

# 단전자 트랜지스터의 이해

취급하는 정보량이 기하급수적으로 증가하면서 더 많은 정보 처리가 필요하게 되었다. 이에 따라 집적회로에 채울 수 있는 트랜지스터의 수에 한계가 생기면서 그 해결책으로 전자 1개로 동작하는 단전자 트랜지스터 구현의 중요성이 대두되고 있다. 본고에서는 이러한 단전자 트랜지스터의 기술적인 측면에 대해 살펴보고 아울러 향후 개선해야 할 부분을 알아볼 예정이다.

글 : 김태근, 송경환, 안재현, 최루리/ 황성우, 주병권 교수  
고려대학교 공과대학 디스플레이 및 나노시스템 연구실 /  
<http://www.diana.korea.ac.kr>

집적회로의 발전에 따라 개인 컴퓨터나 휴대단말기를 포함한 고도의 정보처리능력을 가지는 기계의 수요가 많아지고 취급하는 정보량도 기하급수적으로 증가하게 되었다. 하지만 점차적으로 더 많은 정보처리가 필요하기 때문에 집적회로에 채울 수 있는 트랜지스터의 수를 더욱 증가시켜야 한다. 이를 위해서는 트랜지스터의 크기를 줄이는 것은 물론이거니와 제한된 공간 안에서의 발열문제 및 에너지 소비를 최소화하기 위한 노력이 필요하다. 하지만 현재의 집적회로 상에서 트랜지스터 동작을 하기 위해서는 약 10만개 전자흐름의 제어가 필요하다. 또한 현재 개인 컴퓨터의 초당 20억 회 이상(2GHz)의 동작회수를 고려한다면 현재 소비하는 전력 및 발열량은 막대한 것이 된다.

이와 같은 문제를 해결해 줄 수 있는 방법은 전자 1개로 동작하는 단전자 트랜지스터를 구현하는 것이다. 즉, 사용하는 전자를 1개씩 제어하는 기술이 가능해지면 기존의 트랜지스터에 비해 10만분의 1정도 전자만 제어하면 되므로 그만큼 소

비는 전력도 감소하게 되고 크기도 줄어들게 된다. 따라서 기존보다 더 고밀도의 집적회로 제작이 가능하다.

최근 트랜지스터가 작아짐에 따라 비휘발성 메모리의 용량도 급격히 커지고 있으며 메모리 가격이 빠른 속도로 하락하면서 대부분의 기기에 메모리가 탑재되고 있다. 또한 그 수요도 기하급수적으로 증가하고 있다. 더군다나 각종 정보관련 기기들이 하나의 복합 디지털 기기로 기능들이 합쳐지면서 정보저장량과 처리속도 측면에서 차세대 정보저장기술에 대한 필요성이 계속 대두되고 있다. 게다가 수요의 방향이 점점 더 작고 얇으면서, 그 성능이 더욱 뛰어난 전자기기를 원하면서

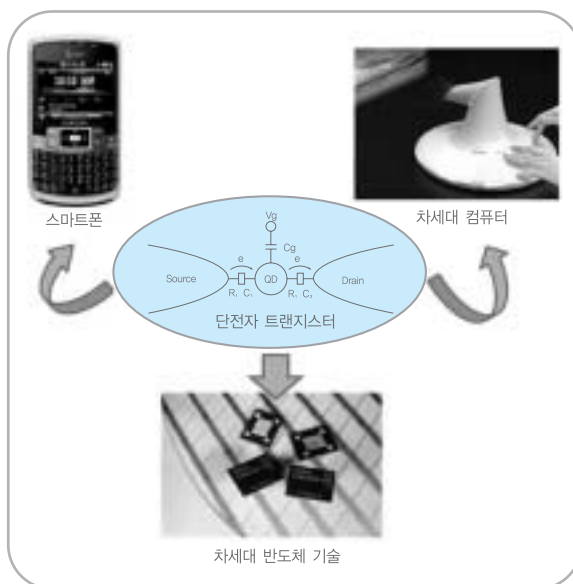


그림 1. 단전자 트랜지스터의 응용

도 환경오염과 연관해서 더 적은 에너지를 소비하는 기기들이 각광받고 있는 추세이다.

