전기수력학젯 분산 기술을 이용한 아연-주석 산화물 박막트랜지스터의 인듐 도핑 효과

최운섭*

호서대학교 디스플레이공학과

Doping Effect of Indium on Zinc-tin Oxide Thin-Film Transistor Using Electrohydrodynamic Jet Spray Technology

Woon-Seop Choi*

Department of Display Engineering, Hoseo University, Asan 31499, Republic of Korea

Abstract: The effect of indium doping on zinc-tin oxide thin-film transistor was investigated using electrohydrodynamic (EHD) jet spray technology. EHD jet spray is a new and unique drop-on-demand patterning technology for printed electronics. After optimizing process parameters, the EHD jet spraying conditions were determined to be a voltage of 4.5 kV, a syringe speed of 0.032 $\mu\text{m/s}$, spraying time of 10 s, and a substrate temperature of 50 $^{\circ}\text{C}$. Indium doping increased metal-oxide formation in the thin-film, as confirmed by XPS. In addition, improved TFT electrical properties were obtained compared with non-doped TFTs by using EHD jet spray. A 0.1 M In-doped ZTO TFT showed a mobility of 7.40 $\text{cm}^2/\text{V s}$, a threshold voltage of -3.4 V, an on-to-off current ratio of 1.87×10^6 , and a sub-threshold slope of 1.2 V/dec. Improved hysteresis behavior of the TFT was also achieved by indium doping.

(Received January 22, 2019; Accepted March 5, 2019)

Keywords: EHD jet, spray, ZTO TFT, Indium doping

1. 서 론

산화물반도체는 공정의 용이성, 우수한 전기적 특성, 광학적 특성 등으로 인하여 최근에 매우 각광을 받고 있다 [1]. 이들은 무정형의 구조로 인하여 반도체내의 전자궤도의 겹침이 발생하여 무정형에서도 우수한 전기적 특성을 보여주고, 또한 넓은 밴드갭으로 인하여 광학적으로 투명한 소재로의 활용이 가능하다.

산화물 반도체에 사용되는 금속산화물은 IGZO, ZTO, IZO, In_2O_3 등의 다양한 성분계를 가지고 있다 [2]. 이들 중에 IGZO는 현재 LCD와 OLED용의 backplane에서 thin-film transistors (TFTs)의 반도체소재로서 사용되고 있다. 한편 ZTO는 최근에 연구가 되고 있는 금속산화물 반도체로서 상대적으로 저가의 재료인 Sn을 사용하여 원하는

전기적 특성을 얻을 수 있다 [3].

기존의 금속산화물을 사용하여 TFTs를 제작하는 경우에는 스퍼터링 (sputtering)이라는 진공 공정을 사용하여 원하는 금속산화물 박막을 얻을 수 있다. 최근에는 유연성 디스플레이의 개발이 진행되고 있으며, 이들의 초기 형태로는 휴대폰에 사용하는 엣지 (edge) 형태의 디스플레이가 있고, 접이식 (foldable) 디스플레이를 활용한 휴대폰이 곧 상용화 될 예정이다. 진정한 유연성을 부여한 디스플레이에 사용하기 위해 유연성 backplane을 개발하여야 하며, 이 경우에는 유연성기판에 적용이 가능한 박막형성 기술들이 필요하다.

유연성 디스플레이용 backplane 기판을 위한 공정으로는 일반적으로 inkjet이나 electrohydrodynamic (EHD) jet 등의 새로운 공정을 통하여 박막형성이 가능하다 [4,5]. 이러한 인쇄공정을 사용하는 경우에는 패턴의 형성을 위하여 광 리소그래픽 (photo-lithography)이 필요하지 않기에 재료, 비용, 그리고 시간을 절약할 수 있는 친환경 공정으로서 많은 장점을 가지고 있다.

- 최운섭: 교수

*Corresponding Author: Woon-Seop Choi

[Tel: ++82-41-540-5924, E-mail: wschoi@hoseo.edu]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

Table 1. Electrical properties of In-doped ZTO TFTs with various indium concentrations.

