

Semiconductor Business and EUV Lithography

Jinho Ahn

Professor, Materials Science and Engineering, Hanyang University

Director, EUV-IUCC (Industry-University Collaboration Center) : <https://euv-iucc.org>



HANYANG UNIVERSITY



**We live in a time of
integrated connectivity**

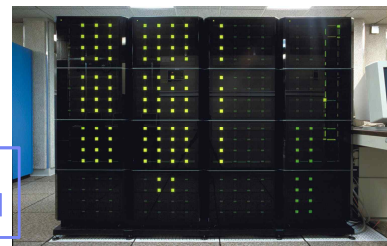
2006

3

내 손안의 슈퍼 컴퓨터: 스마트폰



1985년
CRAY-2 슈퍼컴퓨터



1994년
인텔 Paragon 슈퍼컴퓨터



2010년 iPhone 4
CRAY-2보다
우월한 성능

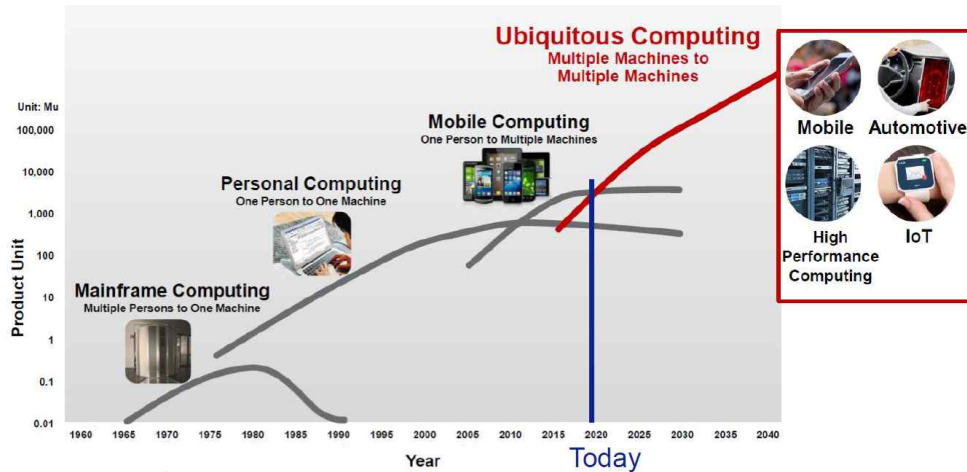
2014년 Galaxy S5
인텔 Paragon보다
우월한 성능





Mobile 컴퓨팅에서 Ubiquitous 컴퓨팅의 시대로 ..

1천억개 이상의 장치에서 무제한의 데이터 생산



Source: Min Cao, TSMC, "Semiconductor Innovation and Scaling, a foundry perspective", China Semiconductor Technology Conference, Shanghai, March 2019

7

반도체 기술을 이용한 Connected Service

2024년까지 반도체 소모량 두 배



Source: Optics & Photonics, Texas Instruments

자동차 센서/반도체들은 전세계에서 1초에 백만개 이상의 데이터를 제공하며 자율주행을 가능하게 함

8

세계의 가장 소중한 자원

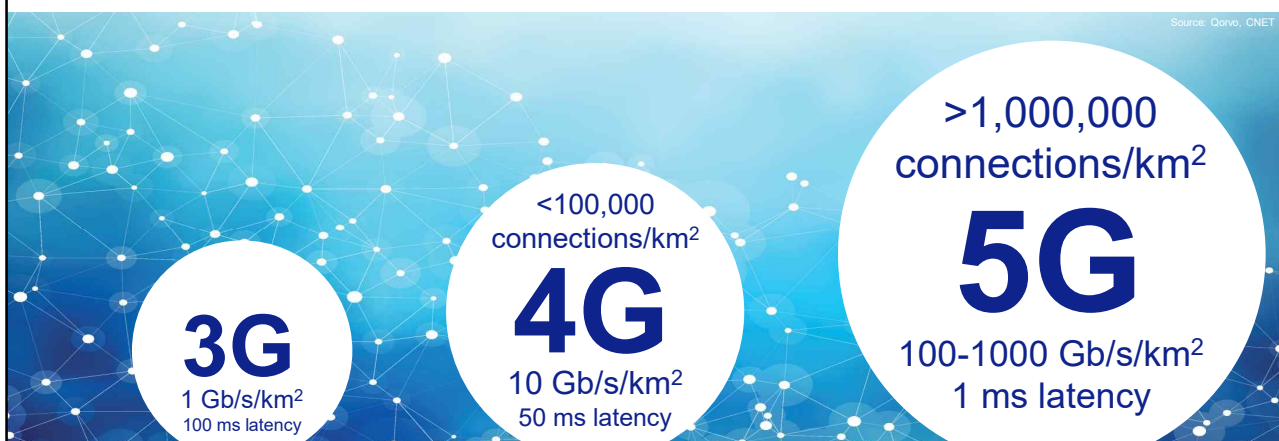


Source: The Economist, May 2017

9

통신 속도와 지연시간의 개선 더 많은 실시간 응용을 가능케 하는 요인

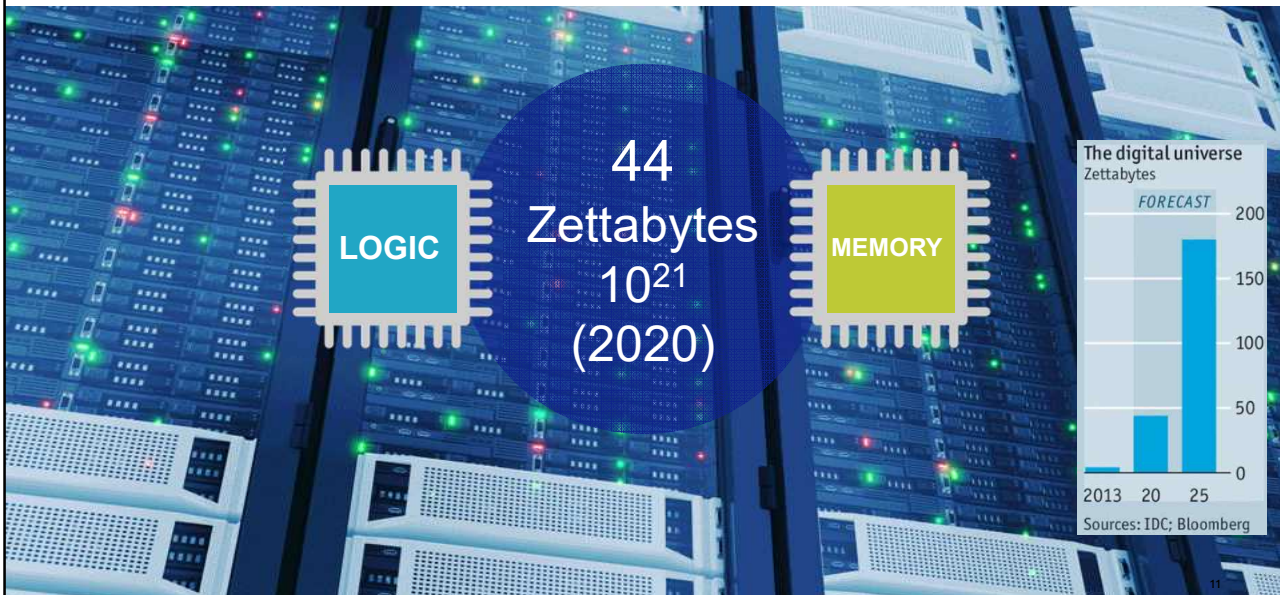
Source: Qorvo, CNET



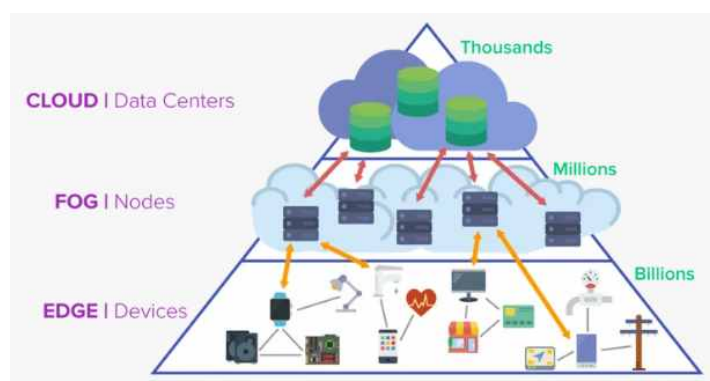
2시간 분량의 영화를 스마트폰에 다운받는 시간:
3G @ 26 hours, 4G @ 6 minutes, 5G @ 3.6 seconds

