

Failure of Local Realism Revealed by Extremely-coarse-grained Measurements

양자역학의 발전은 물리학자들에게 고전적인 세계와는 전혀 다른 법칙에 의해 지배되는 세계를 드러내어 주었다. 아마도 양자 세계가 보여주는 가장 충격적인 단면은 국소적 실재론(local realism)의 종말일 것이다. 이 이야기는 아인슈타인-포돌스카-로젠의 유명한 역설로 거슬러 올라간다. 아인슈타인 등은 1935년 Physical Review에 발표한 논문에서 국소적 실재론이라는 가정에 근거해서 양자역학이 완전한 물리 이론인지에 대한 의문을 제기했다.

국소적 실재론은 국소성(locality)과 실재론(realism)이라는 두 개의 가정들의 조합이라고 할 수 있다. 국소성 가정은 서로 멀리 떨어져 있는 물리적 계들이 서로 즉각적인 상호작용을 할 수 없음을 말해 준다. 물리적 실재론에 따르면 모든 측정 결과들은 측정 전에 이미 결정되어 있었다고 가정해야 한다. 이후 벨(Bell)은 국소적 실재론에 따르면 반드시 성립해야 하는 부등식을 제안했다. 벨의 부등식이 위배될 수 있다는 사실은 이론적, 실험적으로 밝혀져 왔으며 물리학자들은 이것을 국소적 실재론의 포기, 즉 국소성과 실재론 둘 중 적어도 하나의 가정은 포기해야 한다는 결론으로 받아들여 왔다.

미시적 물리계를 제어하는 많은 실험실들에서 벨 부등식의 위배를 포함한 많은 양자 효과들을 관찰해 왔음에도 불구하고 이러한 양자 효과들을 거시적인 영역에서는 관찰하기는 극히 어렵다. 물리학자들은 미시적인 물리계들이 양자 이론을 따름에도 불구하고 거시적 영역에서는 왜 고전 세계가 나타나는지에 대한 설명들을 시도해 왔다. 양자 효과들이 환경과의 상호작용에 의해 사라지게 된다는 결어긋남(decoherence) 이론은 양자 역학의 법칙으로부터 고전 세계가 나타나는 데 대한 가장 유력한 설명으로 여겨지고 있다. 널리 퍼져 있는 또 다른 설명은 측정의 불확정성이 결어긋남 효과와 유사하게

양자효과를 지워버리고 고전적인 세계가 나타나게 한다는 것이다. 특히 최근에 Kofler와 Brukner에 의해 고전 세계의 나타남을 측정의 비효율성에 따른 측정 결과의 모호함(fuzziness)에 의해 설명할 수 있을 것이라는 보다 체계적인 주장이 제기되었다 [Phys. Rev. Lett. **99**, 180403 (2007)].

우리는 이 문제에 대한 다소 다른 접근을 시도했다. 즉 거시적 극한 영역에 있는 측정을 가지고도 국소적 실재론이 위배되는 양자 세계가 측정자에게 드러날 수 있는지에 대한 의문에 대한 답을 얻고자 했다. 고도의 정확성을 가진 양자 측정 장치는 광자의 개수와 같은 미시적인 차이를 구별해내는 것이 가능하다. 그러나 극단적인 예로 사람의 눈은 이러한 미시적 차이를 정확히 구별할 수 없으며 ‘밝음’과 ‘어두움’이라는 거시적 수준의 차이를 구별해낼 수 있을 뿐이다. 과연 이러한 거시적인 영역에 있는 측정을 가지고 양자 세계를 분명히 드러낼 수 있는가는 우리의 연구 이전에는 분명히 답변되지 않은 문제였다.

우리가 밝힌 예들은 Kofler와 Brukner의 결론을 포함하여 기존에 알려져 왔던 바와 달리, 거시적 극한 영역에 접근하는 거친 측정(coarse-grained measurements) - 혹은 모호한 측정(fuzzy measurements) -으로도 양자 세계가 측정자에게 분명하게 드러날 수 있다는 사실을 보여주었다. 이러한 예들을 보이기 위해 우리는 “빛의 슈뢰딩거 고양이 상태”라고 불리는 거시적 양자 중

