

금속 윈도우 유도 결합 플라즈마 방전 장치에 대한 수치 해석적 접근

최희환(한국항공대학교 항공전자정보공학부)

1. 서 론

잘 알려진바와 같이 디스플레이 소자의 공정에서 플라즈마를 이용한 공정으로는 식각과 증착이 있다. 증착 공정에서는 PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)을 사용하거나 DC magnetron sputtering을 사용한다. 이러한 증착 공정의 경우에는 RF(Radio Frequency) 전력원을 사용하여서 CCP(Capacitively Coupled Plasma)를 형성하거나, DC 전력원을 사용하여서 플라즈마를 형성한다. 식각 공정에서는 RF 전력원을 사용하는 CCP와 더불어 ICP(Inductively Coupled Plasma)를 발생시켜서 공정에 사용하는 방법을 사용하기도 한다. 디스플레이 소자 공정에서 플라즈마를 사용하는 식각 공정에 CCP를 사용하는 경우 RF를 공급하는 전력원이 평행판에 연결되어 있는 구조를 많이 사용한다. 공정을 위한 기관은 전력을 공급하는 평행판에 놓여 있는 경우도 있고 반대편에 놓여 있는 경우도 있다. CCP를 사용하는 장비의 경우 간단한 장비 구조와 상대적으로 쉬운 유지보수의 장점에도 불구하고, 낮은 플라즈마 밀도를 갖기 때문에 높은 플라즈마 밀도가 필요한 경우에는 ICP를 이용한 장비를 사용한다. 대표적으로 산화막과 금속막을 식각하는 경우에는 낮은 공정 압력이 필요하기 때문에 충분한 플라즈마 밀도를 형성해 주기 위해서는

ICP를 사용하는 것이 유리하다.

일반적으로 ICP 장비의 구성은 플라즈마에 전력을 전달해주기 위한 전류를 흘려주는 안테나, 플라즈마와 안테나를 구분짓는 윈도우 영역, 그리고 플라즈마가 형성되는 영역으로 나뉜다. CCP와 달리 ICP에서는 전력을 코일에 흐르는 전류를 통해서 공급한다. RF의 교류로 흐르는 전류는 자기장을 생성하고, 시간에 따라 변하는 자기장은 다시 유도 전기장을 생성한다. 이 때 생긴 유도 전기장을 통해서 플라즈마에 에너지를 전달하는 방법으로 전력을 공급하는 방식을 사용한다. 보통의 경우는 플라즈마와 안테나 영역을 구분하기 위한 윈도우 영역의 물질로 세라믹(ceramic)을 사용하는 경우가 많다. 세라믹은 전자기장을 잘 투과시키는 반면에 식각 공정 중에 생기는 식각 부산물이 표면에 붙게 되는 경우 오염원으로 작용할 수 있기 때문에 유지보수의 관점에서 ICP 장비가 CCP 장비보다 불리하다고 알려져 있다. 또한, 안테나의 배치가 틀어지면 형성되는 자기장과 유도 전기장이 달라지기 때문에 안테나 배치의 정밀성이 필요하고, 식각용 가스를 공급하는 배관의 위치를 형성하는데 제한적이고, 세라믹 윈도우의 온도를 제어하기가 용이하지 않기 때문에 장비의 복잡성이 더해진다.

ICP 장비를 구성할 때에는 기관의 상부에 안테나를 배치시키고 기관이 놓여진 전극에는 RF 전력을 별도

로 인가하는 방법을 사용한다. 이때에 사용되는 RF 주파수는 보통 안테나에 가해지는 주파수 보다 낮은 값을 가진다. 안테나의 전력으로는 높은 밀도의 플라즈마를 형성하고, 낮은 주파수의 RF 전력을 기관면에 사용하여 형성된 이온을 기관으로 이동시키기 용이하게 하려는 목적이 크다. 따라서 디스플레이 공정에 사용되는 ICP 장비는 플라즈마의 형성에 주로 영향을 미치는 안테나를 통해서 유도 전기장으로 전력을 공급하는 것과 기관 쪽으로 이온을 이동시키기 위해 전력을 공급하는 부분으로 나눌 수 있다. 낮은 주파수의 RF 전력을 걸어주는 부분은 CCP 방전과 원리가 동일(RF bias라고 부른다)하므로 일반적으로 디스플레이 공정에 사용되는 ICP 장비는 안테나의 ICP와 기관부의 CCP가 동시에 플라즈마 형성과 유지에 관여하는 구조라고 할 수 있다.

