

반도체 및 디스플레이 계측·검사(MI) 기술 동향

[한국반도체디스플레이기술학회 / 반도체·디스플레이협회]

1. 개요

가. 정의

□ 계측·검사 (Measurement & Inspection, MI) 기술은 반도체 제조공정에서 핵심 공정 중 하나로 꼽히며, 반도체 제조공정 중 소자의 물리적, 전기적 및 화학적 특성의 정상 여부를 확인하는 기술임

- 주로 광학을 활용하여 박막 및 광학 임계 계측, 오버레이* 및 웨이퍼 응력, 두께, 전도도, 성분 및 공정 중 발생하는 파티클 측정, 결함(defect, bridge, short 등)을 계측·검사·분석에 해당됨

*오버레이: 반도체 제조공정상 웨이퍼 표면에 여러 회로 패턴들의 적층 시 회로 패턴간의 수직방향 정렬도

- Metrology 계측 장비는 회로 선폭이나 hole의 직경, 박막의 두께, 오버레이 등 주로 크기나 길이, 부피등을 측정 하는 장비들이 속하며, 설비는 전자현미경(SEM), 원자현미경(AFM), ion mills, C-V 시스템, 간섭측정기, source measure units (SME) magnetometers, 광학 및 이미징 시스템, 프로파일러, 반사기, 저항측정 probes, resistance high-energy electron diffraction (RHEED), 및 X-ray diffractometers (XRD) 등이 포함됨

□ 계측/분석 기술은 각 공정에서 구현해야 할 성능과 균일성을 확보하는 검증 공정으로써 불량률 최소화하고, 수율을 향상 시켜 수율을 높이는 공정에 해당되므로 기업의 수익과 직결되기 때문에, MI, 계측 및 검사 공정 과정의 중요성이 커지고 있음

[반도체공정 단계 개념도]



나. 필요성

- 메모리(D램 및 3D 낸드) 및 로직반도체를 효율적인 비용으로 제조하기 위해서는 필름 두께 및 재료 특성이 정확하고 균일하며 제어 되어야 하며, 적층 layer간 수직 정렬, 선폭 및 Edge 프로파일이 제한 범위 내에 있어야 하고, 반도체 소자 수율에 문제가 되는 결함이 없어야 함. 따라서 반도체 측정/검사는 반도체 제조공정을 제어하는 데 필수적임
- 현재 한국이 압도적인 점유율로 세계 시장을 지배하고 있는 메모리 반도체, D램은 10나노미터급((나노미터·1nm는 10억분의 1m) 수준으로 선폭이 미세 공정 기술의 발전이 가속화 되고 있으며, 낸드플래시는 200단 이상의 고층화 구조로 가속화 되면서 공정 구현의 난이도가 극격히 올라가고 있음. 특히, 오버레이 정확도와 공정 중 발생하는 먼지(particle) 측정 관리 크기가 10나노급 사이즈를 관리 해야 하며, 생산 과정에서 수 나노급 선폭 및 결함 분석과 공정 중 발생하는 결함(Defect)은 먼지, 오염, 스트레스 검사, 분석 발견하는 것이 점점 더 어려워지고, 이에 따라 생산속도가 느려져, 수율 확보가 힘들어지고 있는 상황임

- 그동안 중요도에서 후순위로 밀렸던 반도체 계측·검사(MI) 공정이 D램, 낸드, 시스템LSI 반도체 제조 공정 기술 고도화와 함께 부각되고 있음
 - 특히, 적층 및 고종횡비(HAR) 구조가 일반화되면서 MI 기술이 팹 생산성을 좌우하는 수준에 달했기 때문임
- 반도체 제조 수율은 생산성으로 직결되어 경쟁력을 좌우하기 때문에 매우 중요한 문제이므로 따라서 지속적으로 계측/분석 기술인 MI의 중요성이 대두되고 있음.
- 계측/검사/분석은 성능과 처리량의 개선 정도가 다른 장비보다 느려서 반도체 회사들은 매일 생산되는 수만장의 웨이퍼에서 단순히 샘플링을 취해 제조 공정 데이터의 통계적 공정관리를 통해 수율과 품질을 최대화 할 수 있기 때문에 공정장비 구매외에 계측/분석 시스템의 설비 구매액 또한 높아 가고 있는 상황임
 - 장비 성능이 양산 수준을 겨우 넘어서거나 미달하는게 대부분이고, 처리량도 적어 MI 공정의 신뢰성을 확보하기 어려운 상황임
 - 반도체 소자업체는 웨이퍼의 모든 다이(Die)를 검사하는 대신 샘플링(Sampling)을 거쳐 일부만 검사하는 데 그침
 - 반도체 공정이 고도화되면서 적층 구조, HAR 구조 등 측정·분석해야할 게 점점 늘어나고 있는데다, 측정 단위와 정밀도도 나노미터 이하로 줄어들었기 때문임
 - 낸드 경우, 과거에는 각 레이어만 검사했다면 이제는 적층(stack) 이후 식각으로 뚫은 채널 홀의 바닥, 셀 구조, 콘택트(Contact) 결함 등을 모두 검사해야 하는 상황임
- 특히, 반도체 트랜지스터 크기의 축소화와 구조의 3차원화, 즉 3D

finFET, GAA MOSFETs, 3D NAND, advanced self-aligned multiple patterning, and EUV lithography 등의 기술과 함께 분석/계측 설비의 중요성과 필요성이 더욱 증가되고 있음

- 최첨단 공정에서 반도체 설계, 공정상의 오류를 미리 잡아내는 반도체 계측기술은 반도체 미세 공정이 10nm(나노미터·1nm는 10억분의 1m) 이하로 진화하면서 그 중요성이 더욱 부각되고 있는 추세이며, 이 기술은 첨단 반도체의 개발과 생산성 향상과도 직접적인 연관이 있는 만큼 삼성전자, 인텔, TSMC, SK하이닉스 등 주요 기업이 적극적인 투자를 단행하고 있는 상황임
- 최근 반도체 집적도가 높아짐에 따라 미세패턴 공정기술, 적층기술, TSV기술(Through Silicon Via) 등이 급속 발전하고 있음. 특히 반도체 집적도가 높아지고 동작클럭(RAM, 메모리 동작속도)이 증가함에 따라, 전통적 패키징 구조를 벗어난 wafer level packaging 기술도 상용화되고 있음

다. 범위 및 분류

(1) 가치사슬 및 용도별 분류

(가) 가치사슬

- 반도체 측정·검사 장비는 반도체 공정 대상품인 반도체의 검사를 위한 장비이며, 기능적 분류로는 전기적 특성을 평가하기 위한 장비, 결함을 검사하기 위한 검사장비, burn-in 시험을 포함한 신뢰성 검사장비, 그 외 넓은 의미로 공정진단 검사장비로 분류
- 기타 검사장비는 결함을 검사하기 위한 장치 등이 있으며, X-ray, SAM 등

