

저온 열처리 공정에 따른 Ag₂Se 나노입자 박막의 열전특성

Effect of Annealing Temperature on Thermoelectric Properties of Ag₂Se Nanoparticle Thin Films

양 승 건* · 조 경 아* · 윤 정 권* · 최 진 용* · 김 상 식*
(Seunggen Yang · Kyoungah Cho · Jungwon Yun · Jinyong Choi · Sangsig Kim)

Abstract - In this study, we synthesized Ag₂Se nanoparticles (NPs) in an aqueous solution and investigated the thermoelectric characteristics of Ag₂Se NPs thin films on plastic substrates. Regardless of thermal annealing treatment, all the Ag₂Se NPs thin films show the negative Seebeck coefficients, indicating the *n*-type characteristics. As the annealing temperature increases, the electric conductivity increases while the Seebeck coefficient decreases. The electric conductivity of the thin film annealed at 180°C is larger by 10⁶ times, compared with the as-prepared thin film, and the maximum power density for the thin film annealed at 180°C is calculated to be 44 μW/cm².

Key Words : Thermoelectric, Silver selenide, Nanoparticles, Seebeck coefficient, Plastic substrate, Annealing

1. 서 론

최근 다기능 웨어러블 전자소자가 미래 성장산업의 한 분야로 주목받고 있다[1-3]. 웨어러블 전자소자의 다기능이 구현되기 위해서는 단일 기능의 전자소자보다 큰 전력소모가 수반되므로, 웨어러블 기판위에 지속적인 전력공급이 가능한 에너지 소자에 대한 관심이 더불어 증가하고 있다[4-6]. 전자소자와 연동하여 에너지를 생산할 수 있는 에너지 소자 중에 열전소자는, 전자소자에서 발생하는 열을 이용할 수 있어 차세대 웨어러블 전자소자의 다기능 구현을 위한 에너지 소자로 적합하다고 여겨진다. 웨어러블 소자 제작을 위해서는 우선 경량의 플라스틱 소재위에 제작이 가능하여야 하지만, 아직까지 플라스틱 소재위에 제작된 열전소자의 연구는 미비한 실정이다. 최근 열전소재로 반도체 나노물질이 주목받고 있으며, 특히 나노입자 박막은 열전도도와 전기전도도의 독립적인 조절로 고효율 열전발전의 가능성을 보여주고 있다[7, 8]. 일반적으로 반도체 나노입자 박막은 유기용매에서 합성되어진 나노입자 용액을 이용하여 제작할 수 있지만, 유기용매에서 합성된 나노입자를 이용하여서는 유기용매에 취약한 플라스틱 소재위에 그 나노입자 박막을 형성시키기가 어렵다[9, 10]. 플라스틱 소재 위에 나노입자 박막을 형성시키기 위해서는 우선 수용액 안에서 나노입자가 합성되어야 하며, 전기전도 향상을 위한 나노입자들간의 접합 (necking)은 플라스틱의 변형온도보다 낮은

온도에서 열처리가 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 벌크에서 우수한 열전특성을 보이는 Ag₂Se[11-13]를 수용액 속에서 나노입자로 합성하여 스프인코팅 방법으로 플라스틱 기판 위에 Ag₂Se 나노입자 박막을 제작하고, 저온 열처리 온도에 따른 Ag₂Se 나노입자 박막의 열전특성 변화를 알아보고자 한다.

2. 본 론

2.1 실험 방법

Ag₂Se 나노입자는 콜로이드 방식을 이용하여 다음과 같은 방법으로 수용액 속에서 합성하였다. 먼저, 250 mL의 증류수에 0.7g의 AgNO₃와 1mL의 1-thioglycerol을 넣고, 1M의 NaOH를 이용하여 pH를 11.4로 맞춘 후, 연결된 두 개의 플라스크 중 하나의 플라스크에 담아두었다. 다른 플라스크에는 0.2 g의 Al₂Se₃와 4M의 HCl를 반응시켜 H₂Se 가스를 생성한 후 그 가스를 수용액에 흘려보내 Ag₂Se 나노입자 수용액을 만들었다. 합성된 Ag₂Se 나노입자 용액은 원심분리기를 이용하여 Ag₂Se 나노입자를 걸러내고, 이를 다시 증류수를 이용하여 10 mg/100 μl의 농도로 재분산하여 Ag₂Se 나노입자 박막 형성에 사용하였다. Ag₂Se 나노입자 박막의 열전특성은 플라스틱 기판위에 형성된 열전 플랫폼을 이용하여 측정하였다. 본 연구에서 사용된 플라스틱 기판은 polyether sulfone (PES) 기판이며, 그림 1에서 볼 수 있듯이, 열전 플랫폼의 구성은 인위적으로 온도 차이를 발생시키기 위한 히터와 E1, E2의 전극, 그리고 두 전극 사이의 채널로 Ag₂Se 나노입자 박막으로 이루어져 있다. 열전 플랫폼에서의 히터와 전극 물질은 Pt를 스퍼터로 증착하였으며, 두 전극간의 거리는 40 μm였다. Ag₂Se 나노입자 박막 열전 플랫폼은 rapid thermal annealing

