

고밀도 플라즈마에 의한 EUV 발생기술

진윤식, 이홍식, 김광훈, 서길수, 임근희
한국전기연구소

EUV Generation by High Density Plasma

Y.S. JIN, H.S. Lee, K.H.KIM, K.S.SEO, K.H.RHIM
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - As a next generation lithography (NGL) technology for VLSI semiconductor fabrication, electron beam, ion beam, X-ray and extreme ultraviolet(EUV) are considered as possible candidates. Among these methods, EUV lithography(EUVL) is thought to be the most probable because it is easily realized by improving current optical lithography technology.

In order to get EUV radiation which can be applied to EUVL, it is essential to generate very high density and high temperature plasma stably. The method using a pulse power laser and a high voltage pulse discharge is commonly used to accomplish such a high density and high temperature plasma.

In this paper, we review the recent trends of the EUV generation technique by high density and high temperature plasma.

1. 서 론

반도체 리소그라피용 광원은 집적도 246K ~1M의 DRAM에서는 수은램프의 G-선(436nm), 4M~16M까지는 수은램프의 G-선과 I-선(365nm)이 사용되었으며, 64M에서는 수은의 Deep Ultraviolet 영역의 248nm와 KrF 엑시머 레이저(248nm)로 발전되어 왔으며, 256M DRAM에는 KrF 엑시머 레이저와 더불어 ArF 엑시머 레이저(193nm), F₂ 엑시머 레이저(157nm)의 사용이 검토되어지고 있는 단계이다. 이와 같이 리소그라피 기술은 반도체 집적회로에서 요구되는 미세화, 고집적화에 부응하기 위해 광원의 파장을 지속적으로 줄여왔다. 리소그라피의 로광파장을 단파장화하고, 다양한 신기술의 도입에 의해 자외선에서의 0.13um 정도의 패턴을 가진 디바이스의 제작 가능성이 확실해지고 있다. 그러나 그 다음의 0.1um 이하의 서브미크론 리소그라피용 광원으로서 전자빔, 이온빔, X-선, 극단자외선(Extreme Ultraviolet: EUV) 등이 검토되어지고 있으나, 현재의 자외선광을 대체할 수 있는 극단자외선 광원에 의한 리소그라피(EUVL) 기술이 가장 현실성 있는 방법으로서 주목을 받고 있다.

극단자외선 리소그라피는 원리적으로는 현재의 축소로광기술과 동일하며, 굴절렌즈 대신으로 EUV 영역에서 높은 반사율을 가진 다층막 미러를 이용한 반사축소 광학계를 사용하는 것을 특징으로 한다. 이와 같은 EUV 광의 발생방법으로는 펄스레이저 플라즈마, 싱크로트론, 플라즈마 핀치, 전자빔 및 이온빔 등에 의한 방법이 대표적이다. 싱크로트론은 넓은 대역의 X-선을 발생시킬 수 있는 가장 우수한 X-선 발생장치이나, 반도체 제조공정용에 사용하기에는 너무 소가여서 현실성이 없다. 전자빔에 의한 X-선 발생시스템은 단일 펄스

로 고효율의 X-선 발생이 가능하나, 고반복이 어렵고, 발생 X-선 파장이 1nm이하로 내려가며, 장치가 대형화 되는 문제점이 발생한다. 따라서 현재 Gbit급 반도체 공정에 사용되어질 EUV 발생 방법으로서 플라즈마 핀치를 이용하는 고압 방전과 고출력 펄스 레이저를 이용한 고밀도 플라즈마에 의한 방법이 활발히 연구되어지고 있다.

본 논문에서는 EUV발생을 위한 고온 고밀도의 플라즈마 형성 방법에 대한 최근의 세계적인 기술 동향과 각 방법에 있어서의 원리 및 문제점에 대하여 고찰한 내용을 기술하고자 한다.

