

저소비전력 PDP를 위한 보호막 재료 기술

윤상훈, 최학년, 김용석 (홍익대학교 신소재 화공시스템 공학부)

I. 서론

평판 정보 디스플레이 소자로 사용되는 AC PDP는 유전 장벽 글로우 방전(dielectric barrier glow discharge) 플라즈마를 발생시켜 생성된 진공 자외선이 형광체를 자극하여 가시광선을 발생시키는 방법으로 이미지를 표현하는 소자이다. 이 소자에서는 전극 표면에 유리질 유전체가 코팅되어 있어, 글로우 방전을 통하여 생성된 이온 또는 전자가 방전이 진행됨에 따라 유전체 표면에 축적되어 벽전압을 형성하게 된다. 실제 PDP에서는 유리질 유전체의 표면에 보호막(protective layer)으로 불리우는 MgO 박막이 사용되고 있다. 이 박막층은 유전체를 이온의 스퍼터링(sputtering)으로부터 보호하는 역할을 하고, 벽전압을 형성하여 PDP의 메모리 구동, 대면적 구동을 가능하게 하는 중요한 역할을 할 뿐만 아니라, 아래에서 논의할 이차 전자 및 엑소 전자(exo-electron)를 방출하여 PDP 글로우 방전의 개시 속도 및 방전 전압에 중요한 영향을 미친다.

유전 장벽 글로우 방전이 개시되기 위해서는 방전 공간내에 씨앗 전자(seed electron, priming electron)가 존재하여야 한다. 그런데, PDP 방전셀내의 전극 간에 인가된 전압은 수 volt/ μm 정도로 상대적으로 작기 때문에 인가된 전장이 가스 원자를 intrinsic breakdown 방법이나, 전계 방출에 의하여 보호막 재료로부터 씨앗 전자를 발생시키기 곤란하다. 가스 원자의 intrinsic breakdown을 유발하거나, 유전체 재료로부터 전계 방출을 유도하기 위해서는 전장의 세기가 $10^7 \sim 10^8$ Volt/m 범위로 높아야 한다.

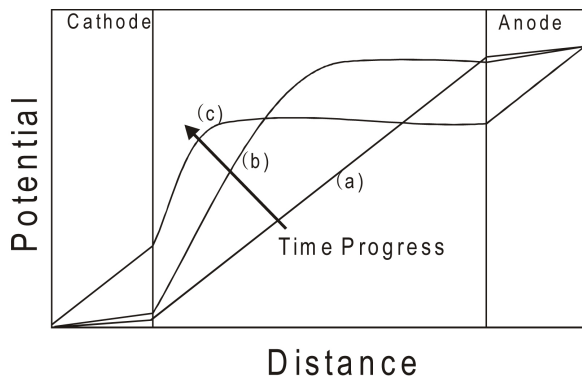
한편 전장이 인가되어 있는 방전 공간내에 존재하는 씨앗 전자 한 개를 추적하여 보기로 하자. 이 씨앗 전자가 전장에 의하여 가속되어 가스 원자를 이온화시키기에 충분한 에너지를 획득하게 되면, 가스 원자와 충돌하여 이온화 반응을 발생시키고, 이 과정이 반복적으로 발생한 후, 전자는 양극 전극의 표면으로 흡수된다. PDP 작동 조건에서 방전 공간내의 전자의 운동 에너지는 평균 2eV 정도로 낮기 때문에^[1] 보호막 표면에 도달된 전자의 대부분은 박막층내로 흡수된다. 이 과정에서 생성된 양이온은 전장에 의하여 음극 방향으로 가속되어 전극 표면의 보호막층에 도달하는데, 이 양이온이 보호막 표면에서 흡착되면, 방전은 종료된다.

그러나 PDP와 같이 전극간의 거리가 작은 방전 조건에서는 앞에서 언급한 일회성의 이온화 이벤트에 의해서는 글로우 방전에서 요구되는 전자 또는 이온 밀도에 도달하지 못한다. 즉 하나의 씨앗 전자가 시작한 충돌 이온화 반응이 상당 기간 지속되어야 한다. 충돌 이온화 반응을 지속시키는 방법은 음극 보호막 표면에 도달한 이온이 2차 전자를 발생시키고 이 전자가 다시 가속되어 이온화 과정을 지속시키는 것이다. 즉 이온화 반응으로 생성된 양이온이 보호막 표면에서 2차 전자를 생성시키고, 이 전자가 다시 양이온을 발생시키는 사이클이 반복되면 방전 공간내의 전자 및 이온의 농도를 급격히 증가시켜 Townsend 방전 모드에서 글로우 방전 모드로 전이토록 하는 것이다. 이 과정에서 방전 공간내의 전자의 밀도는 10^6 내지 10^8 배정도 증가한다^[2].

보호막 표면에서 이온이 전자를 발생시키는 방법을 살펴보기로 한다. 이온은 질량이 전자에 비하여 약 1,000배 가량 크기 때문에 양이온의 운동 에너지는 0.05eV 정도로 매우 작아, 보호막 표면과 충돌할 때 운동 에너지가 전자를 방출할 수 있을 만큼 크지 않다. 그러나 이온은 중성 원자 대비 이온화 상태의 높은 포텐셜 에너지를 가지고 있는데, 이 이온화 에너지가 2차 전자를 방출하는 데 사용되는 것이 가능하다. 즉 이온이 유전체의 표면에 도달하여 중화 반응에 의하여 이온화 포텐셜 에너지를 방출하면, 이 에너지가 전자에 인가되어 2차 전자를 방출하는 것이다.

