

황화납 양자점 기반 단파장 적외선 수광소자의 전기적 특성 향상을 위한 산화아연 나노입자 농도의 중요성

서경호¹ · 배진혁^{1,2,+}

Importance of Zinc Oxide Nanoparticle Concentration on the Electrical Properties of Lead Sulfide Quantum Dots-Based Shortwave Infrared Photodetectors

Kyeong-Ho Seo¹ and Jin-Hyuk Bae^{1,2,+}

Abstract

We describe the importance of zinc oxide nanoparticle (ZnO NP) concentration in the enhancement of electrical properties in a lead sulfide quantum dot (PbS QD)-based shortwave infrared (SWIR) photodetector. ZnO NPs were synthesized using the sol-gel method. The concentration of the ZnO NPs was controlled as 20, 30 and 40 mg/mL in this study. Note that the ZnO NPs layer is commonly used as an electron transport layer in PbS QDs SWIR photodetectors. The photo-to-dark ratio, which is an important parameter of a photodetector, was intensively examined to evaluate the electrical performance. The 20 mg/mL condition of ZnO NPs exhibited the highest photo-to-dark ratio value of 5 at -1 V, compared with 1.8 and 0.4 for 30 mg/mL and 40 mg/mL, respectively. This resulted because the electron mobility decreased when the concentration of ZnO NPs was higher than the optimized value. Based on our results, the concentration of ZnO NPs was observed to play an important role in the electrical performance of the PbS QDs SWIR photodetector.

Keywords: Zinc oxide nanoparticles, Concentration, Shortwave infrared photodetector, Photo-to-dark ratio

1. 서 론

단파장 적외선 ($\lambda = 1-3 \mu\text{m}$) 수광소자는 환경 모니터링, 야간 투시, 천문학 등 현대 첨단 산업분야에서 필수적인 역할을 하는 전자소자로 현재까지 지속적인 연구가 진행되고 있다 [1-3]. 단파장 적외선의 장점은 가시광선 ($\lambda = 0.4-0.7 \mu\text{m}$)보다 깊은 사물에 대한 투과력과 전자기파 자체의 약한 산란성으로 그 덕분에 안개 혹은 화재 현장과 같은 내부 관측이 어려운 가혹 현장에 대해서 뚜렷한 이미지를 제공해준다 [4,5]. 이 단파장 적외선 수광소자를 구현하는데 있어 보편적으로 인듐 소재(InAs, InGaAs 등) 혹은 게르마늄 소재(Ge, GeSn 등)를 기반으로 하는

화합물 반도체가 활용되고 있으나, 이 화합물 반도체들은 매우 높은 공정 온도를 거치는 에피택셜 성장 방법이 요구되고 이는 제조 비용이 값비싸고 대면 공정이 어렵다는 단점이 있다 [6-8].

이러한 점들을 고려하여, 황화납 양자점 (PbS QDs)이 비교적 저온에서 제조가 가능하고, 합성방법 또한 간단하여 고온공정이 불가피한 적외선 감응 소재들의 대안으로 제시되었다 [9,10]. 뿐만 아니라, PbS QDs는 합성시 전구체, 온도, 시간이 입자 크기에 영향을 주고, 이런 크기 조절 가능한 성질은 광범위한 단파장 적외선 영역의 감응을 가능하게 하여 원하는 파장대역에 대한 선택적인 센서를 제작할 수 있다 [10-12].

현재까지 PbS QDs 기반 전자소자에 대한 연구가 많이 진행되고 있는데, 그 중 다양한 소재를 도핑 또는 접합하였을 때 소자의 성능에 대한 연구는 현재까지도 가장 많이 다루는 연구 주제중 하나이다. 이러한 소재들 중, 폴리 3-헥실 티오펜 (P3HT)은 최고 점유 분자 궤도 (HOMO) 준위가 -4.9 eV 으로 이는 PbS QDs의 HOMO 준위와 매우 비슷하여 효과적인 밴드 정렬을 형성한다. 또한 PbS QDs의 분산용매로 활용되고 있는 유기 용제에도 용해가 잘 되어 PbS QDs와 혼합하여 사용할 수 있고, 이와 더불어 높은 정공 이동도를 갖고 있어서 전자소자에 향상된 전기 전도성을 제공한다 [13,14]. 이러한 점에서 혼합된 P3HT:PbS QDs에서 P3HT는 PbS QDs에 탁월한 도너 역할을 한다고 볼 수 있다. 일반적으로, PbS QDs 수광소자는 분자궤도 준위를 고려하여

¹경북대학교 전자전기공학부(School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University)
 80 Daehakro, Bukgu, Daegu, 41566, Korea

