

제193회 한림원탁토론회

# 인간의 뇌를 담은 미래 반도체, 뉴로모픽칩

일시 : 2021년 12월 13일(월), 15:00

(한국과학기술한림원 유튜브 채널에서 실시간 생중계)



## 초대의 말씀

뉴로모픽칩은 인간 뇌의 작동 원리를 반도체에 구현하는 기술로 인간의 뇌와 같이 기억과 정보처리를 동시다발적으로 진행할 수 있는 병렬 연산구조를 지니고 있습니다. 이로 인해 병목현상이 발생할 수 있는 기존의 칩과는 달리 연산 속도가 획기적으로 빠르며, 전력사용의 효율성도 기존보다 무려 5만 배가량 증가한다고 합니다. 뿐만 아니라 뉴로모픽칩이 상용화된다면 자율주행과 로봇뿐만 아니라 사물인터넷, 스마트폰과 같은 소형기기 등에서 획기적인 발전을 이룰 것으로 전망되고 있습니다.

이에 한국과학기술한림원은 관련 분야 전문가분들을 모시고 정보 전달 과정의 병목현상과 과도한 전력 소모의 구조적 한계에 부딪히고 있는 기존 반도체를 넘어 21세기 인류의 새로운 도약을 꿈꾸게 하는 뉴로모픽칩에 대해 전반적으로 살펴보고 해당 분야를 선도하는 데 필요한 정책 방향에 대해 논의하고자 합니다. 바쁘시더라도 많은 관심과 참여 부탁드립니다.

2021년 12월

한국과학기술한림원

한림원탁토론회는 국가 과학기술의 장기적인 비전과 발전전략을 마련하고 국가사회 현안문제에 대한 과학기술적 접근 및 해결방안을 도출하기 위해 개최되고 있습니다.

사회 : 김수영 고려대학교 신소재공학부 교수

| 시간                   | 구분         | 내용  |
|----------------------|------------|---|
| 15:00~15:05<br>(5분)  | 개 회        | 개 회 사 : <b>한민국</b> 한국과학기술한림원 원장   |
| 15:05~15:20<br>(15분) | 주제발표 1     | [소자] 뇌를 모사한 인공 시냅스 소자<br><b>윤태식</b> 울산과학기술원 반도체소재부품대학원 교수   |
| 15:20~15:35<br>(15분) | 주제발표 2     | [시스템] 3차원 집적된 뉴로모픽 소자 시스템<br><b>최창환</b> 한양대학교 신소재공학부 교수   |
| 15:35~15:50<br>(15분) | 주제발표 3     | [응용] 센서 기술과 뉴로모픽 기술의 융합<br>: Sensory- Neuromorphic Technology<br><b>박진홍</b> 성균관대학교 전자전기공학부 교수   |
| 15:50~16:30<br>(40분) | 지정 토론      |   |
|                      | 좌 장<br>토론자 | <b>장호원</b> 서울대학교 재료공학부 교수<br><br><b>이세호</b> SK hynix 미래메모리연구 담당(Fellow)<br><br><b>김상준</b> 삼성전자 종합기술원 컴퓨팅플랫폼랩 마스터<br><br><b>서경춘</b> 과학기술정보통신부 과학기술전략과 과장 |
| 16:30~17:00<br>(30분) | 자유토론       |   |
| 17:00                | 폐 회        |   |

※ 본 토론회에서 논의된 내용은 한국과학기술한림원의 공식적인 의견이 아님을 알려드립니다.

## 발표자 및 패널 약력

### 사회



#### 김수영

고려대학교 신소재공학부 교수

- 국가과학기술자문회의 전문위원
- 한국차세대과학기술한림원 공학부 운영위원
- University of Chicago 방문교수

### 주제발표자



#### 윤태식

울산과학기술원 반도체소재부품대학원 교수

- 과기부 장관 표창 (반도체원천기술발전유공, 2020)
- Materials Science in Semiconductor Processing (ELSEVIER) 국제편집위원
- 울산과학기술원 미래반도체연구센터 센터장



#### 최창환

한양대학교 신소재공학부 교수

- 과학기술정보통신부 장관상 수상 (2019)
- 前 KIST 차세대반도체연구소 방문연구교수
- 前 IBM T. J. Watson 연구소 연구원



#### 박진홍

성균관대학교 전자전기공학부 교수

- 과기부 이달의 과학기술인상 수상 (2017)
- 대한전자공학회 해동젊은공학인상 수상 (2016)
- 前 IBM T. J. Watson 연구소 박사후연구원

## 좌장 및 지정토론

### 좌장



#### 장호원

서울대학교 재료공학부 교수

- 서울대학교 공과대학 연구부학장
- 한국차세대과학기술한림원 공학부 회원
- 前 KIST 전자재료센터 선임연구원

### 토론자



#### 이세호

SK hynix 미래메모리연구 담당(Fellow)

- Scientific Committee  
(IEEE International Memory Workshop)
- 前 University of Pennsylvania, Postdoctoral Fellow
- 前 삼성전자 반도체연구소 책임연구원



#### 김상준

삼성전자 종합기술원 컴퓨팅플랫폼랩 마스터

- 특허청 인공지능 융합기술 분야 전문가 포럼 인공지능 분과  
위원장
- IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems  
(TBCAS) 편집위원



#### 서경춘

과학기술정보통신부 과학기술전략과 과장

- 前 과학기술정보통신부 기계정보통신조정과 과장
- 前 과학기술정보통신부 생명기술과 과장
- 前 과학기술정보통신부 창조경제기획과 서기관

# I

## 주제발표

### 주제발표 1 [소자] 뇌를 모사한 인공 시냅스 소자

- 윤태식 울산과학기술원 반도체소재부품대학원 교수

### 주제발표 2 [시스템] 3차원 집적된 뉴로모픽 소자 시스템

- 최창환 한양대학교 신소재공학부 교수

### 주제발표 3 [응용] 센서 기술과 뉴로모픽 기술의 융합 : Sensory- Neuromorphic Technology

- 박진홍 성균관대학교 전자전기공학부 교수

## 주제발표 1 뇌를 모사한 인공 시냅스 소자

윤 태 식

울산과학기술원 반도체소재부품대학원 교수

한국과학기술한림원 한림원탁토론회 주제발표  
2021. 12. 13.



주제: 인간의 뇌를 담은 미래 반도체, 뉴로모픽칩

**“뇌를 모사한 인공 시냅스 소자”**

윤 태 식

울산과학기술원

반도체소재부품대학원 & 신소재공학과

## 목 차

### I. 뉴로모픽 시스템

- 폰 노이만 시스템 vs. 뉴로모픽 시스템
- 인공 시냅스

### II. 뇌를 모사한 인공 시냅스 소자

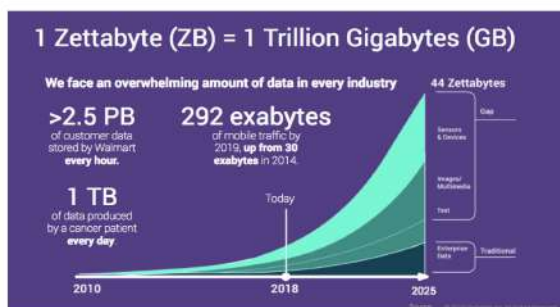
- 메모리를 이용한 인공 시냅스 소자
- 이온 이동을 이용한 인공 시냅스 소자

### III. 기술적 난제 및 도전

## I. 뉴로모픽 시스템

### ◆ 방대한 양의 데이터를 효율적으로 처리하는 컴퓨팅 시스템

- 하드웨어, 소프트웨어(알고리즘), 데이터, etc.



Source: <https://www.gregverdino.com/everything-is-exponential/>

- 인공지능 (Artificial intelligence)
- 사물인터넷 (Internet-of-Things)
- 자율주행차 (Automated vehicle)



<https://strategyonline.ca/2021/03/30/deloitte-acquires-ai-firm-groundswell/>



Source: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/internet-of-things/>



Source: <http://global-autonews.com>

## I. 뉴로모픽 시스템

### ◆ 기존 인공지능 하드웨어를 넘어서는 뉴로모픽 시스템의 필요성

: 데이터 중심 응용 Data-centric applications, e.g. 인공지능



[https://www.chosun.com/opinion/specialist\\_column/2021/11/15](https://www.chosun.com/opinion/specialist_column/2021/11/15)

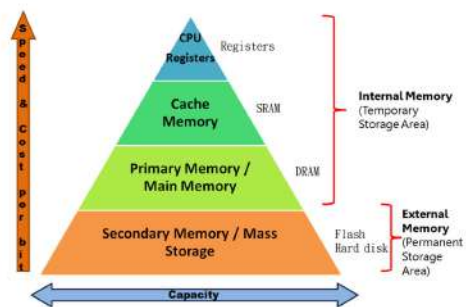
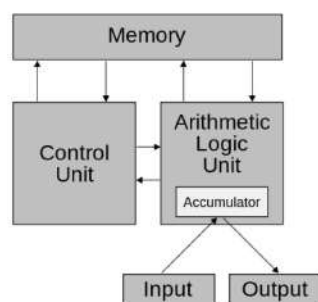
#### AI system

- Artificial Intelligence **algorithm** (학습, 추론)
- Computer hardware with **von Neumann architecture** (폰 노이만 아키텍처)
  - Massive use of CPU/GPU with **high power consumption** (170 kW vs. 20 W)

## I. 뉴로모픽 시스템

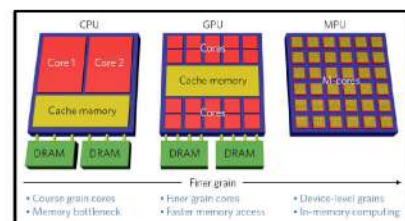
### ◆ 폰 노이만 아키텍처 von Neumann architecture

- Processing unit, Control unit, Memory로 구성된 컴퓨터 아키텍처



<http://www.vlsifacts.com>

- ✓ 정의된 문제에 대한 우수한 연산능력
- ✓ 입력신호에 대한 순차적 처리
  - **고에너지 소모, 비효율적**
- ✓ 비구조화된 데이터에 대한 처리능력 미흡
- ✓ 프로세서와 메모리가 분리된 구조
  - 폰 노이만 병목현상 **von Neumann bottleneck**

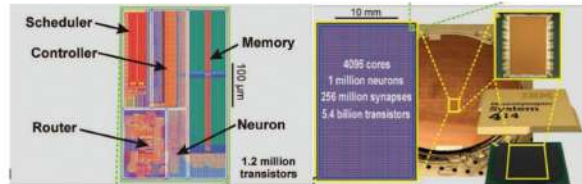
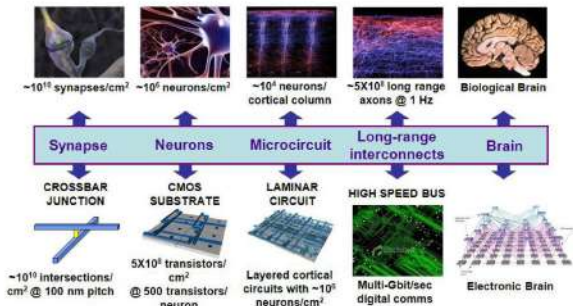


M. Zidan, Nat. Elec.(2018)

# I. 뉴로모픽 시스템 Brain-inspired computing systems

## Systems of Neuromorphic Adaptive Plastic Scalable Electronics

Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), 2008



- TrueNorth, IBM, Merolla et al. Science (2014)
- Loihi, Intel
- SpiNaker, Manchester Univ.
- NeuroGrid, Stanford Univ.
- Tianjic, Tsinghua Univ.
- ...

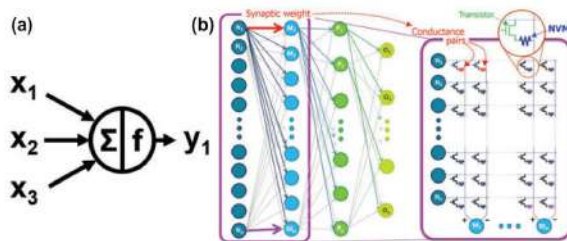
## 뉴로모픽 시스템

### ◆ 인간의 두뇌를 구성하는 신경 시스템을 모사하는 컴퓨팅 시스템

- 인간 두뇌 신경 시스템에 대한 이해, 인공 신경망 알고리즘, 하드웨어, 시스템 아키텍처
- 뉴런-시냅스 고밀도 병렬연결 (~ $10^{11}$  neuron, ~ $10^{15}$  synapses)
- 입력신호와 시냅스가중치를 통한 연산 & 가중치 업데이트를 통한 학습
- 비구조화 신호에 대한 효율적 처리능력 (image, video, sound, etc.)
- 높은 에너지 효율 ~20 W (vs.  $10^{10}$  W in von-Neumann machine)

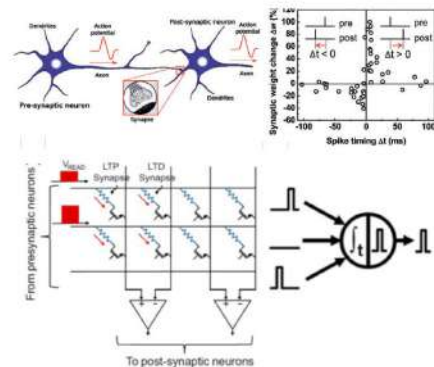
# I. 뉴로모픽 시스템 Brain-inspired computing systems

## ◆ Artificial neural network, ANN e.g., Deep neural network (DNN)



- ✓ Multiply-accumulate(MAC) operation
  - : Current summation along rows and columns
  - Summation along columns needed for forward propagation of neuron excitation
  - Summation along rows needed for backpropagation of error terms
- ✓ Backpropagation algorithm
- ✓ Learning by updating synaptic weight & Inference by reading stored synaptic weight
- ✓ But, not biologically realistic

## ◆ Spiking neural network, SNN

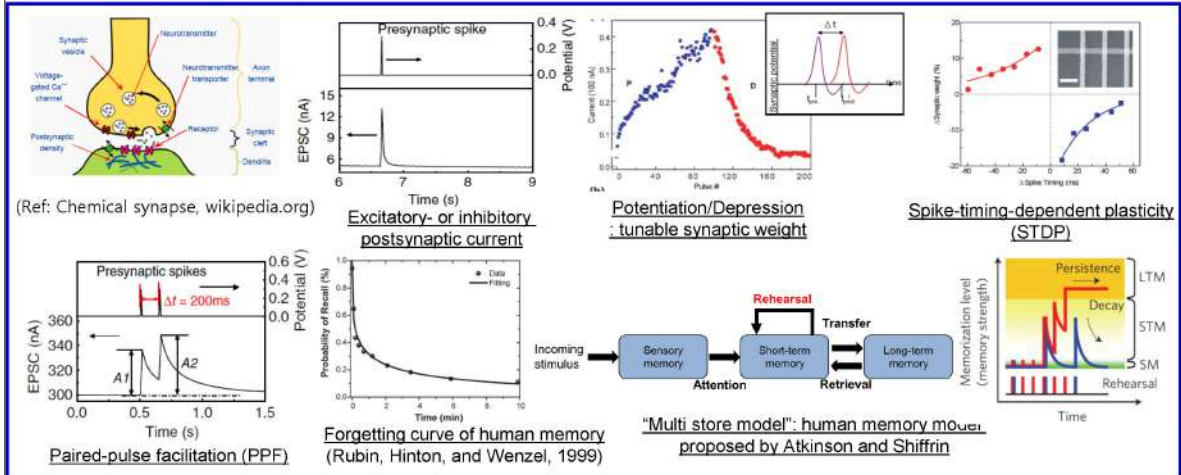


- ✓ Spike-for-learning
- ✓ Spike-for-communication with sparse freq.
- ✓ Information encoded into timing and frequency of the spikes (spike patterns)
- ✓ Downstream spikes by time-integration of spikes with modified synaptic weight
- ✓ But, unavailable proper model(algorithm)

Burr et al. Adv. Phys. X. (2017).

# I. 뉴로모픽 시스템 – 인공 시냅스

## ◆ 시냅스의 동작특성



### 시냅스 소자 특성 요건

- ◆ 고밀도 뉴런-시냅스 네트워크 구조 형성 & CMOS 소자/공정 호환성
- ◆ 아날로그, 선형적, 대칭적, 비휘발적 시냅스 가중치 변화, endurance, retention 특성
- ◆ 다양한 시냅스 거동: Paired-pulse facilitation(PPF), spike-timing-dependent plasticity(STDP), short-term and long-term plasticity(STP, LTP), excitatory/inhibitory postsynaptic response 등
- ◆ 저전력, 고에너지 효율, 고속동작(e.g. brain: 수십 mV, nA, < pJ/event, ms), 안정성, 균일한 동작 특성

## 목 차

### I. 뉴로모픽 시스템

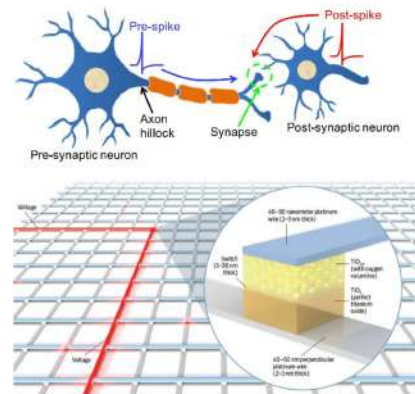
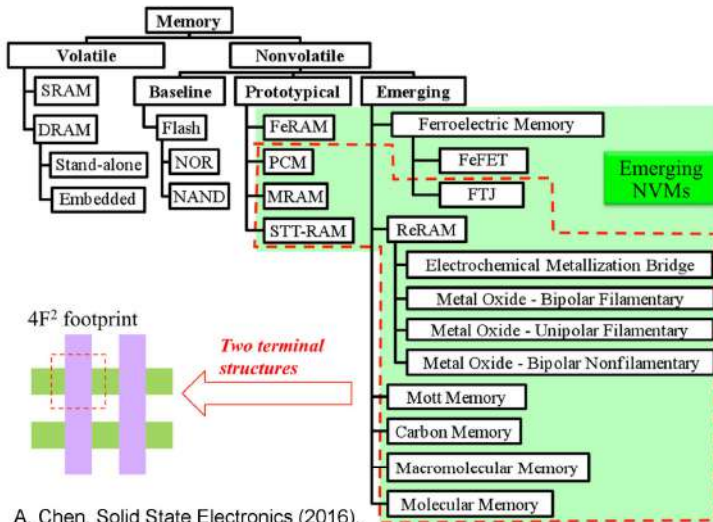
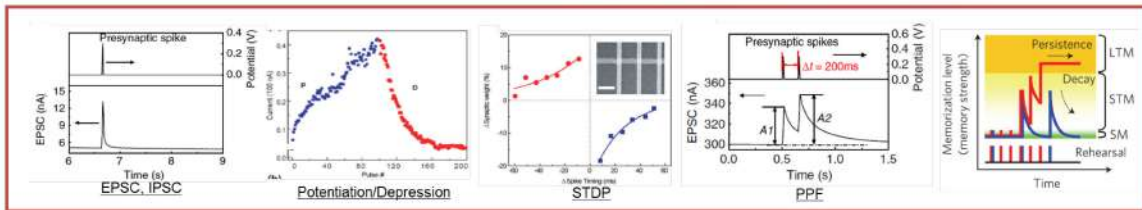
- 폰 노이만 시스템 vs. 뉴로모픽 시스템
- 인공 시냅스

### II. 뇌를 모사한 인공 시냅스 소자

- 메모리를 이용한 인공 시냅스 소자
- 이온 이동을 이용한 인공 시냅스 소자

### III. 기술적 난제 및 도전

## II. 뇌를 모사한 인공 시냅스 소자 – 메모리 기반



R. S. Williams, IEEE Spec. (2008).

UNIST

FIRST IN CHANGE

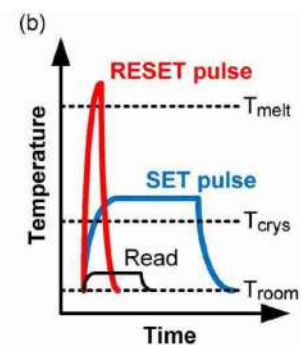
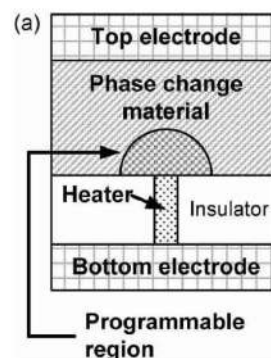
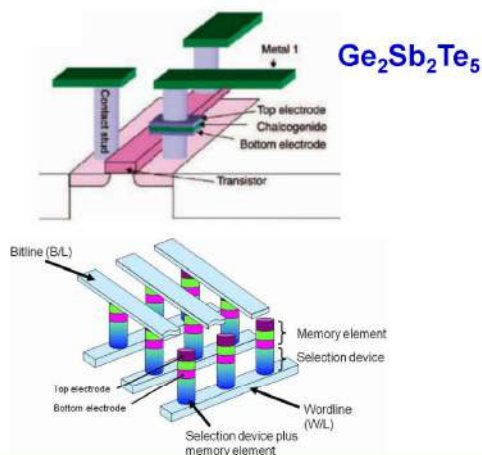
10

## II. 뇌를 모사한 인공 시냅스 소자 – 메모리 기반

### 2단자 메모리 - Memristor

- 생체 뉴런-시냅스 네트워크 구조와 유사
- 시냅스 가중치 업데이트를 통한 학습, 기억 기능을 위한 비휘발성 아날로그 상태변화
- 다양한 시냅스 거동 모사 (시간의존적(SNN) 거동, PPF, STP, LTP, 기억상태 전이 등)

### ◆ 상변화 메모리 Phase-change memory (PRAM)



Wong et al. Proc. IEEE (2010)

