2차원 흑린 반도체 비휘발성 메모리 및 광소자

DOI: 10.3938/PhiT.26.018

최 원 국

Nonvolatile Memory and Optoelectronic Devices with 2-dimensional Black Phosphorous Semiconductor

Won Kook CHOI

Among the two-dimensional van der Waals (2D vdWs) materials, black phosphorus (BP) has exhibited significant potential for use in electronic and optoelectronic applications because of its allotropic properties, high mobility, and direct and the scalability of narrow band gap from 0.3~2 eV. As for stable performance of BP-based devices, the reduction of current fluctuations in few-layer black phosphorus (BP) field-effect transistors with Al_2O_3 passivation prepared by atomic layer deposition was investigated using static and low-frequency noise analyses. A passive mode-locking operation as an example of optical application, through the evanescent field interaction was successfully demonstrated that the optical nonlinear characteristics of BP is sufficiently strong to use in such an indirect interaction method. As applications of electronic devices, both a few-layered BP-based nonvolatile memory transistor with a (P(VDF-TrFE)) ferroelectric top gate insulator and a charge injection memory field-effect transistor were introduced.

저자약력

최원국 박사는 연세대학교에서 방사광을 사용한 각분해능 자외선 분광법 (ARUPS)에 의한 전이금속 표면의 전자 구조에 관한 연구로 물리학 박사학위를 받고(1993), University of Oregon에서 2D Layered- FePS_3 의 고효율 이차전지 전하 충전 특성에 대한 연구하였다. 1996년부터 한국과학기술 연구원에서 저에너지 이온빔을 이용한 재료의 표면 개질 연구, II-VI ZnO 적층성장, p-형 및 LED 구현 연구를 진행하였다. 새물리 편집위원, 한국 과학 기술한림원 공학부 준회원, KIST 미래융합기술연구 본부장 등을 역임하였고, 진공학회 이사 및 센서학회 부회장으로 활동하고 있다. 현재 연구 주제는 ZnO 및 ZnO-나노 카본 hybrid 양자점의 응용, 2D black phosphorous 반도체, 산화물 반도체 소재 및 소자, 고효율 barrier film 개발에 대한 연구 등이다. (wkchoi@kist.re.kr)

Fig. 1. Allotropes of Phosphorus (P). (a) White P, (b) red P, (c) violet P, and (d) black P.

흑린(Black Phosphorous)

원자 번호 15인 인(^{15}P : Phosphorous) 원소는 자연에서 백린, 적린, 자린, 흑린의 4가지 동소체(allotropes)로 존재한다. (그림 1) 이 중 흑린은 Bridgman이 1914년 hydrostatic 방식으로 백린을 상온, 0.6 Gpa에서 kerosen 실린더에 삽입 후 200 °C, 1.2 Gpa에서 흑린으로 합성되는 것을 발견하였고,^[1] 그 밀도는 2.69 g/cm³로 1.83 g/cm³의 백린, 2.05~2.34 g/cm³의 적린보다 높았다. 또한 Hg, Bi flux 방법으로 흑린의 제조^[2]와 Si, Ge이 첨가된 흑린의 제작이 보고된 바 있으며, 1981년 적린이 3.8 Gpa, 270 °C 이상에서 흑린으로 결정화되는 것이 최초로 알려진 바 있다.^[3] 2007년 Lang 등은^[4] 저압에서의 Au, Sn, SnI₄와 적린을 진공 실리카 용기에 넣고 600 °C까지 가열 후 상온까지 서서히 냉각하면 흑린이 합성되는 것을 보고하였고, 최근 Köpf 등은 Sn/SnI₄만을 이용한 흑린 제작을 단순화하는데 성공하였다.^[5]

REFERENCES

- [1] W. Bridgman, J. Am. Chem. Soc., **36**, 1344 (1914).
- [2] Y. Maruyama *et al.*, Synthetic Met. **29**, 213 (1989).
- [3] I. Shirotni, Mol. Cryst. Liq. Cryst. **86**, 203 (1982).
- [4] S. Lange *et al.*, Inorg. Chem. **46**, 4028 (2007).
- [5] M. Köpf *et al.*, 2014, arXiv:1406.7275.

Fig. 2. Comparison of BP bandgap with 2D vdWs like graphene and TMD (upper), and crystalline and energy band structure of phosphorene (below).