전술한 바와 같이 ICP 장비에서 사용되는 세라믹 윈도우의 경우 단점을 가지고 있기 때문에 이를 다른 방법으로 대체하려는 방법이 최근 시도되고 있다. 본 원고에서는 새로운 기술에 대해서 수치해석적으로 접근하는 방법에 대해서 논의해 보도록 한다.

2. 플라즈마 해석을 위한 수치해석방법의 개요

디스플레이 공정에 사용되는 플라즈마의 경우 저온 플라즈마로 분류되며, 공정용 챔버에 넣어주는 중성 가스에 비해 이온화율이 매우 작다. 이러한 플라즈마를 수치적으로 해석하기 위해서는 여러 가지의 접근이 가능한데, 각각의 접근법은 장단점이 있어서 상호 보완적인 측면이 있다. 플라즈마 내의 입자들이 가지는 특성을 정확하게 알기 위해서는 분포함수를 구해야하는데 분포함수를 구하는 기본 방정식은 다음과 같은 편미분 방정식이다.

$$\frac{df(\vec{r}, \vec{v}, t)}{dt} + \vec{v} \cdot \nabla_{\vec{x}} f(\vec{r}, \vec{v}, t) + q \frac{\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}}{m} \cdot \nabla_{\vec{v}} f(\vec{r}, \vec{v}, t) = \left[\frac{\partial f(\vec{r}, \vec{v}, t)}{\partial t} \right] \quad (1)$$

위의 편미분 방정식을 각각의 입자의 종류에 따라서 구할 때 전자기장을 구하는 방정식, 기체의 흐름을 구하는 방정식, 열전도를 구하는 방정식과 이를 연립하여 풀면 수치적인 결과를 얻을 수 있다. 이러한 과정이 매우 복잡하기 때문에 이를 간단하게 바꾸는 방법을 주로 사용하여 플라즈마를 해석하기 위한 수치적 방법을 적용한다.

2.1. Particle simulation method

Particle method는 플라즈마를 해석하기 위한 kinetic method 중에서 흔하게 사용되는 방법 중 하나이다. 플라즈마 내에 있는 입자들의 움직임을 입자의 입장에서 고려하여 수치적인 계산을 수행하는 방법이다. 입자들의 움직임을 전기장과 자기장에 의한 힘을 받아서 움직이기 때문에 이를 고려하여 일정한 시간 간격을 기준으로 입자가 어떤 위치에 어떤 상태(state)로 있는지를 고려하는 방법이다.

챔버 내의 입자의 갯수는 매우 많고 압력이 높은 CCP의 경우 압력에 비례해서 입자의 갯수가 증가하기 때문에 모든 입자를 고려하는 것은 현실적으로 어렵기 때문에 입자들 중 대표성을 부여한 샘플에 해당하는 입자를 선정하여 고려하는 방법을 주로 사용한다. 또한, 입자들의 위치에 대한 정보를 특정한 구역을 정해서 이 영역 내에서 고려하여 계산의 용이성을 확보하는 방법(Particle-In-Cell)을 주로 사용한다.

이 방법에는 풀어야하는 방정식의 갯수가 매우 많기 때문에 계산에 소요되는 시간이 많이 걸리나, 입자들을 매우 많이 고려하기 때문에(특히 저압 영역에서) 실

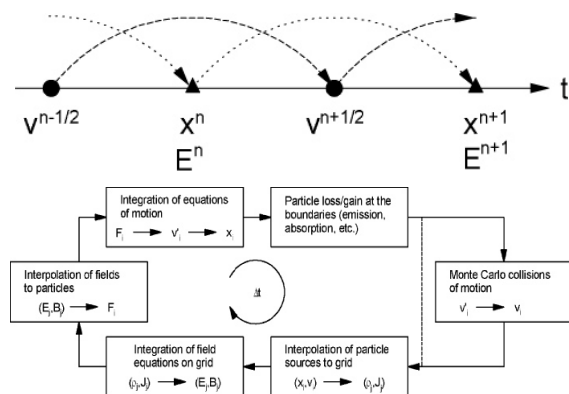


그림 1. PIC 방법의 개념도

제 실험으로 측정된 결과와 비교할 때 다른 방법에 비해서 정확성을 확보하는 경우가 많다. 그런데, 영역의 크기와 시간 간격에 대한 제약이 존재하고, 수렴된 조건을 찾기가 어렵기 때문에 적절한 경험과 판단을 확보하는 것이 중요하다.

