



고효율 광전극 적용을 위한 대면적 균일한 플라즈모닉 나노구조체

글 _ 최덕현
경희대학교 기계공학과

1. 서론

표면 플라즈몬(surface plasmon)이란 Fig. 1과 같이 금속과 같이 자유 전자가 많은 물질의 표면에 전자기파(Electromagnetic field)의 자극이 가해졌을 때, 표면에 있는 자유 전자들이 공진(resonance)을 일으키는 현상으로, 일반적으로 금, 은과 같은 귀금속 물질들은 표면에 매우 많은 자유전자들이 존재하며, 이들이 전자기파인 광 에너지를 받았을 때 표면에 있는 자유 전자들이 주어진 광 에너지의 특정 파장과 공진을 일으키게 되는 현상을 의미한다. 모든 파장의 광 에너지에서 공진이 일어나는 것은 아니며, 공진을 일으키는 파장은 금속의 종류 및 구조에 지배적인 영향을 받게 되며, 따라서 금속의 구조 설계를 통해 공진이 되는 파장을 조절할 수 있다. Fig. 2에서는 금속의 크기에 따라 공진되는 전자구조의 변화에 따른 전자기파 형성의 변화를 보여준다. 이렇게 공진되

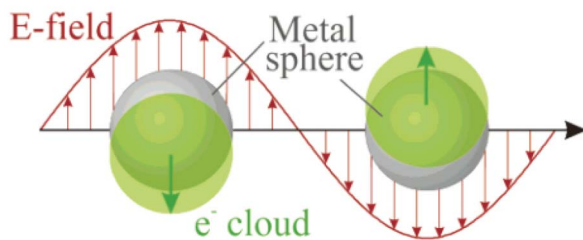


Fig. 1. Schematic of plasmon oscillation for a sphere, showing the displacement of the conduction electron charge cloud relative to the nuclei.²⁾

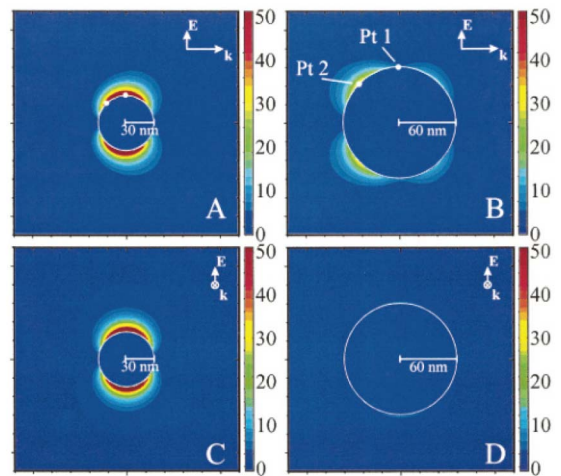


Fig. 2. E-field contours for radius 30 and 60 nm Ag spheres in a vacuum. Two cross-sections are depicted for each sphere. (a, b) The plane containing the propagation and polarization axes and (c, d) the plane perpendicular to the propagation axis. The 30 nm sphere refers to 369 nm light, the main extinction peak for this size, whereas the larger sphere is for 358 nm light, the quadrupole peak for this size.²⁾

는 파장에서는 금속과 유전체의 경계면에서 빛과 플라즈마가 결합된 형태로 표면을 따라 진행하게 되며, 이를 통해 특정 파장의 빛을 전송할 수도 있으며, 흡수율을 향상시키는데 활용할 수도 있다.¹⁻³⁾

표면 플라즈몬은 보통 금속 박막 표면(즉, 유전체와의 계면)에서 발생하나, 이 경우 특정 파장의 광 에너지가 특정 각도로 입사되는 경우에만 공진이 발생하게 된다(이를 위해 보통 프리즘을 사용함). 한편, 나노 금속 구조체에서는 광 에너지의 입사 방향에 상관없이 공진이 발



생하게 되며, 이를 Localized surface plasmon resonance(LSPR)라 한다. 이러한 나노 금속 구조체는 플라즈모닉 나노구조체로 불리며, 나노구조체에 갇힌 채 공진하는 전자에 의해 표면에 강한 전자기파를 형성하게 되어 이는 “Hot Spot”이라 불린다.⁴⁾ 플라즈모닉 나노구조체에서의 광 제어(또는, 증폭) 특성은 생명공학 분야에서의 분자 탐침(Molecular detection) 및 분자 동역학 연구(Molecular dynamics study)등에 활용되고 있으며, 나노 전자 소자 분야에서는 태양전지(Solar cell) 및 발광 다이오드(Light emitting diode), 광전기화학 물분해(Photoelectrochemical water split)등 광전자 소자의 효율 향상을 위해 활용되고 있다.⁵⁻⁷⁾

플라즈모닉 나노구조체를 적용한 광소자를 구현하기 위해서는 대면적, 저가형 플라즈모닉 나노구조체의 제작 기법 개발이 필수적이다. 일반적으로 금속 나노 입자를 대면적(cm 크기 이상)으로 균일하게 분포시키는 일은 매우 어렵다. 균일 분포된 금속 나노구조체의 대부분은 1mm 이하의 작은 공간에서 균일하게 분포되어 있지만, 이를 1cm 이상의 크기로 분포시키는 일은 높은 비용과 복잡한 공정성이 한계로 인식되고 있다. 본 지에서는 최근 보고된 대면적 저가형 플라즈모닉 나노구조체의 다양한 제조 방법 및 응용 사례를 소개하고자 한다.

