원자제어 저차원 전자계 연구단 (재료 물리 그룹)

DOI: 10.3938/PhiT.24.039

조 문 호

Materials Physics Group of CALDES

Introduction to the “Materials Physics Group” at the Center for Artificial Low Dimensional Electronic Systems (CALDES)

Moon-Ho JO

Advances in experimental condensed matter physics, in many cases, have benefited from progress in the syntheses of artificial low-dimensional material systems: to name a few, we have witnessed such examples of physics in the two-dimensional(2D) electron gases of semiconductors, giant magnetoresistance in metal superlattices, and most recently Dirac electrons in 2D hexagonal materials. As such, the precise definition of a new class of materials often initiates new physical phenomena. The Materials Physics Group of the CALDES categorizes research themes into three subjects: (1) heteroepitaxial growth of atomically-thin semiconductors, correlated metals and insulators, (2) photoresponses at the 2D heterointerfaces, and (3) potential development into atomic 2D photonics and optoelectronics. In this article, I give a brief introduction to my group, including our research statements, the group's structure and several recent research activities.

저자약력

조문호 부단장은 2001년 영국 캠브리지대학에서 재료과학 전공 (광간산화물 박막기반 전자스핀 터널링 소자 연구)으로 박사학위를 취득한 후, 하버드 대학에서 박사후연구원 후 (자성단분자에서의 극저온 전자전도 연구), 2004년 귀국, 포항공과대학교 신소재공학과와 연세대학교 신소재공학과를 거쳐 현재 포항공과대학교 신소재공학과 교수와 원자제어 저차원 전자계 연구단 부단장으로 재직 중이다. 그동안 중심 연구 주제로 (1) 기상법에 의한 저차원 물질 합성 (2) 국소광프로브를 이용한 저차원 물질에서의 광-전자 상호 작용 (3) 저차원 전자 스핀 수송 등에 대해 연구해오고 있다. (mhjo@postech.ac.kr)

과학기술적 문제 제기

다양한 응집 물리 대상 물질계 중 고체 전자 물질계에서의 획기적인 과학적 발견은 현대 정보통신문명의 기술적인 토대를 제공하였다. 특히 현재 우리나라 국부의 핵심이기도 한 실리콘 등의 반도체 소재 기반의 고체 전자 소자, 디스플레이 기술은 금세기 초부터의 미국 유럽 등에서의 관련 과학적 현상 발견으로부터 시작되었고, 이후 고집적화와 같은 응용 기술적인 측면에서 미국 일본 한국 등에서의 지속적인(evolutionary) 개발을 통해 발전하고 있다. 가까운 미래에서의 개별적 혹은 집단적인 정보 처리와 통신 기능으로서의 고체 전자 소자의 기능은 상기의 예측 가능하고 지속적인 발전과 동시에 패러다임 전환이 요구하는 획기적인 와해성(disruptive) 발전을 동시에 필요로 한다. 나아가 이들 전자 소자의 역할은 모바일 사회에서 초고성능/초다기능화 요구에 직면하고 있는데, 예를 들어 생명과학(생명과학 대상체의 정밀 검지와 실시간 질병 진단 등), 환경(영구 소모적인 천연자원 개발의 최소화 등), 에너지 문제(고효율 에너지 변환, 대체 에너지원 개발 등) 등을 포함하는 훨씬 다양한 문명적 요소에서의 핵심적인 기체로서 다각화되고 있다. 단위 전자 소자계의 기능으로 보면 이는 정보 처리와 통신에서의 대용량 동시 고속처리 등의 전기적 기능에 있어 추가적인 성능 향상뿐 아니라, 빛과 열 등을 포함하는 전자 이외의 다양한 매개체에 대해 민감하게 반응하는 기능을 필요로 한다. 응집 물리계에서의 전기-빛-열 간의 상호 반응은 고전적 주제이기도 하지만, 앞서 언급한 새로운 문명적 요구 정도에 비해서는 아직도 새로운 현상의 발견과 이해를 필요로 하며, 나아가 원천 연구를 통한 실질적인 응용성 근거의 확보가 매우 중요하다. 이러한 새로운 과학적 발견과 이를 통한 실질적인 응용으로의 가능성에 대한 기술적 근거 제시는 응집물리 학문의 사명이기도 하다. 이러한 측면에서 보았을 때, 본 세부 과제에서의 “**새로운 저차원 전자 응집물질계의 도입**”과 “**이들의 광반응 현상에 대한 광물리 연구**”는, 응집 물리 학문의 세계적인 선도를 지향할 뿐 아니라 기술적으로도 반도체, 디스플레이 등 현 국부 원천 기술의 연속적이며 동시에 질적인 발전에 해당하기도 하다.

Fig. 1. Research categories of Materials Physics Group at CALDES.

Fig. 2. (Left) Materials classification of interest in Materials Physics Group at CALDES. (Right) Schematics of gas-phase synthesis of monolayer heterostructures.

