



인공광합성 광전극연구 효율향상과 플라즈몬 응용

글 _ 박준모, 백정민
울산과학기술대학교 신소재공학과

1. 서론

현대사회의 풍요는 석유, 석탄 및 천연가스와 같은 화석연료를 통해 얻어졌다고 해도 과언이 아니다. 화석연료는 인류가 사용하는 전 세계 에너지의 80% 이상을 차지할 뿐만 아니라 화학공업의 원료로 사용되며 화석연료로 생산되는 대표적인 제품으로 플라스틱과 비료가 있다. 하지만 화석연료는 매장량에 한계가 있으며 환경오염의 문제가 있어 언젠가 더 이상 사용할 수 없는 비재생에너지이며 전 세계적으로 이를 해결하기 위해 태양광, 풍력, 수력 등 재생에너지의 비중을 올리기 위해 노력하고 있다. 하지만 대부분의 재생에너지의 경우 전력발전에 치중되어 있으며 기존 화석연료를 사용하는 교통수단에 해당하는 자동차 및 항공기의 에너지원 및 화학공업의 원료로 이용하기에는 부족한 면을 가진다. 기존 화석연료를 대체하기 위해서는 화학물질형태의 에너지가 필요하며, 이를 해결하기 위해 다양한 시도가 있으며 대표적으로 바이오연료와 인공광합성이 있다. 바이오연료는 생물체를 이용하여 연료를 생산하며, 생명체를 생산할 수 있는 넓은 영역의 공간과 적합한 기후가 필요로 하여 미국, 브라질 등 제한된 국가에서만 현실성이 있으며, 넓은 영역에 분포된 생명체의 수집 및 성장에 필요한 관리 및 비료와 같은 원료를 필요로 한다. 그 결과 화석연료에 비해 지나치게 비싼 가격을 형성하며 인류의 식량자원생산에 영향을 주어 식량가격을 높이는 문제점을 가진다. 반면에 인공광합성은 태양광과 광촉매를 이용하여 이산화탄

소 혹은 물을 분해하여 기존 화석연료를 대체할 수 있는 탄화수소 및 산소와 수소를 생산하는 방법으로 화석연료를 대체할 수 있는 이상적인 재생에너지원으로 주목 받고 있다. 하지만, 인공광합성 또한 상용화되기 위해서는 넘어야 하는 허들이 존재한다. 인공광합성이 화석연료를 대체하기 위해서는 세 가지 요소가 필요하며 그것은 가격, 수명 그리고 효율이다.

최근 인공광합성의 효율과 수명의 향상에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있으며, 새로운 물질, 원리 및 구조에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 본고에서는 상대적으로 수명이 긴 무기물 재료로 이루어진 인공광합성 기술의 연구동향과 최근에 시도되고 있는 플라즈몬이 적용된 인공광합성 광전극의 연구를 소개하고자 한다.

2. 본론

2.1. 인공광합성 원리

무기물 기반의 인공광합성은 대표적으로 물분해를 통한 수소와 산소 발생이다. 그리고 대부분의 경우 광촉매를 이용해서 인공광합성을 연구하고 있다. 여기서 광촉매는 단순히 말하면 빛을 조사하였을 때 특정화학반응이나 반응속도에 영향을 주는 촉매이다. 이러한 특성을 가지기 위해서는 광촉매는 빛을 흡수해서 에너지로 전환하기 위한 반도체 밴드구조 특성과, 화학반응을 유도하기 위한 표면의 촉매특성을 동시에 가져야 한다. 광촉매는 Fig. 1(a)와 같이 태양광의 광자(photon) 흡수하여 가



전자대(valence band)의 전자가 여기하여 전도대(conduction band)로 올라가고 이로 인해 전자전공쌍이 형성된다. 그리고 가전자대 영역의 전공은 산소를 형성하는데 사용되며 전자는 수소를 형성하게 된다. 여기서 인공광합성 물분해가 되기 위해서는 몇 가지 조건이 필요하다. 광촉매의 종류에 따라 표면에서 수소 혹은 산소발생 둘 중 하나의 반응이 일어나는 촉매특성을 가지거나 두 반응 모두 촉매특성을 가져야 한다. 또한 물분해에 필요한 에너지는 최소 1.23 eV가 필요하지만 실제로는 1.8 eV 이상이 필요하기 때문에 밴드갭의 크기 또한 중요하다. 또한 밴드갭의 가전자대와 전도대 사이에 수소와 산소발생반응에 해당하는 산화반응 레벨과 환원반응 레벨이 존재해야 한다. 앞서 언급한 까다로운 조건을 모두 통과하였을 때 인공광합성 광촉매로 사용이 가능하며, 이러한 까다로운 조건을 통과한 광촉매로는 대표적으로 TiO_2 , Fe_2O_3 , $BiVO_4$, ZnO_2 , WO_3 등이 있다.