첩 상태와 효율이 매우 낮은 호모다인 측정(homodyne measurements)을 포함한 광학적 도구들을 사용했다. 그림 1은 벨 함수(B)와 측정의 효율(η), 그리고 벨 부등식 검증 실험에 사용되는 양자 얽힘 상태의 거시성(d) 사이의 관계를 보여준다. 우리가 사용한 벨 부등식은 $|B| \leq 2$ 로 표시되는 형태였으므로 벨 함수의 절대값의 최대값인 $|B|_{\max}$ 가 2보다 크면 벨의 부등식은 위배된다. 그림 1의 결과가 보여주는 것은 η 이 0에 접근하는 영역에서도 거시적 양자 중첩 혹은 얽힘 상태 자체의 거시성을 증가시키면 벨 부등식의 위배를 분명하게 보일 수 있다는 것이다. 즉 충분히 거시적인 양자 상태를 만들어낼 수 있다면 극히 부정확한 측정만이 가능한 경우에도 양자 세계가 측정자에게 나타날 수 있다는 것이다. 이는 양자 역학의 기초(foundations of quantum mechanics) 분야, 특히 측정이란 문제의 본질을 밝히는 데 기여할 것으로 기대된다.

이 연구의 또 다른 주요 결과는 국소적 실재론에 의해 강요되는 벨의 부등식은 위배되거나 비국소적 실재론(nonlocal realism)에 근거한 레gett(Leggett)의 부등식은 완전히 만족하는 영역이 존재함을 보임으로써 국소성과 실재론이라는 두 가정을 나누어서 고찰할 수 있는 계기를 마련한 것이다. 이러한 상황은 실재론적 설명은 가능하나 국소성의 가정은 포기해야 하는 영역이 있을 수 있음을 암시한다고 할 수 있다.

우리의 결과는 비국소적 실재론을 포함하여 자연에 대한 실재론적 기술이 궁극적으로 가능한지에 대한 논쟁의 최종적 결말에 도달할 수 있는 또 하나의 실마리를 제공한 결과라고 할 수 있을 것이다.

정현석(서울대학교), M. Paternostro(Queen's University Belfast), T. C. Ralph(University of Queensland), Phys. Rev. Lett. **101**, 226402 (2008).

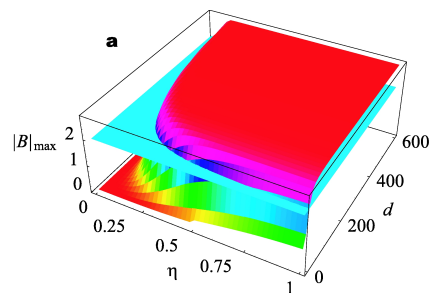


그림 1. 벨 함수(B), 측정의 효율(η), 양자 얽힘 상태의 거시성(d) 사이의 관계.

Nonlinear Dynamics of Domain-Wall Propagation in Epitaxial Ferroelectric Thin Films

물체에 힘을 가해서 움직이게 하면 속도라는 물리량이 생긴다는 것은 많은 사람들이 과학에서 가장 기본적으로 배우는 개념이며 자연현상을 이해하는 데 있어서 중요하다. 과학자들은 매우 복잡해 보이는 물체의 움직임일지라도 그것의 근본 원리는 굉장히 단순한 것이라 그 속도와 궤적을 예측할 수 있다고 생각했다. 이런 생각은 갈릴레오와 뉴턴 이래 성공을 거두어 금세기의 중요한 업적인 양자 역학과 아인슈타인의 상대성 이론에까지 이르게 되었다.

그러나 실제 자연계에 존재하는 물질들을 미시적 관점에서 살펴보면 원자 간의 상호작용, 결합 원자간의 상호작용, 열에너지로 인한 활성화 확률처럼 실제 운동방정식에서 무시된 항들이 중요한 역할을 할 때가 많다. 예를 들어 종이를 물에 적셨을 때 종이가 완벽하게 고르지 못해 군데군데 물이 번지는 속도가 균등하지 않고 경계면이 일직선이 아니라 울퉁불퉁해지는 현상에서도 쉽게 볼 수 있다. 이런 현상들의 특징은 작용하는 물체의 수가 많고 그들이 매우 복잡하고 불규칙적인 운동을 한다는 점이다. 이러한 복잡하고 불규칙한 현상에서 숨은 질서가 있다고 주장하는 것이 혼돈현상 이론이다. 혼돈현상의 특징 중의 하나는 쪽거리(fractal) 차원을 가진다는 점이다. 쪽거리 차원은 차원의 수가 정수가 아닌 (보통 기하학이나 물리학에서 선, 넓이, 공간은 각각 1,2,3차원의 정수 차원을 가진다.) 기묘한 성질을 가졌으며, 이미 칸토집합(Cantor set)으로 수학에서는 잘 알려져 있는 것이다. 하지만 이런 현상이 일어나는 물질들의 고유의 운동 현상 및 그 물리적 의미에 대한 연구가 부족한 상태이다.