이러한 추세에 비추어 볼 때 단전자 트랜지스터는 높은 집적도와 기존의 것보다 더욱 빠른 정보처리속도, 그리고 저전력으로 동작이 가능하기 때문에 위에서 언급한 앞으로의 정보 저장기술이 풀어야 할 갈증을 모두 해소해 줄 수 있는 대안이라고 볼 수 있다.

이 글에서는 양자역학 연구의 역사적인 흐름을 통해 단전자 트랜지스터의 중요성을 살펴보고 기술적인 측면과 향후 개선해 나가야 할 부분을 고찰해보고자 한다.

## 단전자 트랜지스터 연구의 역사

단전자 트랜지스터와 같이 작은 규모 내에서의 전자는 큰 규모 내에서의 전자와 동일하게 구동하지 않는다. 따라서 단전자 트랜지스터 전자 하나의 움직임을 제어하기 위해서는 양자역학에 대한 이해가 필요하다. 전자 하나의 움직임을 조절하는 것이 매우 중요하다는 사실은 지난 양자 역학 연구에 관한 노벨상 수상자들의 연구 목록을 보더라도 알 수 있다.

1952년 이전에는 많은 사람들이 양자역학을 통한 하나의 전자 또는 원자를 제어하는 장치를 제조하는 것은 어려운 것이라고 예상했다. 하지만 1965년 노벨 물리학상을 받은 Richard P. Feynman이 하나의 전자 및 원자의 거동을 예측할 수 있다면 양자화된 에너지 레벨을 포함하는 어떤 시스템, 또는 양자 스핀의 상호작용 등을 이용할 수 있게 될 것이라고

하면서 단일 전자, 원자의 제어가 가능해질 것을 예시하였다. 1981년 노벨 물리학상을 받은 Gerd Binnig, Heinrich Rohrer은 Feynman의 예상대로 주사형 터널 현미경을 사용한 원자 및 분자 조작이 가능하다는 것을 밝혔다. 후에 Dmitri V. Averin와 Konstantin K. Likharev가 1985년 Coulomb Blockade 현상을 이론적으로 금속 dot에서 처음으로 제안하였다. 1987년에 T.A. Fulton과 G.J. Dolan이 알루미늄 구조 상에서 단전자 터널링 제어의 명확한 증명을 해 보였고, 이 시스템에서 Coulomb Oscillation을 보였다. 이러한 결과는 이 디바이스가 단일 전하량을 측정하는 단일 전위계로 사용될 수 있음을 제시하였다.

## 단전자 트랜지스터의 동작원리 이해

그림 3은 단전자 트랜지스터의 구조를 단순화한 그림이다. 가운데 지점의 양자우물 부분과 소스, 게이트, 드레인 사이에 터널링만이 가능한 터널 접합이 있다. 그 접합들을 각각 충전

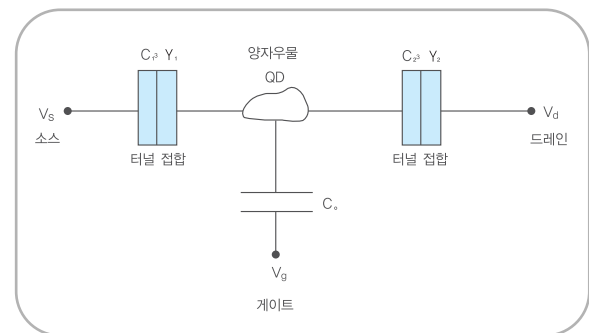


그림 3. 단전자 트랜지스터의 구조

1965년	1981년	1985년
	 	 
양자 전기역학의 기초원리 연구	전자분광학에 레이저 응용	양자화된 홀(Hall) 효과 발견, 전기 저항의 정확한 측정

그림 2. 양자역학 연구를 통한 노벨상 수상자들

이 완료된 캐패시터가 달린 것으로 단전자 트랜지스터 모델을 설명할 수 있다.

