

기초 전자회로

ingyer ks

2021년 3월 21일

차 례

1	이 문서에 대해	5
1.1	문서 작성 경위와 목표	5
1.2	추천 도서 및 문서	5
1.3	피드백	6
1.4	도움을 주신 분들	6
1.5	지식재산권 관련	6
2	기초 반도체공학	9
2.1	기본 이론	9
2.1.1	반도체 재료	9
2.1.2	에너지 밴드	10
2.1.3	페르미 준위	13
2.2	도핑	13
2.3	반도체 내에서의 캐리어 움직임	16
2.3.1	드리프트	17
2.3.2	확산	17
3	다이오드	19
4	다이오드 응용 회로	21
5	MOSFET	23
6	MOSFET 증폭기	25
7	BJT	27

4	차 례
8 BJT 증폭기	29
9 JFET과 다른 소자들	31
10 OPAMP	33
11 각종 응용들	35

제 1 장

이 문서에 대해

1.1 문서 작성 경위와 목표

기초 통신 이론만 쓰다 보니 다른 것도 잠깐씩 해보고 싶었다. 결국 전자기학, 전자 회로/회로이론, 통신을 모두 다루는 게 목표이니까. 전자회로는 사실 어렵지 않다. 라자비나 세드라 같은 두꺼운 책의 절반도 안 되는 분량만 공부하면, 내 생각에 7 급 문제는 다 풀 수 있다. 최근 5개년 정도의 기출문제를 분석해 보았을 때 내린 결론이다. 따라서 원래 이 시리즈를 쓰는 목적에 맞게 실용적인 수험에 도움 되는 글이 되고자 하여 소자들의 기본 원리를 간단히 다루고, 응용 회로에 대해서 간단히만 분석해볼 것이다. 어려운 피드백, 주파수 응답은 제외할 생각이다. 나부터 잘 모르니까. 그리고 미리 고지하지만 필자는 반도체 잘 모른다. 그래서 원리에 틀린 게 많을 터이니 이 글을 보시는 분들은 주의 바란다. 한편, 보통 BJT 다음에 MOS를 배우는 경우가 많은 것 같은데 나는 MOS 먼저 배웠다. Razavi 책도 BJT->MOS 순서와 MOS->BJT 순서 두 개가 있어서 책 양이 거의 두 배가 된 것이다. 내 경험상 MOS 먼저 하는 게 트랜지스터 모델 이해에 도움이 더 되는 것 같아서 나도 MOS 먼저 소개하려고 한다.

1.2 추천 도서 및 문서

더 자세하고 정확한 내용을 원한다면 아래 문서와 책들을 참고하면 좋겠다.

- Floyd. (2019). 전자회로: Electronic Devices (손상희, 강문상, 김남훈,

김민회, 류근관, 정연호, 채용웅, 최채형, 황석승 역). 퍼스트북. (원서출판 2018)

- 이 글의 목적에 가장 가까운 교재이다. 난 본 적이 없는 책이지만 쉽게 설명되어 있다고 들었다. 또한 라자비, 세드라에는 없는 전원회로나 사이리스트 등의 다른 소자도 다루고 있다. 가장 7급에 적합한 책이라 생각한다.

- Razavi. (2015). 마이크로전자회로 (김철우, 김남수, 김종선, 박상규, 백흥기, 이강운, 정성욱 옮김). 한티미디어. (원서출판 2012)
- 내가 학교에서 공부할 때 교재이다. 세드라 대비 적절한 두께와 설명이라고 생각되지만, 그래도 7급 시험용으로는 불필요한 부분이 많다.

1.3 피드백

잘못된 내용을 발견하였거나 무엇이든 제안할 거리가 있다면 아래 경로로 알려주세요.

- ingyer.ks@gmail.com
- [github 레포지토리](https://github.com/ingyer-ks/Book) (<https://github.com/ingyer-ks/Book>)

1.4 도움을 주신 분들

크고작은 도움을 주시는 모든 분들을 지속적으로 여기에 기록해나가고자 한다.

