

이산화탄소를 이용한 ZTO 박막의 이동도와 안정성 분석

오테레사[†]
청주대학교 반도체공학과

Element Analysis related to Mobility and Stability of ZTO Thin Film using the CO₂ Gases

Teresa Oh[†]

Department of Semiconductor Engineering, Cheongju University, Cheongju 28503, Republic of Korea

(Received April 19, 2018 : Revised November 30, 2018 : Accepted November 30, 2018)

Abstracts The transfer characteristics of zinc tin oxide(ZTO) on silicon dioxide(SiO₂) thin film transistor generally depend on the electrical properties of gate insulators. SiO₂ thin films are prepared with argon gas flow rates of 25 sccm and 30 sccm. The rate of ionization of SiO₂(25 sccm) decreases more than that of SiO₂(30 sccm), and then the generation of electrons decreases and the conductivity of SiO₂(25 sccm) is low. Relatively, the conductivity of SiO₂(30 sccm) increases because of the high rate of ionization of argon gases. Therefore, the insulating performance of SiO₂(25 sccm) is superior to that of SiO₂(30 sccm) because of the high potential barrier of SiO₂(25 sccm). The ZTO/SiO₂ transistors are prepared to research the CO₂ gas sensitivity. The stability of the transistor of ZTO/SiO₂(25 sccm) as a high insulator is superior owing to the high potential barrier. It is confirmed that the electrical properties of the insulator in transistor devices is an important factor to detect gases.

Key words ZTO, depletion layer, insulator, capacitance, SiO₂.

1. 서 론

실리콘 혹은 실리콘 산화박막을 대신할 수 있는 zinc oxide(ZnO), indium gallium zink oxide(IGZO), ZTO, indium tin oxide(ITO) 등 반도체 소자를 만들기 위한 신소재 물질들이 등장하고 있으며, 이러한 박막은 무독성, 내식성, 내방사성, 내열성의 장점이 있다고 알려져 있으며 작고 투명할 수 있다는 특성 때문에 최근에 많은 연구가 이루어지고 있다.¹⁻⁴⁾ 특히 ZnO는 3-5족 화합물 반도체로 육방정계 우르자이트(hexagonal wruzite)의 결정 구조를 가지며, 상온에서 3.37 eV의 넓은 밴드갭 에너지를 가지기 때문에 전자소자에 적용하기 좋은 장점이 있다. 하지만 박막의 두께가 수 nm 수준으로 얇아짐에 따라서 투명해질 수 있는 장점은 전자나 양전하의 캐리어들이 존재할 수 있는 공간에 제한을 받기 때문에 상대적으로 도핑하기에 어려운 단점이 생기게 된다.⁵⁻⁷⁾ 불순

물도핑에 의한 캐리어의 감소는 전도성을 떨어뜨리기 때문이다. 기존의 실리콘 기반의 확산공정을 필요로 하는 metal oxide semiconductor(MOS) 트랜지스터를 이용하는 전자소자들은 도핑캐리어들의 농도가 높을수록 전도성이 증가하였다. 따라서 고농도 도핑기술에 대한 연구가 이루어져왔다. 하지만 투명박막에서는 절대적으로 고농도도핑이 힘들다. 그럼에도 불구하고 캐리어가 낮아도 전도성이 우수해지는 연구결과들이 등장하고 있다.⁸⁾ 불순물 도핑에 의한 전자소자에서는 오믹접합에 대한 연구가 많다. 저항을 낮추기 위해서 고농도도핑을 이용하는 기술에서 오믹접합은 중요하게 다루어진다.⁹⁻¹¹⁾ PN 접합이론은 반도체소자에서 공핍층이 생기는 원리를 잘 설명해 준다. 공핍층의 형성은 쇼키접합으로 설명이 되며, 투명하고 얇고 작은 전자소자에서 쇼키접합에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 게이트 절연박막이 들어가는 박막 트랜지스터 구조는 이러한 공핍층에 대한 연구에 적합

[†]Corresponding author

E-Mail : teresa@cju.ac.kr (T. Oh, Cheongju Univ.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://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.

한 구조라고 볼 수 있다. 일반적으로 반도체 개스센서는 히터를 필요로 하며, 기판위에 박막을 증착하고 그 위에 헤어콤 형태의 금속배선에 만들어서 구성한다. 그리고 개스를 흘려보냈을 때 통하는 전류의 양을 측정하여 센서를 만들었다.¹²⁾ 트랜지스터를 구성하여 센서로 사용하는 방법은 시도된 바가 없다.