양자우물에 셀 수 있는 개수의 전자가 들어갈 수 있고, 그것이 소스와 드레인 지역으로 터널링함으로써 전류가 흐르게 된다. 게이트 쪽으로 전류가 새는 것을 막

기 위해 게이트 부분의 캐패시터에는 양극과 음극 사이의 간격을 크게 해서 터널링이 사실상 거의 일어나지 않게 제작한다. 여기서 양자우물에 전자가 몇 개 존재하는가에 따라 소스와 드레인 사이의 전류량이 달라지는 재미있는 현상을 관찰할 수 있다. 이것은 소스나 드레인이 양자우물 사이의 전기 포텐셜 에너지 차이에 의해 생기는 현상으로, 우리가 보통 트랜지스터에서 관찰할 수 있는 게이트 전압이나 드레인 전압에 따른 연속적인 전류값이 아닌 불연속적인 전류값을 보이게 된다. 이 점이 단전자 트랜지스터를 고안해 낸 궁극적인 목적이 바로 매우 작은 소자를 만드는 것이라고 얘기할 수 있는 근거가 된다. 불연속적인 전류값을 보이는 이유는 기존의 일반적인 소자들과 달리, 매우 적은 수의 전자로 움직이는 것만으로도 충분히 소자를 작동시킬 수 있다는 말이기도 하다.

### Coulomb Blockade & Coulomb Oscillation

소스-드레인 전압을 충분히 작게 유지한 상태에서 게이트 전압을 점점 가해주면, 게이트 전압에 의해 양자우물 내부의 전자들이 게이트 쪽의 터널접합으로 끌어당겨지는 효과를 얻을 수 있다. 게이트 부분과 양자우물 부분만 따로 생각하면, 게이트 전압을 가해주지 않았을 때보다 터널접합에 속박된 전자를 게이트와 무한히 떨어져서 게이트 전압에 의해 끌어당기는 힘이 존재하지 않는 지점(물리적으로 포텐셜 0으로 잡는 기준, 그림 4에서 진공 레벨에 해당한다)까지 이동시키는데 더욱 많은 에너지가 필요해진다. 따라서 양자우물의 에너지 준위가 점점 낮아지게 된다.

페르미 준위를 중심으로 전자가 존재할 확률이 매우 크게 차이가 나기 때문에 페르미 준위보다 더 높은 에너지 대역에는 전자가 비어있고, 페르미 준위보다 낮은 에너지 대역에는 모든 준위에 전자가 꽉 차 있는 것으로 생각할 수 있다.

그림 4와 같이 양자우물의 내부는 매우 적은 수의 에너지 준위가 존재하는 반면 소스와 드레인에는 충분히 많은 수의 에너지 준위 내에 전자가 있다. 소스나 드레인 에너지 준위에 채워진 전

자들은 게이트 전압에 따라 터널링이 일어나 양자우물 내부의 에너지 준위를 채우게 된다. 이런 현상은 양자우물에 전자 하나를 가져올 수 있을 만큼의 포텐셜 에너지를 추가로 가해줄

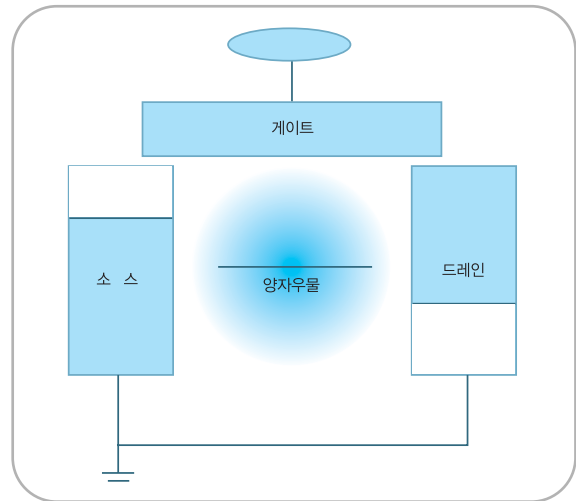


그림 4. 단전자 트랜지스터의 에너지 준위 형태

때마다 일어나게 된다.

그림 5의 식에서 양자우물 내부의 포텐셜 에너지는  $n$ 에 대한 2차 함수이므로, 전자의 개수에 따라 포물선 그래프로 표시될 것이다.  $V_g$ 가  $q/C$ 의 정수배라고 가정하고  $V_g = kq/C$  ( $k$ 는 정수)를 대입해 보면, 포텐셜 에너지의 최소값은  $n=k$ 일 때 얻을 수 있다.  $n=k+1$ ,  $n=k-1$ 일 때는  $n=k$ 일 때보다  $q^2/2C$  만큼 큰 값을 가지게 된다.

