

박막태양전지 버퍼층 적용을 위해 RF 스퍼터링 및 급속열처리 공정으로 제작한 황화아연 박막의 구조적 광학적 특성

박찬일* · 전영길**

Structural and Optical Properties of ZnS Thin Films Fabricated by Using RF Sputtering and Rapid Thermal Annealing Process for Buffer Layer in Thin Film Solar Cells

Chan-Il Park* · Young-Kil Jun**

요약

CIGS 박막 태양 전지의 버퍼층은 흡수층과 윈도우층 사이의 밴드정렬(band alignment)을 통해 에너지 변환 효율을 향상시킨다. ZnS는 무독성의 II-VI 반도체 화합물로서 직접전이형 광대역 밴드갭과 n형 전도성을 가지며, 높은 광투과성, 높은 굴절률 등의 우수한 전기적, 광학적 특성을 가지고 있고, 우수한 격자정합을 가지는 물질이다.

이 연구에서, RF 마그네트론 스퍼터링 방법에 의해 증착 후 급속 열처리에 의해 제작된 ZnS 버퍼층 박막의 구조적, 광학적 특성의 상관관계에 대해 고찰하였다. (111), (220), (311) 면의 섬아연광 입방정 구조를 확인할 수 있고, 상대적으로 저온에서 급속열처리를 수행한 시료에서는 (002) 면의 우르쯔광 육방정 구조가 함께 나타나는 다결정이 되었다. 고온에서 급속열처리 수행한 시료에서는 섬아연광 입방정 구조의 단결정으로 상전이 된다. 화학적 성분 분석을 통해서 Zn/S의 비율이 화학양론에 근접한 시료에서 섬아연광 입방정 구조의 단결정이 나타났음을 확인하였다. 급속열처리 온도가 증가할수록 흡수단이 다소간 단파장 쪽으로 이동되고, 가시광 파장 범위에서 평균 광투과율이 증가하는 경향성을 보이며 500°C 조건에서는 80.40%로 향상되었다.

ABSTRACT

Buffer layer in CIGS thin-film solar cells improves energy conversion efficiency through band alignment between the absorption layer and the window layer. ZnS is a non-toxic II-VI compound semiconductor with direct-transition band gaps and n-conductivity as well as with excellent lattice matching for CIGS absorbent layers. In this study, the structural and optical properties of ZnS thin films, deposited by RF magnetron sputtering method and subsequently performed by the rapid thermal annealing treatment, were investigated for the buffer layer. The zincblende cubic structures along (111), (220), and (311) were shown in all specimens. The rapid thermal annealed specimens at the relatively low temperatures were polycrystalline structure with the wurtzite hexagonal structures along (002). Rapid thermal annealing at high temperatures changed the polycrystalline structure to the single crystal of the zincblende cubic structures. Through the chemical analysis, the zincblende cubic structure was obtained in the specimen with the ratio of Zn/S near stoichiometry. ZnS thin film showed the shifted absorption edge towards the lower wavelength as annealing temperature increased, and the mean optical transmittance in the visible light range increased to 80.40% under 500°C conditions.

키워드

ZnS(: Zinc Sulfide), RF Magnetron Sputtering, Rapid Thermal Annealing, Optical Properties
광학 특성, 급속 열처리, 황화 아연, 박막 태양전지

* 송의과학기술고등학교(94park27@hanmail.net)