2. 레이저 플라즈마에 의한 EUV 광의 발생기술

2.1 레이저생성 플라즈마와 EUV의 발생(1)(2)(3)(4)

대출력 레이저 펄스를 렌즈나 미러를 통해 집광하면 고온고밀도 플라즈마가 생성되고 펄스 EUV광을 얻을 수 있다. 레이저 플라즈마를 이용한 EUV 광원의 특성은 레이저를 집광하는 직경과 거의 같은 영역(수십 μ m)에서 레이저 펄스폭과 거의 동일한 시간(수 ns)에 걸쳐 방사되는 집펄스 광원이라는 점이다.

타겟트 물질에 레이저 펄스를 조사하면 레이저의 초점부근에서 고밀도의 플라즈마가 형성된다. 레이저 광에너지는 역제동복사(Inverse Bremsstrahlung) 과정을 통하여 플라즈마중의 전자의 운동에너지로 전달된다. 레이저 광은 플라즈마의 임계밀도 n_c 부근에서 거의 흡수되고, 그보다 고밀도측에는 침투되지 않고 나머지는 반사된다. 흡수율은 레이저 파장이 짧은 쪽이 높고, 임계밀도는 레이저 임계밀도는 레이저 파장의 제곱에 반비례한다. 즉, 레이저 파장이 짧은 쪽이 고밀도 플라즈마 중에 보다 쉽게 직접 침투가 가능하며, 그 부분을 고온으로 만든다. 레이저 광에 의해 에너지를 얻은 전자는 이온과의 충돌을 반복하여 전리도가 높고, 높은 에너지 상태로 여기된 이온을 주성분으로하는 플라즈마를 생성한다. 이 플라즈마는 X-선과 그 외의 복사방출, 열전도에 의한 열확산, 팽창에 따른 운동에너지로의 변환을 통해서 에너지를 잃는다. 원자번호가 큰 이온에서는 궤도각 운동량이 큰 수많은 상태가 X-선의 발생에 기여하며, 전리도가 조금 밖에 차이 나지 않는 이온들의 전자에너지 상태가 근접해서 존재하므로 다수의 선 스펙트럼이 겹쳐서 확장된(broadened) 스펙트럼으로 된다. 역으로 원자번호가 작은 이온에서는 비교적 소수의 고강도 선 스펙트럼으로 된다. 이 특성으로부터 목적에 맞는 X-선 또는 EUV 광을 발생시킬 수 있다. 일반적으로 플라즈마로부터의 X-선(또는 EUV)의 복사는 (a) bound-bound transition(선복사), (b) free-bound transition(재결합복사), (c) free-free(제동복사)의 3종류가 있다. 이 가운데 레이저 플라즈마에서의 EUV 방사에 주로 기여하고 있는 것은 (a)의 선복사와 또는 이들의 집합체이다.

레이저 플라즈마로부터의 EUV광 변환효율에 영향을

미치는 요소들로는 레이저의 초점스폿의 크기(플라즈마의 크기), 레이저 펄스폭, 레이저 조사강도, 레이저의 파장, 타겟트 원자번호 등을 들 수 있다. 레이저에 의해 생성된 플라즈마는 초기에 이온속도(ionic speed:C_i)로 팽창하며, 이때에는 고체에 버금가는 높은 플라즈마 밀도를 유지하면서 평면 1차원적으로 팽창하게 된다. 그 다음 단계에 플라즈마는 측면으로의 구면파의 상으로 팽창하게 되는데 이때에는 플라즈마 밀도가 급격히 감소함으로서 레이저에 의한 가열과 X-선 방출자체가 매우 비효율적으로 된다. 팽창모드가 선형에서 구면형으로 전환하는 시간의 척도는 플라즈마가 초기 스폿직경 D만큼 팽창하는데 걸리는 시간이다. 따라서 X-선 또는 EUV 선이 효과적으로 방출하기에 충분한 밀도를 유지하는 시간은 선형팽창모드 일 때에 한하므로 레이저 펄스의 에너지는 이 시간동안에 공급되어야 하며, 펄스폭 t_L은 선형팽창 시간보다 짧은 것이 변환효율 면에서 유리하다.

