



THEME 05

그린에너지소자 구현을 위한 레이저 공정 개발 현황

고 승 환 | KAIST 기계공학과, 교수 | e-mail : maxko@kaist.ac.kr

이 글에서는 최첨단 레이저 공정이 태양전지, 연료전지, 수소저장 등의 다양한 차세대 청정에너지원 및 에너지 저장장치와 에너지효율이 높은 그린 전기소자의 생산에 적용되고 있는 연구를 소개하고자 한다.

IT 산업의 발전과 정보화 사회로의 변화가 급격해짐에 따라 갈수록 많은 에너지가 요구되고 있다. 그러나 현대사회의 발전과 더불어 전통적 에너지 자원인 석유, 석탄, 천연가스 등의 화석연료가 고갈됨에 따라 이러한 전통적 에너지 자원의 가격은 급등하고 있으며 기후변화협약에 의하여 온실가스를 감축해야 하는 국제적인 압력, 각 국가들의 차세대 신성장동력산업 발굴 등의 문제들이 산재해 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 각 국가들은 차세대 청정에너지 분야에 큰 관심을 보이고 있으며 급변하는 국제환경에 대처하기 위해 다양한 종류의 정책과 연구지원을 투자하여 최근 3~4년 동안 폭발적으로 발전을 거듭하고 있다.

차세대 청정에너지 분야는 크게 세 가지로 나뉘어 신재생 에너지 생성, 에너지 저장 및 효율적 에너지 소비 소자로 구성되며 현재 효율증대와 생산가격의 저감의 두 가지 목표를 만족하기 위해 다양한 연구가 진행되고 있다. 차세대 청정에너지 소자를 구현하기 위해 다양한 전통적인 생산법이 이용되고 있지만 미세 전자소자를 만들기 위해 개발된 기존 공정의 태생적인 한계와 일반적으로 대면적인 에너지 소자에 적용하게 되면 가격이 상승할 수밖에 없는 단점을 안고 있기 때문에 차세대 청정에너지 생산에 적합한 차세대 신공정 개발에 많은 관심이 집중되고 있다. 현재

개발되고 있는 신공정들 중에서 학계 및 산업체에서 첨단 레이저 공정을 가장 유망한 해결책으로 활발한 연구를 진행하고 있으며 현재 일부 공정이지만 기존 에너지 소자 생산에 실제로 이용되고 있으며 조만간 대부분의 공정을 레이저를 이용하여 생산되는 차세대 에너지 소자도 출시될 전망이다.

태양전지 분야 연구

태양전지는 신재생 에너지 분야 중 현재 가장 각광을 받고 있는 분야이다. 태양전지는 실리콘 웨이퍼형의 단결정 1세대, 그리고 박막형의 2세대 및 신개념의 3세대 태양전지로 구분되며 첨단레이저 공정은 모든 세대 태양전지 제조 공정에 적용하려는 연구가 각각 진행되고 있다. 현재 실리콘 태양전지 제조공정에 주로 적용되고 있는 레이저 공정은 그림 1에 나타나 있는 것과 같이, 레이저 스크라이빙, 레이저 증착, 레이저 접합, 레이저 패터닝 등 다양한 분야에 적용되고 있다.

현재 실리콘 태양전지 제조 공정 중 가장 많이 적용되고 있는 레이저 공정이 바로 레이저를 이용한 스크라이빙 공정이다. 태양전지의 효율을 증가시키기 위해서는 전면과 후면 사이의 전자-정공 재결합(recombination) 통로가 만들어지는 것을 방지해야 하

므로 이를 위해 태양전지 가장자리에 깊은 V홈을 만들어서 이 문제를 해결하며 기존에 습식 또는 플라즈마 에칭법을 많이 이용하였다. 하지만 최근에는 이를 레이저 공정으로 바꾸려는 연구가 활발히 진행되고 있으며 1,064nm 파장의 Q-switched Nd:YAG 레이저 소스가 사용되거나 532nm, 355nm 파장의 레이저 등도 스크라이빙을 하기 위한 어블레이션 공정에 이용되고 있다. 레이저 스크라이빙 공정은 1세대 태양전지 뿐만 아니라 2세대 박막형 태양전지의 P1 스크라이빙 공정에도 이용되고 있으며, 특히 CIGS박막형 태양전지의 후면전극인 몰리브덴층을 1,064nm DPSS

또는 파이버 레이저 등으로 스크라이빙하는 연구가 활발히 진행되고 있다. Laser Grooved Buried Contact 을 세계최초로 양산에 도입한 BP Solar는 레이저를 이용한 에지 분리(edge isolation) 기술에 대해서도 많은 연구를 하고 있으며 특히 355nm 레이저를 이용하여 열 영향이 거의 없고 폭이 매우 좁은 홈을 만드는데 연구를 집중하고 있다.

