

디스플레이 공정용 건식 식각 장비의 시뮬레이션 기술

최희환(한국항공대학교 항공전자정보공학부)

1. 서 론

플라즈마를 구성하는 요소 중에서 하전입자와 여기종을 활용하여 산업에 활용하는 일들은 다양하게 이루어져 왔다. 그 중에서 반도체나 디스플레이 소자를 만드는 미세소자 산업에서는 플라즈마를 주로 증착, 식각, 이온 주입, 세정 등의 목적으로 사용해 왔다. 이러한 플라즈마의 특성을 이해하고 그 특성을 활용하여 본래의 목적을 이루는 것은 오랜 시간 노력되어져 왔으나, 소자의 특성이 바뀌고 장비의 특성이 바뀔때 마다 생기는 현상들을 전부 이해하기에는 아직도 부족한 점들이 많기 때문에, 항상 현상을 설명하기 위한 노력이 계속되고 있다. 또한, 새로운 아이디어를 적용한 장비의 개념을 활용하여 기존의 공정을 크게 바꾸는 노력도 계속되고 있다[1-5].

디스플레이 공정에는 다양한 장비와 기술이 사용되어져 왔다. 각각의 장비는 고유의 목적뿐 아니라 전후 공정과의 연관성에 대한 고려까지 포함하여 개발되고 운용되어져 왔다. 다양한 디스플레이 공정 중에서 플라즈마(plasma)가 사용되는 공정이 있는데, 그 중에 TFT(thin film transistor)로 이루어진 backplane을 형성하기 위한 공정들 중에서 박막을 형성하는 sputtering, PECVD(plasma enhanced chemical vapor deposition) 공정과 식각에 사용되는 건식 식각(dry etching) 공정이 대표적으로 존재한다.

반도체 공정에 사용되는 플라즈마 장비의 경우 크기가 상대적으로 작고, 형상을 근사적으로 대칭으로 취급할 수 있어서 다양한 연구가 진행되어 왔다[1-7]. 반면에 디스플레이 공정에 사용되는 플라즈마의 경우 상대적으로 크기가 크고, 대칭성을 가지고 있지 않기 때문에 플라즈마를 사용한 공정에 대한 연구가 상대적으로 적은 편이다.

디스플레이 소자의 경우 기판의 크기가 지속적으로 커져서 10.5세대 기판 사이즈의 경우 2940mm × 3370mm에 이른다. 이는 300mm Si 웨이퍼 면적과 비교하여 약 140배에 이른다. 이렇게 큰 면적에서 식각률, 선택비, 균일도 등의 공정 요건을 만족하는 장비의 설계와 구현은 매우 어려우며, 주어진 장비에서 최적의 공정 조건을 찾는 것 또한 매우 어렵다. 따라서 리소스를 최적화하기 위해서는 식각 공정에 사용되는 플라즈마에 대한 이해와 시뮬레이션 기법을 활용하는 것이 시간과 비용을 절감하며 실수를 줄이는 방법이 될 수 있다.

본 원고에서는 건식 식각 장비의 기본 구성과 원리 및 관련된 시뮬레이션 기술에 대해서 설명하고자 한다.