그림 2의 왼쪽 위에서 보는 바와 같이 흑린의 원자 격자 구조는 그래핀과 유사하나 zigzag, armchair 구조를 동시에 가지고 있는 2D 이방성(anisotropy)을 보이는 구겨진 육각형 (puckered honeycomb) 배열이며, silicene, germanene 등에서 유사하게 발견되는 buckling 형태이다. 오른쪽 그림에서 보는 바와 같이 벌크 흑린의 경우 밴드갭은 Z 대칭점에서 0.3 eV의 작은 값으로 알려져 있으며, 몇 개의 층으로 이루어진 경우 밴드갭이 두께에 의존하는 직접형으로 0.8-1.5 eV 정도 크기를 가지며, phosphorene으로 명명되는 단일층 흑린의 경우

Fig. 3. (a) A BP-based FET and (b) an electrical mobility according to thickness.^[6]

는 Γ 대칭점에서 2.0 eV를 가지는 것으로 알려져 있다. 따라서 2차원 반데르발스 소재(2D vdWs)의 경우 흑린의 밴드갭은 그래핀보다 크고 전이 금속 다이칼코자나이드(transition metal dichalcogenide; TMD)보다는 작은 위치에 있다. 이와 같은 흑린의 이 직접형 밴드갭과 높은 전기 이동도가 알려지면서 그래핀과 TMD 소재보다 우수한 트랜지스터 반도체 및 광학적 소재로 주목받으며 연구가 활발히 진행되고 있다. 한편 대면적 흑린 제작, 단일층 흑린의 제작 방법, 수분 또는 유기 용매와의 반응을 차단할 수 있는 passivation 방법을 통한 장기 안정성 확보 등의 공정 개발이 병행되어야 한다.

흑린 트랜지스터 연구

한편 그림 3에서 보는 바와 같이 2014년 p형 흑린 반도체 트랜지스터가 최초로 제작되었고, 두께 10 nm에서 약 $\sim 1,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 의 높은 정공 이동도가 보고되었다. 이때의 전류 on-off 비는 10^4 정도로 측정되었다.^[6] 또한 5 nm 두께 흑린을 이용한 PMOS와 MoS₂를 이용한 NMOS로 이루어진 CMOS 트랜지스터가 최초로 제작되었고(그림 4), 이때 정공 이동도는 $268 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 였고 전류 on-off 비는 역시 10^4 정도를 보였다.^[7]

또한 광학적 소자의 대표적인 응용으로는 그림 5에서와 같이 흑린을 이용한 FET 트랜지스터로서, 640, 808, 그리고 940 nm의 파장 영역에서 광응답도(photoresponsivity)가 측정되었고, 640 nm 파장에서 약 4.8 mA/W의 특성을 나타내었고, 응답 속도는 1 ms였다.^[8] 이후 IBM에서는 최초로 532, 1550 nm에서 작동하는 광측정기(photodetector)를 제작하여 2차원 주사(scanning) 가능한 최초의 2D 이미지 주사기(image scanner)를 성공적으로 시사하였다. 이때 광응답도는 1550 nm

REFERENCES

- [6] L. Li *et al.*, Nat. Nanotech. **9**, 372 (2014)
- [7] H. Liu *et al.*, ACS Nano **8**, 4033 (2014).
- [8] M. Buscema *et al.*, Nano Lett. **14**, 3347 (2014).

Fig. 4. (a) Hall mobility of BP PMOS, (b) CMOS consisting of BP PMOS and MoS₂ NMOS, and (c) characteristic curves of V_{out} and gain according to V_{in} .^[7]

Fig. 5. (a) BP FET transistor, (b) photoresponsivity at 640, 808, and 940 nm, and (c) response characteristic curve at 640 nm according to input power.^[8]

과장에서 5 mA/W로 측정되었다.^[9]

흑린 초고속 모드 잠금(ultrafast mode-locked) 펄스 레이저 응용

그래핀, 탄소나노튜브 등의 나노 카본들은 높은 광학적 비선형성(nonlinearity)으로 인하여 비선형 흡수 포화(nonlinear absorption saturation) 특성을 보이고 있으며, 이를 이용한 초고속 수동 모드 잠금형 펄스 레이저의 제작에 매우 유용한 것이 알려져 있다. 모드 잠금을 위하여 이러한 소재와의 직접적인 상호작용은 광학적 부품에 손상을 줄 수 있으나 감쇠장(evanescent field)을 이용한 간접적인 상호작용은 매우 효과적인 것으로 알려져 있다. BP의 경우 나노 카본에 비하여 고 전기 이동도, 높은 전류 on-off 비율과 밴드갭의 조절이 가능하여 혼합형 전자-광자 소자의 제작에 매우 유리하다고 예견되고 있다. 그림 7(a)의 경우 D-shaped 광파이버 위에 PDMS로 BP flake를 전사하여 입사된 CW laser와의 간접장에 의한 상호