인공광합성의 방식에 따라 크게 Fig. 1(b)와 같이 세 가지 형태로 나눌 수 있다. 첫 번째는 입자형태의 광촉매를 사용한 방법으로 넓은 질량대비 표면적, 제작의 간편성 등의 장점을 가지지만 수소와 산소가 같은 장소에서 발생한다는 문제점으로 인해 혼합가스가 발생한다. 수소 산소혼합가스는 산업적으로 가치가 높은 수소를 따로 공정을 통한 분리가 필요하며, 폭발의 위험성을 가지고 있어 상용화에 문제를 가진다. 두 번째 방식은 한쪽에 광전극을 배치하고 모자란 에너지를 외부의 태양전지에서 얻는 방식으로 태양광을 두 군대에서 얻는 문제점으로 인

해 별도의 태양광 패널과 광전극으로 인해 넓은 설치면적과 비용증가의 문제점을 가진다. 마지막으로 세 번째 방식은 양쪽에 수소발생 광전극과 산소발생 광전극을 설치하여 각각 수소와 산소를 분리된 영역에서 각각 발생시킨다. 이 밖에 광촉매를 사용하지 않고 태양전지의 양쪽에 수소와 산소 전기촉매를 사용하는 방식이 있다.

2.2. 인공광합성 효율

인공광합성을 모두 가지더라도 상용화가 가능하기 위해서는 두 가지 문제점 해결해야 하며 그것은 바로 효율과 수명이다. Fig. 2와 같이 인공광합성 광전극의 효율은 크게 네 가지로 구성된다. 첫 번째 투과효율은 광전극에 태양광이 입사하였을 때 용액과 광전극과 계면에서 투과율 혹은 반사율이며 광전극을 구성하는 광촉매의 굴절률에 의해서 결정된다. 광촉매와 용액과의 굴절률 차이가 커지면 반사율이 증가하고, 이러한 문제점으로 인해 투과효율을 올리기 위한 방법으로 최근 주목 받고 있는 나노구조체 광촉매를 이용한 방법으로 나노구조로 인한 유효굴절률 조절할 수 있다. 두 번째 광흡수효율은 광촉매에 입사된 빛을 흡수하여 가전자대 전공을, 전도대에 전자를 형성에 관한 효율로, 광흡수효율에 있어 가장 중요한 변수는 광촉매의 밴드갭으로, 물질의 밴드갭 보다 큰 에너지의 광자만을 흡수하며, 밴드갭이 클 경우 태양광 흡수효율이 떨어져 인공광합성의 효율이 떨어지며, 반대로 밴드갭이 작아 광전압이 낮을 경우 수소산소 발생에 필요한 최소한의 전압을 얻지 못하면 인공광합성이 일어

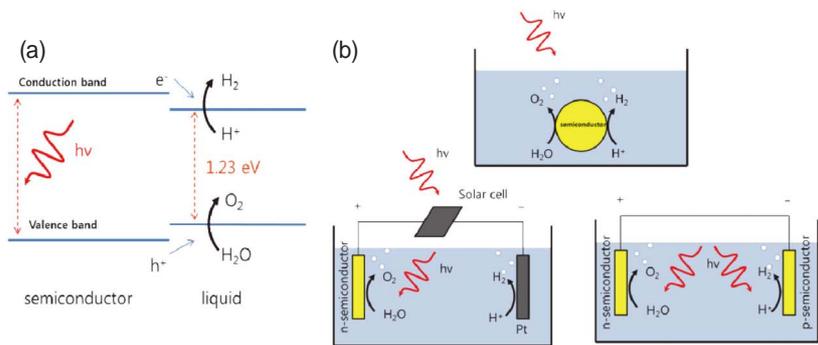


Fig. 1. (a) 광촉매 인공합성 원리 및 (b) 세 가지 형태의 인공광합성 방식.

