

2024 상반기 유럽 반도체 연구 및 정책 동향

작성자: 오석윤(반도체 분야 KERC 서포터즈)

유럽은 기존 반도체 검사 장비가 가진 한계를 극복하기 위해 **극자외선(XUV) 광원을 활용한 새로운 검사 기술 개발에 집중**하고 있다. 기존 장비는 해상도, 속도, 3D 구조 검사, 민감도 및 비용 면에서 한계가 있으며, 특히 7nm 이하의 공정에서 미세한 결함을 검출하는 데 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 유럽연합(EU)은 **XUV 기술에 기반한 혁신적인 검사 장비를 연구**하고 있으며, 독일 Jena 지역을 중심으로 다양한 프로젝트와 연구가 진행 중이다. **고조파 생성(HHG) 및 테이블탑 XUV 소스 개발**을 통해 고해상도 검사와 효율성을 높이는 기술이 적극적으로 연구되고 있으며, 이는 반도체 제조의 정밀도와 생산성을 크게 향상시킬 것으로 기대된다.

<Key words>

극자외선(XUV/EUV) 광원, EUV 검사 장비, 고조파 생성 (High Harmonic Generation, HHG), Quantum Ghost 이미징, XUV Microscopy

1. 유럽의 반도체 연구 동향

□ 개요

- XUV 광원을 이용한 현미경 분야는 독일, 네덜란드, 프랑스를 중심으로 연구가 활발히 진행 중
- EU의 XUV 광원 활용 정책은 반도체 리소그래피의 혁신을 목표로 하며, 이를 위해 초미세 구조 분석, 고해상도 이미징, 나노미터 수준의 검사 기술 개발이 필요
- 대표적인 연구로는 네덜란드의 ASML과 독일의 Fraunhofer 연구소가 주도하는 프로젝트들이 있으며, 이들은 XUV 현미경 기술의 발전에 중요한 역할을 하고 있음

□ EUV Lithography (ASML) 프로젝트¹⁾

- 진행 시기 및 컨소시엄 구성
 - EUV 리소그래피 프로젝트는 2006년부터 ASML에 의해 시작
 - 여러 유럽 및 글로벌 반도체 기업, 연구소와의 협력으로 진행 중이며, Fraunhofer 연구소와 같은 주요 연구 기관들이 이 프로젝트에 참여

1) <https://www.asml.com/en>

- 세부 목적 및 활용 가능성
 - 7nm 이하의 반도체 칩을 제조하기 위한 EUV 리소그래피 기술 개발이 주요 목표
 - 이 기술은 반도체 제조 공정에서 높은 해상도와 정밀성을 제공하여, 미세한 패턴을 구현하는 데 필수적임
- 핵심 연구 및 현재 개발 단계
 - EUV 리소그래피는 현재 상용화 단계에 도달
 - ASML의 기술은 전 세계 반도체 제조업체에서 널리 사용
 - 하지만 EUV 광원의 안정성과 비용 효율성을 높이기 위한 추가 연구가 필요
- 향후 세부 활용 가능성
 - 이 기술은 향후 3nm 이하의 공정에서도 활용 가능할 전망이며, 반도체 제조의 최첨단 기술로 자리매김할 것으로 기대

□ MADEin4 프로젝트²⁾

- 진행 시기 및 컨소시엄 구성
 - 2018년에 시작된 이 프로젝트는 유럽 내 다양한 기업과 연구소로 구성
 - ASML, Fraunhofer 연구소 등이 주도하며, 반도체 제조 공정의 혁신을 목표로 함
- 세부 목적 및 활용 가능성
 - 3D 메트로로지와 데이터 분석을 결합한 기술 개발을 통해 반도체 생산성을 향상시키는 것을 주요 목적으로 함
 - 이 기술은 실시간으로 반도체 공정에서 발생하는 미세 결함을 검출하고 분석할 수 있음
- 핵심 연구 및 현재 개발 단계
 - MADEin4는 현재 초기 단계에서 상용화로의 전환을 준비 중
 - 반도체 제조 과정의 정확도와 효율성을 크게 향상시키는 데 기여하고 있음
- 향후 세부 활용 가능성
 - 이 기술은 고해상도 측정 및 데이터 분석을 통해 반도체 제조 공정의 오류를 최소화하고 생산성을 극대화할 수 있을 것으로 기대됨

