

① 반도체란 무엇인가?

장난감에서 위성에 이르기까지 정보변환 · 처리 · 저장

글 | 이종호 _ 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수 jongho@ee.knu.ac.kr

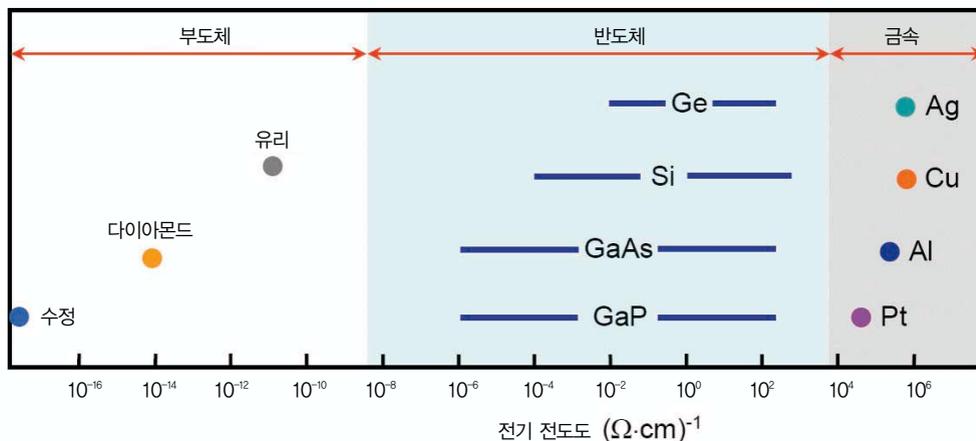
반도체는 20세기에서 오늘에 이르기까지 산업에 큰 영향을 주었으며, 또한 정보화의 엄청난 발전을 가능하게 함으로써 인간의 생활, 문화, 사회에 큰 변화를 가져왔다. 2008년을 기준으로 현재 대략 30대 이하의 젊은 사람은 아마 반도체가 없다면 생활이 어려울 정도로 반도체를 이용한 휴대용 기기, PC 등의 각종 전자기기에 매우 친숙해져 있을 것이다. 이들에게 반도체 없는 세상은 어떻게 보일지 궁금하다.

온도 높이고 빛 비추면 반도체 전도도 향상

반도체 재료는 원소 주기율표에서 4족에 해당하는 저마늄, 실리콘의 단일 재료와 이들을 섞어서 만든 재료가 있다. 또한 3족과 5

족, 그리고 2족과 6족의 원소를 결합한 화합물 반도체가 있다. 기타 반도체 성질을 보이는 화합물이나 산화물 또는 유기물도 있다. 이들 반도체 재료는 각각의 물리적인 특징에 기초하여 각각 특별한 분야에 응용되고 있다. 반도체로 할 수 있는 것은 센서나 액추에이터와 같은 정보변환, 컴퓨터나 디지털신호처리와 같은 정보처리, 그리고 메모리와 같은 정보저장이다.

‘반도체’라는 말은 기본적으로 전도도를 기반으로 하여 나온 것이다. 반도체의 전도도는 금속과 절연체 사이의 어느 영역에 해당된다. 금속이나 절연체는 물질이 정해지면 해당 물질에 대한 전도도는 아래 그림에서 점으로 표시한 것과 같이 하나의 값으로 결정된다. 그러나 반도체의 전도도는 재료에 따라 대략 10^{-8} 에서 10^4 (Ω



절연체, 반도체, 금속에 대한 전기전도도 비교

cm)⁻¹ 범위 내에서 변화된다. 이것이 금속이나 절연체와 다른 반도체의 가장 중요한 기본 특성이라 할 수 있다. 반도체에서 전도도의 변화는 적은 양의 불순물을 적절히 제어하여 반도체내에 도핑시켜서 구현할 수 있다.