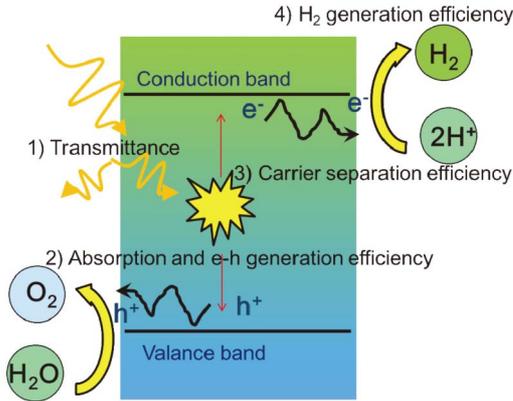


Fig. 2. 인공광합성 효율.

나지 않는다. 세 번째 전자전공이동효율은 광촉매 내에서 발생한 전자전공이 표면으로 이동하는 효율에 관한 것으로, 광흡수로 인해 발생한 전자전공쌍이 한자리에 같이 머물러 있으면 재결합하여 소멸한다. 이때 전자전공이 빠르게 분리되어 표면 혹은 반대편 전극으로 재결합하여 소멸하지 않고 얼마나 빠르게 이동하느냐에 따라 효율이 결정하게 된다. 네 번째 수소산소 발생효율은 촉매특성에 의해서 좌우되며 단위면적당 화학반응의 속도는 물질마다 제한되어 있으며 광촉매마다 그 특성이 다르다. 앞서 언급한 네 가지 효율의 곱의 형태로 인공광합성의 효율이 결정되며, 어느 하나의 효율이 낮아지면 전체효율에 영향을 주게 되어 결과적으로 인공광합성의 효율이 낮아지게 된다. 이와 같이 네 가지 효율에 의해 복합적으로 작용하며 어떤 효율도 무시할 수 없으며 광촉매의 조건과 같이 고려해서 디자인하지 않으면 안 된다. 인공광합성 효율을 비교하는 한 가지 실험방법으로 incident photon to current conversion efficiency (IPCE)가 있다. 이것은 아래와 같은 수식으로 정의 된다.

$$IPCE(\%) = \left(\frac{1240J}{\lambda \times I} \right) \times 100\%$$

여기서 J는 단위면적당 광전류이며 (mA/cm²), λ는 빛의 파장이며 (nm), I는 조사된 단위면적당 빛의 세기이다 (mW/cm²). IPCE는 파장에 따른 광전극의 효율을 나타내며, 광전극이 반응하는 파장영역이 어디인지 알 수 있

다. 이 방법은 짧은 시간 동안 광전극의 효율을 측정할 수 있고 조사 파장별 광특성을 분석하는데 있어 유리한 요소이다. 하지만 가장 중요한 요소는 태양광 변환효율로 (solar energy conversion efficiency) 아래와 같은 수식으로 정의된다.

$$\eta(\%) = J \frac{E_{rex} - |E_{means} - E_{aoc}|}{I} \times 100(\%)$$

여기서 η는 태양에너지 변환효율이며 (%), J는 광전류 밀도이며 (mA/cm²), I는 조사된 광의 밀도이다 (mW/cm²). E_{rex}는 인공광합성에 필요한 전압이고(1.23V), E_{means}와 E_{aoc}은 각각 빛이 조사된 상태에서 광전극의 전압과 개회로(open circuit)에서의 광전극의 전압이다. 태양광 변환효율은 용액내에서 기준전극과 반대전극인 Pt전극과 광전극으로 구성되어지고 여기서 기준 전극과 광전극의 전압에서 태양광변환 효율을 측정하게 된다.

3. 광전극물질과 나노구조체 응용을 통한 효율 향상

앞서 언급했던 고효율 광전극 구성물질로 요구되는 사항으로 태양광 흡수를 효과적으로 하기 위한 적당한 밴드갭과, 밴드갭 안에 물분해를 위한 산화레벨과 환원레벨의 위치해야 하며, 수소산소 발생 촉매특성뿐만 아니라, 화학적 안정성으로 인한 수명과, 낮은 제작비용으로 인한 가격 경쟁력 또한 가져야 한다. TiO₂의 경우 높은 화학적 안정성을 가져 유일하게 상용화되어 인공광합성 뿐 아니라 살균, 공기청정, 수처리 및 유기물분해에 응용되고 있지만, 2.8~3.1 eV의 큰 밴드갭을 가져 UV에 해당하는 오직 4% 태양광을 흡수하여 약 1%의 낮은 효율을 가지는 문제점을 가진다. 반대로 화합물 반도체의 텐덤구조의 태양전지를 이용하여 12%의 효율을 가지지만 화학적 안정성이 부족하고 가격문제로 인해 상용하기에 어렵다. 이러한 문제점으로 인해 작은 2.2~2.6 eV의 밴드갭을 가지면서 화학적 안정성을 가진 물질로 BiVO₄, WO₃, Fe₂O₃ 등이 주목 받고 있다. 하지만 아직 TiO₂를 제외한 나머지 물질에서는 상용화 가능한 수준의 1만 시간 이상의 수명을 가지는 물질은 나타나고 있지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위해 세 가지 방향으로 연구가 진행