1.5 지식재산권 관련

주로 내가 학교에서 배우며 정리한 노트를 중심으로 내용을 채워갔으니 지식재산권 침해 문제는 없을 것이다.(없길 바란다 $\pi\pi$) 그림들이나 그래프들은 내가 직접 그리거나, 크리에이티브 커먼즈 라이선스 등 사용 조건에 맞는 것들을 찾아서 사용하였다. 가끔 소개할 문제들은 [인사혁신처 사이버국가고시센터](#)와 [서울시인턴넷원서접수센터](#)에 공개되어 있는 문제들이다. 인사혁신처 담당자로부터 비상업적 목적으로 사용하는 것은 문제가 없음을 구두로 확인받았다. 이 문서의 내용 중 내게 권리가 있는 콘텐츠에는 [크리에이티브 커먼즈 저작자표시-비영리 4.0 국제 라이선스](#)

스(CC BY-NC 4.0)가 적용된다.



제 2 장

기초 반도체공학

2.1 기본 이론

2.1.1 반도체 재료

반도체에 사용되는 원소들을 주기율표에서 살펴보면 아래와 같다. 이들의 특징은

							2 He
		5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
		13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	

그림 2.1: 주기율표 상의 반도체 재료들

원자가전자(가장 바깥에 노출되어 있는 전자의 수)가 3 ~ 5개라는 것이다. 가운데 규소(Si)의 경우에는 4개가 있고, 그 왼쪽의 붕소(B)는 3개, 오른쪽의 인(P)는 5개가 있다.

한편, 옥텟 규칙이라는 것이 있다. 많은 원소들이 가장 바깥의 전자 수가 8개가

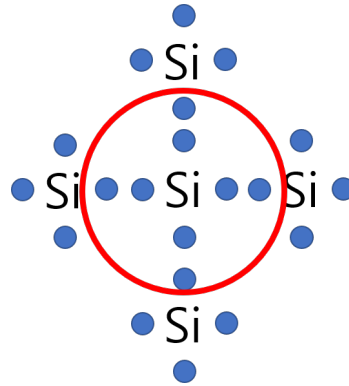


그림 2.2: 규소 결정

되면 좋아라 하는 것이다. 그래서 이름이 옥텟(8) 규칙이다. 규소들 가지고 이 규칙을 만족시킬 수 있을까? 그림 2.2와 같이 규소 한 원자가 이웃들과 전자를 공유하면 어떨까? (파란 동그라미가 전자다.) 가운데 빨간 동그라미 내의 규소를 보면 전자가 8개임을 알 수 있다. 이런 배열이 아주 길게 늘어진다면, (거의) 모든 규소 원자들은 옆의 규소 원자들과 전자를 공유하면서 각자 자신의 최외각 전자 수를 8개로 만들 수 있다. 그리고 각자가 이 상태를 너무나 좋아하기 때문에 서로 떨어지려 하지 않는다. 이렇게 결합되는 것을 공유 결합이라 한다.

2.1.2 에너지 밴드

이러한 공유 결합으로 나타나는 효과를 생각해보자. 양자역학에서 원자핵에 붙들린 전자는 그림 2.3과 같이 우물 속에 있는 것과 비슷하다. 원자핵 하나에 의한 전위는 $V = k\frac{q}{r}$ 형태이다. 가운데 동그라미 원자핵 좌우의 곡선이 이 전위(에너지)를 나타낸다. 어려운 얘기를 생략하자면, 양자역학에서 전자가 가질 수 있는 에너지는 띄엄띄엄 있다. 가운데 빨간색 줄이 그 에너지들을 의미한다. 좌우 간격이 좁을수록 가질 수 있는 에너지 간의 간격이 넓어지고, 간격이 넓어지면 에너지 간격은 줄어든다. 그런데, 규소 결정과 같이 원자들이 늘어서게 되면 어떻게 될까? 다음 그림 2.4를 보자. 양 끝의 전위 곡선 사이의 간격은 멀어졌고, 중간에 전위 곡선들은 옆의 원자핵의 전위 곡선들과 중첩됨에 따라 \cap 형태가 되어 낮아졌다. 이에 따라 에너지 간격이 작아졌고, 결국에는 빨간 상자처럼 에너지들이 연속적인 것처럼 촘촘히 늘어서게 되었다. 이렇게 에너지가 연속적으로 늘어서게 된 것을 에너지 밴드라고 한다. 우리는 반도체 결정을 다루므로 앞으로는 에너지 밴드 개념을 사용할 것이다.

