CRESSEM
CREATIVE ASSEMBLY

웨이퍼 레벨 광학 검사 장비의 광량 예산 및 노광 시간 설계 분석 보고서

문서번호	CRSM-AI-2026-AUTO
작성일	2026-07-31
작성	Cressem AI 시스템 (자동 생성)
보안등급	사내 비밀 (Confidential)
버전	v1.0

목 차

웨이퍼 레벨 광학 검사 장비의 광량 예산 및 노광 시간 설계 분석 보고서 3

개요 및 배경 . . . 3

광량 예산(Photon Budget)의 물리적 모델링 . . . 4

노광 시간(Exposure Time) 및 감마 보정 설계 . . . 6

물리적 변수에 따른 공정 안정성 분석 . . . 8

처리량(Throughput) 최적화 전략 . . . 10

결론 및 기술적 시사점 . . . 12

참고 자료 . . . 13

웨이퍼 레벨 광학 검사 장비의 광량 예산 및 노광 시간 설계 분석 보고서

본 보고서는 웨이퍼 레벨 광학 검사 공정의 핵심인 광량 예산(Photon Budget) 최적화와 정밀 노광 시간 설계 원리를 분석합니다. 광속, 감마 보정, 처리량 등 주요 물리적 변수 간의 정량적 관계식을 통해 검사 신뢰도와 생산성을 동시에 확보하기 위한 엔지니어링 가이드를 제공합니다.

개요 및 배경

반도체 제조 공정이 10nm 이하의 초미세 공정(Advanced Technology Nodes)으로 진입함에 따라, 웨이퍼 레벨 광학 검사(Optical Wafer Inspection)의 난이도는 기하급수적으로 상승하고 있습니다. 특히 HBM(High Bandwidth Memory)과 같이 수천 개의 TSV(Through Silicon Via)와 Micro Bump가 적층된 3D 구조에서는 단순한 표면 결함 검출을 넘어, 내부 구조의 정렬 상태와 물리적 변형을 정밀하게 측정해야 하는 과제에 직면해 있습니다. 이러한 고집적 패키징 환경에서 검사 장비의 성능을 결정짓는 핵심 요소는 검사 시스템 내에서 활용 가능한 광자의 양을 정량적으로 관리하는 **광량 예산(Photon Budget)**과, 센서의 응답성을 최적화하여 이미지 품질을 확보하는 **노광 설계(Exposure Design)**입니다.

광량 예산(Photon Budget)은 광원(Light Source)에서 발생한 광자가 렌즈, 필터, 웨이퍼 표면의 반사 및 산란 과정을 거쳐 이미지 센서(Image Sensor)의 픽셀에 도달하기까지 발생하는 모든 에너지 손실을 고려한 설계 지표입니다. 검사 대상이 미세화될수록 산란되는 광자의 양이 급격히 감소하며, 이는 신호 대 잡음비(SNR, Signal-to-Noise Ratio)의 저하로 직결됩니다. 만약 설계 단계에서 충분한 광량 예산을 확보하지 못하면, 미세한 결함을 정상적인 노이즈로 오인하는 과검(Over-kill) 현상이 발생하거나, 반대로 결함을 놓치는 미검(Under-kill) 문제가 발생하여 최종적으로 반도체 수율(Yield)에 치명적인 영향을 미치게 됩니다.

또한, 노광 시간(Exposure Time) 설계는 검사 정밀도와 생산성(Throughput) 사이의 핵심적인 트레이드오프(Trade-off) 관계를 형성합니다. 노광 시간을 길게 설정하면 센서에 도달하는 광자 수를 늘려 고해상도의 선명한 이미지를 얻을 수 있으나, 이는 검사 장비의 Tact Time(생산 주기)을 증가시켜 전체적인 처리량(₩Theta)을 저하시키는 원인이 됩니다. 따라서 최신 검사 시스템에서는 감마 보정(₩Gamma)을 통해 센서의 비선형적 응답성을 교정하고, 광학적 특성을 극대화할 수 있는 최적의 노광 프로파일을 도출하는 것이 필수적입니다.

특히 차세대 패키징 기술인 Hybrid Bonding이나 고단 HBM 적층 공정에서는 재료의 밀도(rho) 변화에 따른 굴절률 차이와, 열처리 과정에서 발생하는 응력(sigma)에 의한 웨이퍼 휨(Warpage) 현상이 광학적 경로(Optical Path)를 왜곡시키는 주요 변수로 작용합니다. 이러한 물리적 변수들은 위상차(phi)를 유발하여 이미지의 선명도를 떨어뜨리므로, 광량 예산 및 노광 설계 시 반드시 물리적 모델링에 포함되어야 합니다. 본 보고서에서는 이러한 복합적인 변수들을 정량적 수식으로 정의하고, 최적의 검사 성능을 구현하기 위한 통합 설계 방법론을 분석하고자 합니다.