In		Substrate temperature	Mobility ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	On/Off current ratio (A)	V_{th} (V)	S-S (V dec^{-1})
ZTO		25 °C	0.74	4.53×10^4	17.0	0.5
		50 °C	2.90	5.23×10^5	7.3	0.5
		75 °C	4.98	1.89×10^6	9.2	3.0
InZTO	0.025M	25 °C	3.90	1.62×10^6	8.2	2.5
	0.025M	50 °C	4.70	2.44×10^6	5.1	2.5
	0.025M	75 °C	3.61	3.10×10^4	-1.0	5.0
InZTO	0.075M	25 °C	3.74	5.23×10^6	3.7	1.0
	0.075M	50 °C	5.21	1.57×10^6	-2.2	1.9
	0.075M	75 °C	5.28	5.95×10^5	-10.9	2.7
InZTO	0.100M	25 °C	5.50	1.48×10^5	-9.7	2.5
	0.100M	50 °C	7.40	1.87×10^6	-3.4	1.2
	0.100M	75 °C	5.70	6.93×10^4	-3.2	6.5

한편 EHD jet은 용액의 토출 (jetting)을 위한 노즐 속의 용액에 압력을 가하며, 노즐과 기판 사이에 높은 전압을 인가 하여 인쇄를 하는 최신 기술로서, 필요한 곳에만 선택적으로 박막을 코팅 할 수 있는 (drop-on-demand, DOD) 기술이다. 일반적인 다른 용액공정이나 인쇄공정에 비교하여 EHD jet 인쇄공정은 단순하고, jetting 조절가능하고 저가격의 공정으로 매크로 (Macro)에서 나노수준까지의 다양한 형태의 패턴과 연속적인 박막형성, 그리고 고해상도의 패턴을 제작할 수 있다 [6]. 최근에 본 연구실을 중심으로 용액공정에 의하여 ZTO 박막을 형성하여 TFT를 제작하는 연구가 많이 이루어 지고 있다. 본 연구실에서는 ZTO를 inkjet printing과 EHD jet printing를 이용하여 금속산화물 TFT를 제작하였다. Lee 등은 ZTO TFT를 inkjet의 공정최적화를 통하여 제작하였고 200 °C 저온에서 매우 우수한 전기적 특성을 얻었다 [7]. Lee등은 처음으로 EHD jet을 이용한 ZTO TFT를 제작하여 그 패턴형성의 특성과 전자소자로서의 가능성을 조사하였다 [8]. 또한, EHD jet spray를 이용하여 ZTO TFT를 보고하였다 [9]. 최근에는 EHD jet spray 기술을 이용하여 quantum dots을 분산 코팅하여 QD-LED를 제작하는 연구도 보고되었다 [10].

한편 용액공정을 이용한 ZTO에서는 많은 산소공핍 (oxygen vacancies)으로 인하여 전자소자로 적용시에 전기적특성을 가지지 못하는 경우가 있기에 다량의 산소공핍을 제어 하기 위하여 여러가지 이온을 도핑하는 연구도 진행되고 있다 이러한 산소공핍을 제어하는 것으로는 Ga, Zr, Al, Hf등이 사용되고 있다 [11-13]. 한편, 도핑에의한 특성도 서로 다른 결과를 보고한 경우도 있는데, Zr을 도핑한

경우에는 연구보고에 따라서 ZTO TFTs의 전기적 특성을 오히려 낮추는 경우도 있었고 [14], 또 다른 연구는 Zr의 도핑농도를 잘 조절하여 전기적 특성을 향상 시킨 보고도 있다 [15].

EHD jet을 이용하여 산화물 반도체를 연구한 보고는 있으나, 도핑에 의한 효과를 연구한 경우는 아직 보고되고 있지 않았다. 따라서 본 연구에서는 금속 산화물 반도체에서 전기적 특성에 많은 영향을 끼치는 인듐 (In)을 도핑하여 산화물반도체를 EHD jet spray 기술로 제작하여 그 특성을 조사하고자 한다.

2. 실험방법

반도체 용액의 제조를 위하여 zinc acetate dihydrate ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 99.999%), 와 tin chloride (SnCl_2 , 98%)를 0.3M 용액으로 하여 2-methoxyethanol ($\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$, 99.8%)에 용해 시키고 acetylacetone 을 안정제로 첨가하여 60 °C에서 6시간 교반하여 ZTO용액을 제조하였다. 이들 용액에 In의 도핑을 위하여 0.0125에서 0.15 M의 indium nitrate hydrate ($\text{In}(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, 99.99%)를 ZTO 용액에 첨가하여 도핑된 용액을 제조하였다.

