

2024. 8. 28.(수)

보도시점

18:00(국제엠바고)

배포

2024. 8. 28.(수) 09:00

(2024. 8. 29.(목) 조간)

차세대 인메모리 컴퓨팅이 가능한 화합물반도체 신소재 개발

- 반데르발스 갭 내 이온 이동 기반 III-V족 저전력 멤트랜지스터 소재 개발
연구성과 「네이처 머터리얼스(Nature Materials)」 게재 -

과학기술정보통신부(장관 유상임, 이하 ‘과기정통부’)는 연세대학교 심우영 교수 연구팀은 기존의 전이금속 기반의 멤트랜지스터*에 비하여 저전력으로 구동이 가능한 새로운 소재(III-V족 원소** 기반 반도체)의 멤트랜지스터를 개발했다고 밝혔다.

* 멤트랜지스터(Memtransistor): 멤리스터(Memristor)와 트랜지스터(Transistor)의 합성어로 멤리스터 특성과 트랜지스터 특성을 함께 가지는 능동소자

** III-V족 원소: III족 알루미늄(Al), 갈륨(Ga), 인듐(In), V족 질소(N), 인(P), 비소(As), 안티몬(Sb)

‘트랜지스터’는 ‘메모리’와 ‘로직’*소자의 근간이 되는 능동소자이다. 전압과 전류의 관계를 기억하는 특성을 가진 멤리스터(Memristor)는 새로운 형태의 수동 메모리 소자로 주목받아왔다.

* 트랜지스터는 반도체 물질을 사용해 전기 신호를 제어, 메모리는 데이터 저장 역할 수행, 로직소자는 논리연산을 수행

트랜지스터와 멤리스터는 각각 독립적으로 작동하며 상호 호환되지 않아 이를 연결해 사용하는 방식이 활용되었으며, 이로 인해 소자의 밀도가 커지는 문제가 발생하였다. 최근 기술이 발전하면서 전기 소자의 크기를 줄이기 위한 노력의 일환으로, 트랜지스터와 멤리스터의 기능을 하나로 통합하려는 시도가 이루어지면서 ‘멤트랜지스터’가 부각되고 있다.

하지만, 지금까지 개발된 멤트랜지스터는 높은 전력을 필요로 하고 소자 간 성능 차이가 크다는 문제가 있었다. 또한 대부분 전이금속 물질로 구성되어 있어 사용할 수 있는 소재가 제한적이었다.

이에 연세대학교 심우영 교수 연구팀과 공동연구팀(한국세라믹기술원 김종영 박사, 기초과학연구원 천진우 단장, 연세대 박철민 교수, Aloysius Soon 교수)은 기존 높은 전력소모와 제한된 소재 활용 한계를 극복하는 신소재를 발굴하는데 초점을 두고 연구를 수행하였다. 그 결과 저전력으로 반데르발스 겹 내부의 이온의 이동이 가능하면서도 반도체 특성을 발현하는 새로운 이차원 III-V족 화합물 반도체 소재를 개발하고 작동 원리를 규명하는데 성공했다.

연구팀은 새로운 소재를 찾기 위해 다량의 데이터를 빠르게 처리하는 고속 계산(High-throughput)법을 활용하여 주기율표에서 이온 이동이 가능한 층상형 구조를 가진 물질 후보군을 찾았으며, 그 중에서 반도체로 사용될 수 있는 III-V족 기반 40개의 후보 물질을 도출했다.

40개 후보 물질 중 10종의 화합물을 최종 선별한 후 합성에 성공하였으며, 소재 내부에서 이온이 움직이는 것을 실험으로 증명하고, 이온 이동에 따른 메모리 특성이 발현되는 것을 검증했다. 동시에, 반도체 특성도 함께 확인하여 새로운 III-V족 화합물 반도체 소재가 메모리와 트랜지스터로 모두 활용될 수 있으며, 이를 통해 시냅스 작동이 저전력으로 구현될 수 있음을 증명하였다.