2. 대면적 플라즈모닉 나노구조체

플라즈모닉 현상에서의 다양한 광제어, 광변환, 광증폭 등의 효과가 보고된 이래, 플라즈모닉 나노구조체의 제조 방법에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 초기 플라즈모닉 현상에 대한 연구는 금속 나노입자를 낮은 농도로 뿌려서 우연찮게 발견되는 높은 광학적 현상이 발견되는 위치에서 집중적으로 분석을 하였다. 따라서, 재현성과 균일성 높은 플라즈모닉 나노구조체 제조에 대한 필요성이 대두되었다. 최근 10년동안 다양한 대면적 나노구조체의 제조에 관한 연구가 보고되었으나, 본 지에서는 태양전지나 광전기화학 물분해와 같은 소자에서 광전극의 효율을 향상시킬 수 있으며 적용성이 높은 저가형, 대면적 플라즈모닉 나노구조체의 제조에 대해 기술하고자 한

다. 이와 관련되어 대면적으로 균일하며, 나노사이즈에서 구조를 제어할 수 있는 나노템플레이트(Nanotemplate)를 이용하는 제조 방법에 대해 주로 소개하고자 한다.

2.1. 나노구멍 템플레이트 기반 플라즈모닉 나노구조체

양극산화기법(Anodization)을 이용해 산화알루미늄(Al_2O_3)이나 이산화타이타늄(TiO_2)과 같은 물질에 다양한 크기와 깊이의 나노구멍 구조를 갖는 나노기판에 대한 제조 공정에 대한 연구는 오래전부터 진행되어 왔다.^{8,9)} Fig. 3는 나노구멍을 갖는 산화알루미늄(양극산화알루미늄으로 불림)의 전자현미경 사진으로, 이러한 나노구조체는 식각(Etching) 공정을 통해 구멍의 크기를 조절할 수 있으며, 구멍의 깊이도 양극산화 시간을 조절하여 손쉽게 바꿀 수 있다. 이렇게 크기와 깊이가 조절 가능한 나노구멍 구조를 활용하여 대면적 플라즈모닉 구조체를 제조한 연구는 2006년 처음으로 보고되었다.¹⁰⁾ Fig. 4(a)은 양극산화알루미늄의 나노구멍의 크기를 조절한 후 나노구멍 내부에 은입자를 전기화학으로 도금하여 10 nm 이하의 간격을 갖는 대면적 플라즈모닉 나노구조체를 보여 준다. 일반적으로 플라즈모닉 나노구조체들간에 10 nm

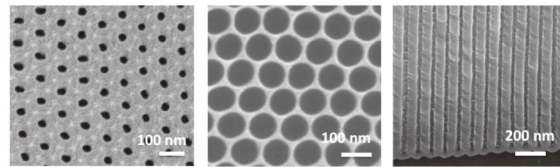


Fig. 3. Field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) images for porous anodic aluminum oxide (AAO) with different pore diameter. A right image shows the cross-section of AAO.

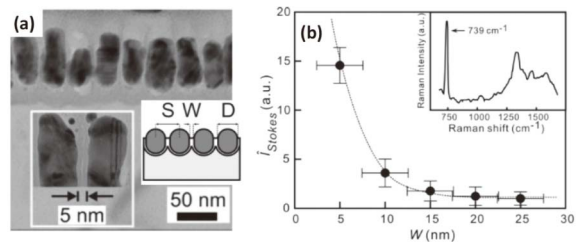


Fig. 4. (a) Transmission electron microscopy (TEM) image of the Ag nanoparticles in AAO. (b) Raman intensity dependent to the gap between Ag nanoparticles (W).¹⁰⁾



이하의 간격을 갖는 경우 엄청나게 증폭된 전자기장을 얻을 수 있게 된다. Fig. 4(b)에서는 플라즈모닉 나노구조체들간의 간격에 따른 검출된 라만신호의 크기를 비교해 놓았다. 플라즈모닉 나노구조체들 간 간격이 커질수록 급격하게 라만신호의 크기가 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 전자기파의 증폭에 플라즈모닉 나노구조체들간의 간격이 중요한 인자임을 알 수 있다.

Fig. 5은 양극산화알루미늄에 금속을 E-beam 또는 Thermal 증착하여 제조된 대면적 플라즈모닉 나노구조체를 보여준다.^{11,12)} Fig. 4에서 소개한 플라즈모닉 나노구조체와 달리, E-beam 또는 Thermal로 금속을 증착하는 경우에 대부분의 금속이 양극산화알루미늄 표면에 코팅되고, 일부 금속이 나노구멍 안쪽에 불균일하게 증착된다. 증착하는 금속의 두께를 조절하면, 양극산화알루미늄의 나노구멍이 막히지 않게 할 수 있는데, 나노구멍이 막히지 않는 경우에, 표면에 코팅된 플라즈모닉 나노구조체는 플라즈모닉 나노구멍을 형성하게되고, 이러한 구조에서 또한 강한 전자기파를 기대할 수 있다. Fig. 5(b)는 증착되는 금의 증착 두께에 따른 검출된 라만 신호로, 금이 30 nm 이상 증착을 하게 되면 더이상 라만신호가 검출이 되지않는다. 이는 금을 30 nm 이상 증착을 하는 경우에, 양극산화알루미늄의 나노구멍이 막혀서 플라즈모

닉 나노구멍이 형성되지 않기 때문이다. 따라서, 나노구멍이 막히지 않게 금속의 두께를 조절하는 것이 매우 중요하다.