$$t_L \leq D/C_i$$

위의 식에서 알 수 있는 바와 같이 긴 레이저 펄스를 이용하는 경우에는 펄스의 에너지를 증가시켜 초점에서의 조사강도를 일정수준으로 유지시키면서 레이저 빔의 초점 스폿직경을 크게 형성함으로써 X-선 변환효율을 높일 수 있다. 펄스폭이 일정한 경우, 레이저의 조사강도가 증가할수록 일반적으로 빛의 흡수율은 감소하고 따라서 EUV의 변환효율도 감소한다. 그림 1에 Nd:YAG 레이저의 기본파와 2차, 3차, 4차 조화파를 금(Au) 타겟트에 조사한 경우의 변환효율의 파장과 조사강도에 대한 의존성을 보인다. 변환효율은 0.1keV에서 1.5keV에 이르는 전체 방사 에너지를 포함한 레이저 에너지 값으로 나눈 값이다. 펄스폭 1ns의 레이저를 Au 타겟에 수직으로 입사한 예이다.

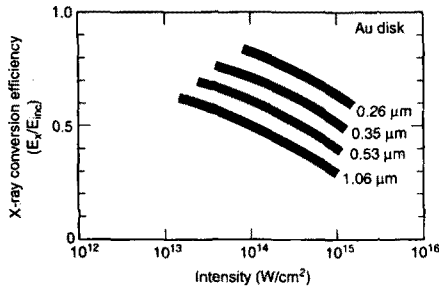


그림 1 0.1-1.5keV에 범위의 스펙트럼의 변환효율

Engineering Test Stand (ETS) 시스템을 그림 2에 보인다(5). 이 시스템은 full-field EUV imaging과 실제 생산설비에 필요한 데이터를 수집하기 위한 시스템으로서 조사광학계(illuminator), 투영광학계(projection optics), scanning stage 등이 제작되어 테스트 단계에 있다. 조사광학계는 레이저 원, condense lens, 진공시스템으로 구성되어 있다. 플라즈마 발생용 레이저는 6개의 Nd:YAG 레이저를 사용하고 있으며, 레이저는 펄스당 에너지 280mJ, 평균출력 1700W, 주파수 6000Hz로 운전한다. 이 때의 타겟에의 빔크기는 180μm x 85μm이고, 레이저 빔 강도는 3-10x10¹¹ W/cm²이다. 타겟트로서는 debris의 문제를 근본적으로 해결하기 위해서 Xe 가스 제트(10-20bar)를 이용하고 있으며, 고압고속으로 진공 용기속에 분사한 Xe에의 에너지 흡수율은 95%이상이다. 또한 터보분자펌프로 타겟트 챔버를 배기함으로써 1mTorr의 압력을 유지하여 13.5nm의 EUV광에 대해서 85%의 투과도를 실현하고 있다. 레이저 에너지에 대한 EUV의 변환효율(Conversion Efficiency:CE)은 13.4nm 에서는 1%/steradian, 11.3nm에서는 4%/steradian 이다. 반사광학계는 Mo/Si의 다층막 코팅(Multilayer coating)된 미러를 사용하여 13.5nm의 EUV광에 대해서 65%이상의 반사율을 얻고 있다. 투영광학계 시스템은 4개의 미러로 구성되어 있으며 ring-field를 구성한다. 4x의 축소 시스템은 개구수(Numerical Aperture:NA) 0.1을 실현하여 100nm feature를 프린팅하기 위한 조건을 만족한다. 웨이퍼와 레티클을 위한 자기부상 스테이지는 평균 위치 정밀도 에러 15nm를 실현하였다.

