

# 대면적 박막 태양전지 적용을 위한 CdTe 박막의 화학적기계적연마 공정 특성

논 문

58-6-14

## Chemical Mechanical Polishing Characteristics of CdTe Thin Films for Application to Large-area Thin Film Solar Cell

양 정 태\* · 신 상 현\*\* · 이 우 선†

(Jung Tae Yang · Sang-Hun Shin · Woo-Sun Lee)

**Abstract** - Cadmium telluride (CdTe) is one of the most attractive photovoltaic materials due to its low cost, high efficiency and stable performance in physical, optical and electronic properties. Few researches on the influences of uniform surface on the photovoltaic characteristics in large-area CdTe solar cell were not reported. As the preceding study of the effects of thickness-uniformity on the photovoltaic characteristics for the large-area CdTe thin film solar cell, chemical mechanical polishing (CMP) process was investigated for an enhancement of thickness-uniformity. Removal rate of CdTe thin film was 3160 nm/min of the maximum value at the 200 gf/cm<sup>2</sup> of down force (pressure) and 60 rpm of table speed (velocity). The removal rate of CdTe thin film was more affected by the down force than the table speed which is the two main factors directly influencing on the removal rate in CMP process. RMS roughness and peak-to-valley roughness of CdTe thin film after CMP process were improved to 96.68% and 85.55%, respectively. The optimum process condition was estimated by 100 gf/cm<sup>2</sup> of down force and 60 rpm of table speed with the consideration of good removal uniformity about 5.0% as well as excellent surface roughness for the large-area CdTe solar cell.

**Key Words** : CdTe, Large-area Thin Film Solar Cell, Chemical Mechanical Polishing (CMP)

### 1. 서 론

최근 '저탄소, 녹색성장'을 구현하기 위하여 청정에너지 기술의 연구가 활발히 진행되어지고 있다. 특히 태양 에너지는 무한정, 무공해 및 저비용 대체 에너지로서 집중적인 주목을 받고 있다. 태양 전지는 광기전력 효과를 이용하여 태양광 에너지를 전기 에너지로 변환시켜주며, 실용화를 위해서는 단위 면적당 발전 효율을 증가시키는 문제와 단위 면적당 제조 단가를 감소시키는 두 가지 경제성 문제를 해결해야만 환경 친화적 에너지원으로 활용 가능할 것이다[1].

현재 태양 전지 시장은 복잡한 제조 공정과 높은 가격에도 불구하고 실리콘을 이용한 태양 전지가 전체 생산량의 99%를 차지하고 있다[2,3]. 따라서 경제성 향상을 위해서는 기존 실리콘 태양 전지의 효율을 상회할 수 있는 태양 전지 재료 및 제조 공정 개선을 통한 저가의 고효율 및 고신뢰도 태양 전지의 개발이 필요한 현실이다[4,5]. 최근 저가의 고효율 태양 전지 구현을 위한 박막 태양 전지에 대한 연구가 집중되고 있으며, 비정질 실리콘(a-Si), 다결정 실리콘(p-Si), I-III-VI<sub>2</sub>족 화합물인 CIGS(CuInGaSe<sub>2</sub>), II-VI족 화합물인 CdTe 등의 재료를 활용한 태양 전지에 대한 연구가

폭넓게 진행되고 있다[4,6]. 특히 CdTe 박막 태양 전지는 직접 천이형 에너지 밴드갭(1.45 eV)을 가지고 있고, 광흡수 계수가  $1 \times 10^5 \text{cm}^{-1}$ 로 반도체 중에서 가장 높아서 수  $\mu\text{m}$  이하의 박막으로도 고효율의 태양 전지 제작이 가능하고, 전기광학적 안정성이 매우 우수한 특성을 지니고 있다[6-8]. 하지만 CdTe 박막을 활용한 대면적 태양 전지 제작을 위한 연구는 초기 단계에 머무르고 있으며[8], 대면적 박막 증착에 의해 발생할 수 있는 박막 두께의 균일도가 대면적 박막 태양 전지 특성에 미치는 영향과 관련한 보고가 극히 적다[9].

