

1. 개요

최근 글로벌 경제위기 및 태양광전지 시장의 급격한 시황변동으로 인한 사업 환경 악화에 따라 태양전지 관련한 국내외 기업의 투자결정 시점과 대비해 최근 사업 수익성이 현저히 악화될 것으로 예상되고 있다. 실제로 국내 K사는 폴리실리콘 공장가동을 최근 중단하였으며, L사 및 S사는 당초 예정하였던 투자계획을 철회하였다. 반면 H사 등은 당초 계획대로 폴리 실리콘 재료에 대한 생산 투자를 진행할 방침으로 보도됐다. 한편 당분간 관련된 분야 시장이 공급과잉에 의한 사업성이 현저히 악화 되겠지만, 고효율의 박막형 태양전지에 대한 요구는 꾸준히 증대할 것으로 기대된다. 세계적으로 박막형 PV 효율 향상을 위한 연구개발은 지속적으로 진행되고 있다. 예를 들어 2010년 7월 독일의 ZWS사는 0.5 cm² 크

하여서는 고순도 재료 개발/생산 및 관련 부품소재와 생산 공정장비 요소기술 및 관련 인프라 등 전방위적으로 전부분이 다 같이 노력 발전함으로써 고효율 태양광전지의 일관생산체계 구축에 의한 태양광전지 생산의 수직계열화가 시급한 실정이다.

한편 박막형 태양전지의 경우, 그림 1에서 보여주는 바와 같이 각각의 cell들이 직렬로 연결된 특징을 갖고 있으므로 가장 낮은 특성을 갖는 cell의 특성에 의하여 전체 모듈의 특성이 결정된다. 따라서 태양전지 모듈의 산업 생산성 및 경쟁력 확보에서 패터닝을 위한 공정 장비의 성능이 전체 PV 모듈의 효율에 미치는 영향이 매우 크다. 즉 high-performance 공정 기술 및 공정장비가 전체 관련 산업분야에서 차지하는 중요도가 매우 높은 특징이 있다. 특히 이러한 현상은 표 1에서 보여주는 바와 같이 기존의 결정형 및 박막형 구조의 photovoltaic

특집 ■ 태양광 기술

초고속레이저의 박막형 태양전지 미세패터닝 활용

정세채*

기의 박막형 태양전지 일종인 CIGS (Cu(In,Ga)Se₂) 형태의 박막형 태양광전지의 효율을 20.3% 달성하였음을 발표하였다.(www.zsw-bw.de,) 이는 기존의 bulk Si의 Polycrystalline Solar Cell의 효율(약 20.3%)과 거의 동등한 효율로서 CIGS를 이용한 thin-film 기반 Solar Cell의 향후 개발 동향 및 관련 산업계의 발전 방향에 많은 영향을 미칠 것이 확실하다. 이는 또한 2008년도 미국의 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서 발표한 최고치인 19.9%를 크게 상회하는 것이다¹⁾. 한편 국내의 산업내외적인 어려움을 극복하고 관련된 박막형 태양광 산업 전 부분이 발전하기 위

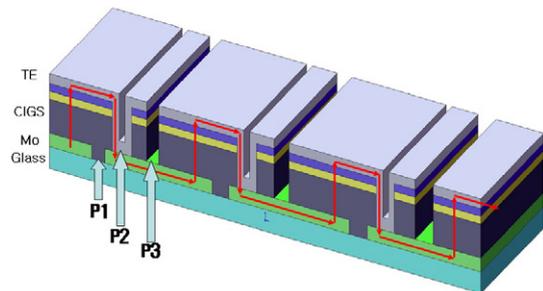


그림 1. Cross-sectional view for thin-film CIGS Solar-cell and its electrical flow direction (red arrows) and structural and positions of P1, P2 P3 patterns

* 한국표준과학연구원 미래융합기술본부

초고속레이저의 박막형 태양전지 미세패턴닝 활용

표 1. Comparison of world recorded efficiency between Bulk-Si and thin film types of solar cell modules

