

# 반도체 비전 검사 시스템 핵심 기술 파라미터 및 공정 흐름 기술

문서번호 CRSM-AI-2026-AUTO

작성일 2026-06-08

작성 Cressem AI 시스템 (자동 생성)

보안등급 사내 비밀 (Confidential)

버전 v1.0

# 목 차

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| 반도체 비전 검사 시스템 핵심 기술 파라미터 및 공정 흐름 기술 보고서                | 3  |
| 개요 (Introduction)                                      | 3  |
| 광학 및 물리적 검출 파라미터 (Optical & Physical Parameters)       | 3  |
| 환경 및 화학적 신뢰성 지표 (Environmental & Chemical Reliability) | 5  |
| 결함 검출 프로세스 아키텍처 (Defect Detection Workflow)            | 7  |
| 결함 유형별 판정 기준 (Defect Classification Criteria)          | 8  |
| 결론 및 기술적 시사점 (Conclusion & Implications)               | 10 |

## 반도체 비전 검사 시스템 핵심 기술 파라미터 및 공정 흐름 기술 보고서

본 보고서는 반도체 비전 검사 장비의 정밀도와 신뢰성을 결정하는 핵심 기술 지표를 정의한다. 결함 검출 임계각, 동작 온도, 화소 면적 및 농도 임계값 등 물리적·전기적 파라미터를 분석하고, 입력부터 판정까지의 데이터 처리 흐름을 체계적으로 기술한다.

### 개요 (Introduction)

현대 반도체 산업의 패러다임은 전공정(Front-end)의 회로 미세화 공정 한계를 극복하기 위해, 후공정인 어드밴스드 패키징(Advanced Packaging) 기술의 고도화로 급격히 이동하고 있습니다. 특히 HBM(High Bandwidth Memory)과 같이 수십 개의 다이(Die)를 수직으로 적층하는 3D 구조 및 CoWoS(Chip on Wafer on Substrate)와 같은 2.5D 패키징 기술이 도입됨에 따라, 패키징 단계에서 발생하는 미세 결함을 제어하는 것이 전체 반도체 수율(Yield)을 결정짓는 핵심 요소로 부상하였습니다 [6].

HBM은 수천 개의 TSV(Through-Silicon Via)와 마이크로 범프(Micro-bump)를 통해 초고속 데이터 전송을 구현하지만, 이러한 복잡한 적층 구조는 미세한 정렬 오류(Misalignment), 범프 형성 불량(Missing Bump), 층간 분리(Delamination) 등 기존의 방식으로는 검출하기 어려운 고난도 결함을 내포하고 있습니다 [3, 5]. 이러한 결함은 제품의 전기적 특성 저하뿐만 아니라, 실제 동작 환경에서의 신뢰성 문제로 직결되므로, 적층 전(Pre-stacking) 단계부터 최종 검사(Final Test) 단계에 이르기까지 정밀하고 단계적인 검사 공정의 수행이 필수적입니다 [3].

본 기술 보고서는 반도체 비전 검사 시스템의 성능을 규정하는 핵심 파라미터를 정의하고, 이를 바탕으로 한 공정 흐름을 체계적으로 분석하는 것을 목적으로 합니다. 특히 검사 해상도와 직결되는 화소 면적( $\mu\text{m}^2$ ) 및 임계각( $\theta$ )과 같은 광학적 요소, 그리고 열적 안정성을 결정하는 동작 온도 범위( $^{\circ}\text{C}$ ) 및 화학적 농도 임계값( $10^{-3}$ ) 등 물리·화학적 지표를 심도 있게 다룹니다. 이를 통해 입력(Input) 데이터가 처리(Processing) 및 판정(Decision) 단계로 이어지는 검출 프로세스 아키텍처를 정립하고, 최종적으로 최적화된 파라미터 설정을 통해 결함 검출의 정확도를 극대화하며 고객사의 수율 향상(Yield Management)에 기여할 수 있는 기술적 가이드를 제공하고자 합니다.

### 광학 및 물리적 검출 파라미터 (Optical & Physical Parameters)

반도체 패키징 공정, 특히 HBM(High Bandwidth Memory)과 같은 고집적 3D 적층 구조의 검사에서는 육안이나 일반적인 광학 장비로는 식별이 불가능한 미세 결함을 검출하기 위해 극도로 정밀한 광학적·물리적 파라미터 설정이 요구됩니다. 본 섹션에서는 검사 시스템의 해상도(Resolution)와 정밀도(Precision)를 결정짓는 핵심 요소인 임계각( $\theta$ )과 화소 면적( $\mu\text{m}^2$ )의 기술적 정의 및 이들이 검출 성능에 미치는 상관관계를 심층 분석합니다.