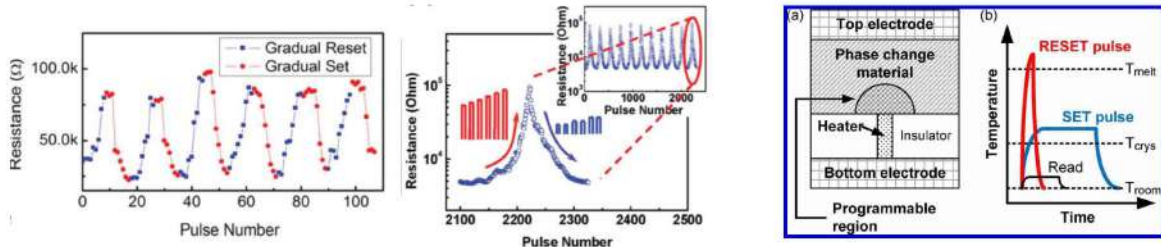
UNIST

FIRST IN CHANGE

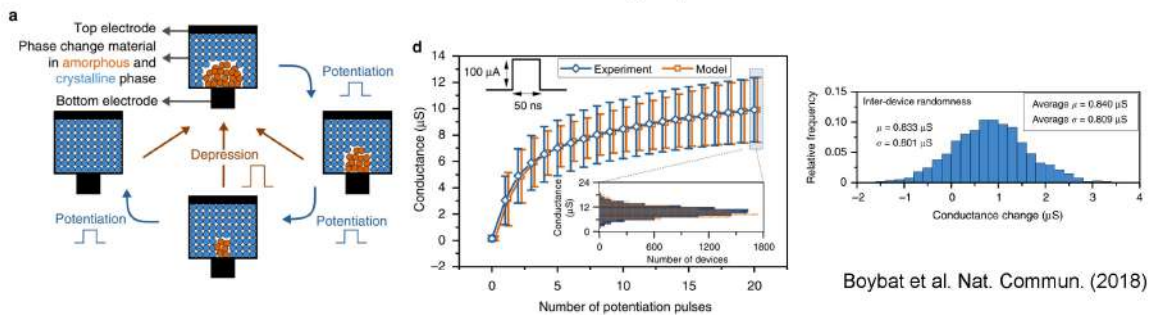
11

## II. 뇌를 모사한 인공 시냅스 소자 – 메모리 기반

### ◆ 상변화 메모리 Phase-change memory (PRAM)



Kuzum et al. Nano Lett. (2012)



Boybat et al. Nat. Commun. (2018)

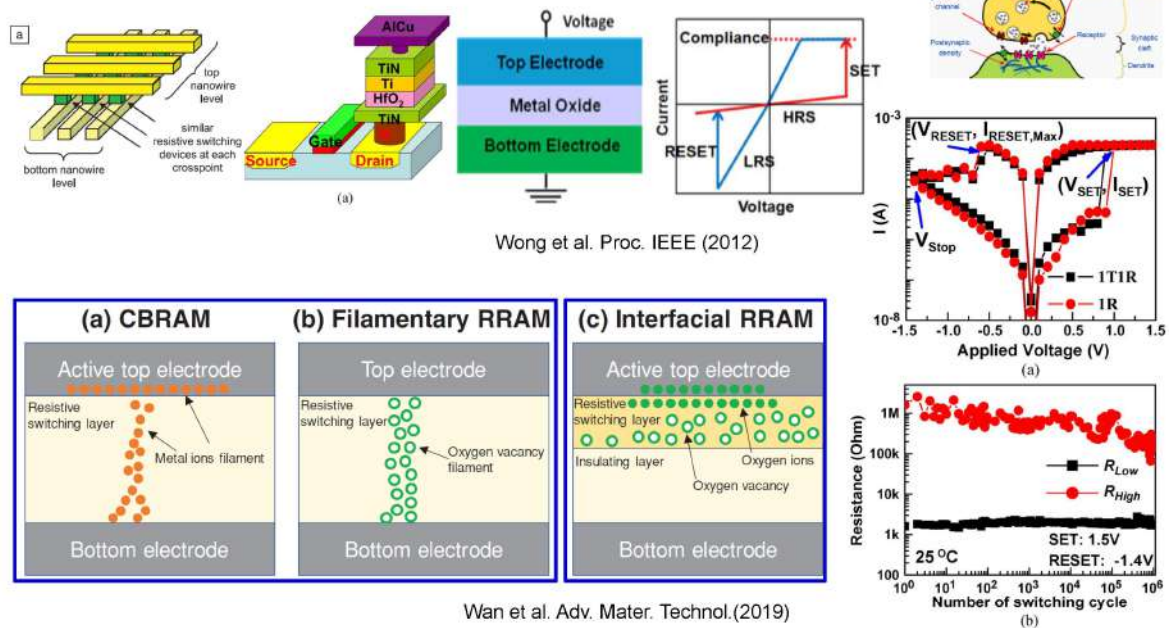
UNIST

FIRST IN CHANGE

12

## II. 뇌를 모사한 인공 시냅스 소자 – 메모리 기반

### ◆ 저항변화 메모리 Resistive memory (RRAM)



Wong et al. Proc. IEEE (2012)

Wan et al. Adv. Mater. Technol. (2019)

Lee et al. IEDM (2008)

UNIST

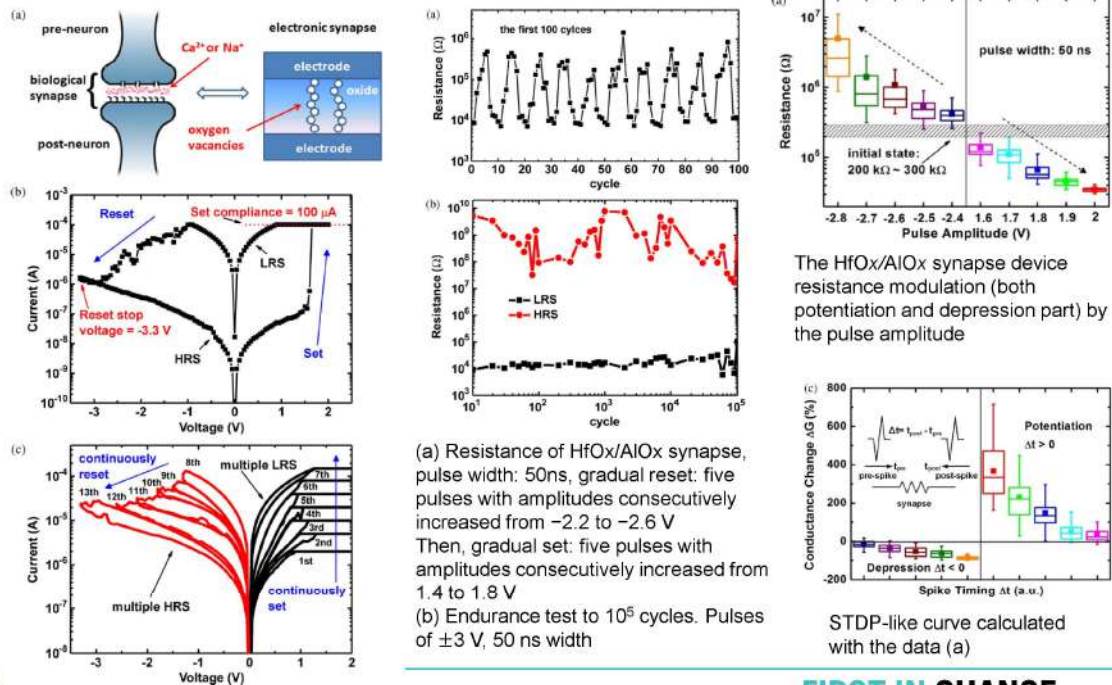
FIRST IN CHANGE

13

## II. 뇌를 모사한 인공 시냅스 소자 – 메모리 기반

### An electronic synapse based on RRAM – $\text{HfO}_2/\text{AlOx}$

Yu et al. IEEE Trans. Electron Dev. (2011)



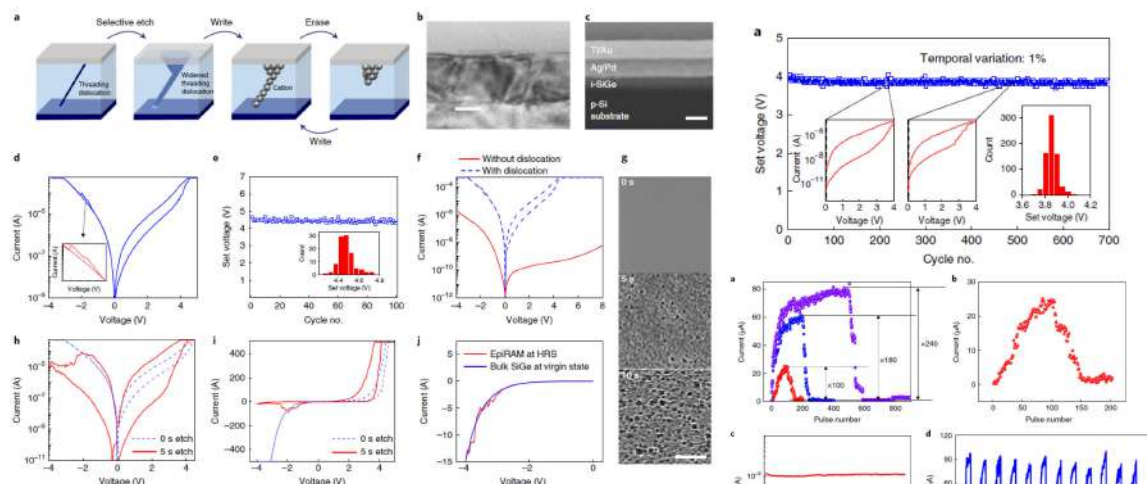
FIRST IN CHANGE

14

## II. 뇌를 모사한 인공 시냅스 소자 – 메모리 기반

### SiGe epitaxial memory based on engineered dislocations

Choi et al. Nat. Mater. (2018)



**Fig. 1** Impact of dislocation on the characteristics of the SiGe epiRAM. **a**, A conceptual schematic of the epiRAM during switching. **b**, Cross-sectional TEM image of 60 nm SiGe grown on a Si substrate. Scale bar, 25 nm. **c**, Cross-sectional SEM image of an epiRAM device. Scale bar, 100 nm. **d**, Measured d.c. I-V characteristics of epiRAM with unwidened dislocations. Inset: zoomed-in image to show difficult reset process. **e**, The set voltage variation of the epiRAM with unwidened dislocations over 100 quasi-static I-V sweeps. Inset: histogram for set voltage distribution. **f**, Measured d.c. I-V characteristics of a Ag/dislocation-free i-Si/p-Si substrate device, where no switching behaviour is observed even when applying a very high voltage. **g**, Plan-view SEM images of epiRAM after etching for 0 s, 5 s and 10 s. Scale bar, 200 nm. **h**, Semilogarithmic d.c. I-V characteristics of 0 s and 5 s etched epiRAM. **i**, Linear-scale d.c. I-V characteristics of 0 s and 5 s etched epiRAM. **j**, I-V characteristics of epiRAM at high resistance state (HRS) and SiGe at the virgin state.

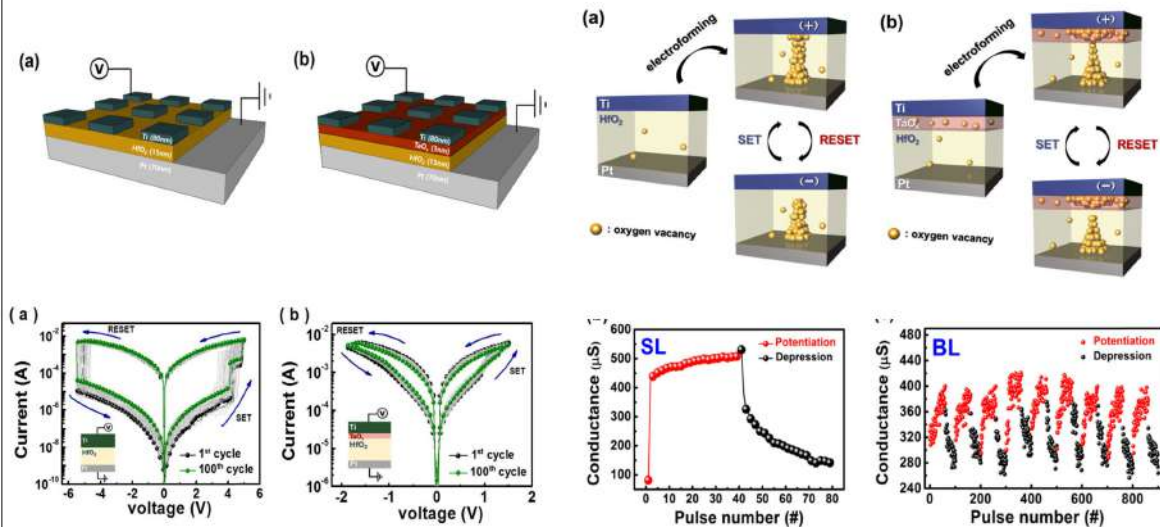


FIRST IN CHANGE

15

## II. 뇌를 모사한 인공 시냅스 소자 – 메모리 기반

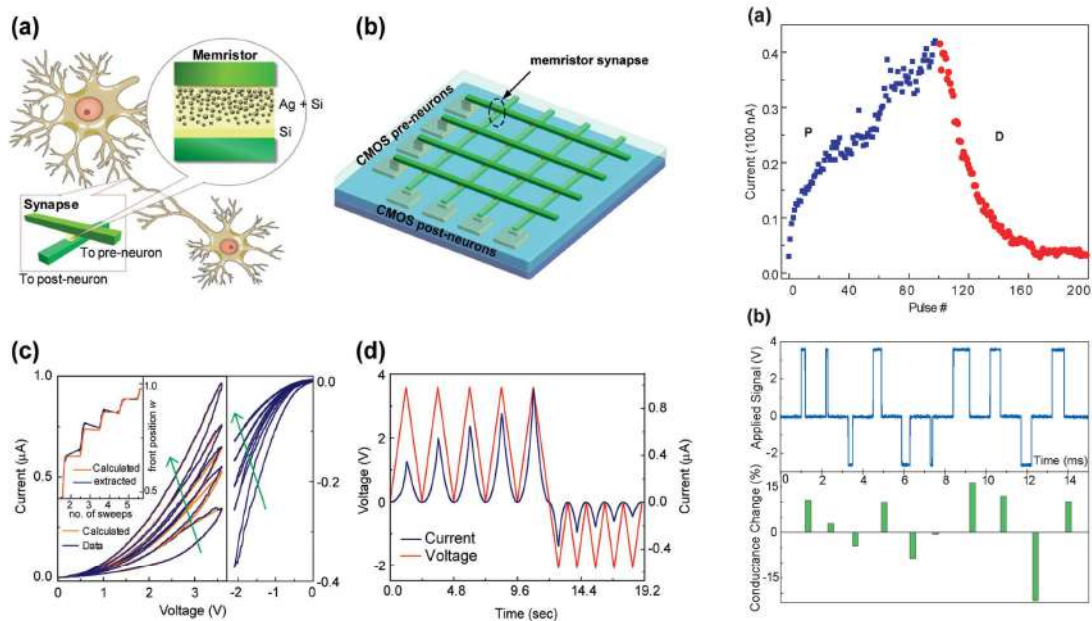
Engineering synaptic characteristics with TaOx/HfOx bilayer  
Kim et al. Nanotechnology (2018).



## II. 뇌를 모사한 인공 시냅스 소자 – 메모리 기반

Nanoscale memristor – cosputtered Ag in Si → continuous motion of conducting front leading to analog change

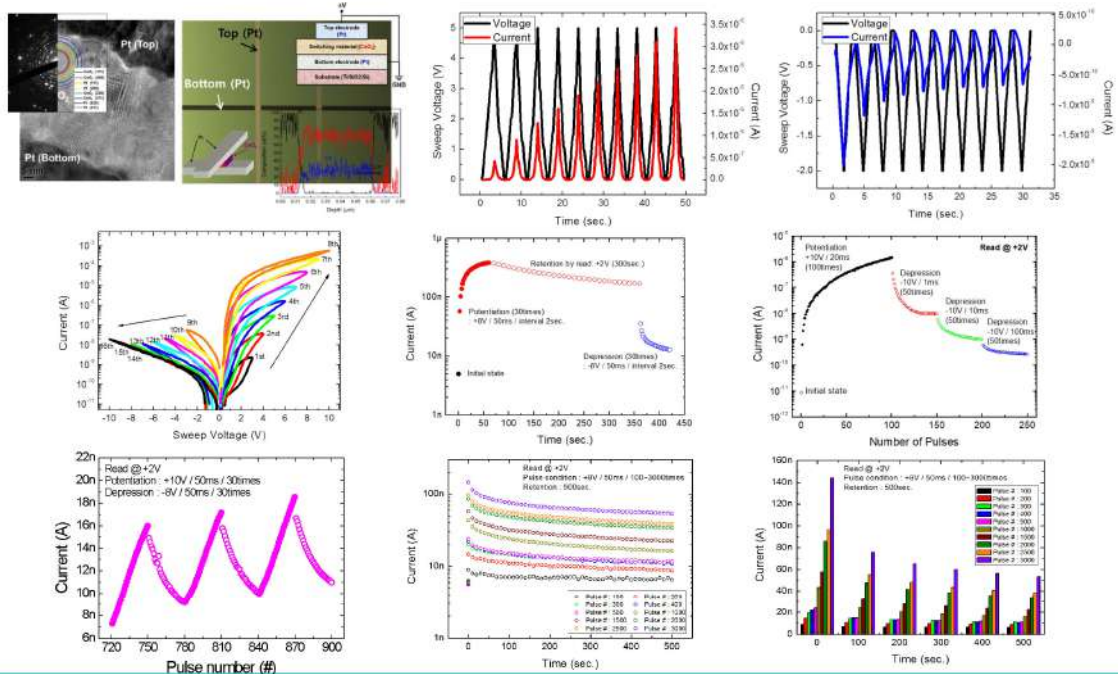
Jo et al. Nano Lett. (2010)



## II. 뇌를 모사한 인공 시냅스 소자 – 메모리 기반

Analog synaptic characteristics in Pt/CeO<sub>2</sub>/Pt: interface state modulation

Kim et al. Nanotechnology (2017), APL Materials (2019)

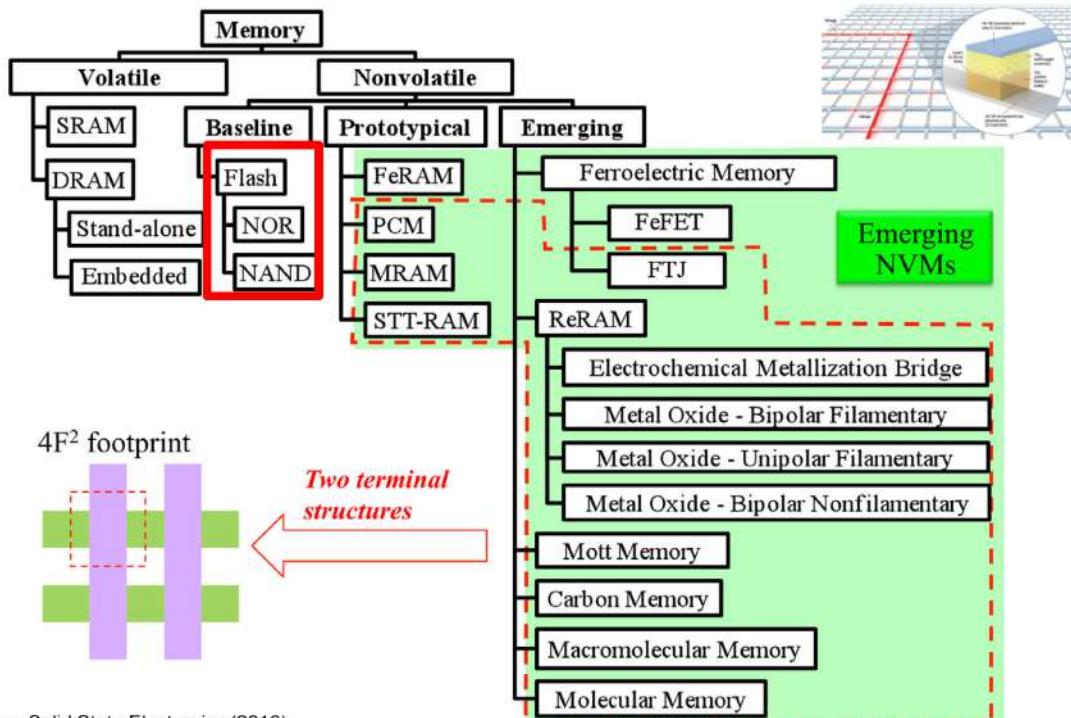


UNIST

FIRST IN CHANGE

18

## II. 뇌를 모사한 인공 시냅스 소자 – 메모리 기반



A. Chen, Solid State Electronics (2016).

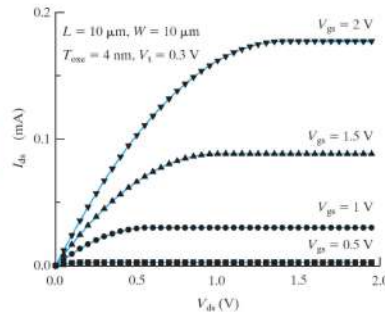
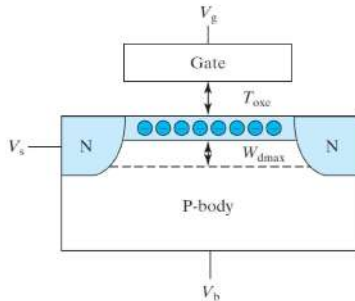
UNIST

FIRST IN CHANGE

19

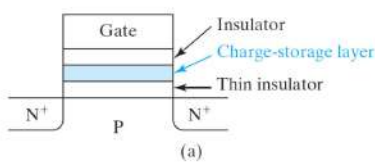
## II. 뇌를 모사한 인공 시냅스 소자 – 메모리 기반

### ◆ MOSFET, TFT

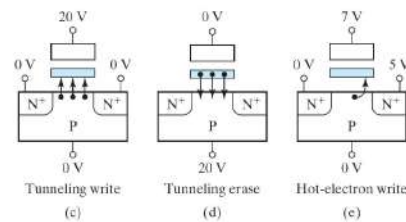
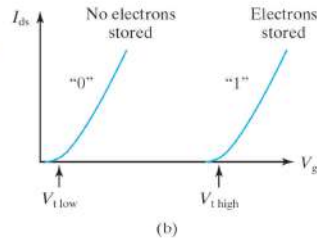


$$I_{dsat} = \frac{W}{2mL} C_{oxe} \mu_{ns} (V_{gs} - V_t)^2$$

### ◆ 플래시 메모리 Flash memory



$$\Delta V_T = -\frac{Q}{C_{FC}}$$



C. Hu, *Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits* (2009).

UNIST

FIRST IN CHANGE

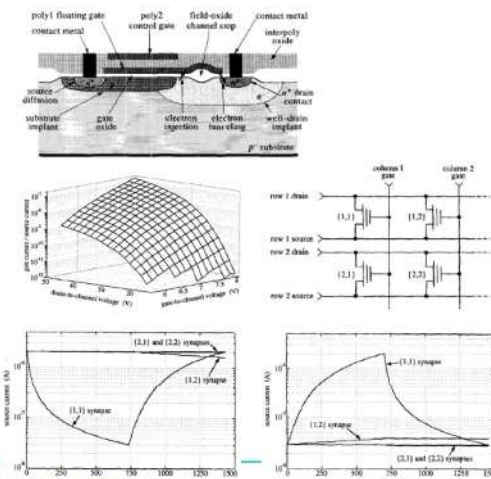
20

## II. 뇌를 모사한 인공 시냅스 소자 – 메모리 기반

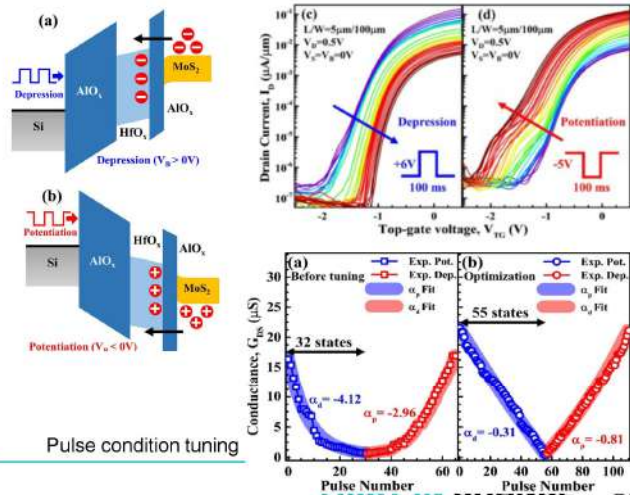
### 3단자 메모리 Synaptic Tr.

