나노구조체의 양자전도 현상

DOI: 10.3938/PhiT.20.042

도용주·김진희

Quantum Transport Phenomena in Nanostructures

Yong-Joo DOH and Jinhee KIM

Chemically-grown nanostructures provide a promising platform to study various quantum phenomena in low-dimensional systems. The high crystallinity in their structures and the high versatility in their compositions make such nano-structured materials more attractive for research in the field of mesoscopic quantum transport. Quantum confinement and quantum interference effects such as the Coulomb blockade, weak localization, universal conductance fluctuations, and Feby-Perot interference have been successfully observed in chemically-grown nanostructures such as carbon nanotubes and semiconducting nanowires. Nowadays, more sophisticated schemes of multiple-quantum dots and nanostructure/superconductor hybrid devices are being developed for the realization of quantum information devices, in which single-bit operation can be attained by manipulating quantum-mechanical entities such as the charge, the spin, and the photon.

들어가는 글

20세기 말부터 활발하게 연구되기 시작한 나노과학(Nano

저자약력

도용주 교수는 포항공과대학교 이학박사(2000)로서 서울대학교, 네덜란드 델프트 공과대학(TU Delft), 미국 Harvard 대학교 박사후 연구원, 포항공과대학교 연구조교수 등을 거쳐 2010년부터 고려대학교 세종캠퍼스 디스플레이반도체·물리학과 부교수로 재직 중이다. (yjdoh@korea.ac.kr)

김진희 박사는 포항공과대학교 이학박사(1995)로서 미국 표준과학연구소(NIST, Gaithersburg) 객원연구원을 거쳐 1997년부터 표준과학연구원에 재직 중이다. (jinhee@kriss.re.kr).

Fig. 1. Representative bottom-up nanostructures (a) C_{60} (b) carbon nanotube (c) semiconductor nanowires (d) graphene.

Science)은 상향식(bottom-up) 접근 방법으로 성장시킨 나노구조체의 발견(혹은 발명)과 밀접하게 관련되어 있다. 이러한 나노구조체의 대표적인 예로는 탄소나노튜브, 나노선(혹은 나노막대), 그래핀 등이 있는데 (Fig. 1 참조) 이들은 단결정인면서 저차원 전자계를 형성함으로써 중시계물리학의 근간이 되는 양자구속(quantum confinement)과 위상결맞음(phase coherence) 현상을 쉽게 발현한다는 특징을 갖는다. 일반적으로 차원이 낮고 결정성이 좋을수록 물질의 양자역학적 특성을 관찰하기가 쉬워진다. 이러한 양자역학적 특성을 보이는 물질의 합성으로 중시계물리학의 연구범위가 더욱 다채로워졌으며 새로운 양자전도 현상의 발견과 이를 바탕으로 한 양자정보소자(quantum information device)의 개발로 이어지고 있다.

이 분야 연구개발의 궁극적인 지향점은 원자 하나하나 수준에서 물질을 제어해서 원하는 양자역학적 특성을 갖는 물

질을 합성하고 이를 이용해서 기존의 반도체소자가 갖지 못한 새로운 기능성을 갖는 양자소자를 실현하는 것이라고 할 수 있다. 이는 실리콘 단결정의 성장과 실리콘 트랜지스터의 실현, 그리고 연이은 집적기술의 발전으로 완성된 20세기 반도체기술의 발전 모델이 21세기 양자정보소자기술에도 적용될 수 있을 것이며 중시계물리학은 그 기반을 이루는 토대가 될 것임을 의미한다. 이 글에서는 위에서 열거한 나노구조체 중에서 특히 탄소나노튜브와 나노선을 이용한 최근의 중시계 실험 결과들을 살펴보고 앞으로의 전망을 논의하고자 한다. 그래핀의 양자전도 현상에 관한 연구 결과는 앞선 글^[1]에서 매우 자세히 다루어졌으므로 이를 참조하기 바란다.