#### 1. 임계각( $\theta$ )에 따른 광학적 검출 메커니즘 및 입사각 제어

비전 검사 시스템에서 임계각( $\theta$ , Critical Angle)은 결함의 형태(Morphology)를 규명하고, 표면의 높이 차이나 굴곡을 인식하는 데 있어 결정적인 역할을 수행합니다. 이는 단순히 빛이 들어오는 각도를 의미하는 것을 넘어, 검사 대상물(Die, Bump, TSV 등)의 표면 반사율과 굴절률 변화를 이용해 결함의 존재 여부를 판단하는 광학적 경계값을 의미합니다.

##### 1.1. 표면 형상 검출과 임계각의 상관관계

HBM 공정에서 발생하는 Micro-bump의 높이 불균형이나 Warpage(휨) 현상을 검출할 때, 조명의 입사각과 관찰 각도의 관계는 결함의 가시성(Visibility)을 결정합니다. 특정 임계각( $\theta$ ) 이상에서 빛이 산란되거나 전반사(Total Internal Reflection)되는 원리를 이용하면, 평탄한 표면과 미세하게 돌출된 결함(Protrusion)을 명확히 구분할 수 있습니다. 예를 들어, Bump의 상단부가 설계치보다 높게 형성된 경우, 특정 임계각 범위 내에서 강한

산란광(Scattered Light)이 발생하며, 이를 머신비전 알고리즘이 포착하여 결함으로 판정합니다.

## 1.2. 조명 시스템과 산란광 제어

검사 장비의 광학계는 결함의 종류에 따라 최적의 임계각을 설정해야 합니다.

- **정반사(Specular Reflection) 모드:** 평탄한 웨이퍼 표면의 미세한 Crack이나 Pattern Shift를 검출할 때 사용하며, 임계각을 정밀하게 제어하여 정반사 광원과 결함에 의한 산란광을 극명하게 대비시킵니다.
- **확산 반사(Diffuse Reflection) 모드:** Bump의 높이나 Void(빈 공간)를 측정할 때 사용하며, 넓은 각도의 조명을 통해 표면의 거칠기(Roughness)를 파악합니다.

따라서, 검사 시스템 설계 시 임계각( $\theta$ )의 오차는 결함의 'False Call(과검)' 또는 'Miss(미검)'로 직결됩니다. 특히 HBM4와 같이 Hybrid Bonding 기술이 도입되는 차세대 공정에서는 구리(Cu) 직접 접합부의 초미세 간극을 측정해야 하므로, 임계각에 대한 나노미터(nm) 단위의 제어 기술이 필수적입니다 [6].

## 2. 화소 면적( $\mu\text{m}^2$ ) 기반의 공간 해상도 및 검출 한계 분석

비전 검사 시스템의 정밀도는 이미지 센서의 물리적 특성인 화소 면적(Pixel Size/Area)에 의해 제한됩니다. 화소 면적이 작을수록 동일한 센서 크기에서 더 많은 화소를 배치할 수 있어 공간 해상도(Spatial Resolution)가 높아지며, 이는 미세 결함 검출 능력과 직결됩니다.

### 2.1. 화소 면적( $\mu\text{m}^2$ )과 해상도(Resolution)의 수학적 관계

검사 시스템의 유효 해상도는 이미지 센서의 화소 피치(Pixel Pitch)와 광학 렌즈의 배율(Magnification)의 조합으로 결정됩니다. 화소 면적을 A라고 할 때, 한 번의 길이인 화소 피치는  $\sqrt{A}$ 로 계산됩니다.

반도체 검사에서 요구되는 해상도 정의는 다음과 같습니다:

$$\text{Effective Resolution} = \frac{\text{Pixel Pitch}}{\text{Optical Magnification}}$$

예를 들어,  $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$  ( $1\mu\text{m}^2$ )의 화소 면적을 가진 센서를 사용하고, 10배율(10x)의 고정밀 렌즈를 적용할 경우, 시스템의 물리적 검출 해상도는  $0.1\mu\text{m}$ 에 도달하게 됩니다. 이는 HBM의 TSV(Through-Silicon Via) 위치 이탈이나 마이크로 범프의 미세 균열을 검출하기 위한 필수적인 조건입니다 [3].