Fig. 5(c)는 증착된 금속의 두께는 20 nm로 일정하게 한 후, 양극산화알루미늄의 나노구멍 두께를 바꾼 경우에 대한 라만신호를 보여준다. 그림에서 보듯이, 나노구멍이 유지가 되었지만, 양극산화알루미늄의 두께 변화에 따라 라만신호가 검출되기도 하고 검출이 안되기도 하였다. 이러한 현상은 플라즈모닉 나노구조체와 간섭효과가 결합되어 나타난 현상이다.¹²⁾ Fig. 6(a)에서 보듯이 양극산화알루미늄의 구조는 바닥에 알루미늄을 기반으로 그 위에 양극산화공정을 통해 형성된 나노구멍의 산화알루미늄이 올려져 있는 형태이다. 금속의 증착을 통해 맨 위에는 플라즈모닉 나노구멍, 중간에는 양극산화알루미늄 나노구멍, 바닥에는 알루미늄이 위치하게 되어, 금속-유전체-금속의 형태를 갖게되며, 이러한 구조에서는 입사한 빛과 알루미늄 바닥에서 반사된 빛이 간섭을 하여 보강 간섭 (Constructive interference)과 상쇄 간섭 (Deconstructive interference) 패턴을 형성하게 된다 (Fig. 6(b)). 보강간섭이 플라즈모닉 나노구멍층과 일치하게 되는 경우, 강한 빛이 플라즈모닉 구조체에 주어지고, 이에 따라 플라즈모닉 구조체에서는 강한 전자기파가 형성되며, 플라즈모닉 광흡수가 일어나 주어진 파장을 거의 흡수하게 된다. 반면에 상쇄간섭이 플라즈모닉 나노구멍층과 일치하게 되는 경우, 플라즈모닉 구조체에는 주어진

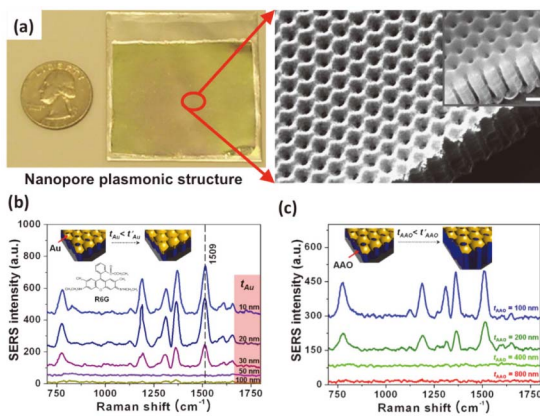


Fig. 5. (a) Thermally evaporated Au on AAO with the size of 5x5 cm². The nanopores in AAO was maintained by controlling the thickness of evaporated Au. (b) Raman signals according to the thickness of evaporated Au. (c) Raman signals according to the AAO thickness under the same thickness of Au.¹¹⁾

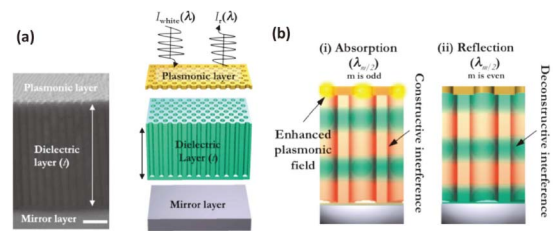


Fig. 6. (a) Composition of Au-coated AAO. The structure consists of a plasmonic layer at the top, a dielectric layer at the center, and a mirror layer at the bottom. (b) Coupling of surface plasmons and interference. Strong plasmonic absorption takes places when constructive interference (red color lines) is matched with the plasmonic layer. On the other hand, reflection occurs when deconstructive interference is located on the plasmonic layer.¹²⁾



빛이 없으므로 플라즈모닉 광흡수는 발생하지 않으며, 대부분의 빛을 반사하여 내보내게 된다. Fig. 7는 이와 같은 현상을 시뮬레이션한 것과 실험한 결과를 보여준다. 주어진 파장에 따라 보강간섭이 플라즈모닉 구조체와 일치한 경우(λ_1 and λ_3), 강한 전자기파가 플라즈모닉 나노