나노구조체의 양자구속 효과

나노구조체의 저차원 전자계로서의 특징이 가장 잘 드러나는 현상은 나노구조체를 이용한 양자점(quantum dot)의 단전자 터널링(single electron tunneling)이라고 말할 수 있다. 나노구조체의 전기적 특성을 조사하기 위해서 나노선 혹은 탄소나노튜브와 같은 나노구조체의 양쪽 끝에 금속 전극을 연결하게 되는데, 이때 전극과 나노구조체 접합면에 절연층(insulating layer)이 형성될 수 있다. 이러한 절연층이 충분히 얇으면(대략 2 nm 이하) 금속전극에 있는 전자가 나노구조체로 터널링(tunneling)이라는 양자역학적 현상을 통해 에너지의 손실 없이 넘어갈 수 있게 된다. 만약 나노구조체의 크기가 매우 작다면 나노구조체에 전자를 하나 더 추가로 넣는데 필요한 에너지, 즉 전기충전에너지(electrical charging energy)가 매우 커져서 뒤이어 오는 전자의 진입을 막는 쿨롱장벽효과(Coulomb blockade effect)가 나타나게 된다. 결국 나노구조체를 통해서 전기가 흐르기 위해서는 전자가 하나씩 움직일 수밖에 없게 된다. 나노구조체의 크기가 작아지면 내부 에너지 준위 자체가 불연속적인 분포를 갖는 양자점이 되게 되고 이러한 양자점에 인접한 게이트를 만들어서 전압을 인가하면 양자점 내부의 전자 수를 한 개씩 인위적으로 조절하는 것이 가능해진다. 이와 같이 양자점 내부의 전자 수를 하나씩 조절해서 전류의 개폐(on and off) 상태를 조절하는 소자를 단전자 트랜지스터(single electron transistor)라고 한다.^[2]

나노구조체를 이용한 단전자 트랜지스터는 먼저 탄소나노튜브를 이용해서 실험적으로 구현되었다. 1998년에 네덜란드 델프트(Delft) 공대의 Dekker 교수 그룹에 의해서 상온에서 작동하는 탄소나노튜브 단전자 트랜지스터가 최초로 개발^[3]되었는데 이 논문은 4000회 이상의 피인용도를 기록하면서 이후 탄소나노튜브를 이용한 나노소자 연구의 전성기를 열었다

Fig. 2. (a) A single carbon nanotube connected to two electrical leads.^[3] (b) Schematic view of the device operation of a single-electron transistor.

(Fig. 2 참조). 나노선의 경우 탄소나노튜브보다 뒤늦게 단전자 투과 현상이 보고^[4]되었는데 전하의 충전에너지가 충분히 크지 않아서 상온이 아닌 극저온에서 작동하는 경향이 있다. 하지만, 구성 물질의 조성 및 성분에 대한 선택적 성장이 용이하고 직경이나 길이를 조절하면서 성장시킬 수 있다는 독특한 장점을 갖는 나노선의 특성을 활용하여 스웨덴 룬트(Lund) 대학 연구팀은 서로 다른 밴드갭을 갖는 InAs와 InP의 헤테로구조(hetero-structure)를 갖는 나노선을 성장시킨 후 InAs 양자점 내부의 전도 전자 갯수를 극소 단위까지 조

REFERENCES

- [1] Dong-Keun KI and Hu-Jong LEE, Phys. High Tech. **18**(7/8), 9 (2009).
- [2] D. Goldhaber-Gordon, H. Shtrikman, D. Mahalu, D. Abusch-Magder, U. Meirav and M. A. Kastner, Nature **391**, 156 (1998).
- [3] S. J. Tans, A. R. M. Verschueren and C. Dekker, Nature **393**, 49 (1998).
- [4] S. De Franceschi, J. A. van Dam, E. P. A. M. Bakkers, L.-F. Feiner, L. Gurevich and L. P. Kouwenhoven, Appl. Phys. Lett. **83**, 344 (2003).
- [5] M. T. Bjork, C. Thelander, A. E. Hansen, L. E. Jensen, M. W. Larsson, L. R. Wallenberg and L. Samuelson, Nano Lett. **4**, 1621 (2004).
- [6] C. Fasth, A. Fuhrer, M. T. Bjork and L. Samuelson, Nano Lett. **5**, 1487 (2005).
- [7] Y. Hu, H. O. H. Churchill, D. J. Reilly, J. Xiang, C. M. Lieber and C. M. Marcus, Nature Nanotech. **2**, 622 (2007).