이번 연구는 기존 전이금속 기반 멤트랜지스터의 비균일성과 저효율 문제를 극복하는 새로운 III-V족 화합물반도체 소재를 개발한 데 의의가 있다. 아울러 이를 멤트랜지스터로 활용함으로써 메모리 및 반도체 산업 분야의 소재 제한성을 해결할 수 있는 가능성을 보여주었다.

심우영 교수는 이번 연구는 “멤트랜지스터 소재 개발의 새로운 사고틀(패러다임)을 제시하고 이를 실험적 구현한 것에 큰 의미가 있다”라며 “기존 실리콘 기술과 호환되면서 저전력이 가능한 멤트랜지스터에 대한 수요를 새로운 III-V족 멤트랜지스터로 충족 가능할 것으로 기대된다”고 설명했다.

과학기술정보통신부 미래소재디스커버리사업과 기초과학연구원 프로그램으로 수행된 이번 연구의 성과는 재료 분야의 국제 학술지 「네이처 머터리얼스(Nature Materials)」에 8월 28일(현지시간 8.28.(수) 18시, GMT) 게재되었다.

※ 논문명 : Cation-eutaxy enabled III-V-derived van der Waals crystals as memristive semiconductor

담당 부서	기초원천연구정책관 원천기술과 나노소재기술팀	책임자	팀 장	이대길 (044-202-4570)
		담당자	서기관	최부용 (044-202-4573)
유관 기관	연세대학교 신소재공학과	교신저자	교 수	심우영 (02-2123-2857)



더 아픈 환자에게 양보해 주셔서 감사합니다
가벼운 증상은 동네 병·의원으로



주요내용 설명

<작성 : 연세대학교 심우영 교수>

논문명	Cation-eutaxy enabled III-V-derived van der Waals crystals as memristive semiconductor
저널명	Nature Materials
키워드	vdW materials (반데르발스 물질), Memtransistor (멤트랜지스터), III-V compounds (III-V족 물질), Topochemical approach (토포케미컬 방법)
DOI	-
저자	심우영 교수(교신저자/연세대학교), 김종영 박사(교신저자/한국세라믹기술원), 박철민 교수(교신저자/연세대학교), 천진우 교수(교신저자/연세대학교), Aloysius Soon 교수(교신저자/연세대학교), 배지홍 학생(제1저자/연세대학교), 원종범 박사(제1저자/연세대학교), 김태영 학생(연세대학교), 최상진 박사(연세대학교), 김혜수 학생(연세대학교), 빅토르 오 성현(Seung-Hyun Victor Oh) 학생(연세대학교), 이기억 학생(연세대학교), 이은실 학생(한국세라믹기술원), 전시진 학생(연세대학교), 김민정 학생(연세대학교), 도형완 박사(연세대학교), 서동철 학생(연세대학교), 김성순 박사(연세대학교), 조영준 학생(연세대학교), 강현수 학생(연세대학교), 김보경 학생(연세대학교), 최 홍 학생(연세대학교), 한지훈 학생(연세대학교), 김태훈 박사(연세대학교), Narguess Nemati 박사(연세대학교), 박찬호 학생(연세대학교), 이규호 학생(연세대학교), 문홍재 학생(연세대학교), 김정민 학생(DGIST), 이형근 학생(KAIST), Daniel W. Davies 학생(Imperial College London), 김도현 학생(KAIST), 강성훈 학생(성균관대학교), 유병규 학생(IBS), 김재겸 박사(한국세라믹기술원), 조민경 학생(KIST), 배지환 박사(KIST), 박수형 박사(KIST), 김정길 교수(제주대학교), 성하준 교수(KAIST), 정명철 교수(KIAST), 정 인 교수(서울대학교), 최현진 교수(연세대학교), 최현용 교수(서울대학교), 김도현 교수(서울대학교), 백현석 박사(KBSI), 이재현 교수(IBS), 양희준 교수(KAIST), 김윤석 교수(성균관대학교), 박홍규 교수(서울대학교), 이우영 교수(연세대학교), 장기주 교수(KAIST), 김미소 교수(성균관대학교), 천동원 박사(KIST), 한명준 교수(KAIST), Aron Walsh 교수(Imperial College London)

1. 연구의 필요성

1) 기존 멤트랜지스터 소재 제한성

- 기존 멤트랜지스터는 이황화몰리브덴(MoS_2)과 같은 전이금속기반 물질을 결정립계(Grain boundary)가 있도록 Bottom-up 방식으로 성장시켜서 제작하였음.

