



- ◆ 반도체와 금속을 접촉하면 금속의 일함수 크기 및 반도체 (N 형 혹은 P 형)에 따라 전류의 흐르는 방법이 다름

- * 일함수(work function) $q\Phi$

- 진공준위 E_s 와 페르미 준위 E_f 와의 에너지 차
- 금속의 일함수 $q\Phi_M$, 반도체의 일함수 $q\Phi_S$

- * 전자친화력(電子親和力 : electron affinity)

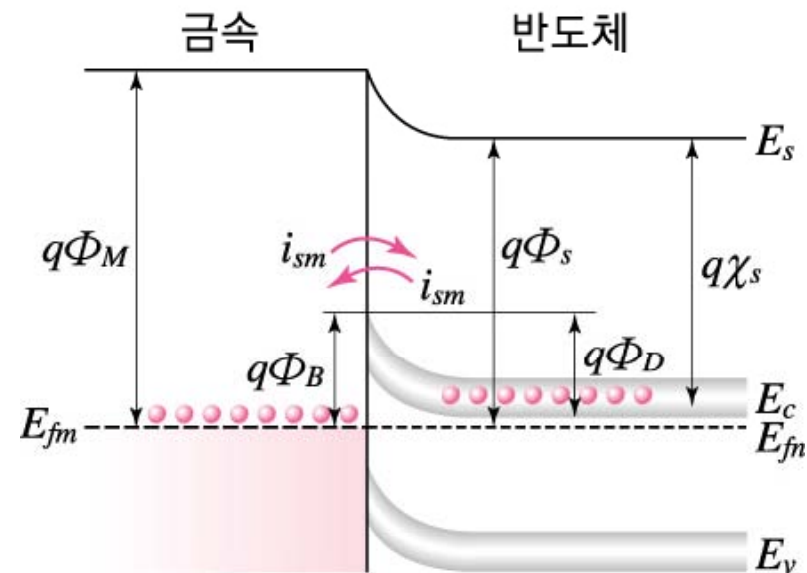
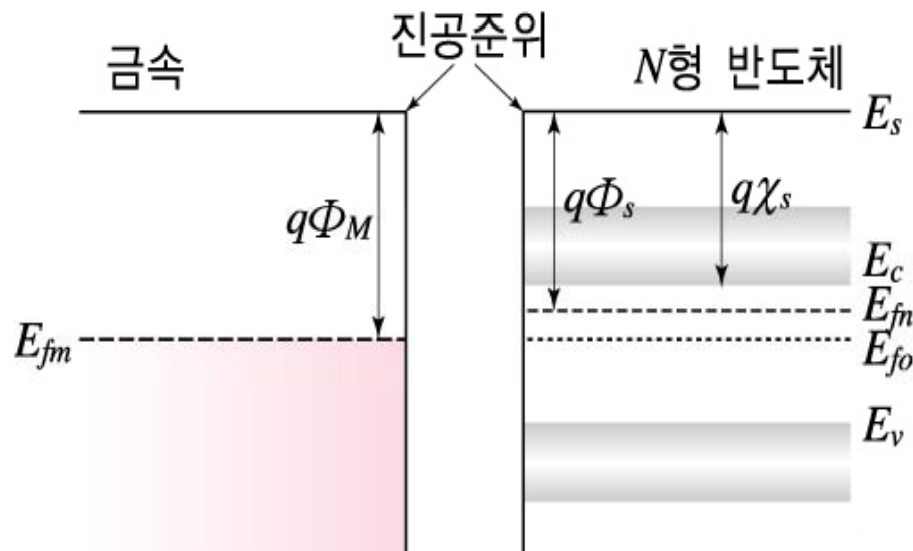
- 전도대의 바닥 E_c 와 진공준위 E_s 와의 차 ($q\chi$)