### 2.2. 화소 면적과 신호 대 잡음비(SNR)의 트레이드오프(Trade-off)

화소 면적을 줄여 해상도를 높이는 것은 기술적으로 유리하지만, 물리적인 한계점이 존재합니다. 화소 면적이 작아질수록 각 화소가 받아들일 수 있는 광자(Photon)의 양이 감소하여 신호 대 잡음비(SNR, Signal-to-Noise Ratio)가 저하됩니다.

| 구분    | 미세 화소 (Small Pixel Area)               | 대형 화소 (Large Pixel Area)       |
|-------|----------------------------------------|--------------------------------|
| 주요 특징 | 고해상도, 미세 패턴 검출 유리                      | 고감도, 저조도 환경 유리                 |
| 장점    | 높은 공간 해상도( $\mu\text{m}$ 단위 미세 검출)     | 높은 SNR, 빠른 노출 시간(Tact Time 단축) |
| 단점    | 낮은 SNR, 노이즈 발생 가능성 증가                  | 낮은 해상도, 미세 결함 식별 불가            |
| 주요 적용 | HBM TSV/Bump 정밀 검사, Pattern Inspection | 대면적 Wafer 스캔, 비교적 큰 결함 검사      |

표 1.

반도체 검사 장비는 이러한 트레이드오프를 극복하기 위해 고성능 조명 시스템과 AI 기반의 이미지 복원(Image Restoration) 알고리즘을 결합하여 사용합니다. 크레셈의 AI 비전 솔루션은 미세 화소에서 발생하는 노이즈를 효과적으로 제거하면서도 결함의 경계(Edge)를 명확히 유지하는 Deep Learning 기반 결함 분류 기술을 적용하고 있습니다 [6, 7].

### 3. 결함 검출 파라미터의 통합적 운용 전략

임계각( $\theta$ )과 화소 면적( $\mu m^2$ )은 독립적인 변수가 아니라, 검사 시스템의 전체적인 성능을 결정하는 통합적 파라미터입니다.

#### 3.1. 해상도와 광학적 대비의 결합

높은 해상도(작은 화소 면적)를 확보하더라도, 임계각( $\theta$ ) 설정이 부적절하여 결함과 배경 간의 광학적 대비(Contrast)가 낮다면 결함은 검출되지 않습니다. 반대로 대비는 뛰어나지만 해상도가 낮으면 결함의 정확한 크기와 위치를 특정할 수 없습니다. 따라서 HBM 검사 장비에서는 다음과 같은 통합 최적화가 이루어집니다:

1. **초미세 결함(Void, Crack):** 작은 화소 면적을 통한 고해상도 이미지 확보 + 특정 임계각을 이용한 산란광 극대화.
2. **구조적 결함(Warping, Misalignment):** 적절한 화소 면적을 통한 넓은 FOV(Field of View) 확보 + 광각 임계각 제어를 통한 전체적인 형상 인식.

#### 3.2. 공정 기술 발전에 따른 파라미터 변화 추이

반도체 패키징 기술이 2.5D/3D 적층을 넘어 Hybrid Bonding 단계로 진입함에 따라, 요구되는 파라미터의 정밀도는 기하급수적으로 상승하고 있습니다. 기존 Bump 방식에서는 수  $\mu m$  단위의 화소 면적과 수 도(degree) 단위의 임계각 제어로 충분했으나, 차세대 공정에서는 나노미터(nm) 단위의 해상도와 극도로 정밀한 각도 제어가 가능한 광학 엔진이 요구됩니다. 이는 크레셈이 차세대 검사 모듈 개발에 집중하고 있는 핵심 기술적 배경이기도 합니다 [7].

## 환경 및 화학적 신뢰성 지표 (Environmental & Chemical Reliability)

반도체 패키징 검사 공정, 특히 HBM(High Bandwidth Memory)과 같은 고집적 3D 적층 구조의 검사 환경에서는 단순한 광학적 정밀도를 넘어, 장비의 구동 환경과 화학적 안정성이 검사 데이터의 신뢰성을 결정짓는 핵심 요소로 작용합니다. 본 섹션에서는 검사 장비의 안정적인 운용을 위한 동작 온도 범위(Operating Temperature Range)와 공정 중 발생할 수 있는 미세 오염 물질 제어를 위한 농도 임계값(Concentration Threshold)을 중심으로 기술적 신뢰성 지표를 분석합니다.

