들어가는 글: 반도체 기술과 반도체 물리학

DOI: 10.3938/PhiT.23.036

노 삼 규

Introduction: Semiconductor Technology and Semiconductor Physics

Sam Kyu NOH

The mobile phone and the internet, great works that combine computer technology with optical communication, are based on semiconductor science and technology, and have led to the present modern civilization. This article deals with the question, "Will the progress in semiconductor science and technology continue in the future?" A brief introduction is followed by five articles on emerging science and technology:

1. Looking Forward on the Physics of Low-dimensional Crystal Heterostructures,
2. Photon Information Processing,
3. Quantum Computing,
4. Terahertz Photonics, and
5. Breakthroughs in Bio-physics: A Combination of Experiments and Theory.

현대 과학기술이 이룩한 수많은 업적 중 우리에게 가장 친숙한 고안물은 우리의 일상생활을 송두리째 바꾸어 놓은 핸드폰(mobile phone)과 인터넷(world wide web)이라는 데에는 어느 누구도 이견이 없을 것이다. 우리의 호주머니와 안방을 독차지하고 있는 핸드폰과 인터넷은 지난 수십 년간 축적된 컴퓨터와 광통신 기술의 결정체로서, 이것들을 가능하게 한 보이지 않는 배경에는 지난 60여 년간 끊임없이 진보를 거듭해 온

반도체 과학과 기술이 있었다.

3년 후 2017년은 현대 과학기술의 기폭제가 되었던 반도체 트랜지스터가 탄생한 지 70주년이 되는 해이다. 본 소고에서는 “거의 70년 동안 끝을 모르고 성장 가도를 달려온 반도체 과학과 기술이 과연 앞으로도 그 발전을 계속할 수 있을 것인가”라는 주제를 생각해 보고자 한다. 반도체란 말 그대로 “반도전성 기능”을 가지는 소재나 소자로서, 반도체 물리학은 앞으로도 미지의 소재나 소자를 탐구 내지는 구현하는 개척자적 역할을 계속할 것임에는 틀림없어 보인다. 그렇다면 10년 후의 반도체는 과연 어떤 것일까? 10년 후의 그것이 구체적으로 무엇인가를 예측하는 일은 매우 어려운 일이지만, 지난 반세기 이상 반도체가 걸어온 길을 재조명해 봄으로써, 앞으로 반도체 물리학은 어떤 주제의 연구를 다루게 될 것인가를 전망해 보고자 한다.

지금까지 반도체는 “기술”과 “물리학”이라는 2개의 상호보완적 축을 가지고 발전해 왔다. 반도체 물질계는 크게 실리콘(silicon, Si)계와 비실리콘(non-Si)계로 구분할 수가 있는데, Si계가 초기 트랜지스터에서 출발하여 현재의 초고집적-초미세소자에 이르기까지 반도체의 “기술을 주도(technology-drive)”해 왔다면 non-Si계의 대명사인 화합물반도체는 이종구조(heterostructure)에서 발견한 저차원(low dimension)계 고유의 물리현상의 탐구와 이에 기초한 양자소자의 구현을 통하여 반도체 분야의 “물리학을 선도(physics-drive)”해 왔다고 평가할 수 있다. 바꾸어 표현하면, Si가 반도체 기반의 현대기술 산업을 창출한 주역이라면, 화합물반도체는 새로운 물리학 분야를 개척해 온 선구자라고 말할 수 있다.

“반도체 기술”을 지금의 첨단기술로 도약시킨 결정적인 두 가지 사건은 Si 소재와 MOSFET 소자의 도입이다. MOSFET 소자는 종래의 3차원적 접합소자를 평면공정(planar technology)에 기초한 현대적 집적회로(IC)로 도약시킨 대들보이고, Si의 산화물인 SiO₂는 묘화기술(lithography)의 초미세화를 가능하게 해 준 숨어 있는 주춧돌이다. 이들 기술에 기반한 기억소자(memory device) 및 마이크로프로세서(microprocessor)의 초고집적화-초미세화는 현대적 IC의 대량생산의 길을 열어줌

저자약력

노삼규 박사는 연세대학교 물리학과를 졸업하고 동 대학원에서 이학박사 학위를 받았으며, 1989년부터 한국표준과학연구원에 재직하고 있다. 브라운 대학교, 이화학연구소, 미시간대학교, 캘리포니아주립대학교에서 연구하였으며, 한국물리학회 반도체분과 위원장, ICPS, ISPSA 등 국제반도체학술대회 조직(부)위원장, GRL 협의회 회장 등을 지냈다. 현재 한국진공학회 회장을 맡고 있다. (sknoh@kriss.re.kr)

Fig. 1. Profiles of 3D-bulk and low-dimensional structures (2D-QW, 1D-QWi, 0D-QD) and the density of states plotted as a function of energy.

로서 현대문명의 대명사인 컴퓨터와 이를 통한 인터넷의 급속한 발전을 이끌어 왔다.