10

이러한 막대한 데이터를 저장하고 처리할 수 있는 반도체칩이 필요



Cloud Computing & Edge Computing

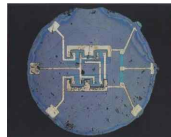
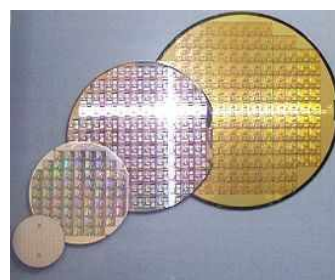
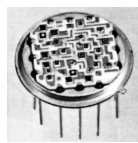
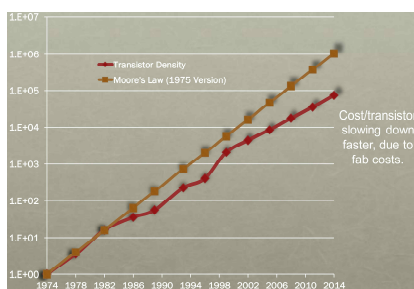


- 클라우드 컴퓨팅의 문제 – 데이터 보안 위험, 성능 문제, 증가하는 운영비용
게다가 저장된 데이터의 극히 일부만 활용 (waste of resources and storage spaces)
- 엣지 컴퓨팅 – 단말장치 차제에서 데이터 처리

Slide 13

Semiconductor Industry

1950-2020: 70년간 미세화를 기반으로 경제성 구현



경쟁 포인트: 성능/단가, 1개의 웨이퍼에서 더 많은 칩을 더 싸게 만들기 위한 경쟁

1960-2005: 작게 만들수록, 수익도 개선되고 개별 소자의 성능도 비례하여 개선 되는 시기

2005-2025: 시스템 집적기술을 개선하여 시스템 성능 경쟁

80년대 중반: 미-일 반도체 전쟁

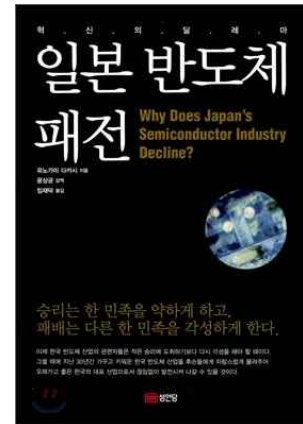
1984년 Intel과 TI, 메모리 산업에서 철수

(인텔 CPU, TI - DSP(digital signal processor) 중심으로 전환)

미-일 반도체 협정 (미국 반도체의 일본내 점유율 10% → 20%)

1987년 SEMATECH 결성: 제조기술 표준화

일본은 90년대부터 personal computer 시장을 중심으로 저가 메모리를 앞세운 한국의 추격 허용
일본은 왜 한국의 추격을 허용하고, 미국을 극복하지 못했을까?



- 일본 반도체 몰락: 일본 반도체 기업들이 고사양 메모리 중심으로 80년대 후반 PC시장향 저가메모리 시장 대응 실패, 기술중심 경영의 문제
- 미국의 통상압력, 한국의 집중투자로 가격경쟁력 상실 (인력수급문제) → 기술경쟁력 상실
- 제조 중심 산업으로 반도체 설계 원천기술 확보 실패 (팹리스 산업부진)
- 고급인력의 지속적 유입과 유연한 신기술 도입이 한국의 성공요인

15

반도체 산업구조의 변혁

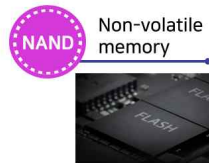
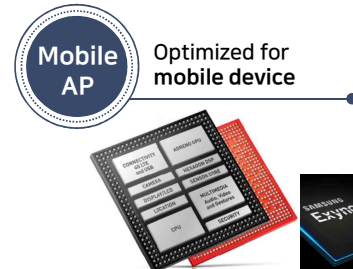
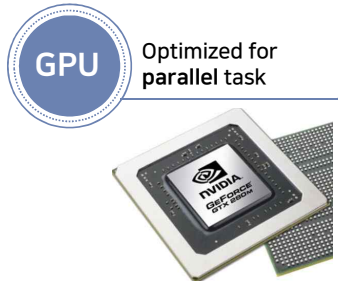


| | 1993 | | 2000 | | 2006 | | 2016 | | 2017 | | 2018 |
|------------|------|----------|------|-----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|
| Intel | 7.6 | Intel | 29.7 | Intel | 31.6 | Intel | 55.0 | Samsung | 62.0 | Samsung | 78.5 |
| NEC | 7.1 | Toshiba | 11 | Samsung | 19.7 | Samsung | 40.4 | Intel | 61.4 | Intel | 66.9 |
| Toshiba | 6.3 | NEC | 10.9 | TI | 13.7 | Qualcomm | 15.4 | SK Hynix | 26.6 | SK Hynix | 36.8 |
| Motorola | 5.8 | Samsung | 10.6 | ST | 10 | Broadcom | 15.0 | Micron | 22.8 | TSMC | 34.2 |
| Hitachi | 5.2 | TI | 9.6 | Toshiba | 9.9 | SK Hynix | 14.7 | Broadcom | 17.3 | Micron | 31 |
| TI | 4 | Motorola | 7.9 | Renesas | 8.2 | Micron | 13.5 | Qualcomm | 16.9 | Broadcom | 18.5 |
| Samsung | 3.1 | ST | 7.9 | Hynix | 7.4 | TI | 12.8 | TI | 12.8 | Qualcomm | 16.4 |
| Mitsubishi | 3 | Hitachi | 7.4 | Freescall | 6.1 | Toshiba | 9.9 | Toshiba | 11.9 | Toshiba | 14.9 |
| Fujitsu | 2.9 | Infineon | 6.8 | NXP | 5.9 | NXP | 9.3 | NXP | 8.9 | TI | 14.9 |
| Matsushita | 2.3 | Philips | 6.3 | NEC | 5.7 | MediaTek | 8.8 | NVIDIA | 8.6 | NVIDIA | 12 |



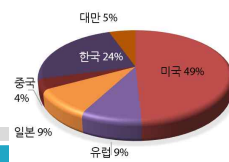
16

새로운 반도체의 출현



CPU+GPU+ISP..
(System-on-chip)

전체 반도체 (~516조)



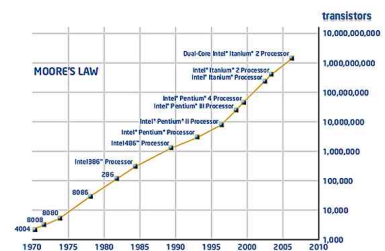
메모리 (~157조)



시스템 반도체 (~277조)



집적(Integration) 기술은 반도체 산업의 성장동력



Apple이 반도체 회사?