** 교신저자 : 서영대학교 전기과

• 접수일 : 2020. 07. 07

• 수정완료일 : 2020. 07. 26

• 게재확정일 : 2020. 08. 15

• Received : Jul. 07, 2020, Revised : Jul. 26, 2020, Accepted : Aug. 15, 2020

• Corresponding Author : Young-Kil Jun

Dept. Electricity, University of Seoyeong

Email : ykjun@seoyeong.ac.kr

I. 서론

CIGS 박막 태양전지는 $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ 을 광흡수층(absorber layer)으로 하는 태양전지로서, 기본적으로 칼코피라이이트(chalcopyrite) 구조이며 직접천이형 p형 화합물 반도체이다. $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ 의 높은 광흡수계수(absorption coefficient)를 가지고 있기 때문에 $1 \mu\text{m}$ 의 두께만으로도 우수한 광흡수 특성을 얻을 수 있고, 유연(flexible) 소자 제작이 가능하다. 또한 열적 안정성이 우수하고, In과 Ga의 조성비를 조절하여 밴드갭을 1.02eV에서 1.67 eV까지 조절할 수 있는 특징을 가지고 있다. 이것은 최근 23.4% 이상의 에너지변환 효율을 기록하였다[1]. CIGS 박막 태양전지는 일반적으로 기판, 후면전극(back contact), 광흡수층, 버퍼층(buffer layer), 윈도우층(window layer)/투명전극(transparent conductive oxide), 전면전극(front contact)으로 구성되어 있다. 버퍼층은 광흡수층과 윈도우층 간의 밴드정렬(band alignment)을 통해서 CIGS 태양전지의 효율을 향상시키며, 버퍼층은 후속 스퍼터링 공정에서 광흡수층의 손상 방지, 광흡수층 표면의 활성화, 격자불량 해소 등의 기능이 있다[2].

현재 화학적용액성장법(CBD, chemical bath deposition)으로 제작된 CdS 버퍼층이 보편적으로 사용되고 있는데, CdS는 화학적으로 안정하고 CIGS 광흡수층과 격자부정합(lattice mismatch)이 적은 장점을 가지고 있다. 하지만 CdS에 포함된 독성 원소인 Cd를 대체하는 연구가 필요하고, Zn 기반의 ZnS 버퍼층과 In 기반의 In_2S_3 버퍼층 등에 대한 연구가 대표적이다[3,4].

ZnS는 무독성의 II-VI 반도체 화합물로서 직접천이형 광대역 밴드갭과 n형 전도성을 가지며, 높은 광투과성, 2.5nm의 큰 보어 엑시톤 반경(Bohr exciton radius), 40meV의 큰 엑시톤 결합에너지, 2.27의 높은 굴절률 등의 우수한 전기적, 광학적 특성을 가지고 있고, 1.3~1.5eV의 밴드갭을 가지는 CIGS 흡광층에 대해서 CdS보다 우수한 격자정합을 제공하기 때문에 CdS 버퍼층을 대체할 유력한 물질로 보고되고 있다 [3,5-7, 11-12]. 한편 첨가연광(ZB, zinc blende) 입방정(cubic) 구조에서는 3.68eV의 밴드갭을 보이고, 우르쯔광(WZ, wurtzite) 육방정(hexagonal) 구조에서는 3.91eV의 밴드갭을 보이는 등 결정구조에 따라서 밴드갭의 변화가 보고되기도 하였다[7].

본 논문에서는 RF(radio frequency) 마그네트론 스퍼터링 방법으로 증착하고, 급속열처리(rapid thermal annealing) 장치를 사용하여 후속 열처리를 수행한 ZnS 박막의 구조적 특성과 광학적 특성과의 상관관계를 고찰하고자 하였다.

II. 실험방법

본 연구에서는 $20 \times 20 \text{ mm}^2$ 코닝유리(Corning glass) 기판을 에탄올과 아세톤 용액에서 각각 10분 동안 초음파(ultrasonication) 및 탈이온수(DIW, deionized water)를 이용하여 순차적으로 세척을 시행하였다. ZnS 박막의 증착은 RF 마그네트론 스퍼터링 장비(IDT Engineering Co.)를 이용하여 상온에서 수행하였다. 순도 99.99% 2인치 ZnS 타겟(RNDKorea Corp.)을 사용하여, 3분간의 프리스퍼터링 진행 후 본 실험을 수행하였다. 타겟과 기판 사이의 거리 5.0cm, 초기진공 $1 \times 10^{-5} \text{ torr}$, 증착진공 $7.5 \times 10^{-3} \text{ torr}$, Ar 가스유량 50sccm 조건에서 스퍼터링 파워 100W로 13분 동안 200nm 두께의 ZnS 박막을 증착하였다. 이후 급속열처리 장치를 사용하여 N₂ 가스 분위기에서 200, 300, 400, 500°C의 서로 다른 온도 조건으로 각각 20분간 급속열처리를 진행하였다. ZnS 박막의 표면특성의 확인을 위해 전자주사현미경(SEM, scanning electron microscopy, Hitachi/S-4700)을 활용하였고, 박막의 화학조성을 확인하기 위하여 SEM 장비에 부착된 에너지분산형 X선 분석장치(EDX, energy-dispersive X-ray spectroscope, Oxford Instruments, INCA)를 사용하였다. 박막의 결정성은 Cu K α ($\lambda=0.15406 \text{ nm}$) X선 소스를 사용하여 40kV 및 30mA, $2\theta=10-80^\circ$ 범위에서 X선 회절장치(XRD, X-ray diffractometer, PANalytical, X'Pert PRO MRD)로 분석하였다. ZnS 박막의 광학적 특성을 조사하기 위하여 자외선-가시광(UV-VIS)분광광도계(Varian, CARY 500 SCAN)를 사용하여 $\lambda=300-2000 \text{ nm}$ 범위에서 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