한편 씨앗 전자 하나가 방전 공간을 통하여 이온화 반응을 발생시켜, 전자와 이온 농도를 증가시키면 이동도가 낮은 이온은 방전 공간내의 인가된 전장 분포에 영향을 미치게 된다. 이러한 현상을 [그림 1]을 이용하여 설명하기로 한다. 먼저 방전 공간내에 아무런 전하가 존재하지 않을 경우에는 두 개의 대향 전극으로 이루어진 방전 공간내의 전압은 직선으로 분포할 것이다(커브 'a').

씨앗 전자에 의하여 이온화 반응 및 2차 전자 방출 과정이 진행됨에 따라 방전 공간내의 이온 및 전자의 밀도가 증가한다. 방전 공간내의 전자의 이동도는 이온의 이동도에 비하여 약 1,000배 이상 높다. 따라서 양이온의 농도가 상대적으로 높은 양극 부분의 방전 공간 내에는 양이온의 농도가 전자에 비하여 상대적으로 높게 되어 방전 공간내의 전압 분포를 왜곡시키게 된다(커브 'b'). 이와 같은 전압 분포의 왜곡은 방전이 지속됨에 따라 지속되고, 궁극적으로는 전자의 자유 행정 거리(mean free path)



[그림 1] 방전 시간에 따른 방전 공간내의 전위 분포 변화

에 해당하는 부분까지 지속된다(커브 'c').

한편 전자의 자유 행정 거리 내에서는 전자와 가스 원자간의 이온화 반응이 거의 발생하지 않기 때문에 이 자유 행정 거리 내에서의 전류는 이온에 의하여 발생된 2차 전자 및 전장에 의하여 끌여 당겨진 이온에 의하여 좌우된다. 여기서 이온에 의한 2차 전자 방출 계수가 0.1이라고 가정하면 자유 행정 거리에 해당하는 부분의 전계는 다른 부분에 비하여 10배 이상이 되어야 정상 상태 전류를 유지할 수 있는 것이다. 따라서 음극 보호막 표면에 형성된 자유 행정 거리에 해당하는 부분에는 전압 강하가 크게 발생하는데, 이 부분을 음극 전압 강하부(cathode drop zone)이라고 한다.

[그림 1]에 모식적으로 나타낸 바와 같이 음극 전하 강하부에서 대부분의 전압 강하가 발생하기 때문에 방전 공간에 인가된 전기 에너지는 대부분 이 전압 강하부에서 사용된다. 만약 음극 전압 강하 부분을 통과하는 이온과 전자의 비율이 10:1일 경우, 10대 1의 비율로 이온과 전자에 전기에너지가 사용되는 것이다. 그러나 이온을 가속하는데 사용된 에너지는 이온이 음극 표면의 보호막과 충돌하면서 열 에너지로 소모되기 때문에, PDP의 방전시 가시광을 발생시키는데 기여하지 못한다. 이에 비하여 전자에 인가된 에너지는 가스 원자와의 충돌 과정을 통하여 이온화시키고 여기(excited)시키는데, 이들이 기저 상태로 천이되면서 진공 자외선(Vacuum Ultraviolet, VUV)을 만들어 PDP의 가시광을 발생시키는데 기여한다. 즉 전자에 인가된 에너지의 상당 부분은 PDP에서 가시광을 생성하는데 사용되는 것이다. 따라서 AC PDP에서 발광 효율을 증가시키기 위해서는 음극 전압 강하 부분을 통과하는 이온과 전자의 비율, 즉 2차 전자 발생 계수를 증가시키는 것이 필수적이다. 즉 이온에 의한 2차 전자 발생 계수의 증가는 음극 전압 강하 구역에서 전자에 인가되는 전기 에너지의 분율을 증가시키고, 이는 결국 일정 인가된 전기 에너지에 의하여 발생하는 가시광 발생 효율을 증가시키게 되는 것이다.

양이온의 2차 전자 방출 계수가 PDP의 방전 효율에 미치는 영향에 대한 단순화된 이론적 분석이 Beouf 교수^[3]에 의하여 제안되었다. 음극 표면에서 이온 전류($J_i(0)$)

는 2차 전자 방출 계수(γ)와 전자에 의한 전류($J_e(0)$)와 다음의 관계를 가진다.

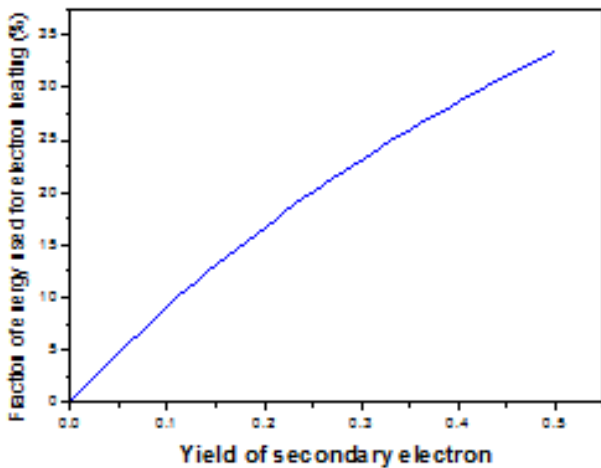
$$J_i(0) = \frac{1}{\gamma} J_e(0) \quad \text{식 (1)}$$

상기 관계식을 이용하면 음극 전압 강하 구간에서 전체 전기 에너지 중에서 전자에 인가되는 에너지는 다음의 식 2로 주어진다.

$$\frac{P_e}{P_T} = \frac{J_e(0)}{J_i(0) + J_e(0)} = \frac{\gamma}{1 + \gamma} \quad \text{식 (2)}$$

상기 식 2를 [그림 2]에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 2차 전자 방출 계수가 증가함에 따라 전체 전기 에너지 중에서 전자에 인가되는 에너지의 분률이 증가하는 것을 알 수 있다. PDP에서 가시광 발광 효율은 전자에 인가된 에너지에 비례하여 증가하기 때문에 2차 전자 방출 계수를 증가시키는 것이 PDP의 발광 효율을 개선하는 데 있어서 필수적이다.