나노구조체의 위상결맞음 현상

Fig. 3. (a) SEM image of Ge/Si nanowire double quantum dot device.^[7] (b) Color plot of the conductance through InAs nanowire double quantum dot as a function of local gate voltages.^[6]

질 가능함을 실험적으로 보였다.^[5] 이후 나노선 양자점 연구는 스핀 큐비트(spin qubit)의 기본 구조인 이중 양자점(double quantum dot) 소자 연구^[6]로 옮겨가게 되어 이를 이용한 전하검출기^[7] 실험 등이 성공적으로 수행되었다(Fig. 3 참조).

나노선 양자점 소자는 기존의 이차원 전자계 양자점에 비해 주기율표 상의 매우 다양한 물질들에 대한 양자점 연구를 가능하게 함으로써 향후 이를 이용한 스핀 기반 양자정보소자의 실현 가능성을 한층 더 높이고 있다. 이는 스핀 이완 시간(spin relaxation time)이나 스핀-궤도 상호작용 인자(spin-orbit interaction parameter)^[8,9] 같은 스핀 큐비트 소자의 기본 물성을 다양한 물질의 나노구조체 양자점 실험을 통하여 탐색·비교함으로써 큐비트 소자의 성능을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 양자정보소자가 최적화된 성능을 구현할 수 있도록 나노구조체를 선택적으로 성장시키거나 양자점 사이의 결합 정도(coupling strength)를 인위적으로 조절하는 것이 비교적 수월하기 때문에 가능하다. 이에 더하여 일차원 나노구조체의 경우 초전도체 또는 자성체 전극을 갖는 하이브리드 소자^[10]의 제작이 이차원 전자계에 비해 용이하기 때문에 양자점이 초전도체 또는 자성체와 결합된 새로운 형태의 양자정보소자의 출현이 기대되고 있다.^[11,12]

양자역학적으로 전자는 입자와 파동의 성질을 동시에 갖고 있으며, 전자의 상태는 양자역학적 파동함수로 표현된다. 연못에 던져진 두 개의 돌맹이가 상호 간섭하는 주기적인 물결파를 만들어내듯이, 파동성을 갖는 전자들 사이에도 양자역학적인 간섭(interference) 현상이 나타나게 된다. 일상적인 경우에 이러한 간섭효과는 열적 요동(thermal fluctuation)이나 시료 내부의 결함 등의 요인에 의해 가리워져서 쉽게 드러나 보이지 않는다. 가까이에 위치해 있는 전자들의 파동함수 위상은 서로 엇비슷한데 그 전자들이 위상의 유사성을 유지하면서 최대한 멀리 떨어져 있을 수 있는 거리를 위상결맞음 길이(phase coherence length)라고 한다. 만일 위상결맞음 길이가 시료의 크기보다 크고 온도가 낮아서 열적 요동이 작다면 전자의 양자역학적 특성, 다시 말해 전자의 파동적 성질에 의한 양자간섭 효과를 실험적으로 관측할 수 있게 된다. 나노구조체는 결정성이 매우 좋고 저차원 구조이기에 위상결맞음 길이가 길어서 전자의 양자역학적 전도 특성을 실험하기 위한 매우 이상적인 기반(platform)이 된다.

위상간섭의 결과로 나타나는 양자전도 현상의 대표적인 예로는 약국재(weak localization; WL) 현상과 전기전도도 보편요동(universal conductance fluctuations; UCF) 등이 있다. 이들은, 양자역학적인 위상간섭 효과를 고려할 경우, 고체 내부의 전도성 전자가 불순물들과 여러 번 충돌한 후에 다시 제자리로 돌아오는 확률이 고전적인 경우보다 두 배로 증가함으로써 시료의 저항이 증가하게 되거나(WL), 서로 다른 충돌 경로를 지나온 전자들 사이의 상호 간섭 효과에 의해서 전기 전도도가 양자화 전도도 값(e^2/h , 여기서 h 는 Planck 상수, e 는 전자의 전하량) 내에서 재현 가능하게 요동치는 현상(UCF)을 가리킨다. 이들 양자간섭 현상을 관측하기 위해서는 금속 전극과 나노구조체 사이에 매우 투명한(transparent) 접합이 형성되어야 한다는 점에서 투과 장벽이 필요했던 양