A12 Bionic Chip

- 초당 5조회의 연산 가능
- 총 69억6000만개의 트랜지스터
- 7나노미터(nm, 10억분의 1m) 공정에서 제조
- 6코어 CPU + 쿼드코어 GPU + 기계 학습용 Neural Engine
- 고성능 코어의 성능은 이전보다 15% 향상
- 소비 전력은 40% 저감

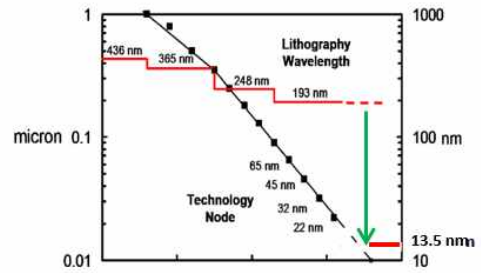
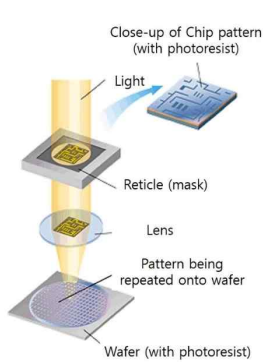
대만 반도체 파운드리 TSMC에서 독점 공급

19

Key Technology: Lithography

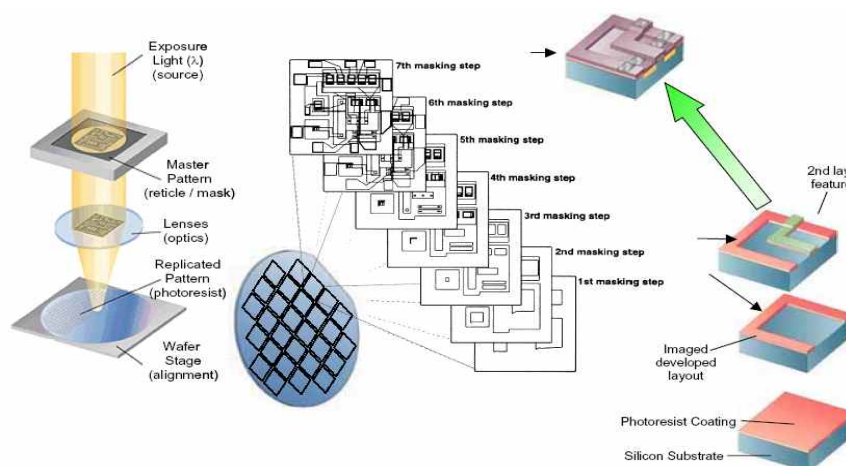
반도체 집적화의 핵심 : 노광공정 (Lithography)

- 포토리소그래피 - 빛을 이용해 마스크의 회로설계를 웨이퍼로 정밀하게 복사하는 기술
- 소자 미세화의 핵심 - 전체 공정 비용과 공정 시간의 50% 이상을 차지



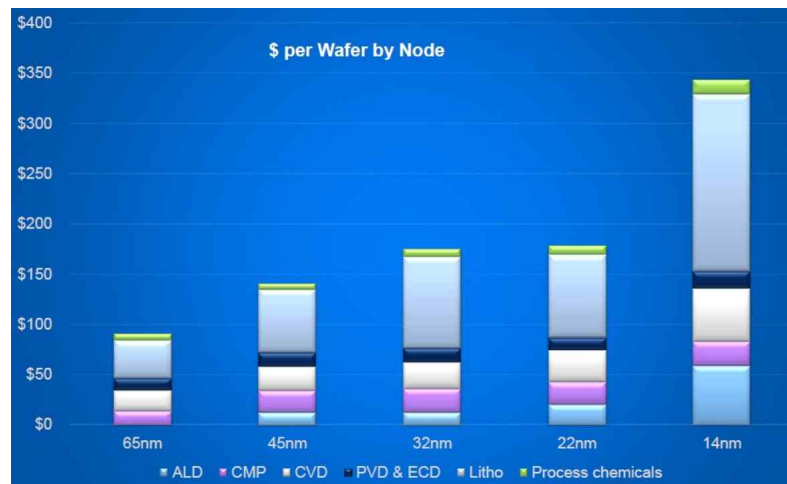
21

Enabler for 3-D structure formation



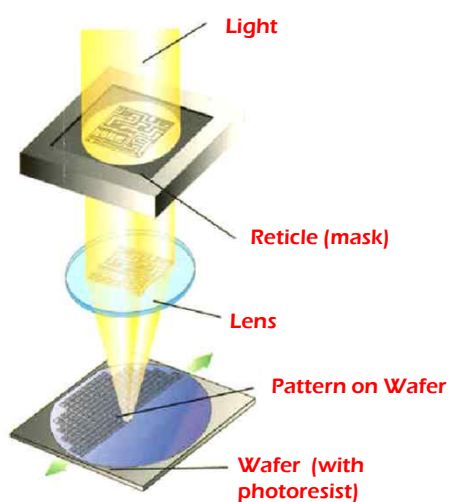
Every thin film/diffusion/etch process requires lithography step

Fraction of wafer processing cost



Lithography cost is more than 50% and keeps increasing (multiple patterning)

Lithography Components



Light source

- I-line, KrF, ArF, E-beam, EUV

Illumination

- Conventional
- OAI (annular/dipole/quadrupole)

Mask

- Binary
- PSM (attPSM, Alt.PSM, CLM)
- OPC mask

Projection lens

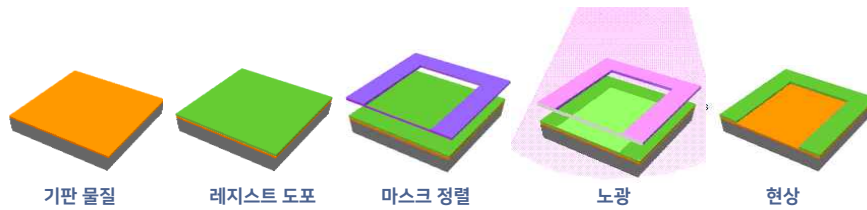
- High NA

Wafer

- Novolac resist
- Chemically Amplified Resist
- ARC

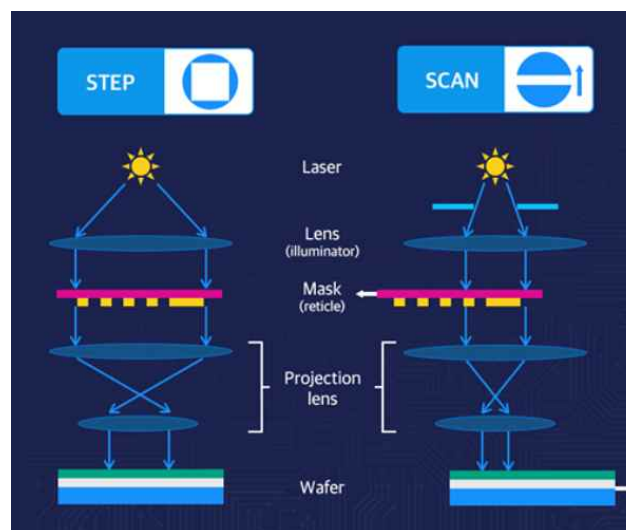
What is Lithography ?