“반도체 물리학”을 선도한 화합물반도체가 이론 가장 뛰어난 업적은 저차원 계의 발견이다. 그림 1은 3차원(3D) 및 저차원 (2D, 1D, 0D)계의 구조와 이에 대응하는 계의 상태밀도(density of states, DOS)를 에너지의 함수로 나타낸 그래프이다. 차원에 따라 계의 DOS는 전혀 다른 함수꼴을 가짐을 알 수 있는데, 이것은 저차원 계는 3D계와는 전혀 다른 고유의 특성을 가짐을 암시하고 있다. 화합물반도체 조작기술의 발달에 힘입어, 3D 벌크(bulk) 소재/소자는 저차원의 양자우물(2D-QW), 양자선(1D-QWi), 양자점(0D-QD)으로 진화해 왔는데, 2차원 전자계(2DEG)에서 발견된 양자 Hall 현상이나 신개념의 초격자 구조(superlattice structure)는 반도체 양자물리학이라는 새로운 장을 열어준 이정표적 업적이다. 특히, 양자구조에 기초한 반도체 레이저다이오드(LD)는 광통신과 디지털디스크(CD/DVD)의 광원으로서 통신의 고속화와 정보기록(information writing)의 대용량화에 결정적으로 기여하였고, 최근 발견된 완전 2D 계인 그래핀(graphene)은 저차원 현상의 탐구와 그 응용을 다시 한번 활성화시키는 계기를 마련해 주었다.

Si 기반의 “반도체 기술”과 화합물반도체에 기초한 “반도체 물리학”의 절묘한 조화는 컴퓨터와 광통신 기술의 발전을 촉진시켜 현재의 기술과 과학에 이르게 하였다. 그렇다면 앞으로 반도체 물리학은 어떤 방향으로 전개될 것인가. 앞서 기술한 반도체 발전사를 볼 때, 향후 반도체물리학은 기존의 반도체 소재나 소자가 지니고 있는 한계를 극복할 수 있는 새로운 물질계나 구조의 발견 내지는 창출이 될 것으로 예상된다. 반도체 소자의 성능을 좌우하는 전자(electron)의 한계 속도를 극복하는 연구와 빛의 속도로 진행되는 광자(photon)를 어떻게 제어하여 원하는 기능을 가지는 소자를 구현할 것인가가 하나의

Fig. 2. Electromagnetic waves presented on axes of frequency and wavelength.

주제가 될 것이다. 그래핀은 이론적으로 전자의 속도를 무한히 높일 수 있는 물질계로 주목받고 있으며, 광자나 전자의 양자 물리학적 조작을 통한 광정보(quantum information) 기술과 초고속으로 동작하는 양자컴퓨터(quantum computer) 실현을 위한 연구가 가속화될 것으로 전망된다.

향후 반도체 물리학이 기여할 수 있는 또 하나의 분야는 마지막 남은 미지의 스펙트럼으로 알려져 있는 테라헤르츠(terahertz, THz) 대역의 전자기파에 관한 연구이다. 그림 2는 개략적으로 표현한 전자기 스펙트럼 대역이다. 라디오파에서부터 γ /X선에 이르기까지 모든 전자기파 스펙트럼 대역에 반도체의 발광·수광 특성과 전기·자기적 특성을 응용한 소자가 광범위하게 활용되고 있다. CD/DVD와 평판표시장치 등에 탑재된 발광소자(LD/LED)는 가시광을 중심으로 적외선/자외선(IR/UV) 영역으로 그 파장 대역을 점차 넓혀 왔으며, 파장장 영역에서 시작한 방송과 무선통신 기술은 반도체의 발달과 함께 그 주파수 대역을 마이크로파(μ -wave) 영역으로 확장하여 현재에 이르렀다. IR 대역과 μ -wave 사이를 폭넓게 차지하고 있는 THz파는 광학적 특성과 전자파적 특성을 동시에 지니는 그 고유한 특성 때문에 향후 기초 및 응용 연구가 보다 활성화될 것으로 전망된다. THz 영상기술은 적외선 영상과 함께 생명의료 기술과의 융복합화를 주도할 것으로 전망되며, 바이오물리학(bio-physics) 등 기초 연구뿐만 아니라 차세대 의료진단을 선도할 산업기술에도 응용되는 주목받는 분야로 성장할 것으로 사료된다.

이상과 같이 본 소고에서 고찰한 내용을 바탕으로 향후 반도체물리학에서 주목받을 연구테마로 아래 5개 분야를 선정하였고, 본 특집에서는 서문에 이어서 각 분야 전문가들의 상세한 논의를 다음과 같은 차례로 싣는다.

1. 저차원 결정 복합체에 대한 연구의 발전 전망
2. Photon Information Processing
3. 양자컴퓨터
4. Terahertz Photonics
5. 생물물리 난제의 돌파구: 실험과 계산의 결합