그림 1은 RF 마그네트론 스퍼터링 장비를 사용하여

상업용 단일 타겟으로 증착한 약 200nm 두께의 ZnS 박막의 (a) 증착직후(as-deposited)와 서로 다른 열처리 온도 (b) 200, (c) 300, (d) 400, (e) 500°C에서 20분간 급속열처리 공정을 수행한 시료에 대한 EDX 및 XRD 분석 결과이다. EDX 분석 결과 ZnS 박막의 화학 조성은 (a) 증착직후 시료에서는 Zn와 S가 각각 54.89와 45.11at%로 나타났고 Zn/S의 비율은 1.217이다.

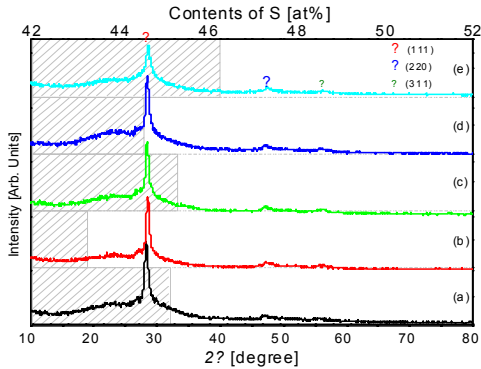


그림 1. 급속 열처리 된 ZnS 박막에서 (a) 증착직후 (b) 200, (c) 300, (d) 400, (e) 500 °C에서 S의 화학적 농도와 XRD 분석

Fig. 1 Chemical concentration of S and XRD patterns in (a) as-deposited and rapid thermal treated ZnS thin films at (b) 200, (c) 300, (d) 400, (e) 500°C

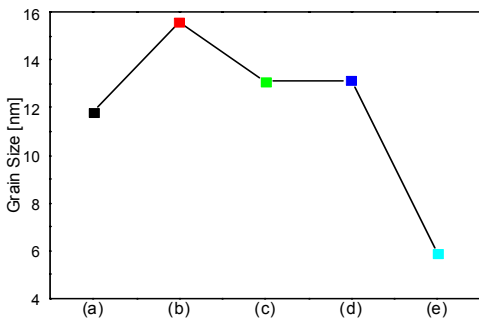


그림 2. (a) 증착직후 및 급속열처리 온도 (b) 200, (c) 300, (d) 400, (e) 500°C 변화에 따른 결정립 크기(grain size) 및 SEM 사진

Fig. 2 Grain size and SEM surface micrographs in (a) as-deposited and rapid thermal treated ZnS thin films at (b) 200, (c) 300, (d) 400, (e) 500°C

