

RF 스퍼터링 및 급속열처리 공정으로 제작한 ZnS:Nd 박막의 구조 및 광학적 특성

김원배*

Structure and Optical Properties of ZnS:Nd Thin filmss Produced by RF Sputtering and Rapid Thermal Annealing Process

Won-Bae Kim*

요 약

다양한 함량으로 네오디뮴이 도핑된 황화아연 박막제작은 RF 마그네트론 스퍼터링 장비를 이용하여 황화아연과 네오디뮴을 동시 증착하여 박막을 제작하였고, 후처리 공정으로 급속열처리를 400°C에서 30분간 실시하였다. 다양한 네오디뮴의 도핑 함량(0.35at.%, 1.31at.%, 1.82at.% 및 1.90at.%)을 갖는 ZnS 박막의 구조, 형태, 광학적 특성을 연구하였다. X-선 회절 패턴은 모든 박막에서 (111)방향의 큐빅 구조로 성장하였다. SEM 이미지와 AFM 이미지를 통해 네오디뮴 도핑 함량에 의한 박막의 표면 및 구조적 형태에 대하여 설명하였다. EDAX를 통해 다른 불순물이 포함되지 않은 Zn, S 및 Nd의 원소만을 확인하였다. UV-vis 스펙트럼을 이용하여 제작된 박막의 투과율과 밴드갭을 확인하였다.

ABSTRACT

For the production of neodymium-doped zinc sulfide thin films in various amounts, zinc sulfide and neodymium were simultaneously deposited using an RF magnetron sputtering equipment to form a thin films, and rapid thermal annealing was performed at 400°C for 30 minutes as a post-treatment process. The structure, shape, and optical properties of ZnS thin films having various neodymium doping contents (0.35at.%, 1.31at.%, 1.82at.% and 1.90at.%) were studied. The X-ray diffraction pattern was grown to a (111) cubic structure in all thin films. The surface and structural morphology of the thin films due to the neodymium doping content was explained through SEM and AFM images. Only elements of Zn, S, and Nd that do not contain other impurities were identified through EDAX. The transmittance and band gap of the prepared thin films were confirmed using the UV-vis spectrum.

키워드

CIGS thin film solar cell, Zinc sulfide, Neodymium, RF Magnetron Sputtering, Rapid Thermal Annealing
CIGS 박막 태양전지, 황화 아연, 네오디뮴, RF 마크네트론 스퍼터링, 급속 열처리

* 교신저자: 송원대학교 전기공학과
• 접수일 : 2021. 01. 23
• 수정완료일 : 2021. 03. 06
• 게재확정일 : 2021. 04. 17

• Received : Jan. 23, 2021, Revised : Mar. 06, 2021, Accepted : Apr. 17, 2021
• Corresponding Author : Won-Bae Kim
Dept. Electrical Song-won University.
Email : mokip@songwon.ac.kr

I. 서 론

급속도로 발전하는 산업으로 전기에너지 사용량 급증 현상은 화석에너지를 이용한 전기에너지 발전시스템의 여러 문제점을 도출하였다. 이에 대한 해결방안으로 화석에너지를 이용한 발전시스템에서 친환경 전기에너지 발전시스템으로 대체하기 위한 수많은 연구개발이 이루어졌으며 다양한 신재생 발전시스템 중 태양전지 발전시스템에 대한 연구개발로 Silicon, CdTe, CIGS Solar cell 등이 각 기업 및 대학 연구소에서 연구개발 되었고 상용화 및 상용화 전 단계까지 연구발전 되었다.