²경북대학교 전자공학부(School of Electronics Engineering, Kyungpook National University)
 80 Daehakro, Bukgu, Daegu, 41566, Korea

⁺Corresponding author: jhbae@ee.knu.ac.kr

(Received: Mar. 14, 2022, Revised: Mar. 29, 2022, Accepted: Mar. 30, 2022)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

인듐 산화 주석 (indium tin oxide; ITO), 알루미늄 (aluminum; Al) 을 각각 양극, 음극으로 활용하여 이렇게 ITO/PbS/Al 수직구조의 수광소자로 제작된다. 그러나 이 구조는 쇼트키 다이오드의 나쁜 정류작용 특성으로 인하여 저하된 성능을 보인다고 알려졌다 [15,16]. 이런 결함에 주목하여, Al 확산을 방지해주는 산화 아연 나노입자 (ZnO NPs)를 PbS QDs와 Al의 중간층으로 형성시킨다면 소자의 정류특성을 개선할 뿐 아니라 전류 흐름을 안정시킬 수 있다 [15,17]. 뿐만 아니라 Kwon, et al.에서는 ZnO NPs를 전자수송층으로 적용함으로써 photo-to-dark ratio가 2.9배 상승했다고 보고하여 PbS QDs 센서 제작에 있어 ZnO NPs 중간층은 핵심적인 역할을 한다고 볼 수 있다.

따라서 본 연구는 ZnO NPs 중간층에 초점을 두어 진행하였다. 연구 방법은 ZnO NPs의 농도를 달리하여 박막을 형성하여 PbS QDs 수광소자에 적용하였을 때 각각에 대한 전기적 특성을 분석하였다 [18]. 본 연구에서 사용된 ZnO NPs의 농도는 20 mg/mL, 30 mg/mL, 40 mg/mL였고 이에 대한 PbS QDs 소자의 current-voltage (I-V) properties를 측정하여 photo-to-dark ratio를 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 PbS QDs 합성방법

PbS QDs는 매우 높지 않은 온도의 hot injection 방법을 통해 합성되었다 [10,11]. 먼저 0.37 mmol의 황 (Sulfur; S)을 1 mL의 (oleylamine; OLA)와 섞고 질소 (N₂) 조건에서 30분 간 상온에서 교반시켜 황 원액을 얻었다. 이와 동시에 1 mmol의 염화납 (lead(II) chloride; PbCl₂)을 5 mL의 OLA와 섞고 질소 (N₂) 조건에서 30분 간 상온에서 교반시켰다. 교반된 PbCl₂-OLA 현탁액은 160°C까지 1시간 동안 가열되어 정제되었다. 그 다음 PbCl₂-OLA 현탁액은 120°C까지 온도가 내려가 15분간 계속 교반되었고 이 과정에서 N₂공급을 중단하고 고무마개로 쓰리벡 플라스크의 입구를 막아준 후 진공이 주입되었다. 15분 후, 쓰리벡 플라스크의 입구를 다시 열어주었고 N₂를 다시 주입시켰다. 모든 원액 및 현탁액 제조가 끝난 후, 황 원액은 PbCl₂-OLA 현탁액에 주입되어 140°C에서 30분간 교반됨으로써 양자점으로 합성되었다. 결과물은 찬물로 냉각된 후, 에틸 알코올 (Ethyl alcohol; EtOH)로 세정되어 10분동안 3,000 rpm으로 원심분리 및 침전되었다. 끝으로, 세정된 PbS QDs는 30 mg/mL 농도에 맞추어 톨루엔에 분산되었다 [9,17].

2.2 하이브리드 P3HT:PbS QDs 제조방법

하이브리드 P3HT:PbS QDs를 제조하기 위해, 1 mL의 PbS QDs 용액을 5 mg의 P3HT와 약 1시간동안 상온에서 섞어주었다 [13]. 모든 연구는 이 혼합된 P3HT:PbS QDs를 기반으로 진행되었다.

2.3 ZnO NPs 합성방법

ZnO NPs는 졸-겔 방법으로 합성되었다. 2.46 g의 아세트산 아연 (zinc acetate dihydrate)을 110 mL의 메틸 알코올 (methyl alcohol; MeOH)과 섞고 1.152 g의 수산화칼륨 (potassium hydroxide; KOH)을 60 mL의 MeOH와 섞어 1시간 동안 60°C에서 따로 교반시켰다. 교반된 KOH 현탁액을 ZnAc 현탁액에 빠르게 주입시켰고 1시간동안 교반시켰다. 결과물은 이소프로필 알코올 (isopropyl alcohol; IPA)과 헥산 (hexane)을 섞어서 세정되었고 약 5°C의 냉장시약장에 24시간동안 보관하여 침전물을 가라앉게 하였다. 침전물만 남기고 남은 용액들을 버렸고 EtOH에 세정시킨 후 3,000 rpm으로 원심분리 후 세정 용액을 버려준 후 20 mg/mL, 30 mg/mL, 40 mg/mL의 농도비로 EtOH에 분산시켜주었다. 10 mg/mL 농도의 ZnO NPs는 이번 연구에서 사용하지 않았다.