* 결정립계(Grain boundary): 다결정 물질에서 서로 다른 방향으로 배열된 두 개의 결정립이 만나는 경계 부분.

- 수 년간의 멤트랜지스터 소재들은 전이금속기반 물질들 기반으로 성능을 향상시켜 왔으나, 멤트랜지스터 특성을 구현하기 위한 메커니즘의 한계로 인해 전이금속기반 물질들에서 벗어나기 어려우며, 결정립계를 비롯한 결함이 필수적이므로 존재해야 한다는 조건이 있어서 불균일성이 따름.

2) 반데르발스 갭 내의 이온/결함 이동의 한계

- 최근 기존 멤트랜지스터의 고전력, 불균일성에 대한 한계를 극복하고자, 결정립계에서의 이온/결함의 이동이 아닌 반데르발스 갭 내의 이온/결함의 이동을 목표로 연구가 시도됨.
- 기존의 반데르발스 물질 내 이온/결함 이동이 가능한 소재는 금속 특성이 발현되기 때문에, 이를 해결하고자 2차원 구조의 소재 발굴 연구에 초점을 맞추었지만 뚜렷한 성과를 보이지 않아 이를 해결할 새로운 방식이 필요한 상황임.

2. 연구내용

1) III-V족 층상형 구조 설계 및 실험적 구현

- 특정 양이온의 삽입을 통해 양이온-양이온 반발력으로 인해 층상형이 된다는 점을 바탕으로 고속 계산(High-throughput)법을 통해 이온 이동이 가능한 층상형 물질을 전범위 원소에서 찾았으며, 이 중 44개의 III-V족 물질을 찾았고, 최종적으로 10개의 물질을 선별함.
- 합성을 통해 특정 양이온이 존재하는 III-V족 층상형 구조를 만든 이후, 토포케미컬(Topochemical) 방식을 이용해 특정 양이온을 수소로 치환하는 방식으로 진행함.

* 토포케미컬(Topochemical): 화학 반응이 고체물질의 결정 구조 내에서 일어나며, 반응 후에도 원래의 결정 구조가 유지되도록 하는 방식

- 각 원소는 III족의 경우 Al, Ga, In으로 구성되며, V족의 경우 N, P, As, Sb 까지 구성됨. 다른 원소로 구성된 각 물질들은 다른 구조를 가지며, 특정 양이온의 종류도 다름. 그러므로 토포케미컬(Topochemical) 방식을 통해 특정 양이온을 제거하기 위한 적정 조건들도 모두 다름. 최적의 조건을 찾아서 최종적으로 10종의 III-V족 반데르발스 물질을 합성함.
- 개발한 III-V족 소재의 재료분석을 통해 특정 양이온을 제거하더라도 기존 첨가연광(zinc blende) 또는 첨유아연광(wurtzite)과는 다른 2차원 구조를 가지는 것을 확인함. 또한 외부전계에 의한 반데르발스 겹 내부의 이온의 움직임 확인함.

2) 실현된 구조체의 성능

- 실험적으로 구현된 2차원 III-V족 반데르발스 물질은 내부 이온이동으로 인해 저항 변화가 일어나는 것을 확인함으로써, 메모리스터로의 활용이 가능함을 검증함. 이온 이동의 제어를 통해서 시냅스 반도체 소자를 구현함으로써 뉴로모픽(Neuromorphic) 소자에 대한 가능성을 검증함.