우리는 두 가지 자발분극 상태를 가진 강유전체 박막에서 각각 다른 자발분극을 가진 구역 사이의 구역벽이 외부힘 (특히 전기장)에 의해 움직이는 현상을 연구하였다. 박막 내부에 존재하는 결함원자가 구역벽 운동의 진행을 방해하는 데 반해 강

유전체의 구역벽이 고유의 탄성은 서로 경쟁하며, 마치 고무줄이 걸렸다가 다시 튕길 때 그 속도가 달라지듯이 결합원자의 분포지역에 따라 구역벽 운동 속도가 달라진다. 결과적으로 구역벽 운동속도는 물질 내에 존재하는 결함원자의 성질, 즉 결합원자 사이의 거리, 상호작용력, 주변열에 의한 동요 등등에 의해 결정된다. 특히 외부의 힘이 약할 경우에는 구역벽 운동이 결함원자를 지나쳐 진행해가는 것은 전적으로 열역학적인 확률에 의해 결정된다. 이처럼 강유전체 박막의 구역벽 운동의 속도 연구는 구역벽 운동의 고유의 물리현상에 대한 이해뿐만 아니라 강유전체 메모리를 비롯해 강유전체를 이용한 초고속 응용 장치들에 있어 중요하다.

강유전체의 구역벽 운동에 대한 연구는 수십 년간 이론과 더불어 기술적으로도 많은 발전이 있었다. 그중에서도 가장 널리 쓰이는 방법으로 압전력 현미경(piezoresponse force microscopy)을 이용하는 방법이다. 이 방식은 원뿔 형태의 나노미터 둘레를 가진 도체 탐침을 강유전체 박막에 접촉시켜 전기를 가하고 구역벽의 자발분극 방향에 따라 달라지는 압전성질을 인식해 쉽고 간단하게 미세 도메인을 관찰할 수 있다. 하지만 탐침의 형태로 인해 탐침을 직접 강유전체 박막에 밀착시켜도 일정한 크기의 높은 전기장을 넓은 지역에 전할 수 없을 뿐 아니라 여러 가지

극한 상황에서 측정할 수 없다는 단점 또한 있다.

우리는 납 지르코늄 타이타네이트 위에 상부전극을 얹고 그 위에 별도의 탐침을 통해 전기장을 마이크로 미터 크기에 고르게 가하는 동시에 구역벽 운동을 관측했다. 또한 다양한 온도 특히 절대영도처럼 극한 상황에서의 구역벽 운동을 관측하기 위해 저온 유지 장치(cryostat)를 이용하여 구역벽이 이동한 면적에 비례하는 반전전류(switching current)를 측정하였다. 특히 반전전류의 고유 시간상수는 구역벽 운동속도와 반비례하는 관계임을 밝히고 이를 이용해 구역벽 운동속도를 다양한 온도에서 측정했다.

그 결과, 가장 낮은 온도인 10 K에서는 문지방 전기장(threshold electric field) 하에서는 거의 반전전류가 흐르지 않는다는 사실을 최초로 발견했다. 그리고 문지방 전기장보다 높은 전기장을 가할 경우 구역벽 전파속도와 전기장 사이에 비선형 관계가 존재할 뿐 아니라 구역벽의 기하학적으로 예상했던 정수가 1.5차원이라는 쪽거리 차원을 가진다는 것을 밝혀냈다. 또한 온도가 높아짐에 따라 문지방 전기장보다 낮은 전기장을 가해도 열에너지가 주는 동요(thermal fluctuation)로 인해 반전전류가 흐를 수 있다는 것을 관측하였다. 온도가 저온에서 상온 이상으로 올라갈수록 구역벽 전파속도는 전기장에 비례하는 형태에 한없이 가까워진다.

우리는 강유전체 박막의 구역벽 운동 속도의 비선형성이 강유전체 내의 결함원자와 열적 동요현상에 의해 결정됨을 밝히고 구역벽이 혼돈현상에서 나타나는 쪽거리 차원을 가짐을 알아냈다. 본 연구는 무질서와 혼돈현상의 적용 범위를 강유전체로 확장시키는 기반을 제시하였다.

조지영, 양상모, 김태현, 노태원 (서울대), 이호녕 (Oak Ridge National Laboratory, 미국), 박승영, 조영훈, 정명화 (한국기초과학연구소), Phys. Rev. Lett. **102**, 045701 (2009).