2.4 SWIR 수광소자 제작

본 연구의 수광소자는 수직구조로 제작되었고 활성층으로부터 전하 추출을 위해 anode와 cathode가 활용되었다. 먼저 anode는 ITO로 30 × 30 mm 크기의 glass substrate에 패터닝되었다. 소자 제작에 앞서 ITO기판은 불순물을 제거하기 위해, 아세톤 (acetone), MeOH 그리고 IPA 순으로 세정된 후 N₂로 세정물을 불어 없앴고 150°C 핫플레이트 위에 열처리되었다. 다음, 준비된 용액을 고르게 분포시키기 위해, 기판은 20분 동안 UV/ozone 처리되어 표면에너지가 상승되었다. 준비된 P3HT:PbS QDs 용액은 아무런 필터 없이 준비된 기판 위에 분사되었고 1분 간 3,000 rpm으로 스핀코팅 후 110°C 진공오븐에 어닐링되어 톨루엔이 증발되었다. Al 전극을 증착하기 전 ZnO NPs를 중간층으로 형성하기 위해 P3HT:PbS QDs 박막 위에 ZnO NPs를 분사한 후 30초 간 1,500 rpm으로 스핀코팅 후 90°C 진공오븐에 기판이 어닐링되어 에탄올이 증발되었다. 끝으로 100 nm 이상 Al을 증착하여 음극이 형성되었다. Fig. 1은 모식화된 소자 구조로, 패터닝된 ITO와 Al이 교차되는 영역을 확인할 수 있는데, 그

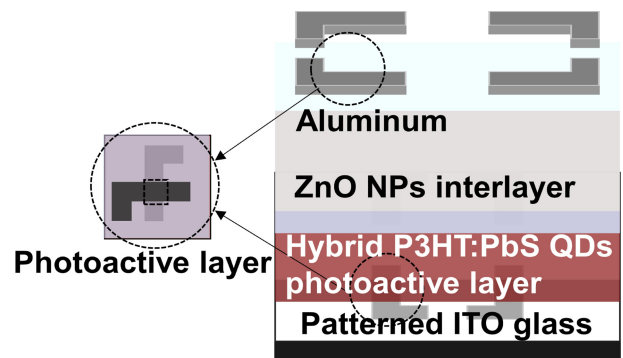


Fig. 1. Schematic diagram of structure fabricated device structure.

크기는 3 mm × 3 mm이고 이 영역에서 광활성이 진행되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 합성된 PbS QDs의 광학적 특성

광활성층으로 활용된 PbS QDs는 UV-VIS-IR spectrometer을 통해 그 흡광도를 측정하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 흡광도 스펙트럼이 두 개 있는데, 흑색 스펙트럼은 아무것도 도핑하지 않은 PbS QDs의 흡광도를, 적색 스펙트럼은 P3HT를 혼합시킨 PbS QDs의 흡광도를 나타낸 것이다. 보는 바와 같이, 두 스펙트럼은 1,410 nm에서 peak가 나타난 것을 확인할 수 있다. 이는 PbS QDs, 혼합된 P3HT:PbS QDs 둘 다 1,410 nm 영역대의 빛을 흡수하여 전자-정공 쌍이 생성된 것을 의미한다 [19]. 즉, SWIR 영역의 빛을 흡수한 것을 알 수 있고 이는 SWIR 수광소자로 활용하기에 충분한 특성을 보인 것을 그 의의로 둔다. 위의 방법대로 합성된 PbS QDs와 P3HT:PbS QDs의 크기는 대략 4.5-5.0 nm의 크기를 갖는다 [20].