- 학습과 신호처리를 여러 단자를 통해 분리해서 수행이 가능
- 3단자를 활용하여 보다 유연한 동작 구현 & 간섭효과 최소화
- 가중치 변화 조절 용이, 하지만 집적도에 불리

A single-transistor silicon synapse  
Diorio et al. IEEE Trans. Elec. Dev. (1996)



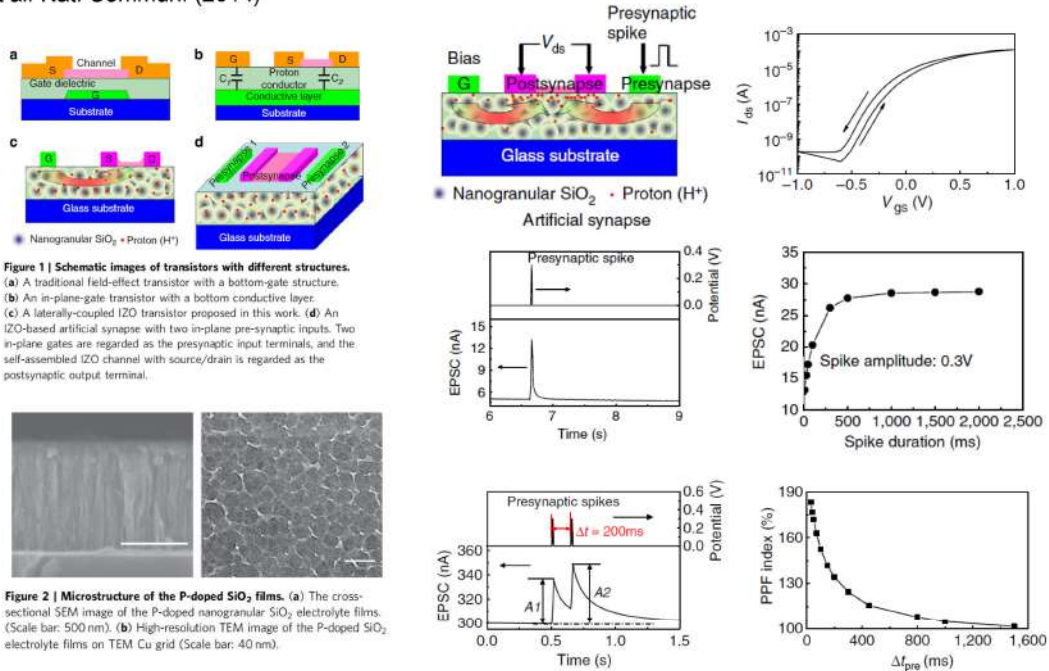
Synapse composed of ultrathin MoS<sub>2</sub> and charge-trap memory  
Chung et al., IEEE Elec. Dev. Lett. (2020).



UNIST

## II. 뇌를 모사한 인공 시냅스 소자 – 이온 이동 기반

**Artificial synapse with proton conductor – proton as n-type dopant in oxide semiconductor**  
Zhu et al. Nat. Commun. (2014)



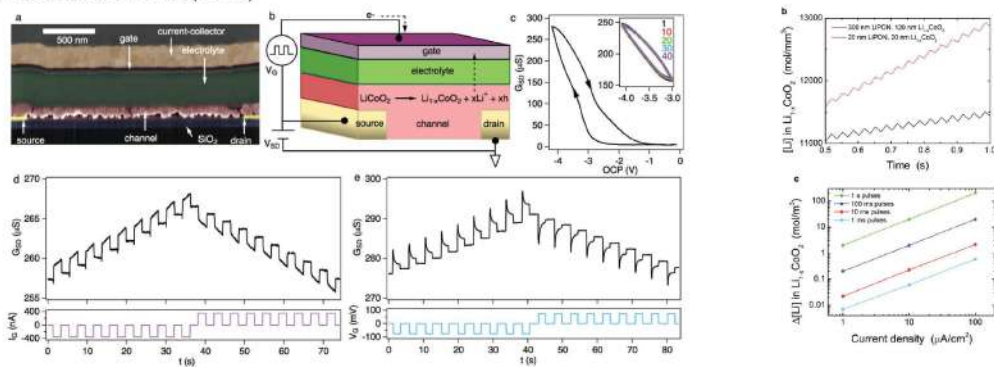
UNIST

FIRST IN CHANGE

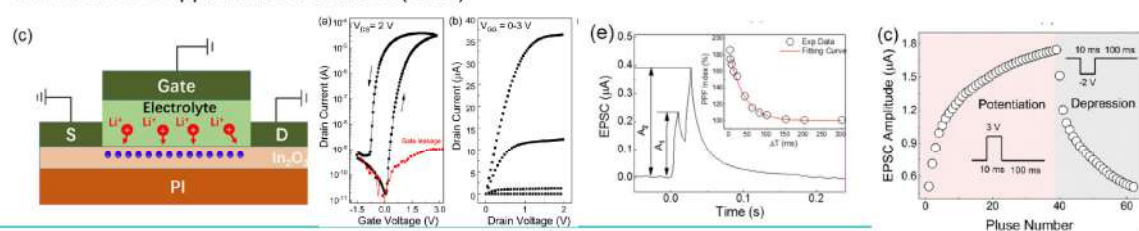
22

## II. 뇌를 모사한 인공 시냅스 소자 – 이온 이동 기반

**Li-ion synaptic transistor – Li ion migration into electrolyte**  
Fuller et al. Adv. Mater. (2017)



**Solution-processed In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> flexible synaptic transistor with LiClO<sub>4</sub> in polyethylene gate electrolyte – Li ion accumulation at the interface**  
Zhu et al. ACS Appl. Mater. Interfaces (2020)



UNIST

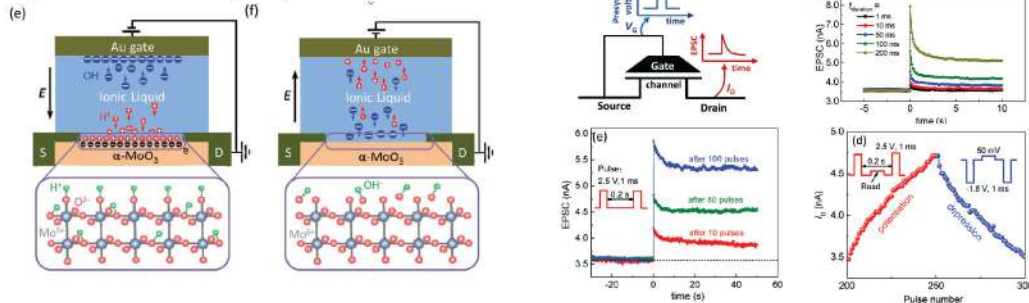
FIRST IN CHANGE

23

## II. 뇌를 모사한 인공 시냅스 소자 – 이온 이동 기반

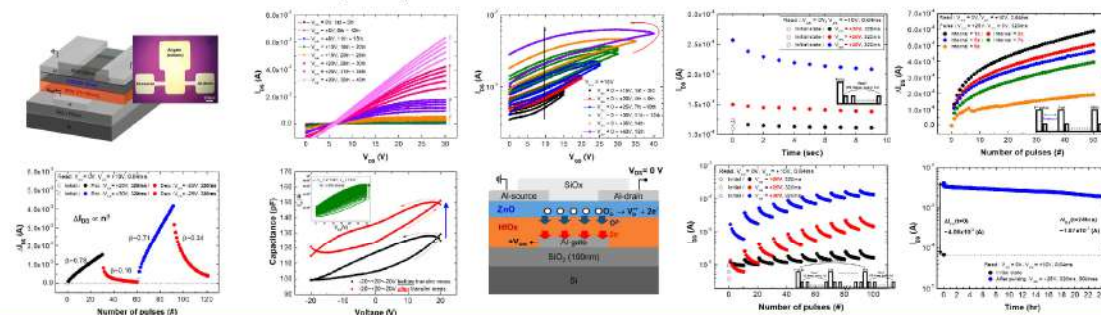
### A synaptic transistor based on quasi-2D molybdenum oxide

Yang et al. Adv. Mater. (2017)



### A synaptic transistor based on oxide-semiconductor TFT

Lee et al. Adv. Electron. Mater. (2020)



UNIST

FIRST IN CHANGE

24

## 목 차

### I. 뉴로모픽 시스템

- 폰 노이만 시스템 vs. 뉴로모픽 시스템
- 인공 시냅스

### II. 뇌를 모사한 인공 시냅스 소자

- 메모리를 이용한 인공 시냅스 소자
- 이온 이동을 이용한 인공 시냅스 소자

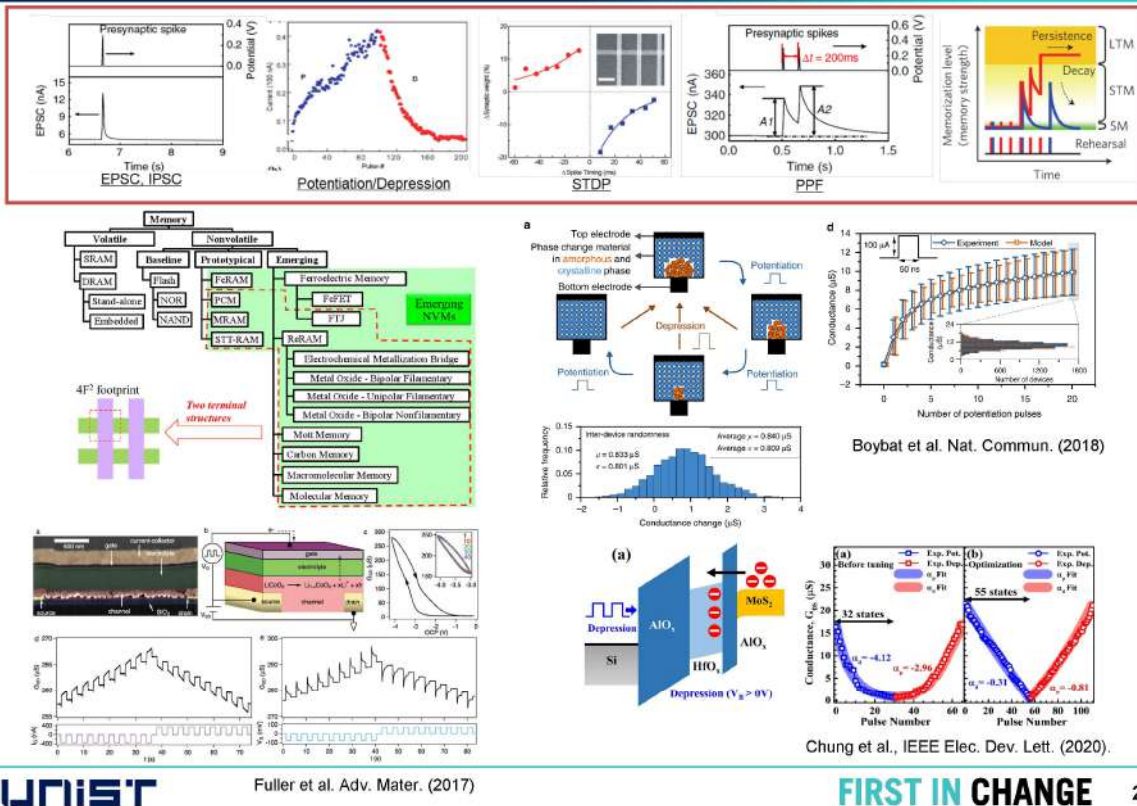
### III. 기술적 난제 및 도전

UNIST

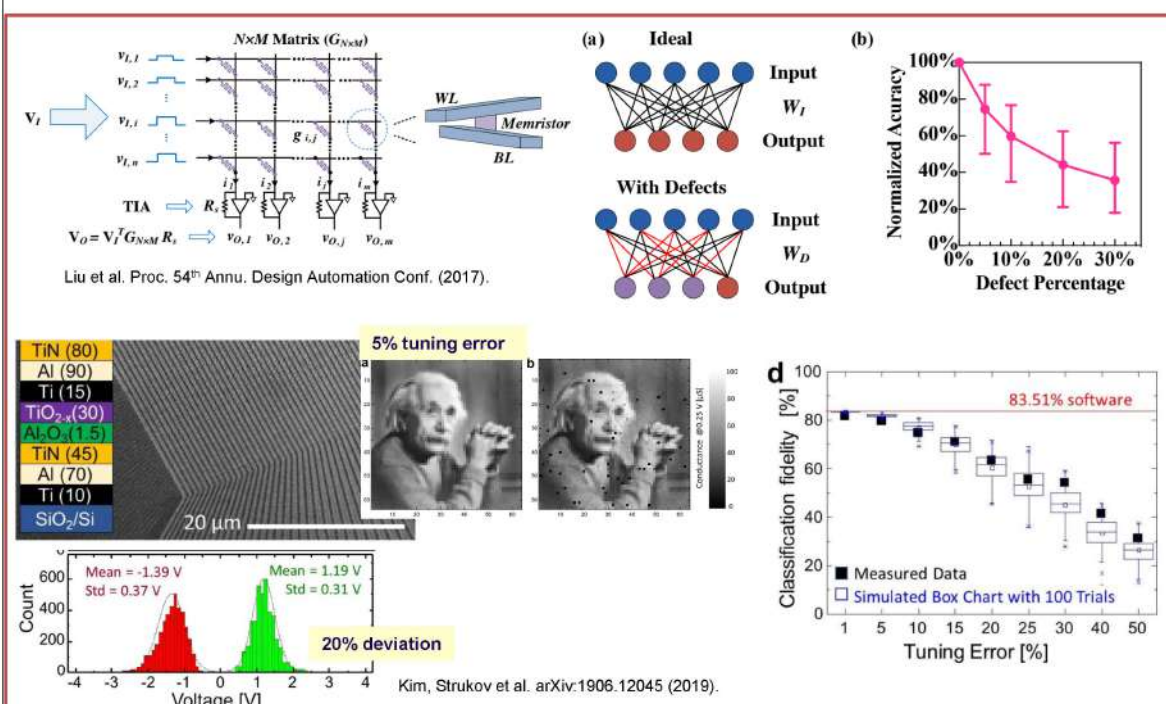
FIRST IN CHANGE

25

### III. 기술적 난제 및 도전 – 성능, 신뢰성



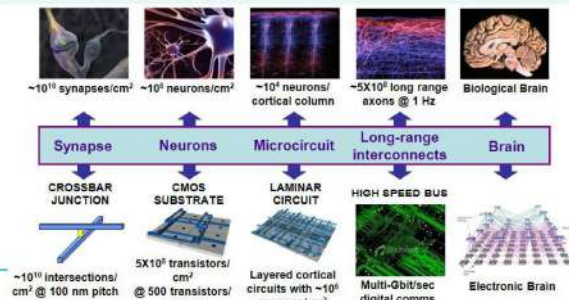
### III. 기술적 난제 및 도전 – 성능, 신뢰성



### III. 기술적 난제 및 도전 – 성능, 신뢰성

고성능 시냅스 소자 구현: **재료/구조/소자/mechanism/알고리즘/시스템**

- 1) 고밀도 뉴런-시냅스 네트워크 구조 (2단자 또는 3단자 시냅스)
- 2) 아날로그, 선형적, 대칭적 시냅스 가중치 변화, endurance (학습), retention (추론)
- 3) 대용량 학습을 위한 높은 throughput (e.g., number of images/second)
- 4) 시간 의존적 시냅스 가중치 업데이트 (SNN 응용)
- 5) 다양한 시냅스 거동: Paired-pulse facilitation (PPF), spike-timing-dependent plasticity (STDP), short-term and long-term plasticity (STP, LTP), excitatory/inhibitory postsynaptic response 등
- 6) 뇌를 모사하는 동작 조건  
: 저에너지 소모 ( $\sim \text{fJ/event}$ ), 저전력/고속 동작 (수십 mV, nA,  $< \text{ms}$  등)  
(참고: 플래시메모리:  $10 \mu\text{J/KB}$ ,  $> 15 \text{ V}$ , 수  $\mu\text{A}$  (read), 수십  $\mu\text{s}$  (pgr), 수 ms (ers))
- 5) Si CMOS 소자/공정 호환성, 3차원 집적 가능, 인공 신경망 알고리즘 적용 등
- 6) 높은 균일성, 안정성, 신뢰성



*Systems of Neuromorphic Adaptive Plastic Scalable Electronics*

Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), 2008

UNIST

FIRST IN CHANGE

28

THANK YOU



## 주제발표 2 3차원 집적된 뉴로모픽 소자 시스템

최 창 환

한양대학교 신소재공학부 교수



## Outline

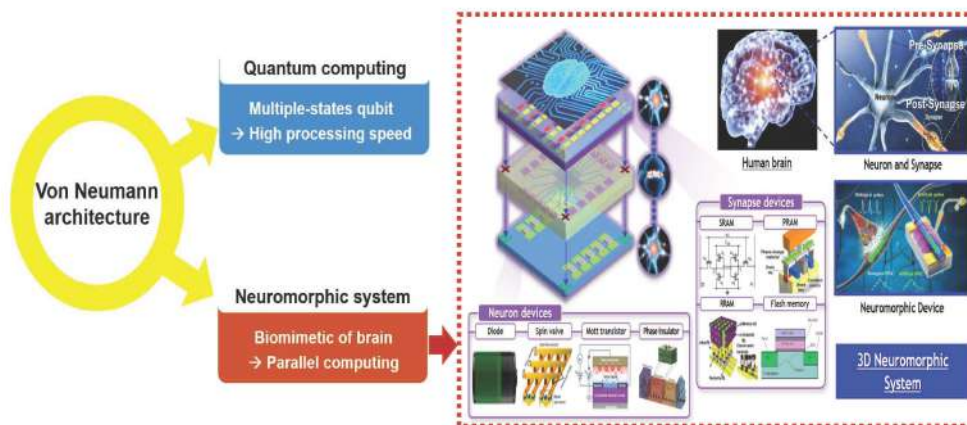


- Introduction – neuromorphic computing system
- Hardware-based neuromorphic device system
  - [1] Synaptic materials for artificial synapse device
  - [2] 3D integrated neuromorphic system
- Conclusion



나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

## Neuromorphic Computing



- Current Von-Neumann architecture bottleneck between memory and processor  
→ Alternative computing system: Neuromorphic computing, Quantum computing
- Highly efficient data process with low power consumption can be possible with hardware-based neuromorphic devices

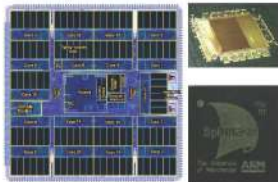


나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

## Neuromorphic Chips

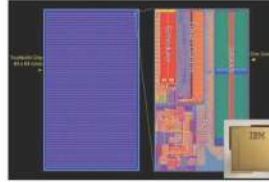


### SpiNNaker (The University of Manchester)



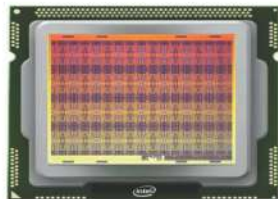
- 18-ARM9 core/chip
- SoC (102mm<sup>2</sup>)
- 18K neuron/chip
- 130nm
- 50KW@500M Neurons

### TrueNorth (IBM)



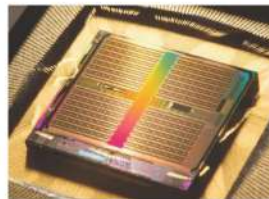
- 45pJ/spike
- 1M Neuron
- 256M Synapse
- 73mW

### LOIH (INTEL)



- 14nm
- SNN based STDP training
- 130,000 Neuron
- 130M Synapse

### Dyanp (The University of Zurich)



- 28nm
- SNN based On-chip training

- Hardware-based neuromorphic chip has been released, but power consumption could be potential issue since these chips rely on the conventional CMOS-based devices

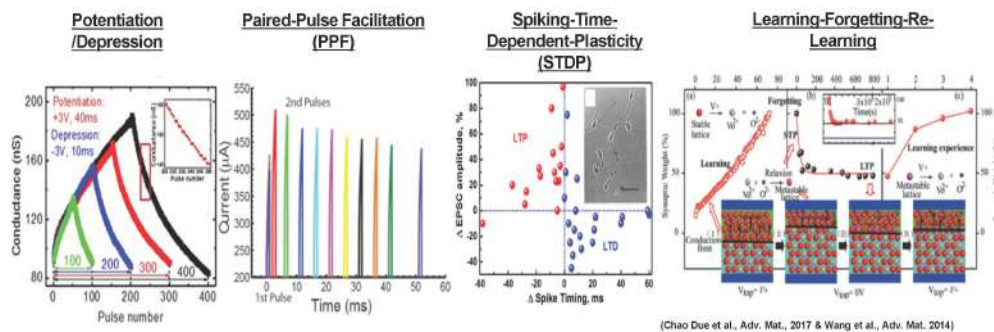


나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

## Required Synapse Characteristics



### Examples of biological synapse related characteristics

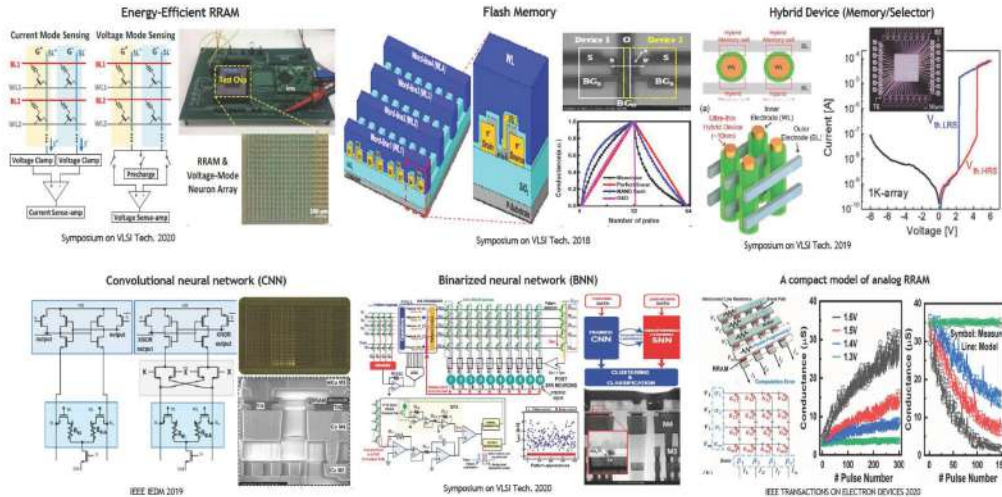


- In biological synapse, signals transfer to neuron depending on weight and various corresponding characteristics.
- In hardware-based synapse, device should be able to emulate the biological synapse functions such as potentiation/depression, paired-pulse facilitation, spiking-time dependent-plasticity, learning-forgetting-re-learning, and so on using various material, devices, and structure.