		Max. Efficiency (%)		Ratio (Ind./Lab.)
		Lab.	Industrial	
Bulk Si	Single	24.3	19.5	0.79
	Poly	20.3	16.5	0.82
Thin film	a-Si	12.1	8	0.66
	CIGS	20.3	14.3	0.70
	CdTe	16.5	11	0.67

cell에 대한 실험실 및 양산에서 발표된 최고의 효율의 비교에서 더욱 분명하다. 즉, 실험실 수준의 최고 효율에 대한 상용 module의 광전환 효율의 비는 결정형의 경우 약 80% 정도이나 박막형의 경우에는 70%가 안 되는 수준이다. 그 이유를 살펴보면 Lab scale에서는 공정 단계 중 interconnection을 위한 패터닝을 photolithography 과정을 통하여 module을 제작함으로써 효율을 극대화 하였다. 그러나 이러한 고품위 미세공정기술은 그 특성상 태양전지분야에서 연구개발 단계에서는 적용이 가능한 공정기술이지만 실제 가격경쟁력을 갖춘 PV 모듈의 양산 단계에서의 적용은 많은 제한 요소가 있다. 따라서 향후 태양광 전지분야 산업에서의 경쟁력 확보 특히 공정의 정밀도 및 신뢰성을 혁신적으로 향상할 수 있는가에 그 기술의 key가 있음을 알 수 있다.

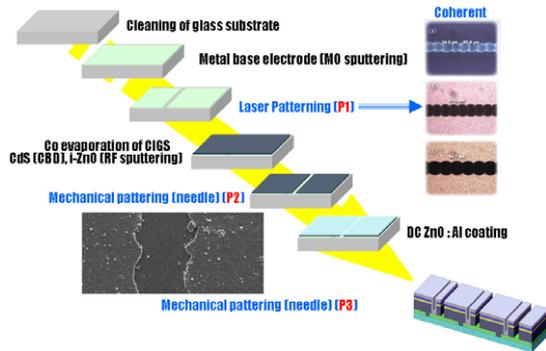


그림 2. Schematic diagram for mass production of CIGS thin-film solar cells adapted in Würth

2. 박막형 태양전지의 패터닝 공정 개괄

그림 2는 CIGS 태양전지 모듈 양산시 적용되는 제작과정의 한 예를 보여주고 있다. 세척된 glass wafer상에 Mo와 같은 금속 film을 증착하여 후면 전극을 형성한 후, 레이저를 이용하여 각각의 분리된 전극을 패턴하게 된다. 주된 광 흡수층인 CIGS 박막은 약 2 μm의 두께로 Co-evaporation과 Selenization 과정을 통하여 제작된다. Buffer layer로써 CdS는 및 i-ZnO layer는 CVD 혹은 RF-sputtering으로 제작된다. 상판 전극을 도포하기 전에 상판 전극과 후면 전극과의 전기적인 통로를 제작하기 위하여 반드시 Mo를 제외한 CIGS층을 선택적으로 제거하여야 하는 바 이를 일반적으로 P2 patterning이라고 한다. P2 patterning 후에 투명전극(Transparent conductive oxide, TCO)를 증착한 후 각각의 solar cell의 분리 공정에 해당하는 P3 patterning을 하는데 이때에도 반드시 Mo를 제외한 multi-layer 구조를 선택적으로 제거하여야 한다.

이러한 적층된 박막의 scribing 혹은 patterning을 위하여 이용되는 방법은 크게 액체상 혹은 기상에서의 화학적인 식각법, 집속된 하전 입자를 이용하는 방법과 기계적 공정 및 레이저 유발 ablation을 이용하는 방법 등이 있다. 한편 식각 및 하전입자 방법은 그 공정의 정밀도는 매우 높으나 공정을 수행하기 위하여 매우 복잡한 단계를 거치거나 진공과 같은 고가의 부가장치가 필수적이다. 또한 적용 재료의 특성에 매우 특이적이며, 특히 생산성에서 매우 취약하다. 따라서 태양광전지 웨이퍼 사이즈의 대형화 추세 및 식각용 재료의 독성 등을 고려

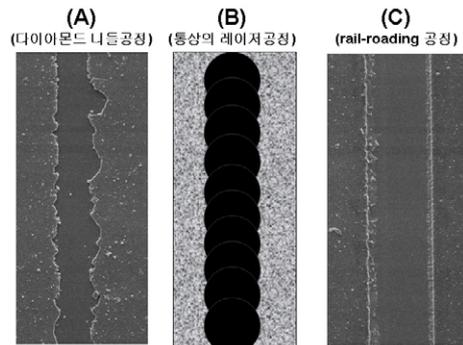
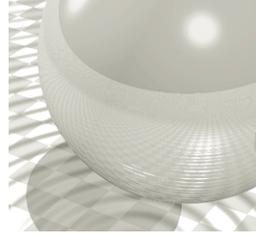


그림 3. 박막형 CIGS Solar cell patterning 후의 표면 이미지. (A)기계적 공정의 한 방법인 다이몬드 needle을 이용하여 긁었을 때, (B) 기존의 레이저 어블레이션 공정후의 모식 pattern 및 (C) fs-laser rail-roading 기술을 통한 공정 후 표면 SEM 이미지.



