

나노하이브리드 조셉슨 소자 연구

도 용 주

고려대학교 세종캠퍼스 디스플레이·반도체 물리학과

1. 서 론

조셉슨 소자는 두 개의 초전도체가 비초전도 물질을 사이에 두고 샌드위치 형태로 결합하고 있는 구조를 갖고 있다. 1962년 캠브릿지 대학의 대학원생이었던 Brian Josephson은 이러한 구조를 갖는 소자에서 초전도 전자쌍 (쿠퍼쌍)의 투과(tunneling) 현상이 이론적으로 가능함을 보였고[1], 이 발견의 공로로 노벨상[2]까지 타게 되었다. 조셉슨의 이론적 예측 이후로, 다양한 종류의 비초전도 물질들(절연 산화막, 금속 박막, 반도체 및 자성 박막 등)을 써서 조셉슨 효과에 따른 초전류를 관측하는 실험 연구가 부단히 진행 되었고 이러한 결과로서 현재 국가 표준으로 정하는 전압의 표준 소자[3] 및 뇌 자기장을 측정할 만큼의 초고감도의 초전도 양자 간섭 소자(SQUID)[4]의 발전이 이루어지게 되었고, 최근에는 투과형 조셉슨 소자를 이용한 양자 정보 소자인 큐비트(qubit)[5]의 개발 연구가 과학 선진국 간에 경쟁적으로 이루어지고 있다. 특히, 조셉슨 소자를 이용한 양자 컴퓨터 및 양자 암호 기술은 양자 물리학의 근원적 질문에 답할 뿐 아니라, 기술의 완성도에 따른 사회적 경제적 파급 효과가 막대하다는 점에서 매우 중요한 의미를 갖는다.

최근에 활발하게 연구되고 있는 나노 과학 기술은 상향식(bottom-up) 접근 방법으로 성장시킨 나노구조체의 발견(혹은 발명)에서 기인한다. 이러한 나노구조체의 대표적인 예로는 탄소나노튜브, 반도체 나노선 (혹은 나노막대), 그래핀 등이 있는데 이들은 단결정을 이루면서 동시에 저차원 전자계를 형성함으로써 중시계 물리학의 근간이 되는 양자구속(quantum confinement) 과 위상결맞음(phase coherence) 현상을 쉽게 드러낼 수 있다는 공통된 특징을 갖는다[6]. 일반적으로 차원이 낮고 결정성이 좋을수록 물질의 양자역학적 특성을 관찰하기가 쉬워진다.

저차원의 단결정 나노구조체가 초전도체와 혼성 구조(hybrid structure)를 이루게 되면 나노구조체 고유의 양자 구속 및 위상결맞음 현상이 초전도 질서도를 따르는 초전도 위상결맞음 효과와 결합하여 새로운 양자 현상이 발현될 것으로 예측되고 있다. 예를 들면, 이차원 전자계로 이루어진 양자점접점(quantum point contact) 구조에서 전형적으로 관측되는 전기 전도도 양자화 현상(conductance quantization)의 경우에, 양자점접점의 양쪽 끝이 초전도체 전극과 투명한(transparent) 접합을 이루었을 때 흐르는 초전류 값 또한 양자화되어 흘러간다는 이론적 예측[7]이 그러하다. 조셉슨 소자는 두 초전도체 사이의 질서도 위상 차이에 따라 초전류가 흐르기 때문에, 나노구조체를 사이에 두고 두 초전도체 전극이 연계된 나노하이브리드 조셉슨 소자야 말로 저차원 구조체의 양자 현상과 초전도 상태를 갖는 거시적 양자계와의 상호 작용을 연구하기에 가장 이상적인 시스템을 이루게 된다.

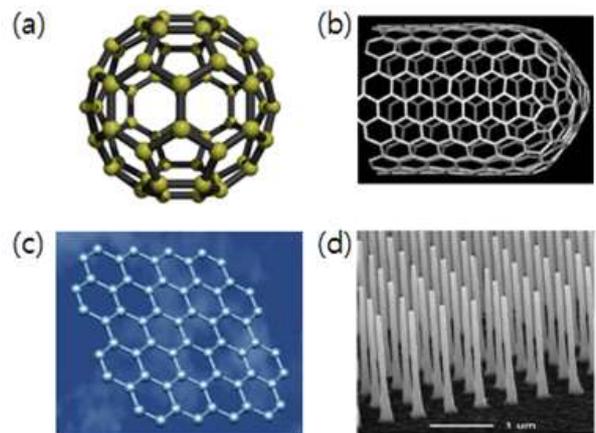


그림 1. 저차원 나노구조체 (a) C60 (b) 탄소나노튜브 (c) 그래핀 (d) 반도체 나노선.