□ XUV Microscopy 프로젝트³⁾

- 진행 시기 및 컨소시엄 구성
 - XUV Microscopy 프로젝트는 2019년부터 독일 Jena를 중심으로 진행 중이며, 유럽 내 여러 연구소와의 협력을 통해 이루어지고 있음
- 세부 목적 및 활용 가능성
 - XUV를 이용한 고해상도 현미경 기술 개발이 목표

2) <https://madein4.eu/>

3) <https://www.physik.uni-jena.de/en/iap/18073/xuv-imaging>

- 이 기술은 반도체 검사와 세포 관찰 등 다양한 분야에서 활용가능
- 핵심 연구 및 현재 개발 단계
 - 현재 연구 중이며, 세포 관찰과 반도체 검사에 대한 초기 결과가 긍정적으로 평가
 - 하지만 더 높은 해상도와 빠른 처리 속도가 요구됨
- 향후 세부 활용 가능성
 - 이 기술은 나노미터 크기의 구조를 고해상도로 관찰할 수 있는 중요한 도구로 자리잡을 것으로 기대됨

□ 극자외선 (XUV/ EUV) 광원 연구

- 극자외선 광원의 발전
 - (XUV 광원의 기술적 우위) XUV 광원은 10-100 나노미터의 파장을 가지며, 이를 통해 반도체 웨이퍼의 미세한 결함을 고해상도로 검출할 수 있음
 - (연구 성과) 독일, 프랑스, 네덜란드 등의 연구소들은 XUV 광원의 효율성을 높이기 위한 다양한 연구를 수행하고 있음, 특히, 네덜란드의 ASML은 이 분야에서 세계적인 선도 기업으로 자리잡고 있음⁴⁾
 - (기술적 도전 과제) XUV 광원의 발전에는 여러 기술적 도전 과제가 따름, 높은 출력을 유지하면서도 긴 수명을 확보하는 것이 주요 과제임
- 고출력 XUV 소스 개발
 - (고출력 광원의 필요성) 반도체 검사는 고속으로 진행되므로, 고출력의 XUV 광원이 필요함, 이를 위해 레이저 플라즈마 소스 및 하이브리드 소스 개발이 진행 중
 - (연구 동향) 최근 연구들은 레이저와 플라즈마의 조합을 통해 XUV 출력을 높이고 있으며, 이는 검사 속도를 크게 향상시키는 데 기여하고 있음⁵⁾
 - (구체적 사례) 프랑스의 ESRF 연구소는 레이저와 플라즈마 기술을 결합한 새로운 형태의 XUV 소스를 개발 중, 이는 반도체 웨이퍼 검사에서 높은 정밀도를 보장함⁶⁾

□ 반도체 검사 장비 개발

- 첨단 검사 장비
 - (검사 장비의 발전) 반도체 검사 장비는 나노미터 크기의 결함을 탐지하기 위해 정밀한 기술이 요구됨, 유럽의 연구소들은 고해상도와 높은 정확도를 제공하는 장비를 개발하고 있음
 - (혁신 사례) 독일의 Fraunhofer 연구소는 XUV 기반의 고해상도 검출기를 개발하여 반도체 제조 공정의 품질 관리 강화 추진⁷⁾
- 실시간 검사 시스템
 - (실시간 검사 필요성) 반도체 제조 공정에서는 실시간 결함 검출이 중요함, 이를

4) <https://www.asml.com/en/products/euv-lithography-systems>

5) <https://www.iof.fraunhofer.de/en/pressrelease/2023/euv-power-on-laboratory-scale.html>

6) <https://www.esrf.fr/>

7) <https://www.iof.fraunhofer.de/en/pressrelease/2023/euv-power-on-laboratory-scale.html>

위해 고속 XUV 검출 기술이 요구됨

- (연구 개발) 유럽의 여러 연구소들은 실시간 데이터 처리와 결합 검출을 결합한 시스템을 개발하고 있으며, 이는 생산성 향상에 크게 기여할 것입니다
- (첨단 알고리즘) 실시간 검사 시스템에는 인공지능(AI) 기반의 결합 검출 알고리즘이 포함되어 있음, 이는 결합 검출의 정확도와 속도를 높이는 데 중요한 역할 수행⁸⁾