CIGS 박막 태양전지는 차세대 유력 태양전지로 각광을 받고 있으며, 흡광층과 윈도우층 사이의 버퍼층(Buffer layer)을 밴드정렬(Band alignment)하여 광흡수층 손상방지, 격자불량 해소(Relieve lattice defects) 등을 통해서 태양전지의 효율을 향상시킨다[1]. 기존의 CIGS 태양전지 버퍼층으로 사용되고 있는 CdS는 화학적으로 안정하고 CIGS 광흡수층과 격자부정합이 적은 장점이 있는 반면, 카드뮴에 의한 취급상 어려움과 제작공정 이후에 발생하는 폐기물로 인해 환경오염이 발생하는 문제점이 있다[2][3]. 이를 대체하기 위한 ZnS, ZnMgO, In₂S₃ 등 다양한 대체물질에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. ZnS는 II-VI족 반도체 화합물로서 3.68-3.91eV의 직접천이형 광대역 밴드갭을 가지고 있는 반도체 소재이다. 전자 발광, 기계적 발광, 평판 디스플레이, 자외선 다이오드, 압전 센서류, 변조기 등에서 유전체 및 필러 소재로써 사용되고 있으며, 최근 CIGS 태양전지 버퍼 층으로 사용하기 위한 연구가 이루어지고 있다[4]. ZnS 박막은 MBE(Molecular Beam Epitaxy), MOVACVD(Metal Oxide Chemical Vapor Deposition), ALE(Atomic Layer Epitaxy), RF(Radio Frequency)-magnetron sputtering 등 다양한 방법을 통하여 증착이 이루어지고 있는데 이중 RF 마그네트론 스퍼터링법은 경제적이고, 박막의 물성조절이 용이하며, 높은 증착률과 대면적 증착이 용이하다는 장점이 있다. 동시 스퍼터링(co-sputtering) 공정은 다양한 화합물 제조 및 특정 성분의 도핑이 가능한 특징을 가지고 있다[5-6]. 본 연구에서는 RF 마그네트론 동시 스퍼터링을 이용하여 제작한 ZnS:Nd 박막의 Nd 도핑 농도에 따른 구

조 및 광학적 특성을 연구하였다.

II. 실험방법

본 연구를 위하여 10×10mm² 코닝유리(Corning glass) 기판을 에탄올과 아세톤 용액, 탈이온수로 각각 10분씩 순차적으로 세척을 진행하였고, 대기속에서 건조하였다. ZnS 박막은 RF 마그네트론 스퍼터링 장비(IDT Engineering Co.)를 이용하여 상온에서 증착하였다. Zinc sulfide target(RNDKorea Corp.)은 순도 99.99%, 2inch를 사용하였고, Neodymium target(RNDKorea Corp.)은 순도 99.95%를 사용하여, 3분간 Pre-Sputtering를 진행하여 타겟 표면의 불순물제거 후 실험을 수행하였다. 타겟과 기판간 거리는 5.0cm, 초기 진공 1×10⁻⁵torr, 증착진공 7.5×10⁻³torr, Ar 가스유량 50sccm 조건에서 ZnS 타겟에 스퍼터링 파워 100W로 600초간 증착하였고, 동시에 Nd 타겟에 스퍼터링 파워 30W로 고정한 후 120초, 240초, 360초, 480초 및 600초로 증착시간을 달리하여 스퍼터링을 진행하였고 135nm 두께의 박막을 제작하였다. 이후 급속열처리 장비(Rapid Thermal Annealing equipment)를 사용하여 N₂ 가스 분위기에서 온도조건 400℃에서 600초간 열처리를 진행하였다.

박막 결정성 확인을 위해 Cu K α (λ =0.15406nm) X선 소스를 사용하고 60kV 및 55mA, 2 θ =10-80° 범위에서 고분해능 X선 회절분석기(High Resolution X-Ray Diffractometer, PANalytical, X'Pert PRO Multi Purpose X-Ray Diffractometer)를 사용하여 분석하였다. 박막의 표면특성의 확인을 위해 전자주사현미경(SEM, Scanning Electron Microscopy, Hitachi/S-4700)을 사용하였고, 박막의 화학조성을 확인하기 위하여 SEM 장비에 부착된 에너지분산형 X선 분석장치(EDX, Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy, Oxford Instruments, INCA)를 사용하였다. 박막의 광학적 특성을 조사하기 위하여 자외선-가시광 분광광도계(UV-VIS Spectrophotometer, ALPHA, OPTIZEN POP)를 사용하여 λ =190-1100nm 범위에서 측정하였다. 박막의 미세구조 측정과 물질 특성을 분석하기 위하여 원자힘 현미경(Atomic Force Microscope, Park systems, XE-100)을 이용하였다.