3.2. 합성된 ZnO NPs의 광학적 특성

다음으로 ZnO NPs의 흡광도를 측정하였다. 측정장비는 PbS QDs와 동일한 UV-VIS-NIR spectrometer을 이용하였다. 본 연구는 ZnO NPs의 흡광도를 통해 ZnO NPs가 합성이 잘 되었는지 알아보기 위해서 진행되었다. 흡광도를 알아본 합성된 ZnO NPs는 에탄올과의 농도비가 30 mg/mL이다. Fig. 3에서 보는 것과 같이 약 325 nm의 영역에서 흡광도 peak가 나타났는데, 이는 자외선을 조사하였을 때 충분히 여기가 된 것을 알 수 있다. Kwon, et, al.의 논문을 참고하면, 40 mg/mL의 ZnO NPs에서 323.5 nm에서 흡광 peak가 나타났다고 보고된 바 있

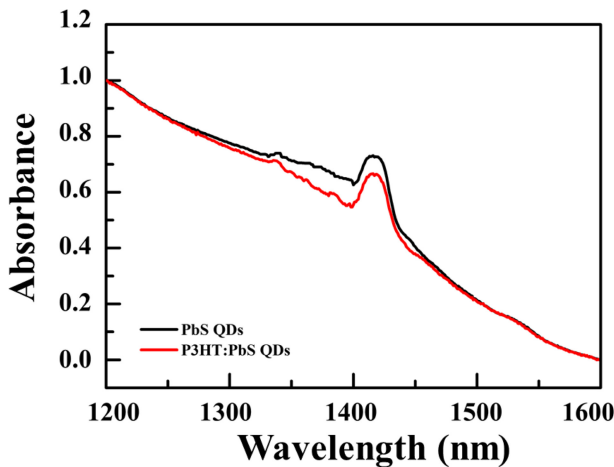


Fig. 2. The absorbance spectra of synthesized PbS QDs and hybrid P3HT:PbS QDs.

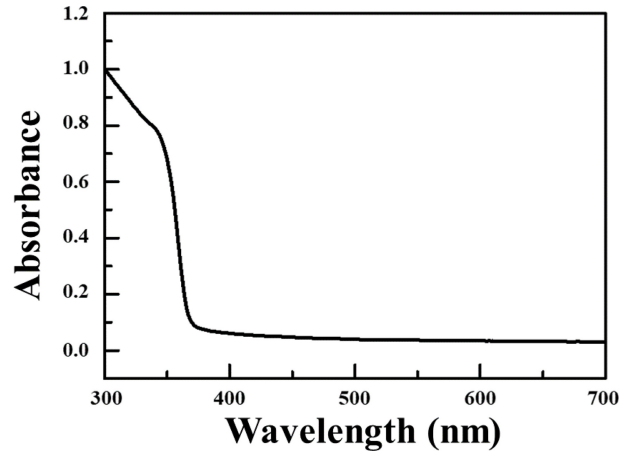


Fig. 3. The absorbance spectrum of synthesized ZnO NPs.

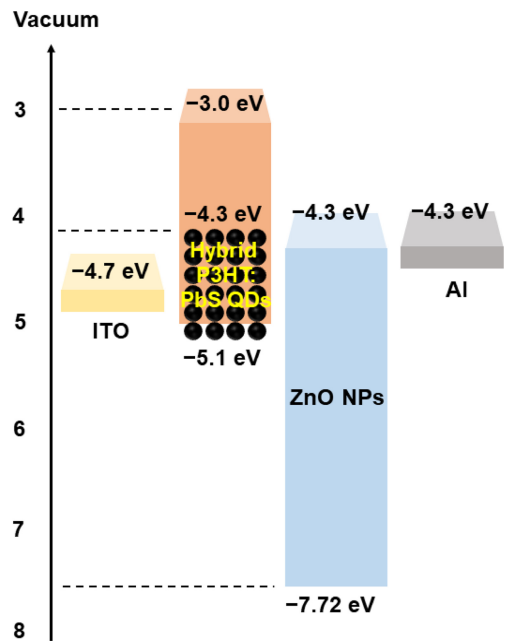


Fig. 4. Schematic diagram of the energy band diagram of the fabricated device.

고 그 크기는 약 4.8 nm이었다 [17]. 이는 에탄올 분산 농도비가 흡광 peak에는 영향을 주지 않았고 본 연구에서 활용된 20 mg/mL, 30 mg/mL, 40 mg/mL 농도비의 ZnO NPs는 모두 비슷하거나 같은 대역의 자외선을 흡수하여 전자 정공 쌍을 여기한 것을 의미한다.