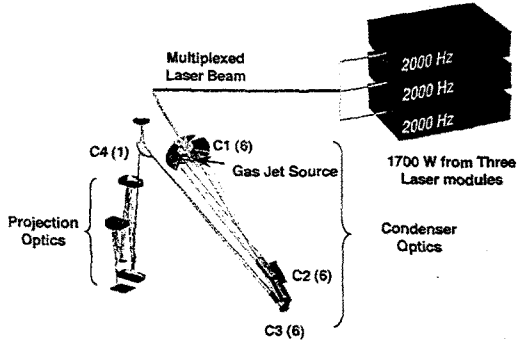


그림 2 고출력 EUV 레이저 플라즈마원과 조사계

앞서 기술한 것처럼, 임계밀도 n_c는 파장의 제곱에 반비례하므로 파장이 짧은 레이저광에서 고밀도 플라즈마의 레이저 광 흡수가 효과적으로 일어나므로 변환효율도 파장이 짧을수록 높은 값을 보이게 된다. 조사강도가 높아지면 비선형적 과정이 레이저-플라즈마 상호작용을 지배하게 되어, 유도산란과정에 의해서 고진폭과 높은 위상속도를 가진 플라즈마 파동을 구동시키게 되며, 일부의 전자는 트래핑되어 매우 높은 에너지로 가속됨으로서 40-50keV의 강 X-선(hard X-선)이 발생되게 된다.

2.2 레이저 플라즈마를 이용한 EUVL의 연구동향

레이저 생성 플라즈마(Laser Produced Plasma :LPP)원은 현재 EUV 리소그래피를 위한 기술적 완성도가 가장 높은 분야이다. 사용되는 레이저로서는 mode-locked KrF 엑시머 레이저를 이용한 예도 있으나, 최근에 개발된 시스템들은 Nd:YAG 레이저의 제2 고조파(532nm)가 주로 이용되고 있다.

미국의 Sandia National Lab.과 Lawrence Livermore National Lab.에서 개발중인

3. 방전 플라즈마에 의한 EUV 광의 발생기술

레이저 플라즈마가 아닌 방전 플라즈마에 의한 EUV의 발생은 여하히 짧은 시간에 고온, 고밀도, 고반복의 플라즈마를 안정하게 생성하는가에 달려있다. 고온, 고밀도의 플라즈마를 얻는 방법으로서 진공스파크 방전, plasma focus, Z-pinch 플라즈마, capillary 방전등이 리소그래피의 광원으로서 개발되어 왔다. 이하에 방전 플라즈마에 의한 EUV광의 발생법으로서 Dense Plasma Focus(DPF)에 의한 방법의 원리 및 결과에 대해서 소개하고자 한다.

그림 3에 CYMER사에서 개발한 DPF에 의한 EUV 발생 회로를 보인다(6). 초기 에너지 저장 커패시터 C₀는 DC 전원에 의해 충전되어, 완전충전상태가 되면 IGBT가 트리거되어, 에너지를 C₀에서 C₁으로 resonant transfer하게 된다. 두 커패시터의 용량은 모두 65μF이다. C₁에서 파크전압이 도달하면 hollow cathod pre-ionization source(그림에는 없음)가 안쪽전극과 바깥쪽 전극사이에 avalanche breakdown을

일으킨다. C₁과 중심전극(양극) 사이에 설치되어 있는 가포화 리액터는 전극의 바닥에서 균일한 플라즈마 sheath가 형성될 때까지 C₁으로부터 전류가 흐르는 것을 순간적으로 저지하는 역할을 한다. 이 구동회로의 낮은 포화 인덕턴스 값으로 인하여 전류상승시간이 빠르며, C₁의 거의 모든 전압이 전극사이에 인가되게 된다.

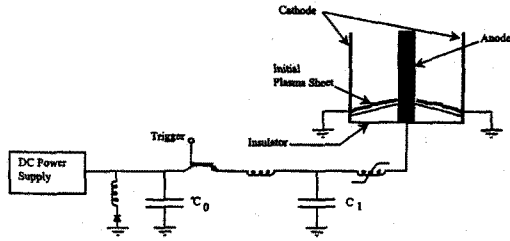


그림 3 DPF 구동회로와 DPF 전극

플라즈마 sheath를 통하여 충분한 전류가 흐르게 되면, $\vec{j} \times \vec{B}$ 힘에 의해 플라즈마는 바닥에서 전극의 위쪽 끝부분으로 가속되어 양극의 끝부분에 집중되어 진다. 플라즈마의 가속과 동시에 구동회로 인덕턴스와 전극 인덕턴스의 직렬연결을 통하여 C₁으로부터의 전류는 최대에 도달하게 된다. 플라즈마 sheath는 마지막으로 양극의 끝부분까지 올라가게 되어 이 부분에서 magnetic force는 가스를 양극의 중심축 부분으로 압축하게 된다. 이 시간 동안 회로 인덕턴스에 저장되어 있던 자기에너지의 일부는 양극 끝부분의 좁은 압축가스 영역으로 전달된다. 압축과 가열은 이 영역의 이온들의 온도를 상승시켜 강한 EUV 영역의 방사를 내기에 충분한 수준까지 이르게 한다.