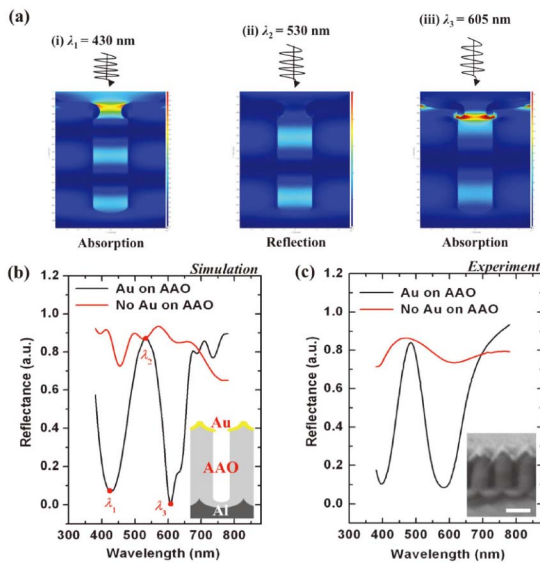


Fig. 7. (a) Local field distribution and interference fringe patterns in the 3D plasmonic nanostructure with the same thickness ($t_{AAO} = 300$ nm) of a dielectric layer under different wavelengths. When the constructive interference is positioned on the plasmonic component, plasmonic absorption (case (i) and (iii)) is created. On the other hand, reflection (case (ii)) occurs when destructive interference is located on the plasmonic layer. Reflection spectra¹²⁾ from FDTD simulation and (c) from experiments.

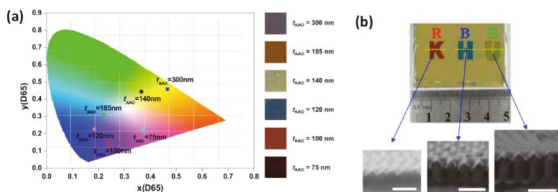


Fig. 8. (a) Color gamut for structural color display based on the reflectance spectra for 3D plasmonic nanostructures. The photographs show each color according to the thickness of the dielectric layer. The structural color covers the full visible range as shown. (b) Structural color display of "KHU" capitals for "RGB" colors by tailoring the thickness of the AAO dielectric layer. The scale bar of the SEM images is 200 nm.¹²⁾

구멍에 형성됨을 확인할 수 있으며, 이 경우 반사율이 거의 0에 가까움을 시뮬레이션 결과를 통해 알 수 있다. 반면, 상쇄간섭이 플라즈모닉 구조체와 일치한 경우(λ_2), 플라즈모닉 나노구조체에서는 어떠한 전자기파도 생성하지 않으며, 이에 따라 반사도가 거의 1에 가까움을 알 수 있다. 이러한 거동은 실험결과와도 완전히 일치함을 확인할 수 있다.

이와 같은 흡수율과 반사율의 극명한 차이를 활용하면, 다양한 색상을 만들어 낼 수 있다. Fig. 8은 이와 같은 현상을 이용하여 생성된 나노구조체에서의 색좌표를 보여준다. 증착된 금의 두께는 같지만, 양극산화알루미늄의 두께만을 변화시켜 빨간색부터 보라색까지 가시광선의 모든 색을 구현할 수 있으며, Fig. 8(b)에서는 RGB를 구현한 결과를 보여준다. 전자현미경 사진에서 보듯이, 증착된 금의 두께는 모두 같으며, 양극산화알루미늄의 두께만을 조절하여 RGB가 구현됨을 알 수 있다.

양극산화알루미늄에 금속을 E-beam 또는 Thermal 증착기로 증착한 후, 열처리를 추가로 수행하는 경우, 형성된 플라즈모닉 나노구멍층은 에너지를 낮추기 위해 금속 구입자(sphere particle)를 형성하게 된다 (Fig. 9).^{13,14)} 증착된 금속의 두께, 양극산화알루미늄의 나노구멍 크기 및 깊이에 따라 열처리 후 형성되는 플라즈모닉 나노 입

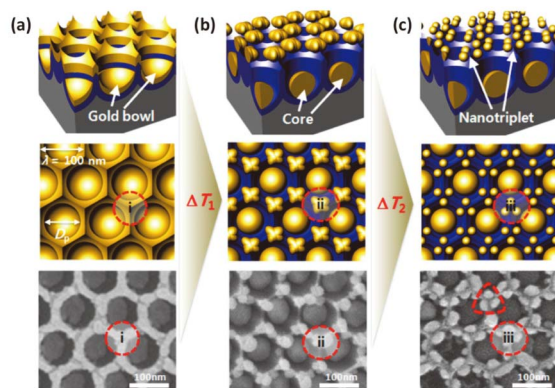


Fig. 9. Mechanism for nanotriplet formation on AAO via dewetting. (a) Evaporated gold on AAO template. The gold thickness was 20 nm. Separated gold bowls were formed in each AAO nanopore. (b) Intermediately dewetted gold on AAO at 400°C (ΔT_1). (c) Plasmonic nanotriplet array formed by dewetting at 600°C (ΔT_2) for 3 h.¹⁴⁾

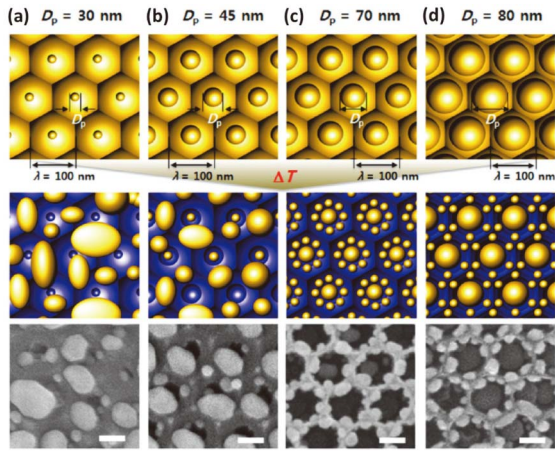


Fig. 10. Dewetting behaviors of gold on AAO according to the AAO pore size. Schematics and FE-SEM images for dewetted gold on AAO with different pore size (D_p) (a) 30, (b) 45, (c) 70, and (d) 80 nm.¹⁴⁾