REFERENCES

- [8] C. Fasth, A. Fuhrer, L. Samuelson, V. N. Golovach and D. Loss, Phys. Rev. Lett. **98**, 266801 (2007).
- [9] G. Petersen, S. Estevez Hernandez, R. Calarco, N. Demarina and T. Schapers, Phys. Rev. B **80**, 125321 (2009).
- [10] Y.-J. Doh, S. De Franceschi, E. P. A. M. Bakkers and L. Kouwenhoven, Nano Lett. **8**, 4098 (2008).
- [11] J.-D. Pillet, C. H. L. Quay, P. Morfin, C. Bena, L. Y. A. and P. Joyez, Nature Physics **6**, 965 (2010).
- [12] S. De Franceschi, L. Kouwenhoven, C. Schönenberger and W. Wernsdorfer, Nature Nanotech. **5**(10), 703 (2010).

Fig. 4. (a) Aharonov-Bohm oscillations observed in multi-walled carbon nanotube device.^[19] (b) Magnetoresistance curve obtained from $\text{In}_2\text{O}_3/\text{InO}_x$ core/shell heterostructure nanowire device. Inset: SEM image of the nanowire device.^[20]

자점의 경우와 대비된다. 실험적으로는 InAs 또는 InN 나노선을 이용해서 전기전도도 보편요동 현상^[13,14]이 측정되었고 약국재현상 또한 InAs 나노선을 이용해서 관측^[15,16]되었는데 전기전도도 보편요동 효과를 소멸시키기 위해 수십 개의 나노선을 병렬로 연결하여 그 통계적 평균(ensemble average)을 구하는 방법이 사용되었다. 이들 실험 결과로부터 나노구조체에서의 양자역학적 위상결맞음 길이를 구할 수 있는데, 앞선 실험들에서 반도체 나노선의 경우에 약 300~400 nm 정도의 값을 얻을 수 있었다. 이러한 실험 결과는 앞으로 나노구조체를 이용하여 인위적으로 조작 가능한 양자상태를 구현하기 위한 소자를 디자인하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

이외에도, 나노구조체 내부를 통과하는 전자의 파동성을 보여주는 대표적인 예로 Fabry-Perot 간섭과 Aharonov-Bohm 진동(oscillation)을 들 수 있다. 탄소나노튜브에서 처음 관찰

된 Fabry-Perot 간섭현상은 일반적으로 투과율이 높은, 즉 대부분의 전자를 투과시키고 일부만을 반사시키는 두 개의 탄소나노튜브/금속 접합 사이에 전자를 넣어주면 전자가 두 접합 사이를 오가면서 투과와 반사를 거듭하면서 주기적인 간섭무늬를 만들어내는 현상이다.^[17] 이를 관찰하기 위해서는 나노구조체 내에서 전자들이 탄성 운동(ballistic motion)을 해야 하기 때문에 충돌자유행로(mean free path)가 짧은 나노선의 경우에는 관측이 용이하지 않았으나, 최근에 이스라엘 Weizmann 연구소에서 InAs 나노선을 이용하여 성공적으로 관측한 바 있다.^[18]

