IT@CookBook

핵심이 보이는 반도체 공학(2판)

연습문제 정답

한빛아카데미 Hanbit Academy, Inc.

Chapter 01

1.1

- 만유인력이 작용하는 힘의 장 : 중력장
- 중력의 원천 : 질량(m)
- 정전기력이 작용하는 힘의 장 : 전기장
- 정전기력의 원천 : 전하량(Q)
- 두 힘 모두 힘의 원천이 되는 물리량에 비례하고, 거리의 제곱에 반비례하는 유사성을 갖는다.

1.2

표 1-1 원자의 구성요소인 전자, 양성자 및 중성자의 전하량과 질량의 비교

원자의 구성요소	전하량	질량
전자	$-1.602 \times 10^{-19}\mathrm{C}$	$9.109 \times 10^{-31}\mathrm{kg}$
양성자	$+1.602 \times 10^{-19}\mathrm{C}$	$1.673 \times 10^{-27}\mathrm{kg}$(전자의 약 1,837배)
중성자	중성	$1.675 \times 10^{-27}\mathrm{kg}$(전자의 약 1,839배)

1.3 생략

1.4

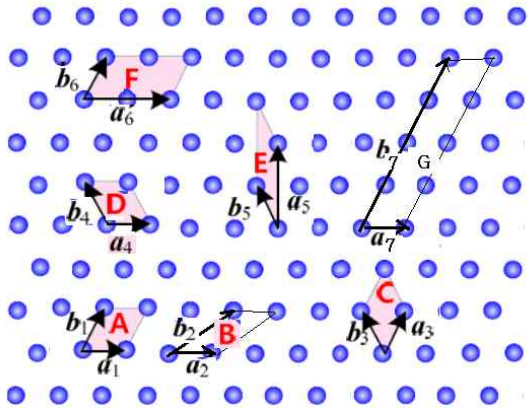
- 전기음성도 : F(3.98), O(3.44), N(3.04), H(2.20)
- 이온결합인 경우 전기음성도 차이 : 2.0 이상

1.5

- 물질의 전기전도율 : 은(Ag)의 $6.1 \times 10^{7}\ \Omega^{-1}\mathrm{m}^{-1}$에서 석영의 $\sim 10^{-17}\ \Omega^{-1}\mathrm{m}^{-1}$까지 약 10^{24}의 광범위한 변화
- 실리콘 전기전도율 : $4.4 \times 10^{-4}\ \Omega^{-1}\mathrm{m}^{-1}$
- 게르마늄의 전기전도율 : $2.2\ \Omega^{-1}\mathrm{m}^{-1}$

1.6 생략

1.7

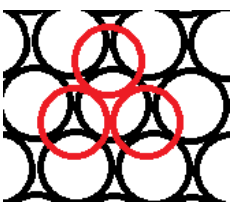


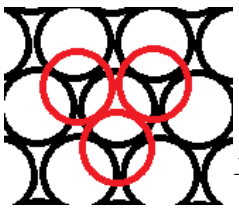
1.8

- 원자의 표면농도 : $\frac{1\text{개}}{a^2} = \frac{1\text{개}}{(5\times10^{-8}\text{cm})^2} = 4.00\times10^{14}\text{개/cm}^2$
- 원자의 체적농도 : $\frac{2\text{개}}{a^3} = \frac{2\text{개}}{(5\times10^{-8}\text{cm})^3} = 1.60\times10^{22}\text{개/cm}^3$

1.9

- 공통점 : 한 층에 촘촘하게 쌓인 원자의 홈 속에 그다음 층의 원자들이 들어가 쌓이는 형태가 반복된다는 것이다. 그림과 같이 한 층을 쌓게 되면, 하나의 원자 주위에 6개의 홈이 생기며, 이 홈에 원자들이 들어가는 방법이 그림 (a)와 (b)의 두 가지가 가능하다.
- 차이점 : 입방 최조밀 쌓임(ccp) 구조에서는 ABCABC 형태로 층이 쌓이고, 육방 최조밀 쌓임(hcp) 구조에서는 ABABAB 형태로 층이 쌓임


그림(a)


그림(b)

1.10

- 배위수 : 어떤 결정격자에서 한 원자(또는 이온)를 둘러싸고 있는 최단 거리의 원자(또는 이온)의 수
- 단순입방 : 배위수 6
- 체심입방 : 배위수 8
- 면심입방 : 배위수 12

1.11

- 실리콘의 밀도 : $(\frac{4.997\times10^{22}\text{개}}{\text{cm}^3})(\frac{4.664\times10^{-23}\text{g}}{\text{개}}) = 2.331\ \text{g/cm}^3$

1.12

(a) (010) (b) (101) (c) (110) (d) $(1\bar{1}1)$ (e) (326)

1.13

(a) [100] [010]

(b) [110] [011]

(c) $[1\bar{2}0]$ [121]

1.14

(a) $1.31\times10^{-21}\text{g/단위 셀}$ (b) $6.79\times10^{-23}\text{cm}^3$ (c) $4.08\,\text{Å}$

(d) $1.44\,\text{Å}$ (e) $1.20\times10^{15}\ \text{개/cm}^2$ (f) $5.89\times10^{22}\ \text{개/cm}^3$

1.15

(a) $3.731\times10^{-22}\text{g/단위 셀}$ (b) $1.60\times10^{-22}\text{cm}^3$ (c) $5.43\,\text{Å}$

(d) $1.18\,\text{Å}$ (e) $6.78\times10^{14}\ \text{개/cm}^2$ (f) $5.00\times10^{22}\ \text{개/cm}^3$

1.16

구분	단순입방	체심입방	면심입방	다이아몬드
단위셀 당 원자 수	1	2	4	8
원자반경	$\frac{a}{2}$	$\frac{\sqrt{3}a}{4}$	$\frac{\sqrt{2}a}{4}$	$\frac{\sqrt{3}a}{8}$
셀 충전 비율	52%	68%	74%	34%

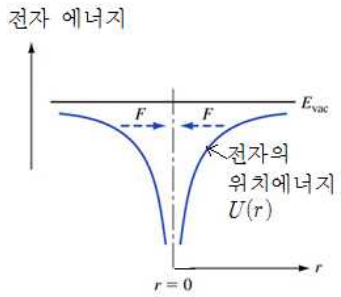
1.17

- In 원자가 차지하는 자리 수 : $(0.2)\times(3\times10^{22}) = 6\times10^{21}$개
- Ga 원자가 차지하는 자리 수 : $(0.3)\times(3\times10^{22}) = 9\times10^{21}$개
- Al 원자가 차지하는 자리 수 : $(0.5)\times(3\times10^{22}) = 1.5\times10^{22}$개

Chapter 02

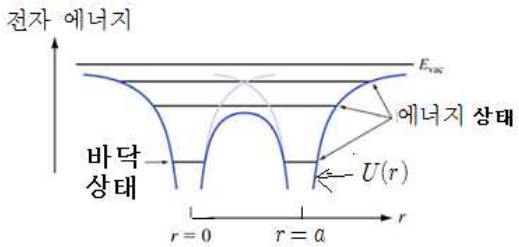
2.1

- $U(r) = (-e)\,V(r) = -\dfrac{e^2}{4\pi\epsilon_o r} + e\,V(r_o) = -\dfrac{e^2}{4\pi\epsilon_o r} + E_{vac}$



[그림] $r=0$인 지점에 한 개의 양전하가 위치할 때 전자에 대한 위치에너지 장벽 분포 $U(r)$

2.2



- 일함수 : (설명 생략) $hf_0 = E_0 - E_A$

2.3 생략

2.4 $-4[\mathrm{V}] > \mathrm{V} > -5[\mathrm{V}]$

2.5 생략

2.6

- 빨간색 : 2.067eV
- 파란색 : 2.756eV

2.7 $T = \dfrac{\pi}{60}\,\mathrm{s}$, $\omega = 120\ \mathrm{rad/s}$

2.8 $\lambda = \frac{\pi}{60}$ m, $k = 120$ rad/m

2.9

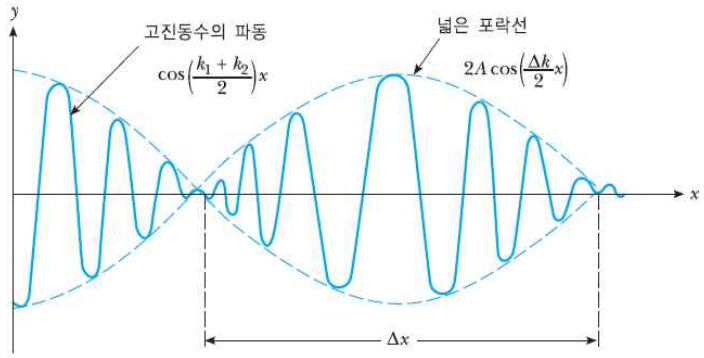
(a) $y = 2\cos[10(x-2t)]$: $+x$ 진행파, $v = 2$