Fig. 6. BP photodetector-based image scanner (left) and IBM image (right).^[9]

Fig. 7. (a) Concept of BP-based passive mode-locking (b) BP saturation absorption curve.^[10]

작용에 의해 흡수 포화 현상을 이용한 모드 잠금 펄스 레이저 제작 개념도를 보여주고 있다. BP의 경우는 입사 광에너지 밀

REFERENCES

[9] M. Engel *et al.*, Nano Lett. **14**, 6414 (2014).

Fig. 8. (a) The setup of the fiber ring cavity for mode-locked pulsed laser. (b) The optical spectrum of the pulsed laser. (c) The autocorrelation data of the output pulse. (d) The pulse train measured by a high-speed oscilloscope.^[10]

Fig. 9. (a), (b) Change of μ_{FE} SS for "Annealing only" and "Annealing+Al₂O₃" BPs, (c) change of SS at the variations of ΔV_{th} (double gate voltage swept data) for "As-fabricated", "Annealing only", and "Annealing+Al₂O₃" BPs, and (d) change of μ_{FE} .

도에 따라 포화밀도 12.5 MW/cm², 26%의 투과도, 비포화 손실(nonsaturable loss) 73.6% 정도로 측정되었다.^[10]

모드 잠김 펄스 광 레이저 출력은 그림 8(b)에서와 같이 중심 파장이 1558.14 nm이고, 반치폭(FWHM)은 1.25 nm이고 출력 펄스 트레인의 전력은 -11.1 dBm 또는 약 77.6 μ W이고 AC 자동 상관(auto correlation)에 의해 -5.9 dBm 또는 약 257 μ W로 증폭되었다. 그림 8(c)에서 보는 바와 같이 AC 결과 sech² pulse로 fitting 결과 FWHM 펄스 지속 시간의 반폭치는 약 2.18 ps였다. 그림 8(d)에서 출력 펄스의 펄스열(pulse train)은 10 ps의 최소 해상도를 가진 오실로스코프로 고속으로 측정된 결과 15.59 MHz의 반복률을 보였다.

Al₂O₃ 층을 이용한 BP passivation

단일 층 phosphorene에 비하여 다수 층의 BP FET에서 최고의 전기 이동도 값들이 보고되고 있어서 소수 층 BP에서 high-k 층의 영향에 관한 연구가 다층재료 다른 2D vdW 소재와 비교하기 위해 정확하게 연구되어야 한다. Na 등은^[11] 금

Fig. 10. LFM characteristics of a few layer BP FET. (a) Change of drain current (I_d) density at various frequencies, (b) change of current, (c) change of average normalized drain current spectral density (NSI) measured at 8-12 Hz, and (d) decrease of change of NSI device with Al₂O₃ passivation layer.

속 산화물 반도체 FET(MOSFET)의 반도체와 절연체 계면에서의 전하 수송 능력 및 계면 현상을 연구하는데 사용되었던 저주파 잡음(LFN: low-frequency noise) 방식을 사용하여 BP와 Al₂O₃ 계면에서의 전류 변동(fluctuation)이 감소하는 정도를 측정하여 그 보호(passivation) 효과를 측정 보고하였다. LFN은 capacitance-voltage 측정, deep-level transient spectroscopy(DLTS) capacitance-voltage 등의 방식이 계면의 크기에 의존성이 큰 것에 비하여 계면 크기에 의존성이 적어 나노 소자의 계면연구에 유리하다.^[12] 그림 9와 10에서와 같이 수 개의 층으로 이루어진 흑린(BP)에서, Al₂O₃ 보호층 사용으로 인한 전계-효과 트랜지스터의 전류 변동의 감소 조사를 연구했으며, 소자 특성에 대한 측정 및 분석은 보호층 형성 전/후, 열처리 후 측정하였고, 보다 구체적으로, 전하 수송 특성을 모니터링하기 위해 정적 및 저주파 노이즈 분석이 이루어졌다. 채

REFERENCES

- [10] K. Park *et al.*, Ann. Phys. **527**, L1 (2015).
- [11] J. Na *et al.*, ACS Nano **8**, 11753 (2014).
- [12] G. Ghibaudo *et al.*, Microelectron. Reliab. **42**, 573 (2004).