3.3. 제작된 PbS QDs 소자의 전기적 특성

이번 연구에서는 각각 다른 20 mg/mL, 30 mg/mL, 40 mg/mL 농도의 ZnO NPs를 전자수송층으로 활용한 SWIR 수광소자를 제작하였고 그에 대한 전기적 특성을 분석하였다. Fig. 4는 제작된 소자의 에너지 밴드 다이어그램으로, P3HT와 PbS QDs가

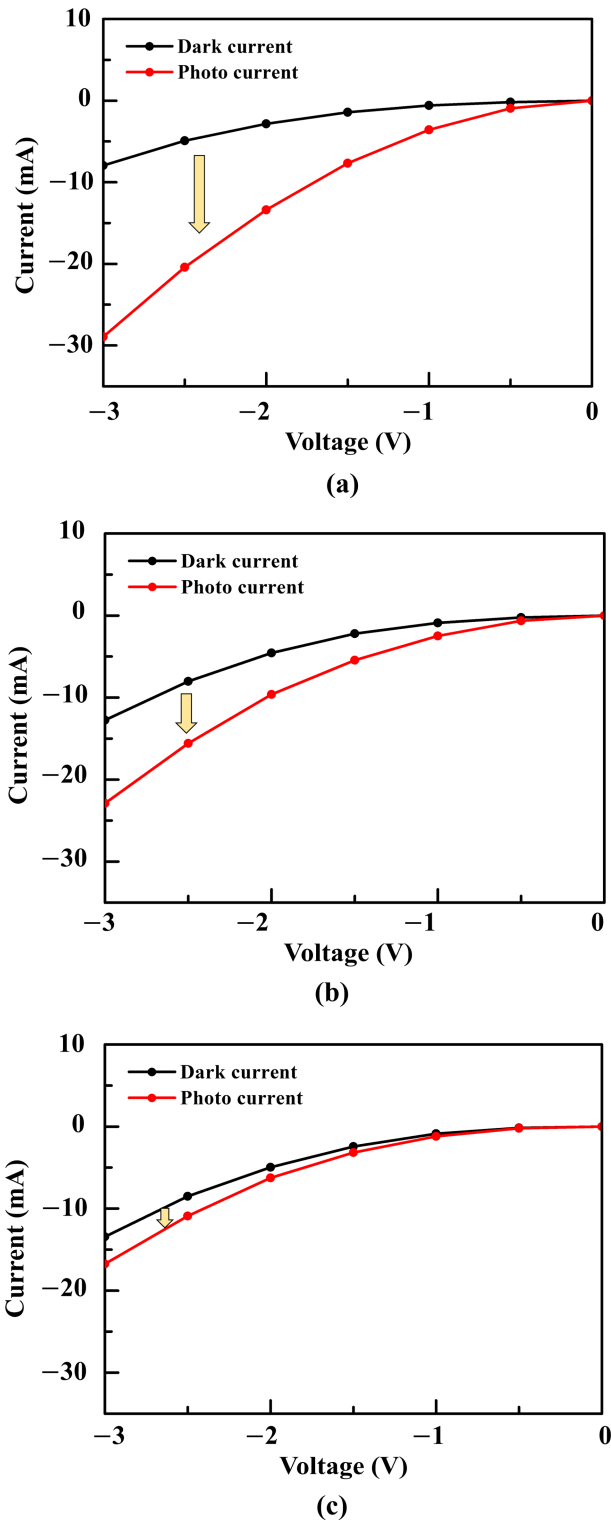


Fig. 5. I-V characteristics of fabricated SWIR photodetector (a) 20 mg/mL (b) 30 mg/mL (c) 40 mg/mL.

하나로 혼합되어 ZnO NPs, Al, ITO가 서로 밴드 정렬을 형성한다. 전기적 특성 분석에 활용된 광원은 텅스텐-할로겐 램프로 출력 세기는 1 W/m²이다. 전반적인 SWIR 수광소자는 소자에 빛을 조사하였을 때 광활성층에서 전자-정공 쌍이 생성되고 외부

전계에 의해 양극단으로 전하들이 추출되는 것을 그 작동원리로 한다. 제작된 소자는 포토 다이오드의 작동영역인 음전압 영역에서 어떻게 전류가 변하는지 역방향 전류 특성을 분석하였다. Fig. 5은 측정된 I-V 특성을 보여준다.

