반도체 나노선의 광학적 응용

DOI: 10.3938/PhiT.20.038

박 홍 규

Nanophotonic Devices Using Semiconductor Nanowires

Hong-Gyu PARK

Semiconductor nanowires are promising building blocks for nanophotonic integrated circuits. I introduce recent progress in nanowire lasers, plasmonic nanowire devices, and nonlinear mixing in nanowires.

들어가는 글

나노 기술은 미래 산업의 기반으로 매우 중요한 가치를 지닌다. 현재 전 세계적으로 나노 기술을 응용한 다양한 실험들이 수행되고 있으며, 다양한 기능을 가진 나노 소자들이 활발히 개발되고 있다. 다양한 나노 구조체 중에서도 특히 반도체 나노선은 top-down 방식이 아닌 bottom-up 방식으로 합성되므로, 대량 생산의 가능성 그리고 낮은 생산 가격 등에서 큰 주목을 받고 있다.^[1] 반도체 나노선의 우수한 전기적인 특성을 이용하여 고효율 나노 트랜지스터를 제작할 수 있고, 이는 고성능 나노 컴퓨터, 민감한 세포 검출기 등에 응용이 가능하다. 최근에는 반도체 나노선의 전기적인 특성과 더불어 광학적인 특성 연구가 활발히 진행되고 있는데, 전자 대신 빛을 이용함으로써 정보의 전달 속도를 매우 증가시킬 수 있다. 특히 광소자의 효율과 속도는 크기가 작아지면 작아질수록 더욱 개선되기 때문에 반도체 나노선을 이용함으로써 뛰어난 성능의 나노 광소자 구현을 기대할 수 있다. 현재 낮은 문턱의 나노선 레이저, 다양한 색깔의 나노선 LED 등이 성공적으로 제작되고 있다.

반도체 나노선의 합성

반도체 나노선은 bottom-up 방식으로 합성되므로 나노선의 정확한 크기와 길이 조절은 나노선의 특성을 이해하는 데, 그리

Fig. 1. SEM image of a single silicon nanowire. Scale bar is 1 micron. Right, as-grown silicon nanowires.

고 많은 양의 나노선 소자들을 안정적으로 제작하는 데 중요한 요소이다. 나노선의 안정적인 합성 방법 중에 촉매를 이용한 VLS 방법(vapor-liquid-solid)이 가장 널리 알려져 있고, 이 방법을 이용하여 단일 결정의 다양한 반도체 나노선들이 합성될 수 있다. 그림 1은 VLS 방식으로 합성된 실리콘 나노선의 전자현미경 사진을 보여준다. IV족의 Si, Ge 나노선뿐 아니라 III-V족이나 II-VI족의 직접 밴드갭을 가진 화합물 반도체 나노선의 합성 또한 가능하므로 빛을 방출하는 능동 광소자가 손쉽게 제작될 수 있다. 예를 들어 CdS 나노선의 합성시에는 CdS 단일 소스 프리커서가 사용되는데, 이 단일 소스 프리커서는 반응로의 온도가 올라가면 분해되기 시작하여 Au 나노 촉매와 함께 Cd-S-Au의 액체 화합물을 이루게 된다. 반응로에서 과포화 상태가 이루어지면서 나노선의 결정화와 나노선의 성장이 이루어진다.^[2]

보다 복잡한 나노선 구조 또한 CVD(chemical vapor deposition) 반응을 통해 성장이 가능하다. 예를 들어 나노선의 반경을 따라 겹겹이 다른 물질의 층으로 이루어진 core-shell 나노선 헤테로 구조(heterostructure) 또한 합성할 수 있는데, core-shell 나노선의 합성은 각각의 shell에 대한 프리커서의 종류를 바꾸고 성장 온도와 압력을 조절함으로써 이루어진다.^[3] Shell의 두께는 증착 시간에 따라 조절된다. 복잡한 나노선 구조의 성장 과정을 정확히 이해하고 성장되어진 나

저자약력

박홍규 교수는 2004년 KAIST 물리학과에서 박사학위를 받고 2005년부터 2007년까지 하버드 대학교 화학과에서 박사후 연구원으로 재직하였다. 그 후 2007년 가을부터 고려대학교 물리학과에서 교수로 재직하고 있으며 2009년에는 극미세 나노선 광소자 창의연구단 단장으로 선정되었다. (hgpark@korea.ac.kr)

REFERENCES

- [1] C. M. Lieber, MRS Bull. **28**, 486 (2003).
- [2] C. J. Barrelet, Y. Wu, D. C. Bell and C. M. Lieber, J. Am. Chem. Soc. **125**, 11498 (2003).
- [3] F. Qian, Y. Li, S. Gradecak, H.-G. Park, Y. Dong, Y. Ding, Z. L. Wang and C. M. Lieber, Nat. Mater. **7**, 701 (2008).