레이저 텍스처링(Laser Texturing)은 태양전지의 표면에서 광반사율을 줄여서 태양전지 내부로 유효광의 흡수량을 증가시킬 목적으로 10 μ m 크기 이내의 피라미드 형상을 웨이퍼 표면에 습식 또는 플라즈마 에칭을 이용하는 방법을 대체하기 위해 펄스형 DPSS레이저를 이용하여 실리콘 표면에 매트릭스 형태의 레이저 가공 홈을 생성하는 공정이다. 레이저 텍스처링 공정은 레이저로 생성되는 홈 또는 무늬의 모양에 따라 그리고 에칭 조건 및 시간에 따라 다양한 형태로 변화될 수 있다.

LRD(Laser Reactive Deposition) 기술은 레이저를 이용한 미립 세라믹과 나노입자를 형성하는 1980년대

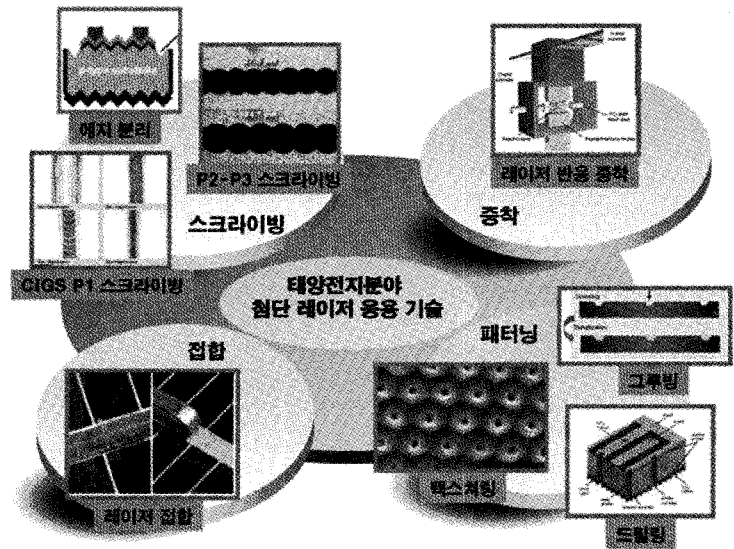


그림 1 1세대 및 2세대 태양전지에 이용되고 있는 첨단 레이저 공정들

연구를 시작으로 1997년 미국의 Nanogram 사는 나노 크기의 재료 및 박막을 제조하는 NPM(NanoParticle Manufacturing) 공정 등에 의해 발전되었다. 10.6 μ m 파장의 CO₂ 레이저가 반응장치를 통과하고 노즐로부터 반응물질들의 흐름에 수직으로 조사되어 열반응을 일으켜 나노입자가 형성되게 된다. NPM의 경우 시간당 10~100그램 정도의 나노재료가 가능하며 나노입자들은 바로 이송되는 웨이퍼와 같은 다양한 기판에 증착하는 기술로 1회에 30 μ m 이상의 두께를 증착할 수 있으며, 다층 박막 형성이 가능하고, 다양한 기판 사용이 가능하여 다양한 박막 태양전지 상용화 기술에 이용될 전망이다.

레이저공정은 태양전지의 광반응 층의 결정성을 높게 만들기 위한 공정개발에도 이용되고 있다. 특히 비정질의 실리콘을 레이저를 열원으로 이용하여 높은 결정성의 실리콘으로 바꾸는 연구가 Columbia 대학의 물리학과 J. Im 교수 그룹에 의해 활발히 진행되고 있다.