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Korea University, Korea

E-mail : sangsig@korea.ac.kr (Sangsig Kim)

E-mail : chochem@korea.ac.kr (Kyoungah Cho)

* Dept. of Electrical Engineering, Korea University, Korea

Received : January 4, 2016; Accepted : March 28, 2016

(RTA)기기를 이용하여 100°C, 150°C 그리고 180°C에서 10분 동안 Ar 분위기에서 열처리 공정을 진행하였다.

Ag₂Se 나노입자 박막의 구조적인 물성은 X-선 회절법 (X-ray diffraction; XRD, Rigaku SmartLab)으로 분석하였으며, 합성된 Ag₂Se 나노입자의 크기는 투과전자현미경(High-resolution transmission electron microscopy; HR-TEM, TECNAI F20)의 이미지로부터 측정하였다. Ag₂Se 나노입자 박막의 열전특성은 Keithley 4200와 IR 카메라(FLIR A645SC)를 이용하여 전기적 특성과 온도측정을 통해 측정하였다. 본 연구에서의 모든 측정은 대기 중 상온에서 측정하였다.

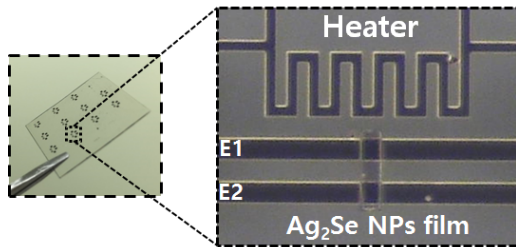


그림 1 Pt 히터와 전극 그리고 Ag₂Se 나노입자 박막으로 구성된 열전 소자의 광학 이미지

Fig. 1 Optical image of a thermoelectric platform consisting of a meander line patterned heater, two Pt electrode (E1, E2), and Ag₂Se NPs thin film on a plastic substrate.

2.1.1 결과 및 고찰

합성된 Ag₂Se 나노입자의 TEM 이미지와 열처리 온도에 따른 Ag₂Se 나노입자 박막의 XRD 패턴을 각각 그림 2(a)와 (b)에 나타내었다. TEM 이미지를 통하여 본 연구에서 합성된 Ag₂Se 나노입자는 평균적으로 4 nm 정도의 크기를 가지는 것을 알 수 있다. 그림 2(a)의 inset에서 볼 수 있는 Ag₂Se 나노입자의 격자 (lattice) 배열은 합성된 Ag₂Se 나노입자가 결정성이 우수하다는 것을 의미한다. 또한, selected area electron diffraction (SAED) 패턴에서 보이는 spot들 역시 Ag₂Se 나노입자의 결정성을 뒷받침해 주는 것이다. SAED 패턴에서 링이 보이는 것은 많은 Ag₂Se 나노입자가 겹쳐져 있어서 나타나는 것이다. Ag₂Se는 일반적으로 133°C를 기준으로 낮은 온도 상인 β상과 높은 온도 상인 α상을 가진다고 알려져 있다[11, 14]. 사방정계 (orthorhombic), 정방정계 (tetragonal), 삼사정계 (triclinic) 등의 구조는 β상에 속하고, α상에는 입방체 (cubic)의 구조가 해당된다[12, 13]. 그림 2(b)에서 열처리 전 상태의 XRD 패턴은 입방체 α-Ag₂Se (JCPDS No.76-0135)에 해당한다는 것을 알 수 있다. 본 연구의 Ag₂Se 나노입자 합성 온도가 상온이라는 점을 생각하면 Ag₂Se 나노입자는 벌크상태와는 다른 구조적 특징을 가진다고 여겨진다. 150°C의 열처리 후 부터 XRD 패턴에서 Ag (JCPDS No. 15-09146)가 나타나고, 180°C의 열처리 후에는 Ag의 존재뿐만 아니라 입방체 α-Ag₂Se와 사방정계 구조의 β-Ag₂Se

