

정보통신 기술에서 본 나노기술의 개요

박 경 완 | 서울시립대학교 나노과학기술학과 교수

I. 미래 정보통신사회

오늘날 정보통신산업은 한 국가의 중추신경망계로 비유되며, 국가의 모든 산업, 정치, 경제, 그리고 문화에 커다란 발전적 영향을 끼치고 있다. 또 고품질의 정보통신 서비스는 효율적인 사회활동에 큰 영향을 주게 되고, 정보통신 서비스의 질이 사회의 복지상태를 가늠하는 중요한 척도가 된다. 미래의 정보통신사회를 그려 보면, 개인 혹은 단체, 가정이나 직장, 그리고 크게는 국가가 언제 어디서나 필요로 하고 원하는 정보를 손쉽게 접하게 되는 좁고도 큰 사회가 될 것이다. 이에 따른 미래의 정보통신사회 및 그 바탕이 되는 정보통신 서비스의 특성은 지능화(intelligent), 복합화(multimedia), 개인화(personal), 그리고 인간화(human)의 기본 개념으로 이루어져야 할 것이다. 이러한 기본 개념은 정보통신 시스템의 기능적 측면에서 달성되어야 하며, 시스템의 구성 요소인 하드웨어와 소프트웨어의 특성에서 성취되어야 한다. 미래의 정보통신사회의 특성을 최대한 구현하기 위한 정보통신 하드웨어 시스템은 현재의 시스템보다 정보 저장·전송·처리 측면과 소비 전력 측면에서 수천 배 이상의 고기능성을 만족하여야 하며, 이를 위하여 반도체, 컴퓨터, 통신기술에 있어서 현재의 기술을 뛰어넘는 대용량, 초고속, 저전력 소모, 그리고 신기능성의 기반 기술을 창출하여야 한다.

제 3세대 이동통신 서비스 IMT-2000, 이 휴대단말은 통신이 두절되는 일이 없다. 해외 그 어디에 있건, 사막이든 밀림이든 태평양 한복판에 있든, 지상파가 미치지 못하는 곳에서는 인공위성을 사용하여 꿈의 멀티미디어 이동통신을 즐기게 한다. 음성과 영상 통신뿐 아니라, 생활, 교육, 여행, 오락 등의 일상 멀티미디어 정보와 과학기술산업 등의 전문 정보의 검색, 각종 전자 상거래와 은행거래 등 가정, 직장, 사회 활동에서 놀랄만한 정보통신 서비스를 제공받게 된다. 따라서, 이 꿈의 서비스를 제공받고자 하는 사용자 수가 해가 갈수록 기하급수적으로 증가하고, 시간이 흐를수록 개개인 은 더 나은 고품질의 정보와 통신 서비스를 원하게 될 것이다. 일반적으로 디지털 시대의 고품질 정보통신 서비스는 더 세밀한 데이터 비트, 즉 더 많은 개수의 데이터 비트를 의미한다. 이러한 고품질의 정보통신 서비스는 우리에게 더 긴 시간과 더 큰 시스템의 공간을 요구한다. 그러나 사람에게나 정보통신 시스템 및 단말에게나 감당할 수 있는 시간과 공간의 크기는 어느 정도 한정되어 있으며, 이 한계를 넘어

“

오늘날 정보통신산업은 한 국가의 중추신경망계로 비유되며,
 국가의 모든 산업, 정치, 경제, 그리고 문화에
 커다란 발전적 영향을 끼치고 있다. 또 고품질의 정보통신 서비스는
 효율적인 사회활동에 큰 영향을 주게 되고,
 정보통신 서비스의 질이 사회의 복지상태를 가능하는 중요한 척도가 된다.

”

선 무리한 작동은 도리어 정보통신 서비스의 질적 저하를 가져오며, 꿈의 이동통신은 사라지게 될 것이다.

