

마이크로 LED 디스플레이 전사(Mass Transfer) 공정 결함 검사 기술 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

마이크로 LED 디스플레이 전사(Mass Transfer) 공정 결함 검사 기술 분석 보고서	3
1. 개요 및 기술적 배경	3
2. 전사 공정의 주요 결함 유형 및 물리적 특성	3
3. 결함 검사 및 수율 평가를 위한 정량적 모델	4
4. 차세대 검사 기술 및 분석 방법론	4
5. 결론 및 향후 전망	5

마이크로 LED 디스플레이 전사(Mass Transfer) 공정 결함 검사 기술 분석 보고서

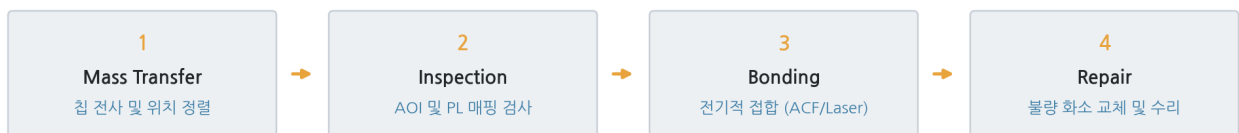
1. 개요 및 기술적 배경

마이크로 LED(μ LED) 디스플레이는 초고해상도, 고휘도, 장수명 특성을 바탕으로 차세대 디스플레이 시장의 핵심 기술로 주목받고 있습니다. 그러나 수백만 개의 미세한 LED 칩을 기판 위에 정밀하게 배치해야 하는 전사(Mass Transfer) 공정은 상용화를 가로막는 가장 큰 기술적 장벽 중 하나입니다. 기존 디스플레이 공정과 달리, 마이크로 LED는 개별 칩의 크기가 수십 μm 단위로 매우 작아 전사 과정에서 발생하는 미세한 위치 오차나 물리적 손상이 전체 디스플레이의 수율에 치명적인 영향을 미칩니다.

현재 마이크로 LED 제조 공정은 크게 전사(Transfer), 접합(Bonding), 그리고 불량 화소 수리(Repair)의 세 단계로 구분됩니다. 전사 공정에서는 칩을 기판으로 옮기는 과정에서 점착력(Adhesion)의 불균형이나 물리적 충격이 발생할 수 있으며, 접합 공정에서는 ACF(Anisotropic Conductive Film) 등을 이용한 전기적 연결 시 높은 압력이 가해져 칩이 파손되는 문제가 보고되고 있습니다 [출처: etri.re.kr]. 이러한 결함들은 육안으로 식별이 불가능하며, 고해상도 광학 검사 및 AI 기반의 머신비전 기술이 필수적으로 요구됩니다.

특히 8K 해상도 디스플레이를 기준으로 할 때, 수율이 99.99%라 하더라도 약 1만 개의 불량 화소가 발생할 수 있습니다. 만약 개별 화소를 수동으로 수리할 경우 한 달 이상의 시간이 소요될 수 있으므로, 전사 단계에서의 실시간 결함 검출과 고속 수리 기술의 확보가 경제성 측면에서 매우 중요한 과제입니다 [출처: etri.re.kr]. 따라서 본 보고서에서는 전사 공정의 주요 결함 유형을 분석하고, 이를 정량적으로 평가하기 위한 물리적 모델과 검사 기술의 현황을 고찰합니다.

마이크로 LED 제조 및 검사 파이프라인



Cressem · 결정론 렌더

그림 1. 마이크로 LED 제조 및 검사 파이프라인

2. 전사 공정의 주요 결함 유형 및 물리적 특성

전사 공정에서 발생하는 결함은 크게 기계적 위치 결함, 전기적 접합 결함, 그리고 소자 자체의 물리적 손상으로 분류할 수 있습니다. 전사 방식에 따라 결함의 양상이 달라지는데, 예를 들어 스탬프 방식은 점착 소재의 특성에 따라 균일한 압력을 전달하기 어렵고, 레이저 전사(LIFT) 방식은 칩의 회전(Rotation) 현상으로 인해 정렬 불량이 발생할 가능성이 있습니다 [출처: springer.com, sciencedirect.com].

2.1. 기계적 및 구조적 결함

가장 빈번하게 발생하는 결함은 칩의 위치가 설계된 좌표에서 벗어나는 Misalignment입니다. 이는 전사 시 스탬프의 압력 불균형이나 기판의 Warpage(휨) 현상에 의해 유발됩니다. 또한, 전사 과정에서 가해지는 과도한 압력은 마이크로 LED의 취성(Brittleness)을 자극하여 Micro-crack이나 Chipping을 유발하며, 이는 최종적으로

소자의 광학적 성능 저하로 이어집니다 [출처: etri.re.kr].

2.2. 전기적 및 광학적 결함

접합 공정 이후에는 전기적 연결 상태를 확인하는 것이 필수적입니다. Bump 또는 TSV(Through Silicon Via)의 연결 불량은 Missing Bump나 Bridge(Short) 결함을 형성합니다. 광학적으로는 발광 파장의 불균일성(Color Inhomogeneity)이 문제가 되는데, 이는 칩의 크기 편차나 전사 시 가해진 열응력에 의해 결정 구조가 변형되면서 발생할 수 있습니다.

3. 결함 검사 및 수율 평가를 위한 정량적 모델

전사 공정의 신뢰성을 확보하기 위해서는 결함의 발생을 단순 현상으로 파악하는 것을 넘어, 물리적 변수 간의 상관관계를 정량화해야 합니다. 다음은 공정 제어를 위해 활용될 수 있는 주요 정량 관계식 모델입니다.