EHD jet printer는 그림 1에서와 같은 구성을 가지고 있다. 인쇄용 용액을 넣은 실린지를 노즐위에 놓고 미세조정이 가능한 펌프로 일정한 압력을 부여하며 이들의 노즐과 기판사이에 고전압을 인가하여 전위차를 주면 노즐 끝에서 토출(jetting)과 분산(spray)이 일어나게 되고 이러한 과정은 고속 카메라로 관찰이 된다. 기판은 상하(z-axis) 및 좌우(x-, y-axis)로의 이동이 가능한 구동축(driving stage)

Fig. 1. Schematic EHD jet printer spraying system

Fig. 2. Schematic bottom-gate and top-contact TFT structure.

위에 설정되어 있고 인쇄되는 전 과정은 컴퓨터로 제어 가능하다. 이때, 다양한 공정변수로서 노즐과 기판 간격, 이들 사이의 전압, 용액의 토출을 위한 미세펌프의 속도, 그리고 토출되는 시간등을 조정하였다.

산화물 실리콘이 있는 실리콘웨이퍼 기판을 150 W에서 산소플라즈마로 약 10분간 처리하여 표면을 개질하고, InZTO용액을 코팅하기 위하여 온도 25, 50, 그리고 75 °C에서 처리된 기판위에 EHD jet 장비를 사용하여 분산(spray)하였다. 박막의 형성을 위하여 초기 열처리 (soft baking, 100 °C, 3분) 하여 용매를 증발시키고 난 후에 400 °C에서 1시간 열처리 (hard baking)를 행하였다. 이후에 열증착기를 이용하여 10^{-6} Torr 에서 알루미늄으로 source-drain (S/D) 전극을 형성하여 bottom-gate와 top-contact TFT를 제작하였다 (그림 2). 이때의 채널의 길이는 100 μm 이고 채널의 길이와 폭의 비율은 1:15이다.

형성된 박막의 특성평가를 위하여, TG/DSC 분석과 X-ray photoelectron spectroscopy (XPS, Thermo VG ESCA Sigma Probe) 분석을 15 kV, 100 W에서 진행하였다. XPS 시료는 전처리 sputtering을 하였으며, Al K α 단파장을 사용하였고, C 1s (285 eV)을 사용하여 교정(calibration) 하였다. 제작된 TFT의 특성 평가를 위하여 parameter analyzer (Kiethley 4200)를 사용하여 암실에서

전기적 평가를 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1에서와 같은 구성의 EHD jet 공정을 검토하면, 도출 용액과 노즐과 기판 사이에 가해지는 전압에 따라 용액의 토출 상태가 매우 다양하게 전개 될 수 있다. 용액을 주사기모양의 도출 용기에 넣고 노즐을 부착하여 장비에 고정한다. 미세펌프로 용액에 압력을 가하면 용액이 매우 천천히 내려와 노즐의 끝에 모이게 된다. 이때 용액의 표면장력에 따라서 노즐에 생성되는 액적의 모양이 이루어진다. 약간의 압력을 더 가하면 용액이 서서히 내려오게 되고, 이때 노즐과 기판 사이에 고전압을 인가 시키면, 가해지는 에너지가 용액의 표면장력 보다 커지게 되면, 용액의 액적이 변형되면서 기판으로 향하여 용액의 토출이 시작된다. 가해지는 전압이 증가하면 토출되는 용액이 가늘어지기 시작하고, 전압을 증가하여 약 2.5 kV 내외가 되면서부터는 일정하게 토출이 진행되는 cone jet mode가 된다. 전압을 더 높이면 가늘게 토출되는 용액의 흐름이 영향을 받아 사방으로 뿌려지는 듯 흩어지게 되는데, 이러한 현상이 다중 토출이 되는 상태가 된다. 이후에 전압의 인가됨에 따라서 미세한 spray가 이루어지게 되고, 일정한 spray를 얻기 위하여는 약 4.0 kV 이상의 전압을 필요로 한다. 본 연구에서 사용한 EHD jet에 의한 spray mode 조건은 노즐과 기판 사이의 거리는 10 mm, 그 사이에 부과되는 전압은 4.5 kV, 용액에 가해지는 압력은 0.032 $\mu\text{L/s}$ 에서 10초 동안 spray를 진행하였다.