리소그래피: 설계된 회로패턴을 사진원리로 고체상에 전사시키는 기술



기술적 중요성 - 소자의 축소/ 회로의 집적화를 주도하는 technology driver
경제적 중요성 - 소자제작 공정시간의 60%, 공정비용의 35% 이상을 점유

Classification by the Exposure mode (Stepper vs. Scanner)

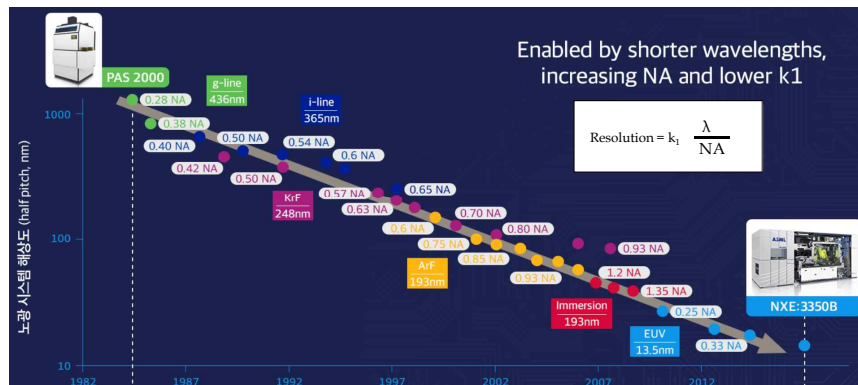


Resolution and DOF

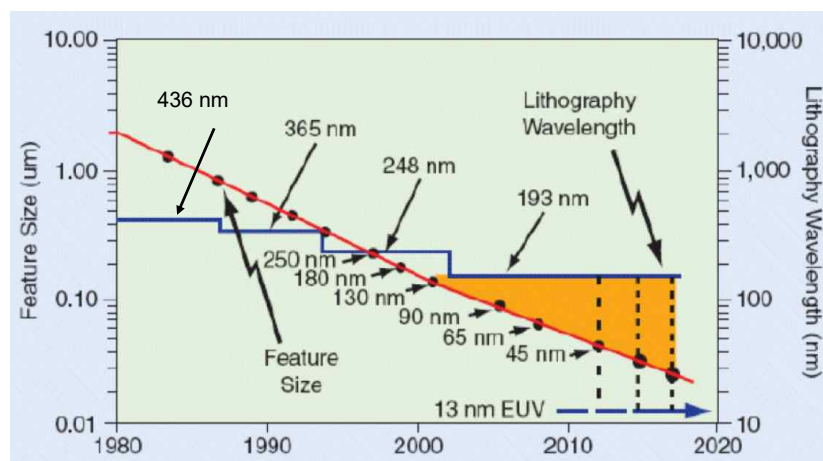
Resolution: $R = k_1 \frac{\lambda}{NA}$

Depth of Focus: $DOF = k_2 \frac{\lambda}{NA^2}$

λ : wavelength, NA: numerical aperture, k_1 & k_2 : process constants
 $NA = D/2f$ (D: diameter of the lens, f: focal length)



Device scaling vs. Lithography wavelength

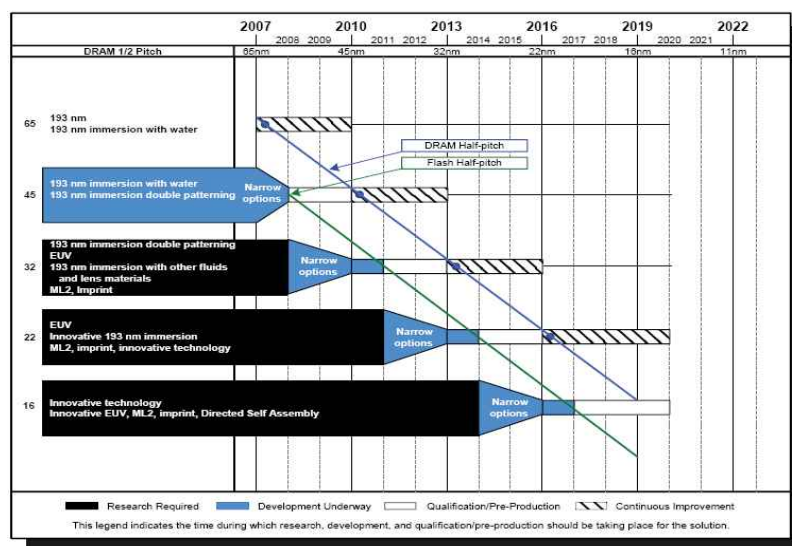


S. Borkar, Int. Symp. Microarchitecture, 2004.

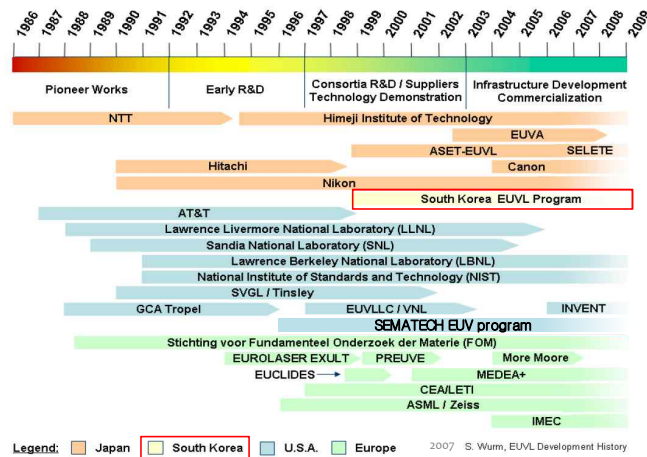
Slide 29

Next generation Lithography

Lithography Technology Roadmap (2007, ITRS)



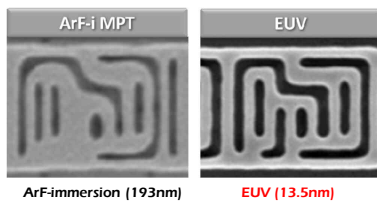
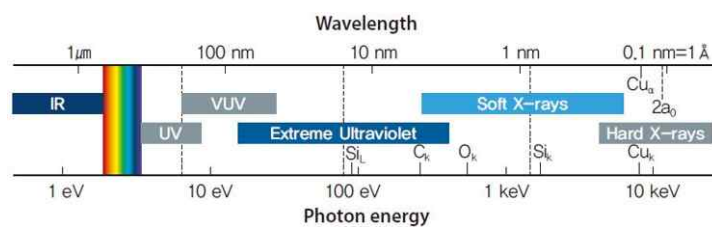
EUVL 기술 연구개발의 역사



31

EUV (13.5NM) vs. ArF (193nm)

EUV-IUCC
Extreme Ultraviolet Industry University Consortium Center



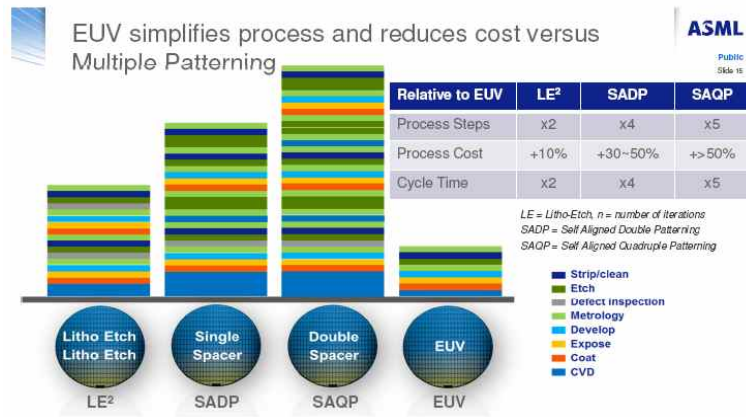
$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA}$$

R = 해상도
 NA = 렌즈의 개구수
 λ = 빛의 파장

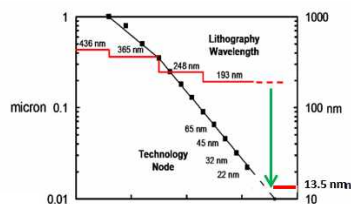
더 짧은 파장이 더 작은 패턴을 전사할 수 있다.
그러나 극자외선 파장은 모든 물질에 흡수가 되어 소멸된다.