한편 대부분의 TV 방송에서 average picture level(APL)은 약 20% 정도이다¹⁴⁾. 따라서 AC PDP에서 방전셀의 20%는 유지 전압(sustaining voltage)이 글로우 방전이 발생하는 조건(어드레스에 의하여 벽전압이 형성된 조건)에



[그림 2] 2차 전자 방출 계수가 전자에 인가되는 에너지 분률에 미치는 영향

서 인가되고 있고 나머지 80%의 방전셀에는 글로우 방전이 발생하지 않는 조건(벽전압이 소거된 조건)에서 동일한 크기의 유지 전압이 교번하여 인가되고 있다. 여기서 글로우 방전이 발생되지 않는 80%의 방전셀에 유지 전압이 교번으로 인가되면 방전셀의 capacitor의 충전, 방전에 의하여 되는 과정에서 리액티브 전력 손실(E_R)이 발생한다. 이때 발생하는 전력 손실은 아래의 식에 나타난 바와 같이 인가된 전압(V_S)의 제곱에 비례하게 된다.

$$E_R = CV_S^2 \quad \text{식 (3)}$$

이러한 리액티브 전력 손실은 방전셀의 해상도가 증가됨에 따라서 증가하고 FHD 해상도에서는 방전에 소모되는 전력과 유사한 크기를 차지하고 있다.

따라서 유지 방전시 유지 전압 및 어드레스 방전 전압을 낮추는 것이 소비 전력을 낮추는데 필수적이다.

이들 유지 전압 및 어드레스 방전 전압은 방전셀의 방전 개시 전압에 의하여 영향을 받는데 이 방전 개시 전압은 잘 알려진 바와 같이 2차 전자 방출 계수에 의하여 좌우된다(식 4 참조).

$$V_f = \frac{BPd}{\ln[APd/\ln(1+1/\gamma)]} \quad \text{식 (4)}$$

여기서 A, B는 가스종류에 의하여 좌우되는 상수이고, P는 방전셀내의 가스 압력, d는 전극간 거리이다. 결국 PDP의 비 방전셀에 있어서 소비되는 리액티브 전력을 감소시키기 위해서는 2차 전자 방출 계수를 증가시키는 것이 필수적인 것임을 다시 알 수 있다.

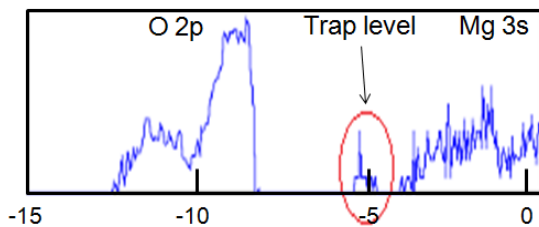
따라서 본 고에서는 AC PDP의 보호막으로부터 방출되는 2차 전자의 방출 거동을 살펴보고 향후 발전 방향을 조망하는 것으로 초 저소비전력 PDP를 개발하는데 가능성을 보고자 한다.

II. 보호막으로부터 2차 전자 방출 현상

MgO 보호막 재료내의 전자는 재료의 포텐셜 에너지

우물에 갇혀 있어, 이를 재료 밖으로 방출시키기 위해서는 이 포텐셜 에너지를 극복할 수 있는 에너지를 전자에 공급하거나, 에너지 포텐셜을 낮추어 주어야 한다. 먼저 AC PDP에서 보호막 재료로 주로 사용되는 MgO의 밴드 에너지 구조를 살펴보면 아래 [그림 3]과 같다^[5]. Mg 이온의 3s 에너지 궤도가 전도대(conduction band)를 형성하고 있고 산소의 2p 궤도가 원자가 밴드(valence band)를 형성하고 있는 구조이다. 밴드갭 에너지에 대해서는 다양한 값이 보고되고 있으나 대부분 밴드갭 에너지 값이 7.8eV이고 전자 친화도는 0.85eV 정도의 값을 가지는 것으로 보고되고 있다^[6].

따라서 MgO내에 존재하는 전자를 재료 밖으로 방출시키기 위해서는 밴드갭 에너지와 전자 친화도 값의 합에 해당하는 에너지를 전자에 공급하거나, 에너지 포텐셜을 낮추어 주어야 한다. 따라서 2차 전자를 방출하는 기구는 에너지를 공급하는 방법 또는 에너지 포텐셜을 낮추는 방법에 따라 분류되는데 열전자 방출, 광전자 방출, 오제이 전자 방출, 전계 방출 기구 등이 현재까지 알려져 있다. 이러한 기구에 의하여 방출되는 전자는 외부 에너지가 인가되는 동안에 전자가 방출되는 정상 상태 전자 방출(steady state electron emission)과 외부 에너지 공급이 중단되고 난 후에 전자가 방출되는 지연 전자 방출(delayed electron emission) 현상으로 구분되기도 한다. 전자는 지금까지 논의한 2차 전자 방출 현상에 해당하고, 후자는 엑소 전자 방출(exo-electron emission) 현상에 해당한다. 엑소 전자는 방전이 종료된 이후에도 전자가 지속적으로 방출되는 현상으로, 이들 전자는 다음 방전 이벤트에서 씨앗 전자로 사용될 수 있기 때문에 매우 중요한 현상이다. 본 고에서는 정상 상태의 전자 방출 현상을 다루기로 하고, 다



[그림 3] MgO 밴드 구조^[5]

른 논문을 통하여 엑소 전자 방출 현상을 다루기로 한다.

