

現代를 변화시킨 20대 發明·發見 ⑱

트랜지스터에서 超LSI까지

존 바딘

벨연구소는 반도체 연구팀에게 전혀 새로운 것을 기대했다. 이들이 발명한 것은 트랜지스터였다.

트랜지스터와 거기에서 발전된 고체소자들이 펼쳐 놓은 전자공학의 혁명은 우리가 초기에 생각하던 가장 무모한 ‘꿈’ 보다 훨씬 앞질러서 진행되고 있다. 트랜지스터는 단순히 라디오, TV, 보청기와 그밖의 가전제품에서 진공관과 대치되었을 뿐 아니라 컴퓨터, 통신, 의료용 전기기기, 산업용 제어장치와 같은 분야에서도 진공관으로서는 불가능했던 새로운 응용의 길을 터 놓았다.

트랜지스터는 진공관과 마찬가지로 전기의 흐름을 제어하는데 사용할 수 있는 전기 밸브이며 전기신호를 증폭할 수 있다. 가장 간단한 트랜지스터는 실리콘과 같은 반도체 칩의 서로 다른 3개 부분에 금속전극을 부착시킨 것이며 2개 전극사이로 흐르는 전류가 세번째 전극에 걸린 전압으로 제어되게 되어 있다. 오늘날 트랜지스터의 종류는 많아졌는데 작은 실리콘 칩 위에 수 십만개의 트랜지스터를 집적한 이른바 「원칩 컴퓨터」에서 큰 용량의 전력을 제어하는 장치

에 이르기까지 여러가지다. 그러나 어떤 트랜지스터라도 기본적으로는 電界效果型¹⁾과 ‘바이폴러형’의 2가지 형으로 크게 나뉜다.

트랜지스터는 제 2 차 세계대전 직후 벨연구소에서 착수한 고체재료연구계획의 첫번째 중요결과였다. 당시 양자론은 원자와 전자의 구조로부터 고체의 특성을 이해할 수 있는 길을 텃다. 학제적인 연구를 통해 고체에 대한 이해를 충분히 두텁게 하면 「완전히 새롭고 개량된 통신시스템의 부품과 장비에 쓰일 수」 있는 신소재의 설계·제작이 가능하지 않을까 하는 기대를 걸고 있었다. 반도체 연구는 이런 노력중의 중요한 분야였다.

월터 브래틴(Walter Brattain),²⁾ 윌리엄 쇼클리(William Shockley)³⁾ 그리고 나⁴⁾를 포함해 트랜지스터를 발명한 3명 외에도 이 반도체 그룹에서 뒤에 실리콘 태양전지를 발명한 물리학자 제럴드 피어슨(Gerald Pearson)과 물리화학자인 로버트 기브니(Robert Gibney)가 있

었다. 1936년 벨에 입소한 쇼클리가 이 그룹의 책임자였다. 쇼클리와 나는 고체의 양자론 분야에서 연구를 한 경력이 있었다. 브래틴은 1929년 이래 벨에서 일하고 있었는데 반도체에 대해 오랜 경험이 있었다. 그는 대학원에서 양자론 과정을 이수했으며 이에 대한 관심을 계속 지니고 있었다. 나는 1945년 가을 이 그룹이 결성될 때 벨에 입소했다.

우리들 중에서 전쟁중 반도체 연구에 종사한 사람은 아무도 없었다. 그래서 이 분야를 따라잡기 위해 벨 연구소의 전통에 따라 연구그룹을 만들었다. 우리는 전쟁중 레이다 검파기용으로 쓰기 위해 실리콘과 게르마늄에 관한 연구가 발전한데 큰 감명을 받았다.