본 연구는 게이트 절연막의 절연특성에 따라서 ZTO 박막 트랜지스터의 전달특성이 달라지는 효과를 이용하여 가스센서에 필요한 공정요소를 분석한다. 게이트 절연막으로 쓰이는 SiO₂에 변화를 주기위해서 아르곤 가스유량을 다르게 하여 이온화량을 조절하며, 절연특성이 차이나도록 구성한다. 아르곤 가스가 많은 경우 플라즈마에너지에 의하여 이온화되는 양이 많아지게 되면 전자가 증가하게 되고 절연박막에서 절연특성은 감소하게 된다. 게이트 절연박막의 절연특성이 우수해지려면 공핍층의 형성되고 전위장벽이 커지는 경우이며 이때 절연성이 증가된다. 절연박막에 따른 트랜지스터의 전기적인 특성들을 분석하여 가스센서를 제작할 때 필요한 기술 요소에 대하여 조사한다.

2. 실험 방법

SiO₂ 박막은 게이트절연막으로 사용하기 위하여 스퍼터링 장비를 사용하여 증착하였다. 플라즈마의 품질을 다르게 하기 위해서 아르곤 가스 유량은 25 sccm과 30 sccm으로 30분 동안 증착하여 SiO₂ 박막의 특성이 다른 2가지 특성의 절연박막을 준비하였다. 각각의 절연박막의 특성을 비교 분석하였다. 절연특성에 따른 트랜지스터의 전도성을 조사하기 위해 SiO₂ 박막 위에 ZTO 채널을 10분 동안 스퍼터링 방법으로 증착하였으며, 150도에서 10분 동안 진공 중에서 열처리를 실시하여 트랜지스터를 제작하고 전달특성을 측정한 후 비교분석 하였다. 박막의 증착조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Condition for ZTO processes and annealing methods.

Substrate	p-Si
Target	ZTO, SiO ₂
Equipment	rf magnetron sputtering
Initial vaccum	3*10 ⁻³ Torr
High vaccum	5*10 ⁻⁵ Torr
Vaccum during the deposition	1.2*10 ⁻² Torr
Gas for plasma	Argon 20 sccm for ZTO Argon 25 sccm, 30 sccm for SiO ₂
Time	10 minute
Annealing temperature, time,	150 °C 10 Min. in a vacuum

3. 결과 및 토론

전자소자의 전기적인 특성에서 전도성에 영향을 미치는 특성과 안정성에 대하여 조사하였다. 트랜지스터의 비교를 위하여 절연박막으로 SiO₂ 박막을 증착하는데 아르곤 가스의 유량을 다르게 하여 이온화 반응에 변화를 주었다. 아르곤 가스가 많은 경우 이온화 반응에 참여하는 가스가 많아지게 되므로 따라서 전자가 많은 SiO₂ 박막이 형성되며, 아르곤 가스가 적은 경우 반응 개스가 상대적으로 줄어들기 때문에 전자의 발생도 줄어들게 된다.

Fig. 1은 아르곤 가스의 유량이 다른 경우 증착되는 SiO₂ 박막의 전기적인 특성을 보여준다.

전류전압특성을 살펴보면 아르곤 가스의 유량이 적은 경우 전류가 거의 흐르지 않은 것으로 나타나며, 아르곤 가스의 유량이 많은 경우 음의 전압방향으로 음전류의 발생이 크게 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 1(c)와 1(d)는 커패시턴스를 보여준다. 아르곤 가스의 유량이 많은 경우 SiO₂ 박막의 커패시턴스도 크게 증가하였다. 하지만 아르곤 가스의 유량이 적은 경우 커패시턴스의 값이 진공현상이 나타났으며, 커패시턴스 값도 낮았다. 전기적인 특성으로부터 아르곤 유량이 적은 SiO₂ 박막에서 유전율도 낮아져서 절연특성이 좋아졌다는 것을 알 수 있다. 절연특성이 우수한 경우 전자소자의 효율이 높아지는데 박막의 특성은 플라즈마의 형성과정과 밀접한 관계가 있다.¹³⁾ 플라즈마 생성으로 양이온이 많은 경우와 음이온이 많은 경우에는 박막에서 분극이 일어난다. 양이온과 음이온이 각각 50%가 된다면 무분극이 된다. 극성이 있다는 것은 전자가 많거나 홀이 많은 경우이고 무