1. 열전자 방출

열전자 방출은 재료내에 존재하는 전자에 열에너지를 공급하여 전자 에너지가 포텐셜 장벽을 넘을 수 있도록 하는 방법이다. 상온 상태에서 자유 전자는 0.03eV 정도의 평균에너지를 보유하고 있어, 보호막 재료의 포텐셜 에너지 장벽(8.65eV)을 극복하는 것이 곤란하다. 그러나 재료가 높은 온도로 가열되면 재료내의 전자 온도가 상승되고 이에 따라 전자의 포텐셜 에너지 장벽을 극복할 수 있는 에너지를 보유한 전자의 밀도가 증가하고 전자의 방출이 발생할 수 있다. Arc 방전 모드에서는 방전 전류에 의하여 전극 재료의 온도가 상승하고 이에 따라 열전자가 활발하게 발생하는 조건을 만족하게 되는 것이다.

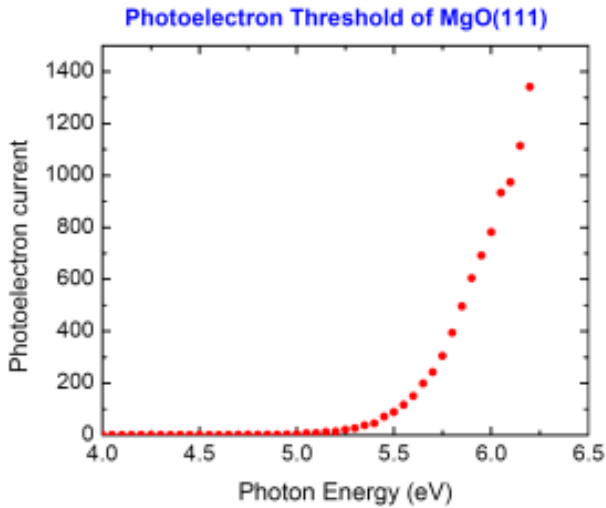
그러나 대부분의 AC PDP 방전셀에서는 보호막 재료의 온도가 100℃ 이상 가열되지 않기 때문에 이와 같은 열전자 방출 현상은 AC PDP 방전 거동에 큰 영향을 미치지 않는다.

2. 광전자 방출

재료내의 전자에 포텐셜 에너지 장벽을 극복할 수 있는 광자 에너지가 공급될 경우 광전자가 방출될 수 있다. 즉 MgO 보호막의 포텐셜 에너지, 8.65eV이상의 에너지가 전자에 공급될 경우 광전자를 발생시키는 것이 가능하다. AC PDP에서 글로우 방전이 발생하는 상황에서는 방전 공간내에는 진공 자외선이 발생되는데 이들은 147nm 또는 173nm 파장대역을 가지는데 8.5eV와 7.5eV 광자 에너지가 된다. 따라서 이들 진공 자외선은 MgO 보호막의 원자가 전자를 여기시켜 광전자로 방출하는 것이 어렵다.

그러나 실제 실험 결과에 의하면 MgO에 5eV이상의 광자 에너지를 가진 광자가 조사되면 아래의 [그림 4]와 같이 광전자가 방출되는 것으로 보고되고 있다^[7].

이와 같은 광전자 방출 현상은 MgO 재료내에 존재하는 결함과 관련이 있는 것으로 판단되고 있다. 즉 상기 [그림 3]에 나타낸 것과 같이 에너지 밴드갭내에 다양한 트랩(trap) 레벨이 존재하는데 이 레벨에 포획되어 있는 전자에 광자 에너지가 공급되면 광전자가 쉽게 방출되는



[그림 4] MgO로부터 광자에너지에 따른 광전자 방출 거동

것이다. 따라서 이와 같은 광전자 방출은 재료의 결합 농도 및 결합의 에너지 위치에 따라서 방출 거동이 변화하게 될 것이다.

이러한 진공 자외선 광자에 의한 2차 전자 방출 거동은 방전 전압 및 방전 효율에 미치는 영향이 제한적인 것으로 예상된다. 즉 광자에 의한 2차 전자가 방출되기 위해서는 진공 자외선이 충분히 발생하여야 하는데 진공자외선은 대부분 방전 초기보다는 방전이 상당부분 진척되어 여기종의 농도가 급격히 증가된 후에 방출되기 때문이다. 따라서 광자에 의한 2차 전자의 방출은 글로우 방전의 방전 개시 전압에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

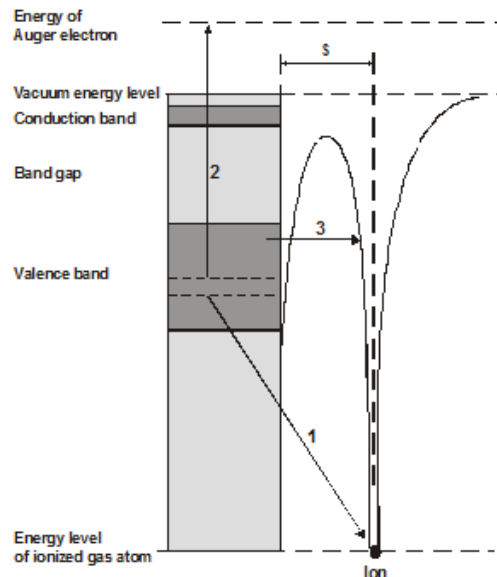
3. 전계 방출

재료의 표면에 전계가 인가되면 재료 표면의 포텐셜 배리어(potential barrier)의 폭이 줄어들고 이 얇아진 포텐셜 배리어를 통하여 전자가 tunneling이 발생하는 현상이 전계 방출이다. 이 전계 방출 현상은 나노 팁에서 전계 증폭(field amplification)을 이용한 전계 방출 디스플레이(FED)에서 주로 사용되는 전자 방출 메커니즘이다. 일부 PDP에서 보호막⁴⁸⁾이나 형광체 표면⁴⁹⁾에 CNT를 채용하는 방법으로 이러한 전자 방출 기구를 활용하기 위한 연구가 진행되었으나, MgO 보호막에서는 이 기구가 2차 전자 방출에 기여한다는 보고는 없다.