제조된 InZTO용액의 열 분석을 위하여 약 80 °C에서 48시간 용매를 증발시켜서 TG/DSC 시료를 준비하였다. 그림 3는 TG/DSC thermogram을 보여주고 있다. 첫번째 피크가 약 130 °C부근에서 발열피크로 나타난다. 이는 용매로 사용되는 2-methoxyethanol의 증발에 의하여 나타나는 것으로 TGA에서도 중량의 감소가 같이 일어난다. 이후에는 약 320 °C 부근에서 약하게 발열피크 (exothermic peak)가 나타나는데, 이는 유기물등의 분해로 인하여 나타나는 것으로 이때부터 금속산화물 (metal-oxide)의 networking이 발생하기 시작되는 것으로 판단된다. 따라서 dehydroxlation에 의하여 금속산화물 결합이 강화되면서 박막의 밀도도 증가하여 InZTO 박막이 형성되는 것으로 판단된다. 한편 본 반응에서는 이전의 In $_2$ O $_3$ 합성에서와 같은 자기연소 (self combustion)에 의한 저온 발열 반응은 없다. In $_2$ O $_3$ 의 용액공정에서는 다량의 In이 연료인 2-methoxyethanol과의 반응으로 발생한다 [7]. 따라서, 본 연

Fig. 3. DSC/TGA thermogram of In-doped ZTO thin film.

구에서는 In의 양이 상대적으로 적게 도핑되었기 때문에 자기연소반응은 발생하지 않는 것으로 사료된다.

박막의 원소구성에 대한 연구를 위하여 그림 4와 같이 XPS 분석을 하였다. InZTO 박막의 O 1s core shell의 XPS spectra를 살펴 보면, 세개의 peaks로 fitting되어 나타난다 [7,8]. 가장 낮은 결합peak는 529.7 eV 부근에 나타나며, 이는 금속산화물내의 metal인 Zn와 Sn간의 Zn-Sn 결합과 관련되는 O_2^- 이온(OM)에 의하여 나타나는 것이다. 두번째의 낮은 결합피크는 530.8 eV 이며, 이는 산소의 공핍영역 (oxygen-deficient region)과 연관된 O_2^- 이온 (VAC)에 의하여 나타나는 것이고, 마지막으로 가장 높은 결합피크는 531.6 eV 부근에 나타나며, 이는 표면에 수분이나 산소등의 결합으로 관련되는 헐겁게 결합되어 있는 산소원소 (OH)에 관련된 것이다. 한편 금속결합과 관련된 O 1s core shell은 OM/(OM+VAC+OH)로 나타낼 수 있으며, 전체의 O 1s core shell에서 금속-산화물과 관련된 부분의 양을 나타낸 것이다. EHD jet print에 의하여 생성된 경우에는 그 부분이 약 83%로서 기존의 연구보다 금속-산화물 결합이 많은 것으로 나타났고, 이는 In 도핑에 의한 영향으로 사료된다. 일반적으로 금속-금속간의 결합력과 금속-산화물간의 결합력은 소성온도에 따라 증가하는 것으로 알려져 있으며, 이들의 결과는 전기적 특성에서도 좋은 결과를 나타낸다. XPS 분석에서 다른 유기물 등은 나타나지 않는데, 이는 소성과정에서 완전히 제거되었기 때문이다.

InZTO를 EHD jet의 spray 방법으로 박막을 형성하고 소스와 드레인 전극 (source-drain electrodes)을 열증착하여 TFT를 제조하였다. 반도체 활성층을 상대적으로 낮은 온도인 300-400 °C의 저온에서 소성하였을 경우에는 transfer curve의 특성을 살펴보았다. 소성온도가 300 °C에서는, In를 0.01 M과 0.05 M을 도핑하였을 경우에 TFT의 이

Fig. 4. XPS spectra of O1s core-shell of In-doped ZTO thin-film.

동도가 약 $1 \text{ cm}^2/\text{V s}$ 정도로 만족할 만한 결과를 얻지 못하였다. 이는 TG/DSC 분석에서 살펴본 것 같이 약 300 °C 이상에서 exthothermic 반응이 일어나는 것으로 반도체층의 형성에 충분한 소성온도가 아님을 알 수 있다. 소성온도를 350 °C로 하였을 경우에는 TFT의 이동도가 증가하여 약 $3.40 \text{ cm}^2/\text{V s}$ 를 나타내었으나 다른 특성 값은 상대적으로 낮았다. 이는 금속-산화물의 형성이 충분하게 이루어지지 않았고, 많은 유기물등이 박막내에 존재하기 때문이다. 따라서 소성온도를 400 °C에서 행하여 보다 나은 전기적특성 값을 얻을 수 있었다.