2. 건식 식각 장비

2.1. 디스플레이 소자 공정용 건식 식각 장비

디스플레이 소자를 만들기 위한 식각 공정은 습식 식각(wet etching)과 건식 식각(dry etching)이 있다. 그

중에서 플라즈마를 사용하는 것은 건식 식각이다. 보통의 경우 건식 장비는 공정을 진행하는 프로세스 챔버(process chamber)가 진공을 활용하는 방식으로 되어 있다. 따라서 공정에 사용되는 압력은 수~수백 mTorr인 경우가 많다. 공정을 진행하기 전에 공정을 위한 하부 전극에 위치하게 되면, 기본 진공(base pressure)을 형성하게 된다. 기본 진공은 보통 10^{-5} Torr 이하로 형성하게 된다. 이러한 압력을 형성하기 위해서는 주로 TMP(turbo molecular pump)와 같은 고진공펌프를 사용하여 배기를 하게 된다. 공정을 위해서 가스를 넣어줄 때에는 목적에 맞게 수~수백 mTorr의 일정한 압력을 형성하여서 공정을 위한 가스의 입자수를 확보하여야 한다. 공정 압력의 형성과 함께 중요한 요소로는 가스의 유량이 있다. 공정 가스의 유량은 가스의 유입 후 플라즈마의 발생에 관여하기도 하고 식각 부산물이 빠져나가는 유속에도 영향을 미치기 때문에 공정 특성에도 영향을 미치게 된다. 건식 식각 공정에서 플라즈마의 형성을 위하여 사용되어져 온 방식은 다양하나 대표적으로 많이 사용되는 것은 축전 결합 플라즈마(capacitively coupled plasma, CCP), 유도 결합 플라즈마(inductively coupled plasma, ICP) 장비가 있다.

2.2. CCP 방전 장비

CCP 장비는 디스플레이 공정에서 많이 사용되어지는 장비로 그림 1의 왼쪽과 같은 기본적 장비 개념을 가지고 있다. CCP 장비는 PE(plasma etching) mode와 RIE(reactive ion etching) mode로 구분할 수 있다. PE mode의 경우 기판이 놓여있는 하부 전극을 접지 전극으로 사용하고, 맞은 편의 상부 전극에 전력을 인가하는 방식을 사용한다. RIE mode의 경우 상부 전극을 접지 전극으로 사용하고, 기판이 놓인 하부 전극에 전력을 인가하는 방식을 사용한다. 전력은 RF(radio frequency)의 주파수를 갖는 교류전원을 사용하고, 보통의 경우 13.56MHz의 주파수를 플라즈마 형성에 많이 사용한다. RIE mode의 경우 플라즈마 형성을 위한 전력을 서로 다른 두 가지 주파수를 사용하기도 하는데 플라즈마 밀도 형성을 위한 고주파수의 전력과 이온을 제어하기 위한 저주파수 전력을 동시에 하부 전극에 인가하는 방식을 사용하는 경우가 많다. CCP 장비 내의

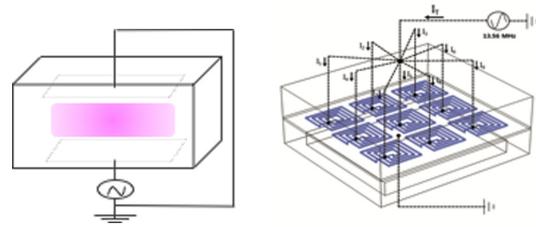


그림 1. 디스플레이 공정용 CCP 장비(왼쪽)와 ICP 장비(오른쪽)의 개념도

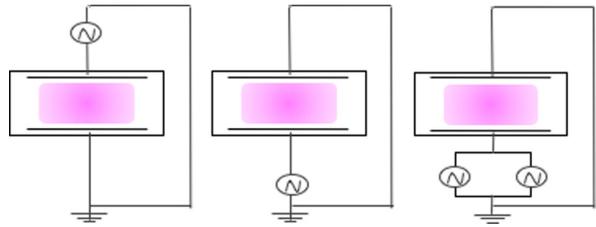


그림 2. PE mode(왼쪽), RIE mode(가운데), dual frequency RIE mode(오른쪽)의 개념도

mode 구분은 그림 2와 같이 구분할 수 있다.