4. Auger 전자 방출

Auger 전자 방출은 가스 이온이 보호막의 표면에서 중화 반응이 발생하고 이때 방출된 에너지가 전자에 인가되어 이를 재료 밖으로 방출하는 기구이다. 이를 모식적으로 나타내면 아래의 그림과 같다. 즉 원자가 전자대에 위치한 전자 '1'이 보호막의 표면으로 접근하는 이온과 중화 반응을 일으키고, 이때 발생된 중화 반응에너지가 원자가 전자대에 존재하는 전자 '2'에 공급되어 재료 밖으로 배출되는 현상이다. 이와 같은 전자 방출 기구를 Auger Neutralization에 의한 2차 전자 방출 현상이라고 한다. 이와 더불어 그림에 나타낸 바와 같이, 원자가 전자대에 있는 전자 '3'이 이온 여기 상태(excited level)로 직접 resonance tunneling이 발생하고 이 여기종이 기저 상태로 천이되면서 발생하는 에너지가 전자에 공급되어 2차 전자를 방출하는 Auger resonance emission 기구는 실제적으로는 일어나지 않을 것으로 판단된다. 왜냐하면 Xe 및 Ne가스의 여기종의 에너지 레벨이 MgO의 원자가 전자대보다 높은 에너지 레벨에 있거나 낮은 에너지 레벨에 존재하기 때문이다.

따라서 Ne, Xe, He이 방전 개스의 주요 성분으로 사용되는 AC PDP에서는 MgO 표면에서 이온의 중화 반응에 의하여 유도되는 Auger 전자 방출 기구가 2차 전자의 주



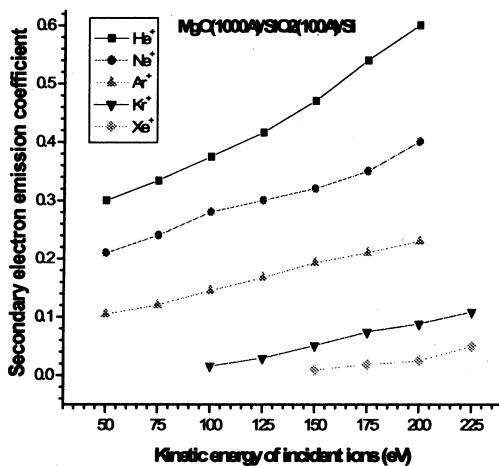
[그림 5] Auger 2차 전자 방출 기구의 모식도

요 방출 기구로 알려져 있다. 따라서 다음 절에서는 Auger 2차 전자 방출 계수를 향상시킬 수 있는 방법에 대해서 논의하기로 한다.

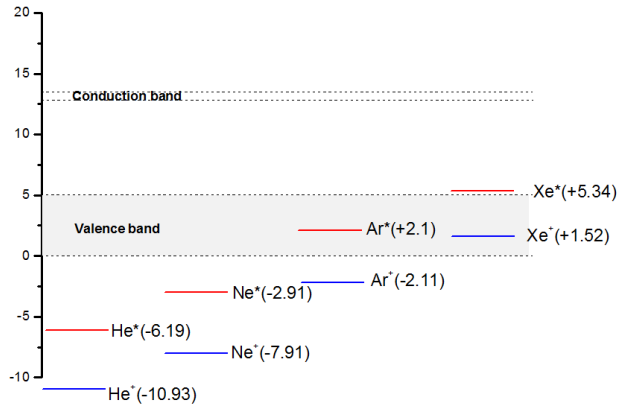
Ⅲ. 고 Xe 방전 개스에서 2차 전자 방출 계수 향상 방법

앞 절에서 언급한 바와 같이 AC PDP의 가시광 생성 효율을 증가시키기 위해서는 전체 전기 에너지 중 전자에 인가되는 분율을 증가시켜야 하는데, 이를 위해서는 2차 전자 방출계수를 증가시켜야 한다. 2차 전자 방출 계수는 이온 종류에 따라서 다른데, 이것은 이온화 에너지가 각각 다르기 때문이다. 즉 이온화 에너지가 높을수록, 전자를 진공 레벨위로 여기할 확률이 높기 때문에, 2차 전자 방출 계수는 증가한다^[10].

그러나 최근 Xe 여기중 생성 효율을 증가시키기 위하여 방전 개스내의 Xe 함량을 증가시키고 있다. 이에 따라 방전 공간내에는 이온화 에너지가 작아 2차 전자 방출 계수가 작은 Xe 이온이 이온종의 대부분을 차지하게 되어 방전 전압을 증가시키게 된다. 이는 리액티브 전력 손실을 증가시켜 AC PDP의 가시광 발생 효율 증가효과를 상쇄시킨다. 따라서 AC PDP에서 소비 전력을 감소시키기 위해서는 보호막의 Xe 이온 2차 전자 방출 계수를 향상시키는 것이 핵심 과제가 되는 것이다.