입자들의 정보를 구하게 되면 위치, 에너지(또는 운동량)에 따른 입자들의 분포를 구할 수 있게 된다. 이를 에너지에 대해서 적분하게 되면 각 위치별로 입자들의 밀도, 운동량(또는 flux)와 공간에 따른 에너지 분포를 얻을 수 있게 된다. 이렇게 얻은 정보는 시각적으로 이해하기 쉬운 정보들이기 때문에 플라즈마 변수들의 분포와 경향을 파악하기 용이하고 분포함수로 부터 측정값을 비교하기 좋은 장점이 있다.

계산적 관점에서는 GPU(Graphic Process Unit)를 병렬로 처리하는 경우가 많은데, GPU의 경우 CPU에 비해서 memory bandwidth가 크고, speed per core가 크기 때문에 병렬처리를 통해서 빠른 계산을 얻기가 좋기 때문이다.

2.2. Fluid simulation method

Fluid method는 챔버 내의 플라즈마와 중성 가스를 유체로 취급하여 풀어야하는 방정식을 간단하게 바꾸는 방법을 사용하여 계산을 수행한다. 이 경우 입자들의 위치와 시간의 분포는 계산으로 구하게 되지만, 입자들이 가지는 에너지 분포는 가정을 하고 풀게 된다. 따라서 입자들이 가지는 에너지 분포가 가정한 값과 차이가 크게 되면 오차가 늘어나게 된다. 반면에 풀어야하는 변수의 양이 particle method에 비해서 줄어들기 때문에 동일한 성능의 컴퓨터를 사용한다면 계산의 결과를 비교적 빨리 얻을 수 있는 장점이 있다.

예를 들어서 플라즈마 내에 존재하는 입자의 밀도 분포를 구하기 위해서는 식(1)로부터 적분을 통해서 $n(\vec{r},t) = \int f(\vec{r},\vec{v},t)dv$ 와 같은 방법으로 구해야하는데, 식(1)에서 구해야하는 분포 중에서 에너지 분포를 가정하는 방식을 사용한다.

현재까지 3차원 simulation의 사례는 주로 반도체 공정용 플라즈마에 한정되어 있는 경우가 많은데, 디스플레이 공정용 플라즈마의 경우 비대칭성으로 인해

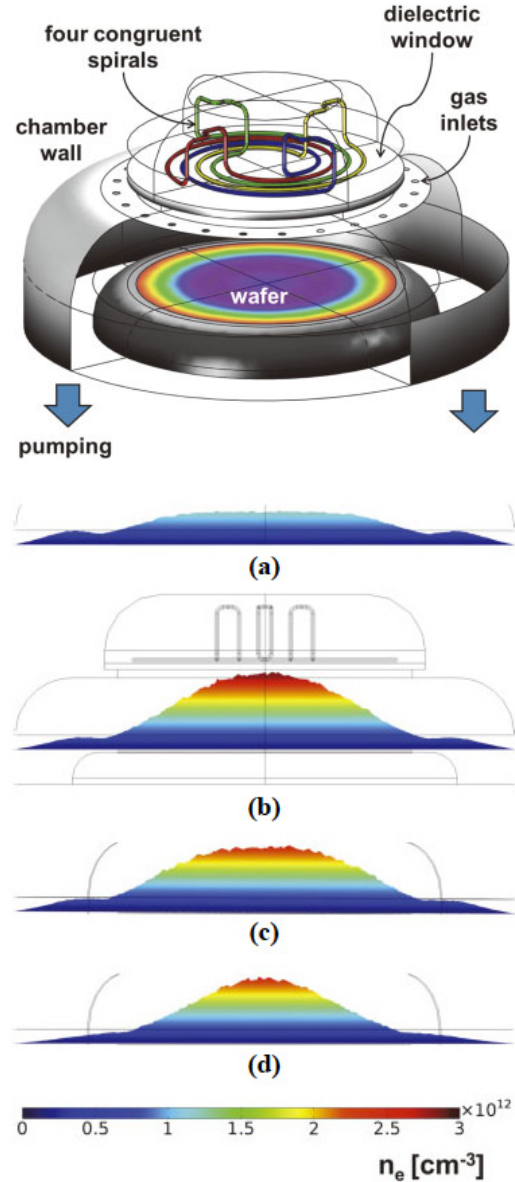


그림 2. 반도체 공정용 플라즈마 장비에서 fluid simulation method를 적용한 3차원 결과의 사례

3차원 simulation이 필요한데, 차원이 늘어나면서 변수의 양이 늘어나서 방정식의 갯수가 늘고 챔버의 부피가 반도체 공정에 비해 매우 크기 때문에 정확성을 확보하면서 결과를 얻기가 상당히 까다롭기 때문이다.