Fig. 5. (a), (b), (c)를 확인하면, 20 mg/mL 농도의 ZnO NPs가 전자수송층으로 형성된 소자에서 dark current 값이 -7.9 mA, photo current 값이 -29.0 mA가 나타난 것을 확인할 수 있다. 30 mg/mL의 ZnO NPs에서 dark current 값이 -12.7 mA, photo current 값이 -22.9 mA가 나타났고, 40 mg/mL에서 dark current 값이 -13.4 mA, photo current 값이 -16.7이 나타났다. 20 mg/mL 농도의 ZnO NPs 전자수송층이 형성된 소자에서 전류 차이가 가장 많이 발생하였고 ZnO NPs의 농도가 높아질수록 전류 차이가 적게 나타났음을 확인할 수 있다. 이는 용액의 농도가 높아질수록 박막으로 형성 시 소자의 전자이동도가 낮아진 것으로 사료된다 [21]. 한편 10 mg/mL농도의 ZnO NPs로 형성된 전자수송층은 20 mg/mL 농도의 ZnO NPs 전자수송층으로 형성된 수광소자보다 성능이 떨어진 전기적 특성을 보였다. 이는 10 mg/mL농도의 ZnO NPs 박막은 20 mg/mL보다 농도가 낮을지라도 전하농도가 너무 낮아 20 mg/mL보다 낮은 전기적 성능을 보였던 것으로 사료된다 [21]. 센서의 성능 중 중요한 척도 중 하나인 감도(sensitivity)를 평가하는 방법은 여러가지가 있는데, 그 중 하나는 dark current와 photo current의 변화 비율로 평가하는 것이다. 이는 photo to dark ratio인데, 공식은 다음과 같다 [13,22].

$$\text{Photo-to-dark ratio} = \frac{I_{\text{light}} - I_{\text{dark}}}{I_{\text{dark}}}$$

I_{dark} 는 수광소자에 흐르는 dark current값이고 I_{light} 는 photo current 값이다. I_{light} 에서 I_{dark} 를 빼서 순수 photo-induced current를 구하고 I_{dark} 으로 나누어 dark current대비 photo current의 변화율을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 음 전압 영역의 photo to dark ratio를 나타낸 것이다. -3 V 영역은 상대적으로 dark current 값이 다른 전압에 비해 높아 가장 낮은 photo to dark ratio를 나타냈다. 전압이 높을수록 더 큰 photo to dark ratio를 보였고 -1 V에서 20 mg/mL 농도의 ZnO NPs를 사용한 소자에서 그 값이 5를 보였다. 전반적으로 20 mg/mL 농도의 ZnO NPs를 사용한 소자에서 가장 우수한 전기적 성능을 보였고 20 mg/mL 농도의 ZnO NPs 층이 최적화된 박막임을 확인할 수 있었다.

3.4. 20 mg/mL ZnO NPs의 구조적 특성

가장 우수한 전기적 특성을 보였던 20 mg/mL 농도의 ZnO NPs 층의 두께를 확인하기 위해, FE-SEM 촬영을 하였다. 앞서 소개된 합성법 및 공정조건으로 제작된 20 mg/mL ZnO NPs 전자수송층은 두께가 약 9.92 nm였다. D. Pal et al. 연구팀은 원자층 증착을 통해 형성된 ZnO NPs층이 두께에 따라 전자밀도

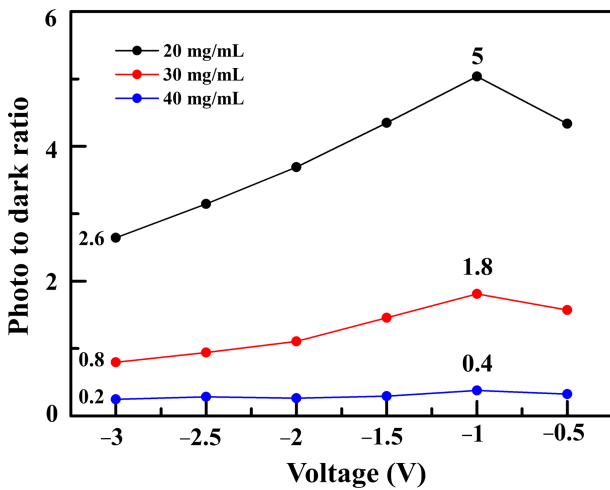


Fig. 6. Photo to dark ratio-voltage characteristics of the P3HT:PbS QDs SWIR photodetector with 20 mg/mL, 30 mg/mL and 40 mg/mL concentration of ZnO NPs layer.

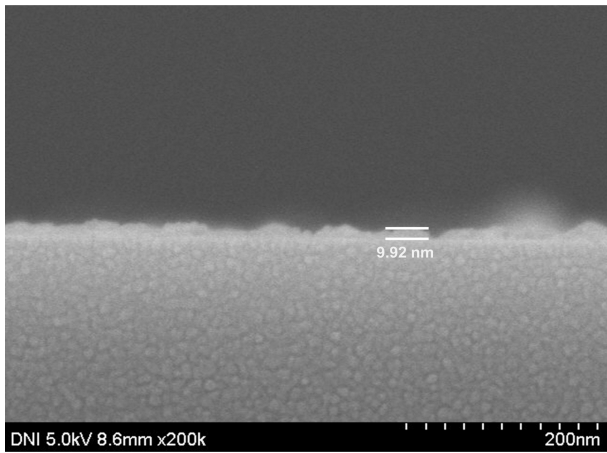


Fig. 7. FE-SEM image of the ZnO NPs layer formed from initial solution of ZnO NPs/EtOH (20 mg/mL).