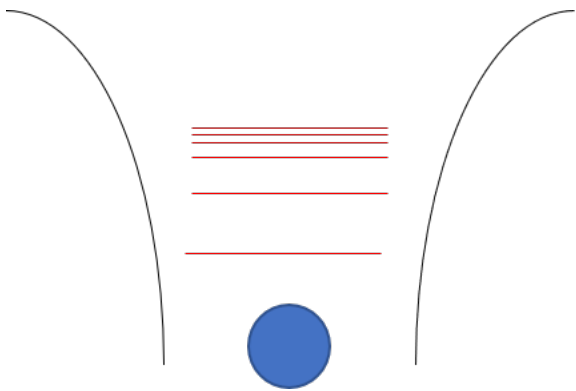


그림 2.3: 원자핵에 의한 에너지 우물

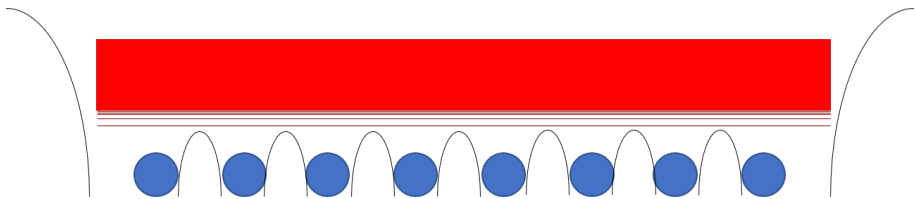


그림 2.4: 규소 결정의 에너지 밴드

한편, 외부의 열에 의해서 전자가 에너지를 충분히 가지면 원자핵의 전기력을 이겨내고 결정 내를 자유롭게 돌아다닐 수 있게 된다. 그림으로 그리면 그림 2.5와 같다.

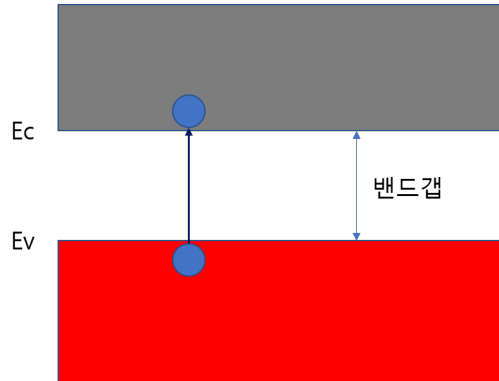


그림 2.5: 에너지 밴드

그림 2.5에서 E_v 는 가전자대역 (Valence Band)라 하고, E_c 는 전도대역 (Conduction Band)라 한다. 전자가 올라가서 자유롭게 움직임에 따라 전기를 흘릴 수 있는 대역이란 뜻이다. 그리고 이 두 대역 사이의 빈 에너지 공간을 금지대역 (Forbidden Band)이라 하고, 이 높이를 밴드갭이라고 한다. 외부 온도가 높아지면 전자가 더 많은 열을 받아서 더 쉽게 이 밴드갭을 뛰어넘을 수 있으므로 온도가 올라가면 자유 전자들이 많아진다.

도체, 반도체, 부도체는 이 밴드갭이 얼마냐에 따라 달라진다. 도체의 경우는 밴드갭이 없거나 작아서 아주 쉽게 전자들이 전도대역으로 올라갈 수 있으므로 전기가 잘 통하는 것이고, 부도체는 이 밴드갭이 너무나 커서 전자가 거의 올라가지 못해서 전기가 흐르지 않는다. 반도체는 그 중간이다.

한편, 기본적으로 물질들은 전기적으로 중성이다. 따라서 가전자대역에 있던 전자가 전도대역으로 올라가면, 그 자리에는 빈 공간이 생길 것이다. 이를 양공 (일본식으로는 정공, 영어로는 hole)이라 한다. 결국 전자가 전도대역으로 올라간다는 것은 전자-양공 쌍 (Electron-Hole Pair)가 생긴다는 뜻이다. 상온(섭씨 25도 정도, 약 300K)에서 전도대역에 있는 전자의 농도는 음 (negative에서 따와서) n_i 라 쓰고, 그 값은 약 10^{10} 개/ cm^3 이다. 반대로 양공은(잘 쓰이지 않지만) 전하가 부족한 상태, 즉 0에서 -가 빠진 상태인 +이므로 positive에서 따와서 p_i 라고 할 수 있겠다. 또한 정공 입장에서의 전도대역은 전자 입장에서의 가전자대역 (E_v)가 될 것이다. 그리고 반도체의 특이한 점 중 하나는 전자와 양공 농도의 관계가 다음과



그림 2.6: 진성 반도체의 페르미 준위

같다는 것이다.

$$n_i p_i = n_i^2 \quad (2.1)$$

전자와 양공 농도의 합이 아니라 곱이 일정하다! 이는 다음에 나올 도핑 상태에서도 마찬가지로 성립한다.