2.3. Hybrid simulation method

1절과 2절에 언급한 바와 같이 particle simulation method와 fluid simulation은 각각의 장점을 가지고

있다. 따라서 장점을 최대화하기 위해서 정확도는 높이고 시간 효율을 높이기 위해서 두 방법을 적절히 섞어서 사용하는 hybrid simulation 방법이 있다. Hybrid simulation method의 경우 입자의 에너지 분포함수에 초점을 맞추는 경우가 많다. 입자의 에너지 분포함수에 초점을 맞추게 되면 식 (1)이 다음과 같이 간단해진다.

$$\frac{df(\vec{v},t)}{dt} + q \frac{\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}}{m} \cdot \nabla_v f(\vec{v},t) = \left[\frac{\partial f(\vec{v},t)}{\partial t} \right] \quad (2)$$

이렇게 구한 방정식을 입자의 에너지 분포함수가 필요한 곳에 적용하고 fluid simulation에서 필요한 정보를 구하는 방법을 사용한다. 이 경우 식 (2)를 풀기위한 시간이 필요하지만, 에너지 분포만 적용하기 때문에 일반적인 kinetic simulation 보다는 계산 결과를 얻는 속도가 빠르고, fluid simulation보다는 정확해진다. 2절의 fluid simulation method와 3절의 hybrid simulation method의 경우 공통적으로 heavy particles(ions & neutrals)를 풀기 위해서는 momentum equations를 풀어서 flux를 구하고 이를 continuity equation에 넣어서 구하는 방법을 바탕으로 한다. 각 입자들이 가지는 에너지 값은 별도의 편미분 방정식을 풀어서 구하게 된다.

3. 시간적 공간적 제약

플라즈마에 전력을 넣어주기 위해서는 전기장을 계산해야하고, 전력원으로 전류가 존재하는 ICP 같은 경우에는 전자기장을 구해 주어야한다. 플라즈마가 형성되면서 +의 전하를 갖는 이온과 -의 전하를 갖는 이온 및 전자의 분포가 생기면 이들에 의한 전기장이 생기게 된다. 이 전기장을 구하기 위해서는 Poisson's equation을 풀어야하는데, 결과로 나오는 전기장이 전하를 가진 입자들을 움직이게 되므로 flux와 밀도 분포에 영향을 주게 된다. 따라서, 전기장을 구하는 것은 밀도 분포와 직접적인 연관이 있다. 이러한 영향으로 인해서 수치적인 접근에서 시간 간격에 제약이 따르게 된다. 또한, 플라즈마의 경계 부근에서는 전자 및 이온의 밀도와 전기장이 급격하게 변하기 때문에 공간적으로

로 이들의 차이를 해석하기 위해서는 공간 간격을 설정하는데 제약이 생긴다.

3.1. 시간 제약(Δt : time step limitation)

플라즈마를 수치적으로 접근하기 위해서는 변수들의 시간 변화에 대한 값을 구해야 한다. 이 때 가장 쉽게 적용 할 수 있는 방법은 explicit integration technique이다.