의 장치가 포함될 수도 있음

- 반도체 검사장비의 확장개념으로서 능동적 검사장비는 반도체 공정장비의 진단장비가 포함될 수 있으며, 진단장비는 공정장비의 건정성을 검사하거나, 웨이퍼 형태의 센서를 이용하여 해당 공정 자체를 검사할 수 있음

[반도체 계측·검사 기술별 분류]

분 류		상세 내용
전 기 적 특 성 평가	RF & wireless test	<ul style="list-style-type: none"> • Spectrum, Noise, Gain, Bandwidth 등 측정 • Bluetooth, WiFi, Cell Phone, IoT 등 용도
	SoC & Analog test	<ul style="list-style-type: none"> • 논리 회로(Logic IC)의 기능 검사 • 메모리, SoC, Digital/Analog hybrid IC 등 디지털/아날로그 신호 처리 IC 검사
	핸들러	<ul style="list-style-type: none"> • 반도체 검사를 통한 품질 관리 • 반도체 이송 및 자동 측정, 산포에 따른 분류 제어
	Probe station	<ul style="list-style-type: none"> • 탐침(Probe), 제어, 센서 기술 등 • 반도체에 전기적 신호를 입출력하기 위한 탐침 및 자동 제어시스템이 결합된 장치
결 함 검 사	광학검사	<ul style="list-style-type: none"> • Defect, Pattern, Solder 등 검사 • 패턴의 이상 유무, 솔더의 형상, 기판 또는 반도체 표면의 결함 분석
	기타 비파괴 분석	<ul style="list-style-type: none"> • SAM(Scanning Acoustic Microscope), X-Ray 등 • 비파괴적인 방식으로 주로 패키지의 결함을 분석
신뢰성	Burn-in & reliability test	<ul style="list-style-type: none"> • ESD, HTRB(High Temperature Reverse Bias), HTOL(High Temperature Operating Life), H3TRB(High Humidity High Temperature Reverse Bias) Test 등
공 정 장 치 진 단	Monitoring	<ul style="list-style-type: none"> • 전류, 전압, 진동, 잡음(noise), 온도 등 • 공정장치의 건전성(prognostics) 평가를 통해 공정장치의 재현성, 품질 능동적 관리

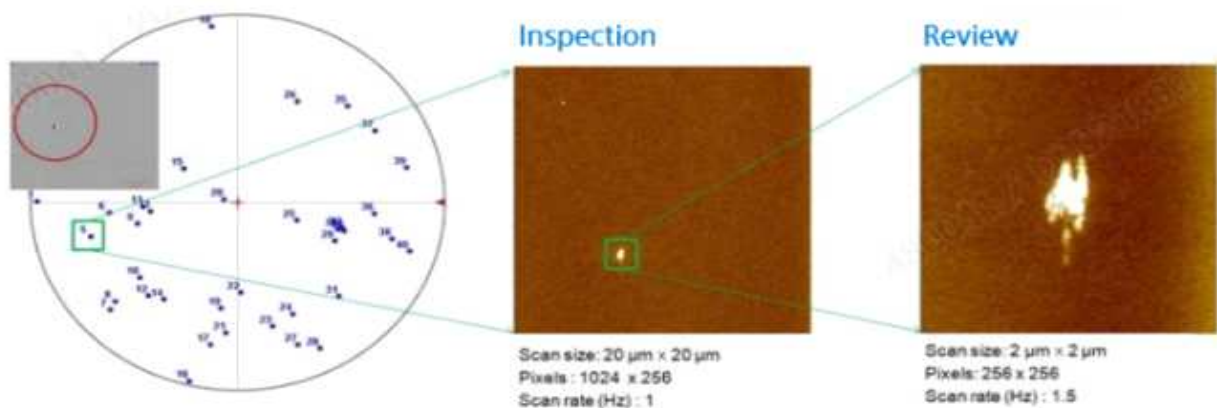
자료 : 중소기업 기술국산화 전략품목 상세분석

[반도체 계측·검사 연관 산업구조]

후방산업	반도체 계측·검사 장비 분야	전방산업
광학 레이저빔 레이저빔 신호 검출기 로봇 리니어 모터 제어시스템 S/W 이미징 프로세서	오버레이 SEM-CD 마스크 검사 및 계측 웨이퍼 검사장비 Ellipsometer spectroscopy 4-point Probe Particle 측정기 Surface measurement	D램 생산공정 NAND 생산공정 시스템반도체 생산공정 파운드리 생산공정

(나) 용도별 분류

- 반도체 제조공정은 웨이퍼를 사용해 집적회로를 구현하는 前공정과 반도체 웨이퍼를 개별 다이로 분리하고 패키지로 밀봉하는 후 공정으로 구분되며, 전공정과 후공정 완료 후 반도체 검사를 수행
- 전공정은 용도별로 Inspection, Metrology, 결함 리뷰 등으로 분류되며, 시장 규모는 Inspection>Metrology>결함 리뷰 순임
 - Inspection과 리뷰의 개념은 아래 사진과 같음



자료: 파크시스템

□ 검사 장비는 용도별로 크게 Particle 검사 및 리뷰, Mask 검사 및 리뷰, 결함 검사 등으로 분류 할 수 있음

● 전자현미경과 원자현미경 차이

구 분	전자현미경(SEM)	원자현미경(AFM)
특징	<ul style="list-style-type: none"> 진공에서만 사용 가능 정교하고 복잡한 시료 준비과정 필요 정량적 업체정보 측정 불가 전자빔에 의한 시료 손상 	<ul style="list-style-type: none"> 공기, 진공, 용액 안에서도 사용 가능 시료 준비과정 불필요 높낮이, 각도, 거칠기 등 정량적인 3차원 형상 정보 추출 높은 분해능과 해상도
업체	히타치, FEI, ZEISS, JEOL, KLA	파크시스템즈, 브루커, 옥스퍼드

자료: 파크시스템즈

□ Metrology 장비는 크게 세가지 종류 정도로 분류 할 수 있으며, Lithography Metrology 시장은 CD-SEM과 Overlay metrology 가 주요 함

1. CD (Critical dimension, 임계치수)

2. Overlay

3. Thin film 두께 (ellipsometry)

- CD라 함은 회로 패턴의 선 너비 및 홀 직경 등을 말하는 개념으로 패턴 사이의 거리를 의미함
 - 노광 공정 후 CD 측정 경우 Developed CD(DCD)라 하며, 패턴 식각후 CD 측정 경우 Etched CD(ECD) 라고 함
- 수평적 패턴의 균일함의 표현 개념은 CD 또는 CD 균일도이며, 수직으로 쌓아 올리는 패턴의 정확도는 Overlay 라고 할 수 있음

□ 웨이퍼 테스트는 전공정 완료 후 원형 웨이퍼 상에 형성된 다수의 개별 다이를 대상으로 특성을 검사하는 것으로, 탐침인 프로브를 반도체 웨이퍼에 형성된 개별 다이의 전극에 접촉시켜 전기신호를 인가하고 관찰하여 기능을 검사