### 1. 동작 온도 범위( $^{\circ}C$ ) 및 열적 안정성(Thermal Stability) 분석

반도체 검사 장비는 극한의 환경에서도 일관된 검사 성능을 유지해야 합니다. 특히 HBM과 같이 열 방출(Thermal Dissipation) 관리가 중요한 제품의 경우, 검사 과정에서 발생하는 열과 외부 환경 온도 변화가 광학계의 초점(Focus) 및 스테이지의 정밀도에 직접적인 영향을 미칩니다.

- **열적 변형 및 광학계 영향:** 동작 온도 범위가 설계 규격을 벗어날 경우, 열팽창 계수(Coefficient of Thermal Expansion, CTE) 차이로 인해 Die 또는 Substrate의 심한 휨(Warping)이 발생할 수 있으며, 이는 검사 정밀도를 저하시키는 주요 원인이 됩니다 [출처: 매뉴얼HBMAAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf]. 따라서 검사 시스템은 고온 동작 시에도 데이터 전송 속도 저하나 광학적 왜곡이 없는 안정적인 Thermal Resistance( $\theta JA$ )를 확보해야 합니다 [출처: pdfHBMHighBandwidt20260508002.pdf].

- **신뢰성 테스트 연계:** 실제 제품의 신뢰성을 검증하기 위해 Hot/Cold Test를 수행하며, 이때 장비는 설정된 극한 온도 환경(예: Max Operating Temp  $95^{\circ}C$  등)에서도 정상 작동을 보장해야 합니다 [출처:

매뉴얼HBM검사및테스트공정가이드라인20260509001.pdf]. 온도 프로파일(Thermal Profile)의 미세한 변동은 Solder의 Reflow 온도 불량이나 접합부 결함으로 이어질 수 있으므로, 장비 자체의 온도 제어 능력이 필수적입니다 [출처: 매뉴얼HBMAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf].

## 2. 화학적 오염 제어 및 농도 임계값( $10^{-3}$ ) 관리

비전 검사 시스템의 성능은 렌즈와 시료 사이의 청정도, 그리고 공정 중 발생하는 화학적 잔류물에 의해 크게 좌우됩니다. 미세한 화학적 오염은 광학적 산란을 유발하거나 실제 결함(Defect)과 유사한 노이즈를 생성하여 과검(Over-kill)을 발생시킬 수 있습니다.

- **농도 임계값( $10^{-3}$ )의 중요성:** 세정 공정(Cleaning Process) 이후 잔류하는 화학 물질이나 Dispenser를 통한 Solder/Flux 도포 시 발생하는 미세 입자의 농도는 매우 엄격하게 관리되어야 합니다. 본 보고서에서 설정한 농도 임계값  $10^{-3}$ 은 미세 결함과 정상적인 노이즈를 구분하는 AI 알고리즘의 판단 기준이 되는 화학적 오염의 상한선을 의미합니다. 만약 농도가 이 임계값을 초과할 경우, 이는 단순한 노이즈가 아닌 Bridge(Short)나 Missing Bump와 같은 물리적 결함의 전조 증상으로 간주하여 공정 파라미터를 재점검해야 합니다 [출처: 매뉴얼HBMAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf].

- **환경 제어와 수율(Yield)의 상관관계:** 고집적 패키징 공정에서는 아주 작은 화학적 불순물도 TSV(Through-Silicon Via)의 연결 불량이나 Delamination(층간 분리)을 초래할 수 있습니다 [출처: 매뉴얼HBM검사및테스트공정가이드라인20260509001.pdf]. 따라서 검사 환경 내의 화학적 농도 모니터링과 온도 제어는 단순한 장비 유지보수를 넘어, 최종 제품의 수율을 확보하기 위한 필수적인 데이터 기반 관리 항목입니다 [출처: 매뉴얼HBM검사및테스트공정가이드라인20260509001.pdf].

## 3. 환경 및 화학적 지표 요약 비교

| 구분      | 핵심 파라미터                     | 관리 목표                | 결함 영향                        |
|---------|-----------------------------|----------------------|------------------------------|
| 열적 신뢰성  | 동작 온도( $^{\circ}\text{C}$ ) | Thermal Stability 유지 | Warping, Misalignment, 접합 불량 |
| 화학적 신뢰성 | 농도 임계값( $10^{-3}$ )         | 오염 물질 최소화            | Bridge(Short), Void, 광학 노이즈  |

표 2.