Fig. 11. (a) Optical microscopic images of a few layer BP with Al₂O₃ passivation layer and that of the same sample stored at room temperature for 2 months, (b) corresponding Raman spectra.

널 및 게이트 유전체 계면에서의 전하 트래핑/디 트래핑 프로세스에 기인한 캐리어 번호 변동(CNF: carrier number fluctuation) 모델을 전류 변동 현상을 설명하기 위해 사용되었다. Al₂O₃ 보호층으로 인한 노이즈 감소는 SS(subthreshold slope) 및 CNF 모델로부터 추출된 감소된 계면 트랩 밀도 D_{it} 및 N_{it} 를 나타낸다. 계면 트랩 밀도 값 사이의 편차는 BP와 금속 접촉 쇼트키(Schottky) 장벽의 역할에 의해 설명하였다. 그림 11에서와 같이 Al₂O₃ 보호층으로 사용된, 수 층 BP 박편을 2개월 동안 주변 대기에서 보존하여, 동일한 라만 스펙트럼으로 확인되었다. (그림 11) 이러한 결과로부터 산화알루미늄 보호층이 상온에서 여러 가지 가스 분자들과의 상호작용에 의해 표면이 손상되는 것을^[6] 효과적으로 방지함을 알 수 있다.

P(VDF-TrFE)를 이용한 BP 비휘발성 강유전체 메모리(nonvolatile ferroelectric memory)

Y. T. Lee 등은 폴리(비닐 리덴 플루오 라이드-트리 플루오로 에틸렌), (P(VDF-TrFE)) 강유전체를 탑 게이트 절연체로 사용한 수 층 두께의 BP 기반 비휘발성 메모리를 구현하였다.^[13] 실온에서 명확한 메모리 영역을 보이는 등 만족스럽게 작동하였고, 기존의 양극성 BP 트랜지스터의 강유전성 트랜지스터는 탄소-불소(C-F) 쌍극자 효과로 인해 p-형 특성을 보였다.

그림 12에서는 각각 두께가 BFM01($t=4.8$ nm), BFM02($t=6.7$ nm)인 BP를 채널 길이가 5 μm인 트랜지스터 패턴을 형성 후 강유전체인 P(VDF-TrFE)를 220 nm 두께로 스핀 코팅하여 BP FET를 제작하였다. 강유전체 삽입 후 전류 on-off 비율은 10²에서 10⁵까지 증가하였고, 이러한 효과는 C-F dipole이 게이트에 부(-) 전압 인가 시(그림 12(b)) S/D로부터

Fig. 12. (a) Cross-sectional view of BFM (BP FeFET), (b) p-channel ON (hole accumulation) after -20 V pulse, (c) p-channel OFF (hole depletion) (arrow indicates the direction of dipole) after 20 V pulse, (d) and (e) V_G memory hysteresis loop of BFM01 and BFM02 at V_D = -0.1 V and various V_G's, and (f) and (g) plot of linear mobility of BFM01 and BFM02 at V_D = -0.1 V, V_G = ±20 V.

터 전자의 주입을 방해한 효과에 기인한 것으로 설명되었다. 그림 12(d), (e)에서 보는 바와 같이 p-형 반도체 특성을 보여주고 있으며, linear mobility는 식 (1), (2)에 의해 얻어질 수 있는데, 각각 BFM 01, BFM 02의 경우 297, 1,298 cm²/Vs 값을 보였다.

$$g_m(V_G) = \frac{\partial I_D}{\partial V_G} \quad (1)$$

$$\mu_{lin}(V_G) = \frac{g_m(V_G)}{C_{ox} V_D} \left(\frac{L}{W} \right) \quad (2)$$

P(VDF-TrFE) 강유전체는 약 11 V에서 Coercive field값이 ~0.55 MV/cm를 보여주고 있으며, 그림 12(d), (e)에서와 같이 V_G = ±15 V 이상에서 명확한 메모리 영역을 보여주고 있다. 그림 12(f), (g)로부터 V_G와 linear mobility는 각각 131, 574 cm²/Vs(V_G = ±20 V, V_D = -0.1 V) 정도로 측정되었다. 그림 13(a), (b)에서와 같이 BFM 01을 이용한 기본적인 FeFET 메모리, 그림 13의 (c), (d)와 같이 BFM02에 각각 외부 저항 10 MΩ 연결하여 전류를 전압으로 전환하는 인버터를 제작하

REFERENCES

- [13] Y. T. Lee *et al.*, ACS Nano 9, 10394 (2015).