32

Higher integration density with reduced cost



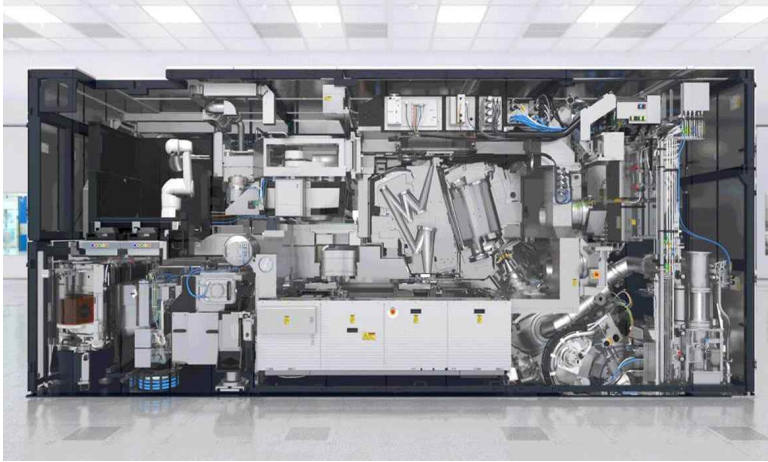
Why EUV Lithography is difficult ?



적용되는 신기술

- 새로운 광원 (플라즈마)
- 반사형 마스크 및 반사광학계
- 고진공 챔버
- 나노 멤브레인 펠리클
- 새로운 레지스트

The Most Complicated Machine on Earth



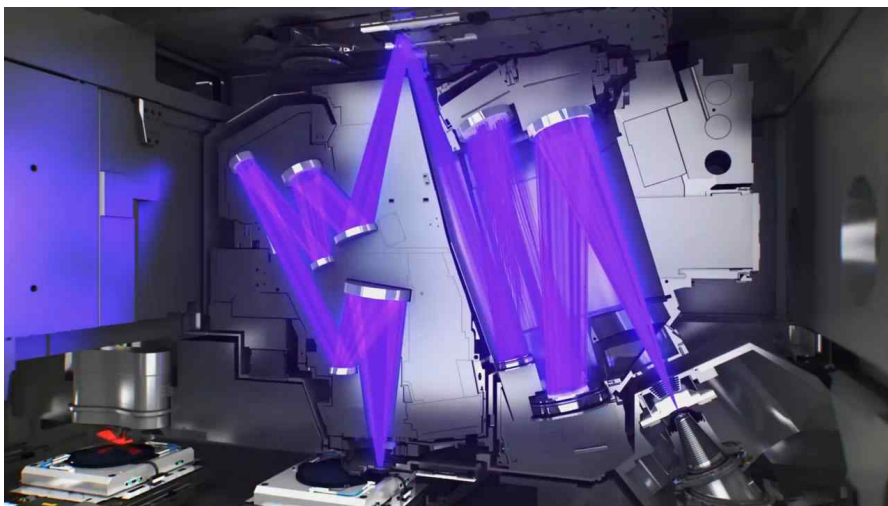
0.33NA HVM EUV Scanner (NXE 3400)



Optics metrology vessel installed in High NA cleanroom

출처: ASML

Reflective Mask and Optics



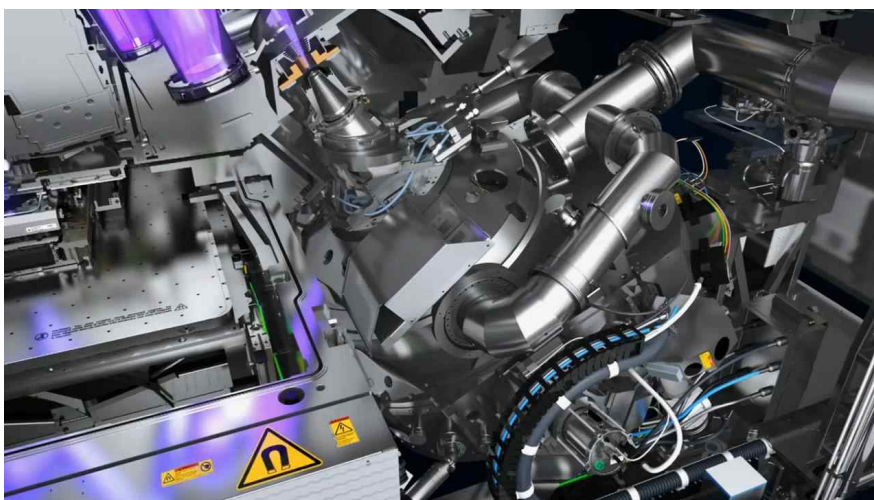
출처: ASML

EUV Scan Printing



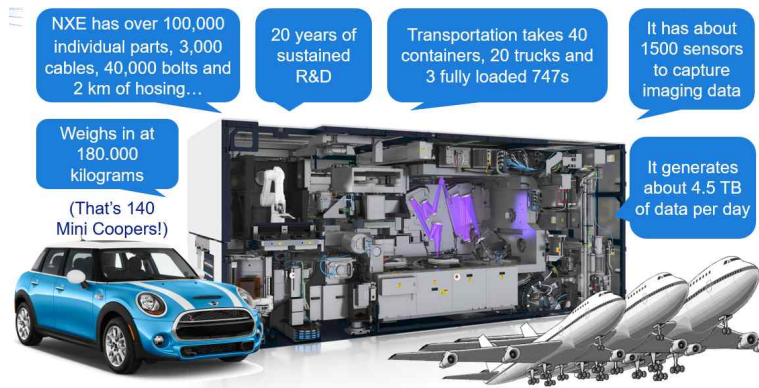
출처: ASML

EUV Source : Laser Produced Plasma



출처: ASML

모든 것이 거대한 EUV 노광장비

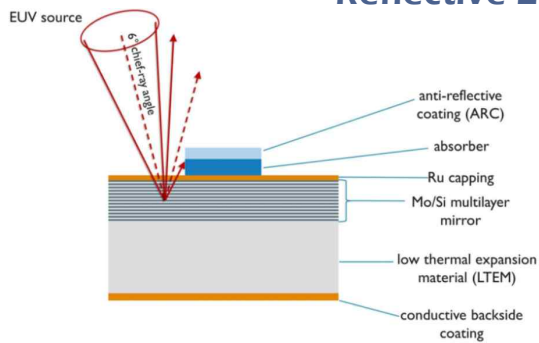


ASML의 양산용 EUV 노광장비 (NXE3400B)는

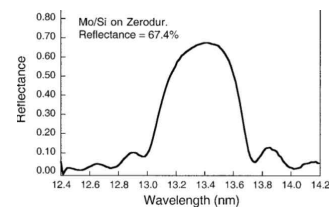
- 20년의 개발 기간
- 10만개의 부품, 4만개의 볼트, 1500개의 센서
- 이동에 40개의 컨테이너, 20대의 트럭, 보잉 747 화물기 3대 필요
- 무게 180톤 (미니쿠퍼 자동차 140대)
- 매일 하나의 장비가 4.5테라비트의 데이터 생산