레이저 공정은 현재 1,2세대 태양전지 양산뿐만 아

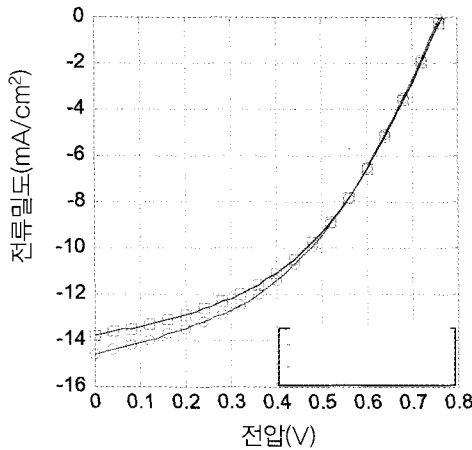


그림 2 레이저 공정을 이용한 유연 염료감응형 태양전지 및 소자 성능

나라 3세대 태양전지분야에서도 이용되고 있다. UC Berkeley의 Grigoropoulos group은 최근 산화금속 나노입자의 레이저 저온 소결법을 개발하여 염료감응형 태양전지를 플라스틱 기판 위에 구현하였다. 나노입자를 이용하는 대표적인 태양전지는 염료감응형 태양전지로 일반적으로 TiO_2 나노입자를 박막형태로 만든 후 $350\sim 450^\circ C$ 의 고온에서 30분 이상 소결하여 나노다공성 구조체를 만들고 염료와 전해질을 침투시켜 완성한다. 그런데 공정이 플라스틱이 견디기 어려운 고온 공정이기 때문에 염료감응형 태양전지를 플라스틱 기판 위에 구현하는 것은 거의 불가능한 공정이었다. 하지만 레이저 소결을 이용하게 되면 앞에서 언급한 플라스틱이 열손상되지 않는 저온 공정을 개발할 수 있기 때문에 고효율 염료감응형 태양전지를 플라스틱 기판 위에 구현할 수 있게 되었다. TiO_2 나노입자를 에어로젯 성막법을 이용하여 플라스틱 기판 위에 적층후에 248nm 파장의 엑시머 나노초 레이저를 이용하여 플라스틱 기판이 손상되지 않고 TiO_2 나노입자만 녹여서 나노 다공성 박막을 만들어서 유연기판 위에 염료감응형 태양전지를 구현하였다. UV 레이저와 에어로젯을 이용하게 되면 플라스틱 기판에 손상을 최소화하면서 최적의 나노다공성 산화금속 박막을 만

들 수 있다. 그림 2는 산화금속 입자의 에어로젯 성막법과 레이저 공정을 이용하여 만든 유연 염료감응형 태양전지를 나타내고 있다. 본 공정을 통해 제작된 염료감응형 태양전지의 효율은 약 3.3%를 나타내었으며 기존 공정에 의해 만들어진 태양전지의 효율($\sim 3.0\%$)에 비해 향상됨을 보여주었다.

연료전지 분야 연구

고체산화물연료전지(SOFC: Solid Oxide Fuel Cell)는 고온의 작동온도, 간단한 구조, 전해질의 손실 및 보충과 부식의 문제가 없으며, 고온에서 작동하기 때문에 귀금속 촉매가 필요하지 않으며, 직접 내부 개질을 통한 연료 공급이 용이하며, 고온의 가스를 배출하기 때문에 폐열을 이용한 열 복합 발전이 가능하다는 장점들을 지니고 있어서 미국, 일본 등 선진국을 중심으로 연구가 활발히 이루어지고 있다. SOFC에서 고안정성 분리막 제조는 매우 중요한 부분을 차지하고 있으며, 우수한 가스 밀봉 능력을 요구하고 또한 전기적으로 절연체의 접합으로 되어 있다. 절연과 실링을 위해서는 고온 가열을 통한 유리 실링이 오늘날 일반적으로 사용되는 기술이며, 이 단계에서 SOFC 문제점이

가장 많이 발생하고 있다. 이러한 문제를 막기 위해서 독일 울리히 연구소는 레이저를 이용한 유리 실링 기술을 개발하였다. 전체 공정 진행과정에서 발생하는 결함들은 레이저에 의해 부분적으로 가열되어 선택적으로 제거될 수 있게 되었으며, 레이저 빔을 이용한 선택적인 가열은 전체로 공정에서 불가능했던 새로운 공정 기술이다. 연구팀은 이번에 레이저를 이용한 유리 실링 기술을 새롭게 개발하여 기존의 유리 실링의 부분적인 파괴가 전체 파괴로 이어지는 것을 막을 수 있게 되었다. 이를 통해 연료전지 실링의 불안정성을 크게 개선할 수 있게 되었다.