이후 급속열처리 공정을 각각의 온도에서 수행한 (b)~(e) 시료에서 S의 조성비는 (b) 43.26, (c) 45.30,

(d) 44.53, (e) 46.25at%으로 모든 급속열처리 온도 조건에 43~47at% 범위로 나타났다. 또한 Zn/S의 비율은 (b) 1.317, (c) 1.208, (d) 1.246, (e) 1.162로 확인되었고, (e) 조건이 상대적으로 화학양론(stoichiometry)에 가까운 조성이었다. 타겟 자체의 Zn/S 비율은 1.0에 수렴하였으나, 열처리 이전의 증착직후 시료부터 S의 조성비가 감소하는 경향이 나타났는데, 이는 S 성분의 휘발성이 강한 이유로 파악되며 유사한 결과가 보고되었다[8]. XRD 결과에서는 $2\theta=28.58^\circ, 47.97^\circ, 56.23^\circ$ 에서 각각 (111), (220), (311) 면의 삼아연광 입방정 구조를 확인할 수 있다[9]. 이 때 상대적으로 저온인 (b) 200°C~(d) 400°C으로 급속열처리를 수행한 시료에서는 $2\theta=26.59^\circ$ 에서 (002) 면의 우르쯔광 육방정 구조가 함께 나타나는 다결정이 되었다가[7,10], (e) 500°C 급속열처리 온도 조건에서는 육방정 구조와 관련된 피크가 사라지며 삼아연광 입방정 구조의 단결정으로 상전이 되며, 지배적인 입방정 (111) 피크의 세기(intensity)는 작아지고, (111) 피크의 반치폭(FWHM, full width at half maximum)이 커지는 것을 확인할 수 있다. 급속열처리 시료 중에 고온에서 공정 수행하여 Zn/S의 비율이 화학양론에 근접한 시료에서 삼아연광 입방정 구조의 단결정이 나타난 것을 주의 깊게 살펴볼 필요가 있다.

그림 2는 (a) 증착직후 및 급속열처리 온도 (b) 200, (c) 300, (d) 400, (e) 500°C 변화에 따른 결정립 크기(grain size) 및 SEM 표면 분석 결과이다. 결정립 크기는 그림 1의 XRD 결과에서 주도적인 (111) 피크에서 슈어리식(Scherrer formula) $D=0.94\lambda/\omega \cdot \cos \theta$ 를 적용하여 계산하였다. 식에서 λ 는 Cu K α X선의 파장(0.15406nm)이고, ω 는 (111) 피크의 FWHM이고, θ 는 Bragg 회절각을 나타낸다. 증착직후 시료 (a)에서의 결정립 크기는 11.81nm이었고, (b) 200°C~(d) 400°C의 비교적 낮은 온도에서 급속열처리를 수행한 시료들은 각각 15.58, 13.09, 13.13nm 등으로 결정립의 크기가 증가하였고 SEM 사진에서도 동일한 결과를 확인할 수 있다. 급속열처리 온도가 (e) 500°C 조건에서는 결정립의 크기가 5.87nm로 급격히 감소하면서, 결정립계(grain boundary)가 증가하는 것을 SEM 사진을 통해서도 관찰할 수 있는 반면에 박막 내에서 결정립이 조밀하고 밀집한(compact and dense) 상태로 볼 수 있다.[13]

그림 3은 (a) 증착직후 및 급속열처리 온도 (b) 200, (c) 300, (d) 400, (e) 500°C 변화에 따른 광흡수도 (absorbance) 및 가시광(380~780nm) 파장 범위에서의 평균 광흡수도 분석 결과이다. 광흡수도 $A = -\log T = \log(I_0/I)$ 식으로 산출하였고, T는 광투과도 (transmittance)이고, I_0 는 입사광의 세기, I는 투과광의 세기를 나타낸다.

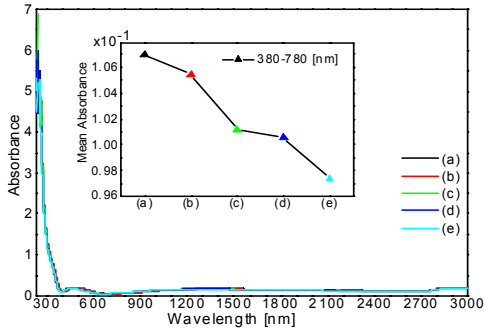


그림 3. (a) 증착직후 및 급속열처리 온도 (b) 200, (c) 300, (d) 400, (e) 500°C 변화에 따른 광흡수도 및 가시광 영역에서 평균 광흡수도

Fig. 3 Absorbance in (a) as-deposited and rapid thermal treated ZnS thin films at (b) 200, (c) 300, (d) 400, (e) 500°C. The inset shows mean absorbance in the wavelength range of 380 to 780 nm under the same conditions