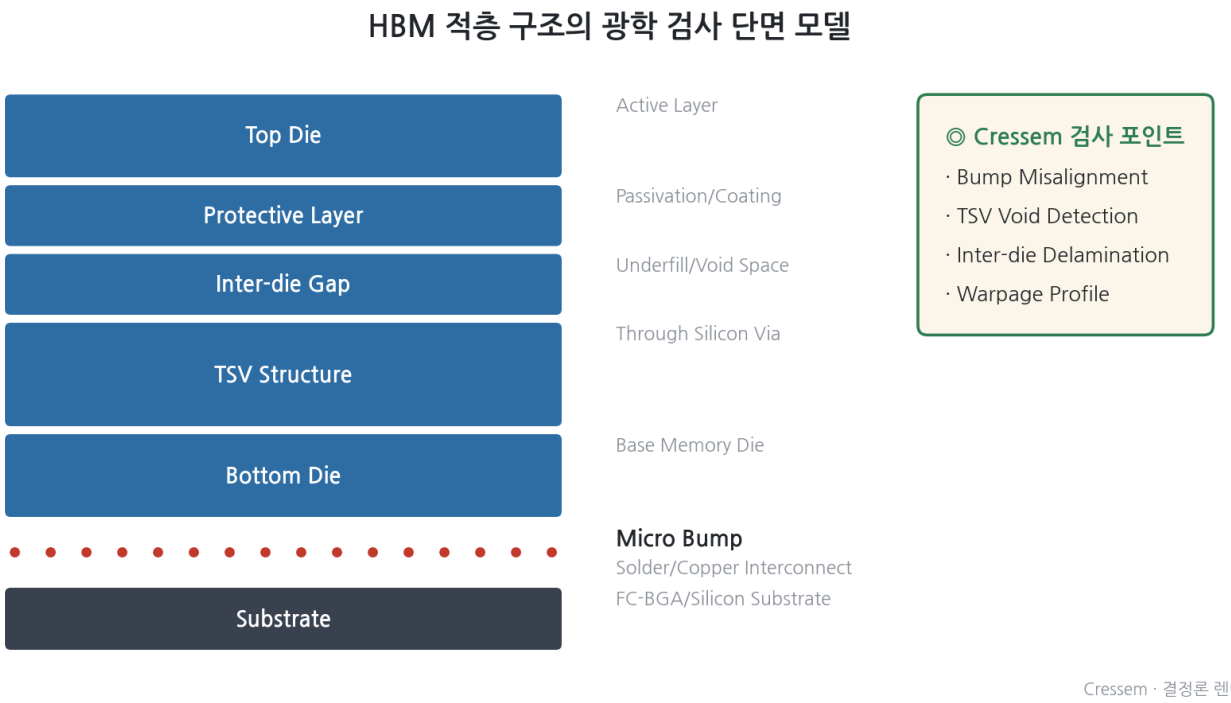

그림 1. HBM 적층 구조의 광학 검사 단면 모델

광량 예산(Photon Budget)의 물리적 모델링

웨이퍼 레벨 광학 검사(Wafer-level Optical Inspection) 시스템의 성능은 검사 대상인 웨이퍼 표면에서 반사되어 이미지 센서(Image Sensor)에 도달하는 유효 광자의 수량, 즉 광량 예산(Photon Budget)에 의해 결정됩니다. 고해상도 검사가 요구되는 HBM(High Bandwidth Memory)이나 차세대 패키징 공정에서는 미세한 결함(Defect)을 검출하기 위해 극도로 높은 신호 대 잡음비(SNR, Signal-to-Noise Ratio)가 필요하며, 이를 달성하기 위한 물리적 모델링은 장비 설계의 핵심적인 기초가 됩니다.

광량 예산은 광원(Light Source)에서 방출된 총 광량으로부터 시작하여, 광학계(Optical Path)를 거치며 발생하는 각종 감쇄 요인과 웨이퍼 표면의 물리적 특성에 의한 산란 및 흡수를 거쳐 최종적으로 센서의 픽셀에 도달하는 과정으로 정의됩니다.

1. 광학적 에너지 흐름과 광속(₩Phi)의 정의

검사 시스템의 입력을 정의하는 첫 번째 요소는 광원으로부터 방출되는 광속(Luminous Flux, ₩Phi)입니다. 검사 장비의 광학 엔진은 특정 파장 대역에서 일정한 광량을 유지해야 하며, 이때 센서에 도달하는 유효 광량은 광원의 출력뿐만 아니라 광학계의 투과율과 웨이퍼의 반사율에 의해 결정됩니다.

단위 시간당 센서에 도달하는 광자(Photon)의 흐름을 모델링하기 위해 다음과 같은 정량 관계식을 정의할 수 있습니다. 센서에 도달하는 유효 광속 ₩Phidet는 다음과 같습니다.

$$\Phi_{det} = \Phi_{source} \cdot \eta_{opt} \cdot R(\theta, \text{material}) \cdot \exp(-\alpha d)$$

여기서 각 변수의 의미는 다음과 같습니다.

- ₩Phisource: 광원으로부터 방출되는 총 광속
- etaopt: 광학계(Lens, Filter, Polarizer 등)의 총 투과 효율

- R(θ, material): 웨이퍼 표면의 입사각(θ) 및 재료 특성에 따른 반사율(Reflectivity)
- exp(-α d): 웨이퍼 표면층 또는 보호막(Passivation layer) 내에서의 광 흡수 감쇄 (여기서 α는 흡수 계수, d는 두께)

2. 재료 밀도(rho) 및 위상차(phi)에 따른 광학적 손실 모델링

웨이퍼의 물리적 상태는 광량 예산에 직접적인 영향을 미칩니다. 특히 HBM과 같이 다단 적층된 구조에서는 웨이퍼 및 패키지 소재의 재료 밀도(rho)와 박막의 두께 변화가 굴절률(Refractive Index)에 영향을 주어 광학적 경로를 변화시킵니다.