* 뉴로모픽(Neuromorphic): 인간의 뇌 신경망을 모방하여 신경세포(뉴런)와 시냅스의 작동 원리를 구현하는 전자 소자

- 메모리스터 특성 뿐 아니라, III-V족 반도체로서의 특성을 검증함으로써 트랜지스터로의 활용이 가능함을 검증함. 이는 반데르발스 겹 내부에서의 이온 이동을 통한 메모리 특성과 2차원 소재의 반도체 특성을 통한 트랜지스터 특성을 동시에 보여주는 최초의 멤트랜지스터임.
- 멤트랜지스터 특성을 활용하여 단일 소자에서의 논리 연산을 수행할 수 있으며, 이온의 움직임에 의해 OR과 NOR 로직이 재설정 될 수 있음을 입증함.

3. 연구성과/기대효과

- III-V족 멤트랜지스터는 반데르발스 겹 내부에서의 이온 이동으로 구동하기에 전력소모가 낮으며, III-V족 소재로 구성되어 있으므로 기존 산업 인프라에 통합되기에 적합함.
- 고속 계산(High-throughput)법과 실험적 합성에 대한 효율성을 입증함으로써, 새로운 멤트랜지스터 소재 발견에 대한 패러다임을 제시함. 결과적으로 메모리 및 반도체 분야의 발전을 가속화하고 전자소자의 개발에 기여할 것으로 기대됨.

그림 설명



(그림) 비휘발성 3단자 소자의 예시. 현재 플래시 메모리와 강유전 FET구조가 많이 사용된다(왼쪽 2개). 본 연구에서 제안된 구조(맨 오른쪽)는 반도체 채널에서 이온과 전자/홀 동시제어가 가능한 소재개발로서 이를 이용해서 멤트랜지스터 제작이 가능하다

출처 : 연세대학교 신소재공학과 심우영 교수

용 어 설 명

1. 네이처 머터리얼스(Nature Materials)誌

○ 재료 분야 세계 최고 권위 학술지(Impact Factor(영향력 지수) : IF 37.2)

2. 멤리스터(Memristor)와 트랜지스터(Transistor)

- 회로에 사용되는 수동 소자는 저항, 캐패시터, 인덕터의 세 가지가 있다. 2008년에 네 번째 수동 소자로 제안된 것이 멤리스터이다. 멤리스터는 저항 특성과 메모리 기능을 동시에 가지는 소자로, 차세대 뉴로모픽 컴퓨팅과 메모리 소자로 주목받고 있다. 반면, 트랜지스터는 외부 전원 공급이 있을 때 작동하는 대표적인 능동 소자이다. 현재 모든 칩 단위의 회로는 수동 소자와 능동 소자의 조합으로 이루어져 있으며, 멤리스터와 트랜지스터가 결합된 형태에 대한 기초 연구가 활발히 진행되고 있다.

3. 멤트랜지스터(Memtransistor)

- 멤트랜지스터는 멤리스터와 트랜지스터를 결합한 소자이다. 이 두 소자를 결합하는 것이 어려웠던 이유는 멤리스터는 주로 부도체에서 발견되는 특성을 가지고 있는 반면, 트랜지스터는 반도체를 기반으로 한 소자이기 때문이다. 반도체 특성과 멤리스터 특성을 동시에 나타내는 소재를 찾는 것이 매우 어려웠다. 2018년, 미국 노스웨스턴 대학에서 최초로 멤트랜지스터 소재를 제안했으나, 전력 소비가 크다는 한계가 있어 새로운 소재 개발이 필요했다. 멤트랜지스터는 새로운 메모리 응용뿐만 아니라 뉴로모픽 컴퓨팅 등 로직 회로에도 적용할 수 있는 잠재력을 가지고 있다.