ZnS 박막은 급속열처리 유무 또는 급속열처리 온도에 관계없이 가시광 파장 범위에서부터 3000nm의 근적외선(NIR, near infrared) 파장 범위에 이르기까지 투광 특성을 보임을 관찰할 수 있다. 가시광 영역에서 평균흡광도는 증착직후 시료의 경우에 0.107로 나타났고, 이는 200nm 두께의 ZnS 박막이 가시광 영역의 입사광의 21.84%를 흡수하는 것을 의미한다. 급속열처리를 수행한 시료들은 모든 온도 조건에서 증착직후의 시료보다 가시광 영역에서의 평균 광흡수도가 감소하였다. 급속열처리 온도가 증가할수록 평균 광흡수도는 감소하는 경향성을 보이며, (e) 500°C 온도 조건에서의 평균 광흡수도는 0.097이었고, 이는 가시광 영역 입사광의 오직 20.0%만을 200nm 두께의 ZnS 박막이 흡수한다는 것을 의미한다.

그림 4는 (a) 증착직후 및 급속열처리 온도 (b) 200, (c) 300, (d) 400, (e) 500°C 변화에 따른 광투과율 및 가시광 영역에서의 평균 광투과율 분석 결과이

다. ZnS 박막은 급속열처리 유무에 관계없이 가시광 파장 범위에서부터 3000nm의 근적외선 파장 범위에 이르기까지 약 61~91%의 투과율을 갖는 투광 특성을 보임을 관찰할 수 있다. 급속열처리 온도가 증가할수록 흡수단(absorption edge)이 다소간 단파장 쪽으로 이동(shift)되는 청색이동(blue-shift)을 확인할 수

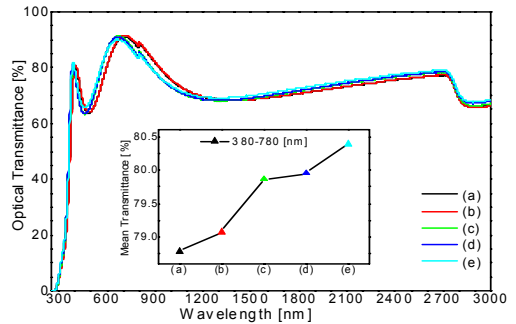


그림 4. (a) 증착직후 및 급속열처리 온도 (b) 200, (c) 300, (d) 400, (e) 500°C 변화에 따른 광투과율 및 가시광 영역에서의 평균 광투과율 분석

Fig. 4 Optical transmittance in (a) as-deposited and rapid thermal treated ZnS thin films at (b) 200, (c) 300, (d) 400, (e) 500°C. The inset shows mean transmittance in the wavelength range of 380 to 780 nm under the same conditions

있는데, 투광층으로서의 보다 낮은 파장 범위까지 투과할 수 있음을 의미한다. 가시광 파장 범위에서 평균 광투과율은 증착직후 시료의 경우에 78.80%로 나타났고, 급속열처리 공정을 수행한 시료 (b)는 79.08% 증가하였고, 급속열처리 온도가 증가할수록 가시광 영역의 평균 광투과율은 증가하는 경향성을 보이며 (e) 500°C 조건에서는 80.40%로 향상되었다. XRD 분석 결과에서 결정립 크기가 작아지며 결정성이 저하된 것으로 조사되었지만, (e) 조건에서 삼아연광 입방정 구조의 단결정으로 상변화하며 균일하고 치밀한 결정성을 나타냄으로써 광투과율이 향상된 것으로 파악된다.

그림 5는 Tauc의 식을 통해 자외선-가시광 분광광도계를 통해 확보된 데이터를 전환한 Tauc plot으로 $(ah\nu)^2$ 과 $h\nu$ 의 관계를 나타낸 그래프이다. 이 때 a 는 흡수계수(absorption coefficient), h 는 플랑크상수(Planck's constant), ν 는 입사광의 파장이고, $h\nu$ 는 광자에너지(photon energy)를 의미한다. 이 때 Tauc plot의 기울기가 가장 급격한 영역에서 외접선을 그어

x축과 교차하는 지점의 값을 밴드갭으로 추산하는데, (a) 증착직후 및 급속열처리 온도 (b) 200, (c) 300, (d) 400, (e) 500°C에서의 밴드갭은 각각 (a) 3.428, (b) 3.423, (c) 3.498, (d) 3.450, (e) 3.485eV로 조사되