- 패키지 테스트는 후공정 완료 후 개별 패키지로 밀봉된 개별 반도체 제품을 대상으로 특성을 검사하는 것으로, 반도체 제품을 임시로 고정하면서 전극을 연결해주는 IC 소켓에 개별 제품을 실장하여 기능을 검사하는 방식

2. 산업 분석

가. 산업 동향

- 전세계 계측·검사(MI) 장비 시장의 주요 기업은 KLA (미), Applied Materials (미), Onto Innovation (Rudolph Technologies Inc.) Thermo Fisher Scientific (미), 히타치하이테크(일), Nova Measuring Instruments (이스라엘), ASML Holding NV(네덜란드), Lasertec (일), JEOL (일), Nikon Metrology (일), Camtek (영국) 등이 차지하고 있음
- 국내 경우, 오러스테크놀러지, 파크시스템, 넥스틴, 나노메트릭스, 램크래프트, 이솔사 등이 있음
- 공정 계측 및 분석 시장은 아래와 같은 특징을 가짐

- 특징 1** 어려워지는 공정전환 속 수율 향상을 위한 다양한 파티클에 대한 검사, 검출에 대한 니즈 확대
▶ 스텝 증가 효과
- 특징 2**기술전환 속, EUV 도입에 따른 스텝 감소보다는 오히려 새로운 시장의 도입
▶ 더 작은 파티클에 대한 검사/검출 요구
- 특징 3**3D 구조 확대 속, 더 많은 Metrology에 대한 요구
▶ 정렬도, 미세화 정도 측정 등 요구 확대
- 특징 4**전공정 외 후공정에도 진입 확대
▶ Advanced packaging 및 PCB단에서도 다양한 변화들이 나타나며 관련된 inspection 장비에 대한 니즈 확대

자료: 삼성증권

- 반도체 트랜지스터의 지속적인 회로선폭 축소와 3D 구조 도입 및 EUV 포토 공정 도입은 웨이퍼 생산량의 증가뿐 아니라 공정에서 필요한 MI 설비 대수를 증가시키고 있음
 - 웨이퍼상에 형성된 패턴의 선폭 치수를 측정 하는데 사용하는 critical dimension scanning electron microscope (CD-SEM) 은 생산 제조공정 중의 한 부분이 되었음
 - 3D 낸드플래시 메모리 경우, 3차원 적층 단수가 높아짐에 따라, 층별 응력 발생이 심화되어 warp 및 stress 측정 횟수가 증가 되고 있음
- 아시아태평양 시장은 반도체 생산과 사용에 있어서 가장 크게 차지하고 있음. SIA 통계자료에 따르면, 아시아 태평양 지역이 가장 큰 시장이며, 중국은 단일 국가로 가장 큰 시장임
- 반도체 MI 장비 시장에서는 여러 분야에서 협력과 파트너십을 체결해 가고 있는 상황임
 - 2021년 7월, Shenzhen JT 자동 설비와 중국 칩 생산 톨 제조사는 Huawei's HiSilicon Technologies business와 5년간 법적 MOU를 체결하여 반도체 패키지 톨 개발을하기로 함
 - 히타치 하이테크는 최근에 초고속 결함분석기인 SEM*1 CR7300 개발 하였음을 발표함 CR7300은 review SEM의 최근 모델이며 defect의 초고속 리뷰로 생산성 향상에 기여 할 수 있을 것으로 기대됨
 - 특히, 전자광학을 토대로 초정밀 이미지를 취득하고 초고속으로 이미지 처리와 스테이지 시스템을 구현하여 종래 모델대비 2배 이상의 분석 속도를 구현 하였음
 - 또한, APAC 에서는 싱글레이어 박막 측정 시스템이 부족한 시장에서 클러스터 필름 데포지션 시스템 사용으로 인해 멀티플 레이어 필름 측정에 대

한 경향이 증가하고 있음

- 또한, FAB 생산업체들은 공정모니터 방법을 높은 원가와 웨이퍼 축소
에 직면한 검사 도적으로 인해 bare 웨이퍼에서 양산 웨이퍼로 변경하
고 있는 추세임
- KLA-Tencor 와 히타치하이크와 같은 큰 회사들은 고객의 혁신 기술을
사용하는 특정 시장에서 신생 중소기업과 경쟁을 벌이고 있음
- RTEC bare 웨이퍼 edge와 backside를 검사하는 신 제품인 NovusEdge를
개발 하였음. 반도체 업체들은 웨이퍼 당 더 높은 수율을 확보하기 위하여
edge exclusion area를 줄임으로써 원가를 줄이기 위해 Edge die yield 더
욱 중요해 지고 있기 때문임

나. 시장 분석

(1) 세계 시장

- 글로벌 반도체 검사장비 시장은 2020년 42억 63만 달러에 달하였으며,
2025년까지 연평균 8.9% 높은 성장을 이룩할 것으로 전망됨

[반도체 검사장비의 세계 시장규모 및 전망]

(단위 : 억 달러, %)

구분	'20	'21	'22	'23	'24	'25	CAGR
세계 시장	39.63	42.63	46.06	50.08	54.84	60.57	8.9

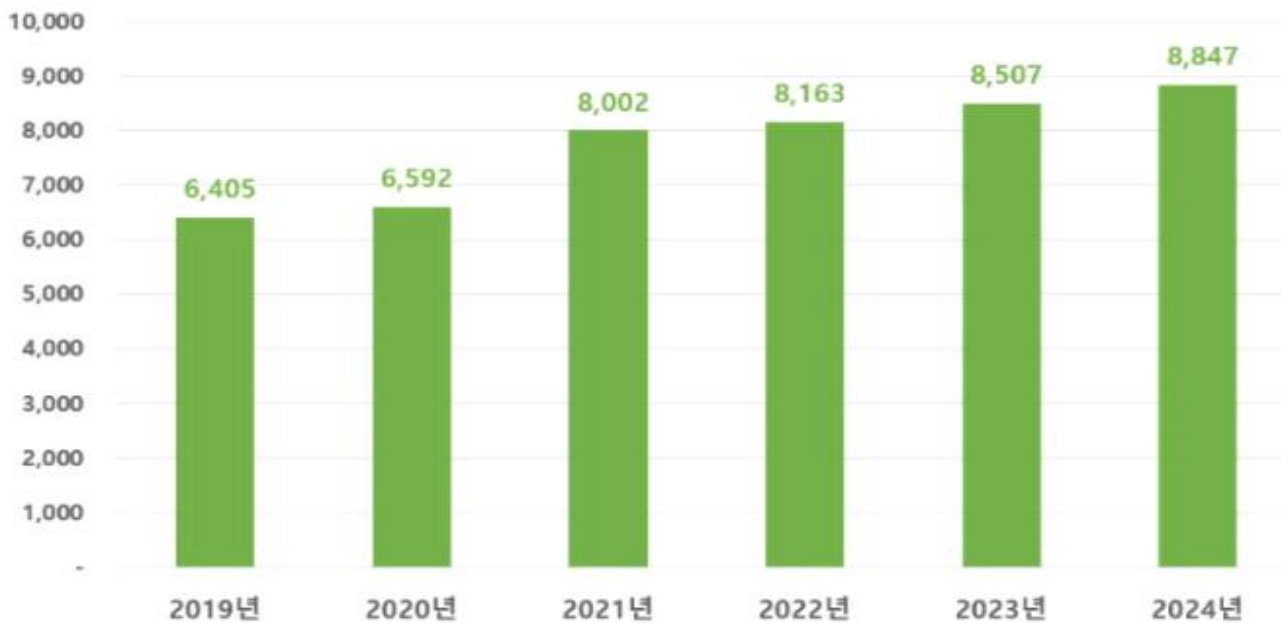
자료 : Technavio, Global Semiconductor Wafer Inspection Equipment Market (2020)