수소 저장

대체에너지 중에서 수소 에너지는 지구뿐만 아니라 우주적으로 현존량이 가장 많은 에너지로 알려져 왔으며, 이러한 수소 에너지 활성화를 위하여 무엇보다도 중요한 것이 수소 저장 능력에 관한 것이다. 이러한 수소는 기본적으로 태워서 에너지를 발생하게 될 때 일반적으로 사용하는 가솔린 열량의 세 배에 달하는 열량을 방출한다. 하지만 수소는 폭발의 위험성을 가지고 있기 때문에 저장의 측면에서 많은 상용화하기엔 많은 문제점을 안고 있었다. 이러한 위험성은 모두 가스 형태의 수소가 가지는 것으로 수소를 고체 표면에 고정하여 이용하는 고체 저장 방법을 사용하게 되면 이러한 위험 또한 사라진다. 현재 효과적인 수소 저장을 위해 표면적을 극대화한 금속 수화물 나노구조체를 다양한 화학적 방법에 의해 만들려는 연구가 진행되고 있으며, 첨단레이저를 이용한 펄스 레이저 증착(Pulsed laser deposition) 방법으로 망간 나노입

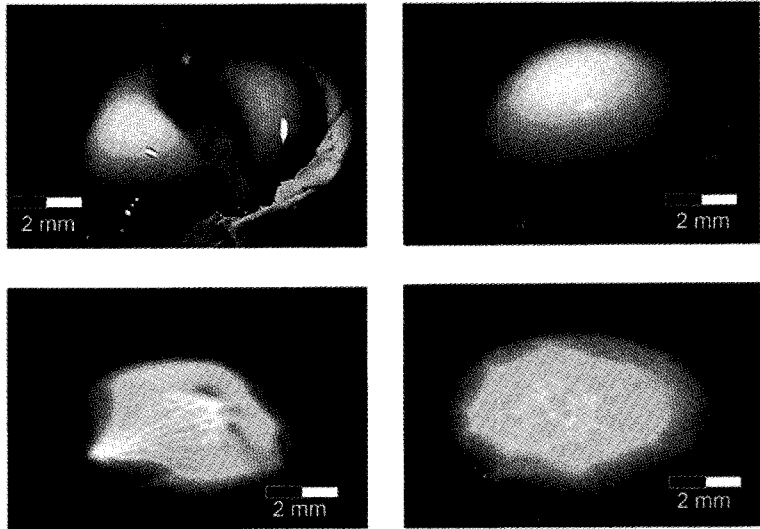


그림 3 국부적 레이저 가열을 통한 연료전지 유리 실링 개선 공정

자를 발생하여 높은 효율의 나노구조체를 구현한 연구가 버클리 국립연구소에서 Dr. Mao가 이끄는 그룹에서 연구되고 있다.

저전력 디스플레이 레이저 생산 공정

그린 에너지 발생 및 에너지 저장뿐만 아니라 에너지를 소모하는 소자도 에너지 효율이 높은 소자를 개발하는 것도 그린 에너지 분야에서 전체적인 에너지 루프를 완성하는 데 중요한 의미를 지닌다. 이러한 높은 에너지 효율의 전기소자를 다양한 레이저 공정을 이용하여 구현하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 디스플레이 분야에서 첨단 레이저들을 이용한 연구가 실제 공정에 적용되고 있다. 디스플레이는 크게 발광부 픽셀들과 각 픽셀에 연결된 트랜지스터 어레이로 구성되며 각각의 부분에 대해 레이저 공정이 개발되고 있다.