$$N(t + \Delta t) \simeq N(t) + \frac{dN(t)}{dt} \cdot \Delta t \quad (3)$$

이러한 방법을 적용하기 위해서는 기본적으로 전기장의 변화와 밀도의 변화가 완성되어 steady state에 도달하기 전에 시간에 따른 변화를 반영하여야한다. 따라서 시간 제약이 생기는데, 공정용 플라즈마에서 이러한 시간 (dielectric relaxation time Δt_D)은 대략적으로 10^{-12} 초 정도이다. 일반적으로 fluid simulation method에서 수치적인 해석을 없애기 위한 시간적인 제약으로 알려져 있는 Courant time step(Δt_C)은 공정용 플라즈마에서 10^{-9} 초 정도이다. 추가적으로 플라즈마가 가지는 고유진동수를 나타내주는 plasma frequency ω_{pe} 에 의한 시간 $1/\omega_{pe}$ 보다 작은 time step을 적용해야한다. 이를 종합하면, $\Delta t < \min(\Delta t_D, \Delta t_C, 1/\omega_{pe})$ 와 같은 제약을 갖는다. 이를 적용하여서 계산 결과를 얻기 위해서는 상당히 많은 시간이 필요하여 비현실적인 상황에 놓이게 된다. 이를 해결하기 위한 가장 쉬운 접근은 Runge-Kuta method 방법을 적용하거나 implicit method를 적용하는 방법이다. 일반적인 implicit method를 적용하게 되면 전하를 가진 입자들을 동시에 풀기위한 매우 차원이 큰 행렬식을 풀게 변형되는데, 행렬식을 풀기 위해서는 많은 computational resource가 필요하게 된다. 이러한 부분을 줄여보기 위해서 explicit method와 implicit method를 적절하게 사용한 semi-implicit method를 적용하기도 한다.

이렇게 시간 제약을 해결하기 위한 다양한 방법을 적용하더라도 구해진 값이 급격하게 증가 또는 감소하는 불안정이 생길 수 있는데, 그 이유는 다양하기 때문에 물리적 현상에 의한 불안정(실제현상)인지 수치적

인 요소에 의한 불안정(적용된 수치방법의 오류)인지를 판단하는 것은 별도의 일이다.

3.2. 공간 제약(Δx : mesh/grid size limitaiton)

플라즈마의 해석을 위해 계산하는 변수들은 공간적으로도 급격하게 변화하는 경우가 많이 때문에 이를 고려하지 않고 풀게 되면 공간적으로 급격하게 변화하는 현상에 의한 오류가 발생하게 된다.

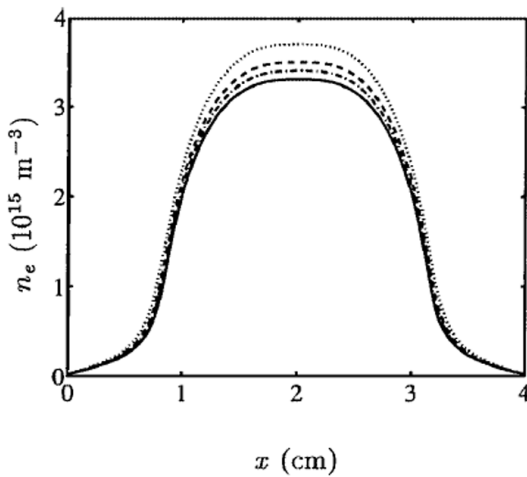


그림 3. 공간적 제약을 해결하기 위한 방법에 따른 수치적 오차의 사례

근본적으로 이러한 오차를 없애기 위해서는 공간 간격(Δx)을 드바이길이(λ_D)보다 작게 설정하면 된다. 그런데, 공정용 플라즈마에서 드바이 길이는 수~수백 μm 이기 때문에 3차원 공간에서 디스플레이 공정용 플라즈마를 해석하기 위해서는 10^{15} 개 이상의 좌표에 대해서 문제를 연립해서 풀어야하는 비현실적인 제약이 따른다.

따라서 이를 해결하기 위해서 upwind scheme, Scharfetter-Gummel scheme, Runge-Kutta method 등을 적용하지만 위의 그림 3에서 보듯이 그러한 방법들 또한 갯수에 따르는 오차를 가지는 경우가 적지 않다.

4. 전자기장의 해석

플라즈마의 해석을 위한 전자기장을 수치적으로 취급하기 위해서는 전기장과 자기장을 동시에 구해서 적

용해야 한다. CCP의 경우 전극의 크기가 작을 경우(대략 6G 정도)에는 자기장을 별도로 고려하지 않아도 되지만 8G 이상의 기판을 위한 공정에서는 CCP에서도 해석에 standing wave effect를 포함하여 정확성을 확보하기 위해서는 자기장을 고려해야 한다. Maxwell equations를 수치적으로 푸는 방법의 경우 방전식이 가지는 의미를 정확하게 이해하고 적용하는 것이 필요하다.

4.1. FDTD (Finite Difference Time Domain)

Maxwell equations에 존재하는 시간과 공간에 대한 미분을 finite difference scheme에 기반을 두어 구하는 방법이다. 이 경우 전기장, 자기장을 계산하는 위치에 대한 주의가 필요하며, 시간과 공간에 대한 전자기장값의 변화를 구할 때 explicit, implicit, semi-implicit 하게 할지는 플라즈마의 해석과 연계되어서 결정되어야 한다.