Ⅱ. 나노기술과 반도체소자 축소화

현재의 기술적 한계를 넘어야 하는 미래 정보통신 시스템의 요구 조건을 충족시키기 위해서는 기존 기술의 획기적인 향상이나, 시스템을 구성하고 있는 기본 단위소자 측면에서 고기능 신소자기술의 창출이 필연적이다. 그러나 현재 기술의 연장선상의 방법론으로 이 미래형 단위소자의 동작 특성, 즉, 테라비트 이상의 초고집적성, 100GHz 이상의 초고속 동작성, 극한의 저전력 소모성, 그리고 다중 에너지 상태의 신기능성을 성취하는 것은 매우 어렵다. 하지만 지난 수십 년간 과학기술의 발전 상황을 면밀히 관찰해 보면, 위의 특성을 달성할 수 있는 새로운 기술의 출현을 예고할 수 있다. 이는 원자나 분자 크기의 나노미터급의 물질 공간에서 일어나는 새로운 현상들을 규명하고, 이를 바탕으로 나노미터 크기의 물질계를 제작·제어하여 극한 성능의 신기능소자를 구현할 수 있으리라고 예측하고 있으며, 위와 같은 범주의 기술이 나노기술(Nano-

Technology : NT)이다. 그리고 나노기술의 중요 주제는 나노미터급 크기의 물질 특성에 의한 기본 단위소자의 초고집적성, 초고속 동작성, 초저전력 소모성, 다기능성의 구현이다. 미래형 나노기술의 창출은 물리, 화학, 생물 등의 기초과학, 그리고 전자, 재료, 화공 등의 응용공학이 상호유기적이고 종합적으로 융합되어 발전되어야만 가능하다. 즉, 미래형의 고기능 단위소자를 구현하는 데 필요한 총체적 기술이 나노소자 기술이며, 이 기술에 필요한 범과학 기술의 집합이 나노기술이다.

이 미래형 나노기술의 근원은 현재까지 발전해 오고 있는 반도체소자의 축소화 기술이라고 할 수 있다. 과거 30년간 반도체소자의 축소화에 의하여, ① 단위 칩 안에 더 많은 소자를 집적하여 기기의 대용량 및 소형화를 이루었고, ② 소자 내에서 전기 신호 수송 시간을 줄임으로써 정보처리속도를 향상시켰을 뿐 아니라, ③ 활용되는 전자의 수를 줄여서 소비전력을 감소시켰으므로, 고집적/고속/저전력의 성능 향상에 직접적인 견인차 역할을 해 왔다. 실례로서, 1971년 2300개의 10 μ m-세대 트랜지스터를 집적시킨 108kHz의 Intel 4004 마이크로 프로세서를 필두로, 2000년 2800만 개의 0.18 μ m-세대의 트랜지스터를 집적시킨 1GHz의 Intel

Pentium III 프로세서 칩에 이르기까지, 반도체 전자 소자의 소형화 기술은 지난 30년간 크기에 있어서 50여 배, 집적도에 있어서 약 10,000배, 칩의 속도에 있어서 약 10,000배의 눈부신 향상을 이룩할 수 있었다.

이러한 소형화 추세는 꾸준히 계속되어 현재의 1기가비트(Gb)급에서 2016년경에는 테라비트(Tb)급의 메모리소자의 출현을 예상하고 있다 (1 테라비트 칩이란 단위 칩에 1조(兆) 개의 단위소자를 집적시킨 것으로, 기억 용량으로 치면 단행본 약 15만 권에 해당하는 양이다.). 이 테라급 집적 기술은 선폭이 25나노미터(나노미터: 1nm = 10⁻⁹m) 정도의 설계를 요구하는데, 이 길이는 원자를 약 100여 개 정렬해 놓은 거리 정도로서 '분자' 차원에 육박하는 크기이다.

Ⅲ. 나노기술의 배경 및 특성

반도체소자의 축소화 기술에서 많은 영향을 받은 나노기술의 배경을 살펴보면, 1959년 캘리포니아 공과대학의 리처드 파인만 교수의 'There is plenty of room at the bottom'이라는 주제의 강연에서 찾을 수 있다. 파인만 교수는 브리태니커 사전의 전체 정보량을 한 개의 편 정도의 크기에 담을 수 있고, 원자나 분자 크기의 컴퓨터도 가능할 것이라고 설명하였다. 이러한 강연 내용이 현재 나노기술의 비전이며, 궁극적으로 우리가 달성하고자 하는 것이다. 그리고 나노기술의 커다란 획은 1981년 유럽 IBM의 연구진에 의하여 발명된 주사탐침 현미경(Scanning Tunneling Microscope)이라고 할 수 있다. 이 주사탐침 현미경으로 우리는 개개 원자의 거동을 관찰할 수 있으며, 원자 크기의 물질을 이동·제어할 수 있게 되었다. 핵심 기술의 출현과 현재의 반도체소자의 축소화 기술에 힘입어 수

십 나노미터 크기의 물질을 제작하여 소자화할 수 있었으며, 앞으로는 수 나노미터 크기의 물질계도 제작·제어하여 극한 성능의 신기능 소자를 개발하려고 하고 있다.