39

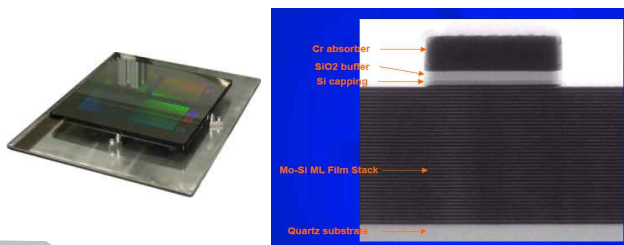
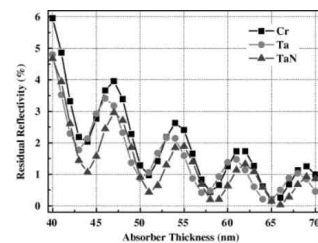
Reflective EUV Mask



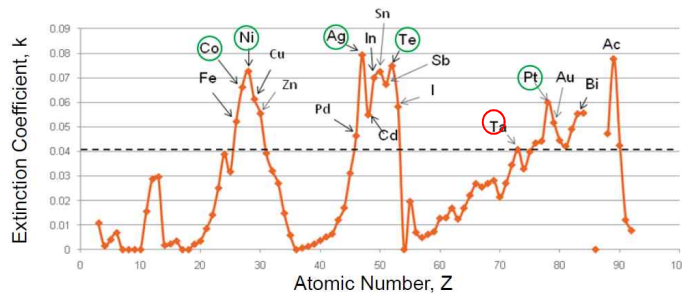
Multilayer reflector



Absorber (pattern) material



Absorber layer for EUV Mask



Min Absorber Thickness

| Film | R (%) | T (nm) |
|------|-------|--------|
| TaBN | 2.10 | 54.2 |
| Ni | 0.94 | 25.4 |
| Pd | 1.00 | 36.0 |
| Pt | 1.10 | 27.6 |
| Co | 1.26 | 26.0 |

Basic material for EUV absorber: Ta and Ta-compounds (TaN, TaBN)

Advanced mask for better resolution and reduced mask 3D effect

- Thinner absorber with high extinction coefficient (k)
- EUV Phase shift mask

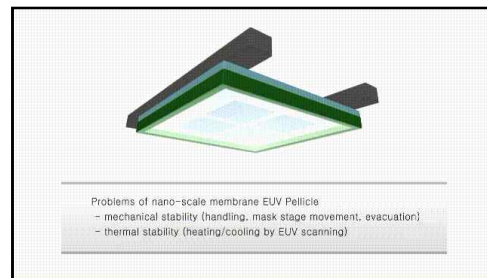
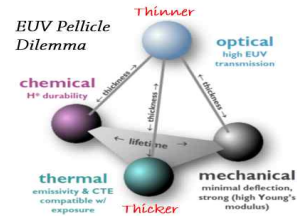
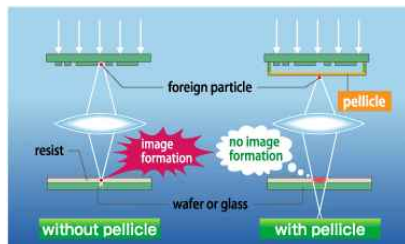
Current EUV Mask

| Layer | Materials | Main Role | Current Focus |
|-----------|--------------------------|---|--|
| ARC (LR) | TaON, TaO, TaBO, etc. | Inspection sensitivity @193nm | Thickness optimization for litho performances & mask process compatibility |
| Absorber | TaN, TaBN, TaB, etc. | Litho performances @EUV (contrast, NILS, LWR, CDU...) | |
| Capping | Ru, Ru alloy | Protecting ML (etch, CLN, repair, handling, exposure) | Damage (from Etch, CLN, Repair) |
| ML mirror | Mo/Si 40-50 pairs | Reflection mirror @EUV | Defect, Stability, EUVR (CW, R _{peak} , BW) |
| Substrate | LTEM 6025 (ULE®, AZ®...) | Supporting mask structure, Low thermal expansion | Defect (polish, CLN), Non-flatness |
| Backside | CrN, etc. | Electrostatic chucking @EUV scanner | E-chucking damage, Bowing control |

Ref. H. Seo, EUVL Symposium (2012)

EUV Pellicle Concept

펠리클이란 마스크의 오염을 방지하는 박막 형태의 보호막으로 이루어진 부품



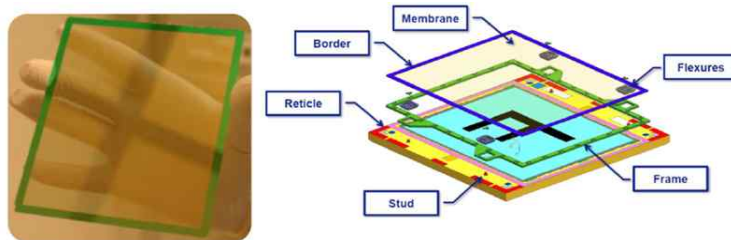
Requirements for EUV Pellicle

EUV 펠리클에 대한 요구 특성

기계적 특성: 수십 nm의 얇은 멤브레인 구조 (EUV 고투과도)이지만 강하고

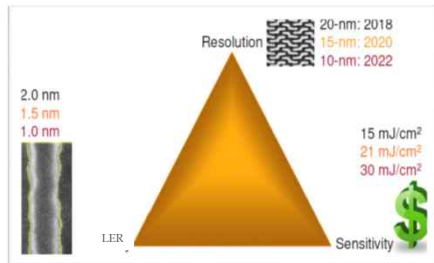
열적 특성: EUV 광의 흡수에 의한 온도상승을 효과적으로 냉각시킬 고방사를 특성을 가지고

화학적 특성: 수소 라디칼 분위기에서 (노광장치의 환경) 견딜 수 있는 화학적 안정성을 가질 것



Ref. ASML, SPIE Advanced Lithography (2014)
EUV Tech, SPIE Advanced Lithography (2017)

EUV Photoresist



$$\sigma_{LER} \approx c \left(\frac{I}{\partial I} \right)_{edge} \sqrt{\frac{1}{\rho_{PAG} \alpha Q v E_{sc} R^3}}$$

I = Image intensity
 α = Absorptivity
 Q = Quantum Efficiency
 $R = \sqrt{D \tau}$ = PEB Diffusion Range
 v = Photon - Acid interaction volume
 ρ_{PAG} = # PAGs/volume

LER, Constant, Dose, Blur
 RLS Tradeoff

Resolution, Line edge (width) roughness, Sensitivity
 이상 3가지 특성을 동시에 개선할 수는 없다.

$$[Z\text{-factor}] = [Resolution]^3 \times [LWR]^2 \times [Sensitivity]$$

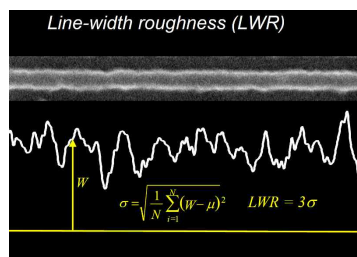
| | Target | 2013 | 2015 | 2017 | 2020 |
|---------------|------------|-----------|------------|------------|------------|
| Dense Lines | Resolution | 22nm | 16 nm | 13nm | 8nm |
| | LWR | <20% | <4.4nm | <3.2nm | <2.6nm |
| | Dose | <20mJ/cm² | <20 mJ/cm² | <20 mJ/cm² | <20 mJ/cm² |
| Contact Holes | Resolution | 24nm | 24nm | 20nm | 18nm |
| | LCDU | <15% | <3.6nm | <3.0nm | <2.7nm |
| | Dose | <20mJ/cm² | <20 mJ/cm² | <20 mJ/cm² | <20 mJ/cm² |

| | CA-A | CA-B | CA-C | NCA-A | NCA-B |
|-----------------------|------|------|------|-------|-------|
| Resolution (nm) | 16 | 16 | 15 | 15 | 13 |
| LWR (nm) @ resolution | 3.1 | 4.8 | 3.8 | 1.5 | 2.9 |
| Sensitivity (mJ/cm²) | 30 | 20 | 22 | 70 | 52 |
| Nano-Z Factor | 8.2 | 13.1 | 7.4 | 3.7 | 7.7 |