□ 공정관리 장비 시장 규모

- 2020년 기준 전체 66.4억\$ 이었던 공정 장비 시장에서 Metrology 장비군은 약 21억\$이며, 그 중 노광공정 관련 metrology 시장 규모가 19억\$ 에 해당 됨

	2018	2019	2020	CAGR 2019-2024
Lithography Metrology				
Overlay Metrology	516.3	508.5	545.4	5.6%
CD-SEM	627.5	538.0	545.3	5.1%
Mask Metrology	52.4	43.7	46.1	5.3%
Mask Inspection and Review	597.0	749.6	788.1	5.1%
Total Lithography Metrology	1,793.1	1,839.8	1,924.9	5.2%
Thin-Film Metrology				
Optical Metrology	915.7	810.8	853.3	6.0%
Other Thin-Film/Substrate Metrology	183.9	158.7	167.2	5.1%
Total Thin-Film Metrology	1,099.6	969.5	1,020.5	5.8%

● Overlay 시장 규모 및 전망



자료: Gartner 2019

(2) 국내시장

- 반도체 계측·검사장비 산업은 반도체 칩 업황에 크게 영향받으며, 반도체 소자업계의 설비투자 증감에 따라 계측·검사 장비의 수요가 크게 의존하게 됨
 - 또한 반도체산업은 4차 산업혁명의 필수 요소로서 거의 모든 산업에 적용되고 있으며, 우리나라 전체 수출의 약 20%를 차지하는 기간산업임
 - 4차 산업혁명에 기반한 다양한 신규 산업의 등장은 반도체산업의 성장을 더욱 촉진하고 있으며, 반도체산업은 전통적 수요처인 모바일 디바이스, PC, 서버 시장뿐만 아니라 AI, 빅데이터, 데이터센터, 자율주행, 5G 등 다양한 신사업에도 필수 요소로 자리매김하고 있음
 - 이러한 시장 흐름을 반영한 반도체 제조사의 장비 투자는 매년 계속하여 높은 수준의 투자가 이루어질 것으로 예상되어, 반도체 검사장비 산업의 성장세도 긍정적으로 전망되고 있음
- 향후에도 반도체에 대한 수요가 증가함에 따라 새로운 제조공장의 설립에 대한 투자가 증가하고 있으며, 신규 제조에 대한 투자 증가는 반도체 검사장비 수요를 견인할 것으로 전망됨
 - 또한, 업종별로 반도체 부품을 필요로 하는 장비개발 및 수요가 증가하는 것도 반도체 검사장비 시장을 촉진하는 요인으로 부각되고 있음
- NICE디앤비(2022.5) 자료조사에 의하면, 국내 반도체 검사장비 시장 규모는 2020년 2조 3,932억 원을 형성하였으며, 이후 연평균 8.9%의 높은 성장률을 나타내어 2025년 3조 6,721억 원의 시장을 형성할 것으로 전망함

[반도체 검사장비 국내 시장규모 및 전망]

(단위 : 억원, %)

구분	'20	'21	'22	'23	'24	'25	CAGR
국내 시장	23,932	26,071	28,402	30,941	33,708	36,721	8.9

자료 : NICE디앤비 (2022.5)

3. 기술개발동향

가. 연구 동향

(1) 최근 국산화 성공사례

- 미국이 중국에 대한 강력한 반도체 제재를 실행하면서 미국의 대표적인 반도체 계측회사인 KLA의 중국 수출이 막힌 가운데 아직 제재의 대상이 되지 않은 우리나라 기업의 대중국 매출이 늘어날 것이라는 전망
 - 통상 계측 장비의 경우 실제 미세공정의 발전을 직접 끌어올리기 보다는 이미 어느 정도 수준에 이른 기업의 생산성을 높이는 방향이기 때문에 대중국 제재에 해당되지 않을 가능성도 크다고 보기 때문임
- 반도체 분야의 소부장 중에서도 가장 높은 수준의 기술력과 연구개발이 필요한 반도체 계측장비 시장에서 삼성전자, SK하이닉스 등 대형 반도체 기업과의 R&D 협력을 바탕으로 미국, 일본 기업이 장악하고 있는 반도체 장비 국산화에 한국 기업들이 서서히 두각을 나타내고 있음
 - 2022년 11월 29일 파크시스템스 등 국내 반도체 계측장비 기업이 삼성전자, SK하이닉스 등 국내 대표 반도체 기업의 극자외선(EUV) 노광공정을 비롯해 최첨단 후공정(패키징) 등에서 비중을 높여나가고 있음

- 특히 삼성전자 파운드리사업부는 EUV 공정 장비와 찍을 이를 국산 계측장비의 검증을 조만간 완료할 예정이며, 첨단 후공정(패키징) 등에도 국산 장비 비중을 높이는 방향으로 방침을 정했음
- (파크시스템스) 특히 원자현미경(AFM) 기술로 국내 반도체 계측장비 부문을 이끌고 있는 파크시스템스는 삼성전자의 극자외선(EUV) 노광장비와 10nm 초반대로 달려가고 있는 D램 미세공정과 보조를 맞춰 장비 공급을 늘려나가고 있음
- 원자현미경은 1nm의 미세한 물질까지 관찰할 수 있는 장비이며, 파크시스템스는 반도체 장비 시장의 전반적인 불황 속에서도 급격한 성장을 이루어 나가고 있음
- (오로스테크놀로지) SK하이닉스와 오랜 협력 관계를 맺고 있는 오로스테크놀로지의 계측 장비는 삼성전자의 첨단 공정에 적용될 것으로 관측되며, 조만간 삼성전자는 오로스테크놀로지의 반도체 계측 장비를 검증해 도입을 결정한다는 방침임
- 중국의 반도체 기업으로도 계측장비 수출을 진행하며 한국뿐 아니라 해외 고객사로 포트폴리오를 다변화하고 있음