열적요동  $k_B T \gg q^2/2C$ 이고 소스-드레인 전압이  $V_{ds} \ll q/C$ 가 되도록 작게 유지한다면 전자가 터널링 하여 양자우물로 들어

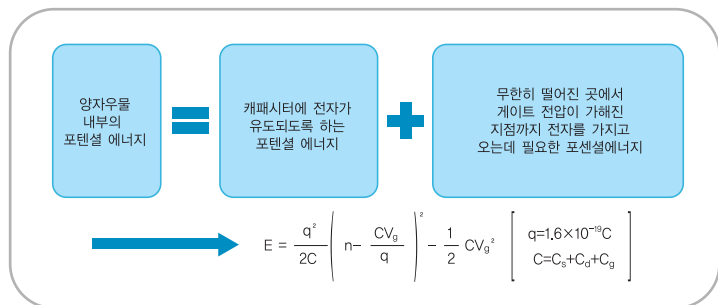


그림 5. 단전자 트랜지스터의 포텐셜 에너지 식

오는데 필요한 에너지를 얻을 수 없기 때문에 양자우물 내부의 전자가  $k$ 개에서  $k+1$ 개 혹은  $k-1$ 개로 변화하는 것이 불가능해진다. 이 현상을 Coulomb Blockade라고 한다.

$V_g = (k+1/2)q/C$  ( $k$ 는 정수)의 경우에는 포텐셜 에너지의 최소값을  $n=k+1/2$ 일 때 얻을 수 있다. 그 때는  $n=k$ ,  $n=k+1$ 상태의 포텐셜 에너지 차이가 없으므로, 터널링이 일어날 수 있는 상태가 된다. 그러므로 게이트 전압 크기가  $q/C$  간격으로 변화할 때마다 전자 하나씩 더 터널링할 수 있는 가능성이 생기게 된다. 이와 같은 결과를 통해 그림 6과 같은 Coulomb Oscillation 현상을 확인할 수 있다.

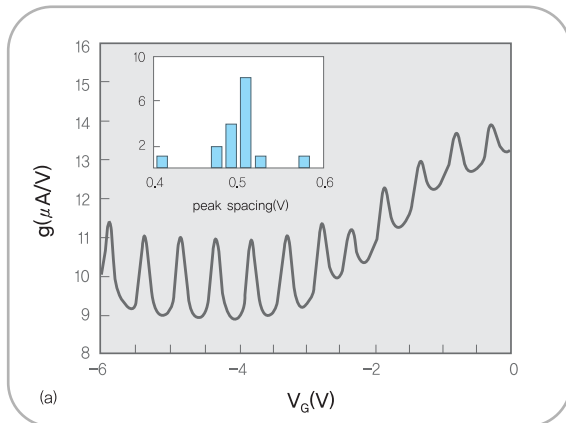


그림 6. 50nm wide silicon nanowire로 만들어진 소자를 4K에서 측정하여 Coulomb oscillation 현상을 보여주는 그래프

## Coulomb Staircase

게이트 전압을 일정한 값으로 고정시켜 놓고 소스-드레인 전압을 변화시켜 가면 어떤 현상이 일어나는지를 설명하고자 한다. 쿨롱 갭(Coulomb gap)은 전자 하나를 양자우물 내부에 끌어들이기 위해 필요한 에너지의 양을 말한다. 즉, 쿨롱 갭  $= q^2/2C$ 이다. 게이트 전압이 고정되어 있는 상태에서 쿨롱 갭 이상의 전류를 소스-드레인 전압으로 가해주면 양자우물 내부로 전자가 이동할 수 있기 때문에 전류가 흐를 수 있게 된다. 쿨롱 갭의 2배, 3배, ... $n$ 배의 전압을 가해줄 때마다 양자우물 내부에 들어올 수 있는 전자의 수가 2개, 3개, ... $n$ 개로

증가한다.

그 각각의 전자가 일정한 확률을 가지고 터널링 한다면 소스-드레인 전압을 증가시킬 때 드레인 전류의 그래프가 그림 7과 같은 계단 형태로 나타나는 것을 볼 수 있다.