4. 기존 멤트랜지스터의 작동원리: 전이금속 기반의 결정립계에서의 이온/결합의 이동

- 기존 멤트랜지스터에서는 이온이 결정립계를 따라 이동한다. 결정립계는 소재 내에서 구불구불한 형태를 가지기 때문에, 이온이 이동하는 데 많은 에너지가 필요하며, 이는 전력 소비량과 직결된다. 특히, AI 가속기 등에서 전력 사용이 중요한 이슈로 대두되는 상황에서 이 문제는 반드시 해결해야 할 과제이다. 또한, 결정립계의 농도와 크기 등을 제어하기가 어려워, 저전력에서 이온 이동이 가능한 효과적인 해결책을 찾는 것이 매우 까다롭다.

5. 반데르발스 물질과 III-V족 물질

- 반데르발스 물질은 흑연처럼 여러 겹의 원자층이 쌓인 소재를 말한다. 예를 들어, 흑연에서 원자층 하나를 분리하면 그래핀을 얻을 수 있다. III-V족 화합물은 대표적인 화합물 반도체로, IV족 반도체의 대표적인 예는 실리콘(Si)이며, III족(Al, Ga, In)과 V족(N, P, As, Sb)의 조합으로 이루어진 III-V족 반도체는 GaN과 같은 물질들이 포함된다. 그러나 IV족과 III-V족 반도체 소재에서는 이온이 이동할 수 있는 경로가 없기 때문에, 기존에 알려진 IV족과 III-V족 반도체에서는 멤트랜지스터 특성을 발현할 수 없다.

6. 신소재 멤트랜지스터의 작동원리:

- III-V족 반도체를 흑연처럼 층상형 반데르발스 구조로 변형시켰다. 이러한 구조는 자연계에 존재하지 않던 새로운 결정 구조로, 여러 겹의 III-V족 반도체 층이 쌓여 있으며, 그 사이에 물리적인 공간(반데르발스 갭)이 형성되어 있다. 이 공간은 이온이 이동할 수 있는 고속도로 역할을 하여, 이온 이동이 메모리 기능을 수행하게 한다. 동시에, III-V족 반도체 자체는 로직 기능을 담당할 수 있다. 결과적으로, 하나의 소재에서 멤리스터와 트랜지스터 기능이 모두 발현되는 혁신적인 구조가 탄생한 것이다.

연구 이야기

<작성 : 연세대학교 심우영 교수>

□ 연구를 시작한 계기나 배경은?

본 연구팀에서는 3차원 물질에서 다양한 방법으로 새로운 2D물질의 구현할 수 있는 물질의 차원계층설계 및 그의 응용에 관한 연구가 진행되고 있다. 본 연구는 기존에 존재하지 않았던 III-V족 반도체에 대한 이론적 고찰과 실험적 가능성에 대한 궁금증으로 시작되었다.

□ 연구 전개 과정에 대한 소개

특정 원소가 존재하는 III-V족 반도체에 대한 후보군을 도출하고, 층상형 III-V족 반도체 화합물을 실험적으로 합성한 뒤, 특정 원소 제거를 통해서 III-V족 반데르발스 물질을 얻었다. 반데르발스 갭 내부의 이온 이동에 대한 검증을 진행 후, 이온 이동에 의한 메모리 성능 구현과 III-V족 반도체 특성으로 인한 트랜지스터 성능 구현을 실험적으로 구현하였다. 최종적으로 메모리 성능과 트랜지스터 성능이 동시에 발현하는 멤트랜지스터 성능을 확인하였다.

□ 연구하면서 어려웠던 점이나 장애요소는 무엇인지? 어떻게 극복하였는지?

각 물질에 대한 합성 공정 및 특정원소 제거에 대한 공정 최적화에 어려움이 있었다. 본 연구단은 공정시간, 환경, 화학시약 등 다양한 실험 변수를 정밀하게 조절하여 가장 최적화된 합성법을 찾아 이를 극복할 수 있었다.

□ 이번 성과, 무엇이 다른가?