차 례

(1900 - 1919)

- (1) 플라스틱이 바꾼 세계
- (2) IQ 테스트와 함정
- (3) 아인슈타인의 멋진해
- (4) 혈액형발견이 구제할 듯한 인명
- (5) 수의 재판
- (6) 휴지통에서 나온 진공관
- (7) 식량증산의 길을 튼 잡종옥수수
- (8) 진공소제기에서 揚力을 얻은 현대 항공술

(1920 - 1939)

- (9) 산업발전을 떠받친 發明의 수레바퀴
- (10) 제 2의 의학혁명
- (11) 人類의 뿌리를 밝힌 타우의 어린이
- (12) 原子를 깬 이야기
- (13) 宇宙의 始初를 찾다
- (14) DDT가 깨버린 알꺃질
- (15) TV時代의 幕을 올린 튜브

(1940 ~ 1959)

- (16) 女性을 解放시킨 避妊劑
- (17) 現代科學의 얼굴 - 컴퓨터
- (18) 藥物로 고친 精神病
- (19) 트랜지스터에서 超LSI까지
- (20) 2重나사선이 펼친 新世界
- (21) 레이저가 연 光産業

진공관은 레이다에 쓰일만한 고주파에서는 작동하지 않았기 때문에 초기에 라디오에 사용되던 '고양이의 수염' 검파기를 개량하는 노력을 했다. '고양이의 수염'이라는 것은 반도체 표면과 접촉된 가느다란 와이어로 되어 있었으며 이것은 전류를 한쪽 방향으로 쉽게 통과시키지만 반대방향으로는 전류의 흐름을 저지하는 정류⁶⁾용 전극을 형성 했다. 전쟁 직전에 벨연구소에서는 중전에 쓰이던 방연광 보다는 고르고 신뢰성이 높은 것을 찾기 위한 연구를 했다. 이리하여 전쟁중 여러 연구소에서 실리콘과 게르마늄에 대한 재료의 준비와 이해에 큰 진전을 보았으며 이것은 트랜지스터 발명에 없어서는 안될 기반이 되었다. 우리는 언젠가는 반도체를 증폭하는 방법을 배우게 되기를 기대하면서 이 재료연구에 노력을 집중하기로 결정했다.

반도체속의 원자들은 결정격자⁶⁾를 형성하고 있고 원자와 이웃한 원자는 전자의 중개로 화학적 또는 원자가(原子價)⁷⁾ 결합을 하고 있다. 반도체 속을 전기가 전도하기 위하여서는 2 가지 방법이 있다. 그 하나는 원자가 결합에 관여하지 않은 여분의 전자(자유전자)가 움직이는 방법이며 다른 하나는 원자가 결합에서 전자가 빠져 나간 공(정공⁸⁾)이 움직이는 것이다. 전자는 정상적인 부(負)의 전하를 갖고 있어 전계의 영향을 받으며 결정 속을 이동한다. 한편 정공은 정(正)의 전하를 갖고 있어 전자와는 반대 방향으로 이동한다. 이것은 흡사 동전을 한줄로 세워놓고 한쪽 끝의 동전을 하나 제거하면 그 빈공간을 이웃의 동전으로 메워가는 것과 같으며 이것을 되풀이 하면 빈 공간(구멍)이 반대쪽 끝까지 이동하게 되는 것이다.

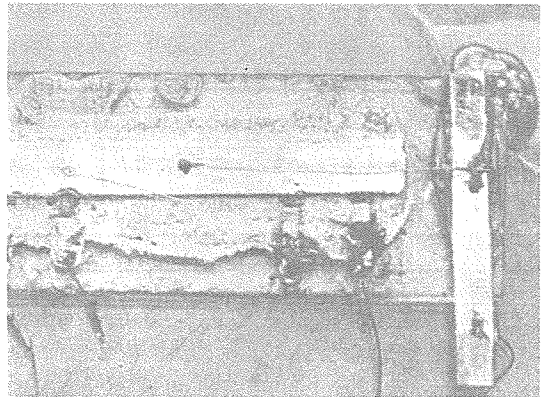
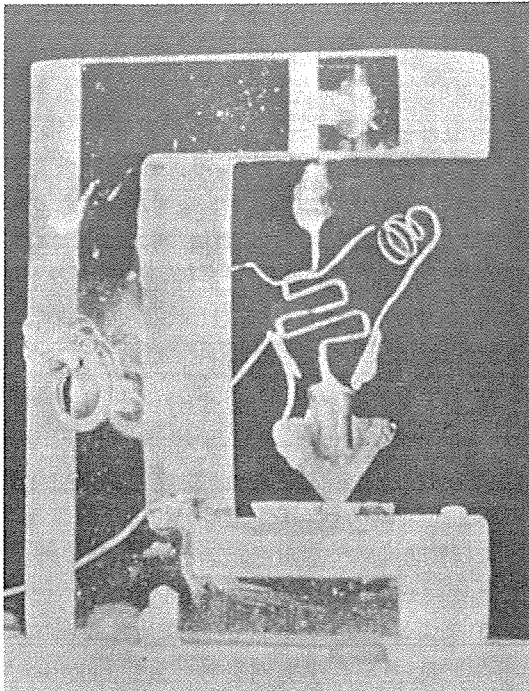
그런데 전류의 캐리어(운반체)⁹⁾가 되는 전도전자나 정공은 순수한 반도체에 불순물을 첨가함으로써 만들 수 있다는 것은 오래 전부터 알려져 있었으나 어떤 불순물을 넣으면 좋은 것인지 거의 알려지지 않았다. 그러나 전쟁중의 연구결과 불순물로서 인과 같은 제V족 원소를 넣으면 불순물은 전자 하나를 방출하여 정의 이온이 되므로 전도전자가 제공되어 n형(negative의