[그림 6] 이온종류에 따른 2차 전자 방출 계수 ^[10]

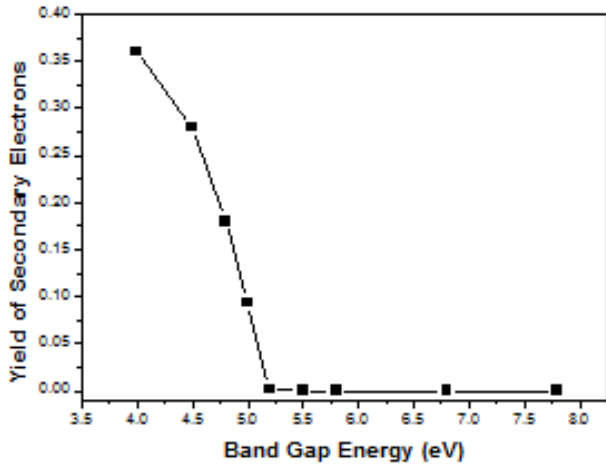


[그림 7] MgO 에너지 밴드상에서 불활성 방전 개스의 이온 및 여기 에너지 준위

Xe 이온이 MgO 보호막에서 낮은 2차 전자 방출 계수를 나타내는 현상을 이해하기 위해서는, MgO 보호막의 에너지 준위와 Xe 이온의 에너지 레벨의 상대적 위치를 파악하는 것이 필요하다. [그림 7]에 나타난 바와 같이 Xe 이온은 원자가 밴드의 가장 낮은 에너지 준위 대비 1.5eV 높은 에너지 레벨에 위치하고 있다. 따라서 원자가 밴드의 최상위에 위치한 전자와의 중화 반응으로 발생시킬 수 있는 에너지가 최대 3.5eV가 되는데, 이 에너지는 원자가 밴드의 전자를 외부로 방출하기에 필요로 하는 에너지인 6.85eV보다 작기 때문에 2차 전자를 방출하는 것이 곤란한 것이다.

보호막으로부터 Xe 이온의 중화 반응 에너지에 의한 2차 전자를 방출하기 위해서는 보호막 재료의 밴드갭 에너지를 감소시켜야 한다. 즉 보호막의 밴드갭 에너지를 낮추면 Xe이온과의 중화 반응 에너지가 증가함과 동시에, 원자가 밴드에서 전자를 재료 밖으로 방출하는데 필요로 하는 에너지가 감소하여, 전자의 방출 확률이 증가되기 때문이다.

Auger 중화 기구를 통하여 2차 전자가 방출될 경우, 보호막의 밴드갭 에너지에 따른 Xe 이온의 2차 전자 방출 계수를 이론적으로 예측하여 [그림 8]에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 보호막의 밴드갭 에너지가 5.2eV 이하로 감소되면, Xe 이온에 의한 2차 전자의 방출 계수가 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 Xe 이온에 의한 2차 전자의 방출을 증가시키기 위해서는 밴드갭 에



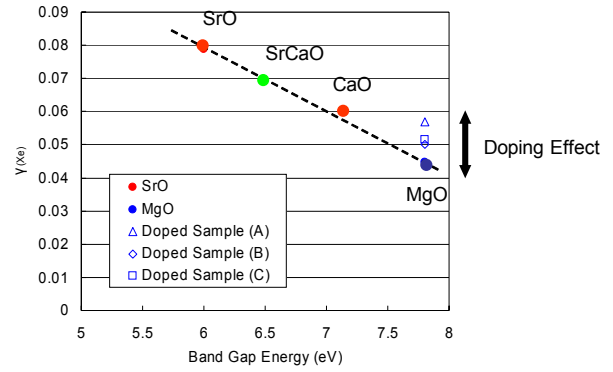
[그림 8] 보호막의 밴드갭 에너지에 따른 Xe 이온의 2차 전자 방출 계수

너지가 낮은 보호막을 사용하여야 한다.

이러한 요구 조건을 만족시키는 보호막 재료는 1) 밴드갭 에너지가 낮은 단위 산화물 재료, 또는 2) 두 개 이상의 산화물을 혼합하여 밴드갭 에너지를 낮춘 재료가 후보 재료가 될 수 있을 것이다. 이들 재료는 추가적으로 가시광선에 대한 투과도가 높아야 하며 sputtering에 대한 저항성이 높아야 하고 여기된 전자의 escape probability가 높아야 한다. 또한 이들 재료가 대기에 노출되었을 때 대기 중의 수증기 또한 CO₂ 가스와의 반응성이 낮아야 하는 요구 조건을 만족하여야 한다.

대부분의 천이 금속 산화물(CoO, NiO, FeO, ZnO, 등)은 밴드갭 에너지가 낮은 장점이 있는데, 이들 재료는 천이 금속의 고유 특성 때문에 발생하는 결함이 많이 발생하기 때문에 여기된 전자의 escape probability를 저하시켜 2차 전자 방출 계수가 높지 않은 문제점이 있다. 여기된 전자의 escape probability는 산화물 결정 구조에 의해서도 영향을 받는다. 즉 Face Centered Cubic(FCC)과 같이 대칭적 결정 구조에서는 전자의 self-trapping 현상이 발생하지 않아서 escape probability가 높게 된다. 따라서 산화물은 FCC와 같은 결정 구조를 가져야 한다.

상기 다양한 요구 조건을 동시에 만족시킬 수 있는 보호막 재료는 알칼리 토금속 산화물이고, 실제 보호막 재료로 사용될 수 있는 산화물의 범위는 MgO, CaO, SrO의 범위로 좁혀지게 된다. 이들 재료가 2차 전자 방출 계수