반도체의 중요한 다른 기본적인 특징은 온도를 올리게 되면 캐리어(전자나 정공)의 수가 증가하여 전도도가 향상된다는 것이다. 참고로 금속의 경우 온도를 올리게 되면 전기전도도가 높아진다. 반도체의 또 하나의 기본적인 특징은 빛을 비추면 전기전도도가 증가한다. 빛을 비추면 전자와 정공이 쌍으로 생겨 전도도를 증가시키게 되는데, 이를 활용하는 것이 오늘날 널리 사용하는 이미지 센서나 태양전지이다.

이러한 반도체의 기본적인 특성은 고체 내에서의 전자에 대한 양자역학, 특히 1931년 앨런 윌슨이 보고한 띠 이론을 이용하면서 설명이 가능하게 되었다. 결국 그 이전에는 반도체는 이해할 수 없는 비정상적인 것으로 생각한 것이다. 띠 이론을 가지고 간단히 반도체의 기본적인 특성을 설명한 것이 아래 그림이다. 그림의 (a)는 열을 가할 경우 전자가 가전자대에서 전도대로 이동하는 것을 보여주고 있다. 이렇게 되면 전자-정공 쌍이 많아 전도도가 올라간다. 그림(b)는 빛을 비추게 되면 역시 전자-정공 쌍이 형성되어 광전류를 형성할 수 있음을 보여주고 있다. 그림(c)는 p-n 접합에서 정방향 전류를 흘리면 빛이 발생하는 경우를 도식적으로 설명한다.

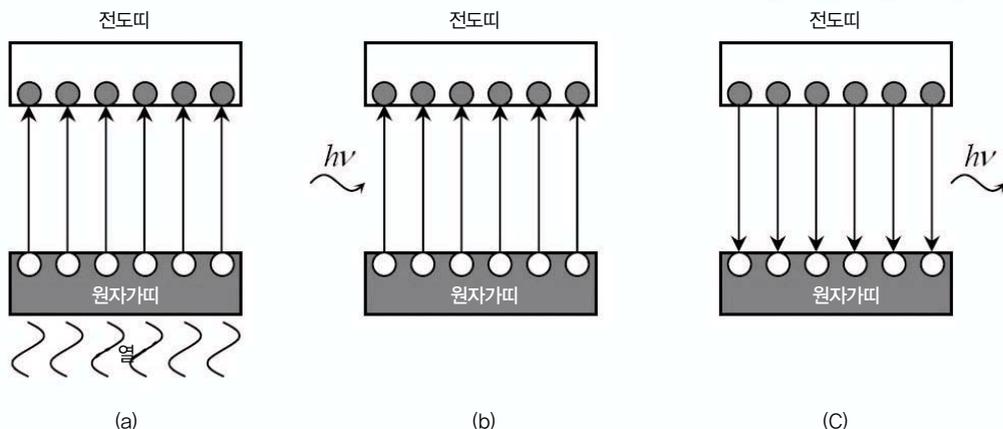
띠 이론, 반도체의 이론적인 설명 기반 제공

반도체 라는 용어는 독일어(halbleiter)로 1911년 처음 사용되었다. 1926년에는 오늘날의 MOSFET의 근간이 되는 FET 개념이 윌

리우스 릴리엔펠트에 의해 특허로 등록되었다. 즉, 반도체 표면가 사이에 금속을 가까이 놓고 전압을 인가하면 전계에 의해 반도체 표면의 전도도가 바뀌는 것이다. 전쟁의 시기인 1930년대는 고주파로 동작하는 레이더의 필요성 때문에 반도체 개발의 전성기를 맞게 되었다. 더불어 1931년에 발표된 띠 이론은 반도체를 비롯하여 금속, 절연체를 이론적으로 설명할 수 있는 기반을 제공하였다.