머리글자 n) 이라고 불리는 반도체가 되는 것을 알았다. 한편 보론(붕소)과 같은 제Ⅲ족의 불순물을 넣으면 원자가 결합에 관여하는 전자를 빼앗아가서 부의 이온¹⁰⁾이 된다. 따라서 거기에 생긴 정공이 캐리어가 되는 p형(positive의 머리글자 p)의 반도체가 생긴다.

1945년 쇼클리는 반도체의 박판에 수직으로 전계를 걸어서 캐리어의 수를 제어하는 방식을 제안했다. 이것이 바로 전계효과형 트랜지스터의 원리다. 실험은 얇은 석영판의 위쪽 면에 반도체의 박막을, 그리고 아래쪽 면에 금속막을 증착시키면서 진행되었다. 반도체의 양단에는 전극을 부착 하여 그 사이로 전류가 흐르게 되어 있다. 이렇게 해서 금속막과 반도체막 간에 전압에 따라 캐리어의 수 곧 전류를 제어하는 방식이었다. 쇼클리의 이론에 따르면 이 방법으로 충분히 증폭¹¹⁾ 작용이 일어나야 했으나 여러 번 시도해도 실험은 모두 실패로 끝나버렸다.

내가 벨 연구소에 입소한 얼마 후 쇼클리는 나에게 실험 결과를 검산해 달라고 했다. 내가

▼금접점 사이의 신호를 증폭하기 위해 게르마늄을 사용한 최초의 트랜지스터.



▲1958년 9월 텍사스 인스트루먼츠(TI)사의 재크 킬비가 게르마늄을 사용해서 만든 최초의 집적회로(IC). 이쉴시개크기의 이 웨이퍼는 네오폴의 유리에 아교로 붙였으며 이 유리는 다시 다른 유리와의 접착되었다. 이 회로는 5개의 부품으로 되어 있다.

