

③ 미래의 반도체

# 인간 몸 속 변화 실시간으로 알아낸다

글 | 박영준 \_ 서울대학교 전기컴퓨터공학부 교수 ypark@snu.ac.kr

**미**래의 반도체 모습을 조망하는 것은 쉬운 일이 아니다. 왜냐하면 미래는 오지 않았으며, 정해져 있는 것이 아니라, 과학기술자 그리고 반도체를 사용하는 경제주체들에 의해서 결정되기 때문이다. 미래를 조망하는 방법으로 기술적인 측면과 응용측면에서 나누어서 생각해 보자. 기술적인 측면으로는 반도체 칩을 구성하는 트랜지스터의 크기가 줄어들을 역사적으로 고찰하고 미래를 전망하는 일이다. 응용측면에서는 반도체 칩으로 구현할 수 있는 기능들을 확장해 나가는 면에서 고찰할 수 있다.

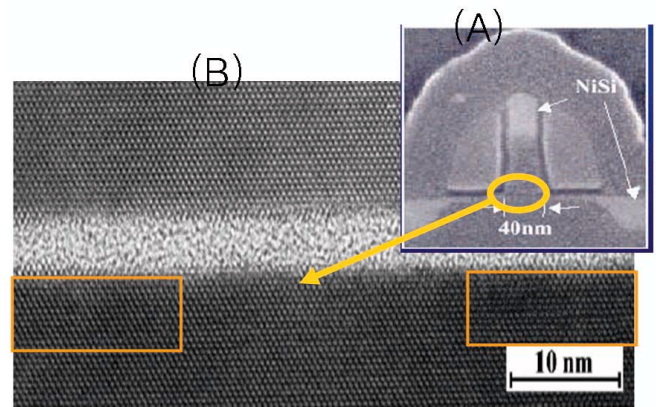
### 현재 100nm 트랜지스터, 이론적으로 10nm까지 가능

반도체기술 역사만큼 빠른 시간 내에 크기를 줄인 역사가 있을까. 20세기가 시작할 때 인류는 눈에는 보이지 않지만 공기 중에 퍼져 나가는 전자파를 발견하고는 이를 무선 통신에 응용할 수 있다는 것을 감지했다. 무선 통신을 위해서 안테나에서 받은 목소리를 싣고 있는 전자파에서 목소리 신호를 떼어내기 위해서 정류기가 필요했는데, 당시에는 정류기를 '진공관'으로 만들어서 썼다. 정류기는 말 그대로 한쪽으로는 전기를 흘리고 다른 쪽으로는 전기를 흘리지 않는 소자를 말한다. 진공관은 크기가 크고, 에너지를 많이 사용하기 때문에 뜨겁다. 이를 작고도 전기에너지를 매우 조금 사용하는 고체(반도체)로 만들기 위해서 50년간 노력했는데, 이것이 현대 반도체를 이용한 정류기(다이오드)와 신호를 크게 하고 스위치 기능을 가진 트랜지스터가 발명된 이유이다.

100년 전 진공관 다이오드(혹은 트랜지스터) 크기는 약 10cm 정

도였다. 요즘은 우리 나라 반도체 공학자들은 트랜지스터의 크기를 100nm 정도로 작게 만들고 있다. 즉, 진공관에 비해서 100만분의 1 정도로 작은 크기로 트랜지스터를 만들 수가 있다. 아마 예전 진공관을 이용해서 현재의 개인용 컴퓨터를 만들려면 1천만개의 트랜지스터가 필요하다고 해도 약 중국크기의 장소가 필요할 것이다. 이와 같이 반도체의 발명으로 크기가 축소된 것이 디지털 혁명을 이루게 된 가장 큰 이유이다.

과연 트랜지스터의 크기가 계속 줄어들 수 있을까. 꿈을 꾸는 과



<그림 1> 트랜지스터를 이루는 실리콘의 원자 현미경 사진. 그림에서 A)는 현재 생산되고 있는 트랜지스터 사진이고 B)는 전자가 흐르는 부분의 현미경 사진이다. 이 사진에서 보듯이 전류가 흐르는 채널 부분의 길이가 동작 성능을 결정한다. 앞으로 현재 과학기술자들은 40nm~50nm 크기의 트랜지스터를 제작하고 있다. 10년 이내에 10nm 급 트랜지스터를 만들려고 노력하고 있다. B) 그림에서 채널 부분에 존재하는 실리콘 원자가 선명하게 드러난다. 20nm 급이 되면 채널 사이에 실리콘 원자가 겨우 40개 정도밖에 존재하지 않는다.