재료의 밀도(rho)는 광학적 밀도(Optical Density)와 상관관계를 가지며, 이는 빛의 산란(Scattering) 및 투과 특성을 결정합니다. 또한, 웨이퍼 표면의 미세한 거칠기(Roughness)나 구조적 불균일성은 입사광과 반사광 사이의 위상차(phi)를 발생시키며, 이는 간섭(Interference) 현상을 유도하여 검사 이미지의 명암비(Contrast)를 저하시키는 원인이 됩니다.

위상차 ₩phi를 포함한 광학적 간섭 모델은 다음과 같이 표현됩니다.

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n \cdot d \cdot \cos(\theta)$$

여기서 n은 재료의 굴절률이며, n은 재료의 밀도 ₩rho의 함수 n(rho)로 간주할 수 있습니다. 따라서 재료의 밀도 변화는 위상차 ₩phi의 변동을 야기하고, 이는 최종적으로 검사 알고리즘이 결함과 노이즈를 구분하는 데 사용하는 광학적 신호의 품질을 결정짓게 됩니다.

3. 결함 검출 한계와 SNR의 관계

광량 예산의 최종 목적은 결함(Defect)에 의한 신호 변화를 노이즈(Noise)로부터 분리해내는 것입니다. 광량 예산이 충분하지 않으면 센서의 Shot Noise(광자 통계적 노이즈)가 지배적이게 되어, 미세한 결함에 의한 반사율 변화를 감지할 수 없습니다.

센서에 도달하는 광자 수 N에 대한 SNR 모델은 다음과 같습니다.

$$SNR = \frac{N_{signal}}{\sqrt{N_{signal} + N_{background} + \sigma_{read}^2}}$$

여기서 Nsignal은 결함에 의해 추가되거나 감소된 유효 광자 수이며, ₩sigmaread²는 센서 자체의 읽기 노이즈(Read Noise)를 의미합니다. 고해상도 검사 장비 설계 시, ₩Phidet를 계산하여 SNR이 목표치(예: SNR > 5)를 만족하는 최소 노광 시간(texp)을 산출하는 과정이 필수적입니다.

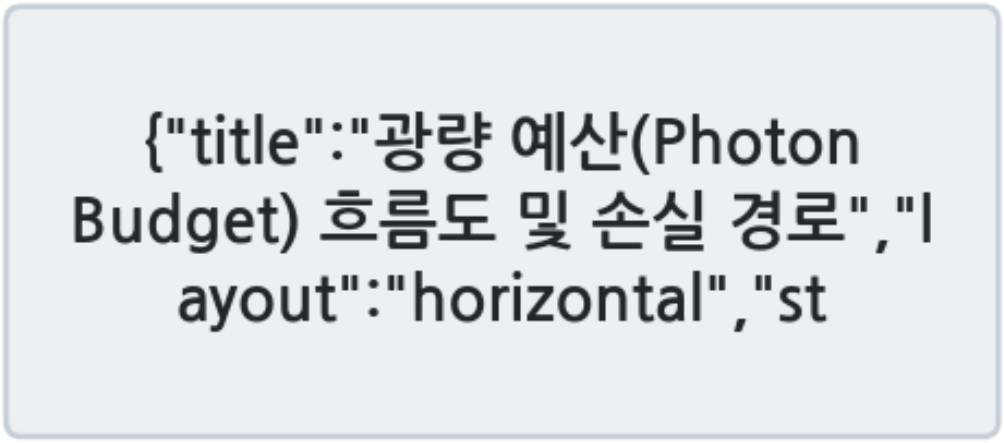

그림 2.

4. 물리적 변수 간의 상관관계 요약

검사 장비의 설계 엔지니어는 광량 예산을 최적화하기 위해 광학적 파라미터와 웨이퍼의 물리적 파라미터를 동시에 고려해야 합니다. 아래 표는 주요 물리적 변수가 광량 예산 및 검사 품질에 미치는 영향을 정리한 것입니다.

물리적 변수	기호	광학적 영향	검사 품질에 미치는 결과
광속	₩Phi	시스템 전체의 에너지 입력량 결정	SNR 및 검출 감도(Sensitivity) 결정
재료 밀도	rho	굴절률(n) 및 흡수 계수(α)에 영향	위상차 및 광학적 투과율 변동 유발
위상차	phi	빛의 간섭(Interference) 패턴 형성	결함의 명암비(Contrast) 및 형상 왜곡
굴절률	n	빛의 경로(Optical Path) 및 반사각 결정	초점 심도(DOF) 및 해상도 영향

표 1. 물리적 변수 간의 상관관계 요약

결론적으로, 웨이퍼 레벨 광학 검사 장비의 광량 예산 설계는 단순히 밝은 조명을 사용하는 것이 아니라, 재료의 밀도(rho)와 구조적 위상차(phi)를 고려하여 최적의 광학 경로를 확보하고, 이를 통해 최소한의 노광 시간 내에 목표로 하는 SNR을 달성할 수 있는 정밀한 물리적 모델링이 선행되어야 합니다.