III. 결과 및 도찰

그림 1은 RF 마그네트론 스퍼터링 장비를 사용하여 Zinc sulfide만을 증착한 시료 (a) 및 Neodymium을 서로 다른 함량 (b) 0.35at.%, (c) 1.31at.%, (d) 1.82at.%, (e) 1.90at.%로 도핑한 135nm 두께의 시료들을 400°C에서 30분간 급속열처리 공정을 실시한 박막의 XRD 분석 결과이다. XRD 분석을 통해 Nd의 서로 다른 도핑 농도에 따른 ZnS 박막에서 28.24°, 47.97°, 56.23°에서 발생하는 2θ peak를 관찰한바 (a) 시료에서 피크의 모양은 명확하게 관찰되며 Nd 농도가 커질수록 줄어드는 현상이 나타났다. 시료 (a)의 2θ 피크값이 2.45로 나타나고 있으며, (111), (220), (311) 면의 십아연광 입방정(cubic) 구조를 확인할 수 있었다[7]. Nd의 농도가 증가하며 입방정 구조의 피크가 약해지며, 2θ=26.59° 부근의 피크에 해당하는 (c)시료의 피크 2θ 피크값 4.30의 값을 나타냈으며 (002) 면의 우르쯔광 육방정(hexagonal) 구조가 함께 나타나는 다결정으로 상전이가 발생하는 것을 볼 수 있다. EDX 분석결과 증착직후 ZnS 박막(a)에서 화학적 조성은 Zn와 S가 각각 46.15와 54.07at.%로 Zn/S의 비율은 0.85로 확인되었고 Nd의 함량을 조절하여 제작한 시료에서의 Zn/S의 비율은 (b) 0.79, (c) 0.83,

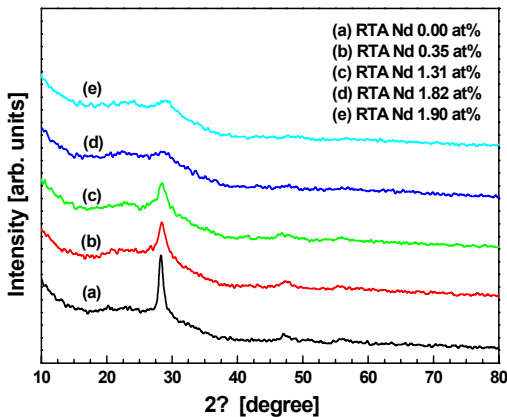


그림 1. 급속 열처리 된 ZnS:Nd 박막에서 (a) Nd 함량 0.00at.%, (b) 0.35at.%, (c) 1.31at.%, (d) 1.82at.%, (e) 1.90at.%에서의 XRD 분석

Fig. 1 XRD patterns at (a) Nd content 0.00at.%, (b) 0.35at.%, (c) 1.31at.%, (d) 1.82at.% and (e) 1.90at% in rapid thermal annealing ZnS:Nd thin films.

(d) 0.95 및 (e) 0.86으로 조사되었으며 Nd 함량이 증가될수록 Zn/S의 비가 향상되었고 1.82at.%에서 화학양론적비에 근접하였다.

ZnS:Nd 박막 시료 내에 Nd 함량이 높아질수록 지배적인 입방정 (111) 피크의 반치폭(FWHM, full width at half maximum)이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 결정립 크기(grain size)를 관찰하기 위하여 슈어리식(Scherrer formula)를 사용하여 계산하였다. 식 (1)에서 λ 는 Cu K α X선의 파장 0.15406nm이고 ω 는 (111) 피의 반치폭이고, Θ 는 Bragg 회절각을 나타낸다.

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

그림 2는 제작된 시료의 결정립 크기(Grain Size)를 보여주는데, 네오디뮴이 도핑되지 않은 순수한 ZnS 박막의 경우 3.39nm이었고, Nd 함량이 (b) 0.35at.%, (c) 1.31at.%, (d) 1.82at.%, (e) 1.90at.%로 네오디뮴 함량이 증가할수록 결정립 크기는 (b) 2.02nm, (c)1.99nm. (d) 1.55nm, (e) 1.32nm로 크기가 감소하는 것으로 나타났으며, Nd 이온으로 인해 ZnS의 격자구조에 영향을 주고 있음을 알 수 있다[8].