1940년에는 AT&T 벨 연구소의 리셀 올이 p-n 접합을 발견하였고, 그것이 1941년 세계 2차 대전에 사용되었다. 이 시기에 실리콘 재료의 순도에 따른 문제가 있었고, 순수한 실리콘을 얻기 위한 연구가 수행되었으며, 1942년까지 99.999%의 실리콘 단결정 성장이 가능했다. 1942년에는 고순도의 저마늄도 개발되었다. 저마늄은 실리콘 용융점(1415℃)보다 낮은 온도인 937℃에서 용융되어 단결정으로 만들어 지므로, 그 당시 기술 수준에서 도가니와 반응없이 고순도 단결정을 만들 수 있었다. 따라서 저마늄을 이용한 p-n 다이오드가 레이더 등에 널리 사용되었고, 이후 첫 번째 트랜지스터도 저마늄을 이용하여 제작되었다. 당시 p-n 접합 다이오드가 개발되는 동안 아노드와 캐소드 사이에 그리드를 넣어 증폭을 할 수 있는 3극 진공관의 개념을 고체상태 소자에 적용하고자 하는 생각을 하게 되었다.

FET 개념이 발표된 후 20여 년이 지난 1947년 12월 16일에 AT&T 벨 연구소의 존 바딘과 월터 브래튼이 저마늄 기판에 점 접합을 이용하여 전력증폭이 가능한 트랜지스터 효과를 발견하였다. 최초로 제작된 트랜지스터는 역삼각형의 플라스틱이 저마늄 기판에 살짝 접촉하고 있는데, 플라스틱의 좌우에 금이 저마늄과 금속-반도체 점 접합을 형성한다. 두 개의 점 접합이 가까이 형성되고,



반도체의 띠(band) 이론을 이용한 기본동작 설명

저마늄이 접지된 상태에서 하나의 점 접합은 정방향 바이어스를, 다른 점 접합은 역방향 바이어스를 인가하여 동작시킨다.

접합 트랜지스터의 개념은 1948년 윌리엄 쇼클리가 벨 연구소 노트에 소개하였으며, 1949년에 발표한 논문에는 오늘날 우리가 반도체 소자 교과서에 보는 그 유명한 p-n 접합 및 바이폴라 접합에 대한 이론이 있다. 이들 세 사람은 이 공로로 1956년에 공동으로 노벨상을 수상하였다. 점 접합 트랜지스터보다 접합 트랜지스터가 제조가 용이하고 안정적이고 동작특성이 우수하여 1959년부터 상업화가 되기 시작했다.

한국인 공학자 강대원, 1960년 MOSFET 개발

1950년대에 실리콘 단결정 성장기술이 발전하면서 실리콘 소자도 제작되었다. 실리콘은 저마늄보다 밴드갭이 크기 때문에 열적 안정성이 우수하고, SiO₂라는 양질의 절연막을 쉽게 형성할 수 있는 특징이 있어 MOSFET에 특히 유용하다. 또한 실리콘은 가장 널리 응용되는 반도체 재료이고 쉽게 구할 수 있다. 지구의 지각을 구성하는 원소 중에서 가장 풍부한 것은 46.6%를 차지하는 산소이고, 두 번째가 27.7%를 차지하는 실리콘이다. 반도체의 금속 배선에 많이 사용되는 알루미늄은 세 번째로 풍부한 원소로 8.1%를 차지한다.

1958년에는 TI의 잭 킬비는 고체상태의 기관에 바이폴라 트랜지스터, 저항, 커패시터를 형성하고 와이어로 연결하여 소위 집적회로를 만들었다. 1959년 페어차일드 세미컨덕터에서 장 호에르니와 로버트 노이스가 평탄기술이라는 새로운 기술을 개발하였다. 이것은 실리콘 표면에 여러 개의 개별 부품을 금속 배선을 통해 하나의 웨이퍼 상에 집적하는 기술로, 잭 킬비의 방법보다 효과적이며, 오늘날 집적회로 기술의 근간이 되었다. 이 때 실리콘 웨이퍼에 집적회로가 만들어져 상업화가 되었다. 이와 같이 1950 년대의 반도체 발전은 실리콘 미세전자공학의 시대를 예고하는 계기가 되었다.