(JCPDS No. 71-2410)가 혼재되어 나타난다. 180°C의 열처리 후의 XRD 패턴에서 보여지는 피크는 열처리 전과 비교하면 상당히 그 폭이 좁아진다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 물질의 결정성이 좋아지거나 입자의 크기가 커질수록 XRD 패턴에서 피크의 폭은 좁아진다. XRD 패턴에서의 피크와 Scherrer equation을 이용하여 나노입자 크기를 계산한 결과 열처리 전 Ag₂Se 나노입자 크기는 1.3 nm로 계산되었고 100°C, 150°C, 180°C 열처리 후의 나노입자 크기는 각각 1.5 nm, 6.1 nm, 12.1 nm로 열처리 온도를 증가시킬수록 나노입자 크기가 증가한 것을 확인할 수 있다. 여기서 열처리 전 Ag₂Se 나노입자의 크기가 TEM 이미지와 XRD 패턴으로 계산했을 때 다른 것은 샘플 사이즈에 의한 것으로, TEM 이미지의 경우 샘플 사이즈가 50 nm × 50 nm 정도로 XRD 분석의 샘플 범위에 비해 매우 작기 때문에 XRD 패턴을 통해 계산한 나노입자 사이즈가 더 정확하다고 볼 수 있다. 그림 2(a)에서 알 수 있듯이 합성된 Ag₂Se 나노입자의 결정성은 상당히 좋은 것으로, 그림 2(b)에서 180°C의 열처리 후에 XRD 패턴의 피크 폭이 좁아진 것은 결정성 향상에 의한 것이라기보다 열처리로 인해 입자 크기가 커져서 발생한 것이다.

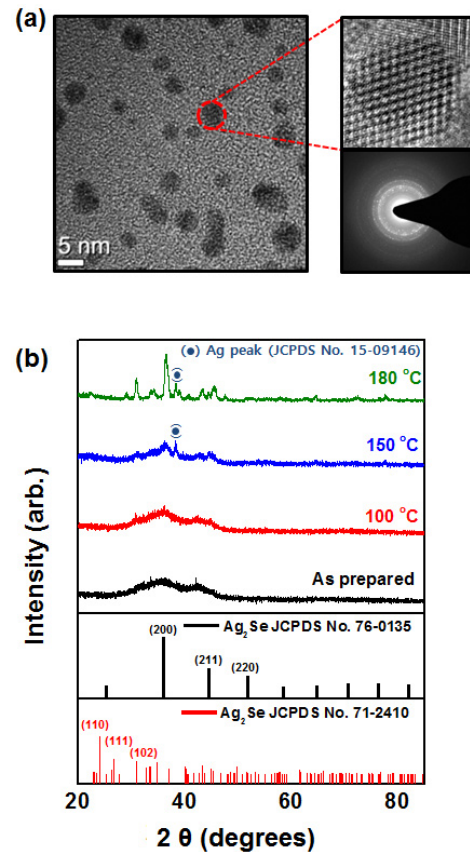


그림 2 (a) 열처리 전 Ag₂Se 나노입자의 HR-TEM 이미지, (b) 다른 온도에서 열처리한 Ag₂Se 나노입자 필름의 XRD 패턴
Fig. 2 (a) HR-TEM image of the synthesized Ag₂Se NPs and (b) XRD pattern of the Ag₂Se NPs films annealed at different temperatures

그림 3은 Ag₂Se 나노입자 박막의 열처리 전과 100°C, 150°C, 180°C에서 열처리한 후의 전류-전압 특성을 나타낸 그래프이다. Ag₂Se 나노입자 박막은 열처리 온도가 높아질수록 전류가 증가하였다. 1.5 V의 전압에서, 180°C에서 열처리한 Ag₂Se 나노입자 박막의 경우는 23 μA의 전류가 흘렀으며, 이 값은 열처리 전의 0.42 nA 보다 10⁶ 배 이상으로 증가한 것이다. 열처리 온도를 높일수록 Ag₂Se 나노입자 박막내에서 나노입자들의 성장, 격자간의 불안전함이 감소하게 됨에 따라 전기전도도의 향상으로 이어진 것으로 볼 수 있다[15-17].