프로토타입의 DPF 장치를 그림 4에 보인다. C₀, C₁ 커패시터는 650개의 용량 0.1μF, 1400V의 커패시터를 병렬로 연결하여 구성함으로써 인덕턴스와 ESR (equivalent series resistance)를 줄여서 플라즈마의 임피던스와 매칭이 가능하도록 하였다. C₀에서 C₁으로의 에너지 전달에는 8개의 1400V, 1kA의 IGBT를 병렬로 연결하였다. 이 장치로서 현재 2500Hz, 1.5J의 입력에너지를 달성하였으며, He buffer가스에 Lithium vapor을 사용하여 13.5nm에서 0.85%의 변환효율을 달성하였다.

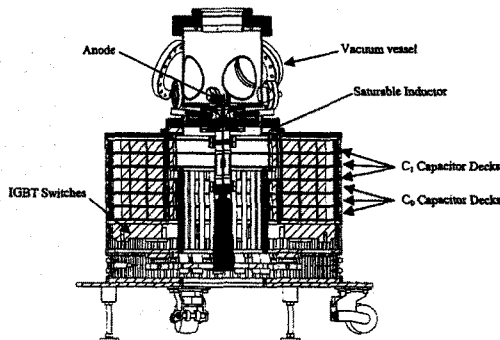


그림 4 DPF장치의 단면모습

3. 결 론

차세대 리소그래피(NGL) 기술의 하나로서 EUV를

광원으로 하는 EUVL 기술이 매우 유망하며, 이 리소그래피에 응용될 EUV 광원으로서 펄스 레이저 플라즈마와 고밀도 방전플라즈마에 의한 방법을 살펴보았다. 미국, 일본, 유럽등 선진국에서는 차세대 리소그래피 기술로서 레이저 플라즈마 기술, 전자빔 기술, 이온 빔 기술, EUV 광학 기술등을 기업뿐만 아니라 정부차원에서 적극 지원하여, 해당기술의 선두를 선점하고자 노력하고 있다. 미국에서는 민간연구소 뿐만 아니라 LBL, LLNL 등의 국가연구소에서도 차세대 리소그래피 기술을 적극적으로 지원하고 있으므로, 국내에서도 기업뿐만 아니라 국가가 적극 지원하여 국책연구소에서 NGL 기술에 대한 연구를 수행함으로써 현재 한국이 반도체 분야에서 차지하고 있는 기술 우위를 차세대에도 유지할 수 있을 것으로 생각된다. 이와 같은 추세에 부응하여, 한국전기연구소에서는 2000년 1월부터 시작하여 레이저 플라즈마에 의한 EUV 발생기술에 대한 연구를 진행 중에 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] Hirouki DAIDO, "Laser Plasma X-ray Source", 레이저-연구, Vol. 27, 3, 1999
- [2] K. Koyama, T. Tome and M. Yano, "X-ray lithography and X-ray Microscopy Using Laser-Produced Plasma", 眞空, Vol. 29, 529, 1986
- [3] C.E. TURCU and J.B. DANCE, "X-Rays from Laser Plasmas", John Willy & Sons, 1999
- [4] David ATTWOOD, "Soft X-Rays and Extreme Ultraviolet Radiation", Cambridge University Press, 1999
- [5] G.D. Kubiak et al., "High-power source and illumination system for extreme ultraviolet lithography", SPIE, Vol. 3767, 136, 1999
- [6] W. Partlo, I. Fomenkov and D. Birx, "EUV (13.5nm) Light Generation Using a Dense Plasma Docus Device", SPIE, Vol. 3676, 846, 1999