도너츠나 파이프와 같이 가운데가 비어있는(수학적으로는 multiply-connected) 나노구조체 양단에 전극을 붙이고 전류를 흘리면 전자의 입장에서는 두 개의 서로 다른 경로가 가능해진다. 만약 전자와 같이 파동성을 갖는 입자를 서로 다른 두 개의 경로로 통과시키면 광학에서 잘 알려진 Young의 이중슬릿 실험에서와 같이 파동의 중첩으로 인한 간섭무늬를 볼 수 있다. 일반적으로 탄소나노튜브와 같은 도체에서는 자기장을 변화시키면서 저항을 측정하면 자기장에 따른 주기적인 저항의 변화를 볼 수 있는데 이를 Aharonov-Bohm 진동(oscillation)이라고 한다. Aharonov-Bohm 진동의 주기는 가운데 비어 있는 부분의 면적에 자기장을 곱했을 때 전자의 자속 양자(flux quantum= h/e)가 되게 하는 자기장의 크기가 된다. 계산해 보면 알 수 있지만 직경이 3 nm인 단결 탄소나노튜브의 경우 그 주기가 300 T 이상이 되어서 현재의 기술로는 실험적으로 관찰하기가 불가능에 가깝다. 지금까지 대부분의 실험결과가 직경이 10 nm 이상의 다중벽 탄소나노튜브에서 얻어졌고^[19] (Fig. 4(a) 참조) 저항 변화의 주기가 아하로노프-봄 진동인지 아니면 이와 유사한 물리 현상이지만 주기가 반($h/2e$)이 되는 AAS 진동(Altshuler-Aharonov-Spivak

REFERENCES

- [13] Y.-J. Doh, J. A. Van Dam, A. L. Roest, E. P. A. M. Bakkers, L. P. Kouwenhoven and S. De Franceschi, *Science* **309**(5732), 272 (2005).
- [14] C. Blomers, T. Schapers, T. Richter, R. Calarco, H. Luth and M. Marso, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 132101 (2008).
- [15] A. E. Hansen, M. T. Bjork, C. Fasth, C. Thelander and L. Samuelson, *Phys. Rev. B* **71**, 205328 (2005).
- [16] D. Liang, M. R. Sakr and X. P. A. Gao, *Nano Lett.* **9**, 1709 (2009).
- [17] W. Liang, M. Bockrath, D. Bozovic, J. H. Hafner, M. Tinkham and H. Park, *Nature* **411**, 665 (2001).
- [18] A. V. Kretinin, R. Popovitz-Biro, D. Mahalu and H. Shtrikman, *Nano Lett.* **10**, 3439 (2010).
- [19] A. Bachtold, C. Strunk, J.-P. Salvetat, J.-M. Bonard, L. Forro, T. Nussbaumer and C. Schönenberger, *Nature* **397**, 673 (1999).

Fig. 5. (a) Artistic illustration of an InAs nanowire contacted with two superconducting electrodes. Cover image of Nano Letters.^[10] (b) InAs nanowire SQUID with local gate electrodes to tune the Josephson coupling (bottom) or to form a quantum dot between two superconducting electrodes.^[28]

oscillation)인지 논란이 정리되지 않는 이유이기도 하다. 이런 점에서 가운데가 부도체이고 바깥이 도체인 이중접합 나노선은 Aharonov-Bohm 진동 실험에 큰 장점을 지닌다. 나노선의 직경을 키워서 진동주기를 줄일 수 있기 때문이다 (Fig. 4(b)).^[20]

나노구조체를 이용한 하이브리드 양자소자

나노구조체가 아니더라도 초전도체나 자성체는 초전도 전자쌍(또는 쿠퍼쌍) 또는 스핀 분극된 전자들 사이에 위상결맞음 현상이 존재한다. 이는 초전도 혹은 자성 질서도(order parameter)로 표현되며 그 물질의 초전도성 혹은 자성 정도를 가늠하는 잣대로 사용되기도 한다. 나노구조체의 고유한 특성인 양자 구속 혹은 양자간섭(quantum interference) 특성이 초전도체 혹은 자성체의 응집물질 물성과 결합할 때 새로운 양자전도 현상이 나타날 것으로 예상할 수 있다. 예를 들면, 이차원 전자계로 이루어진 양자점접점(quantum point contact) 구조에서 전형적으로 관측되는 전기전도도 양자화(conductance quantization)^[21]의 경우에, 양자점접점의 양쪽 끝이 초전도체 전극과 투명한 접합을 이루었을 때 흐르는 초전류 값 또한 양자화되어 흘러간다는 이론적 예측^[22]이 그러

하다.