(b) $y = 6\cos(3x-24t)$: $+x$ 진행파, $v = \frac{24}{3} = 8$

(c) $y = 2\cos[5(x+15t)]$: $-x$ 진행파, $v = 15$

(d) $y = 6\cos(4x+12t)$: $-x$ 진행파, $v = \frac{12}{4} = 3$

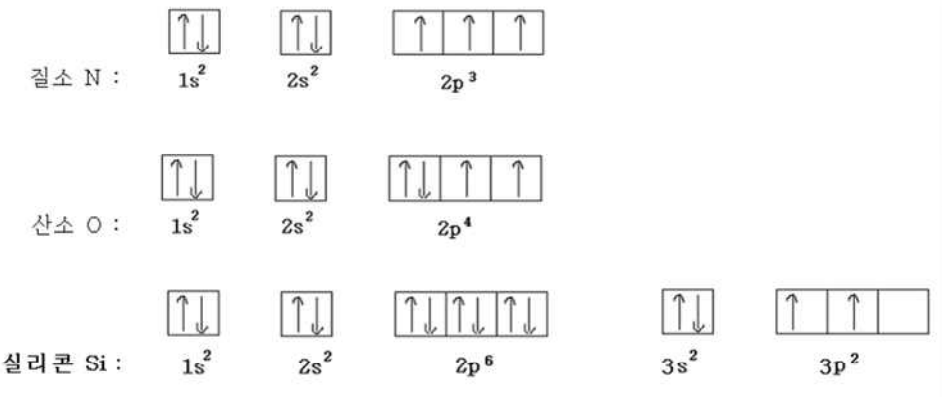
2.10



- 포락선 내 파형의 속도 : $v_p = \frac{\omega_2+\omega_1}{k_2+k_1} \simeq \frac{\omega}{k}$
- 포락선의 속도 : $v_g = \frac{\triangle\omega}{\triangle k}$

2.11 ~ 2.13 생략

2.14



Chapter 03

3.1

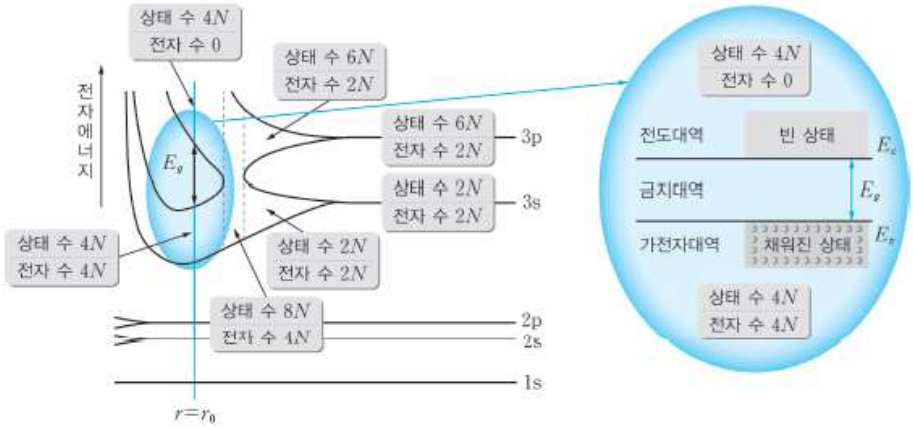


그림 3-1 실리콘의 3s와 3p 상태가 허용 에너지 밴드와 금지 에너지 밴드로 분리되는 것을 보여주는 개념도

3.2

(a) $v = -\dfrac{2bk}{\hbar}$

(b) $m^* = -\dfrac{\hbar^2}{2b}$

3.3 ~ 3.4 생략

3.5

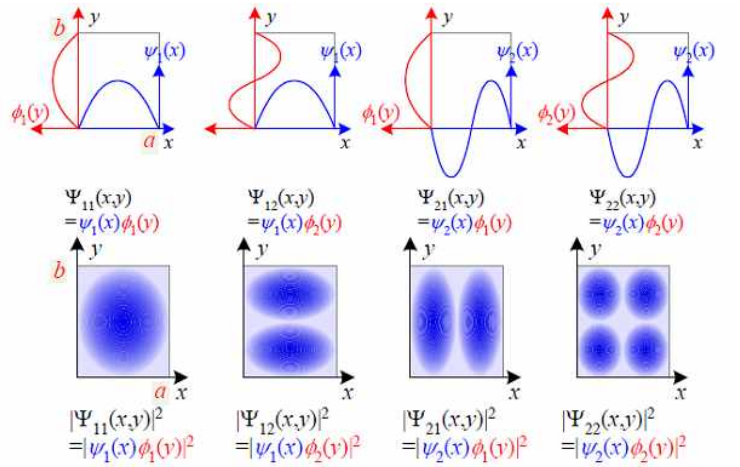
갈륨비소의 전도대역 전자가 실리콘의 전도대역 전자보다 곡률이 크므로 유효질량이 더 작음

3.6

- GaAs의 경우 : $\lambda\,[\mu\mathrm{m}] = 0.873\,[\mu\mathrm{m}]$, 적외선
- GaN의 경우 : $\lambda\,[\mu\mathrm{m}] = 0.366\,[\mu\mathrm{m}]$, 자외선

3.7

(a)



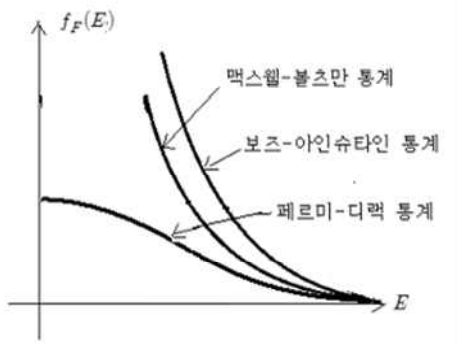
[그림] $k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}$에 해당하는 파동함수 $\Psi(x,y)=\psi(x)\phi(y)$와 확률밀도함수 $|\Psi(x,y)|^2$

(b)

$$E_{11}=\frac{\hbar^2\pi^2}{2m^*}\left(\frac{1}{a^2}+\frac{1}{b^2}\right),\ E_{12}=\frac{\hbar^2\pi^2}{2m^*}\left(\frac{1}{a^2}+\frac{4}{b^2}\right),\ E_{21}=\frac{\hbar^2\pi^2}{2m^*}\left(\frac{4}{a^2}+\frac{1}{b^2}\right),\ E_{22}=\frac{\hbar^2\pi^2}{2m^*}\left(\frac{4}{a^2}+\frac{4}{b^2}\right)$$

3.8 ~ 3.10 생략

3.11



3.12 약 5%

3.13 $$n=\int_0^{E_F} D(E)dE=\left(\frac{1}{3\pi^2}\right)\left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}}E_F\sqrt{E_F}$$

Chapter 04

4.1 생략

4.2 $2.26\times10^{6}\mathrm{cm}^{-3}$

4.3 $2\left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2}\right)^{3/2}\exp\left[\frac{-(E_c-E_F)}{kT}\right]$

4.4 생략

4.5 E_F는 E_{midgap}보다 약간 더 낮은 위치에 있어야 함

4.6 (a) GaAs (b) Si (c) Ge

4.7

- $T=300\mathrm{K}$인 경우 : $0.6789\times10^{10}[\mathrm{cm}^{-3}]$
- $T=200\mathrm{K}$인 경우 : $7.3395\times10^{4}[\mathrm{cm}^{-3}]$