노광 시간(Exposure Time) 및 감마 보정 설계

웨이퍼 레벨 광학 검사(Optical Wafer Inspection) 시스템에서 이미지 센서(Image Sensor)가 유효한 결함 정보를 획득하기 위해서는 입사되는 광자(Photon)를 전기적 신호로 변환하는 과정이 필수적입니다. 이 과정의 핵심은 검사 대상의 미세 패턴이나 결함(Defect)을 명확히 구분할 수 있는 충분한 신호 강도를 확보하면서도, 생산성을 저해하지 않는 최적의 노광 시간(Exposure Time, texp)을 설정하는 것입니다. 또한, 센서의 비선형적 응답 특성을 보정하여 실제 광량과 디지털 출력값 사이의 선형성을 확보하는 감마 보정(₩Gamma) 설계는 검사 데이터의 신뢰성을 결정짓는 결정적인 요소입니다.

1. 노광 시간과 신호 대 잡음비(SNR)의 정량적 상관관계

광학 검사 장비에서 노광 시간 texp는 센서에 도달하는 총 광자 수와 직결됩니다. 센서의 픽셀에 축적되는 신호 전하량 Q는 입사 광속 ₩Phi와 노광 시간 texp의 곱에 비례하며, 다음과 같은 관계식으로 표현할 수 있습니다.

$$Q = \eta \cdot \Phi \cdot t_{exp}$$

여기서 ₩eta는 센서의 양자 효율(Quantum Efficiency, QE)을 의미합니다. 검사 시스템의 품질을 결정하는 핵심 지표인 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)는 신호의 크기를 잡음의 표준 편차로 나눈 값으로, 노광 시간이 길어질수록 신호 성분이 증가함에 따라 SNR이 개선됩니다. 샷 노이즈(Shot Noise)가 지배적인 환경에서의 SNR 모델은 다음과 같습니다.

$$SNR = \frac{\eta \Phi t_{exp}}{\sqrt{\eta \Phi t_{exp} + \sigma_{read}^2}}$$

여기서 ₩sigmaread는 센서의 읽기 노이즈(Read Noise)를 나타냅니다. 위 식에서 알 수 있듯이, 노광 시간 texp가 증가할수록 분자의 증가율이 분모의 증가율보다 크기 때문에 SNR이 향상되지만, 이는 곧 검사 장비의 Tact Time(생산 주기) 증가를 의미하며 생산성(₩Theta)과의 상충 관계(Trade-off)를 발생시킵니다. 따라서 고해상도 검사를 위해 미세 결함을 검출해야 하는 HBM(High Bandwidth Memory)이나 FC-BGA 검사 공정에서는, 결함의 크기와 반사율을 고려하여 최소한의 texp를 산출하는 최적화 과정이 선행되어야 합니다.

2. 감마 보정(₩Gamma)의 물리적 원리 및 비선형성 제어

이미지 센서는 물리적으로 입사되는 광량에 대해 완벽한 선형적(Linear) 응답을 보이지 않습니다. 특히 CMOS 센서의 경우, 포화(Saturation) 영역 근처에서의 비선형성이나 광전 변환 과정에서의 비효율성으로 인해 입력 광량과 출력 디지털 값(Digital Number, DN) 사이에 왜곡이 발생합니다. 이를 보정하기 위해 적용되는 것이 감마 보정(₩Gamma)입니다.

감마 보정은 출력 신호 Sout과 입력 광량 Sin 사이의 관계를 다음과 같은 거듭제곱 함수(Power-law function)로 정의하여 제어합니다.

$$S_{out} = \Gamma \cdot S_{in}^{\gamma}$$

여기서 ɣ는 감마 값(Gamma value)을 의미하며, 검사 시스템의 목적에 따라 다르게 설계됩니다.

1. **ɣ < 1 (Compression):** 어두운 영역(Shadow)의 디테일을 강조하여 미세한 결함이나 낮은 반사율을 가진 패턴을 검출할 때 유리합니다.

2. **ɣ > 1 (Expansion):** 밝은 영역(Highlight)의 포화 현상을 억제하고 고휘도 영역의 계조를 세분화할 때 사용됩니다.

반도체 웨이퍼 검사에서는 패턴의 경계면(Edge)에서 발생하는 회절광이나 산란광에 의한 명암 차이를 정확히 측정해야 하므로, ₩Gamma를 통한 정밀한 선형화 과정이 필수적입니다. 만약 감마 보정이 부적절하게 설계될 경우, 실제로는 존재하는 미세한 결함(Bridge, Missing Bump 등)이 센서의 비선형 구간에 갇혀 '정상'으로 오판되는 과검

방지(Under-kill) 문제가 발생할 수 있습니다 [출처: 매뉴얼HBMAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf].