(2) 관련 연구개발 추진 사례

[반도체 계측·검사장비 분야 주요 연구개발 사례]

기관	소속	연구분야
AUROS Technology	기업부설 연구소 (자체개발)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 차세대 Overlay Metrology System 개발 (기간: '18년 09월 ~'21년 2월) ○ 8" Overlay Metrology System 개발(기간: '17년 01월 ~'19년 01월)
	기업부설 연구소 (산업부 국책 과제)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1x/2xnm 반도체의 300mm 포토 공정 오정렬 정확도 개선을 위한 공정변위 측정 및 분석 장비 개발(기간: '14년 11월 ~'16년 10월) ○ 광학이미지 획득방법을 이용하는 반도체 패턴 미소결함 고속 검사장비 기술개발(기간: '12년 6월 ~'16년 5월)
넥스틴	넥스틴 부설 연구소	<ul style="list-style-type: none"> ○ 차원 반도체 소자 제조 공정에 적합한 미소 패턴 결함 검사 장비개발(기간 : '12년 11월 ~'16년 9월) ○ 검출력 향상 위한 AEGIS-II 장비 개발(기간: '17년 ~'20년) ○ 3차원 공정결함 검사장비 개발(기간: '14년 11월 ~'16년 9월)
파크시스템스	기업부설 연구소 (나노융합 2020 국책 과제)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 고해상도 탐침형 형광/WLI 융합 현미경 개발 ○ 반도체 공정에서 30nm~100nm 크기의 결함 특성 분석을 위한 2세대 auto defect review 전용 AFM 플랫폼 개발 ○ 30nm이하 나노소자용 인라인 3D-AFM

자료 : 각기업 사업보고서

(3) 국내외 연구기관 기술개발 동향

□ 반도체기업들은 계측·검사 성능과 처리량의 한계를 극복하기 위해 다양한 노력을 기울이고 있으며, 인공지능(AI) 개발이 화두로 논의되고 있음. 특히, 각 장비에 AI를 도입하려는 추세임

□ SK하이닉스

- 삼성전자에 이어 최근 SK하이닉스도 AI를 도입, MI 공정을 자동화 진행 중임
- 원래 MI 공정은 장비가 찾은 결함을 사람이 직접 확인하면서 진행했으나,

각 결함(defect)의 형태에 따라 어떤 공정에서 문제가 있었는지 추측, 공정
에 반영하는 식으로 처리함

□ ASML

- 오버레이(Overlay) 계측을 위해 신경망(NN) 기술을 활용했고, 딥 러닝 기반 전자빔(E-beam) 계측 기술로 광학근접보정(OPC) 정확도를 높였음

□ KLA 텐코

- 이미지 분류 및 샘플 추출 작업에 머신러닝(ML)을 접목하고 있음
- 2021년 6월 고성능 자동화 MI 설비를 시장에 출시하였음
 - 8935 고생산성 patterned 웨이퍼 검사시스템
 - C205 broadband plasma patterned 웨이퍼 검사시스템
 - Surfscan SP A2/A3 unpatterned 웨이퍼 검사시스템
 - I-PAT inline defect part average testing screening 검사기

□ AMAT

- 2022년 OBM 모듈에 AI를 적용해 정확도를 높이고 있음
- 2021년 4월 Alx platform을 개발함
 - 공정 엔지니어들이 실시간으로 공정을 볼 수 있게 하였으며 웨이퍼와 개별 칩의 수백만 point를 측정하여 반도체 성능, 파워, 면적 코스트 및 타임투마켓(PPACT)를 향상 시킬 수 있는 수천개의 공정 변수를 최적화할 수 있는 platform 장비임
 - Alx platform을 모든 Applied Materials 공정 장비와 eBeam 분석시스템 및 검사 시스템에서 작동하게 하였으며 Lab에서 FAB으로 확장 사용이 가능한 수준임

□ 히타치 하이테크

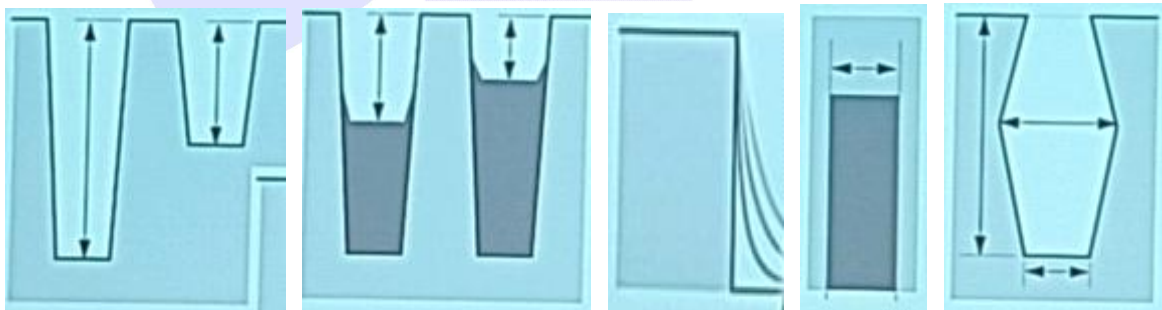
- 2022년 6월, 히타치하이테크는 'Hitachi Dark Field Wafer Defect

Inspection System DI2800' 개발하여 공표함. DI2800 는 초고속 분석기로, 20mm 웨이퍼상 defects과 파티클클을 규명하기 위해 설계 되었으며 고성능 및 고생산성으로 IoT 반도체 웨이퍼 및 100% 전수 검사에 필요한 자동화 설비임을 자랑함

나. 기술개발 이슈

□ 고정밀 3차원(3D) 구조 측정 기술

- 반도체 CD 측정에 가장 많이 활용되는 SEM 장비는 기존 2차원 SEM 장비에서 측정 계측 할 수 없는 3차원(3D) 구조물을 검사할 수 있는 3D-SEM으로 발전하고 있음
- 3D-SEM의 분석 목표: Trench depth & height, Recess depth, Slope angle, Inner pattern structure, 및 Negative profile MCD/BCD structure