현 연구 상황의 인식

앞서 예시한 저차원 전자 소자계를 기반으로 하는 응집물리 연구는 현재 전 세계적으로 가장 활발한 연구 프로그램으로서, 특히 저차원 응집 물리계에서의 전자에너지 분포의 특이성과 이에서 발현되는 전자(스핀) 이동 현상에 집중되어 있다. 구체적인 대상 물질계로서 (1) 원자층 층상 결정구조를 가지는 graphene, hexagonal boron nitride (*h*-BN), (2) Si와 Ge 등의 3차원 결정 구조의 원자층 2차원 결정 동위 구조인 silicene, germanicene, (3) 원자층 층상 금속칼코게나이드 화합물, (4) 강상계 산화물에서의 이중 접합계면(itinerant *d*-electron 2DEG) 등이 있다. 다양한 저차원 물질계 중에서 이러한 원자층 혹은 2차원 물질계가 고유하게 가지는 차별성은 크게 두 가지로 나누어 생각할 수 있는데, (i) 원자층 저차원에서 나타나는 다양한 전자계의 대칭성과 강한 상관 작용의 양태가 매우 다양하고, (ii) 현상의 발현을 비교적 용이하게 응용할 수 있는 대면적 물질계의 합성 또는 제작

Fig. 3. Strong photon-matter interactions in atomically thin materials and their various band-structures.

이 가능하다는 점이다. 이는 최근 20-30년간 나노과학의 연구를 주도한 양자점(quantum dots) 또는 나노선(nanowire) 등의 물질계가 실제 응용으로 적용되기 위해 필연적으로 요구되는 나노 단위체의 소위 bottom-up assembly에 의한 집합체 구조물의 제작이 기술적으로 매우 어려운 점과 대별되는 특성이다. 즉 대면적 2차원 물질계는 공정 측면에서 대량생산이 가능한 bottom-up assembly 방식의 massive parallelism이 가능하다. 따라서 2차원 구조체는 기초연구에서의 현상 발견과 이해가 훨씬 더 구체적이고 직접적으로 응용되는 가능성을 가진다고 할 수 있다. 이러한 원자층 2차원 전자계에서의 대칭성과 강상 관계 연구에서 빛 또는 열 등과의 상호 반응 연구는 기존에 보고되지 않은 새로운 현상을 발현할 것으로 예측되어 오고 있으나, 아직 구체적인 연구는 전자계로서의 연구에 비하여 상대적으로 이루어지지 않고 있는 실정이다. 예를 들어 대표적인 금속 칼코게나이드 화합물인 Bi₂Se₃의 경우, 최근 응집물리 분야에서 집중적인 연구 대상인 전자계로서 위상부도체의 전형이기도 하지만, 응용 측면에서는 대표적인 상온 열전 변환 소재로도 알려져 있는데, 2차원 구조에서 이들의 상호 관계에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다. 이러한 2차원 응집 물질계의 빛 또는 열 등과의 상호 반

Fig. 4. (Left) Step-terraced Bi_2Te_3 topological insulator crystals. (Center) Photoinduced thermoelectric measurements with local laser heating. (Right) Thermoelectric current generation across the atomic step in Bi_2Te_3 . Ref. Nano Letters 14, 4030 (2014).

Fig. 5. (Left) Orthorhombic SnS and hexagonal SnS_2 crystals. (Center) Deterministic gas-phase growth of Orthorhombic SnS and hexagonal SnS_2 crystals. (Right) Electrical characteristics of n-type SnS_2 and p-type SnS few monolayers. Ref. Nano Letters 15, 3703 (2015).

응 연구는 기존의 전자 거동에 관한 연구에 새로운 각도로부터의 접근을 통한 새로운 현상의 발견으로 지향되며 나아가 새롭고 구체적인 응용을 직접적으로 시사할 수 있다.

원자제어 저차원 전자계 연구단 재료 물리 그룹

조문호 부단장에 의해 구성된 재료 물리 연구 그룹(Materials Physics Group)은 연구단 전체의 연구 주제인 인공 저차원 전자계의 대칭성과 위상질서 연구에 있어, 특히 (1) 대면적 원자층 물질의 고품위 이종 접합 결정의 합성과 이들에서의 국소 광여기에 의한 (2) 강한 비선형 빛-물질 상관관계 그리고 (3) 분광학적 전자 수송에 대한 연구를 수행한다. 그림 1에 연구 그룹의 세부 연구 분류에 대해 요약하였다.

이러한 연구는 기본적으로 빛-열-저차원전자계의 강한 상호작용에 관한 것으로 이는 원자층 저차원 물질에서 발현되는 기존에 보고되지 않은 새로운 전자구조에서 기인한다. 그림 2는 본 연구 그룹에서 합성하고 있는 원자층 물질을 에너지 밴드갭의 크기에 따라 분류한 것인데, 흡수되는 다양한 파장과 분극의 빛은 이러한 전자계를 여기시켜 매우 다양한 전자계 현상을 발현한다.