3.1. 전사 수율 및 픽셀 결손율 모델

전사 공정의 최종 성공 여부를 결정하는 전사 수율(η)은 개별 칩의 전사 성공 확률과 기판의 정렬 정밀도에 의존합니다. 픽셀 결손율(Φ)은 전체 픽셀 수 대비 결함이 발생한 픽셀의 비율로 정의됩니다.

1. **전사 수율 (Transfer Yield, η):**

$$\eta = \prod_{i=1}^N [P_{\text{transfer}}(i) * P_{\text{alignment}}(i)]$$
 (P_transfer: 개별 칩 전사 성공 확률, P_alignment: 기판 정렬 정밀도)
2. **픽셀 결손율 (Pixel Defect Rate, Φ):**

$$\Phi = (N_{\text{defect}} / N_{\text{total}}) * 100 [\%]$$

3.2. 열응력 및 물리적 변형 모델

전사 및 접합 시 발생하는 열적 불균형은 소자에 잔류 응력을 남깁니다. 이는 칩의 파손이나 접합 위상의 변화를 초래합니다.

3. **열응력 (Thermal Stress, Σ):**

$$\Sigma = \alpha * E * \Delta T$$
 (α : 열팽창 계수, E: 영률(Young's Modulus), ΔT : 온도 변화)
4. **접합 위상 편차 (Bonding Phase Error, θ):**

$$\theta = \arctan(\Delta y / \Delta x)$$
 (Δx , Δy : 접합 위치 편차)

3.3. 광학적 성능 편차 모델

마이크로 LED의 색 순도와 휘도를 결정하는 발광 파장의 편차($\Delta\lambda$)는 공정 중 발생하는 물리적 변형과 밀접한 관련이 있습니다.

5. **발광 파장 편차 (Wavelength Deviation, $\Delta\lambda$):**

$$\Delta\lambda = \lambda_{\text{measured}} - \lambda_{\text{target}}$$
 ($\Delta\lambda$: 측정된 파장 편차)

4. 차세대 검사 기술 및 분석 방법론

마이크로 LED의 미세 결함을 검출하기 위해 최근에는 단순 AOI(Automated Optical Inspection)를 넘어선 고도화된 기술들이 도입되고 있습니다.

4.1. 고속 PL 매핑 및 멀티 스펙트럼 검사

PL(Photoluminescence) Intensity Mapping 기술은 칩에 빛을 조사하여 발광 강도를 측정함으로써, 전기적 연결 없이도 소자의 작동 여부를 판별할 수 있게 합니다. 최근 연구에 따르면 시간당 4인치 웨이퍼 6매 이상의 고속 매핑과 3 μ m 수준의 미세 결함(Defect/Micro-crack/Chipping) 검출이 가능한 AOI 장비가 개발되고 있습니다 [출처: scienceon.kisti.re.kr]. 또한, Multi-illumination(다각도 조명)과 Deep Learning을 결합하여 미세한 결함 이미지를 고품질로 확보하는 기술이 핵심으로 떠오르고 있습니다 [출처: sciencedirect.com].

4.2. AI 기반 비전 알고리즘 적용

기존의 Rule-based 검사는 미세한 노이즈와 실제 결함을 구분하지 못해 과검(Over-kill)률이 높은 단점이 있었습니다. 이를 해결하기 위해 LCB-YOLO와 같은 경량화된 딥러닝 모델을 활용하여 RGB 마이크로 LED의 결함을 실시간으로 검출하는 기술이 제안되었습니다 [출처: sciencedirect.com]. 이러한 AI 엔진은 픽셀 간의 공간적 의존성과 다중 스케일 특징을 학습하여 검사 정확도를 99% 이상으로 끌어올리는 데 기여합니다 [출처: scienceon.kisti.re.kr].

4.3. 검사 항목 및 기술 비교

검사 항목	주요 결함 내용	권장 검사 기술	비고
전사 정렬	Misalignment, Rotation	고해상도 AOI, Vision 알고리즘	좌표 정밀도 중요
전기적 연결	Missing Bump, Bridge	Electrical Test, 3D AOI	접합 신뢰성 평가
물리적 건전성	Micro-crack, Chipping	광학 현미경, SEM	파손 여부 확인
광학적 성능	파장 편차($\Delta\lambda$), 휘도 불균일	PL Intensity Mapping	색 재현성 평가
내부 구조	Void, Delamination	X-ray, CT (비파괴 검사)	내부 결함 확인

표 1. 검사 항목 및 기술 비교

5. 결론 및 향후 전망

마이크로 LED 디스플레이의 상용화를 위해서는 전사 공정의 수율(η)을 극대화하고, 결함 발생 시 즉각적인 수리(Repair)가 가능한 통합 검사 솔루션이 필수적입니다. 현재 기술은 고속 PL 매핑과 AI 기반 비전 검사를 통해 결함 검출력을 높이는 단계에 있으며, 향후에는 Hybrid Bonding과 같은 차세대 접합 기술 도입에 따른 초미세 간극 측정 기술이 시장의 주도권을 결정할 것으로 전망됩니다.

특히, 단순한 불량 검출을 넘어 검사 데이터를 기반으로 공정상의 불량 원인을 역추적(Root Cause Analysis)할 수 있는 스마트 팩토리 기반의 데이터 분석 솔루션이 고객사의 수율 향상을 위한 핵심 파트너 기술이 될 것입니다. 크레셈은 이러한 흐름에 발맞추어 고정밀 광학 엔진과 AI 알고리즘이 결합된 맞춤형 검사 시스템을 통해 차세대 패키징 시장을 선도할 것으로 기대됩니다.