자의 형태는 다양하게 된다. Fig. 10은 양극산화알루미늄의 나노구멍 크기에 따른 열처리 후 형성된 금속 나노입자의 모양을 보여준다.¹⁴⁾ 특정 조건에서 매우 균일하고 반복적인 형태의 금속 나노입자를 발견할 수 있으며, 이러한 입자들은 양극산화알루미늄의 독특한 표면 모양에 의해 나노구멍 주위에 형성된다. Fig. 11에서 보듯이 양극산화알루미늄의 표면을 평평하지 않고 뾰족한 모양을 하고 있으며, 이에 따라 열처리 과정에서 금속입자들은 초기에 뾰족한 부분에 모여서 큰 입자를 형성한 후 시간이 지속되면 세계의 입자로 나누지게 된다. 나누어진 세계의 입자는 10 nm 이내의 간격으로 위치하여 강한 전자기파를 생성하게 된다. 양극산화알루미늄 나노구멍의 깊이에 따라 나노구멍에 증착된 금속입자가 커다란 코어 금속나노입자를 형성할 수 있다(Fig. 12). 코어 입자가 형성된 경우, 코어 입자와 주위에 형성된 작은 금속입자들 간에 전자기파가 결합하여 넓은 공간에 강한 전자기



Fig. 11. Proposed mechanism for the formation of gold nan-triplet on AAO by dewetting.¹⁴⁾

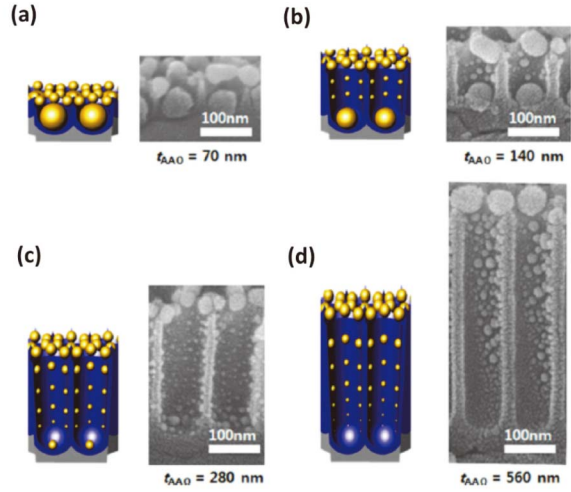


Fig. 12. Effect of AAO depth on the core formation. Cross-sectional schematics and FE-SEM images for dewetted gold on AAO with different depth (t_{AAO}) (a) 70, (b) 140, (c) 280, and (d) 560 nm. The AAO pore diameter was 80 nm, and the gold thickness was 20 nm.¹⁴⁾

파의 분포를 유도할 수 있게 된다. 플라즈모닉 입자에서의 강한 전자기파는 일반적으로 입자에서 매우 가까운 거리(보통 10 nm 근방)에만 분포한다. 코어 입자와 작은 입자들의 결합을 통해 강한 전자기파가 넓은 공간에 분포하게 되면, 향상된 플라즈모닉 효과를 제공할 수 있게 된다.

2.2. 나노막대를 이용한 3차원 분포 플라즈모닉 나노구조체

플라즈모닉 효과는 플라즈모닉 나노구조체 근방에서만 발생하기 때문에 다양한 광전자소자에 적용을 위해서는 3차원 공간에 플라즈모닉 구조체를 분포하는 기술이 필요하다. 기존에는 금속 나노입자를 활성층(광흡수 또는 발광 층 등) 물질과 섞어서 박막을 만들었으나, 이러한 과정에서 대부분의 나노입자는 서로 뭉치게되어 일부 부분에만 모이게 되며, 균일하게 분포하게 되지 못한다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 나노막대 기판을 이용하여 플라즈모닉 나노구조체를 3차원 공간에 분포하는 기술이 개발되었다. Fig. 13은 유리기판에 은입자를 형성한 후 Reactive ion etching (RIE) 공정을 통해 유리 나노막대



를 형성하고 그 위에 은을 다시 증착하고 열처리(380°C) 함으로써 플라즈모닉 나노입자를 3차원 공간에 분포하는 기술을 보여준다.¹⁵⁾ 나노막대가 매우 가까이 위치하는 경우 분포된 플라즈모닉 나노입자들 간에 강한 전자기장이 형성된다. Fig. 14은 산화아연(ZnO) 나노막대를 이용하여 3차원 분포된 플라즈모닉 나노구조체를 보여준다.¹⁶⁾ 질화갈륨(GaN) 기판에 화학증착법(Chemical Vapor Deposition)을 이용해 수직성장된 산화아연 나노막대를 성장한다. 금속의 증착과 열처리 공정을 통해 Fig. 13과 유사한 3차원 플라즈모닉 나노구조체가 형성됨을 알 수 있다.