노선의 화학적인 성분을 자세히 분석하기 위해서 다양한 분석 장비가 이용된다. 일반적으로 투과전자현미경(TEM)이나 에너지 분산 X-ray 분석 시스템(EDS)을 포함한 주사투과전자현미경(STEM)과 같은 마이크로 분석이 수행된다.

반도체 나노선 레이저

III-V족이나 II-VI족의 직접 밴드갭 발광 반도체를 이용하여 합성된 나노선들은 레이저로서 동작할 수 있다. 매우 작은 나노선 자체가 개별적인 레이저가 되므로 고밀도 광집적회로에 적합한 광원이 된다. 게다가 단순히 나노선을 합성하고 원하는 기판 위에 이들을 뿌리기만 하면 되므로 나노 레이저의 대량 생산이 싼 값으로 가능해진다.^[1]

반도체 나노선 레이저는 일반적으로 나노선 양쪽 끝의 매끈한 끝단이 거울 역할을 하여 나노선의 내부에 빛을 가두는 Fabry-Perot 형태의 공진기이다. 나노선의 굴절율과 외부 공기의 굴절율 차이에 의해 반사율이 생기고 이를 통하여 나노선에서 방출되는 빛이 내부에 갇힐 수 있다. 그림 2는 상온에서 광펌핑으로 동작하는 GaN 나노선 레이저를 보여준다.^[4] GaN 나노선의 굴절율이 약 2.5이므로 삼각형의 깨끗한 단면이 약 20%의 반사율로 거울 역할을 할 수 있다. 나노선 전체가 광펌핑되어 처음에는 나노선의 전면에서 자발방출이 일어나다가, 펌핑 세기를 점차로 증가시키에 따라 유도 방출이 발생되어 나노선의 양 끝단에서 집중적으로 레이저 빛이 방출됨을 그림 2B에서 확인할 수 있다. 이 레이저의 경우 약 100 kW/cm^2 의 문턱값을 가지고 나노선 레이저가 동작하였다. 반면 나노선 전체가 발광 물질이 아닌, 나노선 지름 방향으로 양자 우물 층을 삽입한 발전된 형태의 나노선 레이저의 개발 또한 가능하다.^[3] 이 구조 역시 광펌핑에 의해 레이저가 발진되는데, 펌핑에 의해 발생된 carrier들은 양자 우물 층에서 높은 양자 효율을 가지고 결합된다.

나노선 레이저의 산업적인 응용성이 더욱 탄력을 받기 위해서는 상온 연속 발진이 요구된다. 이를 위해서 나노선 레이저의 문턱값을 더욱 낮추는 것이 필요한데, 먼저 반도체 나노선의 광학적 특징을 잘 이해할 수 있어야 한다. 나노선에서 나타나는 광학 모드의 특성, 나노선에서 나오는 방출 특성, 면장의 특성 등의 연구는 3차원 FDTD(finite-difference time-domain, 유한차분시간영역 전산모사) 계산을 통하여 정밀하게 조사될 수 있다. 특히 레이저의 문턱값을 낮추는 데 있어서 공진기의 품질값과 confinement factor를 높이는 것이 중요하데, 예를 들어 나노선의 바깥쪽에 전기장이 분포하는 형태에서 높은 품질값과 높은 confinement factor를 얻을 수 있다.^[5] 이는 양자 우물층이 바깥 껍질 쪽에 위치한다면 나노

Fig. 2. (A) SEM images of a GaN nanowire with a triangular cross section.^[4] (B) Above-threshold photoluminescence image of a GaN nanowire.^[4]

선 공진기 모드와 자발 방출된 빛이 매우 잘 결합할 수 있고 문턱값 또한 낮아질 수 있음을 의미한다. 이처럼 FDTD 계산을 통하여 나노선 공진기의 많은 광학적인 정보를 얻을 수 있으므로 다양한 나노선 구조에서 정량적인 계산이 요구된다.