4.8 $-12.8\mathrm{meV}$

4.9 $0.407\mathrm{eV}$ 위에 위치

4.10

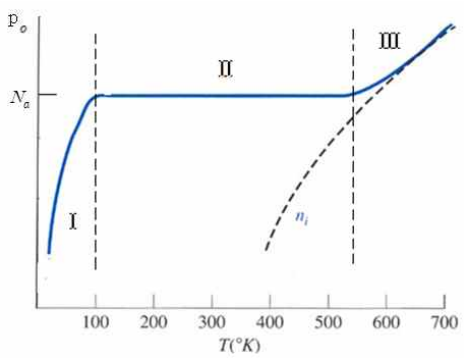
(a) $\exp\left[\frac{0.15E_g}{kT}\right]$ (b) $\exp\left[\frac{-0.15E_g}{kT}\right]$ (c) $\exp\left[\frac{0.7E_g}{kT}\right]$

4.11

(a) $\exp\left[\frac{0.15E_g}{kT}\right]$ (b) $\exp\left[\frac{-0.15E_g}{kT}\right]$ (c) $\exp\left[\frac{0.7E_g}{kT}\right]$

4.12 ~ 4.13 생략

4.14



[그림] 억셉터 농도가 N_a인 p형 반도체에서 온도에 따른 정공농도의 변화

영역		정공농도
Ⅰ	부분적 이온화 영역	$p_o < N_a$
Ⅱ	외인성 영역	$p_o \simeq N_a$
Ⅲ	진성 영역	$p_o \simeq n_i > N_a$

4.15

단위 부피 $1\,\mathrm{cm}^3$ 내에 존재하는 전자의 개수가 n이고 정공의 개수는 p이다. 전자의 재결합률 R_n을 구하기 위해, 전자들이 평균 속도 $v\,\mathrm{cm/s}$로 움직이고 정공들은 정지상태로 존재한다고 가정하자. 또한 전자와 정공의 크기는 매우 작고, 움직이는 전자의 궤적(포획 단면적 궤적)은 서로 겹치지 않는다고 가정하자. 전자가 정공을 포획할 수 있는 유효단면적을 $A\,\mathrm{cm}^2$라고 하면, 1초에 1개의 전자가 움직이면서 정공을 포획할 수 있는 공간의 크기는 (vA)cm^3이다. 따라서 총 n개의 전자들이 움직이면서 정공을 포획할 수 있는 총 공간의 크기 V는 (nvA)cm^3이다. 단위 부피 $1\,\mathrm{cm}^3$당 존재하는 정공의 개수가 p이므로, 공간의 크기 V 내에 존재하는 정공의 수는 ($nvAp$)이다. 결국 단위부피당, 단위시간당[$\mathrm{cm}^{-3}\mathrm{s}^{-1}$] 전자가 정공을 만나 재결합하는 건수, 즉 전자의 재결합률 R_n은 ($vApn$)이다.

Chapter 05

5.1

(a) $N_c \exp\left[\frac{-(E_c - E_F)}{kT}\right] = n_o$

(b) $\left(\frac{3kT}{2}\right) N_c \exp\left[\frac{-(E_c - E_F)}{kT}\right] = \left(\frac{3kT}{2}\right) n_o$

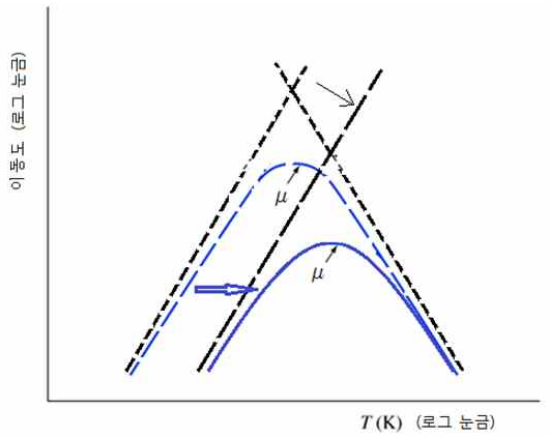
5.2

정공 표동전류밀도	전자 표동전류밀도
$J_{p,drift} = \rho_p v_{d,p}$	$J_{n,drift} = \rho_n v_{d,n}$
$\rho_p = e\,p$	$\rho_n = -e\,n$
$v_{d,p} = \mu_p \mathscr{E}$	$v_{d,n} = -\mu_n \mathscr{E}$
$J_{p,drift} = (ep)(\mu_p \mathscr{E}) = ep\mu_p \mathscr{E} = \sigma_p \mathscr{E}$	$J_{n,drift} = (-en)(-\mu_n \mathscr{E}) = en\mu_n \mathscr{E} = \sigma_n \mathscr{E}$
총 표동전류밀도 $J_{drift} = J_{p,drift} + J_{n,drift} = (\sigma_p + \sigma_n)\mathscr{E} = \sigma \mathscr{E}$ $\sigma = \sigma_p + \sigma_n = e(p\mu_p + n\mu_n) = \frac{1}{\rho}$	

5.3 생략

5.4 $12.7\,\mathrm{M}\Omega$

5.5



(설명 생략)

5.6 생략

5.7

정공 확산전류밀도	전자 확산전류밀도
$J_{p,diff} = eF_p$	$J_{n,diff} = -eF_n$
$F_p = -D_p\frac{dp}{dx}$	$F_n = -D_n\frac{dn}{dx}$
$D_p = \frac{l^2}{2\tau_{c,p}} = \frac{lv_{th}}{2}$	$D_n = \frac{l^2}{2\tau_{c,n}} = \frac{lv_{th}}{2}$
$J_{p,diff} = eF_p - eD_p\frac{dp}{dx}$	$J_{n,diff} = -eF_n = eD_n\frac{dn}{dx}$
총 확산전류밀도 $J_{diff} = J_{p,diff} + J_{n,diff} = -eD_p\frac{dp}{dx} + eD_n\frac{dn}{dx}$	

5.8

구분	전계에 의한 표동	농도 기울기에 의한 확산
전자 전류	$en\mu_n \mathscr{E}_x$	$eD_n\frac{dn}{dx}$
정공 전류	$ep\mu_p \mathscr{E}_x$	$-eD_p\frac{dp}{dx}$

5.9 $-(0.0259)\frac{(-10^{19})}{(10^{17}-10^{19}x)}$

5.10 생략

5.11

(a) n형 반도체

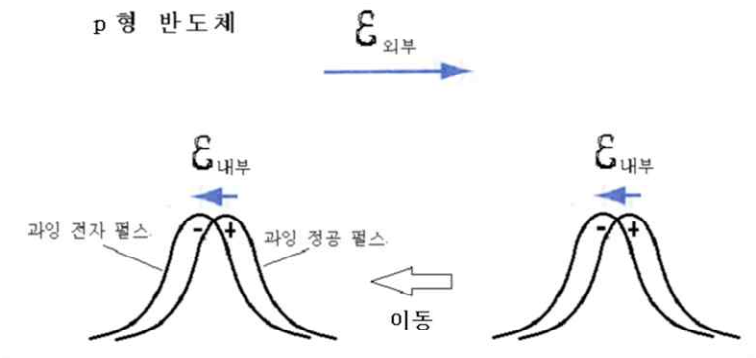
(b) $2.5\times10^{16}\,\mathrm{cm}^{-3}$

(c) $1000\,\mathrm{cm}^2/\mathrm{V}\cdot\mathrm{sec}$

(d) $3.5\times10^{16}\mathrm{cm}^{-3}$

Chapter 06

6.1



6.2 생략

6.3

(a) 정공 유속 $\mu_p p\Xi - D_p \frac{\partial p}{\partial x}$, 전자 유속 $-\mu_n n\Xi - D_n \frac{\partial n}{\partial x}$

(b) 생략

6.4 생략

6.5 $\delta n(t) = 10^{13}[1 - e^{-t/10^{-8}}]\mathrm{cm}^{-3}$

6.6

- $x > 0$일 때, $\delta n(x) = 10^{14} e^{-x/5.92\times10^{-4}}\mathrm{cm}^{-3}$
- $x < 0$일 때, $\delta n(x) = 10^{14} e^{x/5.92\times10^{-4}}\mathrm{cm}^{-3}$
- 정상상태 과잉농도는 $x = 5.92\mu m$일 때 그 초깃값의 e^{-1}으로 감소된다.