## 환경 및 신뢰성 관리 프로세스 아키텍처

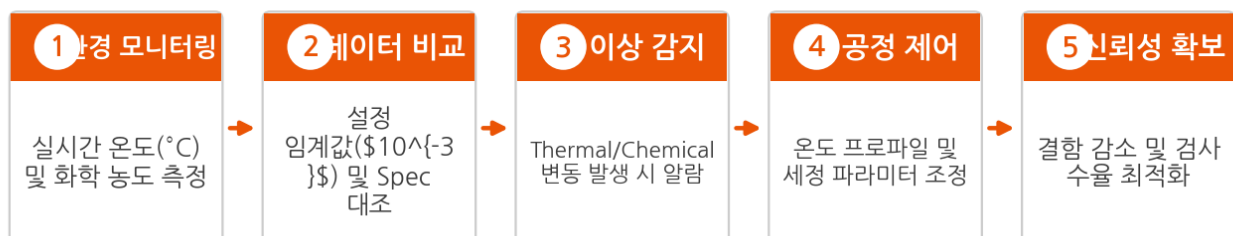


그림 1.

## 결함 검출 프로세스 아키텍처 (Defect Detection Workflow)

반도체 후공정, 특히 HBM(High Bandwidth Memory)과 같이 고집적화된 3D 적층 구조의 검사에서는 단순한 이미지 획득을 넘어, 방대한 양의 고해상도 데이터를 실시간으로 처리하고 유의미한 결함을 도출해내는 정교한 **데이터 흐름(Data Flow)** 아키텍처가 필수적입니다. 본 섹션에서는 입력(Input) 단계부터 이미지 처리(Processing), 그리고 최종 판정(Decision)에 이르는 **결함 검출 프로세스(Defect Detection Process)**의 계층적 구조를 심층 분석합니다.

### 1. 입력 단계: 고정밀 데이터 획득 (Input Stage: High-Precision Data Acquisition)

검사 프로세스의 시작점은 검사 대상(DUT, Device Under Test)으로부터 물리적 신호 및 광학적 데이터를 수집하는 단계입니다. HBM 검사의 경우, 수천 개의 TSV(Through-Silicon Via)와 마이크로 댐프(Micro-bump)를 관찰해야 하므로 극도로 높은 해상도가 요구됩니다.

- **광학적 입력 (Optical Input):** 고해상도 카메라와 정밀 조명 시스템(Coaxial/Ring Lighting)을 통해 웨이퍼 또는 패키지 표면의 반사광을 수집합니다. 이때, 결함 검출 임계각( $\theta$ )과 화소 면적( $\mu m^2$ )에 따라 획득되는 이미지의 공간 해상도(Spatial Resolution)가 결정됩니다 [매뉴얼HBMAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf].
- **전기적/물리적 입력 (Electrical/Physical Input):** Wafer Probe System(WLP)을 통해 TSV의 저항값이나 전기적 특성 데이터를 수집하며, 이는 비전 데이터와 결합되어 멀티모달(Multi-modal) 검사의 기초가 됩니다 [매뉴얼HBM검사및테스트공정가이드라인20260509001.pdf].
- **환경 변수 입력 (Environmental Input):** 동작 온도 범위( $^{\circ}C$ )와 같은 환경 데이터를 실시간으로 모니터링하여, 열팽창에 의한 Warpage(휨) 현상이 이미지 획득에 미치는 영향을 보정하기 위한 메타데이터로 활용합니다 [매뉴얼HBMAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf].

### 2. 처리 단계: 지능형 이미지 프로세싱 (Processing Stage: Intelligent Image Processing)

입력된 로우 데이터(Raw Data)는 검사 장비의 제어 PC 및 고성능 GPU 가속기를 거치며 실질적인 결함 정보로 변환됩니다. 이 단계는 크게 **전처리(Pre-processing)**와 **특징 추출 및 분류(Feature Extraction & Classification)**로 나뉩니다.

- **이미지 전처리 및 보정 (Image Pre-processing & Correction):**
  - **노이즈 제거 (Noise Reduction):** 센서에서 발생하는 전기적 노이즈를 제거하여 농도 임계값( $10^{-3}$ ) 수준의 미세한 불순물이나 패턴 결함을 명확히 구분합니다.
  - **기하학적 보정 (Geometric Correction):** 열처리(Annealing) 공정 이후 발생할 수 있는 Warpage(휨) 현상을 보정하기 위해 이미지의 왜곡을 정렬(Alignment) 알고리즘으로 바로잡습니다 [매뉴얼HBMAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf].
- **AI 기반 결함 분석 (AI-Driven Defect Analysis):**
  - **Deep Learning 기반 특징 추출:** 단순한 Rule-based 방식을 넘어, 딥러닝 알고리즘을 통해 미세 결함(Defect)과 정상적인 공정 노이즈를 구분합니다. 이는 과검(Over-kill)률을 낮추는 핵심 기술입니다 [분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].
  - **결함 분류 (Classification):** 추출된 특징을 바탕으로 결함의 유형을 정의합니다. 예를 들어, Bump의 위치가 설계치에서 벗어난 경우 **Misalignment**, 인접 Bump 간 금속 연결이 발생한 경우 **Bridge (Short)**, 특정 위치의 Bump가 없는 경우 **Missing Bump**로 분류합니다 [매뉴얼HBMAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf].