가 증가한다는 것을 보고하였다. 특히 10 nm를 기준으로 전자 밀도의 증가율은 그 이하의 두께보다 낮았고 10 nm부터 ZnO NPs 층이 두꺼워짐에 따라 전자밀도가 일관되게 증가했다 [23]. 이는 박막의 두께가 소자 성능에도 영향을 준다는 사실을 뒷받침하고 용액농도에 따라 박막의 두께가 달라진다는 사실과 연관지을때, 추후 다른 농도에 따른 ZnO NPs 박막 두께 및 그에 따른 소자의 전기적 경향성을 탐구하는 것도 진행할 가치가 있는 연구일 것으로 본다 [9, 22]. Fig. 7은 이번 연구에서 활용된 20 mg/mL 농도의 ZnO NPs층의 FE-SEM 이미지이다.

4. 결 론

본 연구에는 P3HT:PbS QDs/ZnO NPs 단파장 적외선 수광소

자의 전기적 특성 향상에 있어 ZnO NPs 농도의 중요성을 다루었다. 연구에서 사용된 ZnO NPs의 농도는 20 mg/mL, 30 mg/mL, 40 mg/mL였고 20 mg/mL 농도에서 photo-to-dark ratio가 -1 V 기준 5로 가장 높은 값을 나타냈다. 용액의 농도가 높아질수록 전하이동도가 감소하는 특성과 너무 낮은 농도를 사용 시 열악한 성능을 보였음을 고려할 때, 20 mg/mL 농도의 ZnO NPs가 이번 연구에서 가장 최적화된 특성을 보여주는 용액이었다. 본 연구 결과를 바탕으로 ZnO NPs 층의 나노입자의 균일한 분산 연구 등의 추가적인 연구가 진행된다면, 보다 우수한 전기적 특성을 가지는 단파장 적외선 수광소자 개발이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2021R1A2C1011429).

REFERENCES

- [1] X. Zhao, L. Song, R. Zhao, and M. C. Tan, "High-Performance and Flexible Shortwave Infrared Photodetectors Using Composites of Rare Earth-Doped Nanoparticles", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 11, No. 2, pp. 2344-2351, 2019.
- [2] A. S. Upadhyaya and P. K. Bandyopadhyay, "Broad Band Antireflection Coating on Zinc Sulphide Window for Short-wave infrared cum Night Vision System", *J. Phys.: Conf. Ser.*, Vol. 390, p. 012018, 2012.
- [3] N. Zhang, Y. Hong, Q. Qin, and L. Liu, "VSDI: a visible and shortwave infrared drought index for monitoring soil and vegetation moisture based on optical remote sensing", *Int. J. Remote Sens.*, Vol. 34, No. 13, pp. 4585-4609, 2013.
- [4] M. A. Iqbal, A. Liaqat, S. Hussain, X. Wang, M. Tahir, Z. Urooj, and L. Xie, "Ultralow-Transition-Energy Organic Complex on Graphene for High-Performance Shortwave Infrared Photodetection", *Adv. Mater.*, Vol. 32, No. 37, p. 2002628, 2020.
- [5] G. Konstantatos, J. Clifford, L. Levina, and E. H. Sargent, "Sensitive solution-processed visible-wavelength photodetectors", *Nature Photon.*, Vol. 1, No. 9, pp. 531-534, 2007.
- [6] R.-M. Lin, S.-F. Tang, S.-C. Lee, and C. H. Kuan, "Improvement of current leakage in the InAs photodetector by molecular beam epitaxy", *J. Cryst. Growth*, Vol. 227-228, pp. 167-171, 2001.
- [7] Y. Wan, Z. Zhang, R. Chao, J. Norman, D. Jung, C. Shang, Q. Li, Mj. Kennedy, D. Liang, C. Zhang, J.-W. Shi, A. C. Gossard, K. M. Lau, and J. E. Bowers, "Monolithically integrated InAs/InGaAs quantum dot photodetectors on silicon substrate", *Opt. Express*, Vol. 25, No. 22, pp. 27715-27723, 2017.
- [8] S. Ghosh, K.-C. Lin, C.-H. Tsai, H. Kumar, Q. Chen, L. Zhang, B. Son, C. S. Tan, M. Kim, B. Mukhopadhyay, and

