것입니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].