되고 있다. 효율이 높지만 화학적 안정성이 낮아 수명이 짧은 광촉매의 수명을 올리는 연구와 화학적 안정성은 높지만 효율이 낮은 물질의 효율을 올리는 연구, 마지막으로 태양전지와 화학적으로 안정적인 전기촉매를 융합을 통한 인공광합성이다. 이러한 연구에 있어 제안되고 연구되는 해결방안으로 나노구조체를 이용한 방법, 광학적 디자인을 통한 방법, 이종접합구조를 이용한 방법, 전기촉매를 이용한 방법, 플라즈몬을 이용한 방법 등이 있다.

3.1. 이종접합구조를 이용한 광전극

이종 접합구조는 형태에 따라 크게 Type I, Type II, Type III 로 나눈다. 여기서 Type II의 경우 광에너지를 전자에너지로 변경에 있어 적합한 구조로 Fig. 3과 같이 두 가지의 밴드구조가 다른 물질을 밴드구조상에서 어긋나게 접합한 구조이다. 이러한 구조로 인해 두 가지 흡수 밴드를 가져 용액과 만나는 표면과 내부의 물질과 분리가 가능하다. 이 구조의 장점은 상대적으로 낮은 촉매특성과 광흡수율을 가지지만 높은 촉매특성과 화학적 안정성을 가진 물질을 용매와 만나는 바깥쪽에 위치하고, 광흡수효율은 높지만 낮은 촉매특성과 화학적 안정성이 낮은 물질을 안쪽에 배치해 두 가지 물질의 장점만을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, Type II 구조의 두 물질이 만나는 계면에 전자전공의 분리가 쉽게 되어 전자전공이동효율이 증가 하게 된다. 또한 두 물질의 굴절률차이에 의한 광학설계 및 나노구조의 적용을 통해 효율을 극대화 할

수 있어 많은 연구가 진행 중이다.

3.2. 나노구조체 인공광합성

최근 나노구조체를 이용한 연구는 재료분야에 있어 가장 주목 받는 연구 분야이며 인공광합성 분야에서도 Fig. 4와 같이 나노로드^{2,3)}, 나노가지⁴⁾, 나노튜브⁵⁾ 형태의 다양한 나노구조체 광전극에 대한 연구가 보고되고 있으며, 나노구조로 인한 효과로 광전극의 효율 증가가 보고되고 있다. 나노구조체는 100 nm 이하의 작은 구조로 인해 광흡수로 인해 발생한 전자전공의 이동거리가 단축되어 표면으로 전자 혹은 전공이 이동할 확률이 증가하게 되어 전자전공이동효율을 높인다. 또한 촉매는 단위면적당 화학반응속도가 제한되어있지만 나노구조체는 표면을 필름에 비해 100배 이상 늘릴 수 있어 결과적으로 촉매특성 또한 상승하게 된다. 최근 나노구조체를 이용한 비반사구조 또한 주목받고 있으며 이것은 원리는 빛의 반과장 이하에서는 스캐터링이 줄어들면서 빛이 직진하는데 이때 공기 혹은 용액과 물질과의 구성 비율에 따라 굴절률이 변하게 된다. 그 결과 기존의 비반사구조와 동일한 원리로 빛이 표면에서 반사하지 않고 90% 이상의 효율로 투과하게 되어 광투과효율이 상승한다. 나노구조체 제작은 리소그래피 혹은 나노임프린트와 같은 패터닝 공정에서 현재는 자발형성을 통한 나노구조체 제작이 주를 이루며 양극산화, 수열합성, 기상증착방법 등 다양한 방법으로 제작되고 있다.