- G.-E. Chang, "Metal-Semiconductor-Metal GeSn Photodetectors on Silicon for Short-Wave Infrared Applications", *Micromachines*, Vol. 11, No. 9, p. 795, 2020.
- [9] K.-H. Seo, X. Zhang, S. Baang, J. Park, and J.-H. Bae, "Influence of Thickness of Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) Hole Transport Layer on Electrical Characteristics of Lead Sulfide Quantum Dot-Based Shortwave Infrared Photodiodes", *J. Korean Phys. Soc.*, Vol. 79, No. 5, pp. 512-520, 2021.
- [10] H. Zhao, M. Chaker, N. Wu, and D. Ma, "Toward controlled synthesis and better understanding of highly luminescent PbS/CdS core/shell quantum dots", *J. Mater. Chem.*, Vol. 21, No. 24, p. 8898, 2011.
- [11] I. Moreels, Y. Justo, B. D. Geyter, K. Haustraete, J. C. Martins, and Z. Hens, "Size-Tunable, Bright and Stable PbS Quantum Dots: A Surface Chemistry Study", *ACS Nano*, Vol. 5, No. 3, pp. 2004-2012, 2011.
- [12] R. Saran and R. J. Curry, "Lead sulphide nanocrystal photodetector technologies", *Nature Photon.*, Vol. 10, No. 2, pp. 81-92, 2016.
- [13] K.-H. Seo, J. Jang, I. Kang, and J.-H. Bae, "Improving of Sensitivity of PbS Quantum Dot Based SWIR Photodetector Using P3HT", *Materials*, Vol. 14, No. 6, p. 1488, 2021.
- [14] Z. Sun, J. Li, and F. Yan, "Highly sensitive organic near-infrared phototransistors based on poly(3-hexylthiophene) and PbS quantum dots", *J. Mater. Chem.*, Vol. 22, No. 40, p. 21673, 2012.
- [15] L.-H. Lai, M. J. Speirs, F.-K. Chang, L. Piveteau, M. V. Kovalenko, J.-S. Chen, J.-J. Wu, and M. A. Loi, "Increasing photon absorption and stability of PbS quantum dot solar cells using a ZnO interlayer", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 107, No. 18, p. 183901, 2015.
- [16] J. Tang, X. Wang, L. Brzozowski, D. A. R. Barkhouse, R. Debnath, L. Levina, and E. H. Sargent, "Schottky Quantum Dot Solar Cells Stable in Air under Solar Illumination", *Adv. Mater.*, Vol. 22, No. 12, pp. 1398-1402, 2010.
- [17] J. Kwon, S. Kim, J. Lee, C. Park, O. Kim, B. Xu, J. Bae, and S. Kang, "Uncooled Short-Wave Infrared Sensor Based on PbS Quantum Dots Using ZnO NPs", *Nanomaterials*, Vol. 9, No. 7, p. 926, 2019.
- [18] A. Abdelkrim, S. Rahmane, O. Abdelouahab, N. Abdelmalek, and G. Brahim, "Effect of solution concentration on the structural, optical and electrical properties of SnO₂ thin films prepared by spray pyrolysis", *Optik*, Vol. 127, No. 5, pp. 2653-2658, 2016.
- [19] S.-W. Kim, N.-R. Kim, J.-B. Kwon, J. K. Kim, D. G. Jung, S. H. Kong, and D. Jung, "Sensitivity enhancement of H₂ gas sensor using PbS quantum dots", *J. Sens. Sci. Technol.*, Vol. 29, No. 6, pp. 388-393, 2020.
- [20] W. Xu, H. Peng, T. Zhu, C. Yi, L. Liu, and X. Gong, "A solution-processed near-infrared polymer:PbS quantum dot photodetectors", *RSC Adv.*, Vol. 7, No. 55, pp. 34633-34637, 2017.
- [21] D. Pal, J. Singhal, A. Mathur, A. Singh, S. Dutta, S. Zollner, and S. Chattopadhyay, "Effect of substrates and thickness on optical properties in atomic layer deposition grown ZnO thin films", *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 421, pp. 341-348, 2017.
- [22] S.A. McDonald, G. Konstantatos, S. Zhang, P. W. Cyr, E.J. D. Klem, L. Levina, and E. H. Sargent, "Solution-processed PbS quantum dot infrared photodetectors and photovoltaics", *Nat. Mater.*, Vol. 4, No. 2, pp. 138-142, 2005.
- [23] S. Wang, H. Li, R. Lu, G. Zheng, and X. Tang, "Metal nanoparticle decorated n-type Bi₂Te₃-based materials with enhanced thermoelectric performances", *Nanotechnology*, Vol. 24, No. 28, p. 285702, 2013.