2. 본 론

투과형 조셉슨 소자를 이용한 큐비트 소자 연구는 네덜란드의 Delft 공대의 Mooij 교수, 일본 NEC 연구소의 Nakamura 박사, Yale 대학의 Schoelkopf 교수와 Devoret 교수, 미국 표준연구소(NIST) 및 UC Santa Barbara 대학의 Martinis 교수, UC Berkeley의 Clarke 교수 등의 주도 하에 이루어져 왔다. 이러한 선도 연구 그룹들의 주요 연구 결과는 지난 10년간 지속적으로 Nature, Science 등의 과학적/사회적 영향력이 큰 저널을 중심으로 발표되면서 이 분야 실험 및 이론 연구를 주도하고 있다. 이들 선두 그룹들은 각자 고유한 조셉슨 큐비트 소자를 독자적으로 개발해서 연구해 오고 있는데, 대표적으로 쿠퍼쌍 상자 큐비트(Cooper-pair box qubit: Nakamura 박사), 초전류 자속 큐비트(flux qubit: Mooij 교수), 양자상자(Quantronium: Devoret 교수), 조셉슨 위상 큐비트(phase qubit: Martinis 교수) 등이 그 대표적인 예이다[5].

여기서 한가지 주목할 점은, 앞서 언급한 선도 그룹들이 유럽과 미국, 일본에서 각각 유럽 연합(EU), 미국 국방부(DARPA) 및 국가 보안국(NSA), 일본 문부성 등의 전략적이고도 집중적인 지원을 지속적으로 받고 있다는 것이다. 이는 조셉슨 큐비트 소자 연구가 미래 기반 산업의 토대를 구축할 뿐만 아니라

정보화된 미래의 국가 및 사회 안전망과 직결되기 때문이며, 연구의 특성상 초정밀 시료 제작과 극한 및 초고감도 측정 환경이 필수적으로 요구될 뿐 아니라, 이를 운용할 최고급의 인력을 양성하는데 장기간의 투자가 필요하기 때문으로 해석된다. 이들은 모두 10년 이상 막대한 인력과 자원을 들여서 각 분야의 실험 및 이론 분야 영역을 거의 독점적으로 연구 개발해 왔기 때문에, 단시간에 이들의 기술적 장벽을 따라잡는 것은 매우 힘든 실정이다. 기존의 기술을 답습하거나 따라가는 방식이 아닌 독자적으로 경쟁력이 있는 새로운 연구 분야를 개척하는 길만이 이들 선두 그룹과 동등하게 경쟁하면서 기술 격차를 따라잡는 연구 전략이 필수적으로 요구된다.

반도체 나노와이어, 탄소나노튜브, 그래핀, C60 bucky ball, 나노결정 등을 초전도체와 결합한 형태의 나노구조체 조셉슨 소자 연구가 본격적으로 시작된 것은 InAs 반도체 나노와이어를 이용한 초전류 트랜지스터의 개발 연구[8]를 통하여 실험 방법과 측정 방법, 기존의 중시계 이론을 이용한 데이터 해석의 접근 방법 등이 제대로 확립되었기 때문이다. 이렇게 확립된 연구 방법 및 데이터 해석 방법은 이후 다른 나노구조체들(탄소나노튜브[9], 그래핀[10], 헥세로 나노선[11], 나노결정[12] 등)에 지속적으로 응용 확장됨으로써 이 분야 연구의 기폭제가 되었다. 나노하이브리드 조셉슨 소자 연구의 의의는 단순히 나노구조체를 따라 흐르는 초전류를 관측한 것에 머물지 않고, 전기전도도 보편요동(universal conductance fluctuations)이나 전기전도도 양자화(conductance quantization), 콘도(Kondo) 효과 같은 개별 나노구조체의 중시계 양자전도 특성이 응집물질 물성인 초전도성과 결합함으로써 초전류 보편요동[8] 초전류 양자화[11] 같은 새로운 양자전도 현상을 발현시켰다는 점에 있다.

이뿐만 아니라, 전기적으로 제어 가능한 거시적 양자투과(macroscopic quantum tunneling) 현상을 그래핀을 이용한 조셉슨 소자에서 최초로 관측[13]하거나 반도체 나노선 조셉슨 소자를 써서 쿠퍼쌍 양자 얽힘(quantum entanglement) 상태를 구현하는 실험[14] 등은 게이트 조절 가능한 양자 상태의 인위적 구현을 가능하게 하고 근본 양

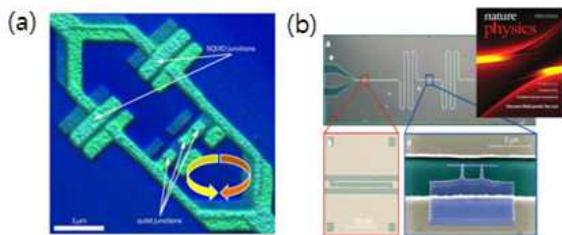


그림 2. (a) 델프트 공대의 Mooij 교수 그룹에서 제작한 초전도 양자정보소자의 전자현미경 사진 [출처: Nature (2004)] (b) Yale 대학의 Schoelkopf 교수 그룹에서 제작한 조셉슨 소자와 초전도 공진기가 서로 결합된 형태의 초전도 양자정보소자의 현미경 사진 [출처: Nature (2007)].