과연 소스-드레인 전압을 계속 증가시키면 ‘드레인 전류가 계단 모양의 형태로 계속 증가하며 흐르는가’ 하는 의문이 생기게 된다. 이것은 앞서 본 Coulomb Blockade & Coulomb Oscillation을 고려하면 해답을 찾을 수 있다. 게이트 전압을 가해주는 것이 양자우물 내부에 전자가 들어 올 수 있는 포텐셜 에너지를 제공해 주는 역할을 한다. 따라서 게이트 전압이 전자  $k$ 개를 가둘 수 있을 만큼의 값이라면 아무리 소스-드레인 전압이 크더라도 동시에 양자우물 내부에 들어 올 수 있는 전자의 수가  $k$ 개를 넘을 수 없다. 그러므로 드레인 전류는 게이트 전압에 의해 증가에 대한 상한선을 갖게 된다.

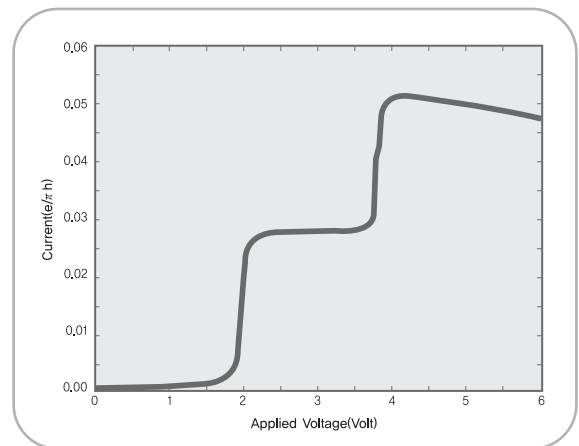


그림 7. Coulomb Staircase 현상

## Ballistic Transport

단전자 트랜지스터에서 양자우물은 적은 수의 전자만 수용할 수 있는 공간이어야 하므로 양자우물은 매우 작은 크기라고 할 수 있다. 양자우물의 크기는 mean free path(자유전자가 다른 입자와 충돌하지 않고 움직이는 평균적인 거리를 뜻함)와 비교할 수 있을 정도로 매우 작다. 이것은 단전자 트랜지스터에서의 전자 움직임을 해석하는데 매우 중요한 요소가

된다. 게이트 전압을 문턱 전압보다 조금 크게 걸었을 때, MOSFET과는 달리 전류값이 2차 함수의 모양을 그리지 않고 중간에 전류가 갑자기 커지는 구간이 생기는데, 이것이 ballistic transport에 의한 것이다. 실제로 나노미터 단위의 나노와이어에서 mean free path보다 소자의 길이가 더 짧아 지게 되므로 이런 현상을 관찰하는 것이 가능해진다. 전자끼리의 충돌이 없으면, 충돌이 있을 때보다 전자의 이동량이 많아지기 때문에 전류가 갑자기 커지는 구간이 생기는데, MOSFET에서 전자의 이동하는 개수가 많아지면 점점 충돌량이 늘어나는 반면, 단전자 트랜지스터는 전자의 이동하는 개수가 많아지더라도 mean free path보다 짧은 구간을 지나기 때문에 충돌이 거의 없게 된다.

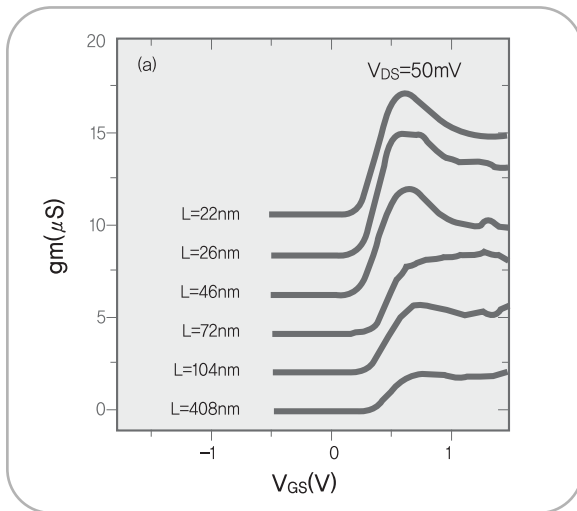


그림 8. 채널 길이가 짧아질 때 Ballistic Transport 현상이 나타남을 보여주는 그래프

이러한 ballistic transport 현상은 그림 8에서와 같은 형태로 나타나며 양자우물의 크기가 매우 작아야 나타난다.