학기술자들은 크기가 10nm 정도까지는 작아질 수 있다고 생각한다. 분자의 크기가 10nm 정도까지 성질을 유지하고 있으므로 이 정도까지는 반도체 트랜지스터가 작아져도 동작을 할 것이라고 믿는 것이다. <그림 1>은 가장 많이 사용된 반도체 물질인 실리콘의 격자 크기를 전자 현미경으로 찍은 사진이다. 이 사진에서 10nm 크기를 표시해 보았다. 그림에서 알 수 있듯이 10nm 크기에는 실리콘 원자가 수십 개 정도 밖에는 존재하지 않는다.

**경제성 · 과도한 전력소모로 현실적인 한계는 20nm**

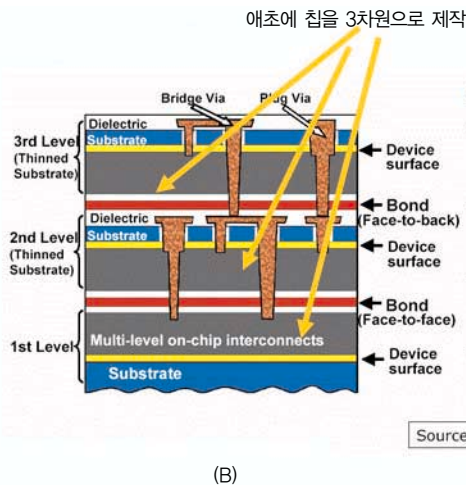
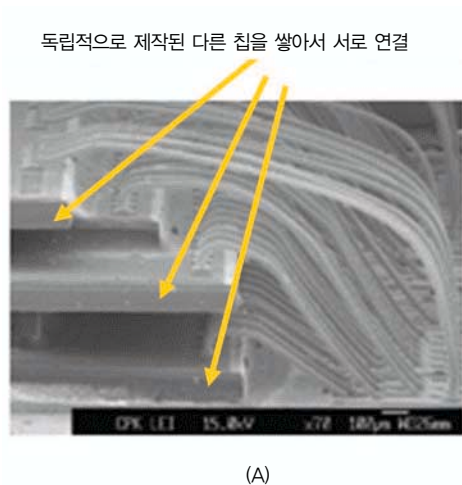
현실적으로 제품을 만들어 내는 공학자 입장에서는 세 가지 문제를 가지고 고민한다. 첫째는 과연 이 정도 크기를 대량 생산으로 만들기 위해서 너무 많은 투자가 필요하다는 점이다. 요즘도 50mm급 반도체 칩을 제작하는 공장을 짓는데 3조~5조 원 정도의 투자가 필요하다. 아마도 10nm 기술용 공장을 지으려면 몇 곱절이 필요할지 모른다. 요즘 우리 나라 대운하를 만드는데 필요한 전체 예산이 15조~20조 원 정도가 된다고 하니, 얼마나 큰 부담인지 상상할 수 있다. 두 번째 고민은 많은 트랜지스터를 손톱 크기의 칩에서 동작시킬 때 발생하는 전력소모 때문에 너무 온도가 올라간다는 것이다. 실제로 요즘 사용되는 펜티엄 칩의 전력소모가 이미 과도하게 커서, 온도를 줄이기 위해서 노력하고 있다. 세 번째는 크기가 너무 작아지면서 트랜지스터가 가지는 특성들을 제어할 수 없을 만큼 산포가 커진다는 어려움이 있다. 마치 우리 나라 4천만 인구의 모습이 전부 다르듯이 다른 특성을 가지게 되어서, 원하는 기능을 가지는 칩을 만드는 것이 점점 불가능해지는 어려움이 있다. 어려움을 피하기 위해서 트랜지스터의 크기를 줄이는 대신에,

칩을 3차원으로 연결시켜서 같은 공간에 많은 트랜지스터를 집어 넣기 위해서 노력하고 있다. 현재 많이 사용하는 메모리 스틱은 이 칩을 여러 개 쌓아서 연결시킨 3차원 구조를 가지고 있다. 3차원 연결은 작은 공간에 여러 트랜지스터를 집적시키는 이점과 동시에, 칩 간 신호 거리를 줄임으로써 동작 속도를 증가시키는 이점이 있다.