할 때 향후 양산 적용에 한계가 있다고 판단된다. 반면 기계적인 공정법은 비교적 높은 생산성을 갖고 있다. 그러나 적용 대상이 박형의 경우에 기계적인 충격으로 인하여 발생하는 다양한 손상으로 인하여 그 적용이 제한적이며, 톱날 혹은 칩형 구조물의 물리적인 크기를 대략 40 μm 이하로 낮추는 데 그 한계가 있다. 더욱 중요한 사항은 박막의 물리적-기계적 특성이 brittle한 경우 공정 상에 chipping 현상을 극복할 수가 없으며, 또한 적층된 박막과 하부 웨이퍼간의 접착력이 기계공정에서 부가되는 토크에 비하여 작은 경우 박막의 delamination 현상을 극복하지 못한다. (그림 3(A) 참조)

한편 레이저 기반 패턴 방법은 이상에서 논의한 타 공정 기술이 갖고 있는 취약점을 극복하여 박막형 태양전지 모듈 양산시 미세 패턴에 활용될 수 있을 것으로 기대되어 많은 연구개발이 시도되었다. 이는 레이저 공정이 기존의 기계적인 공정에 비하여 다음과 같은 장점을 갖고 있기 때문이다. 첫째 소모성 부품을 사용하지 않기 때문에 시간에 따라 공정의 품질이 매우 안정적이라는 점이다. 둘째는 레이저 공정은 비접촉 공정이므로 기계적인 stress에 따른 bulk microcrack의 형성이나 재료의 강도 감소 등을 공정 대상물에 남기지 않는다. 셋째는 레이저 공정은 높은 공정 속도에서도 매우 높은 공정 정밀도 및 매우 작은 공정 선폭을 가능하게 한다. 그렇지만 기존의 비교적 긴 펄스의 레이저를 이용한 pattern 공정에서 CIGS 층을 포함하는 P2 및 P3 공정에서 groove의 양 edge에 발생하는 물리화학적 변형된 CIGS가 각각의 cell들 간의 전기적인 short-circuiting이나 shunting 현상을 유발하거나 groove 간에 상당한 수준의 찌꺼기가 남아 이들의 모듈전체의 효율에 미치는 영향에 대한 논의가 매우 진지하게 다루어지고 있다.²⁾ 또한 이러한 찌꺼기에 대한 논의는 특히 shunt resistance를 낮출 수 있으므로 그 중요성이 매우 크다. 실제로 P.M. Harrison 등은 레이저 스팟 사이에 분명하게 보이는 선들이 이전 펄스 스팟 영역에서의 높은 기판 온도에 의하여 다음번 펄스에 의하여 발생한 plum 혹은 기상화된 물질이 re-deposition하여 stitch line이 발생한다는 보고한 바 있다.³⁾ 열적 손상을 최소화하고자 최근에는 fs- 혹은 ps 레이저를 이용한 thin-film의 선택적인 제거에 따른 패턴링을 하고자 하는 시도가 있으나 이들 또한 직접적인 조사 방법에 의한 패턴링만을 함으로써 나노초 혹은

은 그 이상의 열적 변환과정에 기반하는 기존의 레이저 공정에 비하여 충분한 생산성을 확보할 수 있는 획기적인 기술적인 진보를 이룩하지는 못하고 있다.⁴⁾⁵⁾⁶⁾ (그림 3(B) 참조)

3. 초고속레이저 'rail-roading' 공정 원리의 박막형 태양전지 패턴링 활용.