### 측정 방법

단전자 트랜지스터의 특성을 살펴보기 위해서는 그에 맞는 측정 방법이 필요하다. 앞에서 살펴본 Coulomb Oscillation, Coulomb Staircase 등의 현상을 살펴보려면 기본적으로 외부에서 직류전압을 가하여 전류 값을 측정해야 한다. 따라서

전압에 변화를 주고 이에 따른 전류를 측정할 수 있는 장비를 사용하게 된다. 예를 들어 설정에 따라 전압을 변화시켜 전류 값을 읽어 들이는 장비를 사용하거나 직접회로를 구성하여 측정할 수 있다.

특히 앞에서 열거한 현상들은 저온에서 그 특성이 눈에 띄게 나타난다. 온도 변화에 따른 특성을 관찰하거나 저온에서의 현상을 보기 위해서는 온도 제어가 가능한 장비가 필요할 것이다. 주로 77K에서 온도 측정을 할 경우에는 액체 질소를 사용하며, 4.2K에서 측정하기 위해서는 액체 헬륨을 사용한다. 온도를 측정할 때는 그림 9와 같이 외부와의 공기접촉을 차단시키고 온도를 제어하기 위해 실제 액체 헬륨 용기를 사용하거나 고가의 온도 제어기를 사용하기도 한다.

수 mK에서의 측정이 필요한 경우에는 그림 10과 같은 Dilution fridge 장비를 사용할 수 있다. Dilution fridge의 간

	Net Capacity	30liters	30liters
	Gross Capacity	34liters	34liters
	Weight(Empty)	59.3kg	131lbs
	Material of Construction	304SS	304SS
	N.E.R	2.75%	2.75%
	Operating Pressure	69kPa	10PSIG
	Design Pressure*	206.9kPa	30PSIG
	Neck ID	37mm	1.45inches
	Depth(Flange to Bottom)	865mm	34inches
	Outside Overall Diameter	509mm	20inches
	Height	1221mm	48inches
	Maximum Transfer Line O.D.	12.7mm	1/2inch
	Minimum Transfer Line O.D.	9.5mm	3/8inch
	Transfer Line Length For Withdrawal	1094mm	43inches
	Minimum Fill Lance Length	764mm	30inches
	Caster Size	102mm	4inches
	Vent Connection(MNPT)		1/2inch



그림 9. ▲ (1)액체 헬륨 용기  
◀ (2)단추조작으로 온도제어가 가능한 3HE Probe

단한 동작원리를 보면 헬륨은 기본적으로  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ 이 섞여있는데, 헬륨가스가 일정 온도 이하로 내려가면  $^3\text{He}$ 이 많이 분포하는 부분과  $^4\text{He}$ 이 많이 분포하는 부분으로 나누어지게 된다.

여기에서  $^3\text{He}$ 이 많이 분포하는 부분에서  $^4\text{He}$ 이 많이 분포하는 부분으로 '증발' 현상이 일어나게 되면서 매우 낮은 온도를 얻





그림 10. Dilution refrigerator  
(모델명:KelvinoxMX)

을 수 있게 된다.

소자의 크기를 매우 작게 하지 않는 한, 소스-드레인 전압을 충분히 작게 했음에도 불구하고 전자가 소스에서 드레인까지 지나갈 수 있게 된다. 이것은 전자가 얻을 수 있는 온도에 따른 열에너지인 열적 요동이 양자운동 전자가 들어가기 위해 필요한 에너지보다 더 크기 때문에 일어난다. 이 현상 때문에 아직은 상온에서 단전자 트랜지스터의 특성을 관찰하지 못하는 것이다. 그렇기 때문에 소자가 커서 단전자 트랜지스터 특성 자체를 얻기 위해 온도를 낮추는 것뿐만 아니라, 소자가 수 nm임에도 불구하고 극저온까지 측정을 해야 하는 의미가 있는 것이다. 작은 소자에서 온도까지 낮춘다면 더욱 괜찮은 단전자 트랜지스터의 특성이 관찰될 것이라고 기대할 수 있기 때문이다.