나노구조체-초전도체 하이브리드 접합에 관한 초기의 연구 결과는 주로 탄소나노튜브를 사용한 실험 결과들이었다.^[23,24] 초전도 근접효과(superconducting proximity effect)에 의하면 초전도체 전극과 마주하고 있는 탄소나노튜브가 초전도성을 갖게 되고, 이에 의해 두 초전도체 사이에서 탄소나노튜브를 가로질러 쿠퍼쌍들의 흐름 혹은 초전류가 흐를 수 있을 것이라고 예상되었지만 당시에 실험적으로 이러한 초전류를 관측하지는 못하였다. 스위스 바젤(Basel) 대학 연구팀이 탄소나노튜브-초전도체 접합에서 초전도 근접 효과의 결과로서 나타나는 다중 안드레이 반사효과(multiple Andreev reflection) 현상을 분명하게 관측^[24]하였음에도 초전류의 실험적 증거는 요원하였다. 이후 네덜란드 델프트 공과대학에서 InAs 나노선을 이용한 실험에서 성공적으로 초전류를 관측^[13]한 이후에 동일한 실험적 기법으로 탄소나노튜브-초전도체 접합에서 마찬가지로 초전류를 관측^[25]할 수 있었다. 이후 그래핀-초전도체 접합^[26] 및 나노구조체-초전도체 양자간섭소자^[27,28] 실험 등이 연이어서 성공적으로 수행됨으로써 비로소 나노구조체-초전도체 하이브리드 접합 연구가 본격적으로 시작되게 되었다.

이러한 나노구조체-초전도체 하이브리드 접합 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

REFERENCES

- [20] M. Jung, J. S. Lee, W. Song, Y. H. Kim, S. D. Lee, N. Kim, J. Park, M.-S. Choi, S. Katsumoto, H. Lee and J. Kim, Nano Lett. **8**, 3189 (2008).
- [21] B. J. van Wees, H. van Houten, C. W. J. Beenakker, J. G. Williamson, L. P. Kouwenhoven, D. van der Marel and C. T. Foxon, Phys. Rev. Lett. **60**, 848 (1988).
- [22] C. W. J. Beenakker, Rev. Mod. Phys. **69**, 731 (1997).
- [23] A. F. Morpurgo, J. Kong, C. M. Marcus and H. Dai, Gate-controlled superconducting proximity effect in carbon nanotubes **286**, 263 (1999).
- [24] M. R. Buitelaar, W. Belzig, T. Nussbaumer, B. Babic, C. Bruder and C. Schönenberger, Phys. Rev. Lett. **91**, 057005 (2003).
- [25] P. Jarillo-Herrero, J. A. van Dam and L. P. Kouwenhoven, Nature **439**, 953 (2006).
- [26] H. B. Heersche, P. Jarillo-Herrero, J. B. Oostinga, L. M. K. Vandersypen and A. F. Morpurgo, Nature **446**(7131), 56 (2007).
- [27] J. P. Cleuziou, W. Wernsdorfer, V. Bouchiat, T. Ondaçuhu and M. Monthieux, Nature Nanotech. **1**(1), 53 (2006).
- [28] J. A. van Dam, Y. V. Nazarov, E. P. A. M. Bakkers, S. De Franceschi and L. P. Kouwenhoven, Nature **442**, 667 (2006).

Fig. 6. (a) Energy level diagram for a proposed Josephson light-emitting diode.^[33] (b) Schematic view of a proposed Majorana fermion detector. One-dimensional semiconductor nanowire with strong spin-orbit Rashba interaction is embedded into a superconducting quantum interference device.^[35]

초전류 보편요동^[13] 혹은 초전류 양자화,^[29] 안드레이 반사효과^[30] 같은 새로운 양자전도 현상을 발견시켰다는 점에 있다. 이와 같은 특성을 활용한다면 인위적으로 전자 혹은 쿠퍼쌍의 양자상태를 전기적으로 제어하는 것도 가능할 것으로 전망된다.^[28]