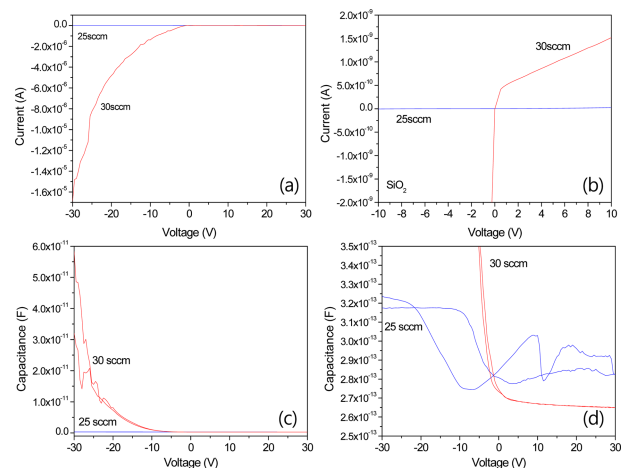


Fig. 1. Electrical characteristics of SiO₂ deposited by Ar gases of 25 sccm and 30 sccm, (a) current in the long range, (b) current in the short range, (c) capacitance in the long range, (d) capacitance in the short range.

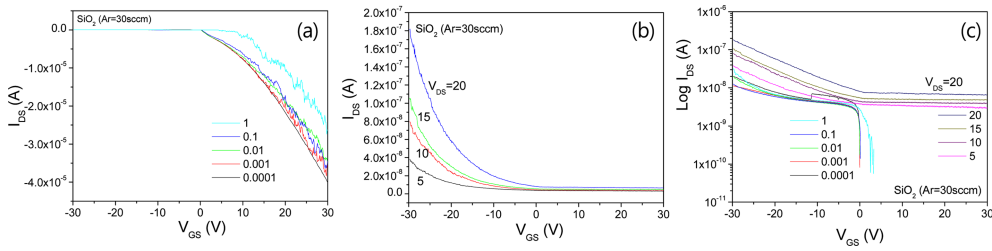


Fig. 2. ZTO transistor prepared on SiO₂ thin film with Ar = 30 sccm, (a) transfer characteristics under V_{DS} = 1 V, (b) transfer characteristics over V_{DS} = 1 V, (c) logarithm.

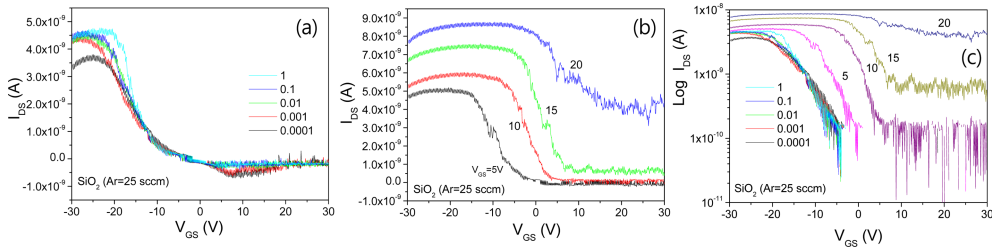


Fig. 3. ZTO transistor prepared on SiO₂ thin film with Ar = 25 sccm, (a) transfer characteristics under V_{DS} = 1 V, (b) transfer characteristics over V_{DS} = 1 V, (c) logarithm.

분극이라면 전자도 홀도 없는 캐리어가 없는 상태이므로 절연체일 가능성이 높다. 절연체의 전기적인 특성은 전류가 흐르지 않는 상태가 되며, 공핍층이라는 증거가 됩니다.