## 맺음말

이미 수 나노미터의 미세 소자들이 속속 개발되고 있고, 수십 나노미터 급의 소자들이 상용화된 상황에서, 반도체의 크기가 한계에 부딪힐 것이라는 우려 섞인 전망이 나오고 있다. 그러나 아직 상용화된 소자들에서는 단전자 트랜지스터의 원리를 이용하지 않았으며, 결국 단전자 트랜지스터를 충분히 상온에 가까운 조건에서 동작시킬 수 있다면 이러한 우려를 어느 정도는 해소해 줄 것으로 기대된다. 또한 앞에서는 단전자 트랜지스터에 전압을 가하고 온도를 변화시켜 가면서 특성을 파악했지만, 그 이외에도 자기장을 걸어주어서 스핀의 변화에 따라 나타나는 특성으로도 단전자 트랜지스터를 제어할 수 있으며 이에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 전자 한 개를 제어할 수 있는 것은 우리가 생각해 볼 수 있는 가장 작은 단위의 제어가 아닐까 생각된다.

현재 4년마다 대략 4배만큼의 집적도 향상의 속도를 감안하면 단전자 트랜지스터의 상용화를 위한 노력이 매우 필요할 것이다. 예를 들어 최근 i7프로세서의 45나노미터 급 소자를 이미 상용화한 인텔의 입장에서 보면 단전자 트랜지스터의 상용화는 매우 시급한 실정이다. 10나노미터 급 소자에서 보면 상온에서 단전자 트랜지스터의 특성이 나타난다고 밝혀져 있는데, 그렇다면 대략 4년 후쯤 거의 상온에서 이 특성을 보이는 소자를 만들거나 다른 기술을 사용해서라도 소자의 집적도를 높여야만 기술적 한계에 부딪히지 않는다는 계산이 나온다. 지금까지의 트랜지스터 기술 개발과 단전자 트랜지스터에 관한 지속적인 연구 결과를 본다면 단전자 트랜지스터의 상용화도 그리 멀지는 않았다고 생각된다.

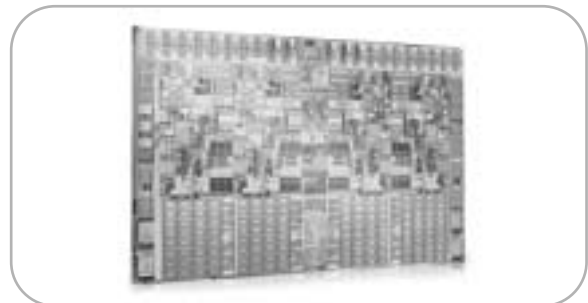



그림 11. Intel® Core™ i7 Processor Extreme Edition

## 감사의 말

본 고는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2009-0083126) 및 세계 수준의 연구중심대학 사업(R3-2008-000-10082-0)의 지원하에 수행되었다. 

## 참고문헌

- [1] S. Babiker et al., "Simulation of Single-Electron Transport in Nanostructured Quantum Dots" IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 52, No.3 (2005)
- [2] T.A. Fulton et al., "Observation of single-electron charging effects in small tunnel junctions", Phys. Rev. Lett, Vol. 59, No.109 (1987)
- [3] Hermann Grabert et al., "Single Charge Tunneling-Coulomb Blockade Phenomena in Nanostructures", Plenum Press (1992)
- [4] AAM Staring et al., "Coulomb-blockade oscillations in disordered quantum wires", Phys. Rev. B Vol. 45, No. 16 (1992)
- [5] Vladimiro Mujica "Current-voltage characteristics of molecular wires: Eigenvalue staircase, Coulomb blockade, and rectification", J. Chem. Phys. Vol.104 (18), No.8 (1996)
- [6] Keun Hwi Cho et al., "Experimental evidence of ballistic transport in cylindrical gate-all-around twin silicon nanowire metal-oxide-semiconductor field-effect transistors", Applied Physics Letters Vol.92, pp.052102 (2008)
- [7] <http://www.cryofab.com>
- [8] <http://www.qdkorea.com>
- [9] <http://www.oxford-instruments.com>
- [10] <http://www.intel.com>