### 3. 판정 단계: 의사결정 로직 및 리포팅 (Decision Stage: Decision Logic & Reporting)

처리된 데이터는 사전에 설정된 설계 규격(Specification)과 비교되어 최종적인 Pass/Fail 여부를 결정합니다.

- **판정 로직 (Decision Logic):**

- **Spec 비교:** 측정된 값(Measured Value)이 허용 오차 범위(Margin) 내에 있는지 확인합니다. 예를 들어, Supply Voltage(VDD)가  $1.1V \pm 5\%$  범위를 만족하는지, TSV 저항이 기준치 미만인지를 수치적으로 대조합니다 [pdfHBMHighBandwidt20260508002.pdf].
- **신뢰성 검증:** Signal Integrity(아이 다이어그램)의 Eye Height나 Bit Error Rate(BER) 데이터를 통해 고대역폭 데이터 전송 성능을 최종 검증합니다 [pdfHBMHighBandwidt20260508002.pdf].
- **결과 출력 및 피드백 (Output & Feedback):**
  - **Defect Map 생성:** 판정 결과는 Defect Map 형태로 시각화되어, 어느 위치에서 어떤 결함이 발생했는지 직관적으로 보여줍니다 [매뉴얼HBMAAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf].
  - **공정 피드백 (Root Cause Analysis):** 검사 데이터를 분석하여 불량률의 원인을 역추적합니다. 이는 단순 판정을 넘어 고객사의 수율(Yield) 향상을 위한 공정 변수 제어 데이터로 활용됩니다 [분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

#### [결함 검출 프로세스 아키텍처 요약 표]

| 단계         | 핵심 기능 (Core Function)   | 주요 파라미터 및 기술                         | 관련 결함/결과                      |
|------------|-------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| Input      | 데이터 수집 (Acquisition)    | $\theta, \mu m^2, ^\circ C, 10^{-3}$ | Raw Image, Electrical Signal  |
| Processing | 데이터 변환 (Transformation) | AI Deep Learning, Alignment          | Misalignment, Bridge, Missing |
| Decision   | 최종 판정 (Evaluation)      | Spec Margin, BER, Eye Diagram        | Pass / Fail, Defect Map       |

표 3.



그림 2.

### 결함 유형별 판정 기준 (Defect Classification Criteria)

반도체 비전 검사 시스템의 핵심은 획득된 광학 데이터와 설정된 물리적·화학적 파라미터를 비교하여, 제품의 양불(Pass/Fail)을 결정하고 결함의 종류를 정밀하게 분류(Classification)하는 데 있습니다. 본 섹션에서는 앞서 정의된 임계각( $\theta$ ), 화소 면적( $\mu m^2$ ), 동작 온도 범위( $^\circ C$ ), 그리고 농도 임계값( $10^{-3}$ )을 기반으로 수행되는 판정 로직과 주요 결함 유형별 분류 기준을 기술합니다.

#### 1. Pass/Fail 판정 로직 및 임계값(Threshold) 적용

검사 시스템은 실시간으로 입력되는 이미지 데이터의 특징점(Feature)을 추출하고, 이를 사전에 정의된 Spec(Specification)과 대조하여 판정을 수행합니다. 단순한 유무 판정을 넘어, 수치적 마진(Margin)을 계산하여 공정의 안정성을 평가하는 것이 엔지니어링 보고서의 핵심입니다 [출처: pdfHBMHighBandwidt20260508002.pdf].