□ Jena의 XUV/EUV 연구

<Carl Zeiss AG>



○ Carl Zeiss AG

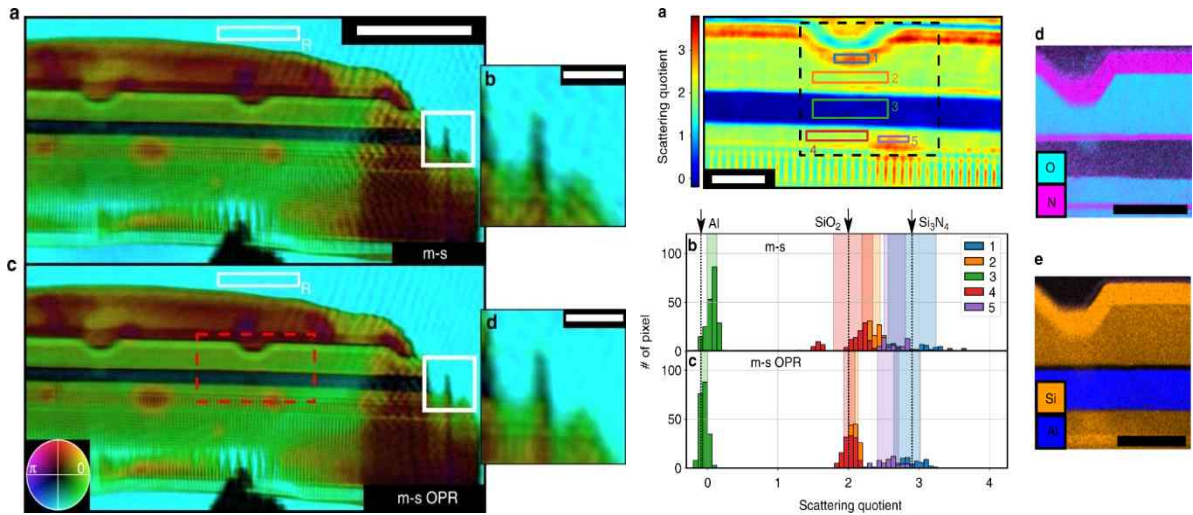
- 1846년 독일 예나에서 설립된 광학기기 제조사로, 네덜란드의 반도체 장비 제조업체 ASML에 XUV(EUV) 렌즈를 공급
- 이 렌즈는 극자외선(EUV) 리소그래피 장비의 핵심 구성 요소로서, 반도체 웨이퍼에 미세한 회로 패턴을 새기는 데 사용되며, 7nm 이하 공정에서 필수적인 기술로 반도체 제조의 정밀도와 생산성을 크게 향상시킴
- Ernst Abbe는 Carl Zeiss의 동료이자 독일의 물리학자로서 광학 이론의 발전에 크게 기여
- 그가 제안한 Abbe의 공식은 광학 해상도를 결정하는 중요한 식으로 현미경의 분해능이 광원의 파장과 개구수치(NA)에 의해 제한됨을 나타내며 고해상도 광학 기기 설계의 기초가 되었음

○ Jena에서의 혁신 연구

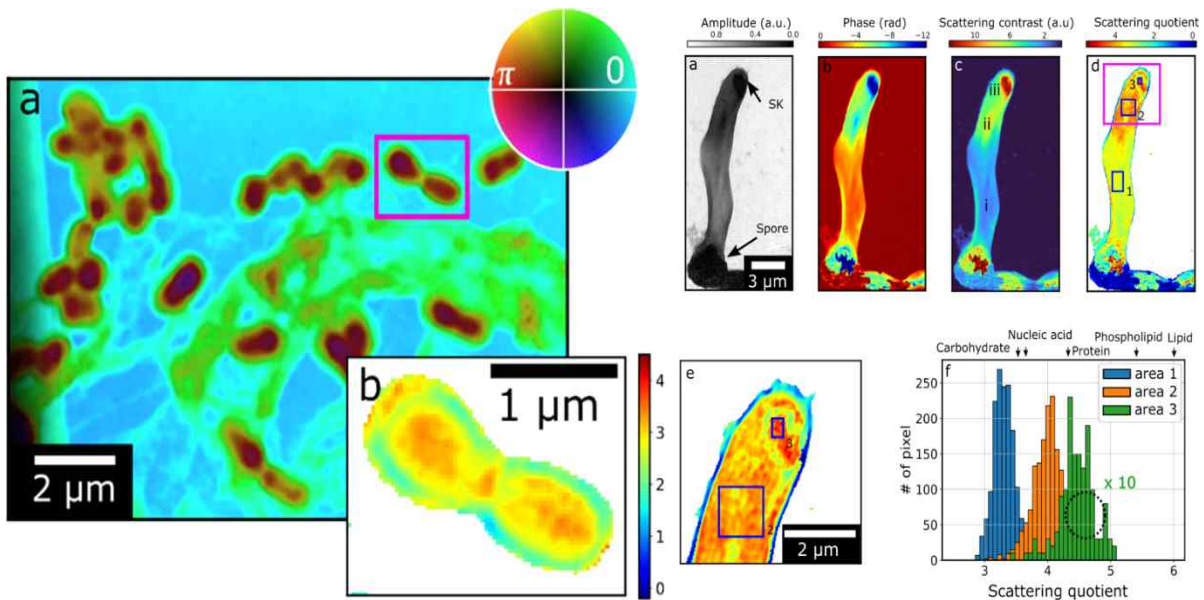
- (Jena의 연구 배경) 독일의 Jena는 광학 및 포토닉스 연구의 중심지로, XUV 및 EUV 광원을 활용한 다양한 연구가 진행되고 있음
- (반도체 검사 연구) Jena의 연구 기관들은 XUV 및 EUV 광원을 이용한 반도체 검사 기술을 개발 중이며, 이는 미세 결합 검출과 정확도 향상에 중점을 두고 있음
- (세포 관찰 연구) 또한, Jena에서는 XUV 및 EUV를 활용한 세포 관찰 연구도 활발히 진행되고 있음, 이는 생물학적 샘플의 나노미터 수준 구조를 고해상도로 분석할 수 있게 함