나노기술의 기본 개념은 나노미터급 크기의 물질 구성 요소를 제어하여 그 크기를 조절할 수 있는 새로운 기술, 나노미터급 크기 물질의 여러 가지 물리화학적 그리고 재료적 분석을 위한 새로운 기술, 또한 나노미터급 물질계와 그 특성과의 상관관계를 새롭게 이해하여 나노미터급 물질계를 실생활에 이용하는 기술을 개발하는 것이다. 그리고 원자나 분자를 합성하여 기본적인 나노기술의 구성 요소인 나노미터 크기의 입자나 층상을 형성·제작하고, 이 구성 요소를 조합하여 여러 분야에서 실제 이용 가능한 나노 구조물을 제작하는 것이 나노기술의 기술적 특징이다. 이러한 나노 구조물을 제작하는 방식은 크게 두 가지 부류로 나눌 수 있다. 기존의 큰 물체를 여러 가지 방법으로 식각하여 나노 구조물을 제작하는 Top-down 방식이 있고, 나노미터급 물질 구성 요소를 조합하여 나노 구조물을 제작하는 Bottom-up 방식이 있다. Top-down 방식으로 나노 구조물을 제작하는 방법은 현재 미세 반도체소자의 제작 공정에 일반적으로 쓰는 기술의 연장선상에 있는 기술로, 나노 구조물 제작에 있어서의 재현성과 용이성이 장점이나, 수 나노미터 크기의 나노 구조물을 제작할 수 있는 기술을 개발하는 데는 그 난이도가 매우 높으며, 기술 개발에 투자되는 경비가 상당히 클 것으로 예상된다. Bottom-up 방법은 나노 구조물을 형성하는 데 있어서 주로 화학적 공정 기법을 이용하는 것으로, 기술적 난이도는 낮고 기술 개발에 투자하여야 하는 경비도 낮은 것으로 예상되지만, 나노 구조물 제작에 있어서의 재현성과 나노 구조물의 크기 및 위치의 조절이 매우 어려운 것으로 예상된다. 따라서 각 나노 구조물

“

나노기술은 응용 분야가 다양한만큼 앞으로
 여러 분야에서 놀랄 만한 기술 개발의 결과물이
 출현할 것으로 보인다. 그 중에서도
 나노 전자소자 기술 분야는 반도체소자의
 고집적화 기술과 관련하여 실용성 측면에서 중점적으로 연구되고 있다.

”

제작 기술의 단점을 극복하기 위해 많은 연구 개발 투자가 이루어져야 할 것이다.

우리가 현재 생각하고 있는 나노기술에는 여러 가지 형태의 분류가 있을 수 있지만, 크게 나누어서 고기능 재료적 특성의 분산·코팅재와 복합 물질계 기술, 고기능 나노소자기술, 그리고 생체와 관련한 나노기술로 구분할 수 있다. 나노미터급 물질계의 구성으로 밀도 및 표면적이 증대되어 그 재료적 성능을 배가하는 의약품, 살충제 혹은 윤활제와 같은 화공약품, 빛 또는 열 차단제, 오염 제거 물질 또는 전기적 특성 강화제 기술, 고효율 전지 기술 및 고성능 초절전의 디스플레이 기술 등이 분산·코팅재 기술 분야에서 나노기술의 특성을 이용하고자 하며, 나노미터 크기의 물질의 결합으로 더 나은 탄성성질, 고강도, 더 질긴 물질을 개발하려고 하는 기술이 나노 복합물질 기술 개발에 속한다. 초미세 약물 전달 기구 개발, 생물학적 분리막 기술, 생체 모터, 생체 자기 이용 기술, 생체 전자소자 및 생체 컴퓨터 기술 개발이 나노기술의 한 분류이며, 정보통신 기술과 관련하여서는 나노미터급 양자선, 양자점 이용의 고효율 정보통신 소자 기술, 나노미터급 초미세 정보 저장 매체 기술, 초고속 정보처리의 반도체 나노소자 기술 등이 고기능 나노소자 기술에

속한다.