앞서 소개한 3차원 플라즈모닉 나노구조체는 금속의

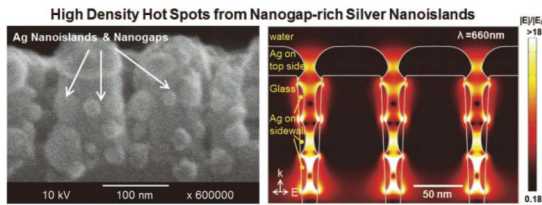


Fig. 13. Sidewall SEM image of high density hot spots generated by nanogap-rich silver nanoislands surrounding glass nanopillars and the calculated electric field distribution near the hot spots.¹⁵⁾

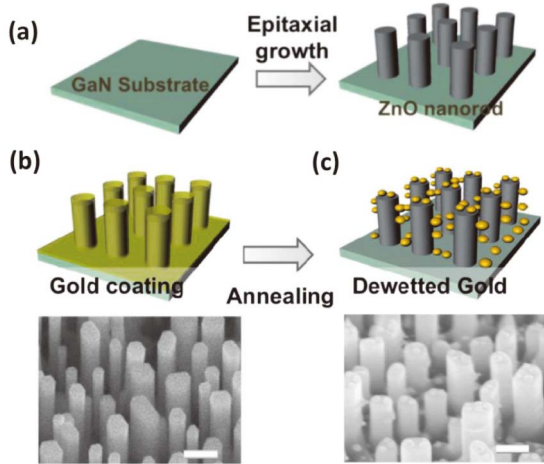


Fig. 14. (a) Epitaxial growth of ZnO nanorods on a GaN substrate. (b) Au thin film deposited on the ZnO nanorods by thermal evaporation. (c) Dewetted Au nanoparticles on the surface of ZnO nanorods by simple annealing for 3 hr at 650°C. The inset clearly shows dewetted Au nanoparticles on a nanorod. The scale bar is 100 nm.¹⁶⁾

증착 후 열처리 공정을 통해 증착된 금속을 나노입자화 하였다. 또한, 사용된 나노구조체가 반도체(ZnO) 혹은 부도체(Glass) 물질을 이용하였다. Fig. 15에서는 전도성 나노막대 위에 열처리 공정 없이 금속의 증착 과정에서 스스로 나노입자가 형성되는 결과를 보여준다.¹⁷⁾ 이를 위해, 표면에너지가 매우 낮은 탄소나노막대(Carbon nanotube, CNT)를 이용하였다. 즉, Plasma-enhanced CVD (PECVD) 공정을 통해 수직 성장된 탄소나노막대를 실리콘 웨이퍼 기판에 형성한 후 은을 thermal 증착하는 경우, 은입자가 탄소나노막대 표면에 균일하게 분포되는 것이 발견되었다. 그 이유는 크게 세 가지로 소개되는데, 첫째는 탄소나노막대의 표면에너지가 낮아 금속이 표면에 잘 달라붙지 못하게 된다는 점이다. 두번째는 은입자는 서로 잘 뭉치려는 특성(Agglomeration)이 강하기 때문이다. 마지막으로 첫째와 두번째 조건에 더불어

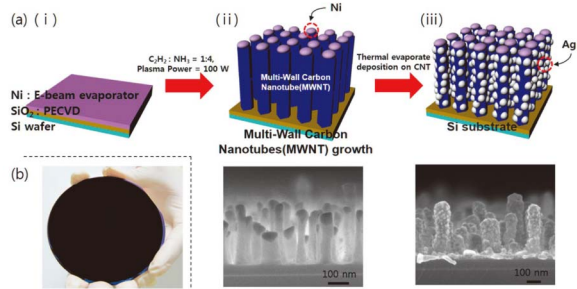


Fig. 15. Fabrication process for the plasmon-integrated electrode. (a) Schematic and FE-SEM images for the formation of silver nanoparticles on vertically aligned multiwalled carbon nanotube electrode. (b) Photograph of large-area 3D plasmon-integrated electrode on 4 in. wafer.¹⁷⁾

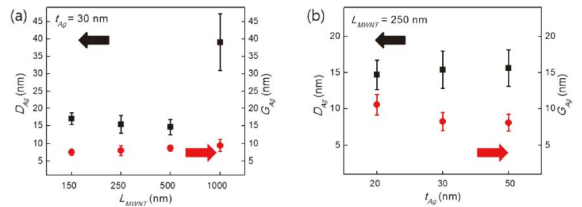


Fig. 16. The diameter (D_{Ag}) of self-assembled silver nanoparticles and the gap (G_{Ag}) between the nanoparticles according to (a) the length of the MWNTs (L_{MWNT}) and (b) silver thickness (t_{Ag}). The values are average and the error bars are standard deviation for each value.¹⁷⁾



수직으로 성장된 탄소나노막대의 구조적 특성으로 은입자가 더욱 잘 3차원 공간에 분포하게 된다는 것이다. 탄소나노막대의 길이와 증착된 은의 두께에 따른 분석을 통해, 증착된 은입자간의 거리(G_{Ag})는 5~10 nm 였으며, 은입자의 크기(D_{Ag})는 가장 긴 1 μm 를 제외하고 15 ~ 20 nm의 직경을 보였다 (Fig. 16(a)). 증착되는 은의 두께를 20 nm 에서 50 nm까지 증가시켰지만 은입자의 크기는 15 nm에서 크게 변하지 않았으나, 입자간 거리가 다소 줄어드는 경향을 확인할 수 있다 (Fig. 16(b)). 이와 같은 플라즈모닉 나노구조체는 전도성 기판과 결합을 하고 있기 때문에 다양한 고효율 광전극 구조로 활용될 것으로 기대된다.