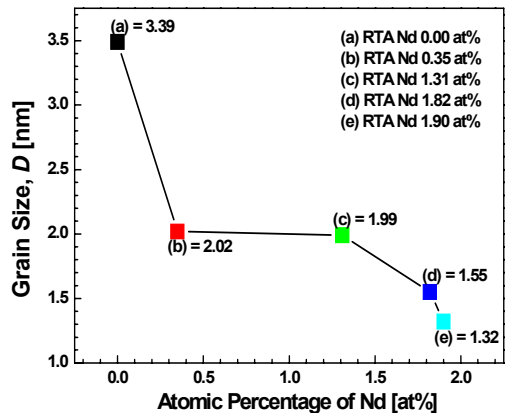


그림 2. 급속 열처리 된 ZnS:Nd 박막에서 (a) Nd 함량 0.00at.%, (b) 0.35at.%, (c) 1.31at.%, (d) 1.82at.% (e) 1.90at.%에서의 결정립 크기

Fig. 2 Grain size in (a) Nd content of 0.00at.% immediately after deposition, (b) 0.35at.%, (c) 1.31at.%, (d) 1.82at.%, and (e) 1.90at.% in rapid thermal annealing ZnS:Nd thin films.

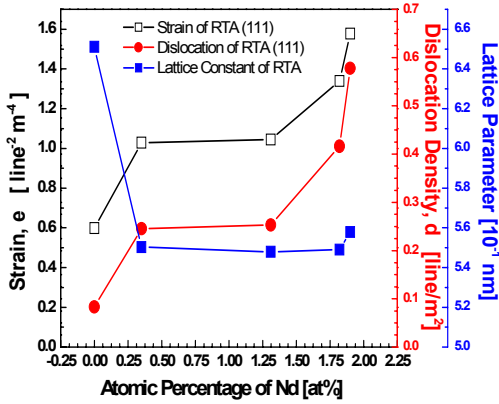


그림 3. 급속 열처리 된 ZnS:Nd 박막에서 (a) Nd 함량 0.00at.%, (b) 0.35at.%, (c) 1.31at.%, (d) 1.82at.%, (e) 1.90at.%에서의 격자상수, 변형 및 전위 밀도

Fig. 3 Lattice constant, strain and dislocation density at (a) Nd content 0.00at.%, (b) 0.35at.%, (c) 1.31at.%, (d) 1.82at.%, and (e) 1.90at% in rapid thermal annealing ZnS:Nd thin films.

그림 3에서는 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 변형률과 전위밀도를 계산함으로써 서로 다른 함량으로 네오디뮴을 도핑한 박막의 결함을 정량화 하였으며, 네오디뮴 함량을 높여가며 도핑을 하였을 경우 변형률이 증가하는 모습을 보이고 있으며, 전위밀도는 변형률과 유사한 경향을 보이며 증가하는 모습을 보였다.

$$\epsilon = \frac{\beta \cos\theta}{4} \quad (2)$$

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (3)$$

그림 4는 네오디뮴을 도핑하지 않은 (a) ZnS 박막과 (b) 0.35at.%, (c) 1.31at.%, (d) 1.82at.%, (e) 1.90at.%의 서로 다른 함량으로 네오디뮴을 도핑한 박막의 광흡수도 및 가시광(380~1100nm) 파장 범위에서의 평균 광흡수도 분석 결과이다. 흡광도를 측정하기 위하여 Lambert-Beer식을 이용하였다.

$$A = -\log T = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (4)$$

$$T = \exp(-ad) \quad (5)$$

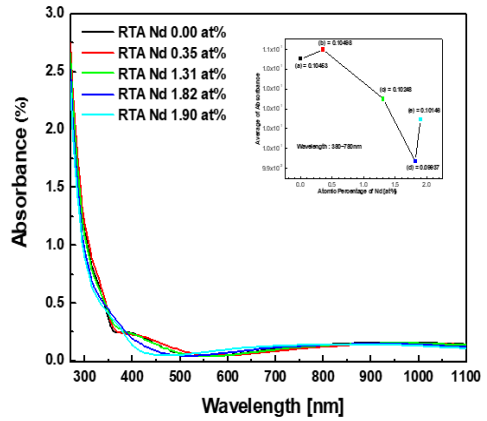


그림 4. 급속 열처리 된 ZnS:Nd 박막에서 (a) Nd 함량 0.00at.%, (b) 0.35at.%, (c) 1.31at.%, (d) 1.82at.%, and (e) 1.90at.%에서의 흡광도