따라서 본 연구에서는 화학적기계적연마(chemical mechanical polishing, CMP) 공정을 적용하여 CdTe 박막의 대면적 증착 후 박막 두께 균일도를 향상시키고자 선행연구로서 CdTe 박막의 화학적기계적연마 공정 특성을 조사하였다. 화학적기계적연마 공정은 연마 패드(pad) 위에 슬러리(slurry)입자를 공급하며 캐리어에 하중(down force)을 가하며 가공물의 표면을 연마하는 방법으로, 가공물을 탄성패드에 누르면서 상대 운동시켜 가공물과 친화력이 우수한 부식액으로 화학적 제거를 함과 동시에 초미립자로 기계적 제거를 하는 것이다[10,11].

본 연구에서는 화학적기계적연마 공정 변수 중에 가장 큰 영향을 미치는 변수로 알려진 테이블 속도(table speed)와 캐리어 하중 압력에 의한 CdTe 박막의 연마율(removal rate, RR), 연마 비균일도(non-uniformity, WIWNU%) 및 표면 특성(surface morphology) 등의 특성을 조사하고 모델링하고자 한다.

† 교신저자, 정회원 : 조선대 공대 전기공학과 교수 · 공바  
E-mail : wslee@chosun.ac.kr

\* 정 회원 : 한국폴리텍V대 금제캠퍼스 전기학과 부교수

\*\* 정 회원 : 조선대 공대 전기공학과 박사수료

접수일자 : 2009년 5월 6일

최종완료 : 2009년 5월 18일

## 2. 실험

본 실험에서는 광특성 등을 측정하지 않고 화학적기계적 연마 특성만을 측정하기 때문에 모든 실험은 표면이 평탄화 처리된 2×2 cm 크기의 실리콘 웨이퍼를 기판으로 사용하였다. 일반적으로 CdTe 박막의 제작 방법으로는 스크린 프린팅법(screen printing), 스프레이법(spraying), 전해석출법(electrodeposition), 스퍼터링법(sputtering), 근접승화법(close-spaced sublimation) 등이 있다[4,12]. 특히 스퍼터링법은 박막 제조에 있어서 성분 제어가 용이하고 박막 제조의 속도가 빠르기 때문에 양산화에 적합하며, 증착 온도를 낮출 수 있는 장점이 있다[9,13]. 본 실험에서는 RF 마그네트론 스퍼터링 시스템(Vacuum Science Co.)을 이용하여 증착하였다. 원료 물질로는 2인치 크기의 CdTe 타겟(LTS Chemical Inc., USA, 99,999%)을 사용하였다. 증착을 위한 스퍼터링 조건은 source power 50 Watt, 진공  $7.5 \times 10^{-3}$  Torr, 기판온도는 상온에서 20분간 증착하였다. 화학적기계적 연마 공정 수행을 위하여 두껍게 증착한 시료의 평균 두께는  $6.833 \mu\text{m}$ 이고 표준편차는 13.756%이며, 평균 증착률은 341.67 nm/min이었다. 모든 연마 공정은 G&P Technology사의 POLI-380 장비로 진행하였다[14]. 공정 조건은 DOE(design of experiments) 방법을 사용하여 최적 조건을 산출하였으며[15], 헤드 속도는 50 rpm, 슬러리의 유속은 90 ml/min으로 설정하여 30초 동안 연마를 진행하였다. 공정조건에 따른 연마율, 연마 비균일도 및 표면 특성을 조사하기 위하여 테이블 속도는 20, 40, 60 rpm, 헤드 압력은 100, 200, 300 gf/cm<sup>2</sup>으로 변화시키며 실험을 진행하였다[14]. 연마 패드는 Rohm and Haas Electronic Materials사의 IC-1400을 사용하였다[14]. 패드 컨디셔닝 압력은 2 kgf/cm<sup>2</sup>으로 고정하였고, 연마 패드는 교체 없이 사용하였다. 슬러리는 실리카 슬러리(SiO<sub>2</sub>-based slurry)를 사용하였다[14]. 슬러리의 에이징 현상을 방지하기 위하여 연마 전에 Sonic Tech사의 초음파 교반기로 충분히 교반시켜 주었다. CMP 공정 후 웨이퍼 세정은 3분 동안 NH<sub>4</sub>OH:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O를 1:2:7의 비율로 제조된 SC-1 용액에서 3분간, 1:10의 DHF 용액에서 2분, 마지막으로 초음파 세척기를 이용하여 4분 동안 세척하였다. 연마 전후의 CdTe 박막 두께 및 연마 비균일도를 측정하기 위하여 FESEM(field emission scanning electron microscope, Hitachi S-4700)을 사용하여 7점을 측정하였고, 표면 형상 측정을 위하여 AFM(atomic force microscopy, PSIA XE-100)을 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