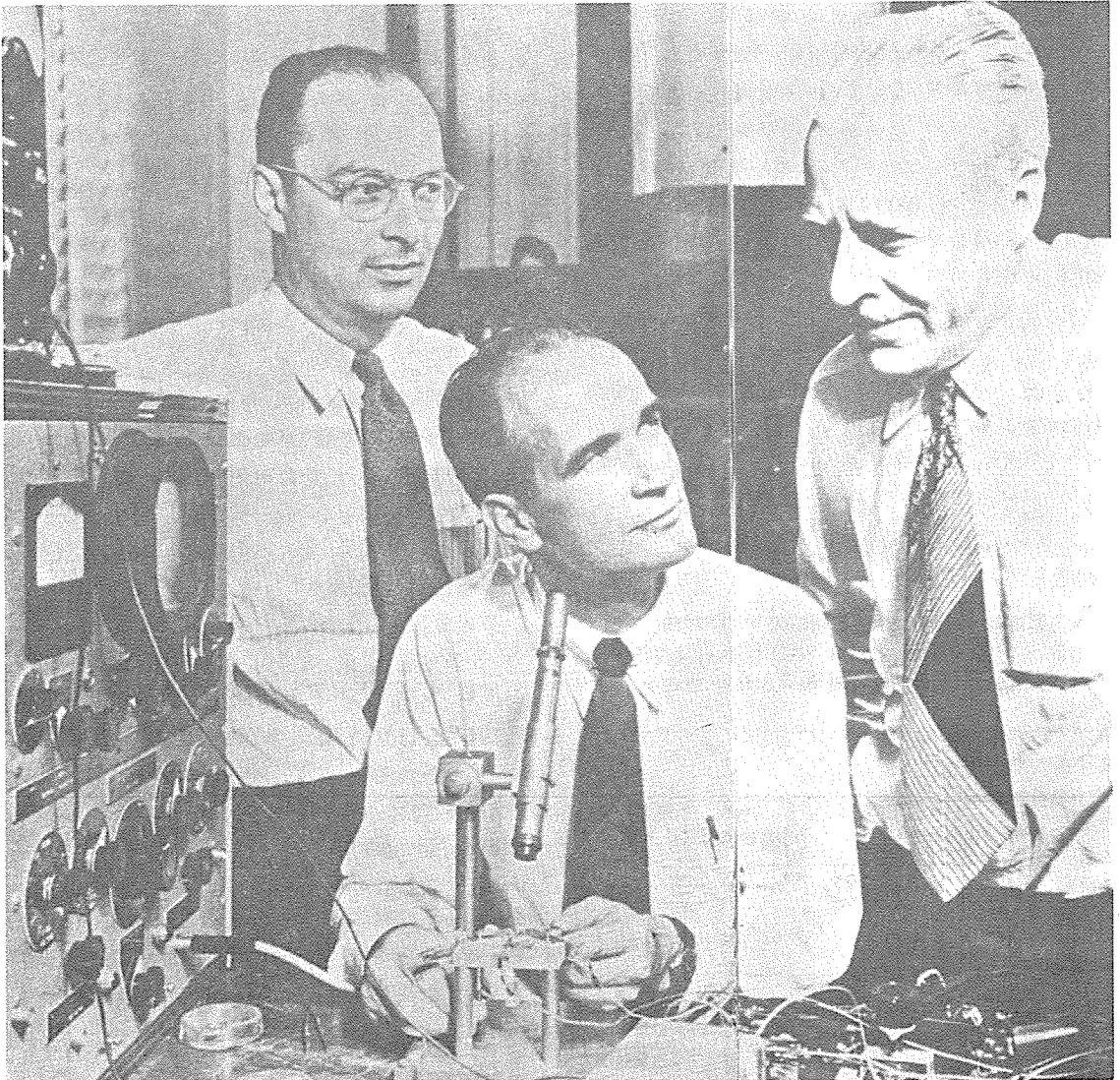
검산한 결과 약간의 효과가 있었다는 것이 드러났다. 다만 이것을 관찰하지 못한 이유는 반도체의 표면상태 때문이라고 생각되었다. 캐리어의 대부분이 반도체 표면에 잡혀 버려 반도체의 내부는 전계에서 차단되어 버린 것이 아닌가 하고 나는 제언했다. 만약 그렇다면 반도체의 표면과 내부 사이에서 전도 타입이 거꾸로 될 수 있다. 예컨대 내부가 n형의 반도체로서 많은 전자가 표면에 잡혀 있다면 표면 바로 밑의 얇은 층에서는 전자가 부족되어 p형이 되어 있을 것이다. 이 층은 오늘날 ‘반전층’이라고 불리고 있다. 브래틴은 실험을 계속 했으며 이것은 이 표면상태의 가설을 확인하는데 도움이 되었다.

브래틴이 기브니와 함께 한 실험중의 하나는 반도체 표면에 전해액을 접촉시킨 뒤 이것을 통해 제어 전압을 걸어주는 실험이었다. 그런데 이때 표면상태 문제는 회피하면서 통과할 수 있다는 것이 밝혀졌다. 이 실험에서 브래틴과 나는 전계효과의 원리가 유효하다는 것을 실증할 새로운 실험을 고안하게 되었다. 우리는 ‘고양이의 수염’ 끝을 n형 게르마늄 표면에 접촉시켜 이것을 제1의 전극으로 하고 제2의 전극은 게르마늄의 뒷면에 넓게 접촉시켜 낮은 저항이 되게 했다. ‘고양이의 수염’에는 왁스의 얇은 층을 씌워 절연시키고 전해질의 액적(처음에는