Fig. 4 Absorbance of (a) Nd content 0.00at.%, (b) 0.35at.%, (c) 1.31at.%, (d) 1.82at.% and (e) 1.90at.% in rapid thermal annealing ZnS:Nd thin films.

$$\alpha = \frac{-\ln(T)}{d} \quad (6)$$

식 (4)에서 T는 광투과도(Optical transmittance)이고, I₀는 입사광의 세기, I는 투과광의 강도를 나타낸다. 서로 다른 네오디뮴의 함량으로 도핑된 박막 모두에서 가시광 파장 범위부터 1100nm의 적외선 파장 영역까지 투과 특성을 보임을 관찰할 수 있다. ZnS 증착직후 가시광 영역에서의 평균흡광도는 0.10453으로 나타났으며, 서로 다른 함량으로 네오디뮴을 도핑한 박막의 경우 평균 광흡수도는 Nd량이 많아질수록 감소하는 경향성을 보였으며 (d) 1.82at.%에서 0.09937을 나타냈고, (e) 1.90at.%에서 0.10146으로 증가하였다.

그림 5는 서로 다른 네오디뮴 도핑량에 따른 박막의 밴드갭 에너지를 측정하기 위하여 광투과율 및 평균 광투과율 분석하였다. 투과율은 식 (6)을 이용하였다. 여기서 T는 투과율, R은 반사율, d는 박막 두께를 나타내며, 흡수단 근처의 반사율은 무시할 정도로 작기 때문에 T=exp(-ad) 식으로 나타낼 수 있다. 식 (5)의 양단에 자연로그를 취하고, 식 (6)에 박막 두께

135nm를 대입하여 계산하면 흡수계수 α 를 나타내게 된다[9].

400°C에서 30분간 열처리를 진행한 모든 박막의 경우 가시광 영역 및 1100nm의 적외선 파장 범위에 이르기까지 약 55~92% 이상의 우수한 투과율을 보이고 있음을 확인할 수 있으며, 또한 네오디뮴 도핑 함량을 증가시킬 때 흡수단이 다소 낮은 파장측으로 이동하는 것을 확인할 수 있으며 투과측으로 활용시 낮은 파장 범위까지 광투과를 할 수 있음을 의미한다. 급속 열처리를 진행한 (a)ZnS 박막의 경우 가시광 파장 영역에서 평균 광투과율은 79.07%로 나타났으며, 네오디뮴의 함량이 높아질수록 낮아지다가 (d) 1.82at.%에서 79.86%까지 증가 후 소폭 감소함을 확인하였다.

그림 5는 네오디뮴 도핑 함량 조절을 이용하여 제작한 박막의 밴드갭 에너지를 나타내고 있으며, 네오디뮴 도핑 함량이 높아짐에 따라 밴드갭 에너지가 낮아짐을 볼 수 있다. UV-VIS 분광광도계를 통해 확보된 데이터를 Tauc 식을 이용하여 광학 밴드갭(Optical Band gap energy)을 계산하였다[10].

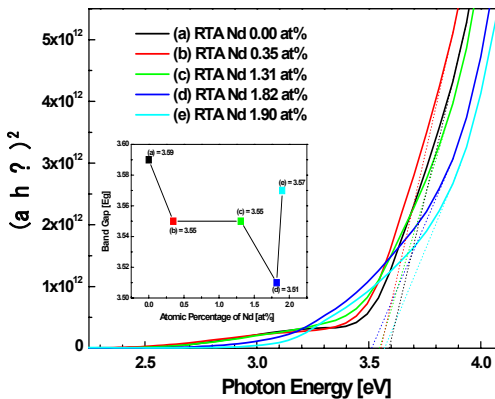


그림 5. 급속 열처리 된 ZnS:Nd 박막에서 (a) Nd 함량 0.00at.%, (b) 0.35at.%, (c) 1.31at.%, (d) 1.82at.%, (e) 1.90at.%에서의 $(\alpha h\nu)^2$ 와 광자에너지 $(h\nu)$ 의 관계 및 동일 조건에서의 밴드갭 에너지