플라즈모닉 나노선 레이저

레이저의 크기가 작아질수록 문턱값을 비롯한 레이저의 동작 특성이 좋아질 뿐 아니라 새로운 물리 현상을 관측할 가능성도 커진다. 그러나 나노선 레이저를 비롯한 많은 나노 레이저들의 크기는 빛의 파장 정도로, 이미 레이저가 가질 수 있는 물리적인 한계에 다다랐다고 할 수 있다. 레이저의 크기를 빛의 파장보다 더 작게 줄이기 위해서 최근 표면 플라즈몬을 이용하는 새로운 형태의 공진기가 활발히 연구되고 있다. 표면 플라즈몬은 빛을 가두는 것이 아니라 빛이 표면을 따라 전파하는 형태이므로 레이저의 크기를 파장보다 더 작게 만들 수 있게 되는 것이다.

표면 플라즈몬을 이용한 플라즈모닉 공진기/레이저 연구는 매우 활발하여 최근 한두 해 동안 광학 분야의 큰 화두 중 하나였다. 그 중 미국 버클리 대학의 Xiang Zhang 교수가 이끄는 연구팀에서는 은(Ag) 표면 위에 CdS 나노선을 올려놓고 광펌핑을 통해 플라즈모닉 레이저를 구현하였다(그림 3A).^[6] 이득 물질인 CdS 나노선에서 방출되는 빛이 나노선과 은 표면 사이에서 나타나는 표면 플라즈몬 모드를 따라 나노선의 양

REFERENCES

- [4] S. Gradecak, F. Qian, Y. Li, H.-G. Park and C. M. Lieber, Appl. Phys. Lett. **87**, 173111 (2005).
- [5] M.-K. Seo, J.-K. Yang, K.-Y. Jeong, H.-G. Park, F. Qian, H.-S. Ee, Y.-S. No and Y.-H. Lee, Nano Lett. **8**, 4534 (2008).
- [6] R. F. Oulton, V. J. Sorger, T. Zentgraf, R.-M. Ma, C. Gladden, L. Dai, G. Bartal and Xiang Zhang, Nature **461**, 629 (2009).

Fig. 3. (A) The plasmonic laser consists of a CdS semiconductor nanowire on top of a silver substrate, separated by a nanometre-scale MgF_2 layer. The inset shows a SEM image of a typical plasmonic laser.^[6] (B) Schematic diagram of the nano-disk/nanopillar structure. The top of the InP disk is bonded to a transparent glass substrate, and the bottom and sidewall of the disk are coated with silver.^[7] (C) Schematic illustration of the plasmonic cavity based on a metal-coated dielectric nanowire with an axial heterostructure.^[8]

끝단 사이를 왕복하면서 증폭되는 것이다. 이러한 플라즈모닉 나노선 레이저는 나노선의 축과 수직인 단면상에서 레이저의 2차원 모드 크기가 파장 제곱의 약 400분의 1로, 파장의 한계를 극복한 나노선 레이저로 인정받고 있다. 그러나 여전히 나노선의 축 방향으로서는 모드의 크기가 나노선의 길이와 비슷하여 전체 모드 크기는 파장에 비하여 훨씬 크다. 3차원적으로 파장보다 작은 표면 플라즈몬 레이저를 구현하기 위해서는 고려해야 할 사항이 더욱 많아진다. 보다 최근에 본 연구실에서는 반도체 나노 디스크와 은 나노판 구조를 결합시킨 3차원 플라즈모닉 레이저를 발표하였다 (그림 3B).^[7] 이 플라즈모닉 공진기의 품질값은 8 K에서 4200 이상으로 매우 높고, 모드의 부피는 $0.56(\lambda/2n)^3$ 으로써 파장보다 작은 부피를 갖는다.

게다가 이 레이저의 온도 특성을 실험적으로 분석함으로써 레이저의 발진 메커니즘이 표면 플라즈몬에 의한 것임을 명확히 규명하여 표면 플라즈몬 현상을 보다 자세히 이해할 수 있었다. 회절한계를 뛰어넘은 이러한 레이저들은 초소형의 고집적 광회로 내에서 우수한 광원으로써 동작할 수 있을 뿐 아니라 다른 극미세 광소자와도 손쉽게 결합될 수 있을 것이다.