금속 반도체 접촉

◆ 접촉 메커니즘

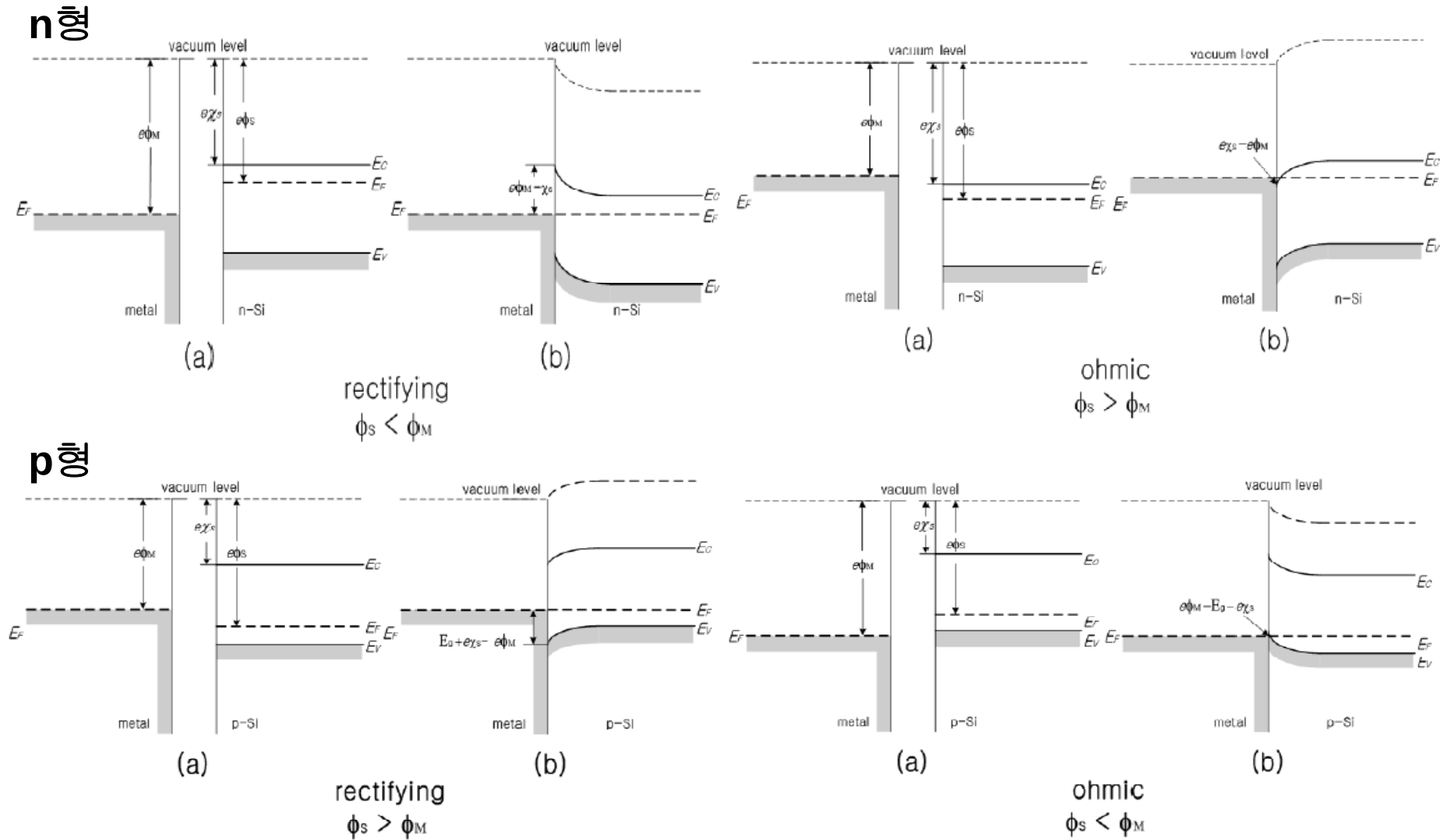
◆ 금속과 N형 반도체의 접촉

- * 반도체의 전자는 전도대에 있고, 금속의 페르미 준위 E_{fm} 보다 높은 에너지 준위에 있기 때문에 에너지가 보다 낮은 금속측으로 이동
- * 이 이동은 금속과 반도체의 페르미 준위가 일치할 때까지 계속되며 결국 반도체 표면 부근에서 공핍층이 생기고 정(+)의 공간전하층이 생성