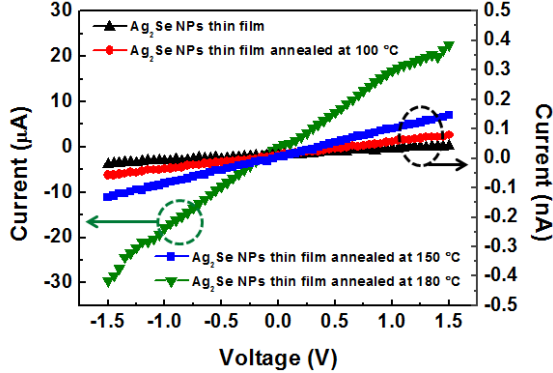


그림 3 열처리 전과 100°C, 150°C, 180°C로 열처리한 Ag₂Se 나노입자 박막의 전류-전압 특성 그래프

Fig. 3 Current-voltage characteristics of an as-prepared Ag₂Se NPs thin film and Ag₂Se NPs thin films annealed at 100°C, 150°C and 180°C.

열처리 온도에 따른 Ag₂Se 나노입자 박막의 전기전도도 및 제백계수를 그림 4에 나타내었다. 열처리 전 Ag₂Se 나노입자 박막의 전기전도도는 1.6×10⁻⁴ S/m 정도로 매우 낮은 값을 가지나, 180°C에서 열처리를 한 Ag₂Se 나노입자 박막은 전기전도도가 279.9 S/m으로 열처리 전의 Ag₂Se 나노입자 박막보다 대략 10⁶ 배 이상 증가하였다. 그림 2(b)의 XRD 패턴에서 볼 수 있듯이 150°C 이상에서는 Ag가 Ag₂Se 나노입자 박막내에 존재한다. 즉, 과잉 Ag는 캐리어 농도 증가에 영향을 주어[12], 전기전도도와 제백계수에 영향을 미치게 된다. 아래 식 (1)과 (2)에서 알 수 있듯이 캐리어 농도(n)의 증가는 전기전도도(σ)를 증가시키나 제백계수(S)는 감소시키게 된다.

$$\sigma = n \cdot e \cdot \mu \quad (1)$$

$$S = \frac{8\pi^2 k_B^2}{3eh^2} m^* T \left(\frac{\pi}{3n}\right)^{2/3} \quad (2)$$

여기서, e는 단위전자의 전하량, μ는 모빌리티, k_B는 볼츠만 상수, h는 플랑크 상수, T는 절대온도, m*은 유효질량을 나타낸다 [18]. 열처리 유무와 상관없이 Ag₂Se 나노입자 박막은 모두 n-type 특성으로 음의 제백 전압을 가진다. 열처리 전과 100°C, 150°C, 180°C로 열처리한 Ag₂Se 나노입자 박막의 제백계수는

각각 -747, -279, -103, -52 μV/K으로 열처리 온도 증가에 따라 제백계수의 절대값이 감소하는 경향을 보인다. 이러한 현상은 앞서 기술한 내용에 부합하는 것으로, 전기전도도와 제백계수의 반비례관계를 보여준다. 즉, 열처리 온도가 증가함에 따라 Ag₂Se 나노입자 박막의 전기전도도는 증가하고 제백계수는 감소하였다.

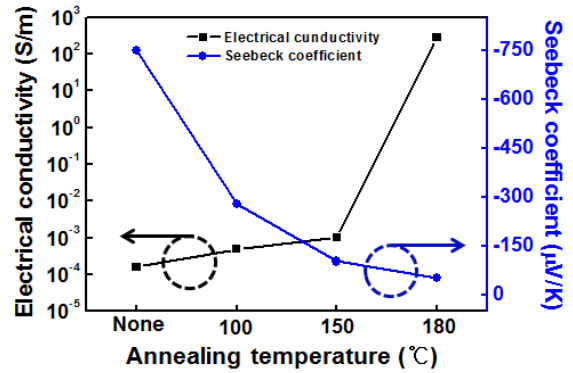


그림 4 열처리 전과 100°C, 150°C, 180°C로 열처리한 Ag₂Se 나노입자 박막의 전기전도도 그래프 (검정)와 제백 계수 그래프 (파랑)