1960년에 페어차일드에 의해 평탄기술을 도입한 최초의 IC가 발표되었다. 1960년에는 또 하나의 역사적인 일이 있었다. 벨 연구소에서 존 아탈라와 한국인 강대원이 최초로 성공적으로 동작하는 MOSFET을 제작하여 발표하였다. 1963년에는 페어차일드의 C.T.사와 프랭크 완래스가 저전력이 특징인 CMOS FET를 발표했는데, 이것이 오늘날 주로 양산되는 제조기술이 되었다. 1964년에는 첫 번째 MOS IC가 상용화되었으며, 바이폴라 IC보다 하나의 칩에 더 많은 트랜지스터를 집적할 수 있었다.

1992년 이후 한국 수출 품목 중 1위 유지

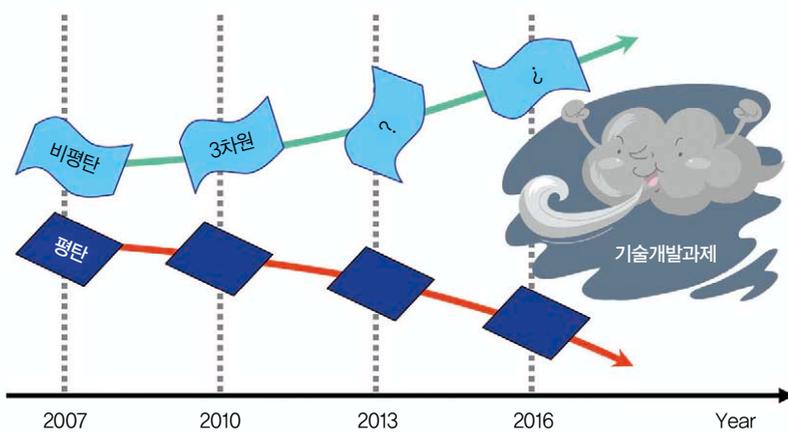
그러면 이러한 반도체가 한국 경제에 어떠한 기여를 했을까. 한국에서는 1965년 미국 코미사의 조립공장을 시작으로, 1973년에는 미국 ICI와 KEMCO에 의해 한국반도체가 설립되어 시계칩을 생산하였다. 한국 정부에서는 1975년 현 ETRI의 전신인 KIET를 설립하여 연구·개발을 시작하였다. 현 이근희 회장이 주위의 만류를 무릅쓰고 1974년에 한국반도체를 인수하여 삼성반도체를 설립하였으며, 결과적으로 국가 발전에 큰 기여를 하게 되었다. 이어 1979년에는 금성반도체가 설립되었다. 또한 1979년에는 아남반도체가 설립되었고, 모토롤라 기술을 도입하여 64k DRAM을 조립하였다.

1981년에 ETRI는 반도체 랩을 설치하여 1989년에는 삼성, 금성, 현대전자(현 하이닉스)와 함께 4M DRAM을 개발하는 쾌거를 이루었고, 이어서 1993년에는 64M DRAM을 개발하였다. 1980년대 말에는 DRAM 분야에서 미국이나 일본에 비해 기술이 앞서가는 결과를 보였다.

삼성전자는 1992년에 8인치 라인을 최초로 가동하여, 1993년 메모리 업계에서 1위에 올랐고, 이후 지금까지 이 분야의 기술을 선도하고 있다. 디지털 저장 분야의 혁명으로 일컬어지는 플래시 메모리 분야에서도 1999년 256M 낸드플래시를 시작으로 해마다 집적도를 2배로 높은 제품을 출시, 황창규 사장의 메모리 신성장론



최초의 점 접합 트랜지스터



미래 반도체 소자구조 및 적층 전망

(황의 법칙)을 입증해 왔다. 삼성전자는 낸드 플래시 메모리 시장에서 2002년부터 1위를 지키고 있고 전체 플래시 메모리 시장에서도 2003년부터 1위에 올랐다.

한국 메모리 역사에서 빼놓을 수 없는 것이 하이닉스이다. 하이닉스 전신인 현대전자가 1983년에 발족되어 삼성, 금성과 더불어 국가 발전에 기여하였다. 그러나 인수합병을 거치면서 2001년 시장악화로 인한 생존위기에 몰렸지만 뼈아픈 구조조정과 자체 노력을 통해 다시 부활하였고, 2007년에는 전년 대비 20.2%의 성장과 전 세계 반도체 업계 7위로 올라섰다. 비메모리 업체로 동부일렉트로닉스와 매그나칩도 끊임없는 노력을 통해 한국 경제발전에 기여를 하고 있다.