플라즈모닉 레이저는 빛을 가두는 원리가 기존의 레이저와 다르므로 레이저 발진 여부를 판단하기 위해서 일반적으로 FDTD 계산을 통한 이론적인 연구가 함께 수행된다. 플라즈모닉 구조는 금속을 포함하고 있으므로 높은 분해능의 계산이 요구된다. 본 연구실에서는 플라즈모닉 레이저의 크기와 광학적 특성의 한계를 조사하기 위하여 그림 3C와 같은 나노선과 금속이 결합된 플라즈모닉 공진기에서 FDTD 계산을 수행하였다.^[8] 이는 반도체 나노선을 기반으로 한 플라즈모닉 공진기라는 측면과 3차원 형태의 보다 강력한 구속이 가능한 공진기라는 점에서 주목을 받고 있다. 그림 3C에서 보듯이 가운데의 반도체 나노선을 중심으로 그 주변을 금속이 둘러싸고 있는데, 중심부의 살짝 두꺼운 부분이 플라즈모닉 공진기의 역할을 하고 있다. 공진기의 부피는 $50 \times 50 \times 40 \text{ nm}^3$ 로서 지금까지 보고된 어떤 형태의 공진기보다도 크기가 작을 뿐더러, 이 공진기 안에서 여기된 표면 플라즈몬 모드들의 품위값은 20 K의 온도에서 최고 38000의 값을 갖는다. 이 공진기 구조를 이용한 전기로 구동되는 플라즈모닉 레이저가 현재 연구 중에 있다.

비선형성을 이용한 나노선 광소자

빛으로만 구동되는 광컴퓨터의 구현은 계산 속도를 극대화할 수 있다는 점에 있어서 많은 주목을 받고 있다. 이를 위해서 광원 및 광도파로 등의 광소자뿐 아니라 빛으로만 동작하는 all-optical 스위치 또한 필수적으로 개발되어야 하는데, 광컴퓨터는 이들 나노 광소자들이 결합된 집합체라 할 수 있다. All-optical 스위치는 기존의 전기 스위치에 비해 많은 장점을 갖는다. 빛의 속도로 구동되므로 rise-time이 빠를 뿐 아니라 RC 딜레이 문제가 없고, 신호의 전달을 방해하는 cross-talk 문제가 없다. 따라서 양자 정보 프로세스 등에 응용 가능성이 크다. 많은 경우 이 all-optical 스위치는 물질의

REFERENCES

- [7] S.-H. Kwon, J.-H. Kang, C. Seassal, S.-K. Kim, P. Regreny, Y.-H. Lee, C. M. Lieber and H.-G. Park, Nano Lett. **10**, 3679 (2010).
- [8] M.-K. Seo, S.-H. Kwon, H.-S. Ee and H.-G. Park, Nano Lett. **9**, 4078 (2009).

비선형성을 이용하여 구현이 된다. 입사하는 신호와는 다른 파장의 빛이 비선형성으로 인해 생성되므로 이를 이용하여 스위칭을 하는 것이다. 물질의 비선형성으로 생성되는 빛은 광도파로에서 생성되고 이동할 수 있어야 광회로 내에서 효율적으로 이용할 수 있다. 이러한 측면에서 현재는 실리콘 광도파로 내에서 발생하는 비선형성 빛에 대한 연구들이 주를 이루고 있다. 하지만 실리콘은 등방성(centrosymmetric) 물질이고 따라서 비선형 3차 조화파를 이용하게 되는데, 이렇게 되면 비선형 변환 효율이 떨어져 매우 큰 파워의 빛으로만 비선형성을 일으킬 수 있다는 단점이 생긴다.

최근 본 연구실에서는 비선형성을 갖는 CdS 반도체 나노선을 이용하여 all-optical 스위치를 성공적으로 구현하였다. CdS 물질은 비등방성(noncentrosymmetric) 물질이어서 물질 자체의 비선형성이 클 뿐 아니라, 나노선은 top-down 타입의 광소자들과의 결합이 용이하기 때문에 기존의 광도파로와도 쉽게 결합될 수 있다. 또한 비선형 빛은 결맞음 조건이 만족되어야만 강하게 생성되는데, 나노선의 경우 지름이 파장보다 훨씬 작아지면 결맞음 조건이 자동적으로 충족되기 때문에 이를 위한 추가적인 구조를 제작할 필요가 없어진다. 그림 4에서 나노선을 이용하여 비선형 빛을 생성할 수 있는 광도파로 구조의 개념도를 보여준다. 실제로 이 광도파로의 한 쪽 끝에 파장이 1064 nm인 빛을 집어넣으면서 반대쪽으로 나오는 신호를 측정할 결과, 넣어준 빛의 두 배의 진동수를 갖는 532 nm 파장의 비선형 2차 조화파가 생성되었다. 다음 실험으로 광도파로의 한 쪽 끝에 파장 532 nm인 빛과 1550 nm인 빛을 동시에 입사시키면서 반대쪽으로 나오는 신호를 살펴보면, 두 빛의 진동수의 차에 해당하는 진동수를 갖는 810 nm 파장의 빛이 검출되었다. 또한, 1550 nm 빛을 켜고 끄에 따라 810 nm 빛의 검출 여부가 달라지는 것이 확인되었다. 즉, 파장보다 작은 나노선 광도파로에서 하나의 빛을 사용해 다른 파장의 빛을 제어하는 것이 가능하다는 사실이 실험적으로 확인된 것이다.