예를 들어 이전에 다른 물질계에서는 존재하지 않은 방식의 새로운 흡광, 광변조, 발광 현상, 또는 매우 효율적인 광-열전

변환 현상, 매우 빠른 전자 동역학적 현상 등이 관찰될 수 있다. 이러한 새로운 현상에 관한 연구는 기본적으로 새로운 원자층 물질의 합성, 특히 이종 접합 구조의 합성을 전제로 하며 이를 통한 인공 국소 접계면에서의 빛-물질 상관관계의 계측으로 가능할 수 있다.

본 연구 그룹의 인적 구성

본 재료 물리 그룹은 총 15명으로, 그룹리더와 2명의 연구위원(박사급 전문 연구 인력)과 11명의 대학원생, 1명의 연구행정 인력으로 구성되어 있다. 상기 언급한 연구 내용 중 (i) 원자층 2차원 결정 미세 분석과 (ii) 고속 레이저를 활용한 동역학적 계측 연구는, 최단기간 연구단 자체의 know-how 확보를 위해, 초기 단계에는 외부 연구 기관과의 공동 연구를 실현하고 있다. (그림 3)

최근 관련 연구

본 그룹은 2013년 11월에 연구단에 합류하였으며, 다양한 원자층 물질계를 크게 (밴드갭이 비교적 큰) 반도체 군과 (밴드갭이 작고 또는 부재한) 전자기상관계 군으로 나누어 대면적 합성과 분광학적/동역학적 빛-물질 상관관계를 연구해오고 있다. 그간 연구 성과로

Fig. 6. (Left) The 2D nucleation kinetics model for the two growth modes and thermodynamic criteria for the lateral and vertical ML growth, which is deterministic by difference in surface energies. (Right) The schematic illustration of two different (lateral stitching and vertical stacking) growth by the growth sequences. Ref. Advanced Materials 27, 3803 (2015).

Fig. 7. (a) Schematics for light absorption and emission by rotation of monolayer hexagonal semiconductors (MoS_2 and WS_2) in vertical stacks and calculated bandstructures of rotational misfit-free stacks and randomly rotated stacks. (b) Interlayer orientation dependent light absorption and emission in MoS_2 and WS_2 monolayer stacks. Ref.: Nature Communications 6, 7372 (2015).

는 수 원자층 단위의 삼차원 위상부도체의 원자층 계단에서 위상부도체의 표면 도체 상태의 유무에 따라 효율적인 광-열전 변환의 기작에 대한 연구 결과를 발표하였다(“Atomic Layer-by-Layer Thermoelectric Conversion in Topological Insulator Bismuth/Antimony Tellurides”, Nano Letters 14, 4030 (2014), 그림 4 참조).

또한 기상 결정 성장시 열역학적 조절로 육방정계 또는 사방정계 2차원 결정 성장의 조절이 가능함을 보고하였다(“Deterministic Two-Dimensional Polymorphism Growth of Hexagonal n-type SnS_2 and Orthorhombic p-type SnS crystals”, Nano Letters, 15, 3703 (2015), 그림 5 참조). 이는 graphene, h -BN, MoS_2 등 육방정계 전자계뿐만 아니라 최근에 새로이 연구되는 phosphorene 등 사방정계 전자계의 원자층 결정의 성장이 인공적으로 가능함을 예시하며, 후속 연구로서 더 다양한 이차원 결정 성장에 관한 연구가 진행되고 있다.

반도체 광물리 관련 연구로는 최근 발표 연구 결과로서 육방정계 원자층 반도체의 수평 혹은 수직형 이중 접합 결정 성장이 인위적으로 조작 가능함을 그 성장 원리와 함께 보고하였다.

(“Rotation-Misfit-Free Heteroepitaxial Stacking and Stitching Growth of Hexagonal Transition-Metal Dichalcogenide Monolayers by Nucleation Kinetics Controls”, Advanced Materials 27, 3803 (2015), 그림 6 참조).

또한, 이러한 결정 방향의 어긋남이 없는 육방정계 단위자층 반도체 이중 접합구조에서 전혀 새로운 흡광과 발광이 관찰됨을 보고하였다(“Interlayer Orientation-Dependent Light Absorption and Emission in Monolayer Semiconductor Stacks”, Nature Communications 6, 7372 (2015), 그림 7 참조).

향후 연구의 방향과 비전

본 재료 물리 연구 그룹은 새로운 저차원 전자계 물질의 합성과 광반응 현상에 대한 기초 연구를 수행하고 이러한 현상 연구에서 파악되는 빛-물질 상호관계를 광에너지 변환이라는 응용 주제로도 환원하여 기초 물질 과학의 응용 기술 과학으로의 비전 제시에 대한 목표로 본 기초과학연구원의 사명에 이바지하고자 한다.