Fig. 4 Electrical conductivities (black) and Seebeck coefficients (blue) of an as-prepared Ag₂Se NPs thin film and Ag₂Se NPs thin films annealed at 100°C, 150°C and 180°C

Ag₂Se 나노입자 박막의 전기전도도와 제백계수로 부터 power factor (S²σ)를 구해보면, 열처리 전 Ag₂Se 나노입자 박막의 power factor는 8.7×10⁻⁵ μW/mK²이고, 열처리 온도가 100°C, 150°C로 증가됨에 따라 3.9×10⁻⁵, 1.1×10⁻⁵ μW/mK²로 조금씩 감소하였다. 이것은 Ag₂Se 나노입자 박막의 전기전도도는 열처리에 의해 증가하지만 상대적으로 제백계수가 더 크게 감소하였기 때문에 나타나는 현상이다. 하지만, 180°C에서 열처리한 Ag₂Se 나노입자 박막의 power factor는 열처리 전 보다 대략 10⁶배 높은 0.75 μW/mK² 값을 가진다. 이것은 열처리 전의 Ag₂Se 나노입자 박막과 180°C에서 열처리 한 Ag₂Se 나노입자 박막의 제백계수와 전기전도도를 비교해 보면, 전기전도도의 증가(~10⁶배)가 제백계수의 감소(~0.1배)보다 크기 때문이라 사료된다. Ag₂Se 나노입자 박막의 단위면적당 출력파워를 온도 차이(ΔT)에 대해 나타낸 것이 그림 5이다. 출력파워는 식 (3)을 통해 구하였다 [19].

$$P = \frac{V_S^2}{4R} \quad (3)$$

여기서 R은 박막의 저항이고 V_S는 제백 전압이다.

Ag₂Se 나노입자 박막의 단위면적당 출력파워에 대한 열처리 공정의 영향은 power factor에서 보여준 경향과 일치한다. 열처리 전에 비해 100°C, 150°C에서 열처리한 Ag₂Se 나노입자 박막의 출력밀도는 감소하나, 180°C로 열처리한 Ag₂Se 나노입자 박

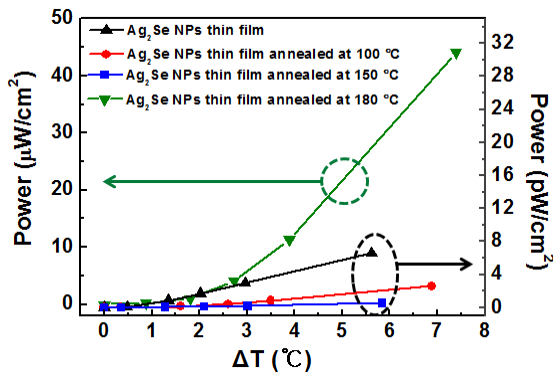


그림 5 열처리 전과 100 °C, 150 °C, 180 °C로 열처리한 Ag₂Se 나노입자 박막의 전극 간 온도 차이에 따른 출력 전력 그래프

Fig. 5 Output power as a function of temperature difference for an as-prepared Ag₂Se NPs thin film and Ag₂Se NPs thin films annealed at 100 °C, 150 °C and 180 °C.

막의 출력밀도는 ΔT가 클수록 열처리 전 Ag₂Se 나노입자 박막의 출력밀도에 비해 최대 10⁷ 배 까지 증가한다. 180 °C에서 열처리한 Ag₂Se 나노입자 박막은 7.3 K의 ΔT에서 44 μW/cm²의 최대 출력밀도를 가진다. 본 연구를 통하여 플라스틱의 변형온도 (200 °C)보다 낮은 온도인 180 °C에서 열처리 공정을 진행하여도 Ag₂Se 나노입자 박막의 출력밀도는 최대 10⁷ 배 까지 증가한다는 것을 확인하였다. 본 연구에서 Ag₂Se 나노입자 박막의 열전특성이 진공상태가 아닌 대기중에서 측정되었다는 점을 고려하면, 플라스틱 기판위에 제작된 Ag₂Se 나노입자 박막은 차세대 웨어러블 전자소자의 다기능 구현을 위한 에너지 소재로 유망하다고 여겨진다.

