

## 기초 전자회로

ingyer ks

2021년 3월 21일



# 차 례

<b>1</b>	<b>이 문서에 대해</b>	<b>5</b>
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
<b>2</b>	<b>기초 반도체공학</b>	<b>9</b>
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
<b>3</b>	<b>다이오드</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>다이오드 응용 회로</b>	<b>19</b>
<b>5</b>	<b>MOSFET</b>	<b>21</b>
<b>6</b>	<b>MOSFET 증폭기</b>	<b>23</b>
<b>7</b>	<b>BJT</b>	<b>25</b>
<b>8</b>	<b>BJT 증폭기</b>	<b>27</b>
<b>9</b>	<b>JFET과 다른 소자들</b>	<b>29</b>

4	차 례
10 OPAMP	31
11 각종 응용들	33

## 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](mailto: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

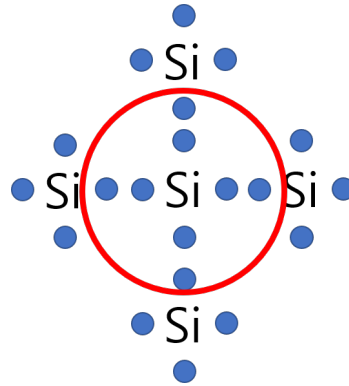


그림 2.2: 규소 결정

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.

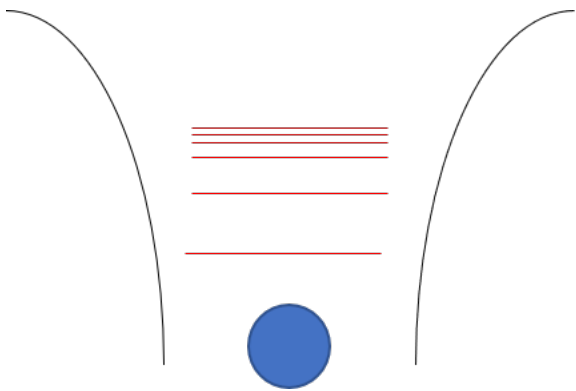


그림 2.3: 원자핵에 의한 에너지 우물

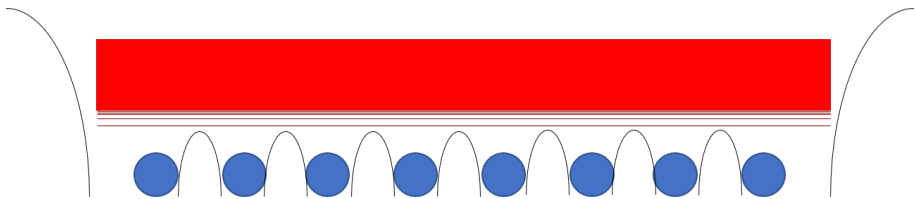


그림 2.4: 규소 결정의 에너지 밴드

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

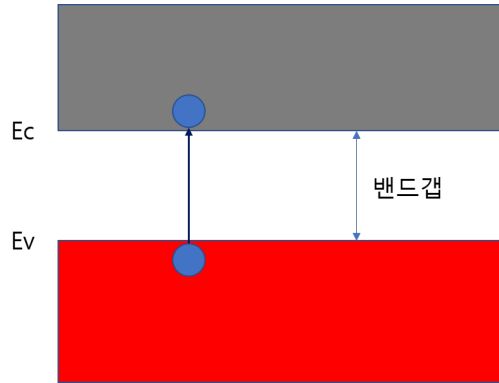


그림 2.5: 에너지 밴드

$E_v$ 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.

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 같다는 것이다.

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



그림 2.6: 진성 반도체의 페르미 준위

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 띠

므로 이 반도체를 N 타입 반도체라고 한다. 또한 전자를 제공한다는 의미에서 인을 도너(Donor)라고 한다. 보라색 잉여 전자가 하나 생겼다. 이 잉여 전자는 자유롭게

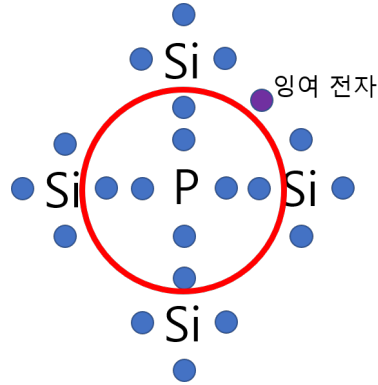


그림 2.7: 인으로 도핑된 반도체

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



그림 2.8: N 타입 반도체의 페르미 준위

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, N타입에서의 전도대역 전자

농도를  $n_n$ , 양공 농도를  $p_n$  이라고 하자. 이 때  $n_n \cong N_D$ 가 성립한다(즉 도핑한 농도만큼이 전도대역 전자 농도가 된다). 그러면 이와 더불어 식 2.1에 의해 다음과 같은 수식이 성립한다.

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

### P타입 도핑





## 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