세부 나노기술들이 그 목적에 맞게 기술 개발이 이루어지고 있는 것이 본연의 특징이나, 현재에 이르러서는 더 이상의 고기능화를 위한 개별 나노기술의 개발뿐만 아니라, 몇 개의 나노기술이 복합화하여 신기능을 보유할 수 있는 나노 시스템의 개발도 또 하나의 방향으로 인정되어 많은 연구개발 투자가 이루어지고 있다. 또한, 나노미터 크기의 물질계를 공정·제작하여 새로이 발현하는 특성을 이용하고자 하는 나노소자 기술은 기반성으로 인하여 반도체 메모리 및 프로세서, 대용량 정보저장기, 대용량 초고속 정보통신 소자 등의 정보통신 기술에 극단적 향상을 제공하는 미래형 요소 기술이며, 이 범주의 기술을 IT-NT 융합 기술이라고 한다.

IV. 반도체 나노기술

나노기술은 응용 분야가 다양한만큼 앞으로 여러 분야에서 놀랄 만한 기술 개발의 결과물이 출현할 것으로 보인다. 그 중에서도 나노 전자소자 기술 분야는 반도체소자의 고집적화 기술과 관련하여 실용성 측면에서 중점적으로 연구되고 있다. 미국 등 선진 연구소에서는 게이트 길이 20nm의 트랜지스

터 연구 결과가 발표되는가 하면, 실리콘 나노 클러스터로부터의 발광 효과도 보고되고 있다. 이에 맞추어 국내에서도 미래 통신용 나노 IC소자의 개념을 구현하기 위하여 '실리콘 미래 신소자 원천기술' 개발을 수행하고 있다. 본 기술에서는 질연막 위의 실리콘 박막을 이용하는 나노 트랜지스터, 다중 상태의 양자 다기능성 트랜지스터, SiGe를 중심으로 하는 초고속 실리콘 헤테로 양자 트랜지스터와 광전 기능 소자를 개발하고 있으며, 초고집적 메모리, 초고속 프로세서, 무선통신 소자, 광통신용 실리콘 수/발광 소자를 하나의 칩에 집적하여 무선통신/광통신/컴퓨터의 기능을 모두 갖추는 Network-on-a-chip의 원천 요소 기술을 창출하고 있다. 이를 성취하기 위하여 나노소자의 구조, 제작 공정 등의 요소 기술에서 새로운 기술의 창출 및 개발이 필요하며, 개발된 기술을 이용하여 게이트 길이 50nm의 실리콘 박막 나노 트랜지스터의 동작을 보고하였다. 이러한 소자 기술은 현재보다 수백 배 이상의 대용량 정보를 처리할 초고속 집적회로와 새로운 전광/광전 개념으로 동작하는 신기능소자를 창출시킬 수 있으며, 병렬연산과 같은 정보처리를 수행할 수 있는 신개념 소자 아키텍처의 발전을 유도한다.

기본 단위전자소자의 축소화 기술로 대표되는 반도체 나노전자소자 기술은 또 하나의 큰 효과를 가지고 있다. 그것은 소자의 특성을 나타내는 전자의 움직임이 물결과 같은 파동성을 가지는 양자 효과이다. 일반적인 반도체전자소자를 나노미터의 크기까지 축소하였을 경우, 양자역학적 효과의 발현으로 소자의 기능면에서 현재 우리가 예견하는 동작이 불가능하게 된다. 그 이유는 극초미세 한계 공간에서 발현하는 전하 단위의 양자화 및 파동성, 관통성과 에너지 준위의 양자화와 같은 양자역학적인 효과가 전자의 운동을 지배하기 때문이며, 양자 효

과 운동은 기존의 전하의 움직임과 전혀 다르다. 따라서, 단순 나노기술은 선풍 10nm급 이하의 크기에서 나타나는 양자 효과로 인해, 기존 소자 동작의 한계를 초래하는 부정적인 측면을 갖고 있는 한편, 전자의 파동성에 의한 양자 효과를 적극적으로 이용하는 신기능 양자소자의 필연적인 출현을 예고하는 긍정적인 측면도 갖는다. 이러한 전자의 양자역학적 특성을 적극적으로 소자에 활용하고자 하는 기술이 나노 양자전자소자 기술이다.