나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

## Neuromorphic System: Synapse & Neuron

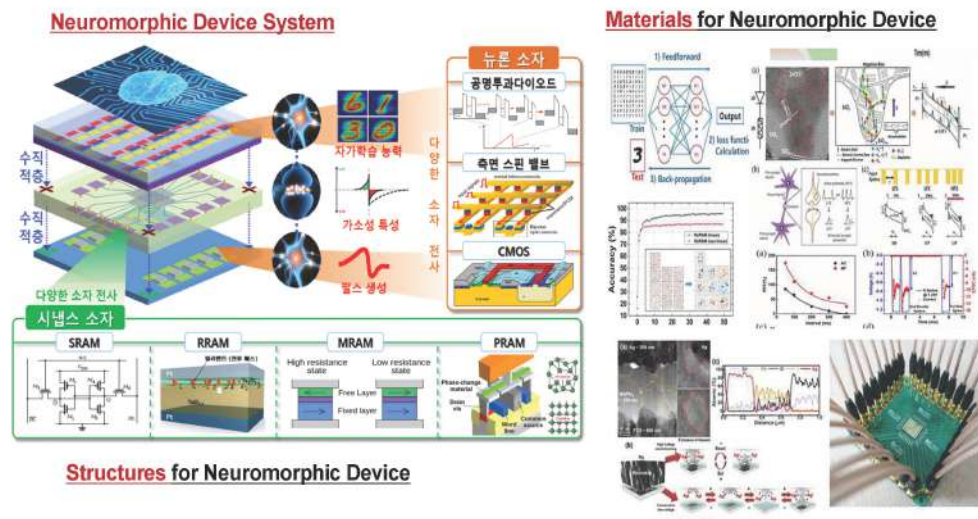


- Device (ex. RRAM array, Flash array) & neural network (ex. CNN, BNN) approaches
- 3D neuromorphic system with array device



나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

## Neuromorphic Device System



- Hardware-based neuromorphic device system can be realized by different materials and device structure along with neural algorithm.

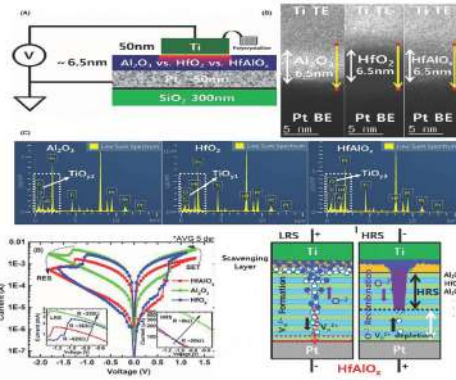


나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

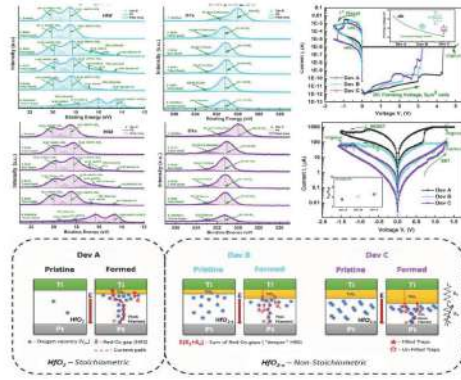
## Synaptic Materials for Artificial Synapse (1/8)



## ①-1 Metal Oxide

High k-metal oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{HfO}_2$ , and  $\text{HfAlO}_x$ )

'Comparative Study of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{HfO}_2$ , and  $\text{HfAlO}_x$  for Improved Self-Compliance Bipolar Resistive Switching'  
Journal of the American Ceramic Society 2017

Ti &  $\text{HfO}_2$ 

'Influence of Oxygen Vacancies in ALD  $\text{HfO}_2$  Thin Films on Resistive Switching Phenomena with a  $\text{Ti/HfO}_2/\text{Pt}$  Structure'  
Applied Surface Science 2018

- The comparison of resistive switching (RS) storage in the same device architecture
- Study its effect on RS behavior with a  $\text{Ti/HfO}_{2-x}/\text{Pt}$  structure

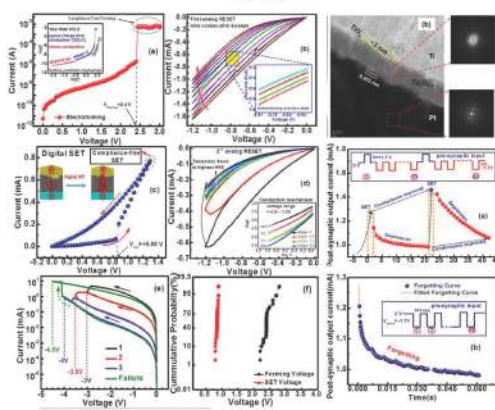


나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

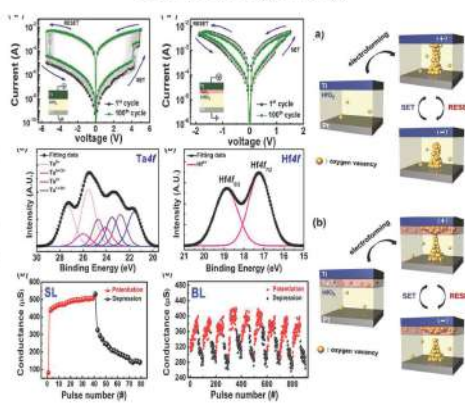
## Synaptic Materials for Artificial Synapse (2/8)



## ①-2 Metal Oxide

 $\text{Ta}_2\text{O}_{5-x}$ 

'Compliance-Free, Digital SET and Analog RESET Synaptic Characteristics of Sub-Tantalum Oxide Based Neuromorphic Device'  
Scientific Reports 2018

Bi-layer ( $\text{TaO}_x$  &  $\text{HfO}_2$ )

'Engineering Synaptic Characteristics of  $\text{TaO}_x/\text{HfO}_2$  Bi-Layered Resistive Switching Device'  
Nanotechnology 2018

- It exhibits the digital SET and analog RESET switching without any compliance current
- $\text{TaO}_x/\text{HfO}_2$  bi-layered device: gradual switching and symmetric conductance change



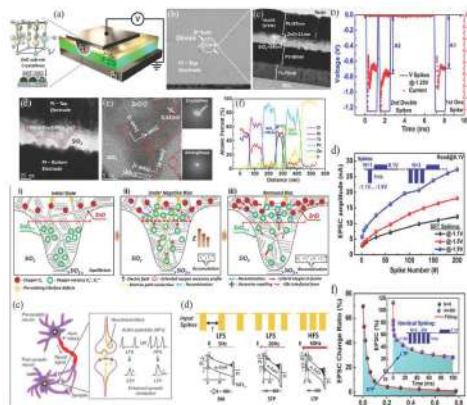
나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

## Synaptic Materials for Artificial Synapse (3/8)

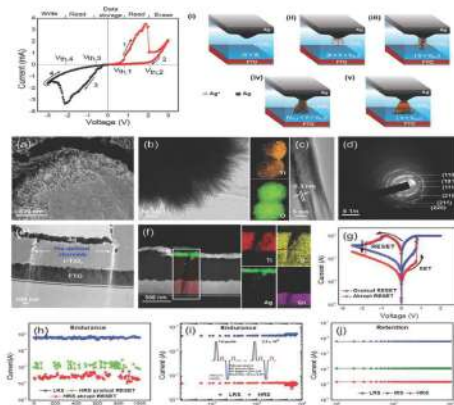


## ①-3 Metal Oxide

## Cone-shaped ZnO



'Bio-Realistic Synaptic Characteristics in the Cone-Shaped ZnO Memristive Devices'  
NPG Asia Materials 2019

Rutile TiO<sub>2</sub>

'Tailored Nanoplateau and Nanochannel Structures Using Solution-Processed Rutile TiO<sub>2</sub> Thin Films for Complementary and Bipolar Switching Characteristics'  
Nanoscale 2019

- n-ZnO cone-shape: bio-realistic synaptic plasticity functions in the Pt/n-ZnO/SiO<sub>2-x</sub>/Pt
- Rutile TiO<sub>2</sub> (r-TiO<sub>2</sub>): Complementary RS (CRS) and bipolar RS (BRS)

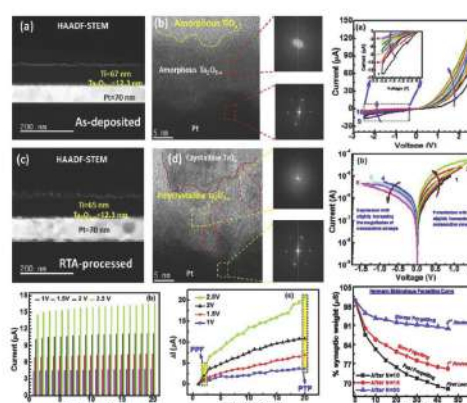


나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

## Synaptic Materials for Artificial Synapse (4/8)

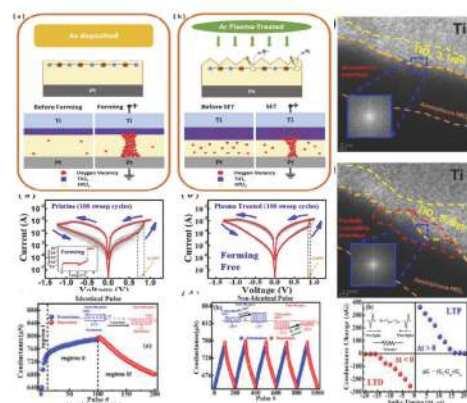


## ② Interface engineering of metal oxide

Ta<sub>2</sub>O<sub>5-x</sub> + RTA treatment

'Structural Engineering of Tantalum Oxide Based Memristor and Its Electrical Switching Responses Using Rapid Thermal Annealing'  
Journal of Alloys and Compounds 2018

## Ar plasma treatment



'Improved Resistive Switching and Synaptic Characteristics using Ar Plasma Irradiation on the Ti/HfO<sub>2</sub> Interface'  
Journal of Alloys and Compounds 2019

- Rapid thermal annealing (RTA): analog switching characteristics
- Ar plasma-treated device: the symmetric and near-linear conductance change

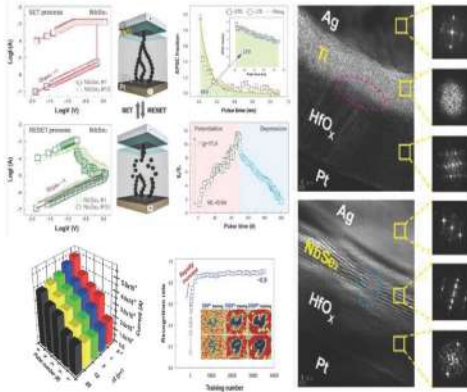


나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

## Synaptic Materials for Artificial Synapse (5/8)



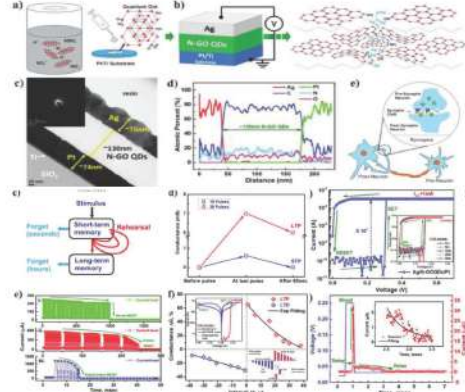
## ③ 2D material and Quantum dot

2D material NbSe<sub>2</sub> for buffer layer

'Suppressed Stochastic Switching Behavior and Improved Synaptic Functions in an Atomic Switch Embedded with a 2D NbSe<sub>2</sub> Material'

ACS Applied Interfaces & Materials 2021

## Graphene oxide quantum dots



'Silver-Adapted Diffusive Memristors based on Organic Nitrogen-doped Graphene Oxide Quantum Dots (N-GOQDs) for Artificial Bio-Synapse Application'

Advanced Functional Materials 2019

- A CVD 2D NbSe<sub>2</sub> blocking layer, the stochastic Ag-ion diffusion behavior is well-controlled
- Graphene quantum dots (GQDs): threshold RS via silver cation (Ag<sup>+</sup>) migration dynamics

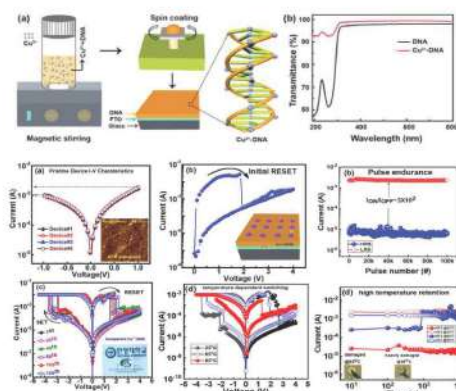


나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

## Synaptic Materials for Artificial Synapse (6/8)

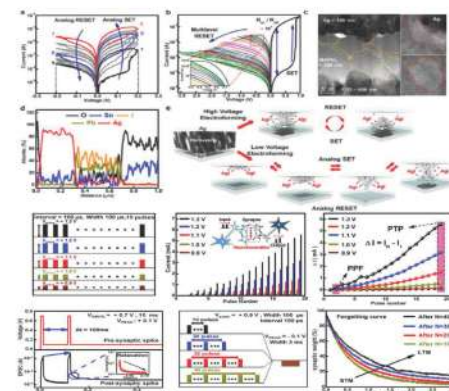


## ④ DNA &amp; Perovskite material

Cu<sub>2</sub><sup>+</sup>-doped Salmon DNA

'The Observation of Resistive Switching Characteristics using Transparent and Bio-Compatible Cu<sup>2+</sup>-doped Salmon DNA Composite Thin Film'

Nanotechnology 2019

Perovskite CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>

'Two-terminal Artificial Synapse with Hybrid Organic-Inorganic Perovskite CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> Synaptic Material Device and Low Operating Power Energy (~47 fJ/μm<sup>2</sup>)'

Journal of Alloys and Compounds 2020

- The Cu<sup>2+</sup>-doped salmon DNA composite thin film: good bipolar switching characteristics
- Organic-inorganic hybrid perovskite: low as 47 fJ/μm<sup>2</sup>



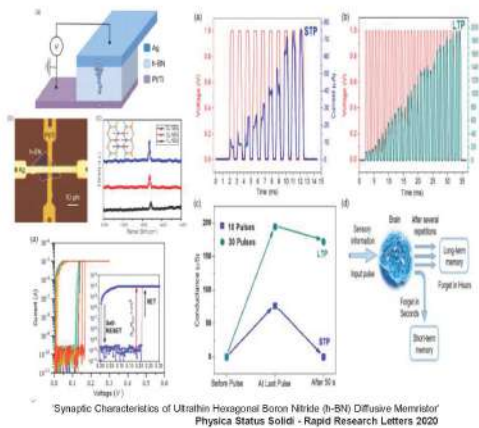
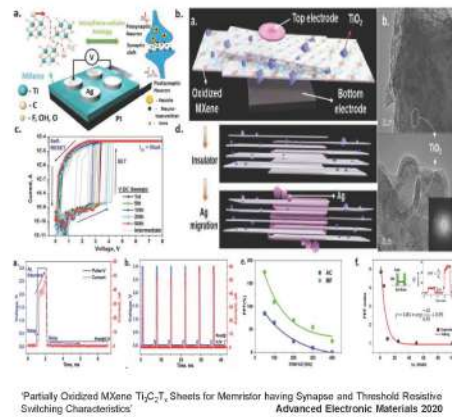
나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

## Synaptic Materials for Artificial Synapse (7/8)



## ⑤ h-BN &amp; MXene

## h-BN diffusive memristor

MXene  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  Sheets

- 2D-flexible h-BN: PPF, SRDP, and STP to LTP synaptic behaviors are demonstrated
- Transition metal carbide (MXene): threshold resistive switching characteristics

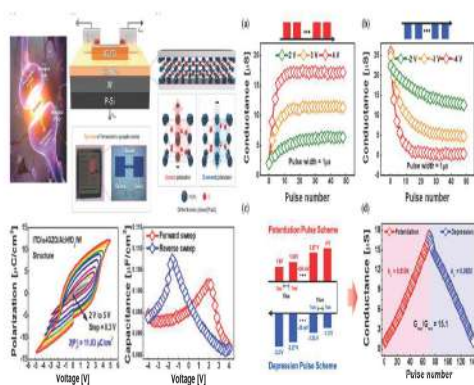


나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

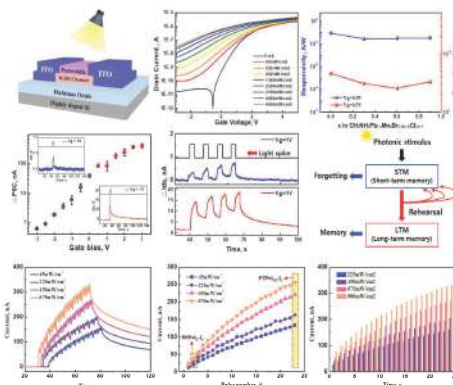
## Synaptic Materials for Artificial Synapse (8/8)



## ⑥ Ferroelectric and Optical material

Al-doped  $\text{HfO}_2$  ferroelectric thin film

## Optical perovskite material



- A ferroelectric material-based thin-film transistor (FeTFT): analog conductance modulation
- Optical perovskite material: stable and subtle synaptic property modulation



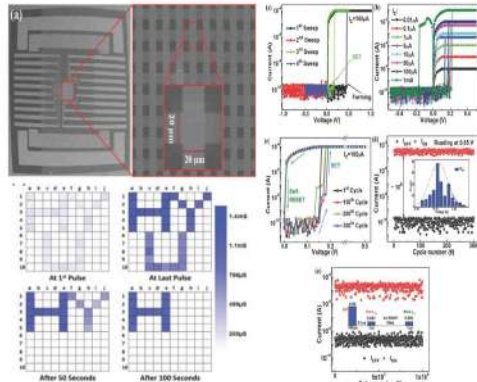
나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

## Synaptic Structure for Artificial Synapse



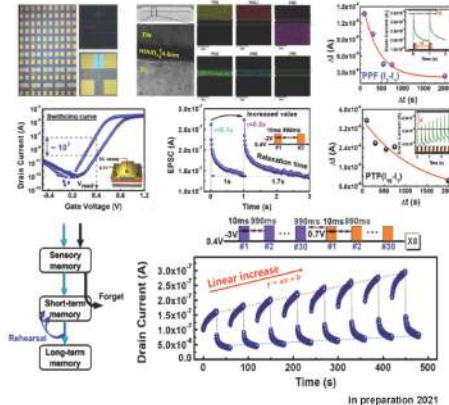
### ⑦ Array and 3-terminal structure

#### HfO<sub>2</sub> 2-terminal crossbar array



"The Coexistence of Threshold and Memory Switching Characteristics of ALD HfO<sub>2</sub> Memristor Synaptic Arrays for Energy-Efficient Neuromorphic Computing"