6.7

(a) 억셉터, $N_a = 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-3}$

(b) $\tau_{no} = 17.37\,\mathrm{ns}$

(c) $\tau_{no} = 17.37\,\mathrm{ns}$

(d) $a_r = 5.76\times10^{-8}\,\mathrm{cm}^3\mathrm{sec}^{-1}$

(e) $n_o = 3.24\times10^{-3}\,\mathrm{cm}^{-3}$

6.8

(a) $\delta p(x) = 10^{10}(1 - 0.9e^{-x/L_p})$

(b) $\delta p(x) = 10^{10}\ \mathrm{cm}^{-3}$

(c) $\delta p(x) = 10^{10}(1 - e^{-x/L_p})$

6.9

접촉점 A에서 B까지의 이동 시간($\Delta t = t_2 - t_1$)이 길수록, 확산계수 D가 클수록, 그리고 그 이동 시간 동안 재결합이 많이 일어날수록 곡선이 더 퍼지고 값이 낮아져, 소수 캐리어의 D와 수명 τ를 부정확하게 만든다.

6.10

$$\int_{t_1}^{t_m} V_0(t)dt \ > \ \int_{t_m}^{t_2} V_0(t)dt$$

6.11

(a) $t_{m2} = \dfrac{\Xi_1\, t_{m1}}{\Xi_2} = \dfrac{10}{5}5\mathrm{ms} = 10\mathrm{ms}$

(b) $\Delta x_2 = \dfrac{\Delta x_1 \Xi_2 \Delta t_2}{\Xi_1 \Delta t_1} = \Delta x_1 \sqrt{\dfrac{t_{m2}}{t_{m1}}} = L_1 \sqrt{\dfrac{10}{5}} = \sqrt{2}\, L_1$

6.12

헤인즈-쇼클리 실험으로부터 구한 이동도 μ와 확산계수 D, 그리고 수명 τ는 모두 소수 캐리어에 대한 값이다. 반면 5.4.2절에서 홀 효과로부터 구한 이동도 μ와 캐리어 농도는 다수 캐리어에 대한 값이라는 점에서 차이가 있다.

Chapter 07

7.1

(a) $V_{bi} = \phi_{Fp} - \phi_{Fn} = V_t \ln\left(\frac{n_{n0} p_{p0}}{(\ n_i^2\ )}\right) = V_t \ln\left(\frac{N_a N_d}{(\ n_i^2\ )}\right) = V_t \ln\left(\frac{n_{n0}}{(\ n_{p0}\ )}\right)$

$= V_t \ln\left(\frac{p_{p0}}{(\ p_{n0}\ )}\right) = \frac{eN_d}{\epsilon}\left(\frac{x_n^2}{2}\right) + \frac{eN_a}{\epsilon}\left(\frac{x_p^2}{2}\right).$

여기서 N_a는 p 영역 억셉터 농도, N_d는 n 영역 도너 농도이며, 완전 이온화를 가정한다.

(b) 역방향 바이어스 전압 $-V_R$을 인가했을 때, 공핍층 내 한 지점에서의

$$np = n_i^2 \exp\left(\frac{-V_R}{V_t}\right) = n_i^2 \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{kT}\right).$$

7.2 생략

7.3

(a) $E_F - E_v = kT \ln\left[\frac{N_v}{p_0}\right] = kT \ln\left[\frac{N_v}{N_a}\right]$

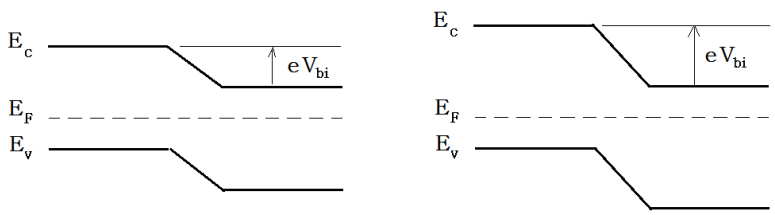
(b) $E_c - E_F = kT \ln\left[\frac{N_c}{n_0}\right] = kT \ln\left[\frac{N_c}{N_d}\right]$

(c) 생략

7.4

- [그림 7-20(b)]가 고온
- 온도가 증가하면 내부 전위 V_{bi}는 감소

7.5



(a) (b)

[그림] (a) 작은 에너지 밴드갭과 (b) 큰 에너지 밴드갭일 때의 에너지 밴드 다이어그램

7.6 ~ 7.7 생략

7.8

(a) n_{p0}

(b) $A \leq 1$

(c) 생략

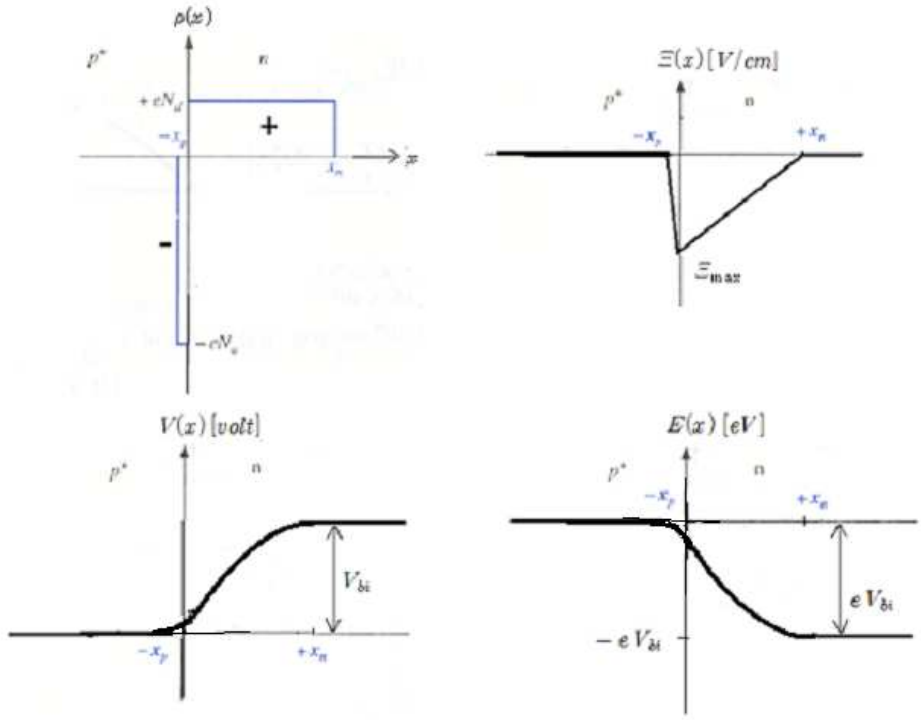
7.9 ~ 7.10 생략

7.11 $4.685 \times 10^{-8}[\mathrm{F/cm^2}]$

7.12 $C' = \frac{C}{A} = \frac{1}{A}\left(\frac{Q}{V}\right) = \frac{1}{A}\left(\frac{\epsilon A}{d}\right) = \frac{\epsilon}{d}$

7.13 $m = -\frac{3}{2}$, $N(x) = cx^m = cx^{-3/2}$

7.14



7.15 생략

Chapter 08

8.1 ~ 8.3 생략

8.4 $E_{Fp} = E_{vn} - kT\ln\frac{p_{n0}}{N_v}\left[\exp\left(\frac{eV_F}{kT}\right)-1\right]+\frac{kT}{L_p}(x-x_n)$

8.5

(a) $0.1098\,\mathrm{eV}$

(b) $1.726\times10^{13}\,\mathrm{cm}^{-3}$

(c) $0.8254\,\mathrm{eV}$

(d) $2.558\times10^{-14}\,\mathrm{cm}^{-3}$

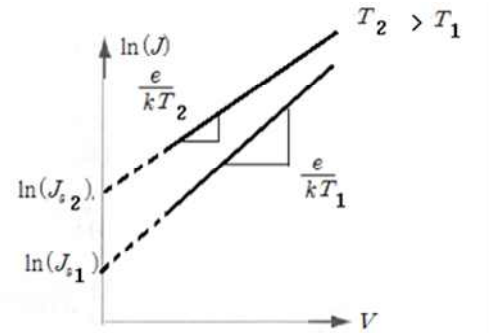
8.6

번호	위치	관계식
①	$x \ll -x_p$	$n_{p0} = N_c\exp\left[\frac{-(E_{cp}-E_{Fn})}{kT}\right] = N_c\exp\left[\frac{-(E_{cp}-E_F)}{kT}\right]$
②	$x = -x_p$	$n(-x_p) = N_c\exp\left[\frac{-(E_{cp}-E_{Fn})}{kT}\right] = n_{p0}\exp\left[\frac{V_F}{kT}\right]$
③	$x_n \ll x$	$n_{n0} = N_c\exp\left[\frac{-(E_{cn}-E_{Fn})}{kT}\right] = N_c\exp\left[\frac{-(E_{cn}-E_F)}{kT}\right]$
④	$x = -x_p$	$n(-x_p) = N_c\exp\left[\frac{-(E_{cp}-E_{Fn})}{kT}\right] = n_{p0}\exp\left[\frac{-V_R}{kT}\right]$

8.7 $9.255\times10^{-12}\,[\mathrm{A/cm^2}]$

8.8 $0.3287[\mathrm{V/cm}]$

8.9



온도가 상승하면 전반적으로 전류가 증가하여 직선이 상승하지만,
$\ln(J_s)$는 더욱 상승하여, 직선의 기울기는 감소한다.