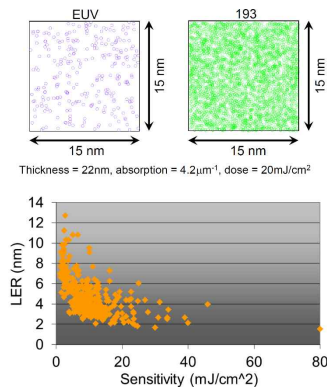
Reference Z factor: R=17nm, D=15mJ/cm², LWR=1.4nm
 "RLS" Tradeoff quantified by $Z_{factor} = R^3 L^2 S$

Photon Shot Noise – Native Problem

Smaller number of EUV photon defining the pattern edge
 results in line edge (width) roughness



Courtesy: Patrick Naulleau



EUV photon은 ArF photon 대비 에너지가 14배 높음
 = 동일한 dose로 레지스트를 노광하는 데 필요한 광자의 개수는 EUV가 ArF 대비 14배 적음

극자외선 노광기술 (EUVL)의 전략적인 중요성

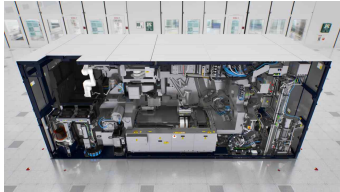
국가주력산업 반도체산업의 고도화를 위한 전략적 투자

고부가가치 비메모리 반도체 산업육성을 위한 EUV 양산화

- 삼성전자 파운드리 산업 전략적인 육성 시작 (2030년까지 133조 투자)
- 세계 최초(2019년)로 양산에 적용

메모리 기술 초격차 전략을 위한 DRAM 양산 적용

- 삼성전자 1x DRAM EUV로 생산/공급 시작
- SK 하이닉스 DRAM 양산용 EUVL 전용라인 구축 중



해외 의존도 ~100%인 핵심 소재·부품·장비 산업 육성의 전략적 필요성

새롭게 열리는 EUVL 관련 소재·부품·장비 산업 육성의 적기

- 포토레지스트, 포토마스크, 펄리클, 언더레이어, 계측장비, 검사장비, 광학부품 등 시장 형성 초기
- 중소·중견기업의 차세대 전략사업 분야

49

기업지원을 위한 국가연구협의회 (www.euv-iucc.org)

EUV-IUCC

Expertise What we offer Members only

EN KR LOGIN Q

EUV-IUCC

EUV lithography는

1981년에 연구가 시작되어 38년만인 2019년 7nm급 반도체 양산에 적용되기 시작한 최첨단 노광기술입니다. 그러나 아직 해결되지 못한 핵심기술이 남아 있어 지속적인 연구개발이 필요합니다.

IUCC는

"Industry and University Cooperation Center"의 약자로, "EUV공정기술의 원상"이라는 공동의 목표를 함께 산학연이 함께 노력하는 곳입니다. EUV-IUCC는 EUV 기술 선도자로서 전문 지식을 바탕으로 더 나은 공정·물류·인력 제공을 위한 기반을 만들고자 합니다.

EUV-IUCC는 기반 기술 연구와 그 결과 공유를 통해 산학계를 지원하는 EUV 기술 중추 역할을 하였습니다.

EUV-IUCC
Extreme Ultraviolet Industry University Cooperation Center

ESOL

ycchem

광원테크노믹스

soulbrain

PSK

THEELEC

SK siltron

PeDiSem

FST

NEXTIN

대한광통신

DOMWOOD

ALPHA

S&S TECH

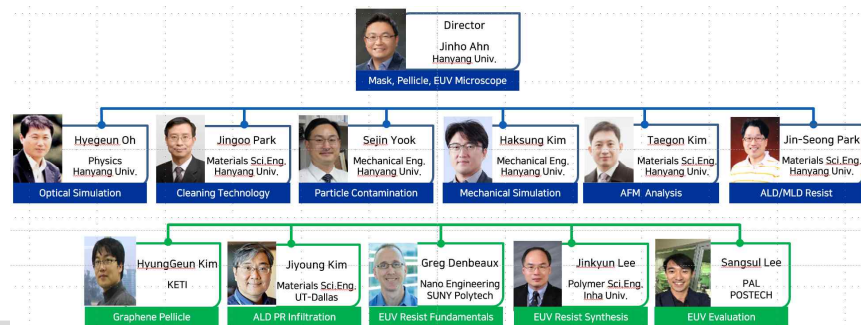
50

EUV-IUCC



EUV Industry-University Collaboration Center (EUV IUCC) is a technology network hub dedicated to aiding industries by

- fundamental/applied research and sharing the results
- partnering with the world-leading research brains and infrastructures
- keeping members updated on the latest EUV technologies and trends
- licensing our IP for new product design, prototyping and manufacturing
- promoting collaborations between member companies

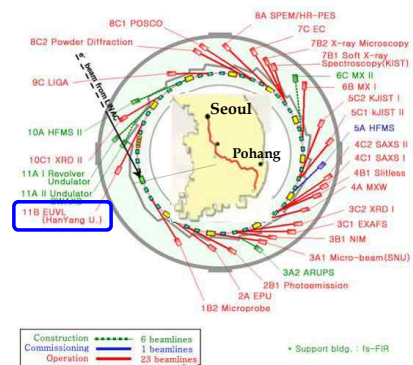
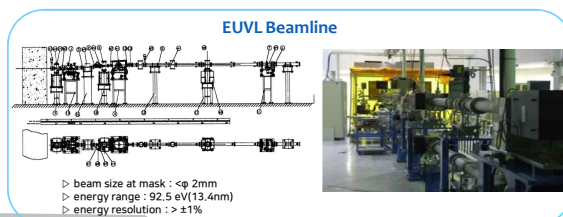


51

포항가속기연구소 EUVL 빔라인 (2002-2011)



**11B Beamline: Originally designed for XRL (1995)
Modified for EUVL (2003 ~) : HYU-PAL Joint Operation**



포항가속기연구소 EUVL 빔라인 (2002-2011)

EUV-IUCC
Extreme Ultraviolet - Industry-University Collaboration Center

차세대신기술개발사업

나노급 반도체용 EUV리소그라피 핵심기술 개발

산업부차세대신기술개발사업단

안양대학교
ANYANG UNIVERSITY

SAMSUNG
ELECTRONICS

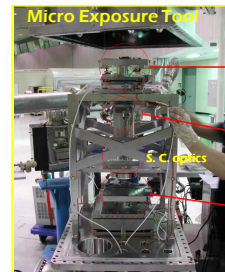
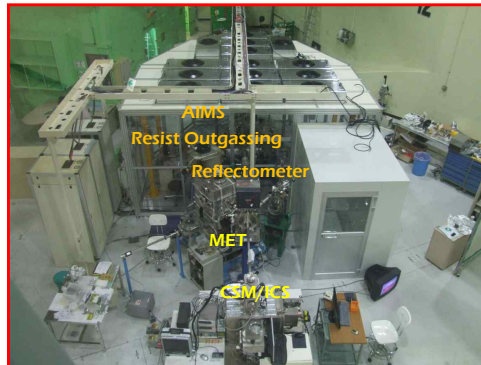
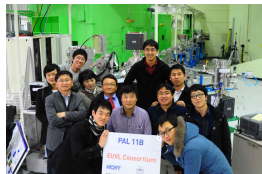
성균관대학교
SUNGKYUNKWAN UNIVERSITY

DONGJIN SEMICHEM CO., LTD.