3. 노광 설계 시 고려해야 할 통합 파라미터

최적의 노광 설계는 단순히 시간(texp)과 감마(₩Gamma)만을 고려하는 것이 아니라, 광학계의 전체적인 에너지 전달 효율을 포함한 통합적인 관점에서 이루어져야 합니다. 특히 고속 검사를 지향하는 차세대 장비에서는 다음과 같은 물리적 변수들이 노광 설계에 복합적으로 작용합니다.

설계 변수	기호	물리적 의미 및 영향
광속 (Luminous Flux)	₩Phi	단위 시간당 입사되는 총 광자 수. SNR의 직접적 결정 인자.
감마 보정 (Gamma Correction)	₩Gamma	센서 응답의 비선형성을 보정하여 선형적 데이터 확보.
위상차 (Phase Difference)	phi	간섭계 기반 검사 시, 패턴의 높이(Δ z)를 측정하는 핵심 변수.
재료 밀도 (Material Density)	rho	웨이퍼 및 패키지 소재의 광 투과율 및 산란 특성에 영향.
응력 (Stress)	sigma	웨이퍼 휨(Warpage)에 따른 초점 심도(DOF) 변화 및 광학적 왜곡 유발.

표 2. 노광 설계 시 고려해야 할 통합 파라미터

특히 HBM과 같이 고단으로 적층된 구조에서는 적층 시 발생하는 열팽창 계수 차이로 인한 응력(sigma)이 웨이퍼의 미세한 휨(Warpage)을 유발하며, 이는 검사 시 광로(Optical Path)의 변화를 초래합니다. 이러한 물리적 변동은 유효 노광량에 영향을 미치므로, 실시간으로 노광 조건을 보정할 수 있는 지능형 검사 알고리즘이 결합되어야 합니다 [출처: 매뉴얼HBM검사및테스트공정가이드라인20260509001.pdf].

결론적으로, 노광 시간 설계는 **'최소한의 texp를 통한 최대의 SNR 확보'**와 **'감마 보정을 통한 데이터의 선형성 및 동적 범위(Dynamic Range) 극대화'**라는 두 가지 목표를 동시에 달성해야 하는 정밀한 엔지니어링 과정입니다. 이는 단순한 이미지 획득을 넘어, 후속 단계인 AI 기반 결함 분류(AI-Driven Defect Classification)의 정확도를 결정짓는 데이터 품질의 근간이 됩니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

물리적 변수에 따른 공정 안정성 분석

웨이퍼 레벨 광학 검사(Wafer-level Optical Inspection) 공정에서 검사 정밀도와 데이터 신뢰성을 확보하기 위해서는 단순한 광학적 파라미터뿐만 아니라, 웨이퍼 및 패키징 소재의 물리적 특성을 반드시 고려해야 합니다. 특히 고집적 HBM(High Bandwidth Memory)과 같은 3D 적층 구조에서는 적층 과정에서의 열팽창 계수(CTE) 차이로 인한 물리적 변형이 광학적 신호에 심대한 영향을 미칩니다. 본 섹션에서는 재료의 밀도(rho)와 응력(sigma)이 광학적 특성 및 노광 결과에 미치는 상관관계를 분석합니다.

1. 재료 밀도(rho)와 광학적 투과성 및 산란의 관계

재료의 밀도(rho)는 광학 검사 시 광자가 매질을 통과할 때 발생하는 감쇠(Attenuation)와 산란(Scattering)의 정도를 결정하는 핵심 변수입니다. 웨이퍼 내부의 TSV(Through Silicon Via)나 Bump 구조를 검사할 때, 주변 박막(Thin film) 또는 절연막의 밀도 변화는 광학적 경로(Optical path)를 왜곡시킬 수 있습니다.

재료의 밀도가 높아질수록 단위 부피당 원자 수가 증가하며, 이는 광자의 산란 단면적(Scattering cross-section)에 영향을 주어 다음과 같은 물리적 관계를 형성합니다. 검사 시스템에서 감지되는 유효 광량(₩Phieff)은 재료의 밀도(rho)와 흡수 계수(α)에 의해 결정되는 지수 함수적 감쇠 모델을 따릅니다.

$$\Phi_{eff} = \Phi_0 \cdot e^{-(\alpha(\rho) \cdot d)}$$

여기서 d는 광 경로의 거리이며, α(rho)는 밀도 ₩rho의 함수로서 밀도가 증가함에 따라 일반적으로 흡수 및 산란 계수가 증가하는 경향을 보입니다. 특히 미세 패턴 검사 시, 재료 밀도의 불균일성은 국부적인 굴절률(n) 변화를 야기하며, 이는 위상차(phi)의 변동으로 이어져 이미지의 대비(Contrast)를 저하시키는 원인이 됩니다.

2. 응력(sigma) 및 변형률에 의한 광학적 왜곡 분석

반도체 패키징 공정, 특히 HBM의 적층 및 Thermal Profile 적용 과정에서는 소재 간의 열팽창 계수 차이로 인해 상당한 수준의 응력(sigma)이 발생합니다. 이러한 응력은 웨이퍼의 물리적 형상을 변화시키는 Warpage(휨) 현상을 유발하며, 이는 광학 검사 장비의 초점 평면(Focal plane)을 이탈하게 만드는 주된 요인입니다.