8.10 60[mV]

8.11 ~ 8.12 생략

8.13

(a) $1.5\times10^{5}\,\mathrm{cm}^{-3}$

(b) $22.36\mu\mathrm{m}$

(c) $1.726\times10^{15}\exp\left(-\dfrac{x-0.7816\mu\mathrm{m}}{22.36\mu\mathrm{m}}\right)\mathrm{cm}^{-3}$

(d) $1.235\exp\left(-\dfrac{x-0.7816\mu\mathrm{m}}{22.36\mu\mathrm{m}}\right)\mathrm{A/cm}^{2}$

8.14

(a) $1.5\times10^{3}\,\mathrm{cm}^{-3}$

(b) $41.83\mu\mathrm{m}$

(c) $1.726\times10^{13}\exp\left(\dfrac{x+0.007816\mu\mathrm{m}}{41.83\mu\mathrm{m}}\right)\mathrm{cm}^{-3}$

(d) $=0.02311\exp\left(\dfrac{x+0.007816\mu\mathrm{m}}{41.83\mu\mathrm{m}}\right)\mathrm{A/cm}^{2}$

8.15

(a) $1.258\,\mathrm{A/cm}^{2}$

(b) $1.093\times10^{-10}\,\mathrm{A/cm}^{2}$

8.16

(a) $1.5\times10^{5}\left[\exp\left(\frac{0.6}{0.0259}\right)-1\right]\left(\frac{2.7816\mu\mathrm{m}-x}{2\mu\mathrm{m}}\right)$

(b) $13.81\,\mathrm{A/cm^2}$

8.17

(a) $1.726\times10^{13}\left(\frac{2.007816\mu\mathrm{m}+x}{2\mu\mathrm{m}}\right)\mathrm{cm^{-3}}$

(b) $0.4833\,\mathrm{A/cm^2}$

8.18

(a) $14.29\,\mathrm{A/cm^2}$

(b) 짧은 pn 다이오드가 긴 pn 다이오드보다 10배 이상 전류가 더 많이 흐름

8.19 생략

8.20

(a) $0.436[\mathrm{V}]$

(b) 광세기를 100배 증가시키면 단락회로 전류 $I_{sc}(=I_{light})$도 100배 증가된다고 볼 수 있다. 그러나 개방회로 전압 V_{oc}는 1.27배밖에 증가하지 않음을 알 수 있다.

8.21 생략

Chapter 09

9.1 생략

9.2

(a) $0.23[\mathrm{V}]$

(b) $0.0244[\mathrm{V}]$

(c) $5.621\times10^{-6}[\mathrm{cm}]$

(d) $8.681\times10^{3}[\mathrm{V/cm}]$

9.3 생략

9.4

(a) $1.006\times10^{15}\mathrm{cm}^{-3}$

(b) $-0.8\,\mathrm{volt}$

(c) $-0.535\,\mathrm{volt}$

9.5

구분	n형 반도체		p형 반도체	
일함수 차이	$\phi_m > \phi_s$	$\phi_m < \phi_s$	$\phi_m > \phi_s$	$\phi_m < \phi_s$
반도체 전하량	도너 (+)이온	전자 (-)	정공 (+)	억셉터 (-)이온
다수 캐리어	공핍	축적	축적	공핍
접합 특성	정류성	저항성	저항성	정류성

9.6 생략

9.7 생략

9.8

(a) 그림 9-3

(b) 전압의 크기가 n형 반도체 전자의 에너지 장벽을 eV_F만큼 낮추어, 금속 쪽으로 전자가 잘 흐르게 하여 순방향 전류가 잘 흐르게 된다.

(c) 전압의 크기가 n형 반도체 전자의 에너지 장벽을 eV_R만큼 더 높여, 금속 쪽으로 전자가 잘 흐

르지 못하게 하여 역방향 전류는 흐르지 않는다.
(d) 정류성 특성을 갖는다.

9.9

(a) 그림 9-12
(b) 전압의 크기가 p형 반도체 정공의 에너지 장벽을 eV_F만큼 낮추어, 금속 쪽으로 정공이 잘 흐르게 하여 순방향 전류가 잘 흐르게 된다.
(c) 전압의 크기가 p형 반도체 정공의 에너지 장벽을 eV_R만큼 더 높여, 금속 쪽으로 정공이 잘 흐르지 못하게 하여 역방향 전류는 흐르지 않는다.
(d) 정류성 특성을 갖는다.

9.10

(a) 그림 9-14
(b) 정공이 자유롭게 왼쪽으로 흘러 전류를 잘 통한다.
(c) 정공이 자유롭게 오른쪽으로 흘러 전류를 잘 통한다.
(d) 항성 특성이 된다.

9.11

(a) 그림 9-16
(b) 정공이 자유롭게 왼쪽으로 흘러 전류를 잘 통한다.
(c) 정공이 자유롭게 오른쪽으로 흘러 전류를 잘 통한다.
(d) 저항성 특성이 된다.

9.12 ~ 9.20 생략

Chapter 10

10.1

동작 모드	이미터-베이스(E-B) 접합 바이어스	베이스-컬렉터(B-C) 접합 바이어스
포화(saturation) 모드	순방향	순방향
순방향 활성(forward active) 모드	순방향	역방향
역방향 활성(inverse active) 모드	역방향	순방향
차단(cut-off) 모드	역방향	역방향

10.2 그림 10-8

10.3

(a) $n_p(x_p) = n_{p0}\exp\left(\frac{-eV_{BC}}{kT}\right)$, 생략

(b) $-D_n\frac{n_{p0}}{L_n}$, $J_{nC0}(x_p) = (-e)(\text{전자 유속}) = \frac{eD_n n_{p0}}{L_n}$

10.4 $n_E(x') = \delta n_E(x') + n_{E0}$

10.5 생략, $J_{nE} = \frac{eD_E n_{E0}}{W_E}\left[\exp\left(\frac{eV_{EB}}{kT}\right) - 1\right]$

10.6 생략

10.7 $n_C(x'') = \delta n_C(x'') + n_{C0} \simeq \frac{n_{C0}}{W_C}x''$

10.8 생략

10.9

(a) $\alpha = 0.9751$, $\beta = 39.16$

(b) $\alpha = 0.9581$, $\beta = 22.87$

10.10

	기호	내용	계산식
이미터 전류 J_E	J_{pE}	이미터에서 베이스로 주입되는 정공의 확산에 의한 이미터 전류	$eD_p\left[\frac{p_n(0)}{W_B}\right]$
	J_{nE}	베이스에서 이미터로 주입되는 전자의 확산에 의한 이미터 전류	$eD_n\left[\frac{n_p(W_E)-n_{p0}}{W_E}\right]$
컬렉터 전류 J_C	J_{pC}	J_{pE} 중에서, 이미터에서 주입된 대다수 캐리어들이 베이스를 통과하여 컬렉터로 그대로 주입되어 흐르는 전류	$eD_p\left[\frac{p_n(0)}{W_B}\right]$
	J_{nC0}	p형 컬렉터에서 소수 캐리어인 전자가 공핍층으로 주입되어 사라지는데, 이렇게 사라지는 전자를 계속 컬렉터에서 주입해 주어야 하는 역포화전류 J_{nC0}.	$\frac{eD_n n_{p0}}{L_n}$
베이스 전류 $J_B = (J_E - J_C)$	J_{pB}	베이스에서 과잉 소수 캐리어 정공과의 재결합으로 사라진 다수 캐리어 전자를 베이스 단자로부터 계속 공급해주어야 하는 전류	$J_{pE} - J_{pC} \simeq 0$
	J_{nB} $(= J_{nE})$	베이스에서 이미터로 주입되는 전자를 베이스 단자로부터 계속 공급해주어야 하는 전류	$eD_n\left[\frac{n_p(W_E)-n_{p0}}{W_E}\right]$
	$-J_{nC0}$	p형 컬렉터에서 소수 캐리어인 전자가 공핍층으로 주입되어 사라지는 음(-)의 베이스 전류(컬렉터 역포화전류 J_{nC0} 성분)	$\frac{-eD_n n_{p0}}{L_n}$