Fig. 13. (a) I_D and V_G hysteresis curve of BFM01 (b) retention test of PRO ($V_G = -20$ V) and ER ($V_G = +20$ V) states at -0.5 V $< V_G < 0.5$ V, $V_D = -0.1$ V, (c) I_D and V_G hysteresis curve of BFM02, (d) $R_{ext} = 10$ MΩ, (e) voltage memory hysteresis curve (VMHC), and (f) retention test.

여 그 특성을 조사하였다. BFM01에는 -20 V pulse 인가 시 PROGRAM(ON state), $+20$ V 인가 시 ERASE(OFF state), 그리고 PRO/ER의 drain 전류비가 10^4 정도인 FeFET를 시연 하였다. BFM02 역시 BFM01과 비슷한 성능을 보였는데, On 상태에서는 3 kΩ, Off 상태에서는 1 GΩ의 저항을 보였고, ferroelectric load-inverter memory 특성으로 그림 13(e), (f)와 같이 13 V 정도의 메모리 영역과 ER(Off)/PRO(on) state의 우수한 retention 특성을 보여 주었다. 그림 14(a)와 같이 BFM03($t = 7.2$ nm)와 MoS_2 ($t = 12.5$ nm)(MFM01)를 각각 p-MOS, n-MOS로 구성된 CMOS를 제작하였고, 그림 14(c)에서 보여주는 3D 단면과 같은 dual gate FeCMOS를 제작하였다. Backgate 전압(V_{BG})을 $0 \sim 20$ V까지 5 V씩 증가하여 메모리 transfer 곡선을 구하여 보면, $V_{BG} = 10$ V 이하에서는 BFM03의 I_{off} 가 MFM01의 I_{on} 보다 더 높은 경향을 보이는데, 이는 BFM03의 C-F dipole이 MoS_2 의 n-형 특성을 저해하고,^[14] 역으로 BFM의 p-형 특성을 증대하는 것으로부터 나타나는 현상이다. 하지만 $V_{BG} = 10$ V 이상에서부터 메모리 영역 hysteresis curve가 12 V 정도 overlap되는 부분이 관측되었고, $V_{BG} = 20$ V, dual gate 전압(VDD) 0.1 V에서 메모리 V_{out} 효율이 95% 정도임을 확인하였고, ON/OFF retention이 역시 잘 유지됨을 보고하였다. 이상과 같이 P(VDF-TrFE) 강유전체 고분자를 BP 반도체를 이용한 트랜지스터의 gate 중간에 삽입

Fig. 14. (a) Optical microscopic (OM) image of dual-gate FeCMOS/P⁺-Si, (b) AFM images of BFM03 and MFM02, (c) 3D images of 2D vdW active channel (BP and MoS₂), (d) I_D vs V_G ($V_{BG} = 0 \sim 20$ V), (e) VMHCs ($V_{BG} = 20$ V) of dual-gate FeCMOS, and (f) retention test ($V_{DD} = 0.1$ V, $V_{BG} = 20$ V) of PRO and ER states.

하여 고이동도를 가지는 BP FeFET 메모리, 인버터 메모리, CMOS를 구현하였다.

비휘발성 전하 인가 BP 메모리 (BCIM: BP-based Nonvolatile Charge Injection Memory)

최근 Y. T. Lee 등은 유리 기판 위에 몇 층의 BP가 활성 채널과 전하 트래핑 층으로 작용하며, 원자층 증착법에 의해 성장된 Al_2O_3 필름이 터널링 및 블록킹 층으로 사용되는 전하 주입 메모리 필드 효과 트랜지스터에 대하여 연구하였다.^[15] BP 나노 시트는 전자와 정공 모두 전하 트래핑에 관여하는 양극성(ambipolar) 속성 때문에, 양방향 임계 전압 시프트가 발생하고, 결국 22 V 큰 메모리 영역이 발생하게 된다. 저항성 부하 인버터의 메모리 회로를 구현하여, 아날로그 신호(전류)를 디지털 신호(전압)로 변환할 수 있고, 이러한 메모리 인버터는 또한 명확한 메모리 윈도우 및 메모리 On/Off 스위칭이 구별

REFERENCES

- [14] S. Kobayashi *et al.*, Nat. Mater. 3, 317 (2004).
- [15] Y. T. Lee *et al.* Adv. Funct. Mater. 26, 5701 (2016).