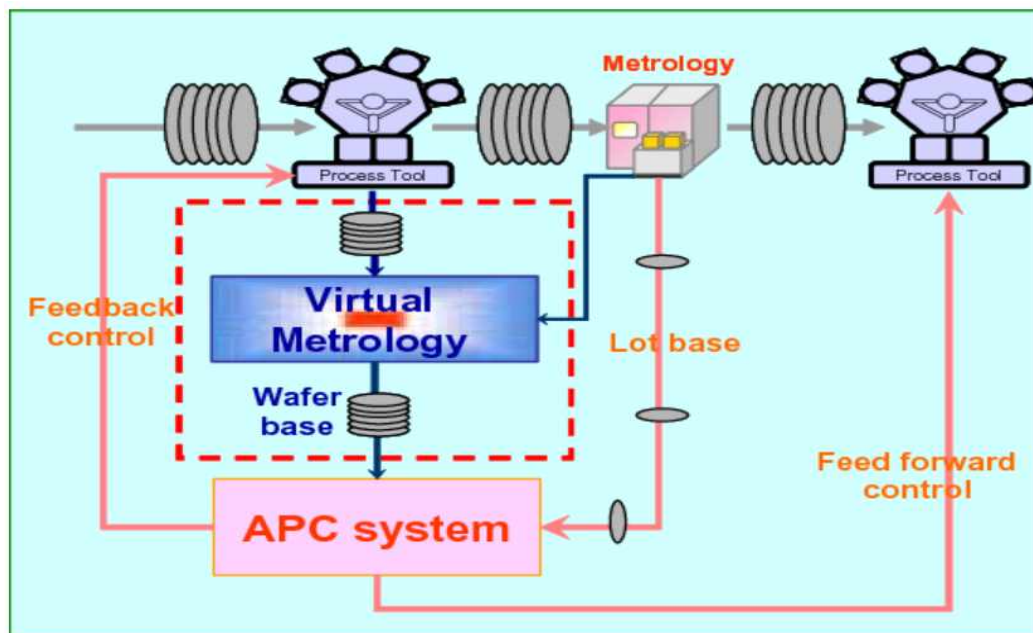


- Trench depth
- Recess height
- Slope angle
- Negative profile

- 3D 구조나 아래 빈공간(Bottom Void)을 측정하는 장비는 공정 가격이 비싸고 처리 속도가 느린 수직 SEM(VSEM)이나 투과전자현미경(TEM) 뿐임.
아예 MI 장비의 광원을 현 가시광선에서 진공 자외선(VUV)이나 적외선(IR), X선 등으로 바꾸려는 움직임도 일고 있음
- CD 측정 장비 중에서는 X선을 이용한 CD-SAXS(Small Angle X-ray Scattering)가 나왔는데 아직 처리량이 낮아 X선 광원의 출력을 높여야 하는 과제를 안고 있음

□ 낮은 성능과 적은 처리량(Throughput) 개선 기술: 가상화(Virtualization) 신기술 도입 통한 한계 극복

- MI 장비는 양산 라인에 적용 가능하기 위해서는 기본적으로 비용, 생산성, 비파괴, 도구 매칭 등을 충족해야 하기 때문에, 빠르고 효율적인 MI 기술에 대한 요구가 늘어나고 있는 상황임. MI의 역할은 공정의 좋고 나쁨을 판단하는 역할에 극한 되지만 미래에는 품질 예측까지 MI가 할 수 있는 기술 개발이 요구되고 있음
- 가상 계측은 직접 웨이퍼를 계측하는 게 아니라 공정 도구에서 올라온 생산 데이터를 가지고 가상 환경에서 계측을 수행하는 기술이다. 나온지는 오래됐지만 공정 장비에 들어가는 수만개의 센서가 균등한 성능을 가지고 있어야하는 등의 한계에 부딪혀 아직 연구개발(R&D) 단계임



가상 계측 기술의 모식도 (출처: IEEE)

다. 생태계 기술 동향

(1) 해외 플레이어 동향

□ KLA (미국)

- 미국 KLA는 반도체 검사 및 계측 장치 부문 세계 시장점유율 1위를 차지하고 있는 업체이며, 3세대 광대역 플라즈마 광원을 활용한 D6 패턴 웨이퍼 결함 검사 장치는 16nm 이하 반도체 생산 공정에 적용되는 검사 및 리뷰가 가능
- 첨단 로직 및 메모리 공정 노드의 실리콘 웨이퍼와 반도체 칩 제조 과정에서 장비와 공정 모니터링의 두 가지 핵심 난제를 해결할 수 있는 새로운 결함 검사장치를 개발하였음. Voyager 1015 시스템은 웨이퍼 재작업이 가능할 때 포토레지스트 형성 직후 리소그래피 셀 검사를 포함한 새로운 패턴 웨이퍼 검사가 가능
- KLA의 Dark-field 장비인 KLA9xxx 시리즈 제품이 업계 표준(Industry Standard)처럼 자리 잡고 있으며, 글로벌 시장을 100% 독점하고 있음.
- KLA가 2016년 출시한 KLA9850 모델 장비와 2018년 하반기 출시한 KLA9980 모델 장비는 검사 속도가 매우 빠른 최고 제품

□ Nanometrics (미국)

- 반도체 검사 및 계측 장치 전문업체인 미국의 Nanometrics는 빛을 이용해 반도체 구조를 살펴볼 수 있는 광학 임계선폭 (OCD, Optical Critical Dimension) 계측장비를 전문으로 생산하고 있으며, 국내 OCD 계측장비 시장에서 약 70%의 점유율을 차지하고 있음
- 반도체 미세공정 난도가 높아지면서 내부 구조 검사의 필요성이 증가하고, 식각을 비롯해 각종 화학증착(CVD) 공정이 추가되면서 OCD 계측장치의 수

요가 함께 증가하고 있으며, 최근 Nanomaterials는 빛의 파장을 더 길게 늘린 장파장(IR) 기술을 개발하고 있음

□ Applied Materials (미국)

- 미국 반도체 제조 장비 및 서비스, 소프트웨어 전문 기업이며, 반도체 장비 기업 중 매출액 1위 기업
- 1984년 미국 반도체 회사로는 처음으로 중국에 진출하였고, 반도체 생산 공정 가운데 증착 공정에서 강점을 지니고 있음. D램 수익률 개선으로 경쟁사 대비 우위를 점하고 있음
- 장비 판매뿐만 아니라 CRM 서비스 제공을 통해 고객사 공장에 대한 생산성 및 효율성을 컨설팅하여 Applied Materials의 장비에 대한 신뢰도를 형성함
- 10나노 이하 멀티패터닝, 핀펫 구성, D램 및 3D 낸드 소자에서 연구와 조사 수요를 충족시키기 위한 고분해능의 전자빔 장비 기술을 보유하고 있음. 차세대 노드(node)로의 변화를 꾀하고 있는 주요 파운드리, 로직, D램 및 3D 낸드 제조사가 필요로 하는 초고도 분해능(resolution) 및 이미지 품질을 가장 빠른 처리량으로 제공 가능
- 엔듀라(Endura) 물리기상증착(PVD) 시스템에 장착할 수 있는 내장형 계측기(OBM)를 출시

□ LAM Research (미국)

- 1980년에 David.K.Lam에 의해 설립되었으며, 제록스, 휴렛 팩커드, 텍사스 인스트루먼트 등에서 근무했던 데이비드 램(David Lam)은 더 좋은 플라스마 식각 기계의 필요성을 느끼고 회사를 설립하였고, 1981년 최초 플라스마 식각 기계인 AutoEtch 480을 출시