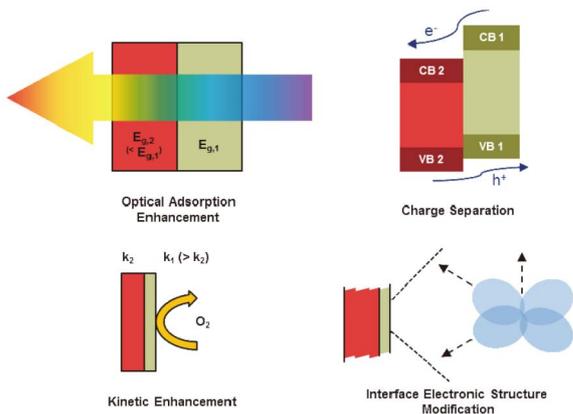


Fig. 3. 이종접합구조에서 인공광합성 효율향상 원리.¹⁾

3.3. 전기촉매를 이용한 인공광합성

광촉매 중 일부는 수소와 산소 모두 촉매특성을 가지는 경우도 있지만 이중 한 가지만 가지는 경우도 있다. 이러한 수소산소발생효율을 높이는 방법으로 나노구조체와 같이 단위부피당 높은 표면적을 형성하거나, 높은 촉매특성을 가지는 부촉매를(co-catalyst) 사용하여 단위면적당 가스발생효율을 향상시킨다. 여기서 부촉매는 일반적으로 전기촉매가 사용되며 전기촉매는 전압을 인가하였을 때 표면에서 수소 혹은 산소가 발생하는 촉매이다. 특히 부촉매를 사용할 경우 촉매특성이 없는 광전물질을 사용하더라도 표면의 부촉매에서 가스발생을 하기

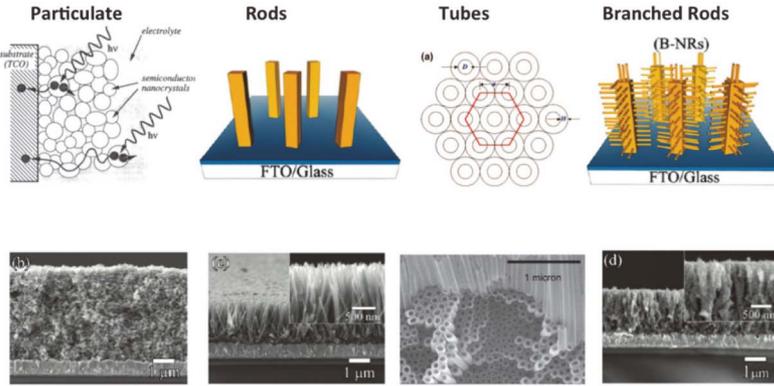


Fig. 4. 대표적 나노구조체의 형태별 분류.

때문에 기존의 태양전지의 표면에 부촉매를 코팅하여 인공광합성이 가능하다. 대표적으로 수소발생효율이 높은 전기촉매는 백금(Pt)이 있으며 산소발생효율이 높은 전기촉매로는 RuO_2 ⁶⁾, NiOx ⁷⁾, co-pi ⁸⁾ 등이 있다. 여기서 수소와 산소의 발생비율이 물의 수소산소 비율과 같은 2:1 일 때 이상적인 가스생성 비율이다.

4. 플라즈몬과 메타물질에 의한 인공광합성 효율향상

표면플라즈몬은 금속 안에 진동하는 유사입자로 금속 입자나 메타물질에서 가시광 영역에서의 광흡수현상으로 주목 받고 있으며 이때 국소적인 영역에 강한 전기장을 형성한다. 이것은 광에너지는 금속과 주변에 플라즈몬 형태의 전자의 진동과 전자기파형태로 에너지가 변환되어 나타나는 현상으로 광이 금속과 주변의 공기 혹은 유전체에 갇힌 형태이다. 플라즈몬은 빛을 파장보다 작은 크기에 모을 수 있어서 다양한 분야에 연구되고 있으며 광도파로, 센서, 발광체효율 향상 등에 연구되고 있으며 특히 광흡수율 향상과 광전현상에 의한 광전류 발생하는 특성으로 인해 주목 받고 있다. 최근 금속이 광에 노출 되었을 때 나타나는 플라즈몬에 의한 양자현상을 이용하여 인공광합성의 효율을 증가시키는 연구가 보고 되었으며 가시광에서 반응 하지 않던 광촉매를 가시광에서 동작시키는 연구가 보고 되고 있다. 표면플라즈몬은

빛에 의해 금속내의 전자가 고유진동수에 따라 진동하면서 전자가 여기된 현상으로, 이때 두 가지 중요한 특성이 나타난다. 광이 금속표면 갇히는 현상과 여기된 전자가 광촉매내로 이동하면서 광전류를 발생하는 것이다.