그림 5는 0.1 M의 In을 도핑하여 InZTO를 제작하였을 때, EHD jet spray시에 기판의 온도에 따른 TFT의 전기적 특성을 살펴보았다. 표1에서 보면 기판의 온도가 50 °C에서는 이동도는 $7.40 \text{ cm}^2/\text{V s}$, 문턱전압은 -3.2 V, 전류비(on-to-off current ratio)는 6.93×10^4 , 그리고 sub-threshold slope는 1.2 V/dec이다. Transfer curve에 따른 전기적특성 값에서는 기판의 온도가 25 및 50 °C에서 제작한 경우가 75 °C에서 제작한 것 보다도 우수함을 알 수 있다.

기판 온도가 증가할수록 off current 상승에 따른 on-to-off ratio 감소가 나타나는데, 한편 ZTO TFT에서는 이와는 반대로 온도 증가에 따라 on-to-off ratio가 증가하는 경향도 보인다. 이것은 아마도 In의 도핑에 의한 영향으로 보여진다. 또한 기판 온도가 증가할수록 on current도 상승하지만 off current 상승 폭이 더 크기 때문에 on-to-off ratio 감소가 되고 있다. 기판 온도가 증가할수록 이동도와 S-S값도 증가하는데, 25 °C에서 50 °C로 기판온도를 상승

Fig. 5. (a) Transfer characteristics with substrate temperatures and (b) output characteristics of 0.100 M In-doped ZTO TFT using EHD jet spray.

시에는 이동도의 향상이 크게 나타나고, S-S 값도 향상되는 등 전반적인 전기적 특성이 가장 우수하게 나타난다. 기판온도가 75 °C에서는 미미한 수준의 이동도 차이가 보이고, 다른 특성의 개선은 상대적으로 적은 것을 알 수 있다. 이는 기판의 온도가 많이 오르게 되면, EHD jet spray에 의하여 분산되는 액적이 기판에 닿아서 박막을 형성할 충분한 시간을 갖지 못하고 용매의 휘발이 보다 빠르게 이루어 지기 때문으로 사료된다. 따라서 전기적 특성이 가장 좋은 기판온도는 50 °C이기에 이후의 실험은 이를 기준으로 진행하였다. 한편 output curve는 대체적으로 양호한 특성을 보여주고 있다. 소스와 드레인 전극에서의 접촉

저항이 발생되지 않으며, 초기의 선형영역에서의 드레인 전류의 거동이 잘 이루어지고 있으며 견고한 포화전류 특성(solid saturation current)를 나타낸다.

그림 6a와 표 1은 기판온도가 25 °C 및 50 °C에서의 indium 도핑농도 0.025, 0.075, 0.100 M에서의 TFT transfer 특성을 보여준다. 기판온도가 50 °C의 경우가 25 °C의 경우보다 우수한 특성값을 가지는 것을 알 수 있다. 기판온도 50 °C에서 각 농도에 따른 TFT 특성값을 보면 도핑농도가 0.025 M에서는 이동도는 $4.70 \text{ cm}^2/\text{V s}$, 문턱전압은 5.1 V, 전류비(on-to-off current ratio)는 2.44×10^6 , 그리고 sub-threshold slope는 2.5 V/dec이다. 도핑농도가 0.075 M에서는 이동도는 $5.21 \text{ cm}^2/\text{V s}$, 문턱전압은 -2.2 V, 전류비는 1.57×10^6 , 그리고 sub-threshold slope는 1.95 V/dec이다. 도핑농도 0.100 M에서는 이동도는 $7.40 \text{ cm}^2/\text{V s}$, 문턱전압은 -3.4 V, 전류비(on-to-off current ratio)는 1.87×10^6 , 그리고 sub-threshold slope는 1.2 V/dec이다. 한편, 도핑을 하지 않은 경우에는 이동도는 $2.90 \text{ cm}^2/\text{V s}$, 문턱전압은 7.3 V, 전류비(on-to-off current ratio)는 5.23×10^5 , 그리고 sub-threshold slope는 0.5 V/dec이다. In를 도핑한 경우에는 도핑을 하지 않은 경우와 비교하면 이동도와 문턱전압, 그리고 전류비에 있어서 우수한 특징을 나타낸다. 그러나 S-S 값은 그 기울기가 낮아지는 것을 알 수 있다. 이것은 이동도가 높은 In이온의 도핑으로 반도체의 특성에서 보다 전도체의 특성으로의 변화가 일어나는 것으로 여겨지고, on-to-off 전류비는 증가되나 transfer curve의 기울기에 따른 반도체특성은 줄어드는 것으로 사료된다. 따라서 In의 도핑에 의하여 전기적특성은 개선되고 있음을 알 수 있는데 이는 금속-산화물의 비율이 향상되었기 때문으로 사료된다.