물, 다음에는 클리콜 봉산염)에 적시도록 했다. 이 액적 속에는 수염과는 별도로 철사의 루프를 넣어서 이것을 제3의 전극으로 만들었다. 그리고 저항의 낮은 쪽에서 높은 쪽으로 향해 '고향이의 수염'에 커다란 부(負)전압을 걸어주었다. 전자가 수염에서 반도체로 이동하기 어렵고 또 n형 반도체 속에는 수염쪽으로 이동하는 정공의 수가 적기 때문에 이 방향에 대한 접촉전압은 높다.

우리는 만약에 반도체표면에 p형의 반전층이 생긴다면 '고향이의 수염'의 전극을 통하는 전류의 대부분은 정공으로 생긴 것이며 이 전공의 흐름은 전해질에 건 전압으로 제어할 수 있을 것이라고 생각했다. 이 실험은 전해질에 건 전압으로 잘 제어할 수 있었다. 이 실험은 반도체가 게르마늄과 실리콘 어느쪽에 대해서도 성공을 거두었다. 그러나 전해질의 반응시간이 늦기 때문에 매우 낮은 주파수의 발진 밖에 얻을

▼ 존 바딘(左), 윌리엄 쇼클리(中), 월터 브래틴(右). 이들이 발명한 트랜지스터는 진공관과 대체되었고, 컴퓨터, 통신, 의료기기, 산업용 제어기기의 새로운 응용의 길을 열어주었다.



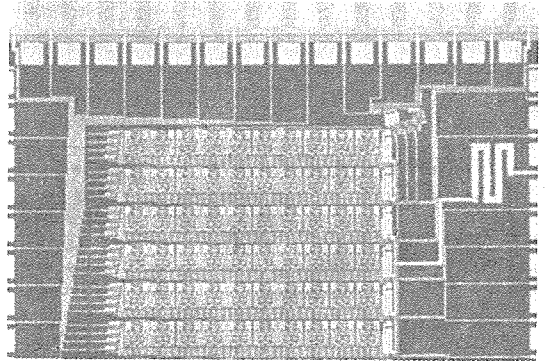
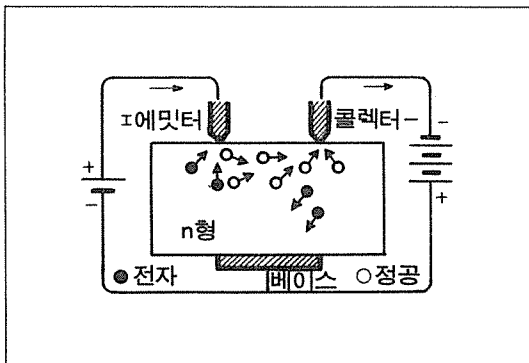
수 없었다.

그래서 반응시간이 늦은 전해질을 피하기 위해 반도체의 산화물층을 사용하기로 했다. 이 층은 반도체표면에 전해질을 떨어뜨렸을 때 그곳에서 성장한다는 것을 알았다. 우리는 우선 산화물층에 금의 점점을 증착시키고 이것과 게르마늄 사이에 산화물층을 가로질러 전압을 걸어보기로 했다(이 원리는 뒷날 금속산화막 반도체(MOS)형 트랜지스터로 발전한다). 그런데 산화물층은 전혀 성장을 하지 않거나 설사 성장한다고 해도 벗겨버려 금의 점점을 게르마늄에서 절연하는 역할을 하지 못했다.

그러나 우리는 금의 점점에 ‘고양이의 수염’을 접근시키면서 실험을 계속했다. 브래틴은 우리의 전계효과의 실험과는 거꾸로 금의 점점에 정전압을 걸면 ‘고양이의 수염’ 쪽을 향해 흐르는 전류가 증가 한다는 것을 발견했다. 그런데 전계효과의 실험에서 그 방향의 전류는 줄어든다고 생각되었던 것이다. 이 실험결과로 정공은 금의 점점에서 게르마늄 속으로 향해 이동하는 한편 일부는 ‘고양이의 수염’ 쪽으로 흘러 전류를 증가시킨다는 것을 비치고 있었다. 이것은 전혀 새로운 원리였으며 부의 전도전자와 정의 정공이 관여하기 때문에 바이폴러(쌍극) 형으로 불리고 있다.