2.3. ICP 방전 장비

ICP 장비는 CCP 장비에 비해 낮은 압력에서 높은 밀도의 플라즈마를 형성해야 할 필요가 있는 경우에 주로 사용된다. ICP 방전의 경우 CCP 방전과는 달리 판형의 전극을 사용하지 않고, 그림 1의 오른쪽 개념도와 같이 상부에 코일(coil) 형태의 전력원을 사용한다. 코일 형태의 전력원에 교류의 전류가 흐르면 전류에 의한 자기장이 유도되고 시간에 따라 변하는 자기장이 다시 전기장을 유도하게 된다. 이렇게 유도된 전기장이 플라즈마 내에서 플라즈마를 형성하는데 기여하는 주요 전력원으로 작용하게 된다. 이를 전기회로적으로 보면 마치 유도코일에 의한 전력전달과 비슷한 방식이 된다. 이렇게 형성된 전기장(에너지를 공급해주는)의 방향은 플라즈마 내의 전자가 에너지를 가지고 빠져나가는 방향과 수직인 방향을 이루게 된다. CCP 방전의 경우에는 에너지의 공급방향과 에너지의 손실 방향이 같은 방향이라서 에너지를 많이 가해주어도 그만큼 에너지 손실이 생기는데 반해 ICP 방전에서는 형성된 플라즈마에서 에너지 손실이 일정하다면 더 많은 에너지의 공급이 가능하다. 따라서 더 많은 에너지를 흡수할 수 있게 되므로 플라즈마의 밀도가 CCP 방전보다 더 높게 형성된다.

보통 반도체 장비의 경우 안테나 코일 유닛(unit)을 1개만 사용하는 경우가 많으나, 디스플레이 공정 장비의 경우 넓은 면적에서 균일한 플라즈마 특성을 확보하기 위해서 여러 개의 안테나 유닛을 사용하는 경우가 많다.

2.4. 임피던스 매칭

플라즈마의 형성을 위해서 전력을 공급하는 방식에 차이가 있지만, 일반적으로 전력원으로는 RF 주파수를 가지는 교류 전원을 사용한다. 플라즈마는 이렇게 공급 받은 에너지를 흡수하기도하고 저장했다가 다시 전력원의 방향으로 되돌려 주기도 한다. 따라서 회로적으로 보게 되면 플라즈마는 하나의 임피던스(impedance)를 지닌 로드(load)로 취급할 수 있다. 에너지를 흡수하는 부분은 저항(resistance)으로 취급할 수 있고, 저장했다가 다시 되돌려 주는 부분은 리액턴스(reactance)로 취급할 수 있다. 전력원의 입장에서는 반사되어서 돌아오는 전력이 없어야하기 때문에 임피던스 매칭(impedance matching)을 시킬 필요가 있다. 또한, CCP 방전의 경우 전력원과 연결된 전극이 직접 플라즈마와 접해있기 때문에 전극을 통해서 빠져나오는 전자에 의한 정전류를 방지하기 위해서 축전기(capacitor)를 연결해준다(이를 blocking capacitor라고 한다). 임피던스매칭 회로는 전력원의 입장에서 리액턴스 부분이 상쇄되는 것처럼 보여 지게 해주는 역할을 한다. 이러한 임피던스 매칭 회로는 플라즈마가 형성되는 방식에 따른 특성(CCP 방전, ICP 방전 또는 기타 방식의 방전)에 따라서 기본적인 구성요소가 결정되고 회로적인 안정화를 위해 부가적인 성분이 추가된다. 임피던스 매칭 회로를 지난 후 플라즈마에 접하는 전극 또는 코일의 경우 전력원에서 공급한 것과는 다른 형태의 전압 또는 전류 파형을 지니게 된다. 때로는 이러한 파형이 지나는 주파수 성분을 분석하여서 오류검출 신호로 사용할 수도 있다.

2.5. 플라즈마 쉬스(sheath)

공정용 플라즈마 내의 전자는 이온에 비해서 높은 에너지를 가지고 있으며, 속도 또한 빠르다. 전력원으로 많이 사용하는 수십 MHz 이하의 교류로 걸리는 전기 신호에 대한 전자와 이온의 반응을 살펴보면, 전자는 전