응력(sigma)과 변형률(epsilon), 그리고 탄성 계수(E) 사이의 관계인 후크의 법칙(Hooke's Law)은 다음과 같이 정의됩니다.

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

이때 발생하는 변형률(epsilon)은 웨이퍼 표면의 높이 변화(Δ z)와 관련이 있으며, 이는 광학적 위상차(phi)에 직접적인 영향을 미칩니다. 응력에 의한 기계적 변형은 광학적 경로 차이(Optical Path Difference, OPD)를 발생시키며, 다음과 같은 정량적 관계를 가집니다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta(OPD) \approx \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (n \cdot \Delta z(\sigma))$$

여기서 λ는 사용된 광원의 파장입니다. 즉, 응력(sigma)이 증가하여 변형률(epsilon)이 커지면, 웨이퍼 표면의 미세한 높이 변화 Δ z가 발생하고, 이는 위상차(phi)의 불규칙한 변동을 초래하여 검사 알고리즘의 결함 판정 오류(False Call)를 유발합니다. 특히 HBM의 경우, Die-to-Die 정렬 시 발생하는 Misalignment는 이러한 응력 기반의 Warpage와 결합되어 검사 난이도를 기하급수적으로 높입니다 [출처: 매뉴얼HBMAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf].

3. 물리적 변수와 검사 성능의 상관관계 요약

재료의 물리적 특성은 광학적 신호의 품질(Signal-to-Noise Ratio)과 직접적으로 연결됩니다. 아래 표는 물리적 변수가 검사 공정에 미치는 영향을 정리한 것입니다.

물리적 변수	주요 영향 경로	검사 결과에 미치는 영향
밀도 (rho)	흡수/산란 계수(α) 변화	광량(₩Phi) 감소 및 이미지 대비(Contrast) 저하
응력 (sigma)	Warpage 및 변형률(epsilon) 유발	초점(Focus) 이탈 및 위상차(phi) 왜곡
열팽창 (αCTE)	온도 변화에 따른 Δ z 발생	적층 구조의 정렬(Alignment) 불량 및 신호 불안정

표 3. 물리적 변수와 검사 성능의 상관관계 요약

결론적으로, 고정밀 광학 검사 장비의 설계 단계에서는 광학적 설계(Optical Design)와 더불어, 소재의 밀도와 응력에 의한 물리적 변동성을 수치적으로 모델링하여 이를 보정할 수 있는 알고리즘(예: AI 기반의 Warpage 보정)이 통합되어야 합니다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

물리적 변수 제어 및 검사 솔루션 매트릭스

	제어 난이도	솔루션 유형	핵심 지표
물리적 변수	● 핵심	◐	● 핵심
광학적 영향	◐	● 핵심	○
검사 대응 기술	● 핵심	● 핵심	● 핵심
수율 관리 요소	○	◐	● 핵심

Cressem · 결정론 렌더

그림 3. 물리적 변수 제어 및 검사 솔루션 매트릭스

처리량(Throughput) 최적화 전략

반도체 후공정, 특히 HBM(High Bandwidth Memory)과 같이 적층 구조가 복잡한 제품의 검사 공정에서 **처리량(Throughput, ₩Theta)**은 제조 원가와 직결되는 핵심 지표입니다. 검사 장비의 성능은 단순히 결함을 얼마나 잘 찾아내는가(Detection Capability)에 그치지 않고, 단위 시간당 얼마나 많은 웨이퍼 또는 다이(Die)를 처리할 수 있는가라는 생산성 관점에서의 최적화가 반드시 병행되어야 합니다. 본 섹션에서는 검사 정밀도와 생산성 사이의 상충 관계(Trade-off)를 수학적으로 모델링하고, 이를 극복하기 위한 최적화 전략을 분석합니다.

1. 정밀도와 처리량의 수학적 상충 관계(Trade-off) 모델링

광학 검사 시스템에서 검사 정밀도를 높이기 위해서는 더 높은 해상도(Resolution)와 더 높은 신호 대 잡음비(SNR, Signal-to-Noise Ratio)가 요구됩니다. 이를 달성하기 위해서는 이미지 센서에 도달하는 광자(Photon)의 수를 늘려야 하며, 이는 필연적으로 **노광 시간(Exposure Time, texp)**의 증가를 야기합니다.

검사 정밀도와 관련된 주요 물리적 변수를 기반으로 한 처리량 ₩Theta의 관계식은 다음과 같이 정의할 수 있습니다.

먼저, 검사 정밀도(P)는 노광 시간(texp)과 광량(₩Phi)에 비례하며, 다음과 같은 관계를 가집니다.

$$P \propto \sqrt{\Phi \cdot t_{exp}}$$

이때, 전체 공정의 **Tact Time(Ttact)**은 검사 시간(tinsp), 스테이지 이동 시간(tmove), 그리고 데이터 처리 시간(tproc)의 합으로 구성됩니다.

$$T_{tact} = t_{insp} + t_{move} + t_{proc}$$

여기서 검사 시간 tinsp는 요구되는 정밀도 P를 충족하기 위한 최소 노광 시간 texp에 비례하므로, 처리량 ₩Theta는 다음과 같은 반비례 관계를 형성합니다.

$$\Theta = \frac{1}{T_{tact}} \approx \frac{1}{k \cdot P^2 + t_{move} + t_{proc}}$$

(단, k는 시스템의 광학적 효율을 나타내는 상수)

위 식에서 알 수 있듯이, 검사 정밀도(P)를 높이기 위해 노광 시간이나 스캔 해상도를 높이면 분모인 Ttact가 급격히 증가하여 처리량 ₩Theta가 감소하는 전형적인 Trade-off 관계가 나타납니다. 특히 HBM과 같이 수천 개의 Bump와 TSV(Through Silicon Via)를 검사해야 하는 경우, 개별 결함에 대한 정밀도를 높이려 할 경우 전체 처리량이 급락하여 양산 라인의 병목(Bottleneck) 현상을 초래할 수 있습니다.