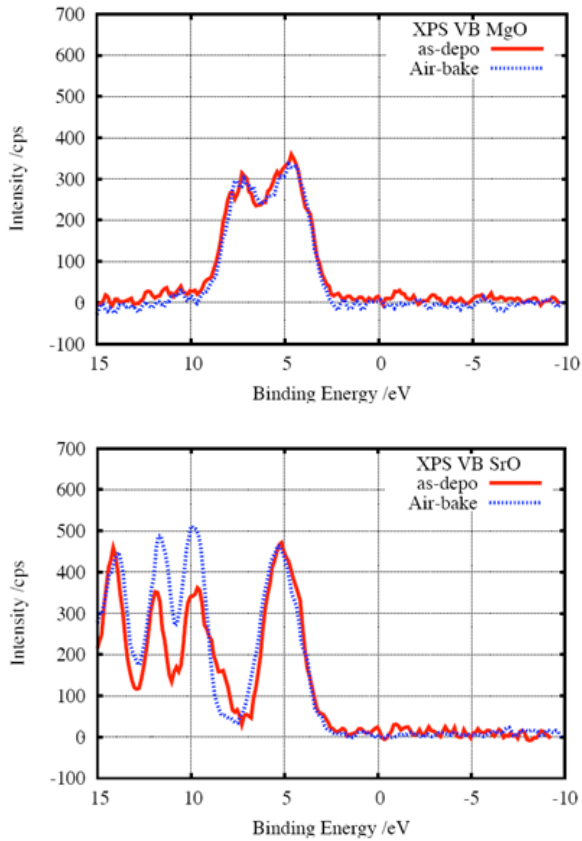
[그림 9] 알칼리 토금속의 Xe 이온에 의한 2차 전자 방출 계수(H. Kajiyama 교수, IMD2008).

에 미치는 영향에 대해서는 다양한 연구가 진행되어 왔다^[11-13]. [그림 9]에 나타난 바와 같이 MgO > CaO > SrO의 순으로 밴드갭 에너지가 감소하고 이와 같은 순으로 2차 전자 방출 계수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 이와 같이 밴드갭 에너지가 낮은 알칼리계 금속 산화물의 사용은 Xe 이온으로 부터의 2차 전자 방출 계수를 증가시키고 이는 결국 AC PDP의 소비 전력을 감소시키는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

이러한 알칼리 토금속 산화물을 보호막 재료로 사용하는데 있어서 가장 주요한 이슈가 알칼리 토금속 산화물 재료의 대기 중 수증기 및 이산화탄소 가스와의 반응성이다.

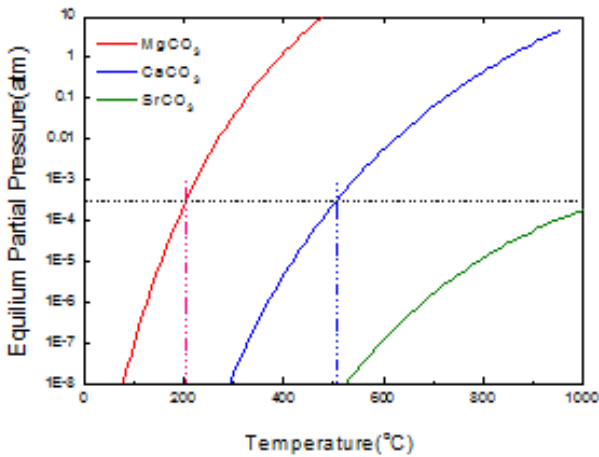
[그림 10]^[14]에 나타난 바와 같이, 기존에 사용되어온 MgO 보호막의 경우에는 대기 중의 이산화탄소와의 반응성이 크지 않기 때문에, 박막을 대기 중에 노출하여도 XPS 피크의 변화가 크지 않은 것을 볼 수 있는데, SrO 박막의 경우에는 증착 과정에서도 일부 Sr-carbonate 피크가 관찰되고 대기 중에 노출될 경우에 그 피크가 크게 성장하는 것을 볼 수 있다.

이와 같은 카보네이트가 형성되는 평형 이산화탄소 평형 분압을 계산하여 아래의 [그림 11]에 나타내었다. 그림에서 각 커브의 위쪽의 조건에서는 카보네이트가 안정하고 평형 분압보다 낮은 조건 즉 커브의 아래쪽 조건에서는 산화물이 안정한 것을 나타내고 있고, 점선은 대기 중의 이산화탄소 분압이다. 그림에서 알 수 있듯이 MgO, CaO, SrO의 순으로 평형 분압이 감소하고 있어 카보네이트의 형성에 대한 구동력이 증가하는 것을 알 수 있다.



[그림 10] MgO 박막(상)과 SrO 박막(하)의 XPS 분석 결과^[14]

이러한 수화물 및 카보네이트가 형성되는 문제점을 해결하기 위해서 Hiroshima 대학의 Kajiyama 교수팀은 진공 상태에서 배기 봉착하는 공정을 사용하였고^[15], 서울

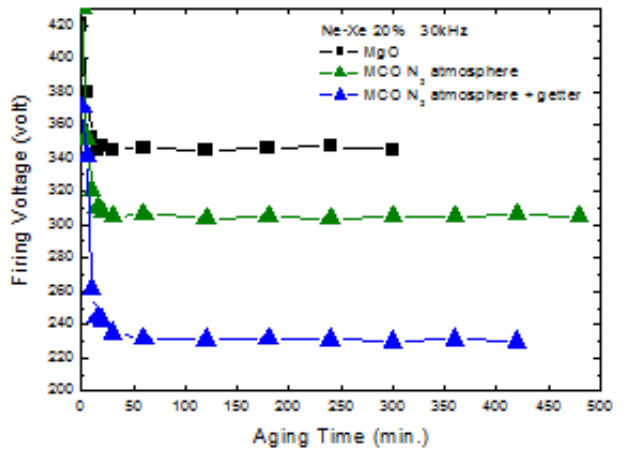


[그림 11] 알칼리 토금속 산화물의 카보네이트 형성 평형 분압

대 황기웅 교수 연구팀은 MgO/SrO 이중 박막 구조를 사용하여 대기 중의 이산화탄소 및 수증기와 반응을 제어한 결과를 발표하였다^[16]. 이들 연구 결과에 의하면 방전 전압이 거의 70~80V 정도 감소하고 방전 효율은 약 100% 정도 증가하는 것을 보고하고 있다.