화학적기계적 연마 공정에 의한 CdTe 박막의 연마율을 캐리어 하중 압력 및 테이블 속도에 따라 측정하여 그림 1에 나타내었다. CdTe 박막의 최고 연마율은 300 gf/cm<sup>2</sup> 및 60 rpm에서 약 3160 nm/min으로 나타났다. 화학적기계적 연마 공정에 있어서 연마율과 관련하여 보편적으로 적용되어지는 프리스톤 방정식(Preston's Equation)은 연마율이 압력과 속도에 선형적인 증가를 한다고 알려져 있다[16]. 하지만 실제 실험 결과는 선형적인 결과를 나타내지 않았다. J. Hernandez 등은 프리스톤 방정식을 일반적인 형태인 식 (1)과 같이 제안하였다[17].

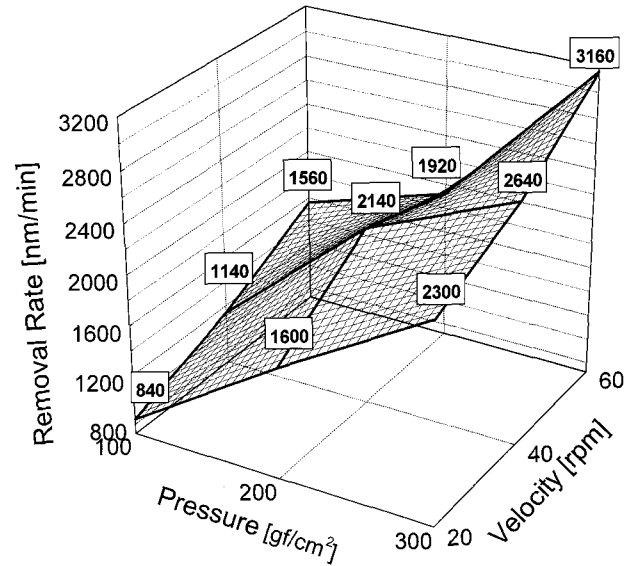


그림 1 압력 및 속도 변화에 의한 CdTe 박막의 연마율.  
Fig. 1 Removal rate of CdTe thin film polished with changes of pressure and velocity.

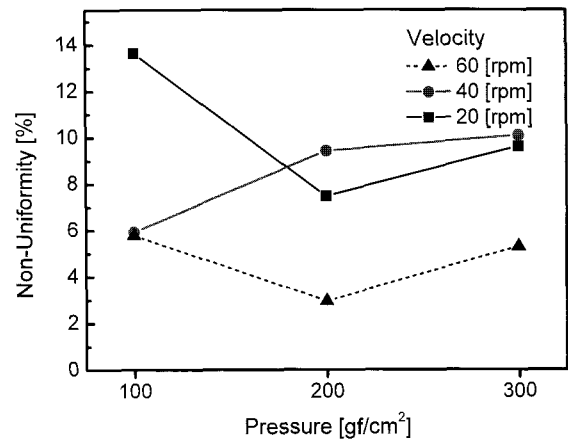


그림 2 압력 및 속도 변화에 의한 CdTe 박막의 연마 비균일도.  
Fig. 2 Non-Uniformity of CdTe thin film polished with changes of pressure and velocity.

$$RR = k p^a v^b \quad (1)$$

식 (1)에서 RR은 연마율을 p는 압력을 v는 속도를 의미하고, 프리스톤 계수 k는 압력과 속도에 독립적인 비례함수로서 패드, 슬러리, 연마 대상 재료 등에 의해 결정되며 본 실험에서는 고정되었다[17]. 따라서 지수 a 및 b는 압력과 속도가 연마율에 미치는 영향의 정도를 나타내게 된다. 실험 결과를 반영 시  $a=0.789 \pm 0.162$  및  $b=0.336 \pm 0.146$ 을 가지는 것으로 분석되었으며, CdTe의 연마율은 속도보다 압력에 더욱 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 다만 편차가 다소 큰 것은 향후 조밀한 공정 변수 스플릿으로 반복 실험을 통해서 개선해 나아갈 수 있을 것으로 기대된다.