나노선을 이용한 비선형 실험은 비선형 구조의 크기가 매우 작고 결맞음 구조가 따로 필요없다는 측면에서 향후 응용 가능성이 매우 높다. 나노선 구조에서 결맞음이 얼마만큼 만족되는지 또 이를 통하여 비선형 빛이 얼마나 강하게 나오는지를 판별할 수 있는 파라미터가 결맞음 길이이다. 비선형 빛은 이 결맞음 길이가 길수록 비선형 물질을 통과하면서 계속 증폭될 수 있으므로, 결맞음 길이가 길수록 더 좋은 비선형 시스템이라 할 수 있다. 이러한 점을 이론적으로 검증하기 위하여 그리고 결맞음 길이를 이론적으로 예측하기 위하여 3차원 FDTD 방법을 사용해 분석할 수 있고, 계산 결과는 실험에서 관측한 결과와 매우 잘 일치함을 확인하였다. 실험에서 관측된 비선형 2차 조화파의 경우, 나노선의 지름이 80 nm

Fig. 4. Schematic of the second harmonic generation process where CdS provides the nonlinear medium. The injected light from the PMMA tapered waveguide (ω) is converted into second harmonic signal (2ω) by the CdS nanowire that is collected using tapered lensed fiber. Figure taken from [9].

정도로 파장에 비해 훨씬 작기 때문에, 파장이 1064 nm인 빛과 532 nm인 빛 사이의 결맞음 길이가 약 42 μm 로 매우 길어져서, 효율적으로 비선형 빛이 생성됨을 알 수 있다.

맺는글

세계적으로 많은 연구 그룹들이 반도체 나노선의 실제적인 광학적 응용을 위해 활발히 연구를 진행하고 있다. 앞서 언급한 분야에서 뿐 아니라, 나노선 태양 전지 혹은 나노선을 이용한 광집적 회로의 구현에 대한 연구 또한 큰 주목을 받고 있다. 나노선 태양 전지의 경우 2차원 태양전지에 비해 훨씬 더 적은 양의 반도체 물질을 사용하여 태양전지를 제작하는 것이 가능하며, 지름 방향으로 다층 구조를 갖기 때문에 생성된 전기를 훨씬 효율적으로 모으는 것이 가능하다.^[10] 게다가 나노선 태양 전지는 크기가 매우 작아서 미래의 광집적 회로에 내장되어 에너지를 공급할 수 있을 것이다. 이와 더불어 반도체 나노선을 광도파로의 내부 광원으로 사용하면, 기존의 나노 광소자들을 높은 효율로 결합할 수 있고 따라서 높은 집적도의 광회로를 꾸미는 것도 가능하다.^[11]

이처럼 반도체 나노선을 기반으로 하는 혁신적인 기술들은 과학 기술의 전반적인 측면에서 큰 영향을 끼치고 있으며, 앞으로 에너지-바이오 분야를 중심으로 이들을 이용한 더욱 효율적이고 새로운 기술이 개발될 것으로 기대한다.

REFERENCES

- [9] C. J. Barrelet, H.-S. Ee, S.-H. Kwon and H.-G. Park, Nano Lett. **11**, 3022 (2011).
- [10] B. Tian, X. Zheng, T. J. Kempa, Y. Fang, N. Yu, G. Yu, J. Huang and C. M. Lieber, Nature **449**, 885 (2007).
- [11] H.-G. Park, C. J. Barrelet, Y. Wu, B. Tian, F. Qian and C. M. Lieber, Nat. Photonics **2**, 622 (2008).