첫 번째로 트랜지스터 어레이는 보통 반도체로 많이 이용되고 있는 실리콘 박막에 대해 비정질 실리콘 박막을 전기적 특성을 향상시키기 위해 레이저를 이

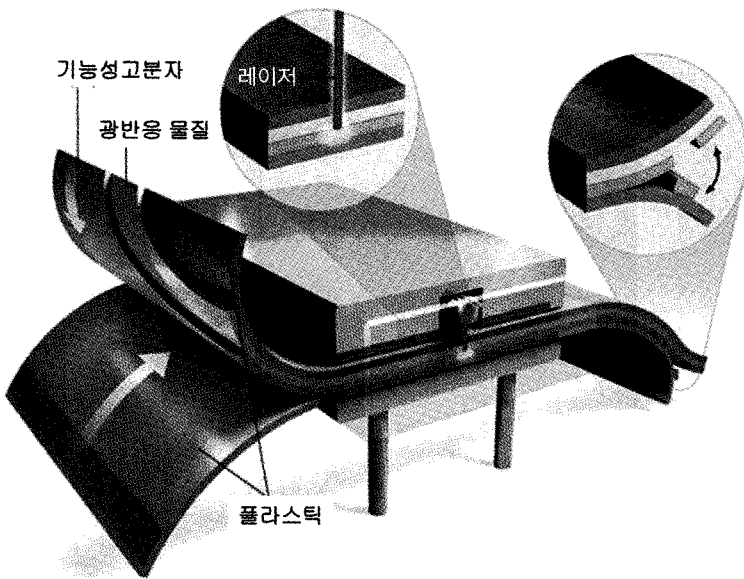


그림 4 레이저 응용 열이미징 공정

용하여 재결정화 시키는 공정이 이용되고 있다. 뿐만 아니라 트랜지스터에 연결된 전극이 잘못 패터닝된 오작동 픽셀을 국부적으로 고칠 수 있도록 피코초 레이저를 이용하는 공정이 개발되어 있으며 현재 실제 공정에서 나오는 버려지는 많은 양의 디스플레이를 다시 이용할 수 있게 하고 있다. 그리고 트랜지스터의 금속 전극을 용액공정으로 성막된 나노입자박막을 레이저를 열원으로 이용하여 낮은 온도에서 직접 패터닝하는 공정도 개발되어 있으며, 특히 나노입자 레이

저 공정은 나노입자의 열역학적 크기 효과에 의해 녹는 점이 낮아지는 현상으로 플라스틱 기판과 같은 열에 취약한 기판 위에 금속 전극 패터닝을 할 수 있는 연구가 수행되고 있다.

두 번째로 디스플레이의 각 픽셀의 발광부를 패터닝하는 공정에 첨단레이저가 이용되고 있으며 특히 유기발광소자분야에서는 양산에 가까운 기술로 다양한 LIFT(Laser Induced Forward Transfer) 기술들이 개발되어 있는 상태이다. LIFT는 미국 Naval Research Lab의 Piqué 그룹에 의해 주로 연구가 되었으며 다양한 유기물, 무기물, 셀 등을 패터닝하고 전달하는 용도로 이용되어

왔다. 대표적인 방법으로 LIFT의 일종인 삼성의 LITI(Laser Induced Thermal Imaging)(그림 4), Sony의 LIPS(Laser Induced Patternwise Sublimation) 등을 들 수 있으며, 이 외에도 자외선 레이저를 이용한 Lipper 그룹의 고분자 광분해를 이용한 LIFT방법과 가시광선 나노초 레이저를 나노입자 층에 조사하여 유기방광소자를 패터닝한 NELT(Nano-material Enabled Laser Transfer) 등이 있다.



기계용어해설

나뭇결(Grain)

수선 방향으로 썬 나뭇결은 바른 평행선으로 나타나고, 연륜절선 가까이 자른 것은 파형의 나뭇결을 나타내는 목재의 나이테.

중력선광법(重力選鑛法; Gravity Concentration)

광물입자를 분리, 선별할 때 광물입자 사이에서 비중의

차이에 따라 입자운동의 크기가 달라지는 현상을 이용하는 것.

중력편석(重力偏析; Gravity Segregation)

응고 이전의 용융금속 중에서 합금 성분의 비중이 다르기 때문에 서냉의 주형공간 상하, 또는 용해용기 속에 생기는 편석.