Fig. 2는 아르곤 30 sccm을 이용하여 증착한 SiO₂ 박막을 위에 ZTO 채널물질을 증착한 후 트랜지스터의 전달특성을 살펴보았다. Fig. 2(a)는 V_{DS} ≤ 1 V의 조건에서 V_{DS} 전압이 1 V, 0.1 V, 0.01 V, 0.001 V와 0.0001 V에서 양의 전압방향에서 -I_{DS} 전류가 많이 발생하며, Fig. 2(b)는 음의 전압방향에서도 V_{DS} > 1 V의 조건에서 +I_{DS} 전류가 발생하는 양방향성 전달특성을 갖는다는 것을 보여준다. Fig. 2(c)는 I_{DS} 전류를 로그 값으로 변환하였다. V_{DS} < 1 범위 안에서 전달특성은 거의 비슷하게 나타난 것을 알 수 있다. V_{DS} 전압이 1 V 보다 낮은 경우 스위칭 및 전달특성이 우수해진다는 것을 보여주며, V_{DS} 전압이 1 V 보다 높은 경우 반도체 특성은 사라지면서 전류가 잘 흐르지 않는 것을 알 수 있다. 전도체 특성은 전자소자의 PN 접합계면에서 공핍층이 점점 사라지면서 동시에 반도체 특성도 사라지는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 아르곤 25 sccm을 이용하여 증착한 SiO₂ 박막을 위에 ZTO 채널물질을 증착한 후 트랜지스터의 전달특성을 살펴보았다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)에서 보듯이 아르곤 30 sccm으로 증착한 SiO₂ 박막을 이용한 ZTO 트랜지스터와 마찬가지로 아르곤 25 sccm으로 증착한 ZTO 트랜지스터에서도 양방향성 전달특성을 나타내고 있다. 절연특성이 우수한 SiO₂/ZTO 트랜지스터의 전달특

성은 Fig. 3(a)에서와 마찬가지로 V_{DS} ≤ 1 범위 V_{DS} ≤ 1 V의 조건 즉 V_{DS} 전압이 1 V, 0.1 V, 0.01 V, 0.001 V와 0.0001 V 경우 그 값이 거의 유사하다. Fig. 3(b)는 V_{DS} > 1 범위에서 전달특성을 보여준다. 양의 게이트 전압 (V_{GS}) 영역에서 대부분이 전도체의 특성을 나타내고 있다. Fig. 3(c)는 로그그래프로 그린 그림이다. V_{DS} > 1인 경우 I_{DS}-V_{DS}의 전달곡선이 오른쪽으로 이동하면 전류가 잘 통하는 전도체 특성을 나타낸다.

SiO₂ 박막에서 아르곤 30 sccm인 경우는 I-V 측정에서 전류가 많이 흐른다는 것을 이미 Fig. 1에서 설명하였다. 따라서 SiO₂(30 sccm) 박막은 절연성이 떨어지기 때문에 ZTO 트랜지스터의 전달특성도 V_{DS} > 1 V에서 SiO₂ (30 sccm)인 경우보다 절연성이 우수한 SiO₂(20 sccm) 박막에서 전도성이 잘 나타나는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 게이트 절연박막의 특성에 의해서 트랜지스터의 전달특성이 크게 달라지는 것을 이해할 수 있다. 이러한 전자소자가 CO₂ 가스를 100 sccm 흘려보냈을 때 대하여 어떤 반응을 나타내는지 살펴보았다. 모든 그래프는 스케일을 같은 상태에서 비교하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 CO₂ 가스반응에 대한 결과를 비교하기 위해서 그래프의 y축 스케일을 똑 같이 맞추어 그렸다.

Fig. 3(c)에서 V_{DS} ≤ 5 V의 조건 즉 V_{DS} 전압이 5 V, 1 V, 0.1 V, 0.01 V, 0.001 V와 0.0001 V 경우 V_{GS}를 양전압으로 인가하기 시작하면서 I_{DS} 값은 음 전류를 가지기 때문에 로그함수로 변환한 경우 나타나지 않는 것을 보여준다. 상대적으로 Fig. 2(c)의 경우 V_{DS} ≤ 1 V의 조건

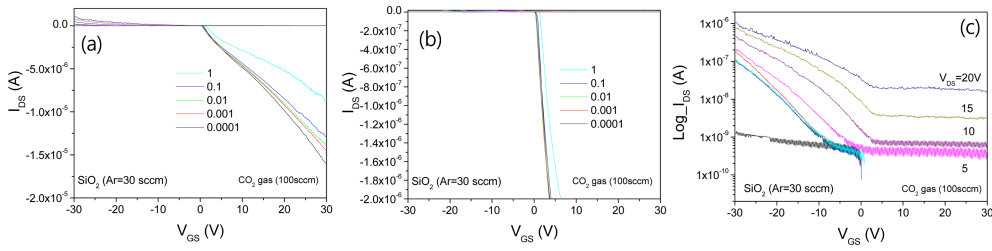


Fig. 4. CO₂ gas effect of ZTO transistor prepared on SiO₂ thin film with Ar = 30 sccm, (a) transfer characteristics in a range of -1×10^{-5} A under $V_{DS} = 1$ V, (b) transfer characteristics in a range of -1×10^{-6} A under $V_{DS} = 1$ V, (c) logarithm.