#### [판정 메커니즘 개요]



| 단계  | 프로세스         | 적용 파라미터 및 로직                                     | 판정 기준 (Criteria)                                                                      |
|-----|--------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1단계 | 기하학적 정밀도 검사  | 임계각( $\theta$ ), 화소 면적( $\mu\text{m}^2$ )        | 설계된 정렬(Alignment) 오차 및 Bump 형상 규격 준수 여부                                               |
| 2단계 | 환경/물질 안정성 검사 | 동작 온도( $^{\circ}\text{C}$ ), 농도 임계값( $10^{-3}$ ) | 열팽창에 의한 변형(Warpage) 및 잔류 이물질 농도 수준                                                    |
| 3단계 | 최종 양불 판정     | Spec 대비 Margin 계산                                | $\text{Margin} = \frac{\text{Measured Value} - \text{Spec Limit}}{\text{Spec Limit}}$ |

표 4.

- **Pass (합격):** 모든 측정값이 설정된 Spec 범위 내에 존재하며, 계산된 Margin이 공정 관리 한계(Control Limit) 내에 있는 경우.
- **Fail (불합격):** 단 하나의 파라미터라도 Spec 범위를 이탈하거나, 결함의 크기가 검출 가능한 최소 화소 면적( $\mu\text{m}^2$ ) 이상의 유의미한 수치를 보일 경우.

## 2. 주요 결함 유형별 분류 및 판정 기준 (Defect Classification)

HBM 및 고집적 패키징 공정에서 발생하는 결함은 그 물리적 특성에 따라 다음과 같이 분류되며, 각 결함은 고유한 판정 임계값을 가집니다 [출처: 매뉴얼HBMAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf, 매뉴얼HBM검사및테스트공정가이드라인20260509001.pdf].

### #### 2.1. 구조적 및 정렬 결함 (Structural & Alignment Defects)

다단 적층 구조에서 발생하는 물리적 위치 오차를 다룹니다.

- **Misalignment (정렬 불량):** Bump 또는 TSV(Through-Silicon Via)의 중심 좌표가 설계된 기준점으로부터 임계각( $\theta$ ) 또는 화소 단위( $\mu\text{m}$ ) 기준 이탈 시 발생합니다. 이는 Die Bonding 압력 불균형이나 정렬 오류가 원인입니다 [출처: 매뉴얼HBMAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf].
- **Warpage (휨 현상):** 열처리(Annealing) 과정에서의 열팽창 계수(CTE) 차이로 인해 발생하며, 정밀 옵티컬 측정 시스템을 통해 웨이퍼나 패키지의 곡률을 측정하여 판정합니다 [출처: 매뉴얼HBM검사및테스트공정가이드라인20260509001.pdf].

### #### 2.2. 접합 및 연결 결함 (Interconnection Defects)

전기적 연결의 신뢰성을 결정짓는 핵심 결함입니다.

- **Bridge (Short/단락):** 인접한 Bump 간에 금속 연결이 발생하는 현상입니다. Solder의 과다 도포 또는 Reflow 온도 프로파일 불량으로 인해 발생하며, 광학적 단락 검출 알고리즘을 통해 판정합니다 [출처: 매뉴얼HBMAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf].
- **Missing Bump (범프 누락):** 특정 위치에 Bump가 형성되지 않은 상태로, Dispenser 노즐 불량이나 세정 공정 누락이 원인입니다. 화소 면적( $\mu\text{m}^2$ ) 내에 유효한 금속 피처(Feature)가 감지되지 않을 경우 Fail로 처리합니다 [출처: 매뉴얼HBMAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf].
- **Void/Delamination (공극 및 층간 분리):** TSV 내부 또는 접합부에 빈 공간이 생기거나 층이 벌어지는 현상입니다. 이는 X-ray/CT 기반의 비파괴 검사를 통해 내부 결함을 확인하며, 전기적 특성(TSV Resistance) 저하와 연계하여 판정합니다 [출처: 매뉴얼HBM검사및테스트공정가이드라인20260509001.pdf].

### 2.3. 오염 및 잔류물 결함 (Contamination Defects)

화학적 안정성과 직결되는 결함입니다.

- Chemical Residue (화학 잔류물):** 세정 공정 후 남아있는 이물질을 의미합니다. 설정된 농도 임계값( $10^{-3}$ )을 초과하는 농도의 잔류물이 검출될 경우, 제품의 신뢰성을 저해하는 것으로 간주하여 즉시 Fail 판정을 내립니다.