8) <https://madein4.eu/>

<Quantitative amplitude and phase imaging EUV of an integrated circuit. Material-specific EUV imaging⁹⁾>



<High-resolution EUV ptychography reconstruction of E. coli bacteria. High-resolution EUV image of A. nidulans¹⁰⁾>



○ 주요 프로젝트

- (프로젝트 예시) Jena의 주요 연구 프로젝트 중 하나는 EU의 Horizon 2020 프로그램의 지원을 받아 진행되고 있는 "XUV Microscopy"임, 이 프로젝트는 XUV를 이용한 고해상도 현미경 기술 개발을 목표로 함
- (협력 연구) Jena의 연구소들은 유럽 전역의 다양한 기관과 협력하여, XUV 및 EUV 기술을 반도체 검사 및 세포 관찰에 적용하고 있음, 이는 기술 개발의 시너지를 창출하고 있음

9) Eschen, Wilhelm, et al. "Material-specific high-resolution table-top extreme ultraviolet microscopy." Light: Science & Applications 11.1 (2022): 117

10) Liu, Chang, et al. "Visualizing the ultra-structure of microorganisms using table-top extreme ultraviolet imaging." Photonix 4.1 (2023): 6

□ 고조파 생성(High Harmonic Generation, HHG) 및 테이블탑 XUV 소스 개발

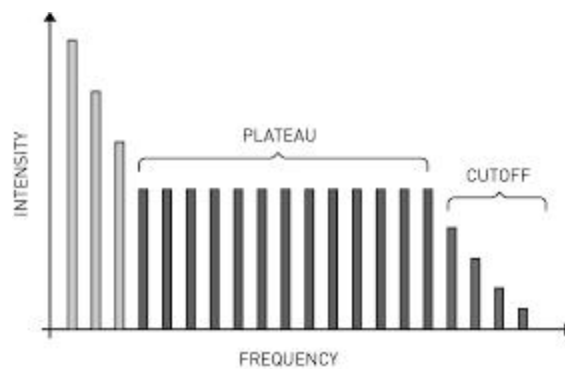
○ 고조파 생성 기술

- (기술 개요) 고조파 생성은 레이저와 물질의 상호작용을 통해 고차 고조파를 발생시키는 기술로, 이를 통해 넓은 스펙트럼의 XUV 빛을 생성할 수 있음
- (연구 동향) 유럽의 여러 연구 기관들은 고조파 생성 기술을 통해 고효율 XUV 소스를 개발하고 있으며, 이는 반도체 검사와 생물학적 응용에 중요한 역할을 함¹¹⁾

○ 2023년 노벨물리학상 수상

< 2023년 노벨물리학상 수상자 >

The Nobel Prize in Physics 2023



- 2023년 노벨 물리학상은 Pierre Agostini, Ferenc Krausz, Anne L'Huillier에게 수여되었음
- 이들은 초단파 레이저 펄스를 생성하고 이를 이용해 물질 내부의 전자 운동을 관찰하는 방법을 개발한 공로로 상을 받았음
- HHG 스펙트럼은 일반적으로 연속적인 저에너지 영역과, 일정한 고에너지 영역(플래토), 그리고 급격히 감소하는 컷오프 영역으로 구성됨, 플래토 영역의 고조파는 일정한 세기로 나타나며, 이는 실험에서 고에너지 광자를 안정적으로 얻는 데 유리함
- 이 기술은 반도체 검사, 생물학적 세포 관찰, 펨토초 및 아토초 물리학 연구 등 다양한 분야에서 응용되고 있으며, 특히 반도체 제조 공정에서의 미세 결함 검사에 큰 역할을 함