2.1.3 페르미 준위

반도체에서 가장 중요한 개념 중 하나가 페르미 준위이다. 이탈리아의 물리학자 엔리코 페르미가 만든 페르미 준위는 전자가 있을 확률이 0.5가 되는 에너지 레벨을 의미하고, E_F 라 쓴다. 지금까지 우리는 도핑되지 않은 순수한 규소로 된 반도체를 다루었는데, 이를 진성 반도체 (intrinsic semiconductor) 라 한다. 진성 반도체의 페르미 준위는 E_i 라 표기하고, 위치는 금지대역의 가운데 즉 E_c 와 E_v 의 평균이다. 이 페르미 준위로부터 반도체의 많은 성질들이 설명된다. 페르미 준위가 어떤 역할을 하는지 차차 살펴보자.

2.2 도핑

도핑이란 진성 반도체에 뭔가를 넣는다는 뜻이다. 운동선수들이 약을 몸에 넣는 불법행위를 하면 도핑한다고 하는 것을 떠올려보자.

N타입 도핑

먼저 인(P)을 규소 결정에 집어넣어 보자. 인은 규소의 오른쪽에 있으므로 전자가 하나 더 많다. 따라서 그림 2.7과 같이 될 것이다. 전자는 음의 전기(Negative)를 띠므로 이 반도체를 N 타입 반도체라고 한다. 또한 전자를 제공한다는 의미에서 인을 도너(Donor)라고 한다. 보라색 잉여 전자가 하나 생겼다.

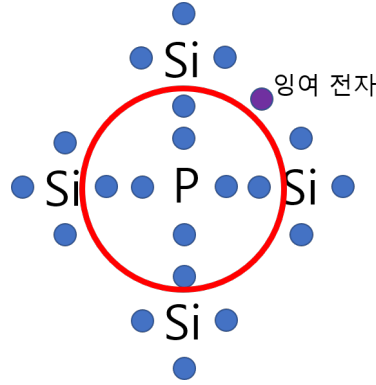


그림 2.7: 인으로 도핑된 반도체

이 잉여 전자는 자유롭게 결정 내를 돌아다닐 수 있다. 즉 전도대역에 있는 전자가 많아지는 것이다. 이를 수학적으로 표현하는 방법이 바로 페르미 준위이다. 진성 반도체에서는 전자의 존재 확률이 0.5인 지점이 가운데 있었는데, 전도대역에 전자가 더 많이 존재하므로 전자의 존재 확률이 0.5가 되는 지점은 더 위에 있을 것이다. 즉 페르미 준위가 위로 올라가는 것이다. 그림으로 그리면 그림 2.8과 같다. N 타입 반도체에서는 진성 상태보다 전자의 수가 양공보다 많을 것이다. 이렇게 도핑된 반도체에서 더 많은 쪽을 다수 캐리어(Majority carrier)라 하고, 더 적은 쪽을 소수 캐리어(Minority carrier)라고 한다. 도너의 도핑 농도를 N_D 라 하고, N 타입에서의 전도대역 전자 농도를 n_n , 양공 농도를 p_n 이라고 하자. 이 때 $n_n \cong N_D$ 가 성립한다(즉 도핑한 농도만큼 전도대역 전자 농도가 된다). 그러면 이와 더불어 식 2.1에 의해 다음과 같은 수식이 성립한다.