#### 3-terminal MOSFET synapse



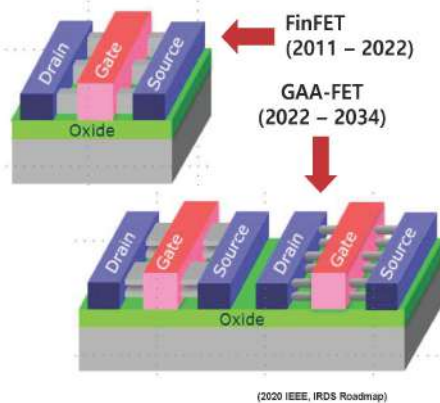
In preparation 2021

- HfO<sub>2</sub>-based memristor synaptic arrays: threshold switching (TS) and memory switching (MS)
- SOI-MOSFET synapse: stable synaptic plasticity using 3-terminal structure

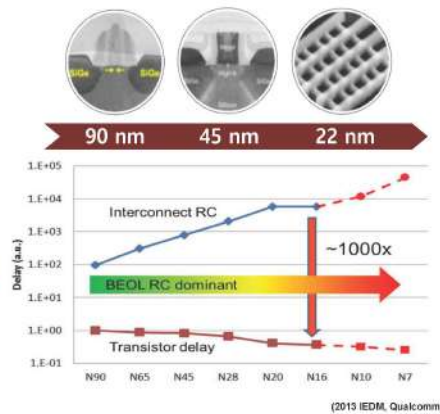


나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

## 3D Integration (1/2)



(2020 IEEE, IRDS Roadmap)

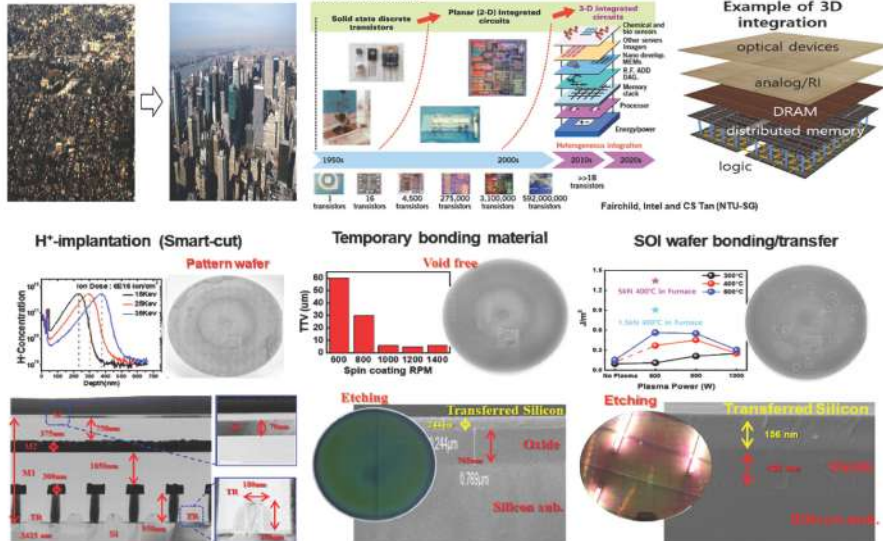


- Semiconductor processing reaches physical scaling limit
- Increased RC delay with longer interconnection line → Power consumption  
→ alternative integration scheme (3D integration)



나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

## 3D Integration (2/2)

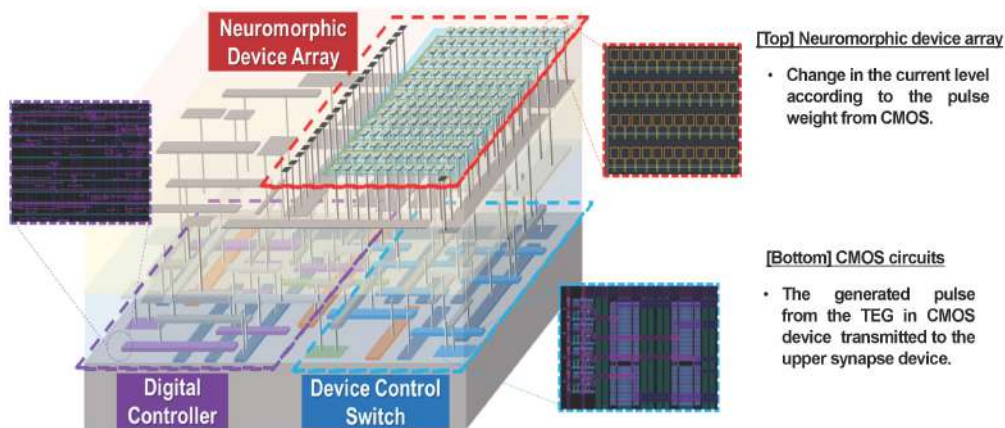


- 3D integration can provide heterogeneous integration
- 3 different approaches have been developed to integrate different wafer substrates in our laboratory



나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

## 3D Neuromorphic Device System



- 3D neuromorphic system was implemented by neuromorphic array and CMOS circuits.
- The neuromorphic array devices were 3-dimensionally connected to CMOS circuits that were designed by automatically and selectively evaluable TEG.



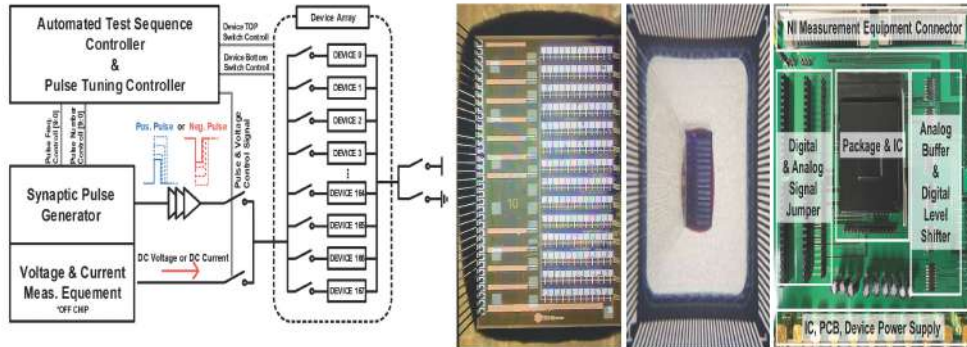
나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

### 3D Neuromorphic Device System



#### TEG with CMOS circuits for neuromorphic system

#### On-Chip learning neuromorphic system



- The circuits with digital controller and control switch, which generated and derived the controllable pulses to automatically selected neuromorphic devices.
- The incorporated neuromorphic devices with CMOS circuits were packaged and attached to PCB to evaluate neuromorphic characteristics.



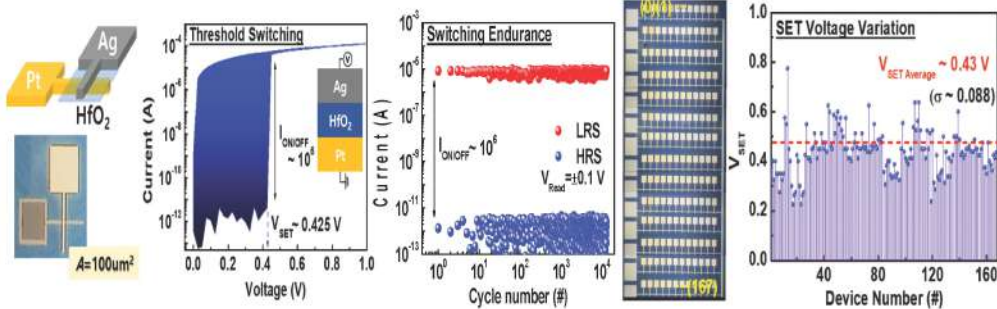
나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

### 3D Neuromorphic Device System: RRAM Array



#### Electrical properties of RRAM device in array

#### Operating distribution of RRAM array devices



- Electrical characteristics of one single device of the neuromorphic  $12 \times 14$  array devices
  - ① Diffusion-memristor, ② Low operating voltage of 0.425 V,
  - ③ On/off-current ratio of  $\sim 10^6$ , ④ Endurance above  $10^4$
- Average  $V_{SET}$  is  $\sim 0.43$  V and the root mean squared error of operating  $V_{SET}$  is  $\sim 0.088$  in neuromorphic  $12 \times 14$  array
  - Reliable characteristics of neuromorphic array device are obtained

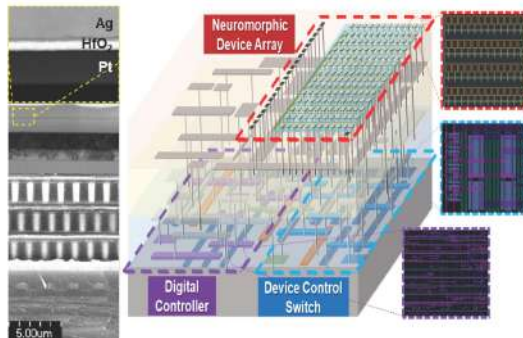


나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

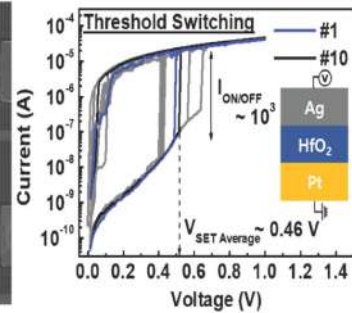
## 3D Neuromorphic System: Integrated Array



RRAM array integrated with CMOS circuits



Switching behavior of RRAM device on CMOS circuit wafer



- TEM and SEM images indicate that 3D neuromorphic system is well fabricated
- The I-V characteristics of a neuromorphic array device on the upper substrate integrated with CMOS circuit on the lower substrate: ①  $V_{SET} \sim 0.46$  V, ②  $I_{on/off} \sim 10^3$

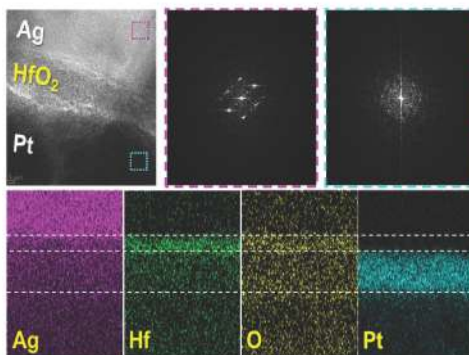


나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

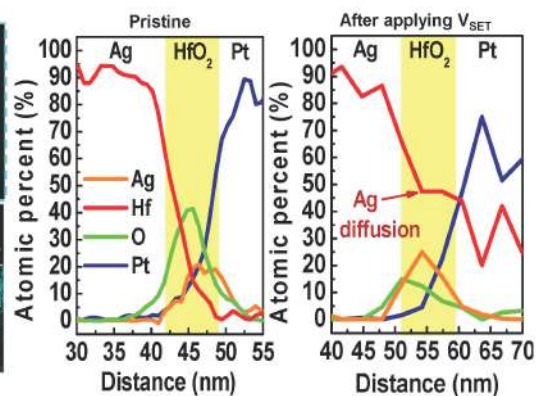
## 3D Neuromorphic System: Integrated Array



STEM, FFT and mapping images



EDS analysis of RRAM device



- The neuromorphic  $12 \times 14$  array devices on the CMOS circuits were analyzed by HRTEM to study structure, depth profiles, crystallinity and elements state of device
- EDS analysis of both initial state and state after applying  $V_{SET}$ : the Ag migration into  $HfO_2$  layer

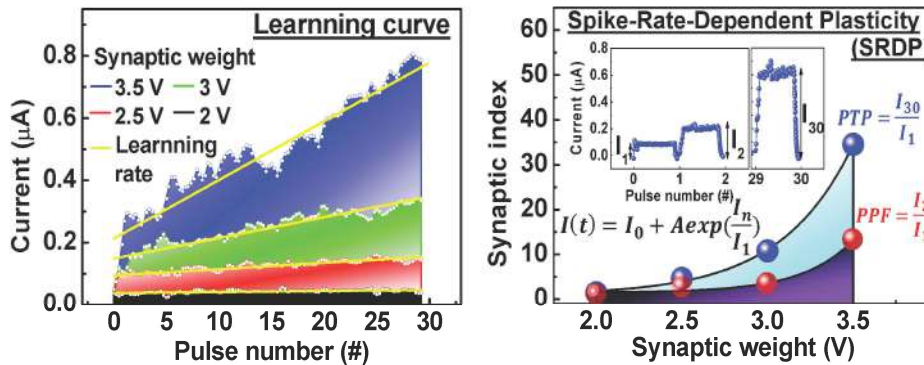


나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

## 3D Neuromorphic System



## Spike-rate dependent plasticity (SRDP)



- Hebbian learning rule: the post-synaptic current level also increases when the strength of the synaptic weight increases.  
→ Weight increased from 2 V to 3.5 V, learning rate also increased from  $3 \times 10^{-3}$  to  $0.2 \mu\text{A}/\#$
- Pulse-paired facilitation (PPF) & Post-tetanic potentiation (PTP) are obtained from the learning curve

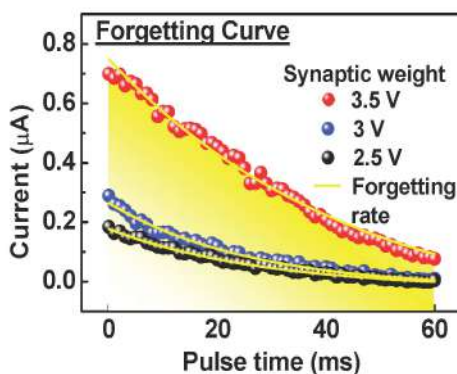


나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

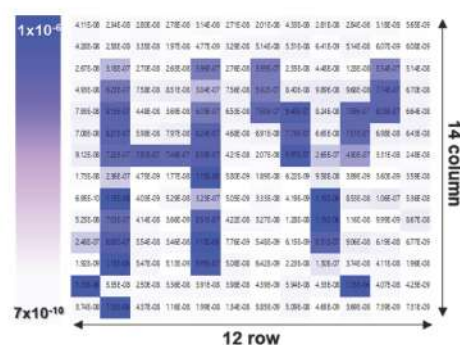
## 3D Neuromorphic System: Pattern Recognition



## Forgetting behavior



## Pattern training of 12x14 array device



- After strong stimulation, the stronger stimulation needs longer time to return to its initial state. [The decreasing rates of exponential formula: 8.89, 2.89, and 2.02]
- Array devices were trained by words of 'H' and 'Y' with the strong 3.5 V weight and the rest of the devices were trained with 3.0 V synaptic weight. [relaxation time 0.1 s, read voltage 2.0 V].

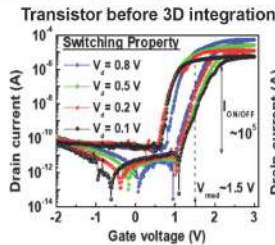
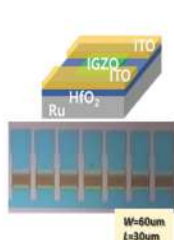


나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

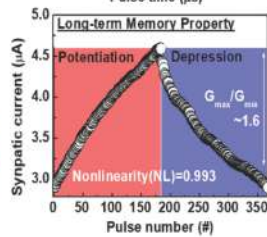
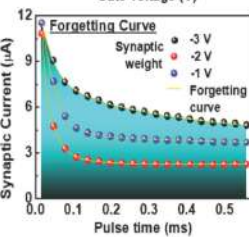
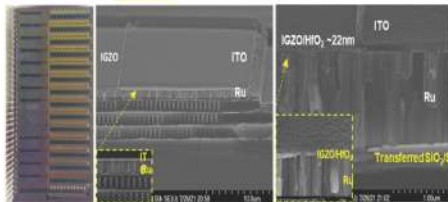
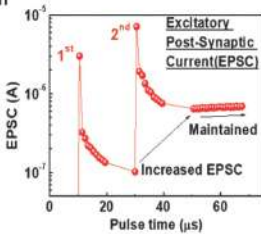
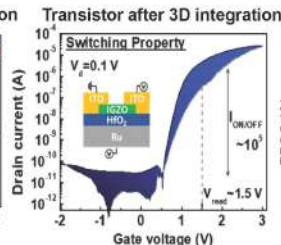
## 3D Neuromorphic System: 3-Terminal Device



## Transistor synapse array integrated 3D neuromorphic system



## Synaptic plasticity with 3-terminal transistor array



- Electrical characteristics and synaptic plasticity of 3D neuromorphic system with 3-terminal transistor synapses incorporated CMOS circuits have been demonstrated (ex. EPSC, Forgetting curve, Long-term memory etc)

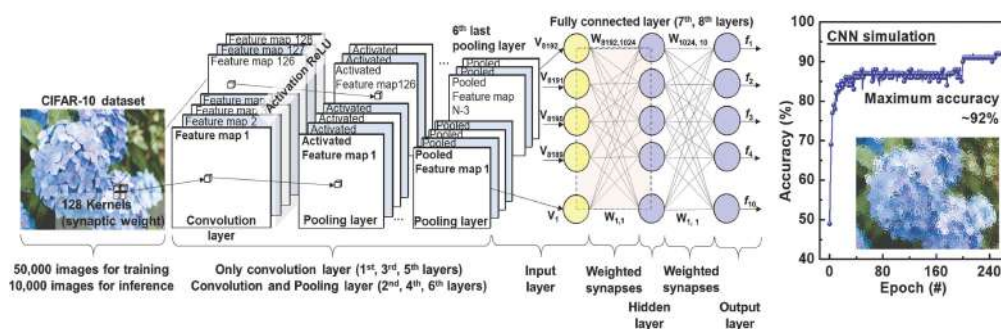


나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

## 3D Neuromorphic System: Image Recognition



## Synaptic plasticity and convolution neural network (CNN) simulation



- 3D neuromorphic system with  $12 \times 14$  transistor array and CMOS circuits has been implemented to recognize the specific image (ex. flower) using CNN simulation
- Maximum accuracy for the image recognition is ~92%



나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory

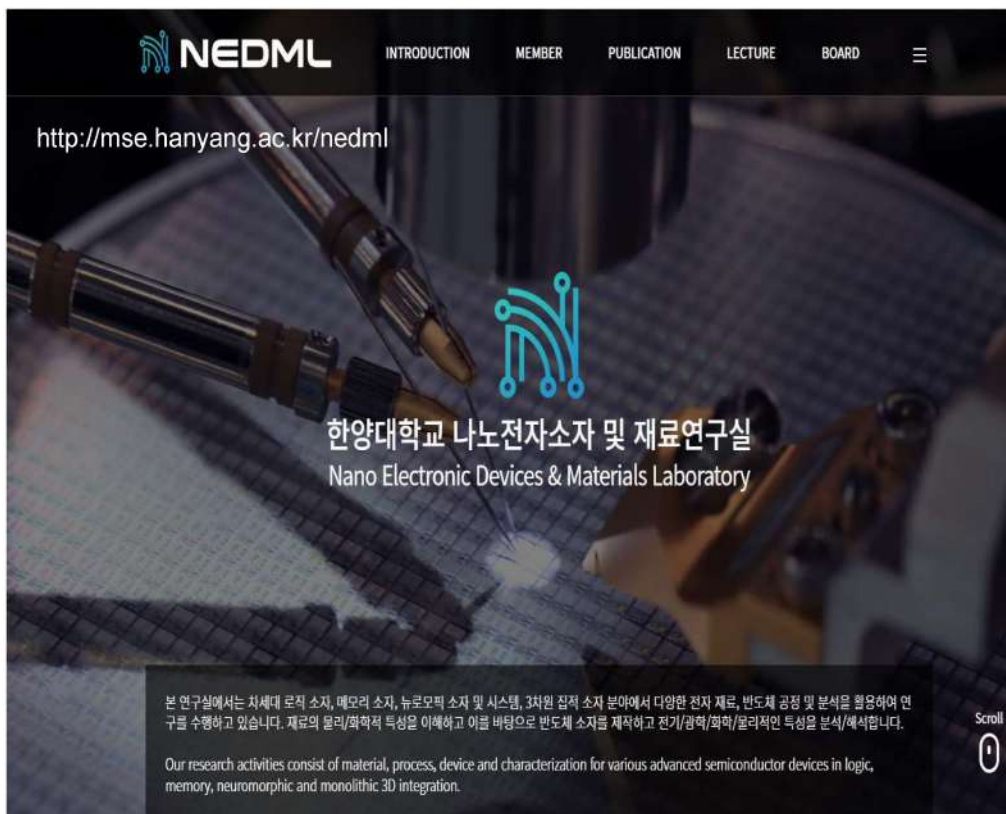
## Summary



- Current computing system should be replaced by alternative computing system like neuromorphic computing system.
- Various material, device, and systems have been explored along with several neural networks
- Main synaptic material and device structure have not been decided yet
- 3D neuromorphic system with CMOS circuits and 2-terminal or 3-terminal device arrays has been demonstrated with well-proven pattern or image recognition
- Besides hardware-based neuromorphic system development, various algorithms should be provided, indicating that holistic research should be carried out in the fields of computer science/engineering, electrical/electronic engineering, materials engineering, physics and so on



나노 전자 소자 및 재료 연구실 (<http://mse.hanyang.ac.kr/nedml>)  
Nano Electronic Devices & Materials Laboratory



## 주제발표 3

# 센서 기술과 뉴로모픽 기술의 융합 : Sensory- Neuromorphic Technology

...

박 진 홍  
성균관대학교 전자전기공학부 교수

한국과학기술한림원 - 원탁토론회

## 센서 기술과 뉴로모픽 기술의 융합 (Sensory Neuromorphic Technology)

Jin-Hong Park, Professor  
School of Electronic and Electrical Engineering  
SKKU Advanced Institute of Nano Technology  
Sungkyunkwan University

1

한국과학기술한림원 - 원탁토론회

# Contents

1. Progress in Neuromorphic Technology
2. Progress in Sensory Neuromorphic Technology
3. Conclusion

2

한국과학기술한림원 - 원탁토론회

## Progress in Neuromorphic Technology

3

Neuromorphic Technology

한국과학기술원  
The Korean Academy of Science and Technology
 성균관대학교  
SUNGKYUNKWAN UNIVERSITY

## Necessity of Neuromorphic Computing

### Data Explosion

Stored Digital Data (Exabytes)

1970 1980 1990 2000 2010 2020

Unstructured: No pre-defined data model  
Structured: Well-defined, easily organized & stored in databases

• The amount of unstructured data is exploding (>100 ZB up to 2025)

### Parallel Computing

Unstructured Data (Image, Sound) → Processing (ex. Learning/Classification) → Classified Data (Strings, Number)

• With the advent of deep learning technology, efficient processing of unstructured data becomes possible.