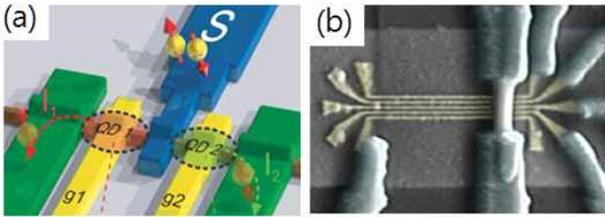


그림 3. 반도체나노선 하이브리드 조셉슨 소자를 이용한 (a) 쿠퍼쌍 양자얽힘 실험 개요도 및 (b) 마요라나 페르미온 검출 소자의 전자현미경 사진. 각각 참고논문 [14] 및 [15]에서 발췌함.

자 역학 원리중의 하나인 EPR 역설 (Einstein-Podolsky-Rosen paradox)을 검증하는 실험을 가능하게 한다는 점에서 큰 의의가 있다. 또한, 일차원 반도체 나노선 또는 위상절연 나노구조체와의 초전도 근접 효과를 이용하여 마요라나 페르미온 (Majorana fermion)을 찾기 위한 실험 [15] 등은 차세대 양자 연산 소자 실현을 위한 초석이 될 것이다.

종래의 투과형 조셉슨 큐비트 소자에 비하여 나노하이브리드 조셉슨 소자의 가장 큰 특징은 조셉슨 연계 정도(coupling strength)를 게이트 전압을 써서 자유롭게 조절 가능하게 만들 수 있다는 점이라고 말할 수 있다. 이는 마치 전계효과 트랜지스터(field-effect transistor, FET)가 전류의 흐름의 ON/OFF 상태를 조절하는 것과 유사하게 나노하이브리드 조셉슨 소자가 초전류 트랜지스터로 작동해서 초전류(supercurrent)의 ON/OFF 상태를 전기적인 방법을 써서 인위적으로 조절할 수 있음을 의미한다. 이러한 초전류의 조절 가능성(tunability)를 이용하면 조셉슨 소자로 이루어진 큐비트 소자의 양자 상태 또한 전기적인 방법으로 인위적인 제어가 가능해질 뿐 아니라, 개별 조셉슨 큐비트의 작동을 넘어서서 큐비트 사이의 조셉슨 연계 정도를 전기적으로 조절함으로써 집적화된 양자 정보소자를 만드는 것이 가능해진다. 이러한 확장 가능성 및 조절 가능성은 기존의 투과형 박막 조셉슨 소자의 경우에는 가능하지 않았다는 점에서 크게 차별화 된다고 할 수 있다.

국내의 연구 현황을 살펴보면 다음과 같다. 대면적 그래핀 합성[16], 고품위 나노막대 어레이 성장[17], 초고집적 나노커패시터 어레이 성장[18] 등의 첨단 연구 결과가 국

내의 대학 및 연구 기관에서 지속적으로 창출되는 것을 통해 알 수 있듯이 국내의 나노구조체의 합성 및 성장에 관해서는 세계적인 연구 경쟁력을 갖추고 있다. 나노구조체에서의 양자역학적인 전자 수송 특성에 관한 이론적 연구 또한 양적인 열세에도 불구하고 개별 연구자의 탁월한 연구 역량을 바탕으로 세계적인 경쟁력을 갖추고 있다[19]. 다만, 나노구조체의 양자전도 특성에 관한 실험 연구에 관해서는 KIST, 포항공대, 부산대, 한국표준과학연구원을 중심으로 주로 이루어져 왔는데, 전술한 바와 같은 유럽 및 미국의 세계적 연구 그룹들과 비교할 때 연구 경쟁력인 상대적으로 많이 취약한 것이 사실이다. 이는 중시계 소자 물리학의 실험적 기반이 취약한 데서 나타난 결과로 여겨지며, 나노 과학기술을 실리 콘 전자기술의 대체 항목으로서만 바라보는 통상의 인식 또한 어느정도 관련이 있다고 보여진다. 그럼에도 불구하고 KIST[20]와 부산대, 포항공대[21] 등에서 최근에 거둔 탁월한 연구 성과로부터 양자소자 실험 연구 분야에서도 국내의 연구 경쟁력이 앞으로 이룬 시일에 세계적인 수준으로 도약할 수 있을 것을 예상할 수 있다.