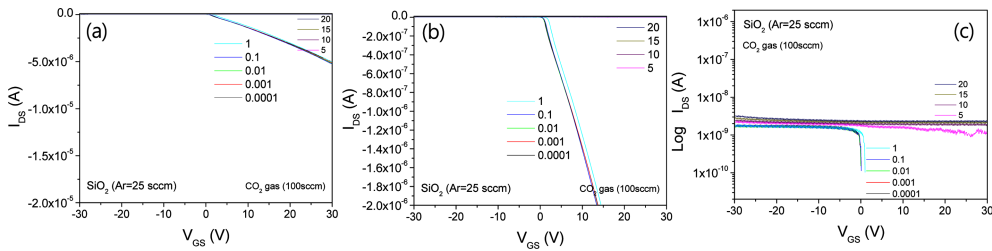


Fig. 5. CO₂ gas effect of ZTO transistor prepared on SiO₂ thin film with Ar = 25 sccm, (a) transfer characteristics in a range of $\sim 10^{-5}$ A under $V_{DS} = 1$ V, (b) transfer characteristics in a range of $\sim 10^{-6}$ A under $V_{DS} = 1$ V, (c) logarithm.

즉 V_{DS} 전압이 1 V, 0.1 V, 0.01 V, 0.001 V와 0.0001 V 경우 V_{GS} 를 양전압으로 인가하기 시작하면 I_{DS} 값은 음 전류를 갖는다는 것을 알 수 있다. SiO₂ 박막의 절연성이 우수한 SiO₂(25 sccm)의 경우 $V_{DS} = 5$ V처럼 높은 V_{DS} 전압에서도 양방향성 특성이 나타난다는 것을 알 수 있다. I_{DS} 가 양방향성 특성이 되면 안정성은 높아지며, 양방향성 특성에서 멀어지면서 $V_{DS} = 5$ V 이상으로 높아지게 되면 안정성은 떨어지고 있는 것을 보여준다.

Fig. 4는 ZTO/SiO₂(30 sccm) 샘플의 CO₂ 가스에 대한 반응으로 가스를 주입하지 않았을 때의 결과인 Fig. 2와 비교하면 유사한 그래프 경향을 보여주고 있으며, CO₂ 가스를 주입한 경우 전류의 크기가 전체적으로 올라가는 경향이 보였다. 하지만 안정성은 떨어져서 Fig. 4(c)의 결과처럼 편차가 많이 발생하고 있다.

Fig. 2(c)에서 $V_{DS} = 20$ V인 경우 I_{DS} 전류가 $\sim 10^{-7}$ A 정도 수준인데, Fig. 4(c)는 I_{DS} 전류가 $\sim 10^{-5}$ A 정도로 향상되었다. $V_{DS} = 0.0001$ V인 경우는 I_{DS} 전류가 $\sim 10^{-9}$ A 수준으로 비슷하였다. 탄소에 포함된 전자들이 반응하여 저항이 낮아져서 전류가 많아졌다고 볼 수 있다. 탄소의 유량이 증가하게 되면 전자를 포함할 수 있는 확률이 높아지므로 ZTO 박막과 반응하는 전자들이 많아지고 따라서 저항은 감소하게 된다.

Fig. 5는 ZTO/SiO₂(25 sccm) 샘플의 CO₂ 가스에 대한 반응으로 가스를 주입하지 않았을 때의 결과인 Fig. 3와 비교하면 상당히 많은 차이를 보여준다. CO₂ 가스를 주입하고 얻은 전달특성의 결과가 매우 안정적인 특징