10.11 생략

10.12

	기호	내용	계산식
이미터 전류 J_E	J_{nE}	이미터에서 베이스로 주입되는 전자의 확산에 의한 이미터 전류	$eD_n\left[\frac{n_p(0)}{W_B}\right]$
	J_{pE}	베이스에서 이미터로 주입되는 정공의 확산에 의한 이미터 전류	$eD_p\left[\frac{p_n(W_E)-p_{n0}}{W_E}\right]$
컬렉터 전류 J_C	J_{nC}	J_{nE} 중에서, 이미터에서 주입된 대다수 캐리어들이 베이스를 통과하여 컬렉터로 그대로 주입되어 흐르는 전류	$eD_n\left[\frac{n_p(0)}{W_B}\right]$
	J_{pC0}	n형 컬렉터에서 소수 캐리어인 정공이 공핍층으로 주입되어 사라지는데, 이렇게 사라지는 정공을 계속 컬렉터에서 주입해 주어야 하는 역포화전류 J_{pC0}.	$\frac{eD_pp_{n0}}{L_p}$
베이스 전류 J_B $=(J_E-J_C)$	J_{nB}	베이스에서 과잉 소수 캐리어 전자와의 재결합으로 사라진 다수 캐리어 정공을 베이스 단자로부터 계속 공급해주어야 하는 전류	$J_{nE}-J_{nC}\simeq 0$
	J_{pB} $(=J_{pE})$	베이스에서 이미터로 주입되는 정공을 베이스 단자로부터 계속 공급해주어야 하는 전류	$eD_p\left[\frac{p_n(W_E)-p_{n0}}{W_E}\right]$
	$-J_{pC0}$	n형 컬렉터에서 소수 캐리어인 정공이 공핍층으로 주입되어 사라지는데, 이렇게 사라지는 정공을 계속 컬렉터에서 주입해 주어야 하는 역포화전류 J_{pC0}	$\frac{-eD_pp_{n0}}{L_p}$

10.13 ~ 10.15 생략

10.16

(a) $\beta=\frac{I_c}{I_b}=\frac{g_mV_{be}}{V_{be}/r_\pi}=g_mr_\pi$

(b) $\beta=\frac{I_c}{I_b}=\frac{g_mr_\pi}{1+j\omega r_\pi C_\pi}$

10.17 생략

Chapter 11

11.1 생략

11.2

(a) $0.0596\,\mathrm{eV}$ (아래로 휜다)

(b) $\triangle = kT\ln\left(\frac{p_0}{p_s}\right) = kT\ln\left(\frac{n_i^2/N_d}{n_i^2/n_s}\right) = kT\ln\left(\frac{n_s}{N_d}\right) = 0.0259\ln\left(\frac{1.5\times10^{10}}{1.5\times10^{17}}\right) = -0.417\,\mathrm{eV}$ (위로 휜다)

(c) $\triangle = kT\ln\left(\frac{p_0}{p_s}\right) = kT\ln\left(\frac{n_i^2/N_d}{p_s}\right) = 0.0259\ln\left(\frac{(1.5\times10^{10})^2/1.5\times10^{17}}{1.5\times10^{17}}\right) = -0.835\,\mathrm{eV}$ (위로 휜다)

11.3 생략

11.4

전하밀도 분포 생략

모드 : (순서대로) 축적, 평탄밴드, 공핍, 문턱, 반전

11.5

(a) $e\phi_{gwf} \simeq e\chi_{Si} = 4.05\,\mathrm{eV}$

(b) $e\chi_{Si} - e\chi_{SiO_2} = 4.05 - 0.95 = 3.1\,\mathrm{eV}$

(c) $e\chi_{SiO_2} = 0.95\,\mathrm{eV}$

(d) $e\chi_{Si} = 4.05\,\mathrm{eV}$

(e) $e\phi_{swf} = e\chi_{Si} + (E_c - E_F) = e\chi_{Si} + (E_g/2 + e\phi_{Fp})$

$= 4.05 + (1.1/2 + 0.417) = 4.05 + 0.967 = 5.017\,\mathrm{eV}$

(f) $E_{g,Si} = 1.1\,\mathrm{eV}$

(g) $E_{g,SiO_2} = 9\,\mathrm{eV}$

(h) $(e\chi_{SiO_2} + E_{g,SiO_2}) - (e\chi_{Si} + E_{g,Si}) = 9.95 - 5.15 = 4.8\,\mathrm{eV}$

(i) $-eV_{oxo} = -e\gamma\sqrt{\phi_{so}} = -0.972\sqrt{0.373}\,eV = -0.594\,\mathrm{eV}$

(j) $\gamma = \frac{\sqrt{eN_a 2\epsilon_s}}{C_{ox}}$

$= \frac{\sqrt{(1.602\times10^{-19})(1.5\times10^{17}\mathrm{cm}^{-3})(2)(1.04\times10^{-12}\mathrm{F/cm})}}{2.30\times10^{-7}\mathrm{F/cm}^2} = 0.972$

$\phi_{so} = \left[\frac{-\gamma}{2} + \sqrt{\frac{\gamma^2}{4} + (V_g - V_{fb})}\right]^2$

$$= \left[\frac{-0.972}{2} + \sqrt{\frac{0.972^2}{4} + (0 + 0.967)} \right]^2 = 0.373\,\mathrm{V}. \quad -e\phi_{so} = -0.373\,\mathrm{eV}$$

(k) $e\phi_{Fp} = e\,V_t \ln\left(\frac{p_0}{n_i}\right) = (0.0259)\ln\left(\frac{1.5\times10^{17}}{1.5\times10^{10}}\right) = 0.417\mathrm{eV}$

11.6

11.7

$V_g = 0.767\,\mathrm{V}$

$V_{fb} = -(E_g/2 + \phi_B) = -0.967\mathrm{V}$

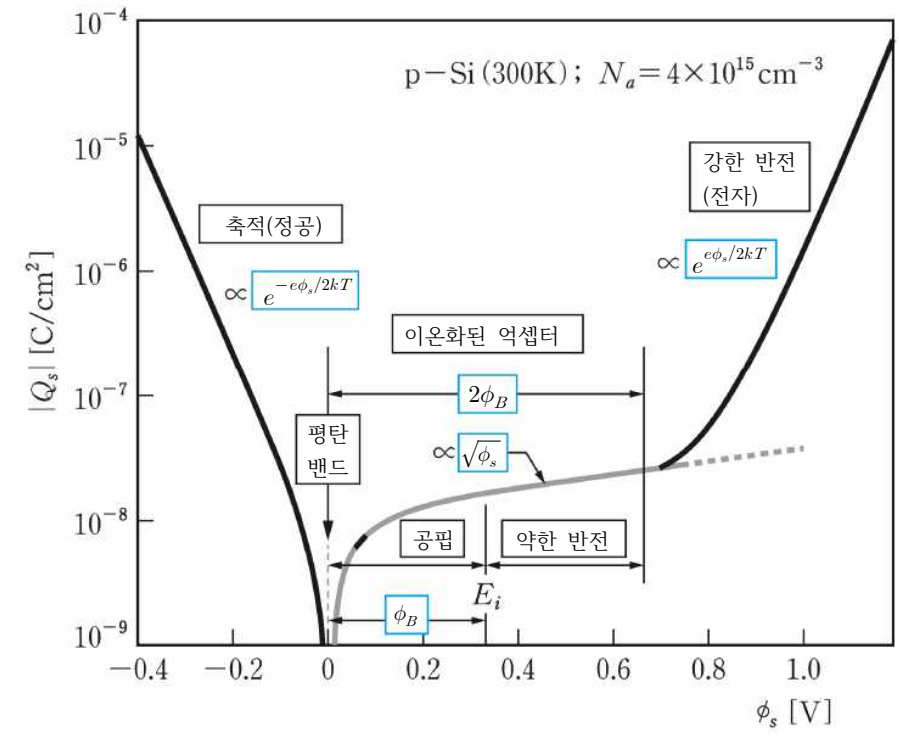
$V_{ox} = 0.899\,\mathrm{V}$

$Q_{dep} = -2.04\times10^{-3}\,\mathrm{C/m^2}$

$Q_{inv} = Q_{inv} = Q_s - Q_{dep} = -3.15\times10^{-5}\,\mathrm{C/m^2}$

11.8

(a)