나노구조체를 이용한 중시계 연구의 최근 동향은 지금까지의 하이브리드 접합 특성 연구에서 더 나아가서 본격적인 양자정보소자를 구현하기 위한 심도깊은 연구들이 동시 다발적으로 진행되고 있다. 전기적으로 제어 가능한 거시적 양자투과(macroscopic quantum tunneling) 현상을 관측^[31]하거나 쿠퍼쌍을 이용한 얽힘(entanglement) 상태^[32]의 구현을 통해 EPR 역설(Einstein-Podolsky-Rosen paradox)을 검증하는 실험 또는 나노구조체에 주입된 쿠퍼쌍을 광자로 전이하여 응집상 큐비트(solid-state qubit)를 광학상 큐비트(photonic qubit)으로 전환하기 위한 조셉슨 발광소자(Josephson light emitting diode)를 구현하려는 이론적 제안^[33](Fig. 6(a) 참조) 등이 그러하다. 이에 더하여 최근에 등장한 위상절연체의 나노구조체의 자기저항 측정을 통해 Aharonov-Bohm 진동을 관측^[34]하거나, 일차원 나노선-초전도체 접합을 이용하여 마요라나 페르미온(Majorana fermion)을 찾기 위한 다양한 이론적 제안^[35](Fig. 6(b) 참조)들은 앞으로의 중시계 연구방향을 총

체적으로 뒤흔들 만한 잠재력을 갖고 있는 것으로 보여진다. 또한, 나노역학적으로 공진기(resonator) 구실을 하는 나노구조체의 특성과 중시계 전도 특성을 조합함으로써 개별 전자의 투과 현상에 따라 나노구조체의 공진 특성을 조절하는 연구^[36] 또한 새로운 종류의 양자정보소자의 출현을 앞당길 전망이다. 이러한 최첨단의 연구가 가능한 데에는 무엇보다도 최근의 비약적인 반도체 기술 발전과 이에 따른 하향식(top-down) 공정기술의 발전이 화학적 성장에 기반한 상향식(bottom-up) 나노합성기술의 발전과 잘 어우러진 결과라고 할 수 있을 것이다.

마치는 글

나노구조체를 이용한 나노 과학이 급속도로 성장할 수 있었던 배경에는 실리콘에 기초한 기존 반도체 메모리 기술이 한계점에 머잖아 도래할 것이라는 인식 때문이었다. 나노구조체가 갖고 있는 저차원 양자계라는 본질적 특성을 이용한다면 궁극적으로는 단일 전하, 단일 스핀, 단일 광자 등의 단일 양자들을 정보의 전달 및 처리, 저장 등에 이용할 수 있을 것이다. 그 동안 국내 연구진의 각고의 노력 끝에 나노소재 합성 및 나노소자의 이론 및 실험 연구에 관한 국제적인 연구 성과들이 속속 발표되고 있는 바, 나노구조체를 이용한 양자소자 연구에 지속적인 관심과 지원이 가일층 배가된다면 기존의 나노소재·소자와 관련한 국내의 국제적인 연구 역량과 더불어 탁월한 시너지 효과를 거둘 수 있으리라 전망된다.

REFERENCES

- [29] J. Xiang, A. Vidan, M. Tinkham, R. M. Westervelt and C. M. Lieber, *Nature Nanotech.* **1**(3), 208 (2006).
- [30] A. Eichler, M. Weiss, S. Oberholzer, C. Schönenberger, A. Levy Yeyati, J. C. Cuevas and A. Martin-Rodero, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 126602 (2007).
- [31] G.-H. Lee, D. Jeong, J.-H. Choi, Y.-J. Doh and H.-J. Lee, accepted in *Phys. Rev. Lett.* (2011); cond-mat/1109.0110.
- [32] L. Hofstetter, S. Csonka, J. Nygard and C. Schönenberger, *Nature* **461**, 960 (2009).
- [33] P. Recher, Y. V. Nazarov and L. P. Kouwenhoven, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 156802 (2010).
- [34] H. Peng, K. Lai, D. Kong, S. Meister, Y. Chen, X.-L. Qi, S.-C. Zhang, Z.-X. Shen and Y. Cui, *Nature Materials* **9**, 225 (2010).
- [35] R. M. Lutchyn, J. D. Sau and S. Das Sarma, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 077001 (2010).
- [36] G. A. Steele, A. K. Huttel, B. Witkamp, M. Poot, H. B. Meerwaldt, L. P. Kouwenhoven and H. S. J. van der Zant, *Science* **325**, 1103 (2009).