현실적으로 트랜지스터를 대량생산하기 위한 크기의 한계를 20nm 정도로 생각하고 있다. 앞에서 이야기했듯이 경제적인 이유, 그리고 과도한 전력소모 때문이다. 과학 기술자들은 실리콘으로 만들어진 트랜지스터를 대체할 수 있는 새로운 방안을 생각하고 있다. 예를 들면, 분자를 이용해서 트랜지스터를 만든다든지, 아예 전기적인 신호를 처리하는 대신 양자 신호를 이용하는 트랜지스터를 제작하려고 노력하고 있다. 전기적인 신호 처리보다도 전력이 적게 들고, 제작이 용이한 대체 방안으로서 새로운 동작원리를 찾고 있다. <그림 3>은 새로운 분자 트랜지스터의 개념도를 보이고 있다. 분자 하나의 전기 흐름을 제어할 수 있게 함으로써 전자 하나 정도의 흐름을 제어해서 신호처리 하는 데 사용하고자 하는 새로운 아이디어들이다. 그러나 새로운 아이디어들이 현재 반도체 칩을 대체하지는 못할 것이다. 복잡하고도 고장이 없는 실리콘 반도체 제작 기술을 훔내 내기가 힘들기 때문이다. 아무리 빠른 운송 수단이 생기더라도, 자동차를 대체할 수 없는 것과 마찬가지로이다.

**빛 신호 처리 · 생명공학에 응용 등 기능 다양화**

트랜지스터의 크기를 줄이는 것과 동시에, 반도체 칩의 가치를 높이기 위한 노력으로 트랜지스터의 기능을 다양화하는 노력을 기

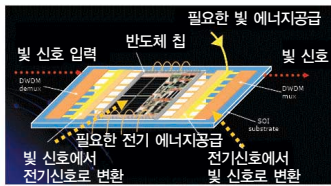


**Key Challenges:**

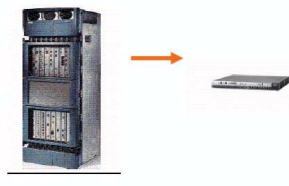
- Precise alignment of 200 mm wafers (<math>\le 1 \mu\text{m}</math> accuracy)
- Thin glue-layer bonding at low temperature (<math>\le 400 \text{ }^\circ\text{C}</math>)
- Precision thinning and leveling of top wafer (<math>\sim 1 \mu\text{m}</math> thick)
- Inter-wafer connection with high-aspect-ratio (<math>\sim 5:1</math> vias)

Source: R. Gutmann, RPI

<그림 2> 칩을 3차원으로 쌓아서 회로를 만들으로써 작은 공간에 많은 트랜지스터를 집적시킨 효과를 가질 수 있다. A)는 독립적으로 제작한 세 개의 칩을 쌓아서 연결한 경우이고, B)는 제작할 때부터 서로 붙여서 3차원으로 제작한 경우이다. B)에서 중요한 어려운 기술적인 사항이 기술되어 있다. 미국 RPI 등에서 발표된 자료를 재구성하였다.



(A)



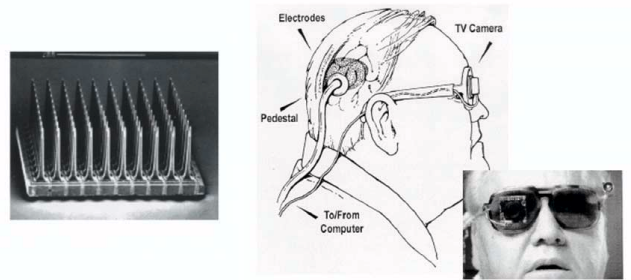
(B)

〈그림 3〉 빛을 처리하는 반도체. 특히 실리콘 반도체로 빛을 처리하는 응용으로 확장되어 통신 시스템을 소형화하는 노력이 시도되고 있다. 그림 A)에서는 실리콘 칩에 빛으로 신호를 보내어, 전기신호로 변환 후, 신호처리를 하게 하고, 신호처리 결과를 다시 빛으로 보내는 아이디어를 표시하고 있다. 이렇게 칩을 만들면, 현재 통신 시스템에서 사용되는 큰 네트워크 시스템이 소형화됨을 B)에서 표시하고 있다. INC07년 발표 내용을 재구성한 것이다.