화학적기계적연마 공정에 의한 CdTe 박막의 연마 비균일도(WIWNУ%)를 FESEM을 활용하여 7점의 두께 측정을 통하여 분석하였다. 화학적기계적연마 공정을 수행하기 이전의 증착 직후 CdTe 박막 두께의 표준편차는 13.756%으로 매우 비균일한 표면 특성을 나타내었다. 그림 2에서와 같이 화학적기계적연마 공정을 수행한 후에는 모든 시편에서 WIWNУ% 연마 비균일도가 증착 직후의 박막 두께 표준편차보다 개선되어졌음을 확인할 수 있다. 연마 비균일도 특성은 화학적기계적연마 공정의 압력 변화에는 뚜렷한 경향성을 보이지는 않고, 연마 속도가 증가할 경우에 균일한 표면 특성을 확보할 수 있음을 볼 수 있으며, 60 rpm의 속도로 연마한 경우에는 압력에 관계없이 모두 5.0% 내외의 우수한 연마 비균일도 특성을 나타내었다. 특히 200 gf/cm<sup>2</sup>의 압력에 60 rpm의 속도로 연마한 경우에 2.944%로 가장 우수한 특성을 나타내었다. 본 실험에서도 사용한 IC-1400 연마 패드를 사용하여 산화막(SiO<sub>2</sub>)을 화학적기계적연마 공정 수행한 경우에 압력이 감소할수록 또한 속도가 증가할수록 연마 균일도가 향상되는 경향성을 보인다는 보고가 있었고 [18], 본 연구자의 선행 연구에서 역시 동일한 연마 패드와 동일한 실리카 슬러리를 사용하여 BLT 강유전체 박막을 연마하였을 때에는 압력이 증가할수록 또한 속도가 증가할수록 연마 균일도가 향상되는 경향성을 보인 바가 있다[14]. CdTe 박막의 화학적기계적연마 공정에 있어서 연마 균일도는 산화막 및 BLT 강유전체 박막의 경향성과는 다른 결과를 보임을 알 수 있다. 다만 FESEM에 의한 두께 측정에 따른 1차원 상의 두께 변화만이 반영된 결과이기 때문에 향후 Ellipsometry를 활용한 2차원 평면 상의 다수(9점 이상) 위치에서 두께 측정을 통하여 검증이 필요하다고 판단된다.

균일한 박막 두께 확보를 위한 CdTe 박막의 최적 화학적기계적연마 공정 조건을 조사하기 위하여 압력과 속도의 변화에 따른 RMS 표면 거칠기( $R_{rms}$ )와 최고-최저점간 표면 거칠기( $R_{p-v}$ )를 AFM을 이용하여 조사하였다. 화학적기계적연마 공정을 수행하기 이전의 증착 직후 CdTe 박막의  $R_{rms}$  및  $R_{p-v}$ 는 각각 473.432 nm 및 792.836 nm이었다. 화학적기계적연마 공정을 수행한 이후 CdTe 박막의  $R_{rms}$ 와  $R_{p-v}$ 는 모든 조건에서 향상된 결과를 보였다. 특히 100 gf/cm<sup>2</sup>의 압력에 20 rpm의 속도로 연마한 경우에  $R_{rms}$ 는 15.702 nm로 가장 우수한 특성을 나타내었고, 결과가 가장 좋지 않았던 200 gf/cm<sup>2</sup>의 압력에 60 rpm의 속도로 연마한 경우에도  $R_{rms}$ 는 148.054 nm로 화학적기계적연마 공정을 수행함으로써 최소 68.73%에서 최대 96.68%까지 개선되었다. 마찬가지로  $R_{p-v}$ 의 경우에도 최소 15.30%에서 최대 85.55%까지 개선되었다. 그림 3과 그림 4에서 속도의 변화에 상관없이 200 gf/cm<sup>2</sup>의 압력에서 가장 좋지 않은 표면 거칠기 결과를 나타내었다. 특히 200 gf/cm<sup>2</sup>의 압력과 60 rpm의 속도에서 화학적기계적연마 공정을 수행한 경우에  $R_{rms}$  및  $R_{p-v}$  모두 급격히 악화되어 최소 개선 정도를 나타내었다. 한편 속도에 의한 표면 거칠기의 경향성은 발견할 수 없었고, 이를 통하여 CdTe 박막의 화학적기계적연마 공정에 있어서 표면 거칠기 특성은 압력에 민감함을 알 수 있다.