3. 결 론

본 연구에서는 수용액속에서 Ag₂Se 나노입자를 합성하고, 플라스틱 기판위에 Ag₂Se 나노입자 박막을 형성하여 열처리 온도에 따른 열전 특성변화를 확인하였다. 열처리 온도가 증가함에 따라 Ag₂Se 나노입자 박막의 전기전도도는 증가하고 제백계수는 감소하였다. 180 °C에서 열처리 한 Ag₂Se 나노입자 박막은 전기전도도가 279.9 S/m으로 열처리 전에 비해 대략 10⁶ 배 이상 증가하였고, 제백계수는 -52 μV/K으로 열처리 전에 비해 약 14배 감소하였다. 이는 열처리에 의해 Ag₂Se 나노입자 박막내에 존재하는 Ag에 의한 것으로, 과잉의 Ag가 Ag₂Se 나노입자 박막내에 캐리어 농도를 증가시켰기 때문이라고 사료된다. Ag₂Se 나노입자 박막의 최대 출력밀도는 180 °C에서 열처리 했을 때 얻어졌는데, 이것은 열처리로 인한 제백계수의 감소보다 전기전도도의 증가가 훨씬 컸기 때문이다. 180 °C에서 열처리 한 Ag₂Se 나노입자 박막

의 최대 출력밀도는 약 7도의 온도차이에서 44 μW/cm² 이다. 본 연구를 통하여 플라스틱 기판위에 제작된 나노입자박막의 열전특성을 향상시키기 위한 방법으로 저온 열처리 공정이 유용하다는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(NRF-2013R1A2A1A03070750), 2015년도 한국연구재단 (NRF-2015R1D1A1A01057641), 2015년도 한국연구재단(NRF-2015R1A2A1A15055437), 2015년도 한국연구재단 (NRF-2015R1A5A7037674), 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 기술혁신사업(No. 10053388, 에너지 절감 및 분리형 전기렌지 개발), 2015년도 산업통상자원부 및 한국산업기술 평가위원회의 센서산업고도화를 위한 첨단센서육성사업(No. 10054570, 센서산업 고도화를 위한 첨단센서 인력양성사업), 2016년도 BK21 플러스 사업의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.

References

- [1] R. H. Reuss, B. R. chalamala, A. Moussessian, G. K. Michael, A. kumar, D. C. Zhang, J. A. rogers, M. hatalis, D. Temple, G. Moddel, B. J. Eliasson, M. J. estes, J. kunze, E. S. Handy, E. S. harmon, D. B. Salzman, J. M. Woodall, M. A. Alam, Y. M. Jayathi, S. C. Jacobsen, M. olivier, D. Markus, P. M. Campbell and E. Snow, "Macroelectronics: Perspectives on Technology and Applications," Proceedings of the IEEE, Vol. 93, pp. 1239-1256, 2005
- [2] S. P. Lacour, J. Jones, S. Wagner, T. Li and Z. Suo, "Stretchable Interconnects for Elastic Electronic Surfaces," Proceedings of the IEEE, Vol.93, pp. 1459-1467, 2005
- [3] A. C. Siegel, D. A. Bruzewicz, D. B. Weibel and G. M. Whitesides, "Microsolidics: Fablrification of Three-Dimensional Metallic Microstructures in Poly (dimethylsiloxane)," Advanced Materials, Vol.19, pp. 727-733, 2007
- [4] V. Leonov and R. J. M. Vullers, "Wearable electronics self-powered by using human body heat: The state of the art and the perspective," Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol. 1, 062701, 2009