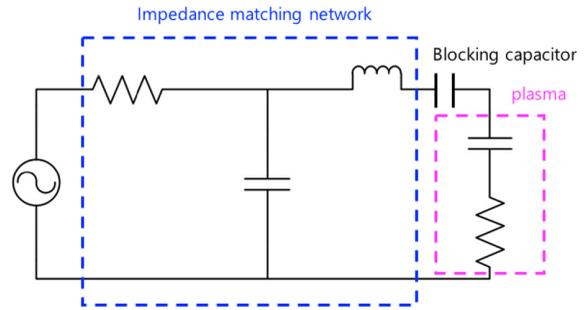


그림 3. 간단한 임피던스 매칭회로의 예시

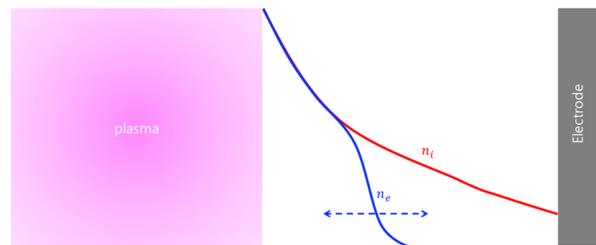


그림 4. 전극부 주변 쉬스에서 전자와 이온의 밀도 분포 개념도

기신호에 즉각적으로 반응할 수 있지만 이온은 그에 대한 반응이 매우 느리다. 빠르게 움직이는 전자는 챔버에 갇혀 있지 않고 벽면 또는 전극으로 먼저 빠져나가게 되며, 이렇게 빠져나가는 전자의 결핍이 챔버의 벽면 또는 전극 주위에 형성되게 된다[8]. 전자의 밀도와 이온의 밀도에 의한 차이는 전위차를 형성하게 되고 이러한 전위차가 생기는 영역은 보통 드바이 길이(Debye length)의 수배~수백배 정도이며, 이때에 형성되는 전위차는 전자가 가지는 에너지의 몇 배 정도에 해당하는 전위차를 가진다. 이렇게 형성된 전위차는 양의 전하를 가진 이온이 빠져 나가는데 전위차에 의한 에너지를 전해주는 역할을 하기도 한다.

CCP 방전에서는 RF의 변화 주기에 따라서 쉬스의 길이와 전압차가 인가된 전압의 위상에 따라서 변하게 된다. 이러한 쉬스를 모델링하기 위한 시도는 다양하게 있었으며, 어떻게 모델링하느냐에 따라서 쉬스의 길이와 쉬스에서의 전압차가 차이를 보이는 경우가 있으나, 보통 공정 조건의 상황에서 그 차이가 현격하게 차이나는 경우는 거의 없다.

2.6. 공정 가스 및 식각 모니터링

디스플레이용 소자에서 플라즈마를 사용하여 건식 식

각을 적용하는 박막은 주로 Si을 포함하는 박막인 경우가 많다. 배선의 금속을 식각하는 경우도 있으나 최근에는 저저항 배선의 적용으로 Cu 배선이 적용되는 경우가 많기 때문에 배선의 식각에는 잘 사용되지 않는다. 디스플레이 소자에서 Si을 포함하는 박막의 특성은 반도체 박막과는 그 특성이 조금 다르나 큰 틀에서는 유사하다. 따라서 식각을 위해 사용하는 가스의 종류도 거의 비슷하다. 식각에 사용되는 가스는 주로 불소계열의 SF₆, CF₄, NF₃ 등이 있고, 염소계열의 Cl₂, HCl 등이 있고, 불활성 가스(inert gas)로는 Ar, He 등이 있다. 이외에 활발한 반응을 위해 추가하는 가스로는 N₂, O₂ 등이 있다. 이러한 가스들이 식각에 참여할 때에는 화학적 식각과 물리적 식각이 동시에 형성된다. 알려진 바와 같이 화학적 식각 또는 물리적 식각을 목적으로 하여 식각하는 경우보다는 복합적으로 식각하는 조건을 만들어 주는 것이 식각률이 높기 때문이다. 최근에는 온실가스 효과를 고려한 공정도 이루어지고 있다. SF₆가 식각용 불소계열 가스로 많이 사용되어 왔으나, CO₂에 비해 온실가스효과가 매우 높기 때문에 이보다 온실가스효과가 적은 가스를 사용하는 공정을 개발하는 노력이 지속적으로 진행되고 있다.