4.2. Fourier method

Maxwell equations에 있는 전자기장의 시간에 대한 변화를 sinusoidal하게 취급하면 Fourier 공간으로 문제를 간단하게 변형하여 풀 수도 있다. 또한, 해석적인 방법으로 전자기장을 구할 수 있는 근거가 있는 경우에는 Fourier series method를 적용하여서 매우 빠른 속도로 전자기장의 값을 구할 수도 있다. 이 경우 주의해야하는 부분은 주파수에 비선형성이 나타나는 경우이므로 이를 정확하게 해석에 적용하여야 한다.

4.3. Self-consistence

Maxwell equations을 이용하여서 ICP에서 발생하는 전자기장을 구할 때 많이 발생하는 문제가 자기장의 근원이 되는 전류에 대한 해석이다. 전류는 자기장을 형성해주는 근원이기 때문에 정확한 해석이 필요한데, 안테나에 흐르는 전류의 경우 형상에 따르는 reactance를 갖기 때문에 이에 의해서 전류와 전압의 변화가 생긴다. 따라서 이렇게 생긴 전류를 고려하여서 자기장을 계산하여야하고, 전압의 변화는 정전기장의 계산에 고려해야한다. 또한, 플라즈마 내에 흐르는 입자들에 의한 전류를 고려하여 전자기장의 해석을 해

야 정확성을 높일 수 있다. 이는 CCP에서의 standing wave effect를 계산하는 데에도 중요한 역할을 하기 때문에 코일 내 전류 및 전압을 정확하게 계산하기 위한 방안이 반드시 필요하다.

5. 금속 윈도우를 적용한 ICP

기존의 경우 세라믹 윈도우를 사용하였기 때문에, 전자기장을 안테나 영역에서 플라즈마 영역으로 투과 시키는 데에는 큰 문제가 없었다. 그러나 세라믹을 금속으로 변경하는 경우에는 ICP의 전력을 플라즈마로 전달하는데 변화가 생긴다. 잘 알려진 바와 같이 전자기파는 금속을 통과하기 위해서는 금속의 두께가 매우 얇거나 전자기파의 주파수가 매우 낮아야한다. 그런데, 디스플레이 공정에 사용하는 ICP의 경우는 금속의 두께나 주파수를 고려할 때에 전자기파가 금속을 통과할 수 있는 여지가 없다. 따라서 자기장이 플라즈마 내에서 유도전기장을 형성하기 위해서는 반드시 금속판이 연결되지 않은 공간이 생겨야 한다.

그림 4와 같이 간단한 형태의 ICP에서 금속영역과 세라믹 영역을 혼용한 경우를 살펴보자. 금속 영역에서는 교류의 자기장이 투과하지 못하게 되고 세라믹 영역을 통해서만 교류의 자기장이 투과하게 된다. 투과된 자기장은 플라즈마 내에서 유도 전기장을 형성하여 플라즈마에 전력을 전달하기 때문에 자기장이 어떠한 형태로 윈도우 영역을 투과하는지와 투과된 자기장이 유도 전기장을 어떻게 형성하는지가 플라즈마 형성에 영향을 주게 된다. 간단한 비교를 위해서 윈도우 영