$$n_n p_n = n_i^2 \Rightarrow p_n = \frac{n_i^2}{N_D} \quad (2.2)$$

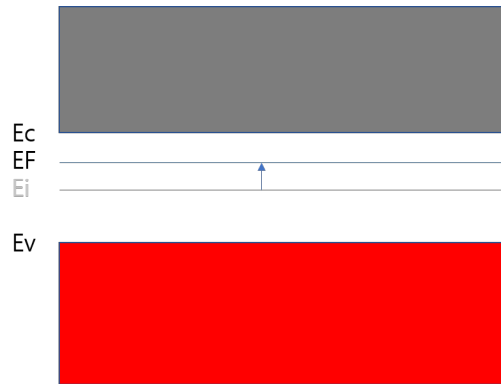


그림 2.8: N 타입 반도체의 페르미 준위

P타입 도핑

이번에는 붕소(B)를 집어넣어 보자. 붕소는 규소의 왼쪽에 있으므로 전자가 하나 부족하다. 즉 전자를 받아들일 수 있는 것이다. 그런 의미에서 이 때의 붕소를 억셉터(Acceptor)라고 한다. 그리고 이 반도체를 positive에서 따와서 P 타입 반도체라고 한다. 그림으로 그리면 그림 2.9와 같다.

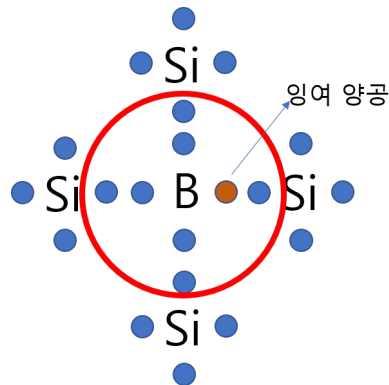


그림 2.9: 붕소로 도핑된 반도체

이 양공은 전자를 받아들일 수 있는데, 그 전자는 어딘가에서 온 것이므로 전자를 받아들이면 그 전자가 출발한 곳에 또 전자가 하나 부족하게 된다. 이를 반대로 해석하면 양공이 전자와 반대 방향으로 옮겨다니는 것으로 해석할 수 있다. 즉 양공 입장에서 전도대역(전자 입장에서 가전자대역)에 양공이 많아지는 것이다. 페르미 준위는 전자 존재 확률이 1/2인 곳이라 했는데, 이는 양공 존재 확률도 1/2라는



그림 2.10: P 타입 반도체의 페르미 준위

뜻이므로, 양공이 E_v 에 더 많이 존재하게 된 지금 페르미 준위는 E_v 에 더 가까워질 것이다. 그림으로 그리면 그림 2.10과 같다. P 타입 반도체에서 전자 농도를 n_p , 양공 농도를 p_p 라 하자. 또한, N 타입에서와 마찬가지로 도핑된 억셉터 농도 N_A 와 가전자대역에 있는 정공 농도는 거의 같다($p_p \cong N_A$). 따라서 다음 수식이 성립한다.

$$n_p p_p = n_i^2 \Rightarrow n_p = \frac{n_i^2}{N_A} \quad (2.3)$$

2.3 반도체 내에서의 캐리어 움직임

카x라이더란 게임을 해 보았다면 드리프트란 이름이 익숙할 것이다. 미끄러지는 것이 바로 드리프트 아닌가? 마찬가지로 전자나 양공도 드리프트를 할 수 있다. 드리프트만 하는 것이 아니다. 캐리어들이 서로 부딪치다 보면 결국엔 농도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 움직이게 되는데, 이를 확산이라 한다. 이 두 메커니즘을 살펴보자.

2.3.1 드리프트

먼저 자유 공간에서의 전자 움직임을 생각해보자. 힘이 일정하게 주어질 때 다음 수식이 성립한다.

$$\begin{aligned}\vec{F} &= -q\vec{E} \\ \vec{a} &= \frac{\vec{F}}{m_e} = -\frac{q\vec{e}}{m_e} \\ \vec{v} &= \vec{a}t + \vec{v}_0 \\ &= -\frac{q\vec{E}}{m_e}t + \vec{v}_0\end{aligned}$$

그런데, 반도체 내에서는 전자가 자유롭게 움직이지 못한다. 규소나 도핑된 원자핵에 부딪히기도 하고, 서로간에 부딪히기도 한다. 따라서 마치 마찰력이 있는 상황 처럼 된다. 이 때의 캐리어의 속도는 다음과 같이 전기장에 비례한다.

$$\vec{v}_{drift} = \mu\vec{E} \quad (2.4)$$

위에서 μ 는 이동도(mobility)라고 한다.