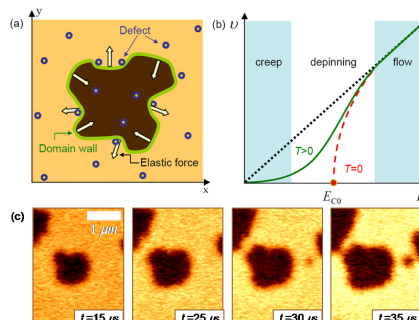


그림 1. 결합원자와 구역벽 운동 (a) 도식도 (b) 온도와 전기장에 따른 구역벽 운동속도 (c) 납 지르코늄 타이타네이트 박막의 구역벽 운동현상.

Unusually Large Franz-Keldysh Oscillations at Ultraviolet Wavelengths in Single-Walled Carbon Nanotubes

1958년 Franz와 Keldysh는 전기장 하에서 광여기전자는 반도체의 금지영역대(forbidden energy gap)를 통과(tunnel)할 수 있고, 흡수대(absorption band edge)에서 반도체 물질의 선형 광학특성을 변화시킨다고 발표하였다. Modulation spectroscopy는 반도체 계면에서 발생하는 국소 전기장을 실험적으로 이해하기 위해 Franz-Keldysh(FK) 효과를 이용한 예라고 할 수 있다. 2007년 Avouris 등은 단일벽 탄소나노튜브(SWNT)에서 제1, 제2 흡수대의 FK 진동(oscillation)을 계산하였다. 나노와이어와 나노튜브는 그들의 1-D 형상에 기인한 전기장 증폭의 효과가 예상되고, FK 효과에 의한 나노소재에서의 전기장이 어떻게 변화되는지 큰 관심사였으나, 탄소나노소재에서의 실험적 관찰이 보고된 바 없었다.

본 연구는 수정(quartz) 기판에 형성된 반도체성 SWNT 박막에 전기장을 가할 때, 자외선(UV) 영역에서 발생하는 FK 진동현상을 실험적으로 규명하였고, band edge에서보다 excitonic state에서 더 강한 전자흡광도(electroabsorption) 특성이 나타남을 밝힌 것이다. SWNT 박막에서 발생한 전자흡광도는 기존에 발표된 III-V 반도체나 반도체가 도핑된 유리의 경우보다 1000배 이상 컸다.

SWNT 박막의 FK 효과에 의한 에너지 밴드 다이어그램은 그림 1과 같다. 일정 전기장 하에서 SWNT의 전자과동 함수는 SWNT-수정 계면의 금지영역대를 통과하게 되고, FK 제한(confinement) 에너지($E_{g,FK}$) 이하의 에너지 영역에서 흡수폭이 즉, 진동현상을 나타낸다. 진동의 주기와 크기는 Airy 함수, 단위계단(unit step) 함수, 입사광 에너지와 FK 제한 에너지의 차이, electro-optic 에너지 등으로 구성된 흡수계수 차이, $\Delta a(V) \equiv a(V) - a(0)$, 에 의해 계산이 가능하다. 그림 2(a)는 3.5 ~ 6.5 eV의 UV 영역에서 전기장 크기에 따라 측정된 전자흡광도를 나타내고, 그림 2(b)는 반도체 SWNT의 평균 밴드갭 에너지(1 eV)와 수정의 밴드갭 에너지(9 eV)의 중간값인 5.35 eV를 제한 에너지로 적용하여 계산한 결과이다.

SWNT 박막에서 반도체성 및 금속성 SWNT 함량을 변화시킴으로써, UV 영역에서 발생하는 강한 FK 진동의 원인을 밝힐 수 있었다. 그림 3(a)와 같이, 반도체성 SWNT 함량에 따라 평균 밴드갭 에너지가 다른 총 4가지의 박막(SF-1 ~ 4)을 준비하였고, 특히 SF-3는 (6,5) 인덱스만 나타내는 순수 반도체성 SWNT 박막, SF-4는 초기 합성된 상태의(pristine) SWNT 박막이다. 추가로 SWNT 기벽을 완전히 기능화(functionalization)시킴으로써, 캐리어 산란의 영향을 살펴보았다. 이를 위해 각 박막의 평균 밴드갭 에너지(E_{11}^S)를