그러나 증폭작용을 얻으려면 더 큰 효과가 필요했다. 우리들은 금의 점점과 ‘고양이의 수염’

▼점접촉형 트랜지스터. 콜렉터에 반대방향의 부전압을 걸어도 전류는 흐르지 않으나 동시에 에미터에 전압을 걸면 콜렉터측에 증폭전류가 흐르게 된다.



▲조셉슨 소자. 꿈의 초고속소자로서 주목을 끌고 있으나 지금까지는 한개의 칩에 집적화할 수 없었다. 그러나 일본 전자기술총합연구소는 최근 칩 한 개에 3백개분의 소자를 집적화하는데 성공했다.

간이 1천분의 2인치(0.05밀리)나 떨어져 있어 이것이 정공의 흐름에 큰 저항이 되고 있다는 것을 알게 되었다. 그래서 브래틴은 플라스틱 나이프를 금박으로 썬 뒤 이 금박을 면도날로 가느다랗게 베어 2개의 슬릿(slit¹²⁾을 만들었다. 이 금박을 게르마늄 본체(베이스¹³⁾)에다 짓눌러 하나의 슬릿(에미터¹⁴⁾)은 적은 正의 전압을 걸고 다른 하나의 슬릿(콜렉터¹⁵⁾)에 큰 부전압을 걸었다. 이때 에미터쪽의 게르마늄속으로 도입된 정공은 베이스 전극으로 향하지 않고 콜렉터로 흘러 콜렉터의 전류가 증가했다. 또 에미터와 베이스 사이에 걸린 신호전압은 크게 증폭된 형태로 콜렉터와 베이스를 연결하는 출력측으로 나왔던 것이다.

우리들은 얼마 뒤 2개의 금박 슬릿대신 2개의 금속칩을 매우 가까이 접근 시켰다. 이것이 최초의 「점접촉형 트랜지스터」였다.

1947년 11월과 12월에 걸쳐 중요한 모든 실험을 마쳤다. 이 새로운 디바이스(소자)의 이름은 당시 벨 연구소의 전기 기사인 J. 피어스(John Pierce)가 붙였다. 브래틴이 어떤 이름을 붙였으면 좋겠는가하고 물었을 때 그는 이 디바이스의 전달저항에 관해 생각하고 있었다. 이 디바이스는 낮은 저항의 입력에서 높은 저항의 출력으로 전류가 전달되는 특성을 갖고 있었다. 그래서 그는 전달(transfer)과 저항(resistance)을 함께 묶어 처음에는 트랜지스터(transresi-

stor) 라고 이름을 붙였으나 뒤에 트랜지스터 (transistor) 라고 줄여서 내어 놓았다. 브래틴은 『바로 그거다!』고 찬성했고 그 뒤 줄곧 ‘트랜지스터’로 불리워지고 있다.

발전은 급속도로 이루어졌다. 그로부터 한 달도 못되어 정공이 에미터에서 콜렉터로 흘러가는 것인지 아직도 확실하지 않았는데 쇼클리는 대담한 제안을 했다. 그는 금속과 반도체의 접점을 p형과 n형의 2종의 반도체의 접합영역으로 매치하면 어떻겠는가란 아이디어를 낸 것이다. 그는 이 디바이스의 작동이론을 완전히 정립하여 1950년에 처음으로 ‘접합 트랜지스터’를 쇼클리가 예측한대로 동작하게 만들었다. 가장 일반적인 npn형 트랜지스터에서는 알박한 p형의 영역이 n형 영역사이에 샌드위치 모양으로

끼인 구조로 되어 있다. 금속의 전극이 3개의 모든 영역에 부착되어 있는데 n형 영역의 하나는 에미터, 다른 하나는 콜렉터로 작용하고 p형 영역은 베이스의 역할을 하고 있다. 오늘날의 바이폴러 트랜지스터는 모두가 접합형으로 되어 있다.