본 연구실에서의 최근에 펨토초 레이저를 기반으로 하는 다중선로 미세 패턴링 (fs laser "rail-roading" micro-machining) 기술을 고안 발표한바있다.⁷⁾ 제안된 공정기술은 기존의 펨토초레이저가 갖고 있는 낮은 생산성을 극복하면서도 매우 높은 공정정밀도 및 열적 기계적인 손상을 최소화 할 수 있는 특성을 유지할 수 있는 새로운 레이저 공정 원리에 기반한다. 이를 간략히 설명하자면, 일정한 간격으로 서로 이격된 2개 이상의 펨토초 레이저 빔을 공정 대상물의 표면에 패턴 형상에 상응하도록 조사하여 2 중 레이저 빔 선로를 발생한다. 이때 형성된 다중 선로의 내측부가 패턴 형성 과정에서 발생하는 충격파 에너지에 의해 자발적으로 lift-off되어 원하는 패턴이 형성되도록 하는 것이다. (그림 4 참조). 이를 상세히 살펴보면 가공 대상물에 레이저를 조사할 때, 레이저가 직접 조사된 영역에서는, 최초에는 선형 혹은 비선형적인 레이저 흡수가 일어난다. 이와 같이 흡수된 레이저 에너지는 물질 내에서 자유운반자를 발생시키게 된다. 이 때 발생된 자유 운반자 밀도가 어느 정도 이상

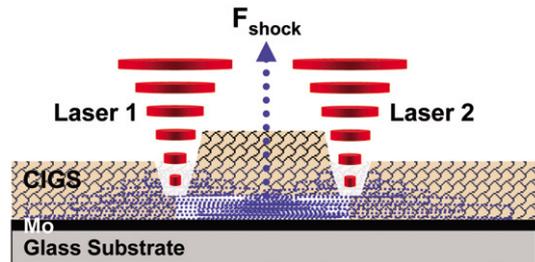


그림 4. Schematics of the model to describe the laser 'rail-roading' scribing method. The two laser beams are simultaneously exposed to the CIGS films. The external force applied by each laser exposure is highlighted by blue dotted lines.

초고속레이저의 박막형 태양전지 미세패턴닝 활용

이 되면 물질의 실질적인 ablation이 일어나게 되는데, 이러한 현상이 두 다른 레이저 빔 선에서 동시에 일어남으로써 미시적으로 보아 박막의 타 영역으로부터 분리되도록 하게 된다. 한편 레이저를 집속하였을 경우, 가공 대상물이 레이저를 흡수함에 따라 발생하는 실질적인 ablation 현상과 더불어, 레이저에 의해 유발되는 compressive force가 동시에 일어나게 된다. 이 때 발생하는 힘은 물질 내부에서 최초 레이저 빔 조사 방향으로 발생하나, 공정 대상물이 층상으로 박막이 적층 형성된 형태로 이루어져 있는 경우, 이 충격파는 경계면에서 reflection하며 궁극적으로 박막에 tensile force 형태로 영향을 미치게 된다. 이때 박막에 가하는 힘의 합이 다중 선로 내측부에 위치하는 박막의 총면적이 갖고 있는 하부 layer와의 adhesion force보다 커지면, 다중 선로 내측부의 박막이 자연스럽게 효과적으로 lift-off될 수 있게 되는 것이다. 그림 3(C)는 fs-laser "Rail-Roading" 기술을 이용하여 CIGS PV에 패턴된 channel의 SEM 이미지를 보여주고 있다. 특히 선로 내측부 영역은 직접 레이저의 에너지에 영향을 받지 않으므로써 기존 레이저 ablation에 의하여 형성되는 groove와는 달리 물리 화학적으로 변형이 전혀 일어나지 않는 특성을 갖고 있음을 표면 분석방법을 통하여 확인하였다.

4. 향후 레이저 기반 미세 패턴닝 기술개발 동향

마지막으로 향후 PV 양산에서 적용 가능한 레이저 패턴닝 공정 기술이 극복하여야 하는 기술적인 문제점에 대한 분석결과를 그림 5에 도시하였다. 이는 표 2에서 보는 바와 같은 각각의 패턴 종류별 가능한 변화 특성과 이에 따른 이슈들을 해결하며 동시에 양산 적용시 필수적인

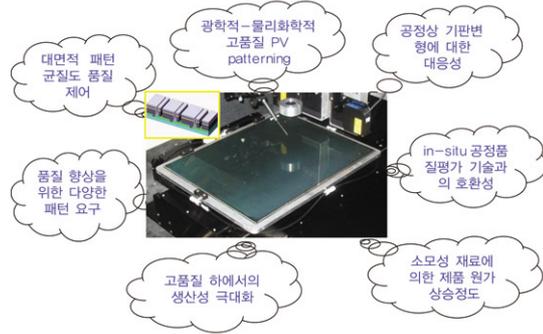
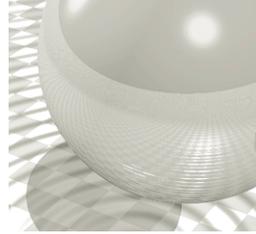


그림 5. Issues related on the micro-patterning process applicable to PV module mass production.