식각 시점의 종료는 통상 식각률을 고려한 시간을 사용하는 방법과 식각 중 광학적 모니터링을 사용하는 방법(end point detection)을 사용한다. 식각률의 편차를 고려할 때에는 광학적 모니터링 방법이 식각률의 편차가 존재하여도 원하는 시점에 공정을 마칠 수 있는 장점이 있다. 예를 들어 아래의 그림 5와 같은 경우를 보면, 식각 공정에 참여하는 주요 입자의 광학적 신호(파란색), 식각되는 박막의 광학적 신호(빨간색), 식각되는 박막의 하부에 존재하는 박막의 광학적 신호(검은색)가 시간에 따라 변하는 것을 볼 수 있다. RF 전력이 인가

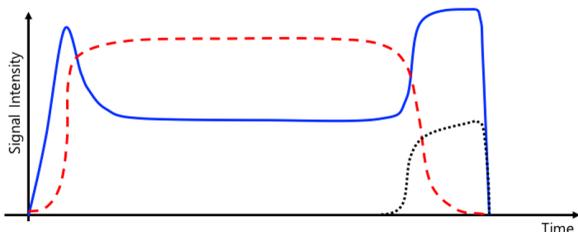


그림 5. EPD 신호의 개념도 예시

되고 초기에 식각이 진행되면서 빨간색의 신호가 커지고 파란색의 신호가 줄어들면서 거의 일정한 신호가 검출된다. 식각이 종료되는 시점에 식각되어지는 박막에 의한 신호가 점점 줄어들게 되고, 하부막에 의한 신호가 검출되기 시작한다. 이후 RF 전력을 중단하여 식각을 종료하는 방법을 적용한다.

3. 식각 장비의 시뮬레이션

3.1. 시뮬레이션 기법

공정용 플라즈마 시뮬레이션 방법으로 널리 사용되는 방법은 크게 세 가지가 있다. 플라즈마 내 입자들의 움직임을 일일이 기술하는 방식(입자의 개수가 너무 많아서 모든 입자를 기술하는 것이 아니라 대표입자를 기술하는 방법을 사용한다. particle simulation), 입자들의 위치 및 속도 분포를 시간의 함수로 구해내는 방법(kinetic simulation), 거시적 관점에서 입자들의 움직임을 유체로 취급하는 방법(fluid simulation)이 있다. 필요에 따라서는 kinetic 방법과 fluid 방법을 혼용한 hybrid simulation을 사용하기도 한다. 이러한 simulation 방법의 장단점은 이미 잘 알려져 있으며, particle > kinetic > hybrid > fluid의 순서로 시뮬레이션 결과를 얻는데 필요한 시간이 소요된다고 알려져 있다. 통상적으로 반도체 소자용 플라즈마 공정을 시뮬레이션 할 때에는 위에 기술된 방법들이 가지는 유효성에 대해서 이미 잘 알려져 있고[9], 시뮬레이션을 수행하는 컴퓨터 환경, 필요한 정밀도 수준, 보고자하는 변수들의 목표에 따라서 선택적으로 사용한다.

3.2. 장비 크기에 따른 시뮬레이션 적용의 어려움

시뮬레이션을 통해 결과를 얻기 위한 공간(부피 또는 면적)을 비교해 보면 반도체 소자에 사용하는 300mm 웨이퍼와 8세대 유리 기판의 크기는 매우 큰 차이를 보이고 있다. 추가로 대칭성을 고려한다면 반도체 소자 공정용 플라즈마에서 전극의 크기는 150mm에 해당하지만, 디스플레이 소자 공정용 플라즈마에서 전극의 크기는 최소 2,200mm는 되어야 한다. 따라서 공간상에서

계산을 수행해야 하는 면적(또는 부피)이 10배 이상 증가하게 된다. 이는 같은 기법과 유사한 공정 조건을 적용하여도 계산의 결과를 얻는데 걸리는 시간상의 어려움으로 이어지게 된다.