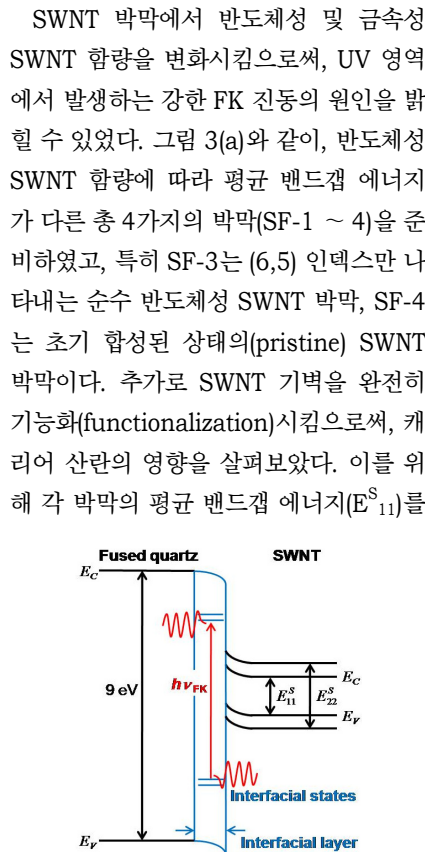


그림 1. 수정 위에 형성된 SWNT 박막의 FK 효과를 도식화한 에너지 밴드 다이어그램.

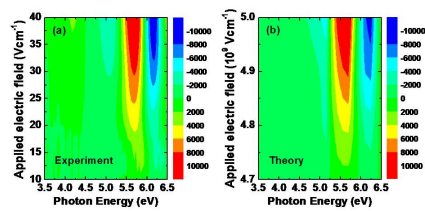


그림 2. UV 영역에서 전기장에 따른 SWNT 박막의 (a) 측정된, (b) 계산된 electro-absorption.

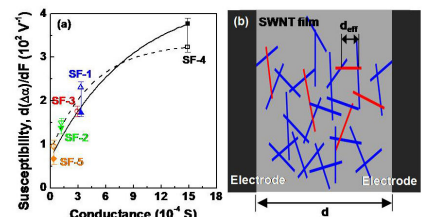


그림 3. (a) 반도체성 및 금속성 SWNT 비율에 따른 박막의 전기전도도와 전자흡광도 효과(susceptibility), (b) 박막에서 금속성 SWNT의 역할에 대한 모식도.

계산하였고, 종합적인 전자흡광도 특성은 다수의(n,m) 인덱스에 의한 영향으로 간주하였다. 또한, FK 제한(confinement) 에너지($E_{g,FK}$)는 반도체성 SWNT의 제1, 제2 밴드간 전자전이(interband transition)의 영향으로 $E_{g,FK}^1$, $E_{g,FK}^2$ 의 2가지 FK 제한 에너지로 나타내었다. E_{11}^S 과 $E_{g,FK}^1$, $E_{g,FK}^2$ 의 선형적인 관계를 통해, SWNT 박막의 평균 밴드갭 에너지와 FK 제한 에너지는 밀접한 관련이 있음을 밝혔다.

한편, 각 SWNT 박막의 전기전도도에 따라 전기장에 의한 FK 효과(susceptibility)는 증가함을 나타내었고, pristine SWNT 박막의 효과가 가장 높았다. 특히, 본 연구에서 인가된 전기장은 최고 160 V/cm였고, 유사한 기존 연구에 사용되었던 전기장($\sim 10^6$ V/cm)에 비해 월등히 낮은 값이다.

일반적으로 밴드갭 에너지가 큰 반도체성 SWNT 비율이 높은 박막의 경우는 금속성 SWNT의 낮은 함량으로 인해, 전기전도도가 감소한다. Pristine SWNT 박막(SF-4)은 가장 많은 금속성 SWNT를 함유하고 있기 때문에 가장 높은 전도도를 나타낸 것이다. 단, 무작위로 배열된 SWNT 네트워크에서 FK 효과는 전류가 흐를 수 있는 금속성 통로의 수에 따라 제한될 것이다. 소자의 전체 채널길이(d)에 비해, 금속성 SWNT에 의해 형성된 sub-percolated 네트워크 내부에 실질적인 채널(d_{eff})이 존재한다. 결국 $d_{eff} \ll d$ 이므로, $F_{eff} = V_{app}/d_{eff}$ 는 증가하게 되어, 소비전력의 감소 효과 즉, FK 진동현상이 기존 타물질의 경우에 비해 월등히 낮은 전기장 하에서도 나타나는 것이다.

또한, FK 효과가 높은 SWNT 박막의 경우, 전기장 인가 유무(on/off)에 따른 전자흡광 응답(modulation) 속도가 빠르고, 이것은 소자를 구성하는 박막의 두께에 따라 결정되는 양자 커패시턴스(quantum capacitance)에 영향 받는다.

M. H. Ham, 공병선, W. J. Kim, 정희태 (KAIST), M. S. Strano, Phys. Rev. Lett. 102, 047402 (2009).