2.3. 환원 공정을 이용한 플라즈모닉 나노구조체 제조

일반 화학에서는 전자를 받는 과정을 환원이라 정의한다. 즉, 금속이온이 전자를 받아 금속되는 과정은 환원 공정이다. 그래핀(Graphene)에 금이온이 접촉하는 경우 두 물질간 환원 전위(Reduction Potential) 차이가 크기 때문에 금이온은 그래핀으로부터 전자를 받아 금을 그래핀 표면에 형성하게 된다. 이러한 현상을 이용해 그래핀의 일함수(Work function)를 제어하는 연구는 보고된 바 있다.¹⁸⁾ Fig. 17에서는 이와 같은 과정에서 형성되는 금입자의 플라즈모닉 효과를 보여준다.¹⁹⁾ 화학증착으로 제조된 그래핀은 대면적으로 단단한 기판과 유연기판에 자유롭게 전사(Transfer printing)될 수 있다. 전사된 그래핀

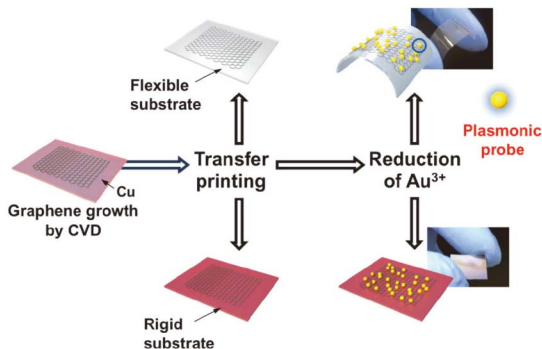


Fig. 17. Schematic illustration of a plasmonic Au/graphene assembly at room temperature by reduction process of Au ion on graphene.¹⁹⁾

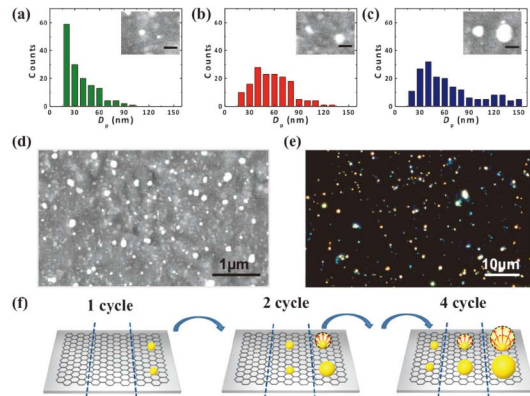


Fig. 18. Cyclic effect of reduction process for the Au nanoparticles. Size histograms of reductive Au nanoparticles according to spin-coating of (a) 1 cycle, (b) 2 cycles, and (c) 4 cycles. (d) SEM image of Au nanoparticles on graphene after 4 cycles in an area of approximately 15 μm^2 . (e) Dark field image for Au nanoparticles with various sizes. The various colors demonstrate different sizes of plasmonic Au nanoparticles. (f) Proposed mechanism of the particle size distribution by the cyclic coating process.¹⁹⁾

을 금이온이 포함된 용액과 접촉하게 되면 금이온의 환원 공정을 통해 금입자가 그래핀 표면에 형성하게 된다. 형성되는 금 입자의 크기는 금이온이 포함된 용액의 농도에는 큰 영향을 받지 않으나, 형성된 금 입자의 밀도는 농도에 따라 급격하게 증가하게 된다. 금 입자의 크기는 용액과의 접촉 횟수를 증가함에 따라 성장하기도 하며, 새로운 입자가 형성되며 그 크기의 분포가 넓게 된다 (Fig. 18). UV-visible photospectrometer를 통해 금 입자의 플라즈모닉 공진 파장의 위치에서 광흡수가 일어나며, 반복된 접촉 횟수에 따라 다양한 크기 분포로 인해 공진 파장의 점점 넓어지는 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

플라즈모닉 나노구조체가 탑재된 새로운 광소자에 대한 연구가 많은 그룹에서 다양한 각도로 진행중에 있으며, 관련 결과물은 우수 연구 성과로 수시로 보도되고 있다. 특히, 환경문제와 같은 사회적 이슈로 인해 무공해 광전자소자의 개발은 앞으로 더욱 활발하게 지원을 받으며 진행될 것이다. 광제어 및 증폭과 같은 플라즈모닉 구



조체의 엄청난 효과를 적용한 광소자의 개발은 그동안 대면적 플라즈모닉 나노구조체 제조의 제약으로 인해 다소 주춤했으나, 최근 나노기술의 비약적인 발전과 함께 플라즈모닉 기술이 접목된 고성능 광전자소자는 곧 현실이 될 것으로 예측된다. 본 지에서 소개한 다양한 플라즈모닉 구조체는 현재까지 보고된 연구 결과의 일부에 불과하며, 그 응용 분야에 따라 접목시킬 수 있는 독창적이고 고성능의 다양한 연구 결과가 보고되었으며, 앞으로도 계속 보고될 것이라 기대된다.