장비의 크기가 가지는 조건을 고려한다면, 유체 시뮬레이션 기법을 적용하는 것이 현실적으로 결과를 얻는 하나의 방법이 될 수 있다. 유체 시뮬레이션을 적용할 경우 전자가 가지는 에너지 분포에 대한 정보를 가정하고 풀기 때문에 이에 대한 정확성을 확보하기 어렵다는 단점이 있다. 따라서 전자의 에너지 분포에 대한 가정을 어떻게 하는지가 결과에 영향을 미치는 것을 반드시 고려해야만 한다.

3.3. 시뮬레이션 차원

플라즈마의 특성을 알려주는 변수들의 공간적인 분포를 알기 위해서는 3차원 공간에서 시뮬레이션을 수행하는 것이 좋겠지만, 3차원 공간에 대해서 시뮬레이션을 수행하는 것은 좋은 컴퓨터 환경과 많은 계산 시간이 소요된다. 따라서 적절한 가정을 통해 2차원(공간상에서 한쪽 축으로는 균일하다고 가정), 1차원(공간상에서 2개의 축으로는 균일하다고 가정)으로 계산을 위한 공간을 줄이기도 하고 필요에 따라서는 0차원(공간에 대해서 변수를 평균) 시뮬레이션을 하기도 한다. 앞서 기술한 바와 같이 반도체 소자용 플라즈마 장비의 경우 공간적으로 대칭성을 가지는 것처럼 취급할 수 있기 때

문에 2차원 시뮬레이션을 주로 수행한다. 하지만, 디스플레이 소자용 플라즈마 장비의 경우 대칭성이 없기 때문에 이러한 적용이 어렵다. 따라서 시뮬레이션을 적용하여서 얻으려는 결과가 어떤 것인지를 명확하게 하는 것이 우선시 되어야 한다. 예를 들어, 공정 조건에 따른 이온 및 라디칼들의 상대적인 양이 얼마나 되는지를 우선적으로 알고자 하는 경우에는 0차원 시뮬레이션만으로 충분할 수 있다. 전극 간 간격에 따른 변수의 변화를 우선적으로 알고 싶은 경우에는 1차원 시뮬레이션의 적용으로 충분할 수 있다. 전극과 챔버월 사이의 배치 및 이에 따른 영향을 보고자 하는 경우에는 2차원 시뮬레이션을 적용할 수 있다. 장비와 공정조건에 따라 나타나는 식각 반응의 균일도를 확인해야 할 경우에는 필요한 정도에 따라 2차원 또는 3차원 시뮬레이션을 적용해야 한다. 예를 들어 아래의 그림은 2차원으로 모델링한 3세대급 CCP 방전에 대한 시뮬레이션 사례이다. 2차원으로 얻은 값에 대해서 전극의 중간영역에서 z-방향으로 전자밀도의 분포를 1차원 모델링과 비교하면 거의 같은 것을 알 수 있다. 다만 2차원 모델에서는 전극이 유전체(dielectric) 및 챔버월과도 전기적인 상호작용을 하고 가스 배기구의 구조가 존재하기 때문에 약간의 위치이동이 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 원하는 조건에 대한 것을 정확하고 적절하게 설정한다면, 1차원으로 전극간격의 주요 변수를 도출할 수 있고, 2차원으로 주변부와의 상호작용을 도출할 수 있다.

만약, ICP 방전을 적용한 공정에서 안테나 코일의 변형에 따른 플라즈마 형성의 균일성을 보고자 한다면 3차원 시뮬레이션을 적용하는 것이 필요하다. 따라서 확인하고자 하는 것들에 대한 명확한 목표가 시뮬레이션 적용에 우선적으로 고려되어야 한다. 그림 7은 3차원으로 안테나의 형상에 의해 형성된 전자기장을 전부 고려한 ICP 방전의 결과이다. 안테나의 구조와 배치에 의한 효과를 전부 고려하려면 3차원이 필요한 사례라고 할 수 있다.