- [5] V. Leonov, T. Torfs, R. J. M. Vullers and C. Van Hoof, "Smart Wireless Sensors Integrated in Clothing: an Electrocardiography System in a Shirt Powered Using Human Body Heat," *Sensors & Transducers*, Vol. 107, pp. 165-176, 2009
- [6] M. S. Dresselhaus, G. Chen, M. Y. Tang, R. Yang, H. Lee, D. Wang, Z. Ren, J. P. Fleurial and P. Gogna, "New Directions for Low-Dimensional Thermoelectric Materials," *Advanced Materials*, Vol. 19, pp. 1043-1053, 2007
- [7] M. R. Dirmeyer, J. Martin, G. S. Nolas, A. Sen and J. V. Badding, "Thermal and Electrical Conductivity of Size-Tuned Bismuth Telluride Nanoparticles," *small*, Vol. 5, pp. 933-937, 2009
- [8] K. Ariga, M. Li, G. J. Richards and J. P. Hill, "Nanoarchitectonics: A Conceptual Paradigm for Design and Synthesis of Dimension-Controlled Functional Nanomaterials," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 11, pp. 1-13(13), 2011
- [9] B. J. Norris, J. Anderson, J. F. Wager and D. A. Keszler, "Spin-coated zinc oxide transparent transistors," *Journal of physics. D, Applied physics*, Vol. 36, pp. L105-L107, 2003
- [10] W. Zhou, W. Zhao, Z. Lu, J. Zhu, S. Fan, J. Ma, H. H. Hng and Q. Yan, "Preparation and thermoelectric properties of sulfur doped Ag_2Te nanoparticles via solvothermal methods," *Nanoscale*, Vol.4, pp. 3926-3931, 2012
- [11] M. Ferhat and J. Nagao, "Thermoelectric and transport properties of $\beta\text{-Ag}_2\text{Se}$ compounds," *Journal of Applied Physics*, Vol. 88, 813, 2000
- [12] H. Wang, W. Chu, D. Wang, W. Mao, W. Pan, Y. Guo, Y. Xiong and H. Jin, "Low-Temperature Thermoelectric Properties of $\beta\text{-Ag}_2\text{Se}$ Synthesized by Hydrothermal Reaction," *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, Vol. 40, 624, 2010
- [13] C. Xiao, J. Xu, K. Li, j. Feng, J. Yang and Y. Xie, "Superionic Phase Transition in Silver Chalcogenide Nanocrystals Realizing Optimized Thermoelectric Performance," *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 134, pp. 4287-4293, 2012
- [14] J. B. Conn and R. C. Taylor, "Thermoelectric and Crystallographic Properties of Ag_2Se ," *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 107, pp. 977-982, 1960
- [15] D. Kim and G. Lee, "Effect of rapid thermal annealing on thermoelectric properties of bismuth telluride films grown by co-sputtering," *Materials Science and Engineering: B*, Vol. 131, pp. 106-110, 2006
- [16] S. Li, H. M. A. Soliman, J. Zhou, M. S. Toprak, M. Muhammed, D. Platzek, P. Ziolkowski and E. Muller, "Effects of Annealing and Doping on Nanostructured Bismuth Telluride Thick Films," *Chemistry of Materials*, Vol. 20, pp. 4403-4410, 2008
- [17] H. Huang, W. Luan and S. Tu, "Influence of annealing on thermoelectric properties of bismuth telluride films grown via radio frequency magnetron sputtering," *Thin Solid Film*, Vol. 517, pp. 3731-3734, 2009
- [18] G. J. Snyder and E. S. Toberer, "Complex thermoelectric materials," *Nature Materials*, Vol. 7, pp. 105-114, 2008
- [19] N. Sato, K. Kuwabara, K. Ono, T. Sakata, H. Morimura, J. Terada, K. Kudou, T. Kamei, M. Yano, K. Machida and H. Ishii, "Monolithic Integration Fabrication Process of Thermoelectric and Vibrational Devices for Microelectromechanical System Power Generator," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 46, pp. 6062-6067, 2007

저 자 소 개



양 승 건 (Seunggen Yang)

2015년 : 고려대학교 전기전자공학부 졸업 (공학사). 2015년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 전기전자공학과 재학 (석박사 통합과정)
<주관심분야> 나노입자를 이용한 열전 소자



조 경 아 (Kyoungah Cho)

2002년 1월 ~ 현재 : 고려대학교 전기전자공학부 연구교수
<주관심분야> 나노입자를 이용한 전자소자



윤 정 권 (Jungwon Yun)

2007년 : 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업 (공학사). 2013년 : 고려대학교 전기전자공학부 졸업 (공학박사)
<주관심분야> 나노입자를 이용한 전자소자



최 진 용 (Jinyong Choi)

2010년 : 고려대학교 전기전자공학부 졸업 (공학사). 2010년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 전기전자공학부 재학 (석박사 통합과정)
<주관심분야> 나노선을 이용한 열전소자



김 상 식 (Sangsig Kim)

1996년 : Columbia University, Ph.D. (반도체 물리). 1996~1998년 : University of Illinois at Urbana-Champaign 박사 후 연구원. 1998~1999년 : University of Illinois at Urbana-Champaign 전문연구원. 1999년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 전기전자공학부 교수
<주관심분야> 나노입자 및 나노선을 이용한 전자소자