1965~1973년은 조립 기술을 받아들이는 수준이었고, 1974~1982년에는 웨이퍼 가공 기술을 흡수하는 정도였다. 1983~1987년에는 공정기술 및 설계기술을 받아들이는 시기였다. 1988년 이후 기술을 자체 개발하기 시작했고, 동시에 DRAM 분야에서 기술을 선도하기 시작했다. 2007년에 한국의 DRAM 시장 점유율은 47%이고 향후 몇 년 동안 계속 매년 수%에서 10% 정도 성장할 것으로 예상된다. 플래시 메모리도 향후 2010년까지 DRAM보다 더 큰 폭으로 성장할 것으로 예상되며, 특히 NAND 플래시 메모리는 그 비중이 높아질 것으로 예상된다.

2006년에 비해 2007년에는 반도체 수출은 약 7% 성장한 약 399억 달러로 보고 있다. 2008년에는 전년 대비 11.7% 늘어난 446억 달러를 전망하고 있다. 반도체 수출은 1992년 이후 한국의 수출 품목 중에서 당당히 1위로 전체 수출액의 10% 이상을 점유하여 국가 경제 발전의 핵심적 역할을 하고 있다. 초창기 그 어려운 환경에

서 한국인들의 부단한 노력에 의해 반도체가 발전할 수 있었고, 결과적으로 한국경제에 큰 버팀목으로 자리 잡을 수 있게 되었다.

실리콘 CMOS 기술, 지속 발전 예상

1965년에 발표된 무어의 법칙이 예견한 것과 같이 반도체는 지난 40여 년간 끊임없이 발전하였다. 무어의 법칙이 실리콘 웨이퍼 크기 변화를 설명하지 못하는 부분도 있기 때문에, 향후 CMOS 기술도 무어의 법칙에서 벗어나 발전할 가능성도 조심스럽게 예상된다. 실리콘 CMOS 기술은 현재 반도체의 핵심기술로 향후에도 계속 발전할 것으로 예상되며, 다만 소자, 적층, 그리고 패키징의 구조가 3차원 형태로 발전할 것으로 예상된다. 발전의 방향은 축소화 및 고집적화로 갈 것이고, 이에 따른 많은 기술적인 도전을 받게 될 것이다.

기존의 평탄채널 구조보다 3차원 구조 소자, 나아가 3차원 집적 기술적인 한계 극복에 보다 능동적일 것으로 예상된다.

필자가 겪은 에피소드 한 가지를 소개한다. 2001년 모 회사의 선행소자팀에 3차원 소자구조, 즉 채널이 평탄하지 않은 소자의 개발에 대한 아이디어와 필요성을 적극 제안하였으나 극심한 반대에 부딪혔다. 재미있는 것은 1년여 후, 가장 반대하던 인사가 3차원 소자의 전도사가 되었다는 것이다. 이는 그만큼 반도체의 변화가 다양해지고 있음을 암시하는 것으로도 볼 수 있다.

미래에는 반도체 기술이 근간이 되고 각종 센서가 융합되는 시대가 올 것이다. 에너지 절약이나 환경친화화의 요구가 높아지면서 화합물 반도체를 이용한 조명기술과 다양한 유무기 재료를 이용한 태양전지 등의 개발이 반도체 기술을 기반으로 이루어질 것이다. 반도체는 간단한 장난감에서 복잡한 로봇이나 통신위성, 환경 친화형 기기 등에 이르기까지 광범위하게 응용될 것이고, 향후 없어서는 안 될 우리의 필수품이 될 것이다. ㉔



글쓴이는 서울대학교에서 박사학위를 받았으며, 현재 경북대 반도체 공학교육센터 부소장을 겸임하고 있다.