○ 테이블탑 XUV 소스

- (소형화된 XUV 소스) 테이블탑 XUV 소스는 대형 시설 없이도 실험실 환경에서 XUV 빛을 생성할 수 있는 소형화된 장비를 의미함
- (연구 성과) 독일의 Jena를 비롯한 유럽의 연구소들은 테이블탑 XUV 소스 개발에 주력하고 있으며, 이는 연구의 접근성을 높이고, 다양한 응용 가능성을 열어줌¹²⁾
- (응용 분야) 테이블탑 XUV 소스는 반도체 검사뿐만 아니라, 생물학적 샘플 분석, 나노 구조 연구 등 다양한 분야에서 활용될 수 있음

11) <https://www.iof.fraunhofer.de/en/business-fields/lasers/xuv-laser-sources.html>

12) <https://www.physik.uni-jena.de/en/iap/18040/coherent-imaging-in-the-xuv-and-soft-x-ray>

2. 유럽의 반도체 검사 정책 동향

□ 개요

- XUV 광원을 이용한 현미경 기술과 관련하여 유럽 내 주요 정책은 반도체 산업의 혁신을 촉진하고, 유럽이 글로벌 반도체 시장에서의 경쟁력을 강화하는 것을 목표로 함
- 이러한 기술은 특히 첨단 반도체 제조와 나노기술 분야에서 중요한 역할을 하며, 유럽연합(EU)과 주요 국가들은 관련 R&D 지원을 지속적으로 확대하고 있음
- 최근에는 유럽 반도체 전략(EU Chips Act)과 Horizon Europe 프로그램을 중심으로 XUV 기술에 대한 연구 지원이 강화되고 있음

□ 연구 자금 지원

- Horizon Europe 프로그램
 - (프로그램 개요) Horizon Europe(2021-2027), 은 유럽의 주요 연구 및 혁신 프로그램으로, XUV 광원과 관련된 반도체 검사 연구에 상당한 자금을 지원하고 있음. 2021-2027년 동안 약 955억 유로의 예산이 할당되었음
 - (주요 프로젝트) EUVPLASMA 프로젝트는 고효율 EUV Lithography를 개발하기 위해 150만 유로의 연구비 지원¹³⁾
 - (협력 연구) Horizon Europe은 EU 회원국 간의 협력 연구를 촉진하여, 기술 혁신을 가속화함. 이를 통해 다양한 연구 기관들이 공동으로 XUV 기술을 발전시키고 있음
- 유럽연구위원회(ERC) 지원
 - (ERC의 역할) ERC는 우수한 연구 프로젝트에 대한 자금을 제공하고 있으며, 이는 첨단 기술 개발을 촉진함. 특히, XUV 광원 연구에 집중하는 프로젝트들이 많은 지원을 받고 있음¹⁴⁾
 - (예산 할당) ERC는 XUV 관련 연구에 약 3억 유로를 투자하여, 혁신적인 검사 기술 개발을 촉진하고 있음
 - (우수 연구 지원) ERC의 지원을 받은 연구 프로젝트들은 세계적인 수준의 기술 개발을 목표로 하고 있으며, 이는 유럽의 기술 경쟁력을 높이는 데 기여

□ 산업 정책

- 반도체 산업 육성
 - (정책 배경) 유럽 연합은 반도체 산업의 경쟁력을 강화하기 위해 다양한 정책을 시행 중. 특히, 반도체 생산 능력을 증대하고, 기술 혁신을 촉진하는 것이 주요 목표

13) <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/projects-details/31045243/802648/H2020>

14) <https://erc.europa.eu/advanced-grants>

- (구체적 정책) 유럽 반도체 연합(European Semiconductor Alliance)은 반도체 기술 발전을 위한 협력 플랫폼을 제공하며, 회원국 간의 협력을 촉진함¹⁵⁾
- (산업 투자) 유럽연합은 반도체 제조 시설에 대한 투자를 확대하여, 글로벌 반도체 공급망에서의 유럽의 위치를 강화하고 있음¹⁶⁾