울이고 있다. 이 노력은 세 가지로 요약할 수 있다. 첫째는 반도체 칩을 전기적인 신호를 처리하는 데서 확장하여 빛 신호를 처리하게 하는 것이다. 트랜지스터는 원래 전기 신호를 받아서 디지털 신호 처리를 하거나, 혹은 아날로그 증폭을 위해서 개발되었다. 그러나 반도체 자체가 가지는 특성들, 특히 빛을 받으면 반도체 자체에서 빛의 세기에 비례해서 전자와 홀을 발생시킨다든지, 혹은 기계적인 스트레스에 따라서 전자와 홀의 특성(특히 무게)이 바뀌는 성질을 이용하는 응용이 반도체의 앞날을 밝게 하고 있다. 최근 핸드폰에 장착되어 있는 카메라 역시 이 반도체 칩의 빛 감광 특성을 이용한 것이다. 이러한 칩을 CIS(CMOS Image Sensor)라고 부른다. 광응용을 위해서 다음 단계로 실리콘을 이용해서 빛을 만들고, 빛을 전송하려는 노력을 기울이고 있다. 우리가 HDTV 등을 즐기는 광대역 통신은 실리콘 반도체가 아닌 반도체로 만든 빛을 이용하고 있다. 그러나 최근 과학기술자들은 실리콘 칩이 전기 신호를 받아들이고 내보내는 대신, 빛을 받아들여서 전기적으로 처리하고, 신호를 빛으로 보내려고 노력하고 있다. 이렇게 하면, 전기신호보다 훨씬 빠른 속도로 신호를 처리할 수 있기 때문이다.

둘째는 반도체 칩을 제작하는 기술을 이용한 MEMS 시스템으로 확장하는 것이다. 즉 기계적인 구조물을 칩에 같이 만들어 넣어서 극소형의 기계를 만드는 것이다. 이러한 아이디어로 자동차의 충격을 감지하는 칩을 제작하기도 하고, 극소형의 비행체를 제작하여 원격 조정하기도 한다.

셋째는 생명공학에의 응용이다. 최근 과학기술자들은 반도체의 응용을 다양하게 하기 위해서 광응용 다음 단계로 생명신호를 탐지



(A)

(B)

〈그림 4〉 신경 탐침을 내장한 반도체 칩이 고장난 뇌 신경을 조작하는 그림. A) 그림에서 실리콘 제작기술로 탐침을 만들고, 이 탐침을 반도체 칩에 연결하여, 뇌 신경에 연결하면, B) 손상된 눈 등의 신경을 복원하는 데 사용할 수 있다. 서울대, 혹은 타 대학 등에서 제작된 칩 사진을 이용하였다.

하고 조작하려고 하고 있다. 트랜지스터의 크기를 생명 단위인 세포, 그리고 세포를 이루고 있는 핵이나, 핵이 만들어 내고 있는 분자 물질의 크기와 비교하면 많은 힌트를 얻을 수 있다. 실제로 많은 생명현상들은 전기적인 작용에 의해서 일어나기도 하고 탐지할 수 있기 때문이다. 가장 먼저 생각할 수 있는 응용은 반도체 탐침 바늘을 만들고 이를 뇌 신경세포에 심어 두어 신경 세포 신호를 반도체 칩이 알아서 처리하고 손상된 신경세포에 알맞은 전기신호를 가해주는 응용이다. 반도체 칩에 안테나를 제작하면 외부에서 무선으로 칩을 조작할 수 있다. 이러한 칩이 이미 귀가 고장 난 환자에게 연결시켜 상당 부분 성공을 거두고 있다.

### 미래는 '센싱'의 세계

앞에서 반도체 트랜지스터가 20nm 정도의 크기에서 한계를 가질 것이라는 점을 강조하였다. 크기를 작게 만드는 노력과 동시에 새로운 기능을 추가하는 노력에 대해서 소개하였다. 가장 큰 응용은 '센서'의 세계에의 응용이다. 건물의 누수, 위험 가스 등을 탐침하는 것, 환자의 상태, 심지어는 인간의 몸 안에서 일어나는 변화를 실시간으로 알아내는 것, 가축의 감염, 지하철의 독가스, 공항의 마약 탐지에 이르기까지 미래는 센서의 시대이다. 이제 센서는 먼지와 같이 보이지 않는 크기로 우리의 환경을 감시하는 시대가 될 것이다. 반도체의 미래 응용은 바로 여기에 있다고 할 수 있다. ㉔



글쓴이는 미국 매사추세츠 주립대학에서 박사학위를 받았으며, 미국 IBM, LG반도체, 현대전자 반도체에서 근무했다. 현재 나노응용 시스템 국가 핵심연구센터 소장을 겸임하고 있다.