그 뒤 많은 트랜지스터와 전자회로가 실리콘 박막에서 자른 소형 칩 속에 집적된 집적회로(IC)가 등장했다. 1960년대부터 칩 위에 집적할 수 있는 회로의 부품수는 거의 해마다 2배로 불어 나서 오늘날 1백만배로 접근했으나 칩의 코스트는 돈가치가 인플레이션으로 떨어졌으나 예나 지금이나 거의 변함없이 그대로 묶여 있다.

〈註〉

〈玄源福 譯〉

1) 전계(electric field) : 전하(전기현상이 기본이 되는 실체. 전기를 띄운 입자, 또는 전기의 양)의 부근에서 전기력이 작용하는 공간. 정전(靜電)상태에 있는 도체 중에는 전계가 없으며 도체중에 전계가 있으면 전류가 흐른다.

2) 브래틴(Walter Houser Brattain, 1902~) : 미국 물리학자. 중국 아모이 태생. 1928년 Minnesota 대학을 마치고 Bureau of Standards(미국 표준국)에 들어갔으나 1929년 Bell Telephone Laboratories로 옮겨 반도체 연구에 종사했다. 1956년 트랜지스터 연구로 W. Shockley, J. Bardeen과 함께 노벨 물리학상을 받았다. 뒤의 두 사람이 이론 물리학자인데 대해 그는 실험 기술면에서의 공헌자로 알려져 있다.

3) 쇼클리(William Bradford Shockley, 1910~) : 미국 물리학자. 영국 London태생. 1932년 California 공대를 졸업한 뒤 MIT에서 배웠다. 1936년 이후에는 Bell Telephone Laboratories에서 고체물리학, 야금학 전기공학연구에 종사하고 1945년부터는 반도체 연구의 리더가 되어 p-n접합의 전자이론을 전개했으며 접합형 트랜지스터의 기초를 만들었다. 이 업적으로 1956년 J. Bardeen, W. H. Brattain과 함께 노벨물리학상 수상.

4) 바딘(John Bardeen, 1908~) : 미국 물리학자. Wisconsin태생. Wisconsin대학, Princeton 대학에서 배우고 1935년에서 41년까지 Harvard대학과 Minnesota대학교수. 제 2차 대전후 반도체 연구를 시작하여 Bell Telephone Laboratories에 영입되었다. 그는 반도체의 표면현상의 이론적 연구를 했으나 정류층 연구를 하다가 그의 협력자인 Brattain과 함께 최초의 트랜지스터를 완성했다. 이 연구로 W. Shockley, Brattain과

함께 1956년 노벨 물리학 상을 받았다. 1951년 Illinois 대학 교수가 되어 1972년에는 L. N. Cooper, J. R. Schrieffer와 함께 초전도의 이론(BCS 이론)으로 노벨 물리학상을 받아 물리학에서 2 번이나 노벨상을 받은 유일한 과학자가 되었다. 이밖에도 금속, 저온물리, 반도체 연구에서 뛰어난 업적이 많다.

5) 정류(rectification) : 교류전류를 직류로 바꾸는 것. 정류기(rectifier) : 정류를 하는 장치.

6) 결정격자(crystal lattice) : 결정을 만들고 있는 원자·분자의 3차원적 격자모양의 배열.

7) 원자가(valency) : 자유상태에 있는 원자가 결합할 때 그 원자핵의 속박에서 벗어나 결합하는데 관여하는 전자의 수.

8) 정공(正孔 : hole=positive hole) : 절연체나 반도체의 가전자대에 속하는 에너지 상태중 전자가 공석이 되어 있는 것을 일종의 가상적 입자로 생각한 것.

9) 캐리어(carrier) : 반도체 내에서 전하를 운반하는 전자 또는 정공(正孔).

10) 이온(ion) : 전하를 띤 원자.

11) 증폭(amplification) : 전압, 전류나 전력 등의 파형의 진폭변화를 확대하는 것. 트랜지스터나 진공관에 이용한다.

12) 슬릿 slit) : 길쭉한 틈.

13) 베이스(base) : 트랜지스터에서 에미터에 주입된 전자 또는 정공의 양을 제어하는 부분.

14) 에미터(emitter) : 트랜지스터에서 캐리어를 베이스에 주입하는 부분. 진공관의 음극에 해당된다.

15) 콜렉터(collector) : 트랜지스터에서 캐리어를 모으는 적극 또는 영역.