3. 결 론

앞의 국내 연구 현황에서 전술한 바와 같이 다양한 나노구조체 연구의 이론 및 재료 합성에 관해서 국내 연구 역량이 탁월함에도 불구하고 아직 세계적 수준에서 비교해 볼 때 상대적으로 취약한 부분이 나노구조체의 전자 전송 특성 및 양자 전도 현상에 관한 실험 연구임을 주목해서 볼 필요가 있다. 이에 높은가의 실험 장비 또는 극저온/고자장 환경에서 실험을 진행하는데 따른 현실적 어려움 등의 여러 가지 요인이 있을 수 있겠지만, 중시계 물리학으로 대변되는 양자 전송 실험의 기초 위에서 초정밀 측정 실험이 엄격하게 진행되어야만 비로소 세계적으로 인정받을 수 있는 연구 결과를 창출해 낼 수 있다는 실험적 특성을 가장 큰 요인으로 지적할 수 있다. 이러한 실험적 특성 때문에 이 분야에서 독립적인 연구자를 한 명 성장시키기 위해서 다른 분야에 비해 상대적으로 매우 큰 시간, 노력, 경제적 비용 투자가 필수

적으로 요구된다. 따라서 한정된 자원에서 단기간에 최대의 연구 성과를 생산해 내야 하는 국내의 연구 정책 및 환경에서 양자 전송 실험 분야의 발전이 다른 분야에 비해 지체된 것은 어쩔 수 없는 결과라고 말할 수 있다. 그러나, 지금까지 성공적으로 진행되었던 국내의 나노구조체 연구 분야를 세계적인 선두 그룹으로 확실하게 자리매김하기 위해서는 나노구조체 합성 및 이론적 연구에 그치지 않고 양자전자소자 실험 연구까지 포함하는 트로이카 체제로 나아가 할 것이다. 기존의 탁월한 이론/합성 연구 역량에 양자소자 연구 역량이 더해짐으로써 세 분야가 서로 상승 발전을 가속하는 시너지 효과를 창출해 내기 위해서는 상대적으로 취약한 양자전자소자 실험 분야를 단기간에 집중 지원할 필요가 있으며, 저자의 연구실 또한 이러한 목표에 가장 적합한 연구 주제를 가지고 효율적이고도 유기적인 연구원 구성을 통하여 국내의 연구 역량을 세계적 수준으로 발전시키는 데 일익을 담당하고자 한다.

참고문헌

[1] B. D. Josephson, Phys. Lett. 1, 251 (1962).
 [2] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/
 [3] <http://www.nist.gov/pml/history-volt/>
 [4] M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity* (New York, 2004).
 [5] J. Clarke and F. K. Wilhelm, Nature 453, 1031 (2008).
 [6] 도용주, 김진희, 물리학과 첨단기술, 10월호 21쪽 (2011).
 [7] C. W. J. Beenakker, Rev. Mod. Phys. 69, 731 (1997).
 [8] Y.-J. Doh et al., Science 309, 272 (2005).
 [9] P. Jarillo-Herrero, et al., Nature 439, 953 (2006).
 [10] H. B. Heersche, et al., Nature 446 (7131), 56-59 (2007).
 [11] J. Xiang, et al., Nature Nanotech. 1 (3), 208-213 (2006).
 [12] De Franceschi, et al., Nature

Nanotech. 5, 703-711 (2010).
 [13] G.-H. Lee, et al., Phys. Rev. Lett. 107, 146605 (2011).
 [14] L. Hofstetter, S. Csonka, J. Nygard and C. Schonenberger, Nature 461, 960 (2009)
 [15] V. Mourik et al., Science 336, 1003 (2012).
 [16] K. S. Kim et al., Nature 457, 706 (2009).
 [17] W. I. Park et al., Appl. Phys. Lett. 80, 4232 (2002).
 [18] W. Lee et al., Nature Nanotechnology 3, 402 (2008).
 [19] Y.-W. Son et al., Nature 444, 347 (2006).
 [20] H. C. Koo et al., Science 325, 1515 (2009).
 [21] D.-I. Chang et al., Nature Physics 4, 205 (2008).

저자이력



도용주(都勇周)

1987-1992년 서울대학교 물리학과 학사, 1992-2000년 포스텍 물리학과 석사/박사, 2000-2003년 서울대학교 복합 다체계물성 연구센터 Post-Doc., 2003-2005년 네덜란드 Kavli Institute of Nanoscience at TU Delft Post-Doc., 2005-2007년 미국 Harvard University 화학과/물리학과 Post-Doc., 2007-2010 포스텍 신소재공학과/물리학과 연구교수, 2010년-현재 고려대학교 세종 캠퍼스 디스플레이·반도체 물리학과 부교수.