2. 변수 기반의 처리량 최적화 파라미터 분석

처리량을 극대화하기 위해서는 Ttact를 구성하는 각 요소별로 물리적·알고리즘적 최적화가 필요합니다.

가. 광학적 최적화 (Optical Optimization)

노광 시간(texp)을 줄이면서도 동일한 SNR을 유지하기 위해서는 광속(₩Phi)을 높여야 합니다. 이는 조명 시스템의 휘도를 높이거나, 고감도 이미지 센서를 채택함으로써 가능합니다. 하지만 과도한 광량은 웨이퍼 표면의 열적 변형이나 재료의 밀도(rho) 변화에 따른 굴절률 왜곡을 야기할 수 있으므로, 광량과 검사 안정성 사이의 균형이 필수적입니다.

나. 기계적·이동 최적화 (Mechanical Optimization)

스테이지의 이동 시간(tmove)을 줄이기 위해 고속 정밀 스테이지를 사용하지만, 이는 진동(Vibration) 문제를 야기합니다. 스테이지 이동 시 발생하는 물리적 응력(sigma)과 진동은 이미지의 블러(Blur) 현상을 초래하여 유효 노광 시간을 오히려 늘리는 결과를 낳을 수 있습니다. 따라서 스테이지의 가속도(a)와 정지 시 감쇠(Damping) 특성을 고려한 경로 최적화가 요구됩니다.

다. 데이터 처리 최적화 (Computational Optimization)

최근 AI 기반 검사 솔루션의 도입으로 데이터 처리 시간(tproc)의 비중이 커지고 있습니다. 딥러닝 기반의 결함 분류(Defect Classification) 알고리즘은 과검(Over-kill)을 줄여주지만, 연산 복잡도가 높습니다. 이를 해결하기 위해 FPGA 또는 GPU를 활용한 병렬 처리와 함께, 검사 영역을 실시간으로 필터링하는 'Region of Interest (ROI) 기반 스캐닝' 기술이 적용됩니다.

3. 처리량 최적화의 전략적 방향: Adaptive Inspection

최근의 선진 검사 장비는 고정된 파라미터로 전체를 검사하는 방식에서 벗어나, **적응형 검사(Adaptive Inspection)** 전략을 취하고 있습니다. 이는 다음과 같은 단계로 이루어집니다.

1. **Pre-scan 단계**: 저해상도 및 짧은 노광 시간으로 웨이퍼 전체의 거시적 패턴을 빠르게 스캔합니다.

2. **Targeting 단계**: Pre-scan에서 발견된 이상 징후(Anomaly)나 설계치와 다른 위상차(phi)가 발생하는 지점을 후보 영역으로 선정합니다.

3. **High-resolution Scan 단계**: 선정된 ROI에 대해서만 높은 광량(₩Phi)과 긴 노광 시간(texp)을 할당하여 정밀 검사를 수행합니다.

이러한 계층적 접근 방식은 전체 공정의 평균 처리량 ₩Theta를 유지하면서도, 결함 검출력(Detection Capability)을 극대화할 수 있는 가장 효율적인 방법입니다.

그림 4. Global Semiconductor Inspection Market Trend

4. 요약 및 설계 가이드라인

결론적으로, 검사 장비 설계 시 처리량 ₩Theta를 최적화하기 위해서는 단순히 속도를 높이는 것이 아니라, 물리적 변수들 간의 상관관계를 고려한 통합 설계가 필요합니다.

최적화 대상	물리적 제약 요인	권장 대응 전략
노광 시간 (texp)	SNR 저하, 광자 부족	고휘도 조명 및 고감도 센서(High-sensitivity Sensor) 적용
스테이지 속도 (v)	진동 및 응력(sigma) 발생	진동 제어 알고리즘 및 고강성 스테이지 설계
데이터 처리 (tproc)	연산 부하, 데이터 병목	AI 기반 ROI 스캐닝 및 하드웨어 가속(FPGA/GPU)
검사 정밀도 (P)	처리량(₩Theta) 감소	계층적(Hierarchical) 적응형 검사 프로세스 도입

표 4. 요약 및 설계 가이드라인

이러한 최적화 전략은 특히 HBM4와 같이 초미세 피치(Fine Pitch)를 요구하는 차세대 패키징 공정에서 수율(Yield)과 생산성을 동시에 확보할 수 있는 핵심 경쟁력이 될 것입니다.