3.4. 시뮬레이션 적용 시 수치 기법의 어려움

플라즈마를 유체 시뮬레이션을 이용해서 기술하고자 하는 경우에 방정식을 풀기 위한 시간과 공간의 구성을 먼저 설계해야 한다. 방정식을 양해법(explicit method)

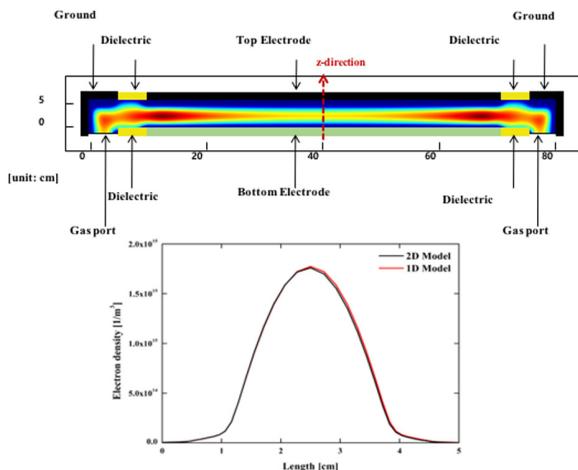
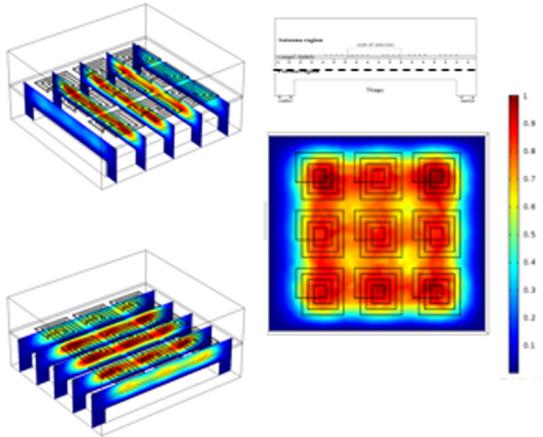


그림 6. 3세대급 CCP 방전에서, 2차원 모델과 1차원 모델에 의한 전자밀도 분포의 비교(시간평균)

• Electron density (max=6.7x10¹⁷m⁻³)



• Electron temperature (max=1.78V)

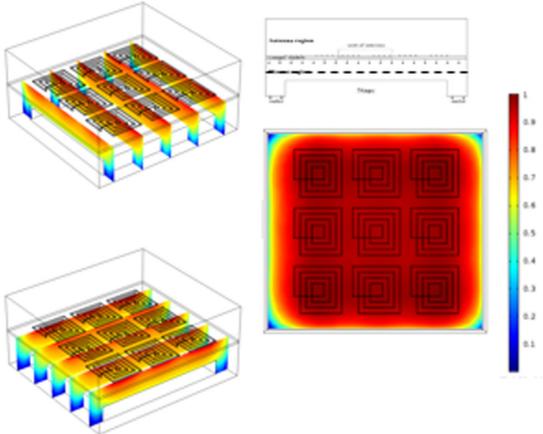


그림 7. 3차원 시뮬레이션에 의한 ICP 방전 시 플라즈마 변수의 분포 사례

으로 풀고자 하는 경우에는 시뮬레이션을 위한 시간 간격과 공간간격에 제약이 따른다. 이를 고려하면 보통의 공정 조건에서, 시간 간격은 10⁻¹²s보다 작게 잡아야 하고, 공간 간격은 수 micrometer보다 작게 잡아야 한다. 이렇게 8세대 크기의 장비에 시뮬레이션을 적용한다면, 공간상에서 계산을 수행해야 하는 위치는 약 10¹⁷개가 나오고, 1ms까지의 결과를 보기 위해서는 10⁹회 시간에 대한 계산을 수행해야 한다. 이는 현실적으로 구현하기가 매우 어렵다. 따라서 음해법(implicit method)를 도입하여 시간상의 제약과 공간상의 제약을 극복하는 방법을 사용한다. 음해법을 사용할 경우에는 수치적인 안정성은 확보할 수 있으나, 정확성을 확보할 수 없는 경우가 많이 때문에 음해법을 도입할 경우에는 음해법

이 가지는 의미와 적용한계를 이해하고 적용하는 것이 필요하다.