초기에 표면플라즈몬에 의한 광전류 향상은 주로 나노파티클에 의한 광트랩효과에 의한 효율향상 보고되었다. Fig. 5와 같이 기존의 나노구조체 혹은 마이크로구조체의 광전극에 금속나노입자를 붙이는 것만으로 광효율의 향상이 보고되었다.^{9,10)} 플라즈몬에 의한 광효율 향상은 금속나노입자 주변에 광을 가두는 효과로 인해 얇은 두께의 광전극에서도 높은 광흡수효율을 얻을 수 있다는 점이며 광촉매의 표면근처에서 대부분의 광흡수가 일어나면서 전자 혹은 전공이 표면으로 이동거리가 단축되어 재결합으로 인한 에너지 손실을 감소시켜 효율의 향상을 가져왔다. 또한 금속나노입자 형태에서 벗어나 패턴을 가지는 금속을 이용하여 광트랩효과를 극대화하기 위한 연구가 진행되었고, Fig. 6과 같이 요철형태의 금속표면과¹¹⁾ 다공성 형태의 금속표면에¹²⁾ 광촉매를 성장하여 효율향상 및 흡수파장영역의 변화를 관측하였으며, 기존의 나노파티클의 크기에 의한 흡수파장영역 조절에서 벗어나 패턴을 통한 공진주파수 변화를 통해 흡수영역의 조절할 수 있어 광촉매에 최적화된 흡수파장영역을 가지는 광전극 제작에 가능성을 보였다.

플라즈몬 광전극의 두 번째 특성으로 플라즈몬에 의해 여기된 전자가 광촉매로 이동하는 광전현상이다. Fig. 7

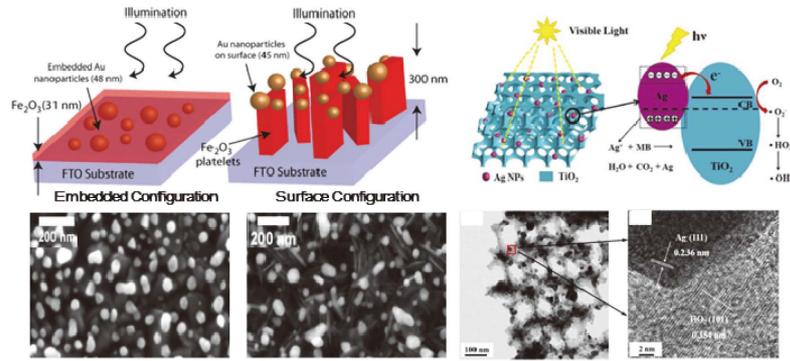


Fig. 5. 나노파티클이 흡착된 플라즈몬 광전극.

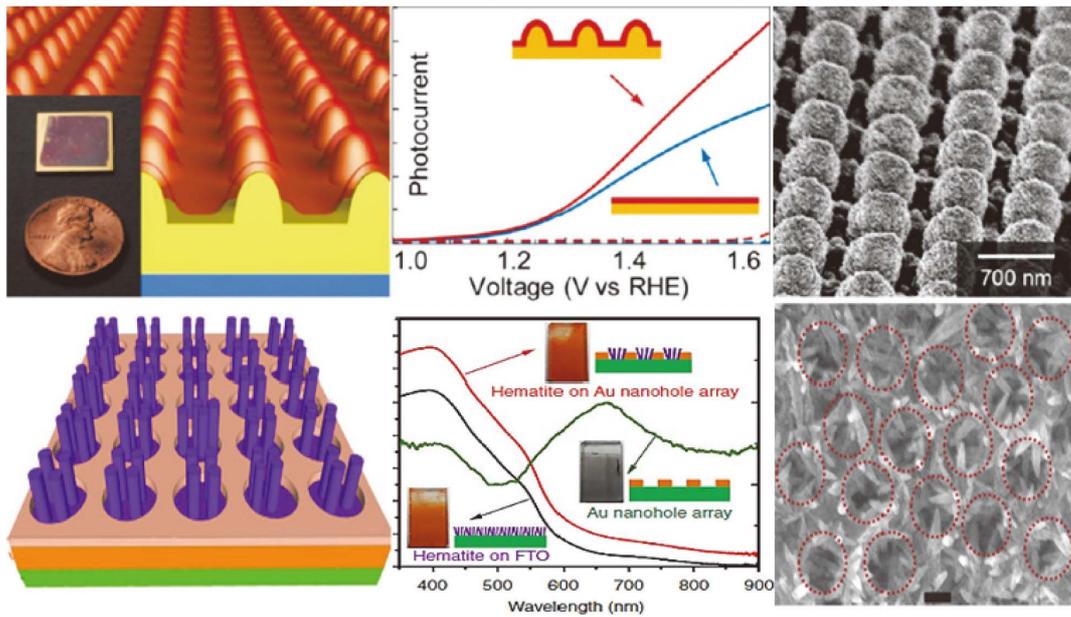


Fig. 6. 패터닝된 금속표면에 광촉매를 성장한 광전극.