- 1990년대에는 아시아 각국으로 사업을 확장하였으며, 현재는 식각 장비 업계 1위를 차지
- 2021년 투자자 설명회에서 새로운 식각 기술을 발표, 하이드라 패터닝 시스템(Hydra patterning system)을 출시함으로써, 더블 패터닝에서 쿼드 패터닝으로 진화하는 것을 가능케 함
- HAR(high aspect ratio) 식각 기술을 통해 3D 낸드가 출시되는데 결정적인 역할 수행했음. 램리서치의 3D 낸드의 경우, 경쟁사에 비해 90% 많은 웨이퍼 프로세싱 경험을 보유하고 있으며, 높은 시장 점유율을 유지

□ Teradyne (미국)

- 미국 자동 테스트 장비(ATE)의 개발 및 공급 업체이며, 2015년 덴마크 회사 Universal Robots 인수
- Mobile Industrial Robots과 Energid를 인수하여 Autonomous Mobile Robots와 로봇 공학용 모션 제어 및 시뮬레이션 소프트웨어를 포함하도록 산업 자동화 사업을 확장
- 테라다인의 반도체 테스트의 경우 동 SOC(System on a Chip)의 테스트가 매출 증가를 주도

□ ASML (네덜란드)

- 1984년 필립스와 ASMI(Advanced Semiconductor Materials International)이 리소그래피에 집중하기 위해 세운 회사가 ASM Lithography이며, 추후 이것이 ASML의 출발이 됨. 이후 1986년 PAS2500 모델명을 가진 스테퍼(리소그래피 장비 중 하나)를 출시하면서 본격적인 비즈니스 시작
- 2012년 인텔은 극자외선 리소그래피 공정 개발을 위해 ASML 지분 15%를 인수하며, 41억 달러를 투자하였고, TSMC, 삼성전자도 비슷한 이유로 지분

을 투자

- 미국은 기술유출 방지를 위하여 ASML 장비의 중국 수출을 금지, 최첨단 공정은 전량 ASML 제조 시스템을 사용
- ASML에서 제작된 노광장비는 전 세계에서 가장 정밀한 기계장비 중 하나로, 이 장비 하나를 생산하기 위해서는 첨단 기술을 보유한 부품 공급업체를 확보해야 하며, 비핵심 R&D부분을 아웃 소싱함
- ASML에 공급하는 첨단업체로는 Tecnotion(선형 모터), Prodrive(전기 시스템), Aalberts(진동제어장치), BKL(특수 리프팅 장비), VDL(웨이퍼 핸들링 장비) 등이 있음
- 노광장비 트윈스캔(Twinscan)에 웨이퍼의 평탄도와 오버레이(Overlay)를 계측할 수 있는 모듈을 장착

□ ADVANTEST (일본)

- 일본 반도체 생산 자동화 장비 업체로 1954년 설립하였으며, Micro Micro Ammeter를 처음 제작
- 2000년 Asia Electronics, Inc.의 반도체 테스트 장비 사업부를 인수하였고, 2020년 미국 Essai, Inc.를 인수하여 고정밀 테스트 솔루션을 강화
- 주요 사업 분야로 SoC 테스트 시스템, 메모리 테스트 시스템, 메카트로닉 시스템 등으로 구성되어 있고, DRAM 및 NVM(비휘발성 메모리)부문에서 선도적 입지 확보

□ Hitachi High-Tech (일본)

- 일본 반도체 관련 매출 3위의 대기업이며, 기업(Hitachi)의 자회사로 주로 반도체 에칭 장비, 계측장비(CD-SEM), 그리고 결함 검사 장비를 생산

- 반도체 관련 주력 제품은 에칭 장비, CD-SEM, 웨이퍼 결함 검사 장비이며, 에칭 장비 중 플라즈마를 이용한 드라이 에칭 장비가 주력 제품
- 2021년 3월, 반도체 제조 장비의 생산 능력 확대 및 다양한 제품 라인업 개발 환경을 마련하기 위해 이바라키현 히타치나카에 공장 준공

(2) 국내 플레이어 동향

□ 넥스틴

- (주)넥스틴은 반도체 소자의 회로 제작공정에서 발생하는 미소 패턴 결함을 검출하는 웨이퍼 미소 패턴 결함 검사 장비를 제조 및 판매하는 전문기술 기업임.
- 국내 중소기업 중에 유일하게 이스라엘에 이미지 프로세싱 연구소를 설립하여 운영하고 있으며, 2014년 웨이퍼 미소 패턴 결함 검사장비인 AEGIS Wafer Inspection System의 시제품을 개발하여 독일 프라운호퍼 (Fraunhofer) 연구소와 함께 성능평가를 진행하여 제품 판매 성공하였음.
- 넥스틴은 유일하게 2차원 이미징 기술에 기반한 장비를 개발하였으며, 제품은 최대 검출 감도는 30nm, 최대 검사 속도는 300mm 웨이퍼 기준으로 시간당 40매로 최고 기술력을 가진 KLA 장비와 유사한 성능을 가지고 있음. 고객사는 메모리 업체와 시스템반도체 업체, 국외 업체 등 다양한 판매처를 확보하고 있음
- 2016년 SK하이닉스, 삼성전자, 동부하이텍으로부터 성능인증을 획득하였고, 2020년부터 중국 반도체업체에 제품을 공급하고 있음
- 넥스틴의 장비는 Bright-field 검사와 Dark-field 검사를 위한 광학 구성을 하나의 장비에서 구현하여 Bright-field 검사와 Dark-field 검사를 선택할 수

있는 복합 구성 장비(Combosystem)임. 사용 목적에 따라 광경로를 Bright-field 또는 Dark-field로 선택하여 검사를 진행할 수 있는 장점

- 넥스틴은 대면적의 빛을 다수의 CMOS 센서로 공간적 분할하는 2차원 이미징 기술을 세계 최초로 개발하였음. 이러한 2차원 이미징 기술은 최신의 이미지 프로세싱 기법인 딥러닝(Deep Learning)에 기반한 알고리즘 적용에 적합하여 향후 기술개발의 가능성이 매우 큼
- 또한 반사광을 이용하는 Bright-field 검사장비와 산란광을 이용하는 Dark-field 검사장비, 두가지 기술을 하나의 장비에 구현한 복합장비 (Combo-system)로서 사용자의 선택 다양성을 극대화하고, 특히 200mm Fab과 같은 중소형 고객사에게 많은 이점을 제공하고 있음
- 2차원 이미징 기술의 장점을 기반으로 다중 비초점면 검사기술(TSOM: Through-focus Scanning Optical Microscope)을 개발하여 미국, 일본 등에 해외 특허를 등록하였음