### Conventional Computing based on Von-Neumann Arch.

Problem: Too high operating power and huge space for processing unstructured data

### Neuromorphic Computing

Solution: Efficient processing for unstructured data (inspired by human brain)

4

Neuromorphic Technology

한국과학기술원  
The Korean Academy of Science and Technology
 성균관대학교  
SUNGKYUNKWAN UNIVERSITY

## Hardware Platform for Neuromorphic Computing

### Neuromorphic Hardware Platform

#### Neural Network

ex) For  $N = 3$

$$\begin{bmatrix} OUT[0] \\ OUT[1] \\ OUT[2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} \\ W_{31} & W_{32} & W_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} IN[0] \\ IN[1] \\ IN[2] \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} W_{11}IN[0] + W_{12}IN[1] + W_{13}IN[2] \\ W_{21}IN[0] + W_{22}IN[1] + W_{23}IN[2] \\ W_{31}IN[0] + W_{32}IN[1] + W_{33}IN[2] \end{bmatrix}$$

• Deep learning is performed on the basis of a matrix-vector multiplication (MVM).  
• MVM requires neuromorphic hardware seen above (Ohm's law & Kirchhoff's law).

### Part of Neuromorphic Hardware

Ohm's Law:  $I = \frac{1}{R} V$

Kirchhoff's Law:  $I_{sum1} = \sum I_{1i}$

### Artificial Synapses

#### Approach A : CMOS-Based Memory

SRAM, DRAM, Flash memory

#### Approach B : Emerging Non-Volatile Memory

RRAM, STT-MRAM, FeFET

5

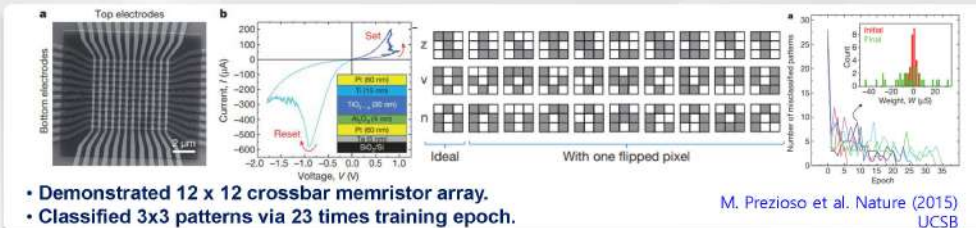
## Neuromorphic Technology

KAST 한국과학기술원  
The Korean Academy of Science and Technology성균관대학교  
SUNGKUN UNIVERSITY

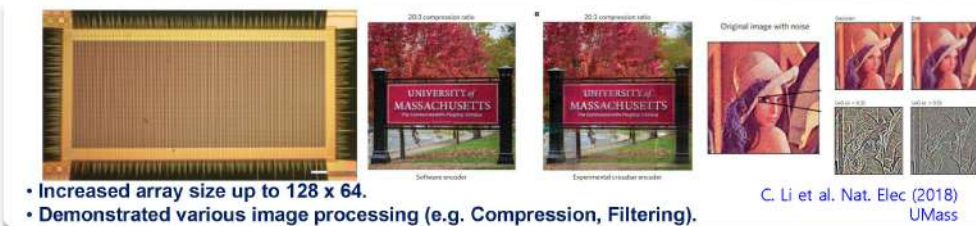
## Hardware Implementation of RRAM Synapse Array

Year

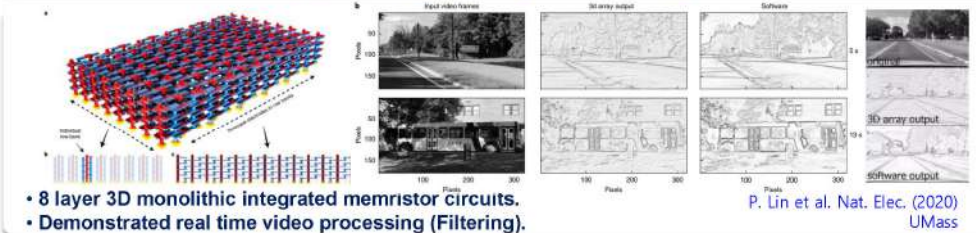
2015



2018



2020



6

## Neuromorphic Technology

KAST 한국과학기술원  
The Korean Academy of Science and Technology성균관대학교  
SUNGKUN UNIVERSITY

## Comparison of Artificial Synapse Technologies

Table 1 Comparison of emerging memory technologies

(Source: F. Zahoor et al. Nanoscale Res. Lett (2020))

| Memory technology    | SRAM        | DRAM        | NAND Flash     | NOR Flash     | PCM         | STT-MRAM     | RRAM                |
|----------------------|-------------|-------------|----------------|---------------|-------------|--------------|---------------------|
| Cell area            | $> 100F^2$  | $6F^2$      | $< 4F^2$ (3D)  | $10F^2$       | $4-20F^2$   | $6-20F^2$    | $< 4F^2$ (3D)       |
| Cell element         | 6T          | 1T1C        | 1T             | 1T            | 1T(D)1R     | 1(2)T1R      | 1T(D)1R             |
| Voltage              | $< 1V$      | $< 1V$      | $< 10V$        | $< 10V$       | $< 3V$      | $< 2V$       | $< 3V$              |
| Read time            | $\sim 1ns$  | $\sim 10ns$ | $\sim 10\mu s$ | $\sim 50ns$   | $< 10ns$    | $< 10ns$     | $< 10ns$            |
| Write time           | $\sim 1ns$  | $\sim 10ns$ | $100\mu s-1ms$ | $10\mu s-1ms$ | $\sim 50ns$ | $< 5ns$      | $< 10ns$            |
| Write energy (J/bit) | $\sim fJ$   | $\sim 10fJ$ | $\sim 10fJ$    | $100pJ$       | $\sim 10pJ$ | $\sim 0.1pJ$ | $\sim 0.1pJ$        |
| Retention            | N/A         | $\sim 64ms$ | $> 10y$        | $> 10y$       | $> 10y$     | $> 10y$      | $> 10y$             |
| Endurance            | $> 10^{16}$ | $> 10^{16}$ | $> 10^4$       | $> 10^5$      | $> 10^9$    | $> 10^{15}$  | $\sim 10^6-10^{12}$ |
| Multibit capacity    | No          | No          | Yes            | Yes           | Yes         | Yes          | Yes                 |
| Non-volatility       | No          | No          | Yes            | Yes           | Yes         | Yes          | Yes                 |
| Scalability          | Yes         | Yes         | Yes            | Yes           | Yes         | Yes          | Yes                 |

F: Feature size of lithography



7

한국과학기술한림원 - 원탁토론회

## Progress in Sensory Neuromorphic Technology

8

### Sensory Neuromorphic Technology (SNT)

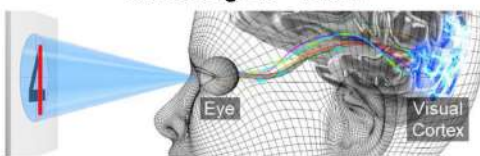
KAST 한국과학기술한림원  
The Korean Academy of Science and Technology

성균관대학교  
SUNGKUNGSANG UNIVERSITY

## Sensory Neuromorphic Technology: Concept & Trends

### Convergence: Sensor Tech. + Neuromorphic Tech.

#### Sense Organs + Brain



• Information collected from the retina is directly transmitted to the brain without storage.

#### Sensor + Neuromorphic

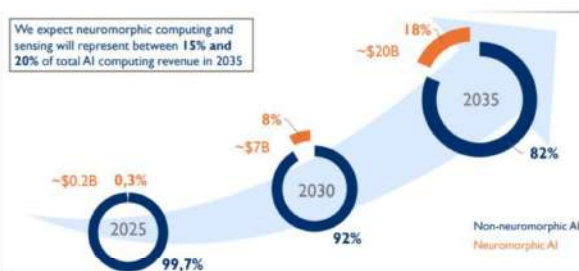


• Data obtained by the sensor is directly transmitted to the neuromorphic processor without storage.

### Industrial Trends



\*Source : Sony, Sony to Release World's First Intelligent Vision Sensors with AI Processing Functionality (2020)

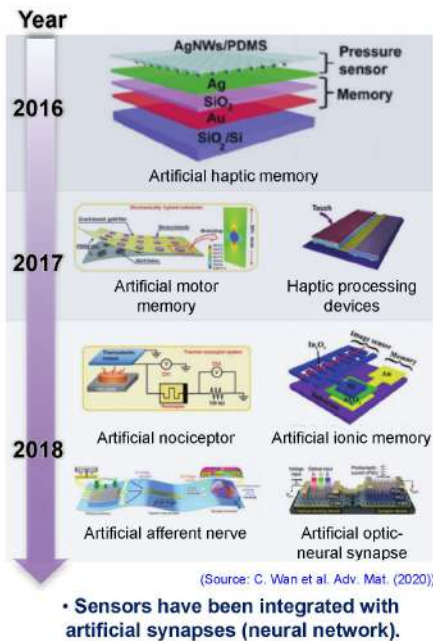


\*Source: YOLE, Neuromorphic Computing and Sensing (2021)

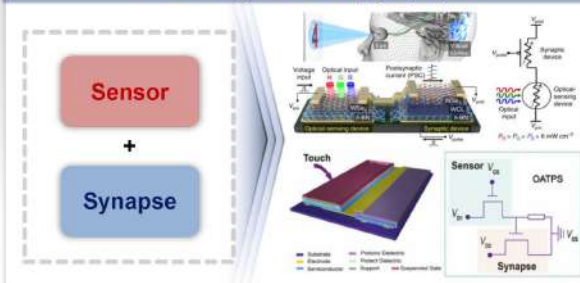
9

## Sensory Neuromorphic Research Summary

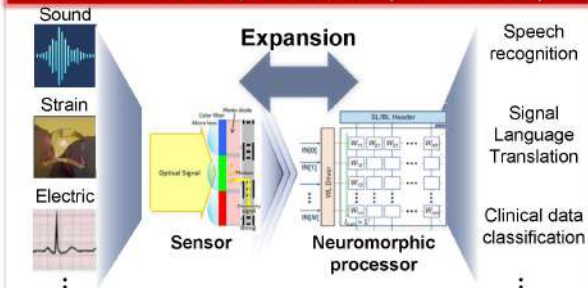
## History of Sensory Neuromorphic



### Approach A : Integration of Sensor and Neuromorphic Device (Synapse)



### Approach B : Integration of Sensing Elements onto Neuromorphic Processor (Neural Network)

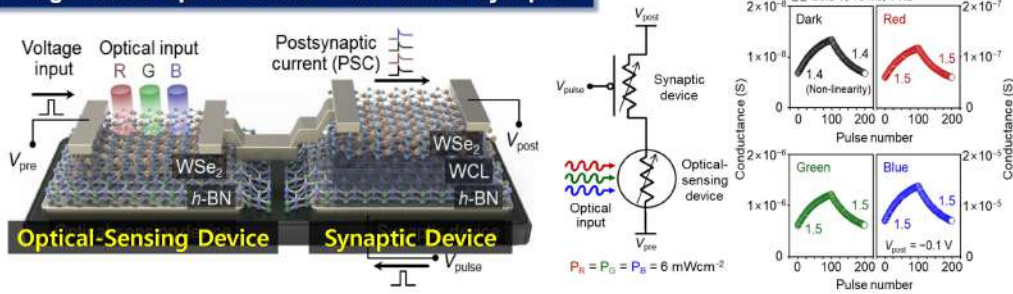


10

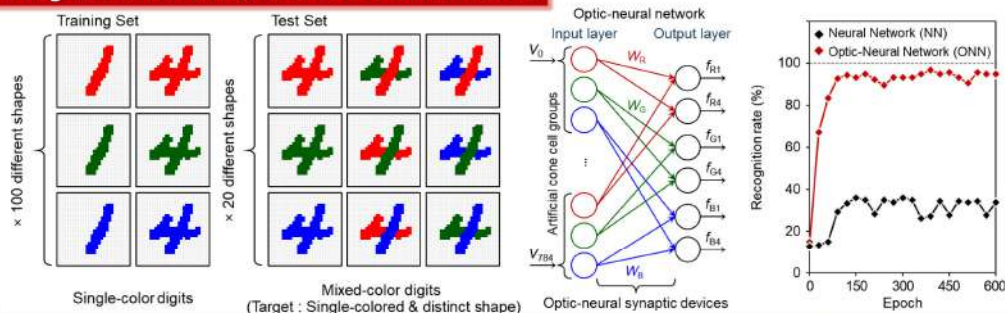
## Recent Progress in SNT

### Approach A: : Integration of Sensor and Synapse

## Integration of Optical Sensor and Artificial Synapse



### Recognition for Colored and Color-Mixed Patterns

S. Seo et al. *Nat. Commun.* (2018)

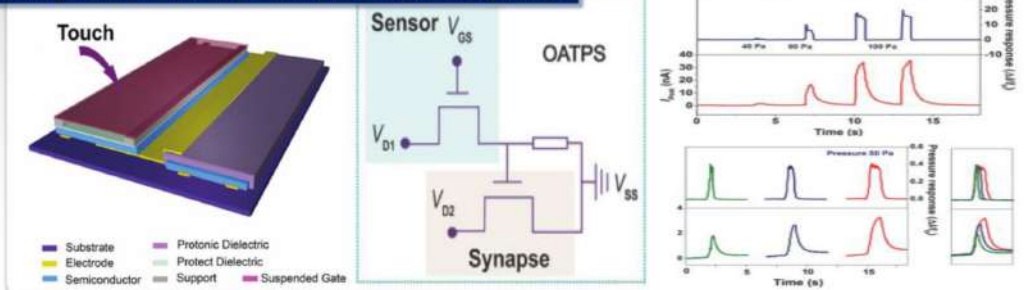
11

## Recent Progress in SNT

KAST 한국과학기술원  
The Korean Academy of Science and Technology성균관대학교  
SUNGKYUNKWAN UNIVERSITY

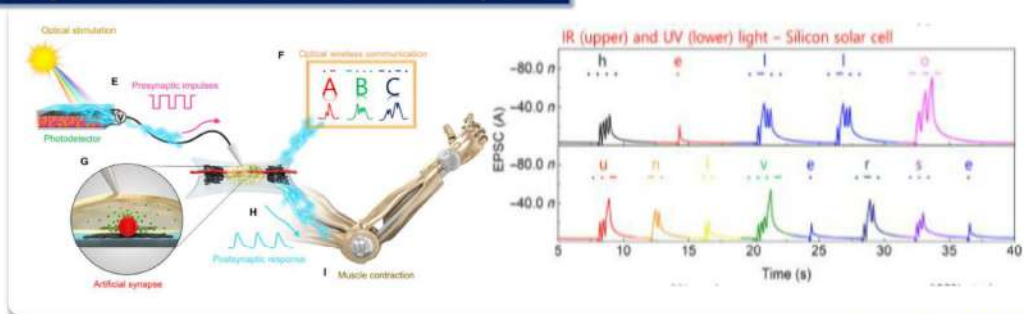
## Approach A: : Integration of Sensor and Synapse

## Integration of Tactile Sensor and Artificial Synapse



## Integration of Photodetector and Artificial Synapse

Y. Zang et al. Adv. Mater. (2017)



Y. Lee et al. Sci. Adv. (2018)

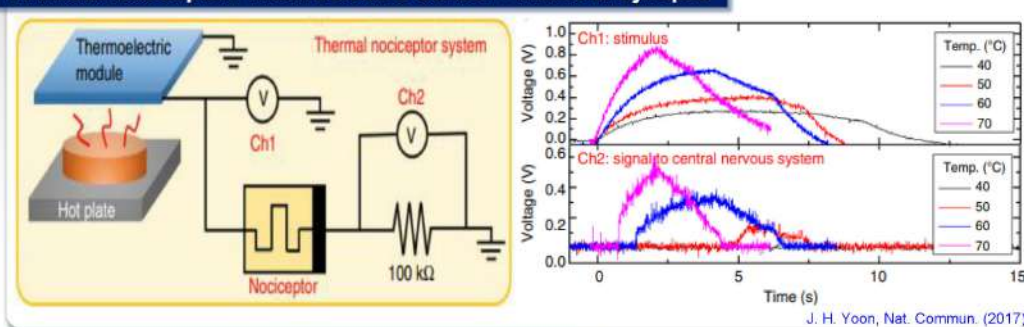
12

## Recent Progress in SNT

KAST 한국과학기술원  
The Korean Academy of Science and Technology성균관대학교  
SUNGKYUNKWAN UNIVERSITY

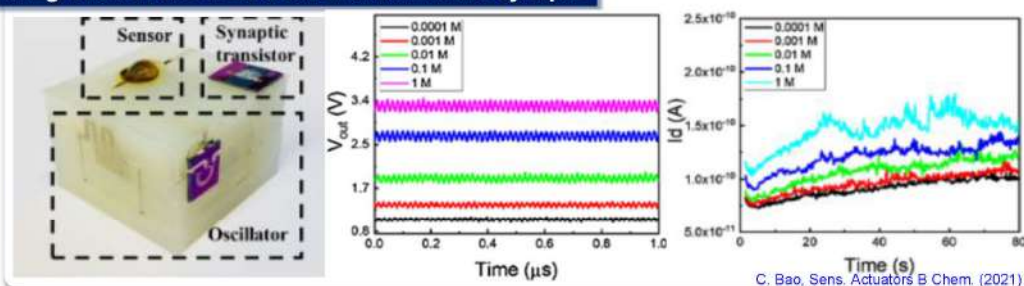
## Approach A: : Integration of Sensor and Synapse

## Artificial Nociceptor: Thermoelectric Sensor + Artificial Synapse



J. H. Yoon, Nat. Commun. (2017)

## Integration of Chemical Sensor and Artificial Synapse



C. Bao, Sens. Actuators B Chem. (2021)

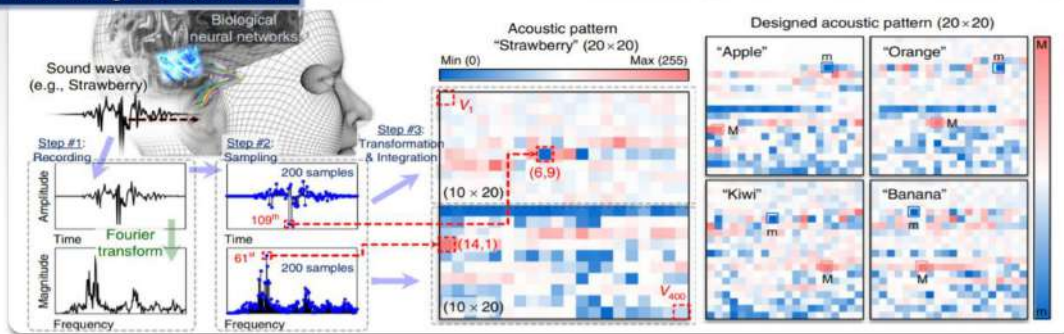
13

## Recent Progress in SNT

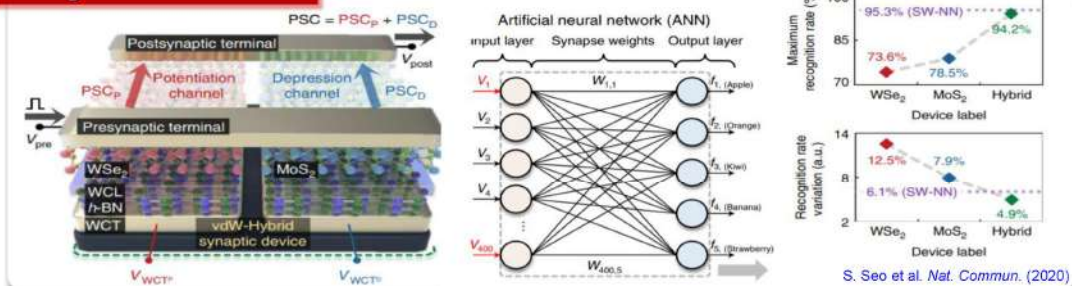
KAST 한국과학기술원  
The Korean Academy of Science and Technology성균관대학교  
SUNGKUN UNIVERSITY

## Approach B: Integration of Sensing Elements onto Neuromorphic Processor

## Patterning of Sound Data



## Recognition of Sound Data



S. Seo et al. Nat. Commun. (2020)

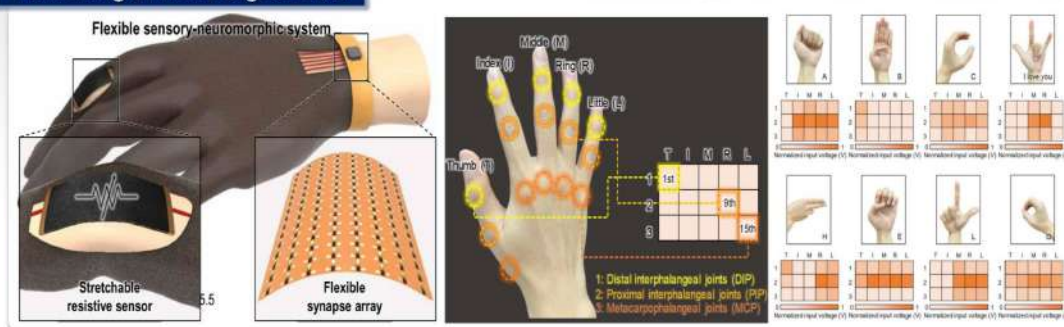
14

## Recent Progress in SNT

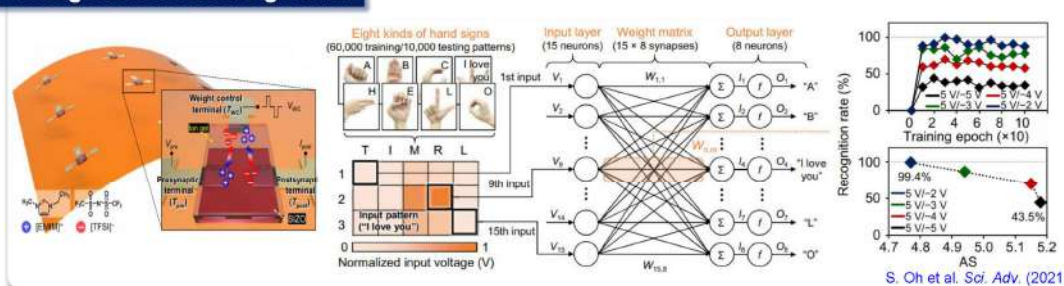
KAST 한국과학기술원  
The Korean Academy of Science and Technology성균관대학교  
SUNGKUN UNIVERSITY