이상의 결과를 그림 2의 연마 균일도와 종합하여 검토하면, 100 gf/cm<sup>2</sup>의 압력과 20 rpm의 속도에서 화학적기계적연마 공정을 수행한 경우에  $R_{rms}$  결과가 우수하지만 대면적

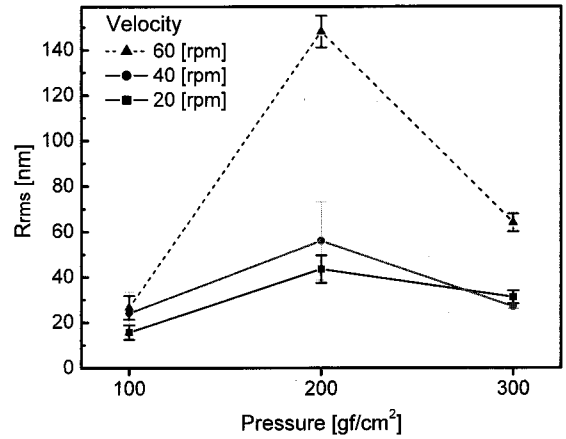


그림 3 압력 및 속도 변화에 의한 CdTe 박막의 RMS 표면 거칠기( $R_{rms}$ ).

Fig. 3 RMS surface roughness ( $R_{rms}$ ) of CdTe thin film polished with changes of pressure and velocity.

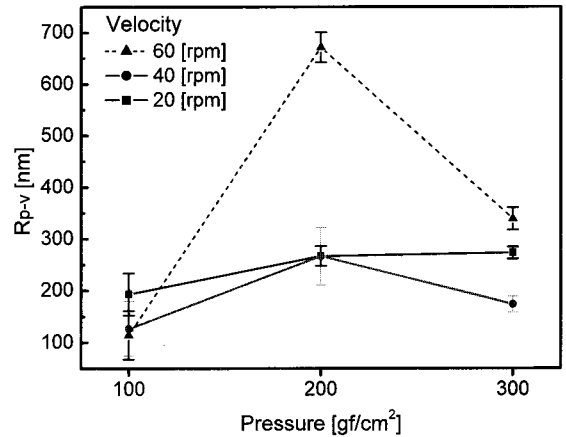


그림 4 압력 및 속도 변화에 의한 CdTe 박막의 최고-최저점간 표면 거칠기( $R_{p-v}$ ).

Fig. 4 Peak-to-valley surface roughness ( $R_{p-v}$ ) of CdTe thin film polished with changes of pressure and velocity.

공정에 적용하였을 때에는 CdTe 박막의 두께 균일성이 떨어질 개연성이 있다. 반면에 200 gf/cm<sup>2</sup>의 압력과 60 rpm의 속도에서 화학적기계적연마 공정을 수행한 경우에는 CdTe 박막의 두께 균일도가 우수한 반면에  $R_{rms}$  및  $R_{p-v}$  등의 표면 거칠기 특성이 저하되는 결과가 발생할 수 있다. 따라서 연마 균일도 5.0% 내외를 만족하는 공정 조건 중에서 표면 거칠기 특성이 우수한 100 gf/cm<sup>2</sup>의 압력에서 40 rpm 및 60 rpm의 속도 조건이 대면적 CdTe 태양 전지 적용을 위한 균일한 두께에 우수한 표면 거칠기 특성 확보를 위한 최적 공정 조건으로 판단된다. 높은 생산성을 위한 고연마율 조건까지 고려한다면 100 gf/cm<sup>2</sup>의 압력에서 60 rpm의 속도 조건이 더욱 적합하다고 판단된다. 그림 5의 AFM 3D 이미지를 살펴보았을 때에 증착 직후 불규칙적이고 균일하지 않은 표면 형상들이 화학적기계적연마 공정을 수행 후 그림 5(b) 및 (c)와 같이 균일하게 연마되어짐을 확인할 수 있다.