을 갖는다는 것을 알 수 있다. Fig. 5(c)와 같이 절연특성이 우수한 SiO₂(25 sccm)의 영향으로 이산화탄소(CO₂) 가스의 불순물이 들어왔는데도 안정성은 오히려 높아지고 있다. shift 효과가 발생한 Fig. 3(c)와 비교하면 CO₂ 가스를 주입한 경우 shift 현상은 일어나지 않았으며, 오히려 안정성은 증가되었다. 전기가 잘 통하지 않고 절연특성이 우수한 SiO₂(25 sccm) 박막을 이용한 ZTO 트랜지스터에서 안정된 가스반응의 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 특성은 전자센서를 만드는데 매우 유용한 특징이라고 할 수 있다. 상대적으로 공핍층이 두꺼워지는 효과가 전위장벽을 크게 만들기 때문에 외부변화와 같은 가스들의 이물질에 대한 반응에 대하여 안정성이 높아지는 효과를 얻게 된다고 볼 수 있다. 전위장벽의 높이가 낮은 유전상수가 높은 절연박막보다는 절연특성이 우수한 절연박막에서 얻을 수 있는 전위장벽의 증가효과가 CO₂ 가스센서를 만드는데 중요한 작용을 한다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

반도체센서는 용도가 다양하기 때문에 반도체 화학센서를 개발할 필요가 있다. 대기의 오염도를 측정할 때 CO₂ 가스에 대한 측정이 필요한 경우가 많다. 따라서 반도체소자의 가스센서에 대한 안정성을 조사하기 위해서 ZTO/SiO₂ 트랜지스터를 제작하여 CO₂ 가스의 반응성을 조사하였다. 트랜지스터는 게이트 절연막으로 SiO₂를 만

들기 위해서 아르곤 가스를 이용하였으며, 아르곤 가스의 양을 25 sccm과 30 sccm으로 하여 이온화되는 반응량을 다르게 조절하였다. SiO₂(25 sccm)과 SiO₂(30 sccm)의 커패시턴스와 전류를 비교하여 SiO₂(25 sccm)의 박막에서 절연성이 우수하였으며, 절연성이 우수한 게이트 절연박막 위의 ZTO 트랜지스터는 CO₂ 가스에 대하여 더 안정적인 특성을 나타내었다. 절연특성이 우수하게 되는 원인은 전위장벽이 커지기 때문이며, 전위장벽이 큰 이유는 공핍층이 크기 때문이고 두꺼워진 공핍층은 외부 가스 등과 같은 변환에 대하여 중재자 같은 역할을 담당하게 되면서 센서 자체의 변화에 미치는 효과가 덜 민감하게 됨으로써 센서의 안정성은 높아진다고 볼 수 있다. 상대적으로 공핍층이 얇고 전자를 많이 포함하는 박막의 센서는 외부의 가스변화와 같이 작은 변화에도 민감하게 반응하여 센서 자체의 안정성은 떨어지게 되는 것을 알 수 있었다. 따라서 가스센서의 감도를 높이기 위해서는 우수한 절연성을 갖추는 것이 중요한 요소임을 확인하였다.

Acknowledgment

This work(2016013153) was supported by Mid-career Researcher Program through NRF(National Research Foundation) grant funded by the MEST(Ministry of Education, Science and Technology).

References

1. K. Nomura, T. Kamiya, H. Ohta, M. Hirano and H. Hosono, *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 192107 (2008).
2. S. Akasaka, K. Tamura, K. Nakahara, T. Tanabe, A. Kamisawa and M. Kawasaki, *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 123309 (2008).
3. T. Oh and C. H. Kim, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **16**, 2096 (2016).
4. F. Liu, Y. Zhou, Y. Wang, X. Liu, J. Wang and H. Guo, *Quantum Mater.*, **1**, 16004 (2016).
5. S. W. Tsao, T. C. Chang, S. Y. Huang, M. C. Chen, S. C. Chen, C. T. Tsai, Y. J. Kuo, Y. C. Chen and W. C. Wub, *Solid-State Electron.*, **54**, 1497 (2010).
6. S. Akasaka, K. Tamura, K. Nakahara, T. Tanabe, A. Kamisawa and M. Kawasaki, *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 123309 (2008).
7. A. Suresh and J. F. Muth, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 033502 (2008).
8. T. Oh, *Electron. Mater. Lett.*, **11**, 853 (2015).
9. J. Maserjian, *J. Vac. Sci. Technol.*, **11**, 996 (1974).
10. J. Maserjian and N. Zamani, *Appl. Phys. Lett.*, **53**, 559 (1982).
11. T. Oh, *Korean J. Mater. Res.*, **25**, 1149 (2015).
12. C. S. Han and S. W. Kim, *Korean J. Mater. Res.*, **28**, 12 (2018).
13. T. Oh, *Japanese J. Appl. Phys.*, **45**, 264 (2006).