내용들을 정리하여 보여주고 있다. 이를 항목별로 살펴 보면 대면적 PV 모듈 양산 공정에서 발생하는, 박막의 기계적-화학적-물리적 특성의 공간적 변화에 대응하며 micrometer 급의 pattern 정밀도를 확보 가능하도록 대면적에서의 품질 제어가 가능한 공정기술이 개발되어야 한다는 것이다. 다음은 패턴 공정상 부가된 기계적인 stress에 따른 microcrack의 형성이나 재료의 강도 감소 등을 공정부산물의 표면잔류 및 layer간 전기적인 특성에 대응할 수 있는 고품질 PV 패턴닝 기술이어야 한다. PV cell의 가격적인 측면에서의 국제적인 경쟁력 확보를 위하여 채택할 재료, 예를 들어 유리 기판의 재료 변화에 따른 PV 모듈의 물리적인 변형의 정도에 대응 가능한 기술이어야 하며, 양산과정에서 공정 부품의 마모 및 불량으로 인하여 교체 시 발생하는 생산성 저하 및 인건비 추가 가능성을 최소화 할 수 있는 기술이 개발되어야 한다. 또한 패턴닝 자체 선폭 및 간격이 박막의 특성에 의하여 제어가 필요할 경우 수정보안에 능동적으로 대응할 수 있는 패턴닝 기술이어야 한다. 양산적용이 가능한 고품질 pattern을 유지하며 생산성이 극대화된 기술이 필요

표 2. Pattern의 종류별 가능한 공정 품질 변화 및 이에 따른 issue 분석

Pattern 종류	변화 특성	Issue
P1	Leakage current	Imperfect isolation of Mo electrode
P2	IR loss	CIGS 층의 완전한 제거를 하지 못하여 발생하는 Contact 저항
P3	Leakage current	cell 간의 imperfect isolation
P1-P2-P3	efficiency	pattern시 발생하는 넓은 선폭
P1-P2-P3	losslow reliability	대면적에서의 패턴 공정의 non-uniformity



하며 가능한 공정 단계를 최소화할 수 있는 혁신적인 patterning 기술이 개발되기를 기대한다. 마지막으로 미세구조상에 발생하는 pattern의 변화가 전체 PV 품질과의 직접비교 가능한 정도의 공정의 품질 평가가 대면적-고속pattern 하에서 가능하도록 in-situ 공정품질평가 기술과의 호환성이 가능하도록 고안된 기술이 필요하다. 특히 공정 정밀도 중 in-situ 모니터링을 할 수 있는 평가 기술 및 이를 장비화 할 수 있는 요소기술의 확보는 새롭게 개발될 레이저 기반 패터닝 기술의 성공적인 실용화 및 산업화에 선결과제이다. 이러한 기술 개발이 성공적으로 이루어지는 경우 국내에서 자생적으로 개발된 원천 기술을 통하여 국내 산업계의 경쟁력 확보를 위한 기술적인 진보가 조속한 시일 안에 이루어질 것이다.

참고문헌

- 1) I. Repins, et al, Prog. Photovolt: Res. Appl. 16, 235 2008.
- 2) D. Butler, "Thin films: ready for their close-up?" Nature 454, 558 2008.
- 3) P.M. Harrison, N. Hay, and D. P. Hand, Appl. Surf. Sci. 256, 7726 2010.
- 4) D. Ruthe, K. Zimmer, and T. Hoche, Appl. Surf. Sci. 247, 447 2005.
- 5) P. Geččys, et al, Phys. Proc. 12, 141 2011.
- 6) M. Park, et al., Optics and Lasers in Engineering, 44, 138 2006.
- 7) S. C. Jeoung et al, Optics Express, 19, 16730 2011.

약 력



정세채

1986년 서울대학교 화학과 학사
 1988년 서울대학교 화학과 석사
 1992년 서울대학교 화학과 박사
 1992년-현재 한국표준과학연구원 책임연구원
 1997-1998 분자과학연구소(일본) invited Scientist

관심분야

- 펄초레이저 기반 정밀 측정기술 및 초미세공정 기술
- 레이저 및 광기반 의료기기 개발 및 평가기술