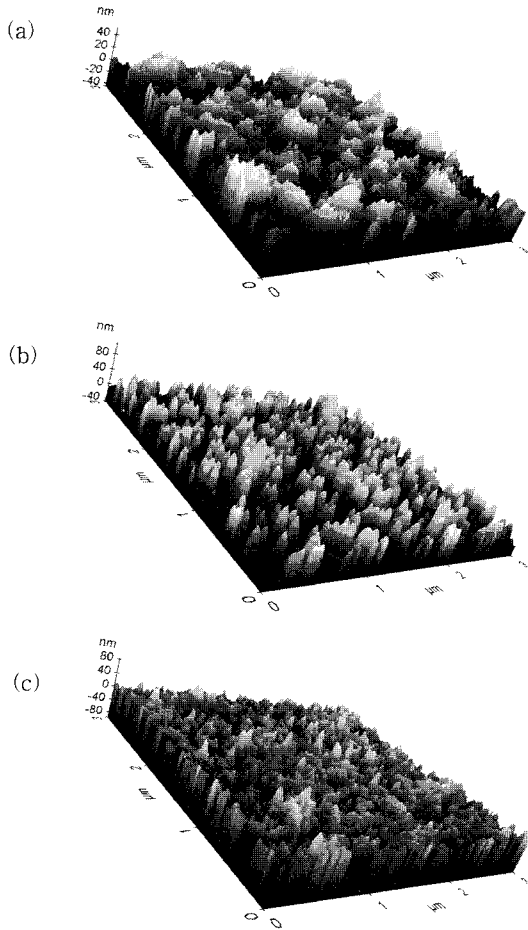


그림 5 (a) 증착 직후 및 100 gf/cm<sup>2</sup>의 압력에서 (b) 40 및 (c) 60 rpm의 속도로 화학적기계적연마 공정을 수행한 시편의 AFM 3x3 μm 3D 이미지.

Fig. 5 AFM 3x3 μm 3D images of (a) non-polished (as-deposited) sample and polished samples with 100 gf/cm<sup>2</sup> of down force and (b) 40 and (c) 60 rpm, respectively.

#### 4. 결 론

대면적 CdTe 박막 태양전지 적용 시에 박막 두께의 균일도가 대면적 박막 태양 전지 특성에 미치는 영향에 대해서 조사하기 위한 선행연구로써, CdTe 박막의 두께 균일도를 향상시키고자 화학적기계적연마 공정을 적용하고 특성을 조사하였다. CdTe의 연마율은 200 gf/cm<sup>2</sup>의 압력과 60 rpm의 속도 조건에서 최대 3160 nm/min을 나타내었고, 속도보다 압력에 더욱 큰 영향을 받는 것으로 조사되었다. 화학적기계적연마 공정을 수행한 이후 CdTe 박막의  $R_{rms}$ 는 최대 96.68%까지 개선되었고,  $R_{p-v}$ 의 경우에도 최대 85.55%까지 개선되었다. 연마 균일도 5.0% 내외를 만족하며 표면 거칠기 특성이 우수한 100 gf/cm<sup>2</sup>의 압력에서 60 rpm의 속도 조건이 대면적 CdTe 태양 전지 적용을 위한 최적 공정 조건으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 조은철, 조영현, 김동섭, 이수홍, 지일환, "실리콘 태양 전지의 개발현황", 전기전자재료, Vol. 8, No. 3, pp. 362-371, 1995.
- [2] 김경해, 이준신, "결정질 실리콘 태양전지 연구개발 동향", 전기전자재료, Vol. 20, No. 4, pp. 39-46, 2007.
- [3] 유진수, 문상일, 김경해, Suresh Dhungel, 이준신, "실리콘 태양전지 최적설계에 관한 연구", 대한전기학회논문지:전기물성.응용부문C, Vol. 53, No. 4, pp. 187-191, 2004.
- [4] 윤경훈, "박막 태양전지 기술개발 현황", 한국전기화학회, 전기기술심포지움 학술대회지, pp. 189-210, 2001.
- [5] 유진수, Kumar Dhungel, 이준신, "태양전지 응용을 위한 PECVD 실리콘 질화막 증착 및 열처리 최적화", 대한전기학회논문지:전기물성.응용부문C, Vol. 55, No. 12, pp. 565-569, 2006.
- [6] 윤재호, 안병태, 윤경훈, "화합물 박막 태양전지 기술동향", 전기전자재료, Vol. 19, No. 7, pp. 29-38, 2006.
- [7] 이재형, 이호열, 박용관, "보론 도핑에 따른 CdS 박막 및 CdS/CdTe 태양전지 특성, 대한전기학회논문지:전기물성.응용부문C, Vol. 48, No. 8, pp. 563-569, 1999.
- [8] 김동환, 윤세왕, "박막형 CdTe 태양전지", 전기전자재료, Vol. 11, No. 8, pp. 60-64, 1998.
- [9] 최진영, 이임근, 정종진, 박성준, 이동윤, 김희제, "염료 감응형 태양전지의 대면적화에 따른 셀 특성 연구", 한국신·재생에너지학회 춘계학술대회논문집, pp. 189-191, 2005.
- [10] 최권우, 김남훈, 서용진, 이우선, "산화제 및 연마제 첨가를 통한 Nickel CMP 특성 개선 연구", 전기전자재료학회논문지, Vol. 18, No. 7, pp. 605-609, 2005.
- [11] 서용진, 고필주, 박성우, 이강연, 이우선, "고집적 메모리 커패시터의 Vertical Sidewal Patterning을 위한 BTO 박막의 CMP 특성", 대한전기학회논문지:전기물성.응용부문C, Vol. 55, No. 3, pp. 116-121, 2006.
- [12] 이재형, 최성현, 이동진, 이종인, 양동진, 양계준, 이준신, "스퍼터 압력에 따른 태양전지용 CdTe 박막의 구조적, 광학적 특성", 한국전기전자재료학회, 추계학술대회논문집, pp. 101-102, 2005.
- [13] 정해원, 이천, 신재혁, 신성호, 박광자, "스퍼터링에 의한 CdTe박막 제조 조건이 CdTe/CdS 태양전지의 특성에 미치는 영향", 전기전자재료학회논문지, Vol. 10, No. 9, pp. 930-937, 1997.
- [14] Nam-Hoon Kim, Sang-Hun Shin, Pil-Ju Ko, Woo-Sun Lee, "Chemical mechanical polishing characteristics in (Bi,La)Ti3O12 damascene process for high-density ferroelectric memories", Thin Solid Films, Vol. 515, pp. 6456-6459, 2007.
- [15] Nam-Hoon Kim, Min-Ho Choi, Sang-Yong Kim, Eui-Goo Chang, "Design of experiment (DOE) method considering interaction effect of process parameters for optimization of copper chemical