OSTECH
오성테크놀로지

나노산업기술연구조합
NANO-INDUSTRIAL TECHNOLOGY RESEARCH COMBINATION

IMT
이머지온



53

EUV-IUCC 회원사

EUV-IUCC
Extreme Ultraviolet - Industry-University Collaboration Center

S&S Tech: EUV Blank Mask, EUV Pellicle, DUV Blank Mask, FPD Blank Mask (<https://snstech.co.kr/>)

FST: EUV Pellicle, EUV Pellicle Mounter, Chiller (<http://www.fstc.co.kr/>)

Esol: EUV Light Source, EUV Microscope (<http://www.euvsol.com/>)

Young Chang Chemical: Photoresist, Developer, BARC, Etchant (<http://www.ycchem.co.kr/>)

Nextin Solutions: Wafer Inspection System (<http://nextinsol.com/>)

Taihan Fiberoptics: Mask Substrate, Optical glass, Fiber Optics (<http://www.tfo.co.kr/>)

SK Siltron: Polished wafer, Epitaxial wafer (<https://www.sksiltron.com/>)

Dongwoo Finechem: Photoresist, Polarizer, Color filter (<https://www.dwchem.co.kr/>)

PSK: Dry Strip System, Dry Cleaning System (<https://www.pskinc.com/>)

Soulbrain: Etchant, Stripper, CVD/ALD Precursors, CMP Slurry (<http://www.soulbrain.co.kr/>)

Alpha Graphene: Graphene Transfer

The Elec: Internet Media (<http://www.thelec.kr/>)

Gangwon Technopark: R&D Infra Service (<http://www.gwtp.or.kr/>)

PeDiSem: Technology Consulting, Education Service (<https://pedisem.com/>)

ESOL

ycchem

강원테크노파크
GANGWON TECHNO PARK

soulbrain

PSK

THEELEC

SK siltron

PeDiSem

FST

NEXTIN
SOLUTIONS

대한광통신

DONGWOO FINE-CHEM

ALPHA GRAPHENE

S&STECH

54

핵심역량 - EUV 현미경 (Coherent Scattering Microscope)



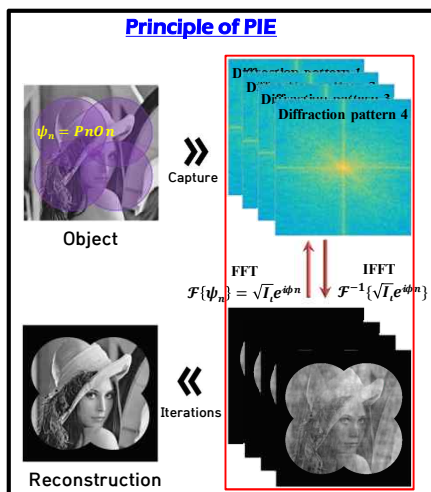
| | |
|--------------------------|------------------|
| NA | 0.125 (@reticle) |
| Wavelength | 13.5nm (HHG) |
| Resolution | ~54 nm |
| Imaging method | Ptychography |
| Mask defect detection | Available |
| Pellicle inspection | Available |
| Through-pellicle imaging | Available |

극자외선 노광 파장인 13.5 nm 를 사용하는
국내 공공기관 유일의 EUV 마스크 / 펠리클 광학 검사 장비

55

EUV 현미경 핵심 이미징 알고리즘 - Ptychography

Ptychography: 다수의 회절패턴을 중첩하여 포집하고 수학적 연산을 통해 이미지를 재구성하는 기술



$$\mathcal{F} \left(\text{Probe function} \otimes \text{Object} \right) = \text{Diffraction pattern}$$

<Convolution of probe and object function>

$$\Psi_{n,l}(\mathbf{r}) = P(\mathbf{r}) O_n(\mathbf{r} - \mathbf{R}_l)$$

$$O_{n+1}(\mathbf{r} - \mathbf{R}_l) = O_n(\mathbf{r} - \mathbf{R}_l) + \beta U(\mathbf{r}) (\Psi_{n,l,\text{new}}(\mathbf{r}) - \Psi_{n,l}(\mathbf{r}))$$

$$U(\mathbf{r}) \equiv \frac{|P(\mathbf{r})|}{\max(|P(\mathbf{r})|) |P(\mathbf{r})|^2 + \alpha} P^*(\mathbf{r})$$

$\psi(\mathbf{r})$: Ext. wave
 $P(\mathbf{r})$: Probe function
 $O(\mathbf{r})$: Object function
 \mathbf{R} : Relative distance between diffraction patterns
 α : Feedback parameter

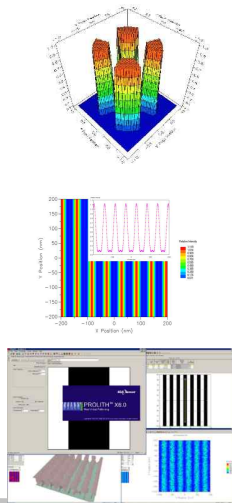
<Math of ptychographical Iterative Engine (PIE)>

56

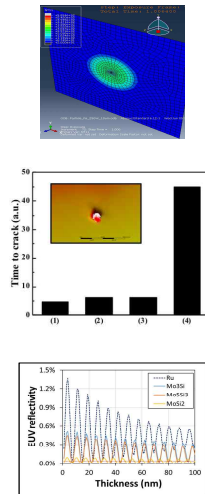
핵심역량

EUV-IUCC
Extreme Ultraviolet - Industry University Collaboration Center

Optical Simulation



Thermo-Mechanical Simulation



Mask Design & Fab.



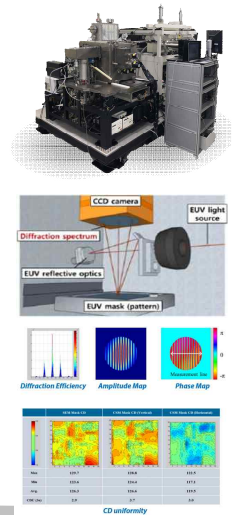
Pellicle Design & Fab.



핵심역량

EUV-IUCC
Extreme Ultraviolet - Industry University Collaboration Center

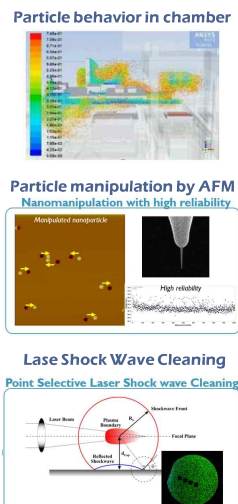
Optical Evaluation (Refl./Trans./Imaging)



Thermo-Mechanical Evaluation



Contamination Analysis & Cleaning



EUV Resist Evaluation



EUV-IUCC is wide open to Everyone !

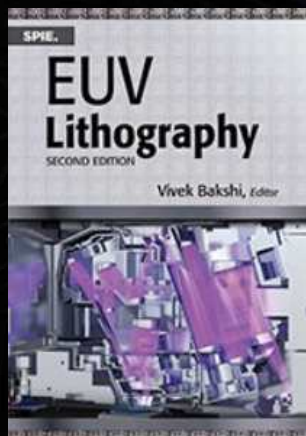
EUV-IUCC
Extreme Ultraviolet - Industry University Collaboration Center



<https://euv-iucc.org>

59

한양대학교
HANYANG UNIVERSITY



EUV Lithography (2nd Edition, 2017)
SPIE Press
ISBN 9781510616783