본 연구에서의 III-V족 멤트랜지스터는 반데르발스 갭 내의 이온 이동에 의한 메모리 특성과 III-V족 반도체 특성이 동시에 결합된 최초의 멤트랜지스터이다. 이는 우선적으로 새로운 멤트랜지스터의 메커니즘을 선보였음에 의의를 둔다. 또한 기존의 전이금속 기반의 결정립계를 통한 이온/결합 이동과는 다르게, 저전력 및 균일성을 확보 할 수 있다는 장점이 있다. 또한 다양한 III-V족 및 그 외의 물질에서도 같은 원리를 적용할 수 있으면, 제한적인 멤트랜지스터 소재군을 확장시킬 수 있다.

□ 실용화된다면 어떻게 활용될 수 있나? 실용화를 위한 과제는?

2차원 물질이면서 간단한 원리로 멤트랜지스터가 구동하기에 복잡한 공정이 필요 없다는 장점이 있다. 산업적으로 실용화를 위해서는 현 공정 방식에서 더 발전하여 III-V족 물질의 대면적화가 필요해 보이며, 이를 보완하기 위해서는 대면적 합성방법에 대한 공정이 최적화되어야 한다. 대면적 공정이 최적화 된다면 현 실리콘 기술과의 호환성이 좋을 것으로 판단된다.

□ 꼭 이루고 싶은 목표나 후속 연구계획은?

산업적으로 실용화를 위해서 우리의 목표는 개발했던 III-V족 물질의 대면적화를 진행하는 것이다. 다양한 합성방법 및 공정을 통해서 대면적 III-V족 반데르발스 물질을 구현하고 이를 이용한 응용을 시도하고자 한다.

연구자 소개

〈심우영, 교신저자〉



1. 인적사항

- 소 속 : 연세대학교 신소재공학과
- 전 화 : 02-2123-2857

2. 학력

- 1996 ~ 2004 연세대학교 금속공학 학사
- 2004 ~ 2006 연세대학교 신소재공학 석사
- 2007 ~ 2012 미국 Northwestern 대학교 재료공학 박사

3. 경력사항

- 2012 ~ 2014 미국 Harvard 대학교 박사후 연구원
- 2014 ~ 2018 연세대학교 신소재공학과 조교수
- 2018 ~ 2024 연세대학교 신소재공학과 부교수
- 2024 ~ 현재 연세대학교 신소재공학과 교수
- 2018 ~ 2022 연세대학교 치과대학 겸임교수
- 2018 ~ 현재 다차원소재연구단 단장
- 2018 ~ 현재 연세대학교 IBS Center for Nanomedicine 교수
- 2020 ~ 현재 *Nano Convergence* 부편집장
- 2020 ~ 2022 연세대학교 대학원 주임
- 2022 ~ 2024 연세대학교 공학연구원 부원장
- 2022 ~ 현재 연세대학교 융합반도체대학원 겸임교수
- 2023 ~ 현재 연세대학교 교수평의회 평의원
- 2023 ~ 현재 연세대학교 디스플레이융합공학과 겸임교수
- 2024 ~ 현재 연세대학교 공과대학 기획부학장

4. 전문분야 정보

- 신소재공학

5. 연구지원 정보

- 2018 ~ 2024 과학기술정보통신부·한국연구재단 미래소재디스커버리사업

〈배지홍, 제1저자〉



1. 인적사항

- 소 속 : 연세대학교 신소재공학과
- 전 화 : 02-2123-8317

2. 학력

- 2013 ~ 2019 연세대학교 신소재공학과 학사
- 2019 ~ 2021 연세대학교 신소재공학과 석사
- 2021 ~ 2022 연세대학교 신소재공학과 석사후 연구원
- 2022 ~ 현재 연세대학교 신소재공학과 박사

3. 경력사항

4. 전문분야 정보

- 신소재공학

〈원종범, 공동 제1저자〉

1. 인적사항

- 소 속 : 연세대학교 신소재공학과
- 전 화 : 02-2123-8317

2. 학력

- 2012 ~ 2018 연세대학교 신소재공학과 학사
- 2018 ~ 2023 연세대학교 신소재공학과 박사

3. 경력사항

- 2023 ~ 현재 연세대학교 신소재공학과 박사후 연구원

4. 전문분야 정보

- 신소재공학