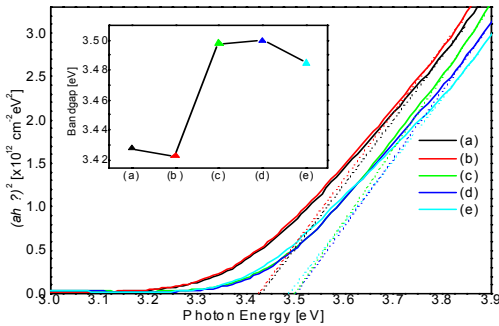


그림 5. (a) 증착직후 및 급속열처리 온도 (b) 200, (c) 300, (d) 400, (e) 500°C 변화에 따른 ZnS 박막에 대한 $(\alpha h\nu)^2$ 와 광자 에너지 $(h\nu)$ 의 관계 및 동일한 조건에서 ZnS 박막의 밴드갭 에너지

Fig. 5. Tauc plots of $(\alpha h\nu)^2$ versus photon energy $(h\nu)$ for the (a) as-deposited and rapid thermal annealed ZnS thin films at (b) 200, (c) 300, (d) 400, (e) 500°C.

The inset shows the estimated bandgaps of the as-deposited and the rapid thermal annealed ZnS thin films under the same conditions

었다. 모든 조건에서 3.4~3.5eV로 나타났으며, 기존에 보고된 밴드갭 보다는 모든 조건에서 낮게 나타났다. 급속열처리 공정을 수행한 ZnS 박막 중에 (c) 300~(e) 400°C 온도 조건에서는 우르쯔광 육방정 구조와 섬아연광 입방정 구조가 혼재된 다결정 구조에서 결정이 균일하고 치밀해지면서 청색이동으로 밴드갭이 증가하여 보다 단파장 범위의 광을 투과할 수 있게 되었다. 하지만 (e) 500°C 조건에서는 광투과율이 상대적으로 완만한 기울기로 증가하면서 350~380nm 영역의 파장 범위에서는 (c)와 (d) 조건보다 흡수단이 장파장 범위에 형성되고 380nm 이상의 파장 범위에서는 (c)와 (d) 조건보다 높은 투과율을 보이고 있다. 따라서 (e) 500°C 조건에서 섬아연광 입방정 구조의 단결정으로 상변화함에 따라서 밴드갭은 다소 감소하지만 가시광 영역의 광투과율은 증가하게 되는 현상이 나타났다.

IV. 결론

본 연구는 CIGS 박막 태양전지의 버퍼층 대체 적용을 위해, 직접천이형 광대역 밴드갭과 n형 전도성을 가지고 CIGS 흡광층에 대해서 우수한 격자정합을 제공하는, 무독성의 ZnS 반도체 화합물에 대해서 RF 마그네트론 스퍼터링 방법으로 증착하고, 후속 급속열처리를 수행하였다. XRD 결과에서 (111), (220), (311)면의 섬아연광 입방정 구조를 확인할 수 있고, 상대적으로 저온에서 급속열처리를 수행한 시료에서는 (002)면의 우르쯔광 육방정 구조가 함께 나타나는 다결정이 되었다. 고온에서 급속열처리 수행한 시료에서는 섬아연광 입방정 구조의 단결정으로 상전이 된다. 화학적 성분 분석을 통해서 Zn/S의 비율이 화학양론에 근접한 시료에서 섬아연광 입방정 구조의 단결정이 나타났음을 확인하였다. 급속열처리를 수행한 시료들은 모든 온도 조건에서 증착직후의 시료보다 가시광 영역에서의 평균 광흡수도가 감소하였다. ZnS 박막은 급속열처리 유무에 관계없이 가시광 파장 범위에서부터 3000nm의 근적외선 파장 범위에서 이르기까지 약 61~91%의 투과율을 갖는 투광 특성이 나타났고, 급속열처리 온도가 증가할수록 평균 광흡수도가 감소하는 경향성을 보였다. 급속열처리 온도가 증가할수록 흡수단이 다소간 단파장 쪽으로 이동되고, 가시광 파장 범위에서 평균 광투과율이 증가하는 경향성을 보이며 500°C 조건에서는 80.40%로 향상되었다.