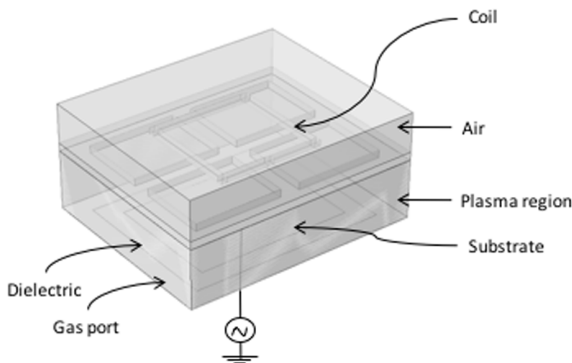


그림 4. 금속과 세라믹을 혼용한 사례의 개념도

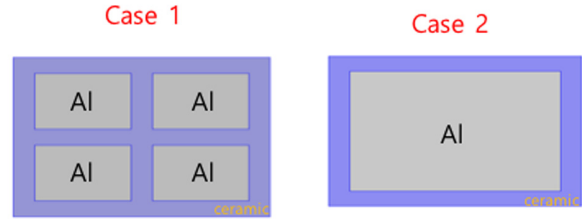


그림 5. 금속과 세라믹을 혼용한 비교를 위한 윈도우의 개념도

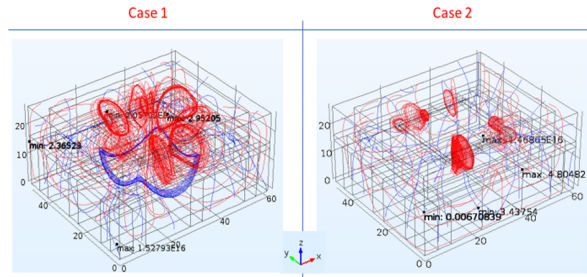


그림 6. 자기장의 분포(붉은선)과 유도 전기장의 분포(파란선)

역을 두 가지 형태로 구분하여 보았다. Al으로 이루어진 윈도우 영역이 4분할로 되어 있는 경우와 1개의 영역으로 되어 있는 경우는 자기장의 투과 양상이 달라지게 된다.

그림 6의 경우는 플라즈마를 고려하지 않고 플라즈마 영역을 일종의 유전체로 취급하여서 Maxwell equations만 풀어서 얻은 결과이다. 간단한 사례에서 보듯이 전자기장의 분포가 금속 윈도우의 분포에 따라서 달라지는 것을 알 수 있다.

자기장의 투과를 높이기 위해서 안테나에 영구자석을 위치시키고 안테나에 의한 자기장의 분포를 변형시켜 보았다.

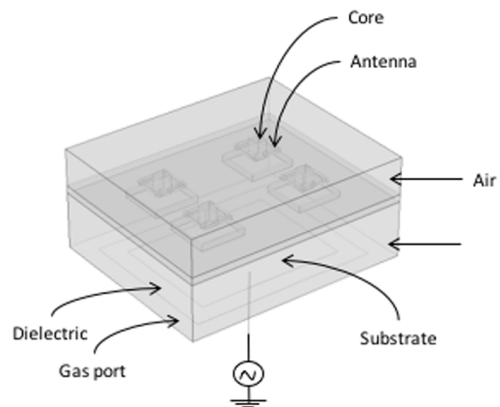


그림 7. 영구자석을 사용한 ICP 장치의 개념도

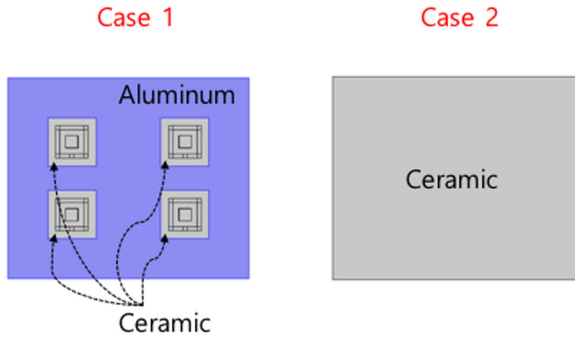


그림 8. 금속 영역의 유무에 따른 변화를 보기위한 윈도우의 개념도

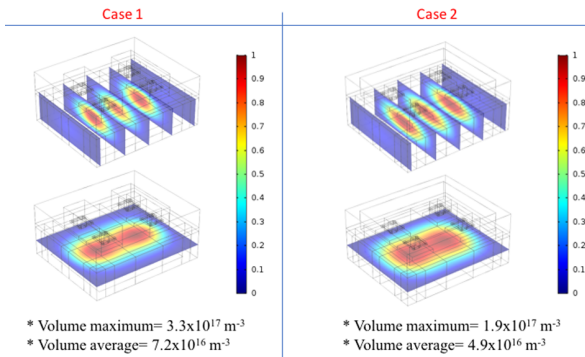


그림 9. 그림 7과 8의 경우에 따른 전자밀도의 분포

그림 8의 좌측과 같이 SI를 사용한 경우는 자기장이 세라믹 영역에 집중될 것이고 우측과 같은 경우는 안테나가 형성하는 자기장을 따르게 될 것이다.