Fig. 15. OM images of BCIM (a) before deposition of Au, (b) after deposition of Au, (c) 3D sectional view, (d) Cross-sectional TEM image, and TEM images of (e) trapping layer, and (f) active channel of BP.

Fig. 16. (a) Transfer curve of BCIM at $V_G=\pm 20$ V, $V_D=-0.1$ V, (b) linear mobility, energy diagram (c) of flat-band, (d) under negative bias, (e) under positive bias, (f) variations of V_{TH} , and (g) FN plot.

되는 소자 구현이 가능하게 된다.

BCIM 구현을 위하여 그림 15에서와 같이 BP($t=6$ nm), BP($t=5$ nm)를 각각 활성 채널과 전자 트래핑 층으로 사용하였으며 그 사이와 트래핑 층 위에 각각 5 nm, 35 nm의 Al_2O_3 터널링 및 블로킹 층을 형성하였다.

고정된 드레인 전압 $V_D=-0.1$ 에서 $V_G=\pm 20$ V까지 증가시키면 12 V의 메모리 영역이 관측되며(그림 16(a)) 식 (1), (2)로부터 linear mobility를 계산하면 $13 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 를 얻을 수 있다.

Fig. 17. (a) Transfer curve of BCIM at $V_G=\pm 25$ V, $V_D=-0.1$ V, (b) load-inverter structure, (c) switching threshold voltage curve (VM), and (d) dynamic inverter voltage cycle, Program(P)-Read(R)-Erase(E)-Read(R).

(그림 16(b)). 그림 16(c)~(e)의 flat band, V_G 에 부전압/양전압 인가 시의 밴드 구조로부터, 부전압 인가 시 BP 드래핑 층에 전자는 FN(Fowler-Nordheim) 터널링을 통하여 활성 채널 층으로 이동할 수 있고, 삼각파형으로 낮아진 에너지 장벽을 통하여 BP 활성층의 정공은 트래핑 층으로 이동 가능하게 되어 음의 V_{TH} shift가 발생하고 양전압 인가 시 양의 V_{TH} shift가 발생한다. 그림 16(f)는 V_G 에 따른 V_{TH} 변화를 보여주는 그래프이고, 그림 16(g)는 FN 터널링으로부터 전자와 정공의 터널링 에너지 장벽, $\Phi_{B,e}$, $\Phi_{B,h}$ 와 유효질량의 비로식 (3), (4)), FN plot의 일차 기울기에 해당하는 S_e , S_h 로 표시된다.

$$\text{Slope}(S) = \frac{d(\ln(J/E^2))}{d(1/E)} = \frac{4\sqrt{2m^*}}{3q\hbar} (\Phi_B)^{3/2} \quad (3)$$

$$\frac{S_h}{S_e} = \sqrt{\frac{m_h^*}{m_e^*}} \left(\frac{\Phi_{B,h}}{\Phi_{B,e}} \right)^{3/2} \quad (4)$$

그림 16(g)로부터 $S_h/S_e=1.4$, 그리고 $\Phi_{B,h}$ 와 $\Phi_{B,e}$ 가 각각 3.28 eV, 2.82 eV 그리고 이로부터 BP의 가전자대 최저점(CBM: conduction band minimum)과 가전자대 최고점(VBM: valence band maximum)이 각각 4.22 eV, 4.52 eV임을 얻을 수 있었다. 또한 그림 17(a)과 같이 BCIM에서 22 V의 V_{TH} shift를 관측하였고, $R_{ext}=10 \text{ M}\Omega$ 을 연결하여 inverter를 제작하여 그 voltage transfer curve(VTC)를 측정하면 switching threshold voltage(VM)이 22 V 영역을 보이며, 이것은 V_{TH} 의 변화와 일치하는 것을 알 수 있다. 그림 17(d)에서 보듯이 $V_G=\pm 25$ V를 100 μs 로 변화하면 dynamic voltage의 변화가 Program(P)-Read(R)-Erase(E)-Read(R)의 순으로 일정하게 유지됨을 알 수 있었다.