References

- [1] NREL, "https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html," *Best Research-Cell Efficiency Chart*, Jul. 2019.
- [2] Y. Tang, "Copper Indium Gallium Selenide Thin Film Solar Cells," *Nanostructured Solar Cells*, InTechOpen, 2017, pp. 183-200.
- [3] S. Tobbeche, S. Kalache, M. Elbar, M. Kateb, and M. Serdouk, "Improvement of the CIGS solar cell performance: structure based on a ZnS buffer layer," *Optical and Quantum Electronics* vol. 51, issue 8, 2019, p. 284.
- [4] A. Chirilă, S. Buecheler, F. Pianezzi, P. Bloesch

- h, C. Gretener, A. Uhl, C. Fella, L. Kranz, J. Perrenoud, S. Seyrling, R. Verma, S. Nishiwaki, Y. Romanyuk, G. Bilger, and A. Tiwari, "Highly efficient Cu(In,Ga)Se₂ solar cells grown on flexible polymer films," *Nature Materials*, vol. 10, no. 11, 2011, pp. 857-861.
- [5] S. Kumar, C. Chen, C. Dong, Y. Ho, J. Lee, T. Chan, R. Thangavel, T. Chen, B. Mok, S. Rao, and M. Wub, "Room temperature ferromagnetism in Ni doped ZnS nanoparticles," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 554, 2013, pp. 357-362.
- [6] B. Poornaprakash, S. Ramu, S. Park, R. P. Vijayalakshmi, and B. Reddy, "Room temperature ferromagnetism in Nd doped ZnS diluted magnetic semiconductor nanoparticles," *Materials Letters*, vol. 164, 2016, pp. 104-107.
- [7] A. Shakil, S. Das, A. Rahman, U. Akther, K. Majumdar, and K. Rahman, "A Review on Zinc Sulphide Thin Film Fabrication for Various Applications Based on Doping Elements," *Materials Sciences and Applications*, vol. 9, no. 9, 2018, pp. 751-778.
- [8] D. Hwang, J. Ahn, K. Hui, K. Hui, and Y. Son, "Structural and optical properties of ZnS thin films deposited by RF magnetron sputtering," *Nanoscale Research Letters*, vol. 7, 2012, p. 26.
- [9] N. Shanmugam, S. Cholan, N. Kannadasan, K. Sathishkumar, and G. Viruthagiri, "Effect of Annealing on the ZnS Nanocrystals Prepared by Chemical Precipitation Method," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2013, 2013, p. 351798.
- [10] Y. Hong and J. Baek, "Development trend of ZnS material for long wavelength infrared transmission," *The Korean Ceramic Society*, vol. 17, no.4, pp. 72-79, 2014.
- [11] H. Chung and D. Kim, "The Calculation of the Energy Band Gaps of Zincblende InAs_{1-X}N_X on Temperature and Composition," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 11, no. 12, 2016, pp. 1165-1174.
- [12] H. Chung and D. Kim, "The Calculation of the Energy Band Gaps and Optical Constants of Zincblende InyGa_{1-y}As_{1-x}N_x on Composition" *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 14, no. 5, 2019, pp. 877-886.
- [13] Y. Chung, Y. Joung and S. Kang, "Effect of RTA Temperature on the Structural and Optical Properties of HfO₂ Thin Films" *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 14, no. 3, 2019, pp. 497-504.

저자 소개

박찬일(Chan-Il Park)



2000년 조선대학교 전기공학과 졸업(공학사)

2003년 조선대학교 교육대학원 전기·전자·통신교육전공 졸업(교육학석사)

2013년 조선대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

2018년 ~현재 숭의과학기술고등학교 신재생에너지과 교사

※ 관심분야 : 전기재료, 신재생에너지, 태양전지

전영길(Young-Kil Jun)



2006년 조선대학교 전기공학과 졸업(공학사)

2008년 조선대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)

2016년 조선대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

2020년 ~현재 서영대학교 전기과 교수

※ 관심분야 : 태양광발전, 전기재료 및 반도체