mechanical polishing (CMP) process," *Microelectronic Engineering*, Vol. 83, Issue 3, pp. 506-512, 2006.

[16] F. W. Preston, "The theory and design of plate glass polishing machines", *J. Soc. Glass Technol.*, Vol. 11, pp. 214-256, 1927.

[17] J. Hernandez, P. Wrschka, Y. Hsu, T.-S. Kuan, G. S. Oehrlein, H. J. Sun, D. A. Hansen, J. King, M. A. Fury, "Chemical Mechanical Polishing of Al and SiO<sub>2</sub> Thin Films: The Role of Consumables," *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 146, Issue 12, pp. 4647-4653, 1999.

[18] D. R. Evans, *Chemical-Mechanical Planarization of Semiconductor Materials*, 1st Edition, Heidelberg: Springer-Verlag, 2004.



**이우선 (李愚宣)**

1952년 1월 23일생. 1974년 조선대학교 전기공학과 졸업. 1978년 조선대학교 일반대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1984년 중앙대학교 일반대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1982~1983년 University of Massachusetts IBRD 교환교수, 1989~1990년 Purdue University Post-Doc, 1992년 동경공업대학 객원연구원, 1998~2000년 조선대학교 에너지자원신기술연구소장, 2000년 한국전기전자재료학회 반도체연구회장, 2000년 한국전기전자재료학회 광주전남지부장, 2001~2003년 조선대학교 연구처장, 2004~2005년 University of California Santa Barbara 교환교수, 2008년 대한전기학회 광주전남지회장, 1978년~현재 조선대학교 전기공학과 교수  
 Tel : 062-230-7024  
 Fax : 062-232-9218  
 E-mail : wslee@chosun.ac.kr

**저자 소개**



**양정태 (楊楨台)**

1960년 7월 19일생. 1996년 호원대학교 전기공학과 졸업. 2006년 전남대학교 일반대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2009년 조선대학교 일반대학원 전기공학과 박사과정 수료. 1986~1994년 대우자동차(주) 에너지관리 연구원, 1994년~현재 한국폴리텍V대학 전기학과 부교수  
 Tel : 017-650-0371  
 Fax : 063-540-7795  
 E-mail : yjt1216@hanmail.net



**신상헌 (申尙憲)**

1976년 8월 25일생. 2000년 전남대학교 전기공학과 졸업. 2004년 한양대학교 일반대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2007년 조선대학교 일반대학원 전기공학과 박사과정 수료  
 Tel : 062-230-7864  
 Fax : 062-232-8544  
 E-mail : shinsh@chosun.ac.kr