## Approach B: Integration of Sensing Elements onto Neuromorphic Processor

## Patterning of Hand Signal Data



## Recognition of Hand Sign Data



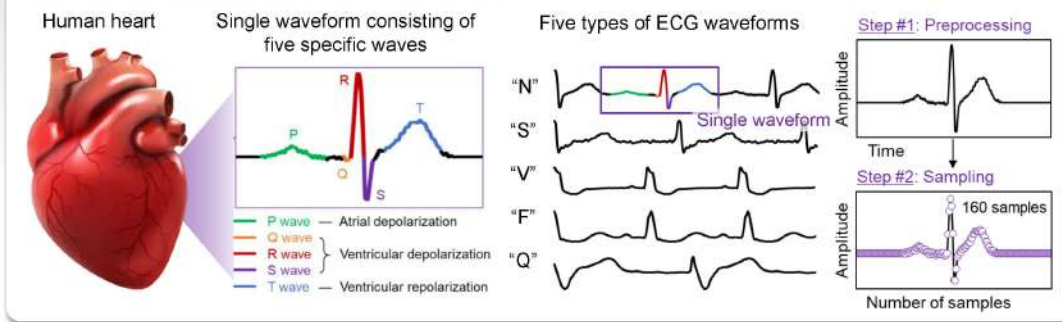
S. Oh et al. Sci. Adv. (2021)

15

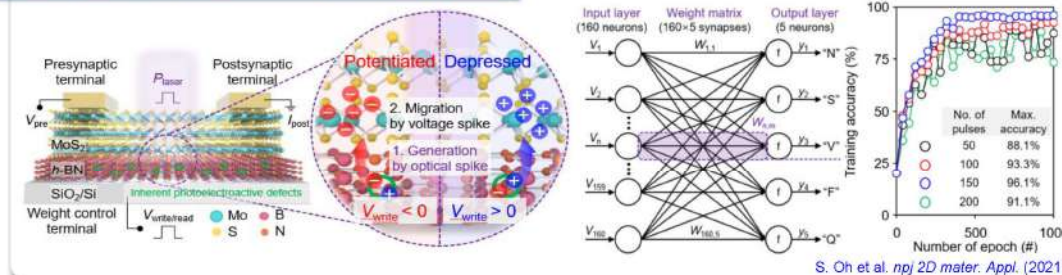
## Recent Progress in SNT

## Approach B: Integration of Sensing Elements onto Neuromorphic Processor

## Patterning of Electrocardiogram (ECG) Data



## Recognition of Electrocardiogram (ECG) Data



16

## Conclusion

## Conclusion: From Neuromorphic Technology to Sensory-Neuromorphic Technology

- Rapid Progress of Neuromorphic Technology:**
  - [SRAM] 14, 7-nm CMOS technology was applied to Intel Loihi 1,2.
  - [New Memory] 3\*3 simple pattern recognition technology  
→ image and video filtering for just five years.
- Various idea/concept on sensory neuromorphic technology was proved.**
  - [Sensor\* + Synapse] Simple integration was suggested.
  - [Sensor\* → Neural Network] Integration of sensory system and neural network was suggested.

\* Optical/haptic/tactile/chemical sensors were reported.  
No SNT works using olfactory sensors were reported yet.
- 1: advanced neuromorphic tech. + 2: various application idea → Development and Industrialization of Sensory Neuromorphic Technology (ex. Sony's Intelligent Vision Sensor)**

17

한국과학기술한림원 - 원탁토론회

**Thank you**

18

# II

## 지정토론

좌 장 : 장호원 서울대학교 재료공학부 교수

지정토론 1 • 이세호 SK hynix 미래메모리연구 담당(Fellow)

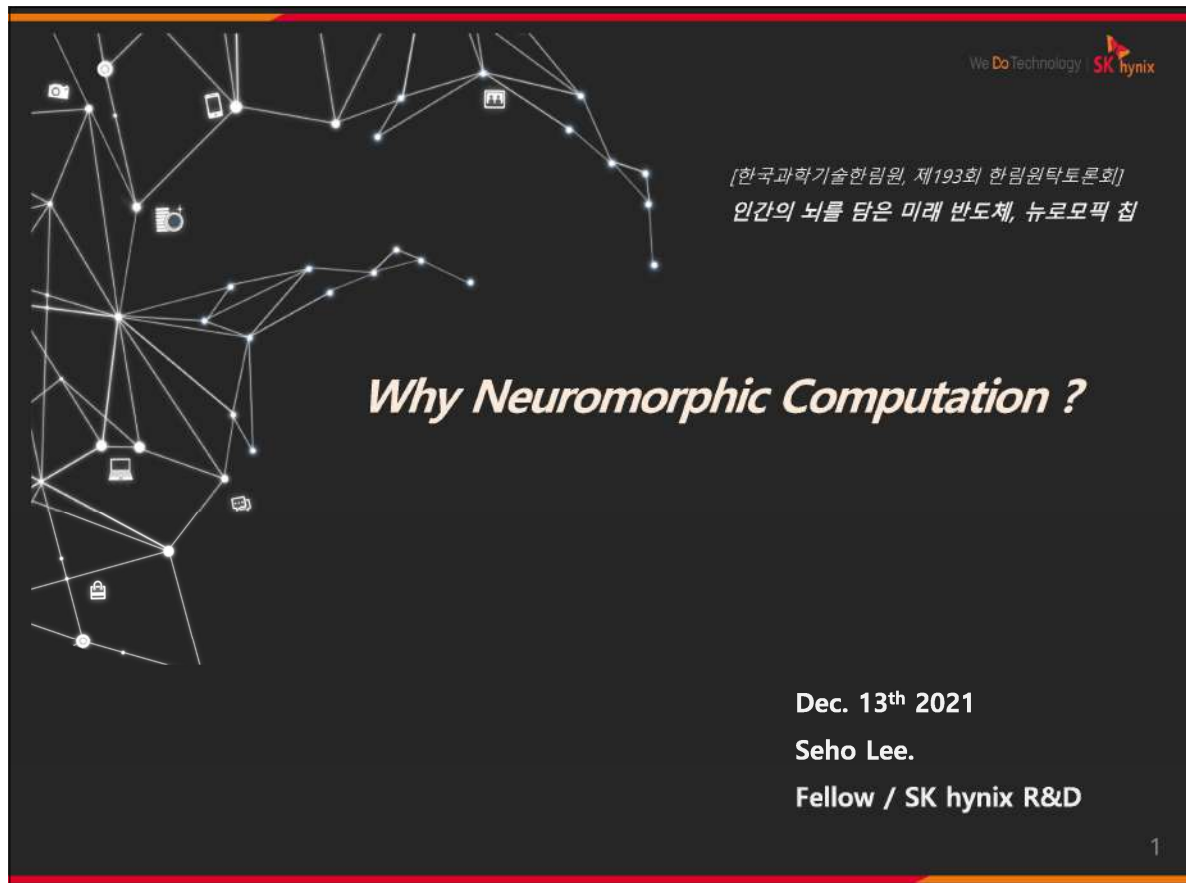
지정토론 2 • 김상준 삼성전자 종합기술원 컴퓨팅플랫폼랩 마스터

지정토론 3 • 서경춘 과학기술정보통신부 과학기술전략과 과장

## 지정토론 1 Why Neuromorphic Computation?

이 세 호

SK hynix 미래메모리연구 담당(Fellow)



## Contents

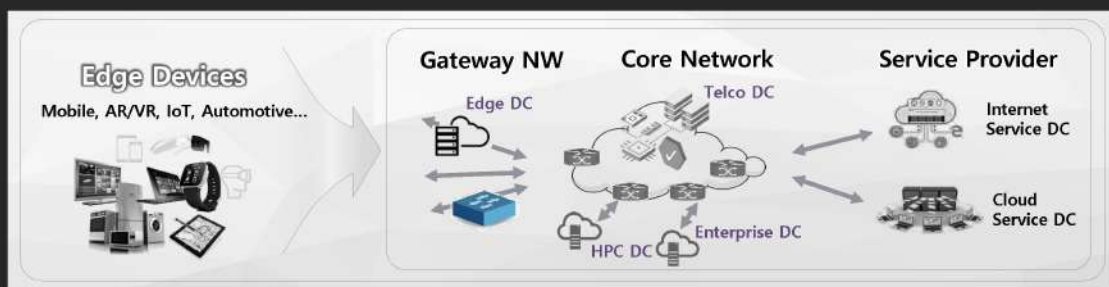
### 1 Digital Transformation Environment

### 2 Neuromorphic Value & Challenge

2

## Digital-Transformation Environment

"High Speed Network" + "Ultra Low Power" + "Smart" in Everything



3

## COVITAL: COVID Accelerates DIGITAL Transformation

We Do Technology | SK hynix



We meet *online*



We work *online*



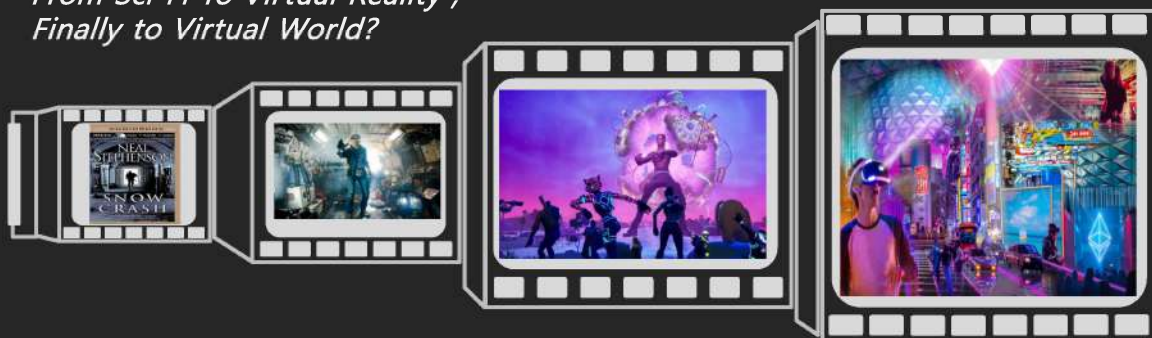
We learn *online*

4

## Metaverse – From Game To Virtual Life

We Do Technology | SK hynix

*From Sci-Fi To Virtual Reality ,  
Finally to Virtual World?*



Virtual World



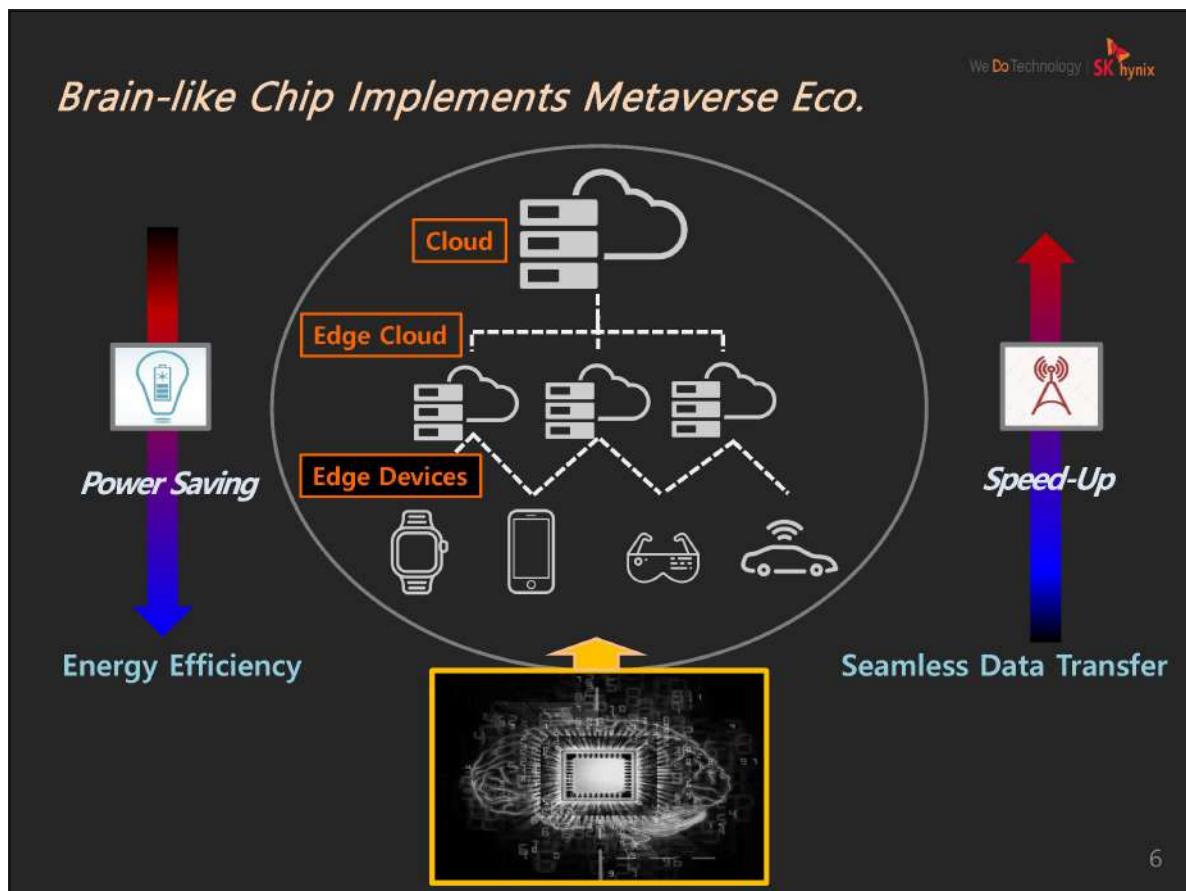
Virtual Asset



Virtual Transaction



5



*We Do Technology | SK hynix*

## Contents

- 1 Digital Transformation Environment
- 2 Neuromorphic Value & Challenge

7

We Do Technology | SK hynix

## Neuromorphic Impact

Inspired by the Brain, dedicated to imitating biological neural networks

### Low Power & High Performance

Brain simulation by traditional computing hardware

100 billion neurons  
x  
100-1000 synapses  
=

1 quadrillion synapses  
2l volume  
~10W

1.5 million processors  
+  
1.6 petabytes of high-speed memory

2 buildings  
~10W

Needs 4.68 years to simulate one day of brain activity  
1700x slower

1 ExaFLOP of performance.  
1 billion calculations/second

### Biological Neural Network in Human Brain

→ Artificial Neural Network (ANN) in Neuromorphic Processor

A neuron

A neuromorphic core

Cell body, Dendrites, Axon, Synapse

Biological neural network

Artificial neural network

One neuromorphic core per artificial neuron

(Source: Yole 2019)

8

We Do Technology | SK hynix

## Low Power Value for Energy & Environment

**ESG & RE100 : Ultra Low Power Technology**

2037: Beyond CO<sub>2</sub> budget

2030: Energy Supply Issue

Cumulative Carbon Emissions (Giga ton)

2037 Budget Exceeded

~CO<sub>2</sub> budget: 790Gt (< 2°C, 2015~2100)

Current (2.6-3°C)

66% reduction (<2°C)

50% reduction (<1.5°C)

1230 Gt (2.6-3°C)

-470 Gt (-25.1 Gt/yr.)

760 Gt (9.7 Gt/yr.)

Power Consumption (TWh)

Networks

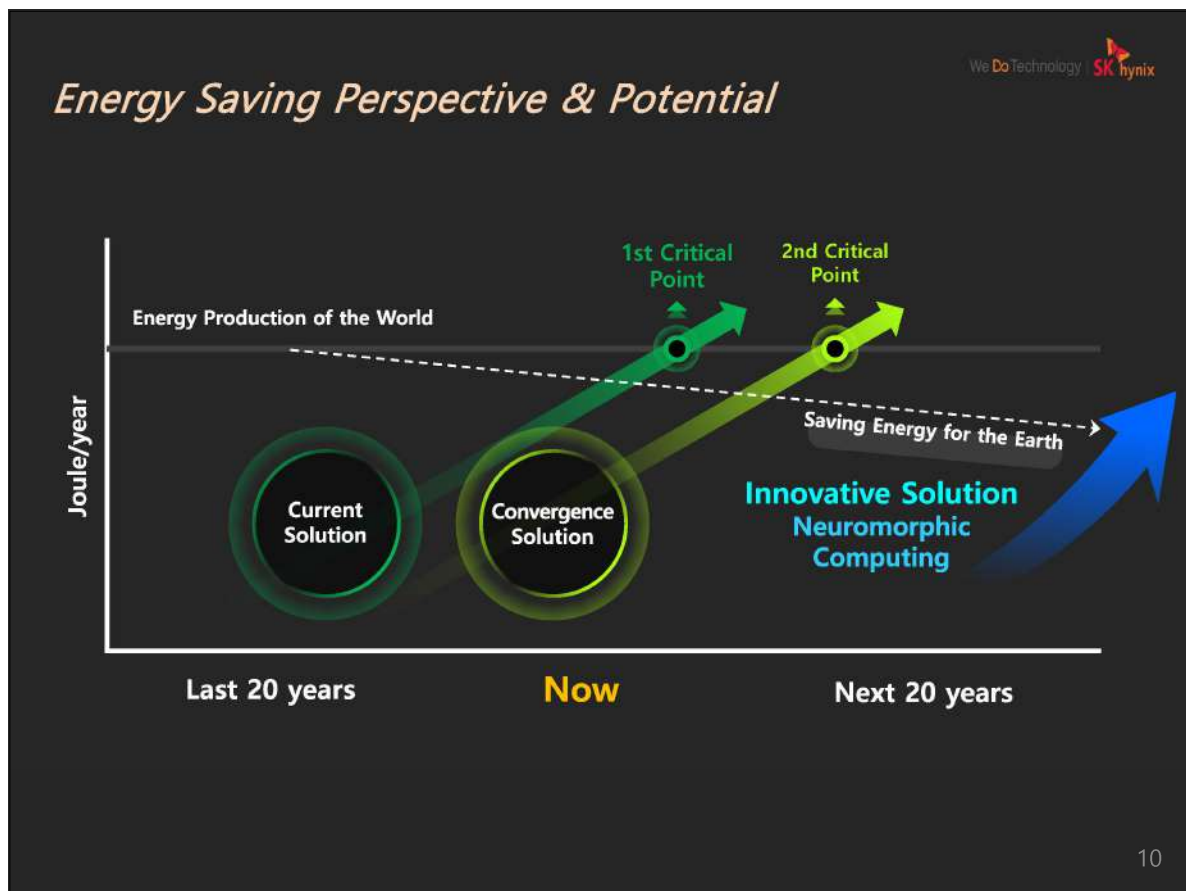
Production of ICT

Consumer devices

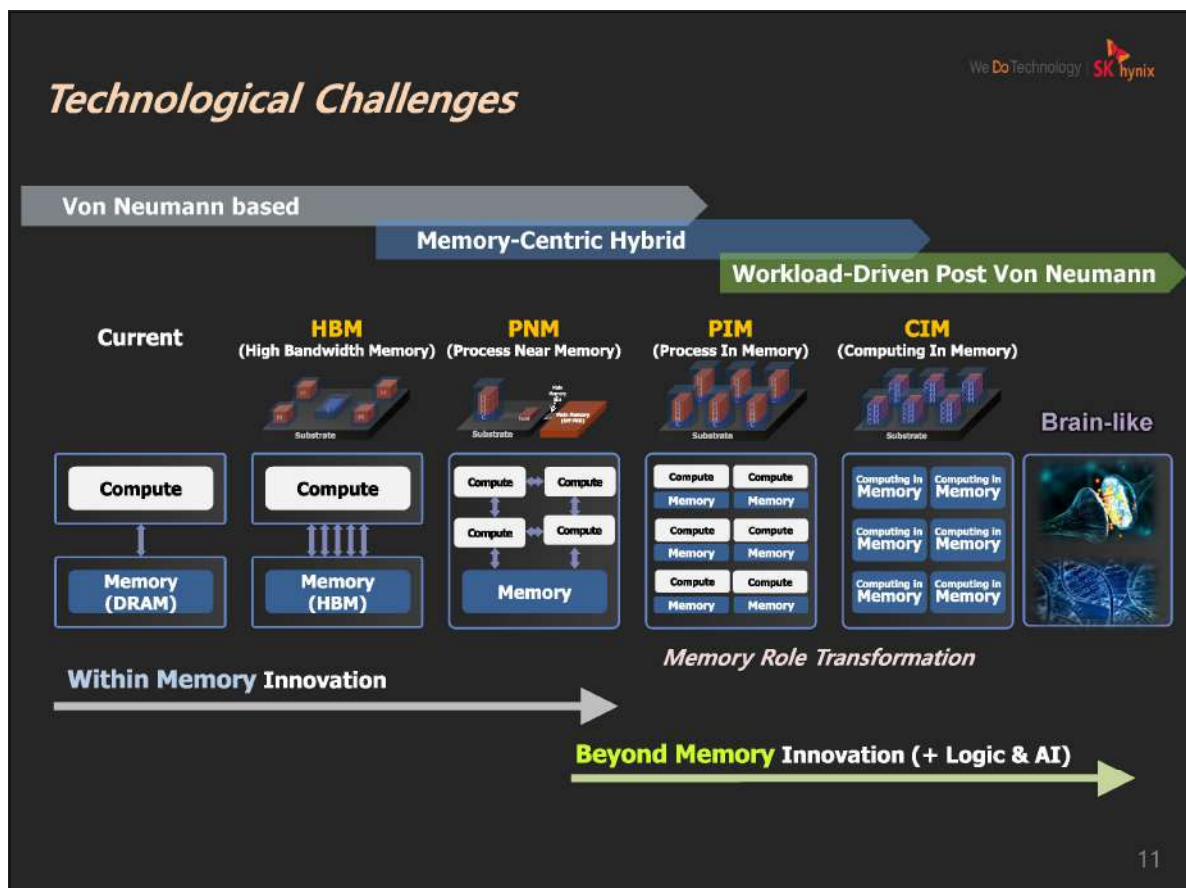
Data centers

(Source: LEDS (Long-term low greenhouse gas Emission Development Strategies) 2020, International Energy Agency 2019, Future timeline 2019)