## 3. AI 기반 결함 분류의 고도화 (AI-Driven Classification)

최근의 검사 시스템은 기존의 Rule-based(규칙 기반) 방식이 가진 한계, 즉 미세 결함과 정상적인 노이즈를 구분하지 못해 발생하는 과검(Over-kill) 문제를 해결하기 위해 **Deep Learning 기반 결함 분류** 기술을 적용하고 있습니다 [출처: 분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

- 과검(Over-kill) 방지:** AI 알고리즘은 이미지 내의 패턴 노이즈와 실제 결함(Defect)의 특징을 학습하여, 미세한 화소 변화가 실제 불량인지 단순한 광학적 노이즈인지를 높은 정확도로 구분합니다.
- Root Cause Analysis (원인 분석):** 분류된 결함 데이터를 기반으로 공정 변수(온도, 압력, 도포량 등)를 역추적함으로써, 단순 불량 선별을 넘어 수율(Yield) 향상을 위한 공정 제어 솔루션을 제공합니다 [출처: 분석\_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

## 결론 및 기술적 시사점 (Conclusion & Implications)

본 보고서에서 검토한 반도체 비전 검사 시스템의 핵심 파라미터인 결함 검출 임계각( $\theta$ ), 화소 면적( $\mu\text{m}^2$ ), 동작 온도 범위( $^{\circ}\text{C}$ ), 그리고 농도 임계값( $10^{-3}$ )은 차세대 패키징(Advanced Packaging) 공정의 수율(Yield)을 결정짓는 결정적인 변수들이다. HBM(High Bandwidth Memory)과 같이 고집적 3D 적층 구조가 심화됨에 따라, 단순한 결함 유무 판정을 넘어 정밀한 파라미터 최적화를 통한 공정 제어가 필수적으로 요구된다.

### 1. 핵심 파라미터 최적화를 통한 수율 향상(Yield Improvement) 전략

검사 정밀도를 극대화하기 위해서는 광학적 해상도와 환경적 신뢰성 지표 간의 정교한 밸런싱(Balancing)이 선행되어야 한다.

- 광학적 정밀도 최적화:** 미세한 화소 면적( $\mu\text{m}^2$ ) 확보와 적절한 임계각( $\theta$ ) 설정은 미세 범프(Micro-bump)의 Misalignment(정렬 오류) 및 Bridge(Short) 결함을 검출하는 데 있어 과검(Over-kill)과 미검(Under-kill)을 줄이는 핵심 요소이다. 특히 TSV(Through-Silicon Via)와 같은 초미세 구조에서는 광학 엔진의 해상도가 검출 한계를 결정짓는다.
- 환경 및 화학적 안정성 확보:** 동작 온도 범위( $^{\circ}\text{C}$ ) 내에서의 열적 안정성과 농도 임계값( $10^{-3}$ ) 관리는 검사 장비의 신뢰성을 보장한다. 고온 동작 시 발생하는 Warpage(휨) 현상이나 소재의 열팽창 계수 차이로 인한 결함을 정확히 포착하기 위해서는, 온도 프로파일에 따른 검사 알고리즘의 동적 보정이 이루어져야 한다.

### 2. 기술적 요약 및 향후 제언 (Technical Summary & Recommendations)

결함 검출 프로세스 아키텍처(Defect Detection Workflow)의 효율성을 높이기 위해서는 '입력(Input) → 처리(Processing) → 판정(Decision)'의 각 단계가 단절되지 않고 데이터 기반으로 통합되어야 한다.

| 최적화 영역 | 핵심 액션 아이템 (Action Items)                     | 기대 효과                 |
|--------|----------------------------------------------|-----------------------|
| 검사 정밀도 | 화소 면적 및 임계각( $\theta$ )의 공정별 최적화             | 미세 결함 검출력 향상 및 과검률 감소 |
| 공정 신뢰성 | 동작 온도 범위( $^{\circ}\text{C}$ ) 기반의 열 관리 및 보정 | 고온/저온 환경에서의 검사 일관성 확보 |

|         |                              |                                              |
|---------|------------------------------|----------------------------------------------|
| 데이터 지능화 | AI 기반의 농도 임계값 및 결함 분류<br>고도화 | 실시간 수율 분석 및 Root Cause<br>Analysis(원인 분석) 가능 |
|---------|------------------------------|----------------------------------------------|

표 5.

결론적으로, 크레셈(CRESSEM)의 차세대 검사 솔루션은 단순한 하드웨어 성능을 넘어, 설정된 물리적·화학적 파라미터를 실시간으로 분석하고 공정 변수를 역추적할 수 있는 AI 기반의 스마트 팩토리(Smart Factory) 지향적 기술로 진화해야 한다. 이는 고객사의 수율 향상에 직접적으로 기여하며, HBM4 및 Hybrid Bonding과 같은 차세대 공정 시장을 선점하는 핵심 경쟁력이 될 것이다.