3.5. 정상파 효과(standing wave effect)

면적이 큰 전극을 사용하여서 교류의 전력을 인가하는 경우 고려해야 하는 사항 중의 하나가 정상파 효과(standing wave effect)이다[10-12]. 교류를 인가하는 경우 주파수에 따라서 파장이 결정되는데, 파장의 길이와 전극의 길이가 비슷한 영역에 들어오게 되면, 전극 내 전압이 일정하지 않게 되어서 플라즈마에 형성되는 전기장의 분포에 영향을 미치게 된다. 인가하는 교류의 주파수가 고주파로 가거나 전극의 크기가 커질수록 이러한 현상이 일어나는 것으로 잘 알려져 있다. 이를 극복하기 위해서는 어떠한 상황에서 정상파효과가 일어나는지 파악해야 하는데, 이를 위해서는 맥스웰 방정식(Maxwell's equation)을 풀어서 전기장을 구하는 것이 추가되어야 한다. 반도체 공정 장비용 플라즈마에서는 대칭성 때문에 이 과정이 비교적 간단하게 해석될 수도 있으나, 디스플레이 공정 장비의 경우 전극의 가로와 세로 크기가 서로 다르기 때문에 이의 해석을 위한 작업이 상대적으로 복잡하다.

4. 결 론

디스플레이 소자 공정용 플라즈마에 대한 시뮬레이션의 경우 앞서 기술한 내용들을 고려할 때, 많은 산출량이 필요하고 그 결과를 얻기가 쉽지 않다. 또한, 여러 가지 다른 이유로 인해서 디스플레이 공정용 플라즈마 시뮬레이션 결과는 반도체 공정용 플라즈마 시뮬레이션에 비해서 참고 자료나 문헌을 얻기가 어렵다. 그럼에도 불구하고 비대칭 구조와 대면적 전극에 적용할 수 있는 다양한 알고리즘의 시도가 계속되어지고 있어서 가상의 실험을 통한 공정 및 장비의 효율 향상에 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] A. Fiala, L. Pitchford and J Boeuff, *Phys. Rev. E*

49, 5607 (1994).
 [2] A. Murphy and C Arundell, *Plasma Chem. Plasma Process.* **14**, 451 (1994).
 [3] J. Hopwood, *Plasma Sources Science and Technology* **1**, 109 (1992).
 [4] K. Nakamura, Y. Kuwashita, and H. Sugai, *Japanese Journal of Applied Physics* **34**, L1686 (1995).
 [5] K. Ikeda, T. Okumura, and V. Kolobov, *Journal of the Vacuum Society of Japan* **50**, 424 (2007).
 [6] M. Lieberman, J. Booth, P. Chabert, R. Rax and Turner, *Plasma Sources Sci. Technol.* **11**, 283 (2002).
 [7] V. Guerra, P. Sa and J. Loureiro, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **28**, 125 (2004).
 [8] M. Lieberman and A. Lichtenberg, *Principles of plasma discharges and material processing*, John Wiley&Sons (2005).
 [9] H. Kim, F Iza, S Yang, M Radmilovic-Radjenovic, and J Lee, *J. Phys. D* **38**, R283 (2005).

[10] H. Schmidt, L. Sansonnens, A. Howling, C. Hollenstein, M. Elyaakoubi and J. Schmitt, *J. Appl. Phys.* **95**, 4559 (2004).
 [11] Z. Chen, S. Rauf and K. Collins, *J. Appl. Phys.* **108**, 073301 (2010).
 [12] I. Lee, D. Graves, and M. Lieberman, *Plasma Sources Sci. and Technol.* **17**, 015018 (2008).

저 자 약 력

최 희 환



- 1990년~2001년 : 한국과학기술원 물리학과 학사, 석사, 박사
- 2001년~2005년 : 삼성전자 LCD 사업부(현, 삼성디스플레이) 책임연구원
- 2005년~현재 : 한국항공대학교 항공전자정보공학부
- 관심분야 : 디스플레이 공정 및 플라즈마

시물레이션