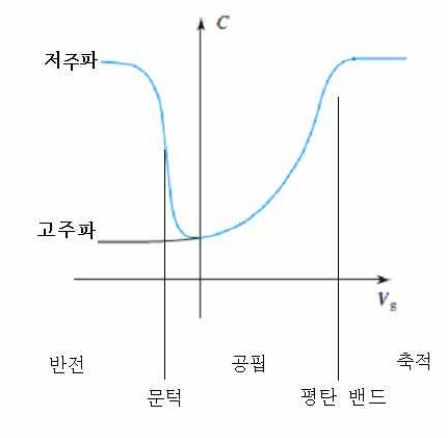
(b)

상태	농도 관계식	상태	농도 관계식
축적	$p_s > N_a$	약한 반전	$n_s < N_a,\ n_s > p_s$
공핍	$n_s < N_a,\ p_s < N_a$	강한 반전	$n_s > N_a$

11.9 ~ 11.10 생략

11.11 $V_m = -\int \frac{dQ_m(x)}{C_m(x)} = -\frac{1}{\epsilon_{SiO_2}} \int_{-x_0}^{0} x\rho_{ox}(x)dx$

11.12



11.13 ~ 11.16 생략

11.17

(a) $t_{ox} = 15\,\mathrm{nm}$

(b) $N_a = 1.5 \times 10^{17}\mathrm{cm}^{-3}$

(c) $V_{fbo} = -0.967\mathrm{V}$

(d) $C_{fb} = = 1.86 \times 10^{-7}\mathrm{F/cm}^2$

(e) $Q_F = 3.05 \times 10^{-8}\mathrm{C/cm}^2$

(f) $\phi = 0.449\,V = \phi_s$

11.18 ~ 11.20 생략

(a) $G_c(s) = 237 \times \frac{(s+0.19)(s+2.32)}{(s+0.03)(s+232)}$

(b) ~ (c) 생략

11.19 ~ 11.20 생략

Chapter 12

12.1

전류밀도 J[C/cm^2 · sec]는 체적전하밀도 $\rho_v = (-e)n$ [C/cm^3]와 (속도 v[cm/sec])를 곱한 양이다. 게이트 면의 단위면적당 반전층 전자 전하량 Q_n' [C/cm^2]은 게이트 체적 전하밀도 ρ_v [C/cm^3]와 (채널 깊이 t_c [cm])의 곱이다. 캐리어 전자의 속도 v[cm/sec]는 (캐리어 이동도 μ_n [cm^2/V · sec])와 전계 $-\mathscr{E}$ [V/cm]의 곱이다. 전류 I[A]는 (전류밀도 J[C/cm^2 · sec])와 단면적 A [cm^2]의 곱이 $\mathscr{E}$ [V/cm]다. 단면적 A[cm^2]는 게이트 폭 W [cm]와 (채널 깊이 t_c [cm])의 곱이다. 채널 내 전계 $\mathscr{E}$는 드레인-소스 전압 V_{DS} [V]를 (채널 길이 L [cm])로 나눈 값이다.

따라서 드레인 전류 I_D[A]는 드레인-소스 전압 V_{DS} [V]에 비례하며, 비례상수는 채널 컨덕턴스 $g_d = \dfrac{W\mu_n |Q_n'|}{L}$ [Ω^{-1}]이다. 이 반전층 전하량 $|Q_n'|$ [C/cm^2]은 (게이트 전압 $(V_{GS} - V_t)$ [V])와 게이트 면의 단위면적당 커패시턴스 C_{ox} [F/cm^2]의 곱이다.

12.2

$I_D(sat) = 6.47\,\mathrm{mA}$

12.3

$\mu_n = 580\mathrm{cm}^2/\mathrm{Vsec},\ \ V_t = 0.366\mathrm{V}$

12.4

$V_t(0) = \ 0.7194\mathrm{V}, \triangle V_t = \ 1.457\mathrm{V}, V_t(-5) = V_t(0) + \triangle V_t = 2.176\mathrm{V}$

12.5 생략

12.6

전위 변화 원인 전하	기판 전위 변화	산화막 전위 변화
$Q_{SD}^{'}$	$\phi_s = (-\frac{1}{C_{Dep}} Q_{SD}^{'})$	$V_{ox} = (-\frac{1}{C_{ox}}) Q_{SD}^{'}$
$\Delta Q_{SD}^{'}$	$\Delta\phi_s = (-\frac{1}{C_{Dep}^{'}}) \Delta Q_{SD}^{'}$	$\Delta V_{ox} = (-\frac{1}{C_{ox}}) \Delta Q_{SD}^{'}$
전위 변화 원인 전하	산화막 전위와 기판 전위 제곱근의 관계	산화막 전위와 기판 전위의 관계
$Q_{SD}^{'}$	$V_{ox} = (\gamma) \sqrt{\phi_s}$	$V_{ox} = (\frac{C_{Dep}}{C_{ox}}) \phi_s$
$\Delta Q_{SD}^{'}$	$\Delta V_{ox} \neq \gamma \sqrt{\Delta\phi_s}$	$\Delta V_{ox} = (\frac{C_{Dep}^{'}}{C_{ox}}) \Delta\phi_s$

여기에서 $C_{Dep} = (\frac{2\epsilon_{Si}}{W_{dMAX}})$이고, $C_{Dep}^{'} = (\frac{2\epsilon_{Si}}{W_{dMAX}^{'} + W_{dMAX}})$이다.

12.7

구분	V_{SB}	$V_{CS}(x)$	$Q_{ss}^{'}$
MOS 커패시터의 전하와 전위 분포(11.2.5절)	×	×	×
산화막 전하를 포함한 제곱 법칙 모델(12.2.2절)	×	○	○
기판 바이어스를 포함한 제곱 법칙 모델(12.2.3절)	○	×	×
기판 바이어스를 포함한 벌크 전하 모델(12.2.6절)	○	○	×

12.8

$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{e}$ 이므로 $I_x = I_{drift} + I_{diffusion} = W\mu_n Q_{inv}\frac{dV_{CS}(x)}{dx} - WD_n\frac{dQ_{inv}(x)}{dx}$

$= (1)$ ❶

이 된다. 식 ❶의 양변을 적분하면 다음과 같다.

$$\int_0^L I_x\,dx = W\mu_n\left(\int_0^{V_D} Q_{inv}\,dV_{CS} - \frac{kT}{e}\int_{Q_{inv0}}^{Q_{invL}} dQ_{inv}\right) = (3) \quad ❷$$

V_{GS}는 표면 전위 $\phi_s(x)$에 따른 전하량과의 관계를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V_{GS} = V_{fb} + \phi_s - \frac{Q_{sub}}{C_{ox}} = V_{fb} + \phi_s - \frac{Q_{inv}(\phi_s) + Q_{dep}(\phi_s)}{C_{ox}} \quad ❸$$

식 (11.36)으로부터 $Q_{dep} = -eN_aW_{dep} = -\sqrt{2eN_a\epsilon_s\phi_s}$ 이고, $\frac{-Q_{dep}}{C_{ox}} = \gamma\sqrt{\phi_s}$ 이다. 따라서 식 ❸을 $Q_{inv}(\phi_s)$에 대해 정리하면 다음과 같이 된다.

$$Q_{inv}(\phi_s) = -C_{ox}(2) \quad ❹$$

식 ❹를 식 ❶에 대입하고 양변을 적분하면, $I_D = -I_x$이므로 다음과 같이 표동전류(첫 번째 항)와 확산전류(두 번째 항)의 합으로 표현할 수 있다.

$$I_D = \frac{W}{L}\mu_n C_{ox}[(6)+(5)] = I_{drift} + I_{diffusion}$$

여기서 첫 번째 표동전류 항을 계산할 때, $C_{ox}\int_{\phi_{s0}}^{\phi_{sL}}\phi_s d\phi_s = C_{ox}\left[\frac{1}{2}(\phi_{sL}^2 - \phi_{s0}^2)\right] = C_{ox}\left[\frac{1}{2}(\phi_{sL}-\phi_{s0})^2 + \phi_{s0}\phi_{sL} - \phi_{s0}^2\right] = (4)$인 것을 이용한다. 그리고 두 번째 확산전류 항을 계산할 때, 식 ❹를 미분한 식 $dQ_{inv} = C_{ox}\left(d\phi_s + \frac{\gamma}{2\sqrt{\phi_s}}d\phi_s\right)$을 이용한다.