나노 양자전자소자 기술은 양자 효과의 장점으로 인하여 미국, 일본 등의 선진 연구기관에서 중요한 연구 대상이 되어 있다. 반도체 나노 양자전자소자 기술 분야에서 주로 다루고 있는 양자 효과와 소자적 특징으로는, 전자를 1개씩 다루는 단전자 메모리와 트랜지스터, 단전자 로직회로, 전자의 파동성을 이용하는 양자간섭소자와 양자 셀룰라 오토마타, 전자의 관통성을 이용하는 나노 관통 트랜지스터, 그리고 에너지 양자화를 이용하는 양자연산소자 등이 있다. 또한, 국내에서도 양자간섭효과를 이용하여 나노전자소자의 상태가 여러 개 나타나는 양자간섭소자의 연구 결과를 발표하는 등, 많은 연구가 진행 중이다. 나노 양자전자소자 기술은 단위 전자소자에 자연이 허용하는 궁극적인 초고집적성, 초고속성, 저전력 소비성, 그리고 신기능성을 구현하게 되어 미래의 정보통신소자 및 부품 기술에 큰 파급 효과를 주며, 관련 반도체, 컴퓨터, 통신 기술에 대단히 중요한 핵심 기술이 된다.

V. 나노기술의 이용

21세기를 시작하는 현대 사회는 정보통신 분야에서 폭발적인 변혁을 체험하고 있다. 세계적으로 3조 달러 규모의 전자 상거래를 비롯하여, 사용 인구가 3억을 돌파한 인터넷, 6억 명에 이르는 무선

“

나노기술은 미래의 정보통신 기술을 포함한
제반 산업 및 일상 생활에서 요구되는 특성을 만족시킬 수 있다.
따라서 나노기술의 성취는 고품질의 정보 통신 서비스 제공에
일익을 담당할 뿐 아니라, 고품질의 정보사회에 부응하는
사회문화에도 발전적 영향을 끼칠 것으로 예상된다.

”

통신 가입자, 국내에서는 10조 원 규모의 정보산업 시장 규모, 1500만에 이르는 인터넷 이용 인구, 2000만 명에 이르는 무선통신 가입자 수 등이 그 단적인 예이다. 가장 수요가 많을 휴대용 정보통신 기기에 필수적인 음성인식이나 비디오통신, 고품질 통신 및 연산 등의 기능을 충족시키기 위해서는 메모리 용량, 연산 속도, 소비 전력 등에 있어서 현재 출시된 제품 수준에 비하여 수천 배 이상의 향상이 요구되고 있다. 이러한 요구들을 충족시키는 데 필요한 핵심기술이 나노기술이다.

나노기술은 산업기기, 가전제품, 컴퓨터, 통신기기 등의 모든 제품에 필수적인 기본 단위소자 및 부품 기술로 응용될 것이다. 지능화, 멀티미디어화, 개인화, 인간 위주로 정의되는 미래 정보화사회에서는 현재 사용하고 있는 모든 전자제품을 소형화하는 것이 필수적이며, 이는 소비자의 편의를 더욱 증진시킬 수 있다. 이러한 편의를 제공하는 나노기술은 미래의 정보통신 기술을 포함한 제반 산업 및

일상 생활에서 요구되는 특성을 만족시킬 수 있다. 따라서 나노기술의 성취는 고품질의 정보 통신 서비스 제공에 일익을 담당할 뿐 아니라, 고품질의 정보사회에 부응하는 사회문화에도 발전적 영향을 끼칠 것으로 예상된다. [1]

박경완

서울대 물리학과를 졸업하고, 한국과학기술원에서 석사학위를, 미국 North Carolina주립대에서 박사학위를 취득하였다. 산업자원부 나노기술산업화위원회 위원, 과학기술부 국가과학기술위원회 산하 나노기술전문위원회 위원, 한국과학기술정보연구원 나노기술정보지문위원회 위원 등을 역임하고 있으며, 현재 서울시립대 나노과학기술과 교수로 재직 중이다. "Temperature dependent correlation function of magnetoconductance quantum fluctuations in a stadium quantum dot," "중시적 양자전자소자" 외 다수의 논문이 있다.