9



10



11

We Do Technology | SK hynix

## Process in Memory (MAC Core in DRAM)

**Memory Bottleneck** ✓ Current Architecture: Compute Cores↑, But, Memory Bus-Narrow (Limited)  
 ✓ Compute Primitives → Into Memory Chip

Need Innovation

AI Accelerator

AI Accelerator

(Source: SRC decadal plan 2030)

12

We Do Technology | SK hynix

## Analog Computation in Memory

Breaking the Boundaries Between Compute & Memory : Ultra Low Power & High Performance

**Conventional Digital Computing**

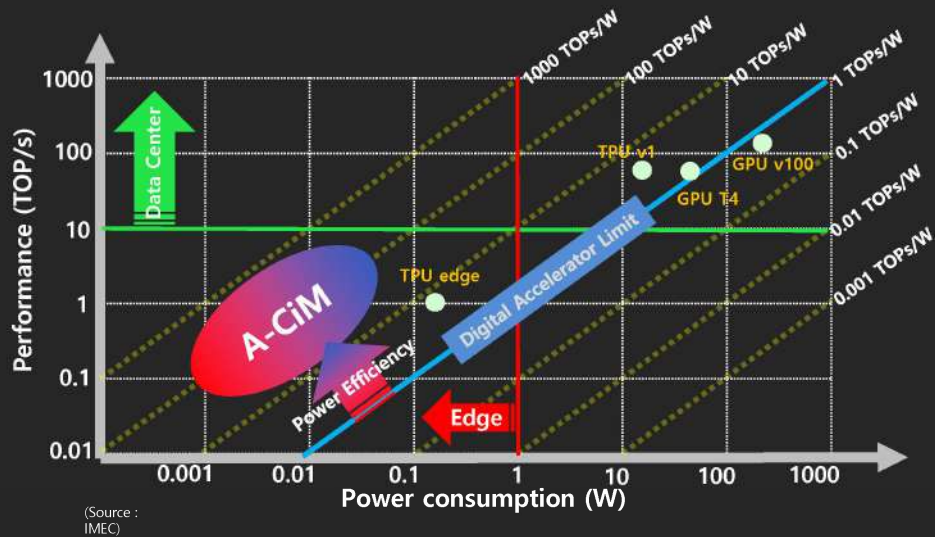
Memory-Centric Analog Solution: A-CiM

Conventional Memory Cell : Bit by Bit Accuracy      Computation Memory Cell: System Accuracy

13

## A-Computation in Memory Potential

- Ultra Low Power Technology:  $\gg 100 \text{ TOPS/W}$
- Early Stage: For Edge AI Inference & Training



14

*Thank You*

## 지정토론 2

# Brain Inspired AI Technology

김 상 준

삼성전자 종합기술원 컴퓨팅플랫폼랩 마스터

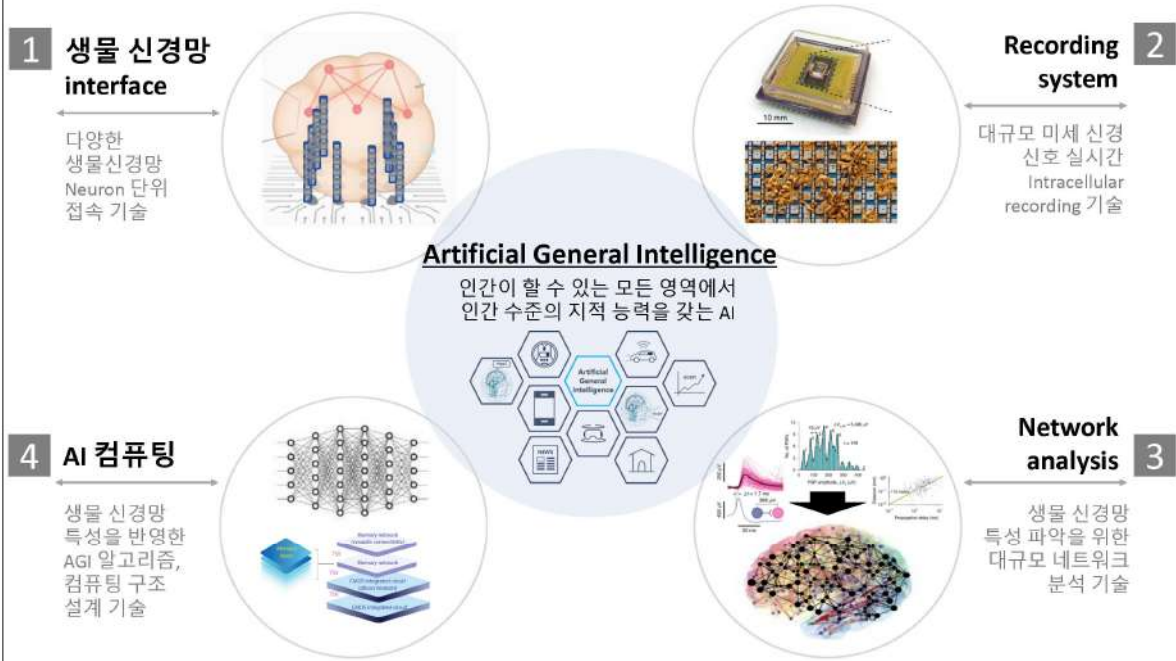
한림원탁토론회

# Brain Inspired AI Technology

2021. 12. 13  
삼성전자 종합기술원  
김상준

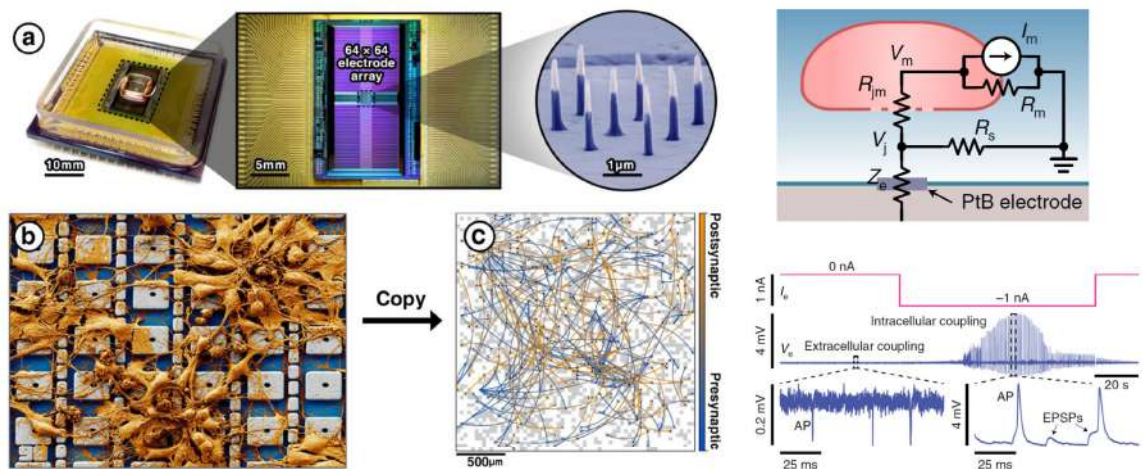
## Concept

### ■ 대규모 생물 신경망의 동작 특성 분석을 기반으로 신규 AI 컴퓨팅 기술 개발



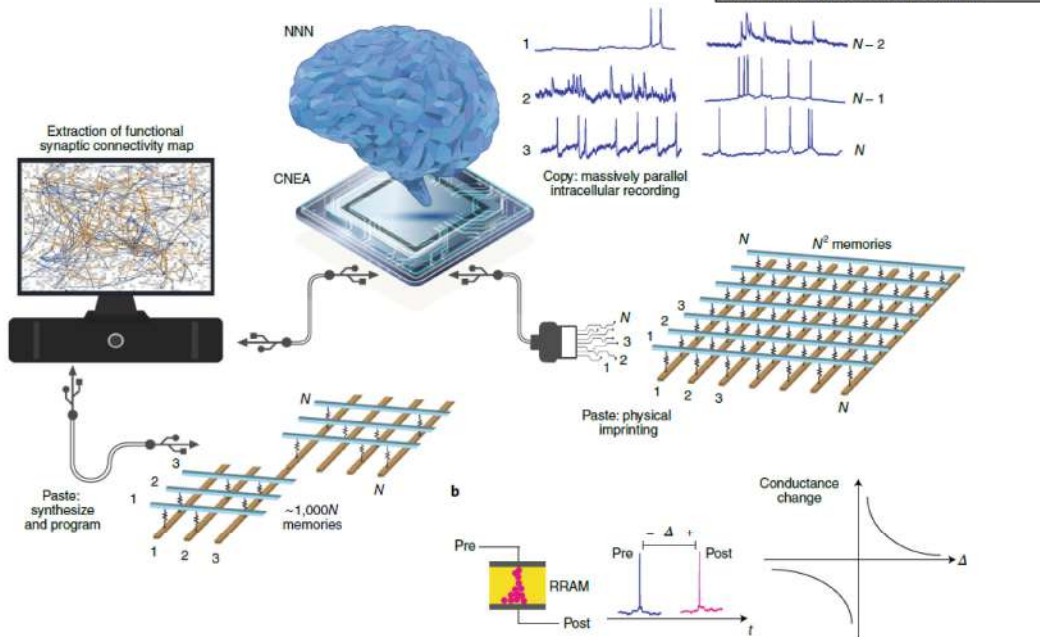
## 세포 단위 측정 기술 : Harvard, Nature BE 20

### ■ 최초의 대규모 (4096ch) Intracellular Recording 기술



## Brain Copy : Harvard/Samsung, Nature Electronics 21

- 생물 신경망의 네트워크 상태를 그대로 전자신경망에 복사하는 기술



## 한림원탁토론회는...

한림원탁토론회는 국가 과학기술의 장기적인 비전과 발전전략을 세우고, 동시에 과학기술 현안 문제에 대한 해결방안을 모색하기 위한 목적으로 개최되고 있는 한림원의 대표적인 정책토론 행사입니다.

지난 1996년 처음 개최된 이래 지금까지 160여회에 걸쳐 초중등 과학교육, 문·이과 통합문제, 국가발전에 미치는 기초과학 등 과학기술분야의 기본문제는 물론 정부출연연구소의 발전방안, 광우병의 진실, 방사능, 안전 방제 등 국민생활에 직접 영향을 미치는 문제에 이르기까지 광범위한 주제를 다루고 있습니다.

한림원은 과학기술 선진화에 걸림돌이 되는 각종 현안문제 중 중요도와 시급성에 따라 주제를 선정하고, 과학기술 유관기관의 최고책임자들을 발제자로 초빙하여, 한림원 석학들을 비롯해 산·학·연·정의 전문가들이 심도 깊게 토론을 진행하고 있습니다.

토론결과는 책자로 발간, 정부, 국회와 관련기관에 배포함으로써 정책 개선방안을 제시하고 정책 입안자료를 제공하여 여론 형성에 기여하도록 힘쓰고 있습니다.

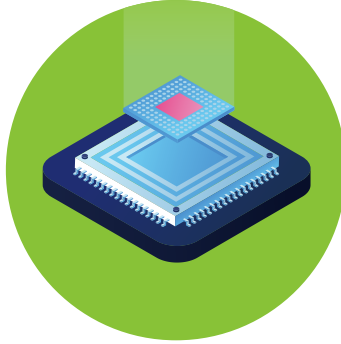
### ■ 한림원탁토론회 개최실적 (2019년 ~ 2021년) ■

| 회수  | 일 자          | 주 제                                 | 발제자           |
|-----|--------------|-------------------------------------|---------------|
| 133 | 2019. 2. 18. | 수소경제의 도래와 과제                        | 김봉석, 김민수, 김세훈 |
| 134 | 2019. 4. 18. | 혁신성장을 이끄는 지식재산권 창출과 직무발명<br>조세제도 개선 | 하흥준, 김승호, 정지선 |
| 135 | 2019. 5. 9.  | 과학기술 정책성과와 과제                       | 이영무           |
| 136 | 2019. 5. 22. | 효과적인 과학인재 양성을 위한 전문연구요원<br>제도 개선 방안 | 곽승엽           |

| 회수  | 일 자           | 주 제  | 발제자                  |
|-----|---------------|--|----------------------|
| 137 | 2019. 6. 4.   | 마약청정국 대한민국이 흔들린다<br>마약류 사용의 실태와 대책은?             | 조성남, 이한덕             |
| 138 | 2019. 6. 28.  | 미세먼지의 과학적 규명을 위한 선도적 연구 전략                       | 윤순창, 안병옥             |
| 139 | 2019. 8. 7.   | 일본의 반도체·디스플레이 소재<br>수출규제에대한 과학기술계 대응방안           | 박재근                  |
| 140 | 2019. 9. 4.   | 4차 산업혁명 시대 농식업(Agriculture and Food) 변화와 혁신정책 방향 | 권대영, 김종윤,<br>박현진     |
| 141 | 2019. 9. 25.  | 과학기술 기반 국가 리스크 거버넌스, 어떻게<br>구축해야 하는가?            | 고상백, 신동천,<br>문일, 이공래 |
| 142 | 2019. 9. 26.  | 인공지능과 함께할 미래 사회, 유토피아인가<br>디스토피아인가               | 김진형, 홍성욱,<br>노영우     |
| 143 | 2019. 10. 17. | 세포치료의 생명윤리                                       | 오일환, 이일학             |
| 144 | 2019. 11. 7.  | 과학기술 석학의 지식과 경험을 어떻게 활용할<br>것인가?                 | 김승조, 이은규             |
| 145 | 2020. 2. 5.   | 신종 코로나바이러스 감염증 대처방안                              | 정용석, 이재갑, 이종구        |
| 146 | 2020. 3. 12.  | 코로나바이러스감염증-19의 중간점검<br>- 과학기술적 관점에서 -            | 김호근                  |
| 147 | 2020. 4. 3.   | COVID-19 팬데믹 중환자진료 실제와 해결방안                      | 홍석경, 전경만, 김제형        |
| 148 | 2020. 4. 10.  | COVID-19 사태에 대비하는 정신건강 관련<br>주요 이슈 및 향후 대책       | 심민영, 현진희, 백종우        |
| 149 | 2020. 4. 17.  | COVID-19 치료제 및 백신 개발, 어디까지<br>왔나?                | 신형식, 황응수, 박혜숙        |
| 150 | 2020. 4. 28.  | Post COVID-19 뉴노멀, 그리고 도약의 기회                    | 김영자                  |
| 151 | 2020. 5. 8.   | COVID-19 2차 유행에 대비한 의료시스템 재정비                    | 전병율, 홍성진, 엄호기        |
| 152 | 2020. 5. 12.  | 포스트 코로나, 어떻게 살아남을 것인가? : 정보<br>분야                | 강홍렬, 차미영             |
| 153 | 2020. 5. 18.  | 포스트 코로나, 어떻게 살아남을 것인가? :<br>경제·산업 분야             | 박영일, 박진              |
| 154 | 2020. 5. 21.  | 젊은 과학자가 바라보는 R&D 과제의 선정 및<br>평가 제도 개선 방향         | 김수영, 정우성             |
| 155 | 2020. 5. 25.  | 포스트 코로나, 어떻게 살아남을 것인가? : 교육<br>분야                | 이윤석, 이혜정             |

| 회수  | 일 자           | 주 제   | 발제자                     |
|-----|---------------|---|-------------------------|
| 156 | 2020. 5. 28.  | 지역소재 대학 다 죽어간다                                | 이성준, 박복재                |
| 157 | 2020. 6. 19.  | 대구·경북에서 COVID-19 경험과 이를 바탕으로 한 대응방안           | 김신우, 신경철, 이재태, 이경수, 조치흠 |
| 158 | 2020. 6. 17.  | 코로나 이후 환경변화 대응 과학기술 정책포럼                      | 장덕진, 임요업                |
| 159 | 2020. 6. 23.  | 포스트 코로나 시대의 과학기술교육과 사회적 가치                    | 이재열, 이태억                |
| 160 | 2020. 6. 30.  | 코로나19 시대의 조현병 환자 걱정 치료를 위한 제언                 | 권준수, 김 윤                |
| 161 | 2020. 7. 9.   | Living with COVID-19                          | 정은옥, 이종구, 오주환           |
| 162 | 2020. 7. 15.  | 포스트 코로나 시대, 농식품 산업의 변화와 대응                    | 김홍상, 김두호                |
| 163 | 2020. 7. 24.  | 건강한 의료복지를 위한 적정 의료인력과 의료제도                    | 송호근, 신영석, 김 윤, 안덕선, 한희철 |
| 164 | 2020. 7. 30.  | 젊은 과학자가 보는 10년 후 한국 대학의 미래                    | 손기훈, 이성주, 주영석           |
| 165 | 2020. 8. 7.   | 집단면역으로 COVID-19의 확산을 차단할 수 있을까?               | 황응수, 김남중, 천병철, 이종구      |
| 166 | 2020. 8. 24.  | 포스트 코로나 시대, 가속화되는 4차산업혁명                      | 윤성로, 김정호                |
| 167 | 2020. 9. 8.   | 부러진 성장사다리 닦고 싶은 여성과학기술리더가 있는가?                | 김소영, 문애리                |
| 168 | 2020. 9. 10.  | 과학기술인재 육성을 위한 대학의 역할                          | 변순천, 안준모                |
| 169 | 2020. 9. 17.  | 지난 50년 국가 연구개발 투자 성과, 어떻게 나타났나?               | 황석원, 조현정, 배종태, 배용호      |
| 170 | 2020. 9. 23.  | 과학기술 재직자 역량 강화 전략                             | 차두원, 김향미                |
| 171 | 2020. 9. 25.  | COVID-19 치료제의 개발 현황                           | 김성준, 강철인, 최준용           |
| 172 | 2020. 10. 7.  | 미래세대 기초·핵심역량 제고 방안                            | 송진웅, 권오남                |
| 173 | 2020. 10. 13. | 대학의 기술 사업화 및 교원 창업 활성화 방안                     | 이희숙, 이지훈, 심경수           |
| 174 | 2020. 10. 14. | 한국판 뉴딜, 성공의 조건은?                              | 박수경                     |
| 175 | 2020. 10. 22. | 성공적인 K 방역을 위한 코로나 19 진단 검사                    | 이혁민, 홍기호, 김동현           |
| 176 | 2020. 11. 5.  | 4단계 BK21 사업과 대학의 혁신                           | 노정혜, 정진택, 최해천           |
| 177 | 2020. 11. 9.  | COVID-19의 재유행 예측과 효과적 대응                      | 이종구, 조성일, 김남중           |
| 178 | 2020. 11. 27. | 우리나라 정밀의료의 현황과 미래 : 차세대 유전체 염기서열 분석의 임상응용과 미래 | 방영주, 박웅양, 김열홍           |

| 회수  | 일 자           | 주 제   | 발제자              |
|-----|---------------|---|------------------|
| 179 | 2020. 12. 4.  | 대학 교수평가제도의 개선방안                                   | 최태림, 림분한, 정우성    |
| 180 | 2020. 12. 8.  | COVID-19의 대유행에서 인플루엔자 동시감염                        | 김성준, 송준영, 장희창    |
| 181 | 2020. 12. 9.  | COVID-19 환자 급증에 따른 중환자 진료 대책                      | 김제형, 홍석경, 공인식    |
| 182 | 2021. 2. 19.  | 세계대학평가 기관들의 객관성 분석과 국내대학을 위한 제언                   | 이준영, 김 현, 박준원    |
| 183 | 2021. 4. 2.   | 인공지능 시대의 인재 양성                                    | 오혜연, 서정연         |
| 184 | 2021. 4. 7.   | 탄소중립 2050 구현을 위한 과학기술 도전 및 제언                     | 박진호, 정병기, 윤제용    |
| 185 | 2021. 4. 15.  | 출연연구기관의 현재와 미래                                    | 임혜숙, 김명준, 윤석진    |
| 186 | 2021. 4. 30.  | 메타버스(Metaverse), 새로운 가상 융합 플랫폼의 미래가치              | 우운택, 양준영         |
| 187 | 2021. 5. 27.  | 원격의료: 현재와 미래                                      | 정 용, 최형식         |
| 188 | 2021. 6. 17.  | 배양육, 미래의 먹거리일까?                                   | 조철훈, 배호재         |
| 189 | 2021. 6. 30.  | 외국인 연구인력 지원 및 개선방안                                | 이한진, 이동현, 버나드 예거 |
| 190 | 2021. 7. 6.   | 국내 대학 연구 경쟁력의 현재와 미래                              | 이현숙, 민정준, 윤봉준    |
| 191 | 2021. 7. 16.  | 아이들의 미래, 2022 교육과정 개정에 부처: 정보 교육 없는 디지털 대전환 가능한가? | 유기홍, 오세정, 이광형    |
| 192 | 2021. 10. 15. | 자율주행을 넘어 생각하는 자동차로                                | 조민수, 서창호, 조기춘    |



제193회 한림원탁토론회

## 인간의 뇌를 담은 미래 반도체, 뉴로모픽칩

이 사업은 복권기금 및 과학기술진흥기금 지원을 통한 사업으로  
우리나라의 사회적 가치 증진에 기여하고 있습니다.

행사문의

한국과학기술한림원(KAST) 경기도 성남시 분당구 돌마로 42(구미동) (우)13630  
전화 (031)726-7900 팩스 (031)726-7909 이메일 [kast@kast.or.kr](mailto:kast@kast.or.kr)