□ 오로스 테크놀로지

- 오로스테크놀로지는 반도체 제조 전공정 중 노광공정 장비인 Wafer의 MI(Metrology, Inspection) 장비 제조를 주력으로 사업하고 있으며, 원천기술을 다수 보유하고 있음. 오로스테크놀로지에서도 가장 많은 매출을 차지하는 Overlay 계측장비는 미세화 공정이 심화됨에 따라 요구 기술력이 급격히 높아져, 현재 오로스테크놀로지와 미국의 KLA만이 생산하고 있음
- 오로스테크놀로지는 2011년 국내 최초로 Overlay 계측 장비 국산화에 성공하였고, 이후 경쟁력 제고를 위해 High Performance AF System, High Precision Measurement Algorithm, Dual-band Color Filter, Tunable NA 등 다수의 핵심 기술을 지속적으로 개발하고 있음
- 오로스테크놀로지는 OVLAY 계측장비를 국내의 반도체 고객사에 성공적으로 납품하면서 실적이 큰 폭으로 증가하였으며, OVERLAY 계측장비 국산화

의 선두주자임. 이러한 Overlay 계측 장비는 300mm 웨이퍼 전용장비로 개발되었음. 반도체 회로패턴 미세화의 핵심이 되는 노광기술의 발전과 함께, 더 정밀한 수직적층 정렬도 계측을 위하여 2~3년마다 새로운 기술장비를 출시하고 있음

- 신규개발 장비는 반도체 제조공정에서 증착되는 박막(ThinFilm)의 두께를 옹스트롬(Angstrom) 단위의 정밀도까지 측정할 수 있는 초정밀 계측장비
- 오로스테크놀로지의 Overlay & CD 계측장비는 TSV(Through Silicon Via)라는 후공정에서 사용됨. 소정의 패턴이 형성된 웨이퍼 표면을 측정하는 방법에 있어서, 웨이퍼 상에 형성된 패턴으로 광을 조사하고, 상기 조사된 광이 상기 패턴에 반사되면, 그 빛과 초기 설정 값 사이의 비대칭한 정도를 수치화함
- Overlay 전용장비와 CD 겸용장비의 차이점은 적용 기술임. 초미세화된 장치에서 사용하는 CD 측정은 해상도가 다소 떨어지나 속도가 빠른 Imaging CD를 적용하고 있음. 그러므로 전공정에서 CD계측은 경쟁력이 없으나, 후공정에서는 SEM대비 속도 측면에서 경쟁력이 있고, 공정 마진이 충분하여 경쟁력을 갖추고 있음
- 성공적 연구개발 프로세스 관리를 위해 스테이지 게이트 모델(Stage-gate Model)을 적용하고 있음. 컨셉 도출, 타당성분석, 사전설계, 상세설계, 개발, 상업화 등 총 6개 단계로 이루어진 연구개발 프로세스에서 단계별로 산출물을 업데이트하고 리스크를 줄이려는 노력을 하고 있음
- 현재 Overlay 및 CD(Critical Dimension) 계측 장비 외 3대 반도체 계측 장비 부문의 마지막 하나인 Thin Film Metrology 장비개발을 통해, MI 장비 분야에서 전문성 제고를 꾀하고 있으며, 제품 다변화를 위한 연구개발을 진행 중에 있음

□ 파크시스템스

- 파크시스템스는 첨단 나노계측장비인 원자현미경(Atomic Force Microscope)을 개발, 생산하여 세계에 판매하는 벤처기업임. 원자현미경은 원자, 분자 수준의 분해능을 갖는 나노계측장비로서 미세한 구조물의 형상 측정과 특성 분석에 널리 활용되고 있으며, 나노기술 발전에 크게 기여하고 있음
- 파크시스템스의 제품은 크게 연구용 장비와 산업용 장비로 구분되며, 산업용 장비는 다시 생산공정용과 분석용으로 구분함. 연구용 장비는 고가대의 NX-Series 모델과 중저가대의 XE-Series 모델이 있음. NX-Series는 최신 기술이 적용된 고기능, 고사양 제품으로 제품의 성능이 탁월할 뿐 아니라 사용의 편의성이 매우 우수함
- 특히 NX-Hivac은 현재 시판되는 유일한 High Vacuum 원자현미경으로, 반도체 디바이스의 절단면과 같이 공기 중의 산소나 수분에 의해 시료 표면이 변환되는 경우 반드시 필요한 장비임
- 산업용 장비에는 생산 공정용 장비와 분석용 장비가 있음. NX-3DM도 생산 공정용 장비이며, CD(Critical Dimension) 계측, SWR(side wall roughness) 측정 등에 사용됨. NX-Wafer 장비는 반도체 생산공정의 모니터링 장비이며, 다양한 반도체 고객사들이 선호하는 장비임
- 2021년에는 WLI(백색광 간섭계)와 AFM의 장점을 상호 결합해 하나의 장비로 통합한 세계 최초의 하이브리드 솔루션인 NX-Hybrid WLI를 공식 런칭하였음. 이는 WLI 기술을 이용해 넓은 범위를 빠르게 측정하고, AFM으로 정밀한 측정이 가능하게 되어 AFM의 어플리케이션 확장을 기대하고 있음
- 2015년 2월에 유럽 벨기에에 위치한 imec 연구소와 차세대 반도체 생산공정용 원자현미경 개발을 위하여 공동연구개발 계약(Joint Development Project)을 체결하고, 2015년 6월부터 2018년 5월까지 3년간 공동연구개발을 진행하였음

- 3년간의 연구 결과, AFM장비가 Logic Si CMOS, EUVL, 3D Packaging 등 반도체 내의 다양한 분야에서 기존 장비들로는 측정에 한계점에 도달한 나노공정에서의 새로운 계측장비로서 가능성을 확인하였음
- 이런 성과로 2020년 2월 두번째 JDP를 체결하였으며, 향후 3년간 반도체 공정내의 CMP 공정 분야에서도 AFM의 활용방안에 대해 연구할 계획임. 이번 2차 JDP에서는 점차 미세화되고 있는 반도체분야에서의 다양한 과제를 NX-Wafer 제품을 통해 해결하는 데 초점을 두고 있음
- 이러한 IMEC과의 협업을 통해 산업용 시장의 요구를 모두 충족시키는 최상의 기술 솔루션을 제공하여, 원자현미경이 차세대 미세공정 검사장비로 가광 받을 것임. 또한 NX-Hybrid WLI를 비롯한 신규 장비들을 개발 및 런칭하는 등 다양한 어플리케이션에서 최상의 솔루션을 제공하기 위한 연구개발 활동을 이어나가고 있음
- 반도체 시장에서 사용되는 자동화 원자현미경은 기존의 Surface roughness 분석을 넘어, CMP공정으로 인한 dishing과 erosion의 정밀한 측정과 Wafer 전체 영역에서 균일도도 확인해주고 있음
- 삼성전자에 장비를 공급하고 있으며, 삼성전자의 다양한 Application 대응을 위한 AFM 공급도 기대하고 있음. 이밖에 NX-Hybrid WLI 등 고객에게 최상의 솔루션을 제공하기 위한 신제품이 출시되었으며, 디스플레이 산업에서의 수요도 증가하고 있음