Fig. 5. In the rapid thermal annealing ZnS:Nd thin film (a) Nd content of 0.00at.%, (b) 0.35at.%, (c) 1.31at.%, (d) 1.82at.%, (e) at 1.90at.% Relationship between $(\alpha h\nu)^2$ and photon energy $(h\nu)$ and bandgap energy under the same conditions.

$$\alpha h\nu = B(h\nu - E_g)^n \quad (7)$$

여기서 α 는 흡수계수(Absorption coefficient)이고, h 는 플랑크 상수(4.135667×10^{-15} eVs), ν 는 입사광 파장이며, $h\nu$ 는 광자에너지(Photon energy)를 의미한다. 직접 천이형 반도체의 경우 $n=1/2$ 또는 $3/2$ 로 n 값이 주어지는데 ZnS 박막의 경우 $n=1/2$ 로 알려져 있으므로 선택하여 그래프로 나타내었다. E_g 값은 Tauc plot의 기울기가 급격한 영역으로 외접선을 그어 x축과 교차하는 지점의 값을 밴드갭으로 추산하였는데 서로 다른 네오디뮴 도핑량에 의해 제작된 박막의 밴드갭은 (a) 3.59eV, (b) 3.55eV, (c) 3.55eV, (d) 3.51eV, (e) 3.57eV로 조사되었으며, ZnS의 밴드갭 3.60eV보다 모든 조건에서 낮게 나타났다. 희토류(Rare earth resources)로 분류되는 Nd의 경우 ZnS 밴드갭(3.60eV)보다 높은 광학 밴드갭(>4.5eV)를 가지므로 네오디뮴을 도핑할 경우 ZnS보다 밴드갭이 좁아짐을 확인하였다.

네오디뮴의 경우 희토류로서 상자성 특성을 가지는 것으로 알려져 있다. 본 실험에서는 ZnS박막에 대한 다양한 함량으로 네오디뮴을 도핑하였고, 0.35at%부터 1.90at.%까지 조절하여 제작하였다. 제작된 박막에 대한 자기강도(Magnetic strength)를 확인하였으나 모든 박막에서 확인되지 않았다. 네오디뮴은 온도에 민감하게 반응하는 특징을 가지고 있으며 1°C가 상승할 경우 자기강도가 0.08~0.12%를 상실하며, 약 80~200°C의 열온도까지 자기강도를 유지할 수 있는 것으로 보고되고 있다. 본 실험에서는 증착 후처리 공정과정으로 급속열처리를 진행하였고, 공정조건 열처리 온도는 400°C에서 열처리 시간은 30분간 실시하였다. 이러한 후처리 공정으로 인해 실험에 사용된 모든 박막에서 자기강도는 확인되지 않았다. 네오디뮴의 자기강도가 박막에 미치는 영향을 확인하기 위해서는 박막에 대한 후공정 조건인 열처리 공정조건 중 열처리 온도 또는 시간, ZnS박막에 포함되는 네오디뮴의 함량 조절에 대한 추후 연구가 필요하다고 사료된다.

IV. 결론

본 연구는 CIGS 박막 태양전지의 버퍼층을 대체하기 위한 ZnS 반도체 화합물의 성능을 향상하기 위하여 네오디뮴을 다양한 함량으로 도핑하였고, 박막을 제작하기 위해 코닝 유리 기판에 RF 마그네트론 스퍼터링 장비를 이용하여 ZnS와 Nd의 함량을 조절하며 동시증착하고, 후공정 과정으로 급속열처리를 수행하였다. 네오디뮴의 함량에 따라 Zinc와 Sulfide의 화학양론적 구성비에 영향을 주고 있음을 확인하였으며 1.90at.%의 Nd 함량에서 화학양론적 구성비에 근접한 0.95의 결과값을 보여주었다.