과 같이 금속표면에 조사된 광자에 의해 플라즈몬 공기에너지레벨로 여기된 전자는 금속반도체 쇼트키배리어를 (Schottky barrier) 뛰어 넘거나 터널링하여 광촉매내로 이동하게 되고 그 결과 광전류가 발생한다. 이것은 기존의 가시광에서 동작하지 않는 TiO_2 를 가시광에서 인공광합성이 가능하게 하며, 기존에 물질의 제한된 물성을 뛰어넘을 수 있는 방법이다. Fig. 8과 같이 박막형태의 TiO_2 위에 금나노 그물을 형성한 형태¹³⁾, 나노선 혹은 나노가지형태의 TiO_2 광촉매에 금나노입자를 흡착시킨 형태^{14,15)}, 반대로 금나노선에 TiO_2 를 성장한 형태¹⁶⁾ 등 금

속반도체 구조의 플라즈몬 광전극에서 효율의 향상과 가시광에서의 작동하는 특성이 보고되었다. 또한 최근 몇몇 그룹에서 기존의 플라즈몬에 의한 흡수를 더욱 강하게 할 수 있고 플라즈몬의 밀도를 더 높일 수 있는 메타구조 광촉매에 대한 연구 중이다. 플라즈몬에 의한 인공광합성 기술은 기존 광촉매의 가장 큰 문제점인 광전극의 수명과 효율에 있어 새로운 접근방법을 제시하며 단순히 인공광합성뿐 아니라 광촉매의 새로운 응용에 가능성을 보여주었다.

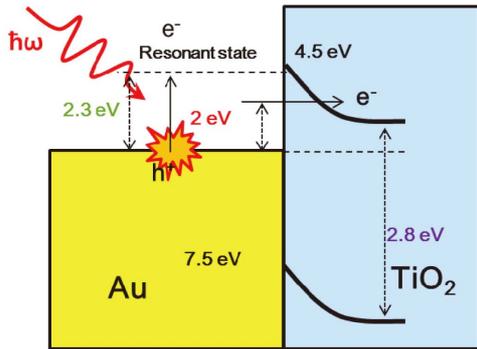


Fig. 7. 플라즈몬에 의해 여기된 전장의 이동으로 인한 광전류.

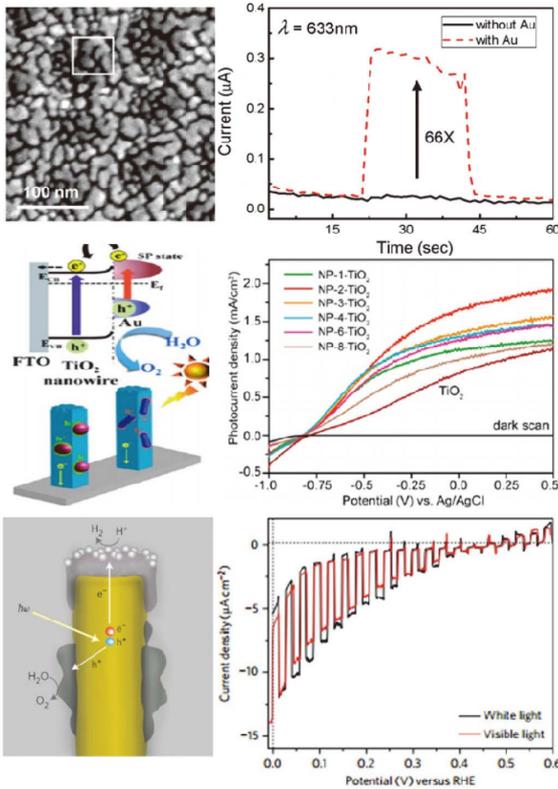


Fig. 8. 금속반도체 구조를 이용한 플라즈몬 인공광합성 기술.