그림 9에서 보듯이 전자밀도의 분포와 크기에 변화가 생기는 것을 알 수 있다. 이는 유도 전기장의 크기와 분포 차이에 의해서 생기는 현상으로 윈도우 내에서 금속 영역과 세라믹 영역을 어떻게 배치하느냐에 큰 영향을 받게 된다. 이는 반도체 공정에서 많이 사용되던 Faraday shield와 매우 유사한 방법이나 활용 방법이 다른 사례라고 할 수 있다.

6. 맺음말

6.1. 금속 윈도우의 배치에 따른 고려

윈도우에 분할된 금속과 세라믹 영역을 배치하는 경우 금속 윈도우의 플라즈마와 마주하는 면에는 전하가 축적되게 된다. 금속 영역을 분할하여 전기적으로 floating으로 놓는 경우 각 금속 윈도우 마다 가지게

되는 전위가 달라지게 될 것이다. 이는 공정에서 제어해야하는 변수가 추가 되었다는 것을 의미한다.

금속이 전자기파를 통과시키지 않는 것은 금속 내에서 전자가 전자기파에 반응하여 skin depth 이후로는 영향이 거의 없게 한다는 것을 의미하므로 금속의 표면에는 전류가 흐르게 될 것인데, 이렇게 흐르는 전류는 금속이 가진 저항에 의해서 열원으로 작용할 것이다. 따라서 이러한 열원을 균일하게 제어하기 위한 방안이 필요하다.

6.2. 회로적 관점

금속 윈도우가 전자기적으로 전하 및 전류를 포함하는 영역이 되었으므로 이를 제어하기 위해서 소자를 추가하면 회로적으로 안테나에 다시 영향을 미치게 된다. 따라서 안테나의 설계 시에 금속 영역과 세라믹 영역을 어떻게 배치할 지, 회로적으로 어떻게 제어할지에 대해서 전체적인 관점에서 고려해야 효율이 높은 ICP가 될 것이다.

6.3. 공정용 복합가스 및 열전달의 고려

ICP를 사용하여서 산화막 또는 금속막을 식각하는 경우 윈도우 영역에서 금속으로 이루어진 영역과 세라믹으로 이루어진 영역이 영향을 받을 수 있다. 따라서 이에 대한 고려가 추가 되어야한다.

금속 윈도우와 공정용 가스의 주입 그리고 안테나 영역 및 기관 영역에서의 열적현상을 고려하면 플라즈마의 에너지에 영향을 주게 된다. 따라서 이러한 계산이 추가적으로 감안되어야 한다.

공정용 다원자분자 가스가 2 종류 이상 사용되는 경우 반응식은 수십에서 수백 가지에 이르게 된다. 이 중에서 어떤 것이 직접적으로 식각에 영향을 주는지를 고려하지 않는다면 효율적인 계산을 하기 어렵다. 따라서 연쇄적으로 얽힌 계산을 어떻게 선별할 지에 대한 방법과 유효한 반응식을 어떻게 선정할 지에 대한 방법이 추가로 고려되어야 한다.

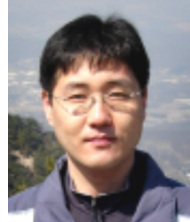
본 원고에서는 자세한 기술적인 사례와 공식을 가급적 피하고 금속 윈도우를 사용하는 경우에 수치적인 결과를 얻기 위해서 고려해야하는 내용을 간략하게 살펴 보았다. 자세한 내용은 후속으로 발표되는 논문이나 자료에 포함될 예정이다.

참고문헌

- [1] J. P. Verboncoeur, *Plasma Phys. Contr. Fusion*, **47**, A232 (2005).
- [2] J. Brcka, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, 07LD08 (2016).
- [3] P. L. G. Ventzek, R. J. Hoekstra, and M. J. Kushner, *J. Vac. Sci. Technol. B* **12**, 461 (1994).
- [4] H. Choe, N. Yoon, S. Kim and D. Choi, *J. Comp. Phys.* **170**, 550 (2001).
- [5] P. Crispel, P. Degond, and M. Vignal, *J. Comp. Phys.* **223**, 208 (2007).
- [6] M. Becker, H. Kahlert, A Sun, M Bonitz and D. Loffhagen, *Plasma Sources Sci. and Technol.* **26**, 044001 (2017).

저 자 약 력

최 희 환



- 1990년~2001년 : KAIST 물리학과 학사, 석사, 박사
- 2001년~2005년 : 삼성 디스플레이 공정개발팀
- 2005년~현재 : 한국항공대학교 항공전자정보공학부
- 관심분야 : 공정용 플라즈마 시뮬레이션