○ 연구 인프라 강화

- (인프라 투자) 유럽은 연구 인프라에 대한 투자를 확대하여, XUV 광원 기술 개발을 위한 첨단 연구 시설을 구축하고 있음. 이는 연구자들이 최첨단 기술을 활용할 수 있도록 지원함
- (사례 연구) 독일의 Helmholtz-Zentrum Berlin은 XUV 광원 연구를 위한 첨단 실험 시설을 운영하고 있으며, 이는 유럽 전역의 연구자들이 활용할 수 있음¹⁷⁾
- (국제 협력) 유럽의 연구 인프라는 국제 연구 협력을 촉진하며, 글로벌 연구자들이 유럽의 첨단 시설을 활용할 수 있도록 개방되어 있음

□ EU Chips Act

○ 개요

- EU Chips Act는 유럽의 반도체 산업을 강화하기 위한 중요한 정책으로, XUV 및 EUV 기술을 포함한 첨단 반도체 검사 장비와 제조 기술의 연구 개발을 적극 지원
- 특히, XUV 현미경 기술은 EU Chips Act에서 강조하는 핵심 분야 중 하나로, 나노미터 단위의 정밀 검사와 고해상도 이미징 기술을 개발하는 데 초점을 맞추고 있음
- 이러한 기술은 차세대 반도체 제조 공정의 정확도를 높이는 데 기여하고, 미세 결함을 빠르게 식별하는 데 필수적임

○ XUV 기술 지원

- EU Chips Act는 XUV기술이 유럽 반도체 제조업체에서 빠르게 상용화될 수 있도록 연구 및 개발에 막대한 자금을 지원
- 또한, EU Chips Act는 XUV 현미경 기술을 통해 7nm 이하의 공정에서 발생하는 미세 결함을 정밀하게 감지할 수 있는 검사 장비를 개발하는 데 목적을 두고 있음
- 이를 위해 유럽 내 주요 연구 기관과 기업들 간의 협력 프로젝트를 촉진하고, 연구 결과의 상용화 및 시장 진입을 가속화하고 있음
- 현재 XUV 기술의 높은 비용과 광원 안정성의 문제를 해결하기 위한 추가 연구가 필요하며, 이를 위한 유럽연합의 지원이 계속되고 있음
- 연구 중 발생하는 기술적 한계를 극복하고, 대규모 생산에 적용할 수 있는 방법이 주목받고 있음

○ 연구 프로젝트와 예산

15) https://joint-research-centre.ec.europa.eu/index_en

16) <https://www.imec-int.com/en/articles/high-na-euvl-next-major-step-lithography>

17) https://www.helmholtz-berlin.de/forschung/oe/be/operation-accelerator/index_en.html

- EU Chips Act는 XUV 현미경 기술을 포함한 연구 프로젝트에 대규모 자금을 할당하여, 유럽이 글로벌 반도체 공급망에서 중요한 역할을 할 수 있도록 하고 있음. 이를 통해 XUV 현미경 기술의 발전이 가속화될 전망
- 약 450억 유로의 예산 중 일부가 XUV 현미경 연구 및 관련 인프라 구축에 사용되고 있으며, 이는 차세대 반도체 제조 기술의 혁신을 이끌고 있음
- 주요 목표는 반도체 검사 공정에서의 고해상도 검사 및 결함 탐지 기술 개발임
- 기술의 복잡성, 비용 문제, 생산성 향상을 위한 추가적인 혁신이 요구됨
- 특히, XUV 기술의 상용화를 위한 인프라 구축과 안정성 확보가 중요한 과제로 떠오르고 있음

3. 시사점

- (기술 리더십 강화) 유럽은 XUV 광원을 이용한 반도체 검사 기술의 선도자로 자리매김하고 있으며, 이는 글로벌 반도체 시장에서의 경쟁력을 강화하는 데 기여함
- (산업 협력 촉진) 유럽의 다양한 연구 기관과 기업 간의 협력을 통해, 반도체 검사 기술의 혁신이 가속화함. 이는 전반적인 기술 발전에 중요한 역할을 함
- (지속 가능한 발전) XUV 기술은 에너지 효율적이고 환경 친화적인 반도체 제조 공정을 가능하게 하여, 지속 가능한 산업 발전에 기여함
- (정책적 지원 강화) 유럽의 연구 및 산업 정책은 지속적으로 XUV 기술 개발을 지원할 것이며, 이는 장기적인 경제 성장과 기술 혁신을 촉진함