참고문헌

- H. Ditlbacher, J. R. Krenn, G. Schider, A. Leitner, and F. R. Aussenegg, "Two-Dimensional Optics with Surface Plasmon Polaritons," *Appl. Phys. Lett.*, **81** 1762-64 (2002).
- K. L. Kelly, E. Coronado, L. L. Zhao, and G. C. Schatz, "The Optical Properties of Metal Nanoparticles: The Influence of Size, Shape, and Dielectric Environment," *J. Phys. Chem. B*, **107** 668-77 (2003).
- L. M. Marzan, "Tailoring Surface Plasmons through the Morphology and Assembly of Metal Nanoparticles," *Langmuir*, **22** 32-41 (2006).
- J. R. Krenn, J. C. Weeber, A. Dereux, E. Bourillot, J. P. Goudonnet, B. Schider, A. Leitner, F. R. Aussenegg, and C. Girard, "Direct Observation of Localized Surface Plasmon Coupling," *Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys.*, **60** 5029-33 (1999).
- J. R. Lakowicz, "Plasmonics in Biology and Plasmon-Controlled Fluorescence," *Plasmonics*, **1** 5-33 (2006).
- Y. A. Akimov and W. S. Koh, "Resonant and Nonresonant Plasmonic Nanoparticle Enhancement for Thin-Film Silicon Solar Cells," *Nanotechnology*, **21** 235201(1)-235201(6) (2010).
- J. Lee, S. Mubeen, X. Ji, G. D. Stucky, and M. Moskovits, "Plasmonic Photoanodes for Solar Water Splitting with Visible Light," *Nano Lett.*, **12** 5014-19 (2012).
- D. Choi, S. Lee, C. Lee, P. Lee, J. Lee, K. Lee, H. Park, and W. Hwang, "Dependence of the Mechanical Properties of Nanohoneycomb Structures on the Porosity," *J. Micromech. Microeng.*, **17** 501 (2007).
- R. S. Hyam and D. Choi, "Effects of Titanium Foil Thickness on TiO₂ Nanostructures Synthesized by Anodization," *RSC Advances*, **3** 7057-63 (2013).
- H.-H. Wang, C.-Y. Liu, S.-B. Wu, N.-W. Liu, C.-Y. Peng, T.-H. Chan, C.-F. Hsu, J.-K. Wang, and Y.-L. Wang, "Highly Raman-Enhancing Substrates Based on Silver Nanoparticle Arrays with Tunable Sub-10 nm Gaps," *Adv. Mater.*, **18** 491-95 (2006).
- D. Choi, Y.H. Choi, S.G. Hong, T.W. Kang, and Luke P. Lee, "Self-organized Hexagonal Nanopore SERS," *Small*, **6** 1741-44 (2010).
- D. Choi, C. K. Shin, D. Yoon, D. S. Chung, Y. W. Jin, and L. P. Lee, "Plasmonic Optical Interference," *Nano Lett.*, **14** 3374 (2014).
- S. Hong, T. Kang, D. Choi, Y. Choi, and L. P. Lee, "Self-Assembled Three-Dimensional Nanocrown Array," *ACS Nano*, **6** 5803-08 (2012).
- H. Jo, D. Yoon, A. Sohn, D.-W. Kim, Y. Choi, T. Kang, D. Choi, S.-W. Kim, and L. P. Lee, "Asymmetrically Coupled Plasmonic Core and Nanotriplet Satellites," *J. Phys. Chem. C*, **118** 18659 (2014).
- Y.-J. Oh and K.H. Jeong, "Glass Nanopillar Arrays with Nanogap-rich Silver Nanoislands for Highly Intense Surface Enhanced Raman Scattering," *Adv. Mater.*, **24** 2234-37 (2012).
- J. Yoo, J.-H. Kim, S. Lee, S. Kim, H.-K. Park, S.-W. Kim, J.-J. Park, and D. Choi, "Self-assembled Tunable Gold Nanoparticles on ZnO Nanorods via Dewetting," *Scripta Mater.*, **69** 654 (2013).
- Y. Kim, S. Lee, K. Lee, S. Shim, J. Y. Kim, H. W. Lee, and D. Choi, "Self-Assembled Plasmonic Nanoparticles on Vertically Aligned Carbon Nanotube Electrodes via Thermal Evaporation," *ACS Applied Mater. & Inter.*, **6** 20423 (2014).
- H. Shin, W. M. Choi, D. Choi, G. H. Han, S. Yoon, H. Park, S. Kim, Y. W. Jin, S. Y. Lee, J. M. Kim, J. Choi, and Y. H. Lee, "Control of Electronic Structure of Graphene by Various Dopants and Their Effects on a Nanogenerator," *J. Am. Chem. Soc.*, **132** 15603-09 (2010).
- S. Lee, M. H. Lee, H. Shin, and D. Choi, "Control of Density and LSPR of Au Nanoparticles on Graphene," *Nanotechnology*, **24** 275702 (2013).

●● 최덕현



- 2000년 포항공대 재료금속공학과 학사
- 2002년 포항공대 기계공학과 석사
- 2006년 포항공대 기계공학과 박사
- 2007-2008년 University California, Berkeley (UC-Berkeley) 박사후 연구원
- 2008-2010년 삼성종합기술원, 전문연구원
- 2010년-현재 경희대학교 기계공학과 조교수