한편 전류란 것은 단위시간당 어떤 면을 통과하는 전하량이므로, 캐리어가 많을수록, 캐리어가 빨리 이동할수록 전류는 커진다. 그리고 전류를 단위면적으로 나눠서 생각한 전류밀도는 결국 캐리어의 농도와 속도와 단위 전하량의 곱이 될 것이다. 그리고 전자는 음전기를 띠므로 전기장의 반대 방향으로, 양공은 양전기를 띠므로 전기장 방향으로 움직인다. 수식으로 정리하면 전자의 전류 밀도 $J_{n,drift}$ 과 양공에 의한 전류 밀도 $J_{p,drift}$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}J_{n,drift} &= n(-\mu_n E)(-q) = n(\mu_n E)q \\ J_{p,drift} &= p(\mu_p E)q \\ J_{total,drift} &= q(\mu_n n + \mu_p p)E\end{aligned}$$

2.3.2 확산

두 번째 캐리어의 움직임은 확산이다. 캐리어들은 무작위로 움직이며 서로 부딪히는데, 만약 위치에 따른 농도차가 있다면 전체적인 움직임은 농도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 향하여 결국 평형 상태에선 농도가 고르게 되려 할 것이다. 그림으로 생각해보자. 그림 2.11에서 왼쪽 상자 내의 입자들 농도를 n_1 이라 하고, 오른쪽 상자 내의 입자들 농도를 n_2 라 하자. 상자의 높이는 농도를 의미한다. 즉 $n_1 > n_2$

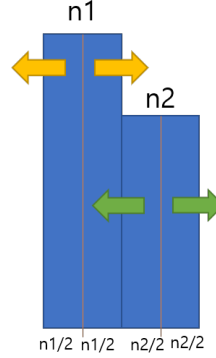


그림 2.11: 농도차가 있는 상태에서 입자의 움직임

인 상황이다. 이 때, 무작위로 움직인다고 했으니 각 상자의 절반은 각자 왼쪽과 오른쪽으로 움직인다. 왼쪽 상자의 왼쪽 절반인 $n_1/2$ 는 왼쪽으로, 오른쪽 절반인 $n_1/2$ 는 오른쪽으로 간다. 오른쪽 상자도 마찬가지로 왼쪽 절반인 $n_2/2$ 는 왼쪽으로, 오른쪽 절반인 $n_2/2$ 는 오른쪽으로 움직인다. 이 때, 두 상자 가운데 지점에서의 순수 입자 이동량을 생각해보면 오른쪽으로 $(n_1 - n_2)/2$ 가 될 것이다. 이로써 입자들은 농도가 높은 쪽에서 농도가 낮은 쪽으로 이동함을 설명할 수 있다.

1차원(x방향)에서 단위 길이당 전자의 농도차는 $\frac{dn}{dx}$ 이고 단위 길이당 양공의 농도차는 $\frac{dp}{dx}$ 이다. 그리고 농도차의 반대 방향으로 움직이므로 움직임의 부호는 이들 농도차에 -가 붙어야 할 것이다. 그리고 농도차에 대한 전자와 양공 각각의 비례상수인 확산 계수 D_n, D_p 가 있을 것이다. 여기에 전하량을 곱해주면 전류밀도가 된다. 수식으로 정리하면 다음과 같다.

$$J_{n,diff} = -(-q)D_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_{p,diff} = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

$$J_{total,diff} = q(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx})$$

2.3.3 아인슈타인 관계식

언뜻 보면 드리프트와 확산은 서로 상관이 없을 것 같다. 하지만 아인슈타인은 그렇지 않음을 증명했다. 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q}$$

즉 같은 온도에서는 드리프트의 비례상수(이동도)와 확산의 비례상수(확산 계수)가 같은 비율로 움직인다는 뜻이다. 반도체 책에서는 이 수식을 유도하지만, 여기서는 증명하지 않고 넘어가겠다.

제 3 장

다이오드

제 4 장

다이오드 응용 회로

제 5 장

MOSFET

제 6 장

MOSFET 증폭기

제 7 장

BJT

제 8 장

BJT 증폭기

제 9 장

JFET과 다른 소자들

제 10 장

OPAMP

제 11 장

각종 응용들