이와 같은 단위 알칼리 토금속 산화물 보호막 방식과 대비하여 두 개의 알칼리 토금속 산화물을 고용체 박막으로 제조하여 이를 보호막으로 적용하기 위한 노력이 활발하게 진행되어왔다. 예를 들면 MgO-CaO^[17] 및 SrO-CaO^[13] 고용체 박막을 적용하여 방전 전압을 획기적 저하시킨 결과를 보고하고 있다. 이와 같은 접근 방법은 밴드갭 에너지가 높은 재료(MgO)와 밴드갭 에너지가 낮은 재료(CaO, 또는 SrO)를 고용시켜 밴드갭 에너지를 낮추어 Xe 이온에 의한 2차 전자 방출을 촉진하고자 하는 것이다. [그림 12]는 MgO-CaO 고용체 박막의 방전 개시 전압을 측정하여 나타낸 것으로^[17] 방전 전압이 패널내의 불순물 개스를 제거하기 위한 getter 및 질소 분위기를 유지한 조건에서 약 100V 정도 감소하는 것을 알 수 있다. 이들 보호막 재료의 경우에도 상기 SrO 재료와 유사한 정도의 방전 효율의 개선을 가져오는 것으로 보고되고 있다.

이와 같이 기존 MgO 보호막 재료를 대체하기 위해서는 CaO, SrO의 수화물 및 카보네이트 화합물을 형성을 억제할 수 있는 새로운 공정방법이나 공정 조건을 새로이 확립하는 것이 필요하다.



[그림 12] MgO-CaO 고용체 박막의 방전 개시 전압

IV. 향후 전망

AC PDP 소자에서 보호막 재료는 이온 sputtering에 대한 유전체를 보호뿐만이 아니라 2차 전자를 방출하며, 방전을 개시하는데 필요로 하는 씨앗 전자를 방출하는 매우 중요한 역할을 한다. 따라서 현재 MgO를 대체할 수 있는 보호막 재료로서 거론되고 있는 SrO, CaO-SrO, MgO-CaO 보호막 재료에 대한 열역학적, 반응 속도론적인 연구를 통하여 수화물 및 카보네이트 생성을 억제할 수 있는 기법이 개발될 경우, AC PDP의 성능을 획기적으로 개선하는데 획기적인 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] C. Feldman, Phys. Rev., Vol.117(2), pp.455-459 (1960)
- [2] F. P. Santos, P. J. B. M. Rachinhas, T. H. V. T. Dias, F. I. G. M. Borges, A. D. Stauffer, and C. A. N. Conde, IEEE Trans. on Nuclear Science, 54(1), pp.219-223 (2007).
- [3] R. Ganter, Th. Callergari, L. C. Pitchford, and J. P. Boeuf, Appl. Surf. Sci. 192, 299 (2002).
- [4] Larry F. Weber, IDW'05, p.1429 (2005).
- [5] K. Serizawa, et al., IDW'09, pp.1949-1952 (2009).
- [6] K.Y. Tsou and E.B. Hensley, J. Appl. Phys. 45,47 (1979).
- [7] P. Riccardi, M. Ishimoto, P. Barone, and R. A. Baragiola, SurfaceScience, 571, ppL305-L310(2004).
- [8] Y.-S. Kim, K.-S. Yoo, S.-H. Yoon, and H.-J. Jeon, IDW03, pp.877-880.
- [9] Q. Yan et al., US Patent #0103307(2006).
- [10] S. K. Lee, J. H. Kim, J. Lee, K.-W. Whang, Thin Solid Films 435 (2003) 69-71.
- [11] J. H. Cho, R. H. Kim, K. W. Lee, C. Y. Son, G. Y. Yeom, H. J. Kim, J. Y. Kim and J. W. Park, J. of Materials Science 34, p.5055(1999).
- [12] Q. Yan et al., US Patent #0262715(2007).
- [13] Y. Motoyama and T. Kurauchi, J. of SID 14, p487 (2006).
- [14] M. Sakai, et al., IDW08, p1881(2008).
- [15] K. Uchida, G. Uchida, T. Yano, H. Kajiyama, and T. Shinoda IDW08 pp.1899-1902 (2008).

[16] Ki-Woong Whang, Hae-Yoon Jung, Tae-Ho Lee and Hee-Woon Cheong IMID 2009 digest pp.173-176 (2009).

[17] Sang-Hoon Yoon, You-Han Kim, Seok Jung, Yong-Seog Kim, SID2010 Digest pp.1608-1611 (2010).

저자 약력

윤상훈



- 2003년: 홍익대학교 공과대학 신소재공학과 학사
- 2005년: 홍익대학교 공과대학 신소재공학과 석사
- 2006년~현재: 홍익대학교 신소재공학과 박사과정
- 관심분야: 플라즈마 디스플레이 패널, 박막 보호막, 방전 효율, 방전 분석

최학년



- 2002년: 홍익대학교 공과대학 신소재공학과 학사
- 2004년: 홍익대학교 공과대학 신소재공학과 석사
- 2005년~현재: 홍익대학교 신소재공학과 박사과정
- 관심분야: 플라즈마 디스플레이 패널, 제조 공정, 방전 효율, 방전 분석

김용석



- 1986년: 서울대학교 공과대학 금속공학과 학사
- 1982년: 한국과학기술연구원 재료공학과 석사
- 1989년: Massachusetts Institute of Technology(MIT) 재료공학 박사
- 1991년~현재: 홍익대학교 공과대학 신소재공학과 교수
- 관심분야: 플라즈마 디스플레이, 디스플레이 재료 및 공정