결론 및 기술적 시사점

본 보고서에서는 웨이퍼 레벨 광학 검사 장비의 핵심 설계 요소인 광량 예산(Photon Budget), 노광 시간(Exposure Time), 그리고 물리적 변수에 따른 공정 안정성을 정량적 모델링을 통해 분석하였다. 차세대 반도체 패키징 공정, 특히 HBM(High Bandwidth Memory)과 같이 적층 구조가 복잡해지고 미세 피치(Fine Pitch)가 심화되는 환경에서는 기존의 Rule-based 검사 방식을 넘어선 통합적 설계 접근 방식이 필수적이다.

분석 결과에 따른 차세대 고해상도 검사 장비 설계를 위한 통합 가이드라인은 다음과 같다.

첫째, **광량 예산 및 신호 무결성 확보를 위한 정밀 설계**가 선행되어야 한다. 광자 수량의 흐름을 결정하는 광속 ₩Phi와 이미지 센서의 비선형 응답성을 보정하는 감마 보정 ₩Gamma 사이의 최적 지점을 찾아야 한다. 특히 미세 결함(Defect) 검출력을 높이기 위해 신호 대 잡음비(SNR)를 극대화하면서도, 과검(Over-kill)을 방지하기 위한 AI 기반의 결함 분류 알고리즘을 광학 엔진과 통합하여 설계해야 한다 [출처:

분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

둘째, **물리적 변수와 광학 특성의 상관관계 제어**가 수율 향상의 핵심이다. 웨이퍼의 재료 밀도 ₩rho와 열/압력에 의한 응력 ₩sigma는 광학적 위상차 ₩phi를 유발하여 이미지 왜곡의 원인이 될 수 있다. 따라서 검사 시스템은 단순한 이미지 획득을 넘어, 측정된 데이터를 바탕으로 공정상의 불량 원인을 역추적(Root Cause Analysis)할 수 있는 데이터 분석 솔루션을 포함해야 한다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

셋째, **생산성(₩Theta)과 검사 정밀도 사이의 수학적 최적화**가 요구된다. 검사 정밀도를 높이기 위해 노광 시간을 늘리면 처리량 ₩Theta가 감소하는 Trade-off 관계가 발생한다. 이를 해결하기 위해 고속 광학 엔진과 정밀 조명 제어 기술을 결합하여 Tact Time을 최소화하는 기술적 구현이 필요하다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

결론적으로, 향후 HBM4 및 Hybrid Bonding과 같은 초미세 공정 도입에 대응하기 위해서는 고해상도 광학 검사 기술과 AI 비전 기술이 결합된 **'지능형 통합 검사 플랫폼'**으로의 진화가 필수적이다. 이러한 통합 설계 가이드라인을 준수함으로써 검사 장비의 정밀도를 확보함과 동시에 고객사의 수율(Yield) 향상에 직접적으로 기여하는 차세대 솔루션을 구축할 수 있을 것이다 [출처: 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf].

참고 자료

1. [KR100292062B1 - 반도체 웨이퍼의 노광 시간 보정방법 - Google Patents](https://patents.google.com/patent/KR100292062B1/ko)

2. [KR101493133B1 - 노광 상태 평가 방법 및 노광 상태 평가 장치 - Google ...](https://patents.google.com/patent/KR101493133B1/ko)

3. [[반도체 공정] 노광 공정, 노광 장비 - Semicircuit](https://semicircuit.tistory.com/entry/%EB%B0%98%EB%8F%84%EC%B2%B4-%EA%B3%B5%EC%A0%95-%EB%85%B8%EA%B4%91-%EA%B3%B5%EC%A0%95-%EB%85%B8%EA%B4%91-%EC%9E%A5%EB%B9%84)

4. [반도체 웨이퍼에 대한 신속하고 저렴한 검사 - Nikon Industrial Metrology](https://industry.nikon.com/ko-kr/case-studies/rapid-low-cost-inspection-of-semiconductor-wafers/)

5. [High-sensitivity, high-throughput inspection of nanoscale defects using a laser ...](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399225008606)

6. [PDF Optical wafer defect inspection at the 10 nm technology node and beyond](http://www.ijemnet.com/article/pdf/preview/10.1088/2631-7990/ac64d7.pdf)

7. [Optical Wafer Inspection at Advanced Technology Nodes](https://ieeexplore.ieee.org/document/10221416)

8. [Review of Wafer Surface Defect Detection Methods - MDPI](https://www.mdpi.com/2079-9292/12/8/1787)

9. ac64d7.pdf (사내 자료)

10. 매뉴얼HBMAdvancedInspectionSyst20260509001.pdf (사내 자료)

11. 매뉴얼HBM검사및테스트공정가이드라인20260509001.pdf (사내 자료)

12. pdfHBMHighBandwidt20260508001.pdf (사내 자료)

13. pdfHBMHighBandwidt20260508002.pdf (사내 자료)

14. 분석_크레셈CRESSEM20260509001.pdf (사내 자료)

15. pdf_인하대학교컴퓨터공학과의배승환20260509001.pdf (사내 자료)
16. ProfessorSeungHwanBaeReport.pdf (사내 자료)
17. pdf1서론HBM시장의패러다임변화20260508001.pdf (사내 자료)