12.9

(a) $V_{DS}'(sat) = \frac{1}{1.539} = 0.650[\mathrm{V}]$, 단채널

(b) $V_{DS}'(sat) = \frac{1}{13.667} = 0.0732[\mathrm{V}]$, 장채널

12.10

(a) DIBL

(b) 펀치 스루

설명 생략

12.11 (A)

12.12

그래프	기판 도핑과 산화막 두께
(C)	$N_{sub}=2\times10^{17}\,[\mathrm{cm}^{-3}],\ t_{ox}=2.5\,[\mathrm{nm}]$
(A)	$N_{sub}=5\times10^{17}\,[\mathrm{cm}^{-3}],\ t_{ox}=2.5\,[\mathrm{nm}]$
(B)	$N_{sub}=2\times10^{17}\,[\mathrm{cm}^{-3}],\ t_{ox}=3.5\,[\mathrm{nm}]$

12.13

그래프 개형	특성
(A)	DIBL, SS
(B)	V_t, I_{on}/I_{off}

12.15 ~ 12.20 생략

12.21

[그림 12-53(a)]의 A MOSFET은 장채널 MOSFET이고, [그림 12-53(b)]의 B MOSFET은 단채널 MOSFET이다. 단채널 MOSFET에서 V_{DS}가 증가할 때 펀치스루가 발생하면 추가적으로 드레인 전류의 증가가 유도되므로 (c)의 I_D- V_{GS} 그래프가 B MOSFET의 특성이 된다.

12.22 ~ 12.27 생략

12.28 (B)

12.29

$$\Delta V_t=\frac{eN_aW_{dMAX}}{C_{ox}}\left(\frac{kW_{dMAX}}{W}\right)=0.0294\,\mathrm{V},$$

$W=5\,\mu\mathrm{m}$일 때 ΔV_t는 $5.87\times10^{-3}\mathrm{V}$로 1/5

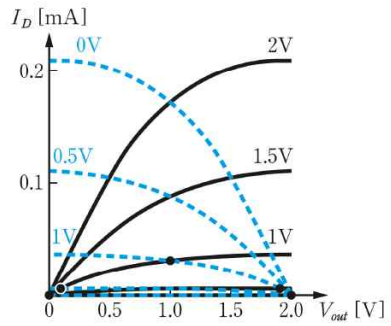
12.30

$D_I=2.10\times10^{12}\mathrm{cm}^{-2}$

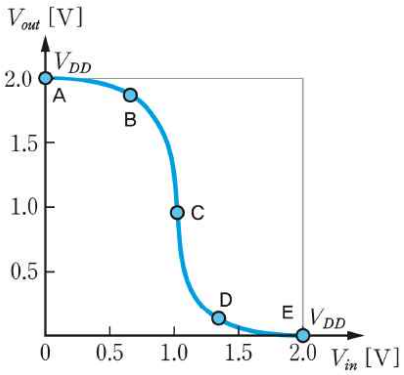
Chapter 13

13.1

(a)



(b)



A	NMOS off PMOS 저항모드
B	NMOS 포화모드 PMOS 저항모드
C	NMOS 포화모드 PMOS 포화모드
D	NMOS 저항모드 PMOS 포화모드
E	NMOS 저항모드 PMOS off

(c) $\frac{1}{2}C_L V_{DD}^2$, $\frac{1}{2}C_L V_{DD}^2$

(d) $\frac{1}{2}C_L V_{DD}^2$, $\frac{1}{2}C_L V_{DD}^2$

(e) $C_L V_{DD}^2$

(f) $P_{dynamic} = \alpha C_L V_{DD}^2 f$. $\alpha = 0.1$인 경우 $P_{dynamic} = (0.1) C_L V_{DD}^2 f$

(g) $P_{static} = V_{DD} I_{off}$

(h) $P_{dynamic} = C_L V_{DD}^2 f(CMOS\text{쌍 갯수}) = (10^{-13})(2^2)(10\times10^9)(10\times10^6) = 40\,\mathrm{kW}$

13.2 생략

13.3

구분	원리	명칭	정보 저장 방법	전하 / 전류 기반 여부
휘발성 메모리	래치 상태	SRAM	입출력이 서로 맞물린 래치의 안정적 상태를 이용	전하 기반 입출력 (커패시턴스 이용)
	전하 유무	DRAM	셀 커패시터 내 전하의 유무에 따라 정보 기록	
비휘발성 메모리	전하 트랩	FLASH	FG에 전하의 보존 여부에 따라 정보 기록	
	분극 변화	FeRAM	강유전체의 분극에 따른 C, V_t, 터널링 전기저항 변화	
	저항 변화	PcRAM	상 의존 저항 변화 : 저저항 (결정질), 고저항 (비정질)	전류 기반 입출력 (저항 이용)
		ReRAM	계면 혹은 물질 내 저항 변화 : 필라멘트 (저저항)	
		MRAM	자기 저항 변화를 이용	

13.4 ~ 13.10 생략

13.11

(a) 데이터 '1'을 읽을 때 : [그림 13-19(b)]에서 $C1$ 커패시터에 저장된 전하량은 $(C1(V_{DD}-V_{CS}))$이고, 비트라인의 $C2$에 사전 충전된 전하량은 $(C2\,V_{DD}/2)$이다. FET이 on되어 [그림 13-19(c)]와 같이 되면, 이 두 전하량 합은 V_H 전압이 $C1$과 $C2$를 충전시킨 전하량의 합과 같아야 하므로 V_H 전압은 $(\frac{C2\,V_{DD}/2+C1\,V_{DD}}{C1+C2})$이 되고, 이때 전압 증분 $\triangle V_H = V_H - V_{DD}/2$는 $(\frac{V_{DD}/2}{1+C2/C1})$이 된다.

(b) 데이터 '0'을 읽을 때 : [그림 13-19(b)]에서 $C1$ 커패시터에 저장된 전하량은 $(C1(-V_{CS}))$이고, 비트라인의 $C2$에 사전 충전된 전하량은 $(C2\,V_{DD}/2)$이다. FET이 on되어 [그림 13-19(c)] 와 같이 되면 V_L 전압은 $(\frac{C2\,V_{DD}/2}{C1+C2})$이 되고, 이때 전압 증분 $\triangle V_L = V_L - V_{DD}/2$는 $(\frac{-V_{DD}/2}{1+C2/C1})$이 된다.

(c) $\triangle V_H$와 $\triangle V_L$은 V_{CS}에 무관하므로, $V_{CS}=(V_{DD}/2)$로 하여 커패시터 전압의 변동량을 최소화 함으로써 커패시터 유전체의 열화를 방지한다.

13.12 ~ 13.13 생략

13.6 ① 13.7 ① 13.8 ③ 13.9 ② 13.10 ④

13.11 ④ 13.12 ③ 13.13 ① 13.14 ② 13.15 ③

13.16 ①

13.17 $X(z) = T^2\left\{\dfrac{z(z+1)}{(z-1)^3}\right\}$

13.18 $X(z) = \mathcal{Z}[\sin\omega t] = \dfrac{(\sin\omega T)z}{z^2 - (2\cos\omega T)z + 1}$

13.19 $X(z) = \mathrm{Z}\left[a^{\frac{t}{T}}\right] = \dfrac{z}{z-a}$ 단, $t = kT,\ k = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \cdots$이다.