그림 6b는 EHD jet spray 공정으로 제작된 ZTO TFT와 InZTO TFT에서의 hysteresis 특성을 비교한 것이다. 게이트 전압을 양의 방향으로 인가하고 난 후에 다시 음의 방향으로 인가하여 측정한 결과이다. TFT에서의 hysteresis 특성을 나타내는 원인은 여러 가지가 있다. 시계방향으로 일어나는 히스테리시스(반도체와 게이트 절연체사이의 계면에나 그 부근에서 발생하는 전자의 트랩(trap)이나 또는 산화물 반도체의 채널 내부에서 생성되는 전자의 트랩에 의한 것이다. 흥미로운 곳은 EHD jet에 의하여 제작된 ZTO TFT에서는 시계방향의 hysteresis가 약간 나타나지만, 도핑에 의하여 제작된 InZTO TFT의 경우에는 거의 hysteresis 현상이 나타나지 않는 것으로 나타났다. 따라서 EHD jet의 spray 기술을 이용하여 제작된 ZTO 산화물반도체에서 In을 도핑 하므로 향상된 전기적 특성을 얻을 수 있었다.

Fig. 6. Effect of In-concentrations on (a) transfer characteristics and (b) hysteresis behaviors at substrate temperatures of 500°C of In-doped ZTO TFTs using EHD-jet spray.

4. 결 론

EHD jet spray의 기술을 이용하여 In 도핑에 따른 ZTO TFT의 특성을 살펴보았다. EHD jet의 공정변수를 최적화 하였고, 박막의 형성을 위한 기판의 온도에 따른 영향과 소성온도를 살펴보았다. In의 도핑농도는 0.025-

0.100 M에 따른 TFT특성을 기판 온도별로 확인하였다. 농도와 기판 온도에 따라 전기적특성 값이 상승하였고, 0.1 M을 도핑하였을 경우에 이동도 $7.40 \text{ cm}^2/\text{V s}$, 문턱전압 -3.4 V , on-to-off 전류비 1.87×10^6 , 그리고 S-S는 1.2 V/dec 를 얻었다. In 도핑에 의한 ZTO TFT특성 향상 및 히스테리특성이 개선된 결과를 얻었다.

REFERENCES

1. J. F. Wager, *Science* **300**, 1245 (2003).
2. S. J. Kim, S. H. Yoon, and H. J. Kim, *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 02BA02 (2014).
3. J. S. Lee, Y. J. Kwack, and W.-S. Choi, *J. Korean Phys. Soc.* **59**, 3055 (2011).
4. W.-S. Choi, *Korean J. Met Mater.* **57**, 170 (2019).
5. Y.-J. Kwack and W.-S. Choi, *IEEE J. Display Tech.* **12**, 3 (2016).
6. J. U. Park, M. Hardy, S. Kang, K. Barton, K. Adair, D. K. Mukhopadhyay, C. Lee, M. S. Strano, A. G. Alleyne, J. G. Georgiadis, P. M. Ferreira, and J. A. Rogers, *Nat. Mater.* **6**, 782 (2007).
7. J. S. Lee and W.-S. Choi, *ACS Appl. Mater. Inter.* **5**, 11578 (2013).
8. Y. Lee and W.-S. Choi, *ACS Appl. Mater. Inter.* **6**, 11167 (2014).
9. Y.-J. Kwack and W.-S. Choi, *Electron. Mater. Lett.* **8**, 341 (2012).
10. T. C. Nguyen, T. T. T. Can, and W.-S. Choi, *Opt. Mater. Express* **8**, 3738 (2018).
11. J. Y. Choi, S. S. Kim, and S. Y. Lee, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 022109 (2012).
12. P. T. Tue, T. Miyasako, J. Li, H. T. C. Tu, S. Inoue, E. Tokumitsu, and T. Shimoda, *IEEE T. Electron Dev.* **60**, 320 (2013).
13. H. J. Jeon, W. J. Maeng, and J. S. Park, *Ceram. Int.* **40**, 8769 (2014).
14. Y. S. Rim, D. L. Kim, W. H. Jeong, and H. J. Kim, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 233502 (2010).
15. H. Kim and W.-S. Choi, *J. Nanoelectron. Optoe.* **11**, 198 (2016).