XRD 분석을 통해 Nd의 서로 다른 도핑 농도에 따른 ZnS 박막에서 (111), (220), (311) 면의 첨가연광 입방정(cubic) 구조를 확인할 수 있었으며, Nd의 농도가 증가할수록 입방정 구조의 피크가 약해지며 (002) 면의 우르쯔광 육방정(hexagonal) 구조가 함께 나타나는 다결정으로 상전이 발생하였다. 광학 투과 스펙트럼 측정 결과 가시광 영역에서의 평균 광흡수도는 네오디뮴 도핑함량이 증가할수록 감소하였으며, 광학적 밴드갭 에너지가 ZnS 밴드갭(3.60eV)보다 좁아짐을 확인하였다. 그러나 후처리 공정조건인 급속열처리 공정의 온도조건으로 인해 도핑재료로 사용된 네오디뮴의 자기장도 특성이 모두 상실되었다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 송원대학교 학술연구비 지원을 받아 연구되었음.

References

- [1] N. Kim, P. Ko, G. Cho, and C. Park, "Rapid Laser Annealing of Cu(In,Ga)Se₂ Thin Films by Using a Continuous Wave Nd:YAG Laser ($\lambda_0 = 532 \text{ nm}$)" *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 70, no. 8, Apr. 2017, pp. 809-815
- [2] C. Park and Y. Jun, "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," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 15, no. 4, Aug. 2020, pp. 665-670.
- [3] D. Hwang, J. An, and Y. Son, "The Influence of Substrate Temperature on the Structural and Optical Properties of ZnS Thin Films." *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, vol. 24, no. 9, Sept. 2011, pp. 760-765.
- [4] R. Zhang, B. Wang, and L. Wei, "Influence of RF power on the structure of ZnS thin filmss grown by sulfurizing F-RF sputter deposited ZnO," *Matreials Chemistry and Physics*, vol. 112, issue 2, 2008, pp. 557-561.
- [5] A. M. Monirul Islam, S. Ishizuka, A. Yamada, K. Sakurai, S. Niki, T. Sakurai, and K. Akimoto, "CIGS solar cell with MBE-grown ZnS buffer layer," *Solar energy materials and solar cells*, vol. 93, issue 6-7, June 2009, pp. 970-972.
- [6] R. Shakoury, A. Arman, Ş. Ṫalu, K. Ghosh, S. Rezaee, C. Luna, F. Mwema, K. Sherafat, M. Salehi, and M. M. Kumar, "Optical properties, microstructure, and multifractal analyses of ZnS thin filmss obtained by RF magnetron sputtering," *J. of materials Science:Materials in Electronice*, vol. 31, Feb. 2020, pp. 5262-5273.
- [7] N. Shanmugam, S. Cholan, N. Kannadasan, K. Sathishkumar, and G. Viruthagiri, "Effect of Annealing on the ZnS Nanocrystals Prepared by Chemical Precipitation Method," *J. of Nanomaterials*, vol. 2013, 2013, pp. 351798.
- [8] Y. Chung, Y. Joung, and S. Kang, "Effect of RTA Temperature on the Structural and Optical Properties of HfO₂ Thin filmss," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 14, no. 3, 2019, pp. 497-504.
- [9] J. Jung and S. Cho. "Structural, Electrical, and optical Properties of AZO Thin Films Subjected to Rapid Thermal Annealing Temperature," *J. of the Korea Institute of Electrical and Eletronic Material Engineers*, vol. 3, no. 4, Apr. 2010. pp. 280.
- [10] X. Chen, W. Guan, G. Fang, and X. Z. Zhao, "Influence of substrate temperature and post-treat

ment on the properties of ZnO:Al thin films prepared by pulsed laser deposition," *Applied Surface Science*, vol. 252, issue 5, Dec. 2005, pp. 1561-1567.

저자 소개



김원배(Won-Bae Kim)

1995년 조선대학교 전기공학과
졸업(공학박사)
1994년 ~현재 송원대학교 전기
공학과 교수
※ 관심분야 : 계측제어, 로봇