5. 결론

인공광합성은 화석연료에 의존하는 현대문명에 있어 가장 가능성이 높은 대안이다. 새로운 재생에너지뿐만 아니라, 플라스틱, 유기물 비료 등 기존 석유화학공업을 대신할 수 있는 수소화학공업이 가능하다. 하지만 아직

효율과 수명 모두 상용화 하기에는 문제점이 많지만 나노구조체, 광학디자인, 신재료광촉매, 플라즈몬 응용 등 새로운 접근방법과 응용방법이 제안되고 있으며, 지속적으로 발전하고 있다. 또한 인공광합성 기술은 광촉매에 대한 원리의 이해를 통해 수질계산, 공기청정기술, 유기물광분해 등 환경관련기술도 동시에 발전하여 인류에 기여하고 있으며, 인류가 가질 수 있는 가장 큰 에너지원인 태양에너지를 원료로 사용하기에 앞으로 성장 가능성이 높은 기술이다.

참고문헌

1. C. X. Kronawitter, et al., "A Perspective on Solar-driven Water Splitting with All-Oxide Hetero-nanostructures," *Energy Environ. Sci.*, **4** 3889-99 (2011).
2. X Feng, et al., "Rapid Charge Transport in Dye-sensitized Solar Cells Made from Vertically Aligned Single-crystal Rutile TiO₂ Nanowires," *Angew. Chem. Int. Ed.*, **51** 2727-30 (2012).
3. S. Hoang, et al., "Visible Light Driven Photoelectrochemical Water Oxidation on Nitrogen-modified TiO₂ Nanowires," *Nano Lett.*, **12** 26-32 (2011).
4. I. S. Cho, et al., "Branched TiO₂ Nanorods for Photoelectrochemical Hydrogen Production," *Nano Lett.*, **11** 4978-84 (2011).
5. K. Shankar, et al., "Recent Advances in the Use of TiO₂ Nanotube and Nanowire Arrays for Oxidative Photoelectrochemistry," *J. Phys. Chem. C*, **113** 6327-59 (2009).
6. S. Licht, et al., "Efficient Solar Water Splitting, Exemplified by RuO₂-catalyzed AlGaAs/Si Photoelectrolysis," *J. Phys. Chem. B*, **104** 8920-24 (2000).
7. M. J. Kenney, et al., "High-performance Silicon Photoanodes Passivated with Ultrathin Nickel Films for Water Oxidation," *Science*, **342** 836-40 (2013).
8. D. K. Zhong and D. R. Gamelin, "Photoelectrochemical Water Oxidation by Cobalt Catalyst ("Co-Pi")/ α -Fe₂O₃ Composite Photoanodes: Oxygen Evolution and Resolution of a Kinetic Bottleneck," *J. Am. Chem. Soc.*, **132** 4202-07 (2010).
9. S. C. Warren, et al., "Plasmonic Solar Water Splitting," *Energy Environ. Sci.*, **5** 5133-46 (2012).
10. Z. Chen, et al., "Inverse Opal Structured Ag/TiO₂ Plasmonic Photocatalyst Prepared by Pulsed Current Deposition and Its Enhanced Visible Light Photocatalytic Activity," *J. Mater. Chem. A*, **2** 824-32 (2014).



11. H. Gao, et al., "Plasmon-enhanced Photocatalytic Activity of Iron Oxide on Gold Nanopillars," *ACS Nano*, **6** 234-40 (2011).
12. J. Li, et al., "Plasmon-induced Photonic and Energy-transfer Enhancement of Solar Water Splitting by a Hematite Nanorod Array," *Nat. Commun.*, **4** 2651-58(2013).
13. Liu, Zuwei, et al., "Plasmon Resonant Enhancement of Photocatalytic Water Splitting Under Visible Illumination," *Nano Lett.*, **11** 1111-16 (2011).
14. Y. C. Pu, et al., "Au Nanostructure-decorated TiO₂ Nanowires Exhibiting Photoactivity across Entire UV-visible Region for Photoelectrochemical Water Splitting," *Nano Lett.*, **13** 3817-23 (2013).
15. X. Zhang, et al., "3D Branched ZnO Nanowire Arrays Decorated with Plasmonic Au Nanoparticles for High-Performance Photoelectrochemical Water Splitting," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6** 4480-89 (2014).
16. S. Mubeen, et al., "An Autonomous Photosynthetic Device in which All Charge Carriers Derive from Surface Plasmons," *Nat. Nanotechnology*, **8** 247-51 (2013).

●● 박준모



- 2008년 전남대 물리학과 석사
- 2012년 전남대 물리학과 박사
- 2012년 한국광기술원 위촉연구원
- 2013년 울산과학기술대학교 연구원

●● 백정민



- 2006년 포항공대 재료공학과 박사
- 2009년 산타바바라 대학 연구원
- 2010년 금오공과대학교 조교수
- 2013년 울산과학기술대학교 조교수
- 2014년 울산과학기술대학교 부교수