금속-반도체 접촉

◆ 금속과 반도체를 접촉하기 전과 후의 에너지 준위



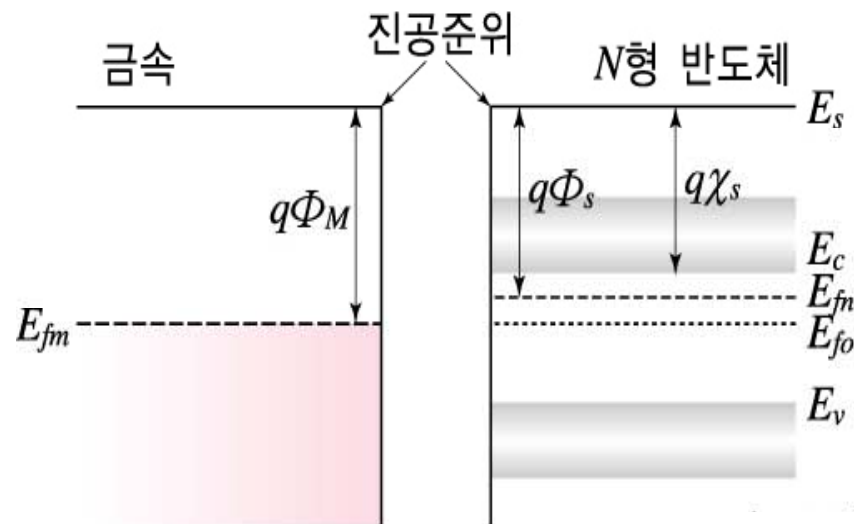
금속-반도체 접촉

1. n형 반도체와 금속의 접촉

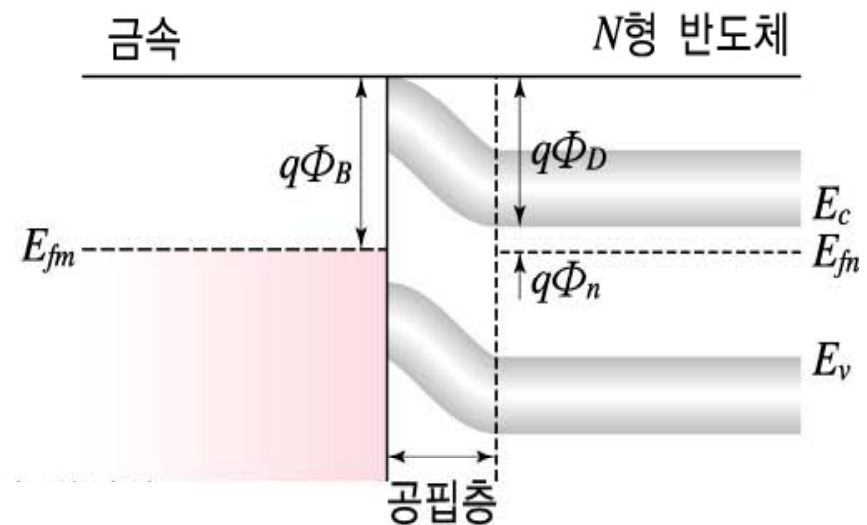
◆ 접촉특성

1. **Schottky** 장벽 : 금속의 일함수 > 반도체의 일함수 ($\Phi_M > \Phi_S$)
2. **Ohmic** 특성 : 금속의 일함수 < 반도체의 일함수 ($\Phi_M < \Phi_S$)
장벽을 낮게 하거나 **tunneling** 이용

◆ 에너지 밴드구조



(a) 접촉 전



(b) 접촉 후

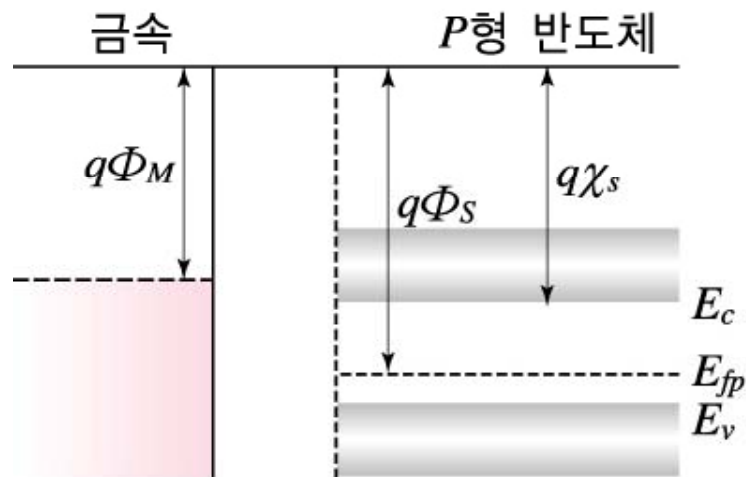
금속-반도체 접촉

2. p형 반도체와 금속의 접합

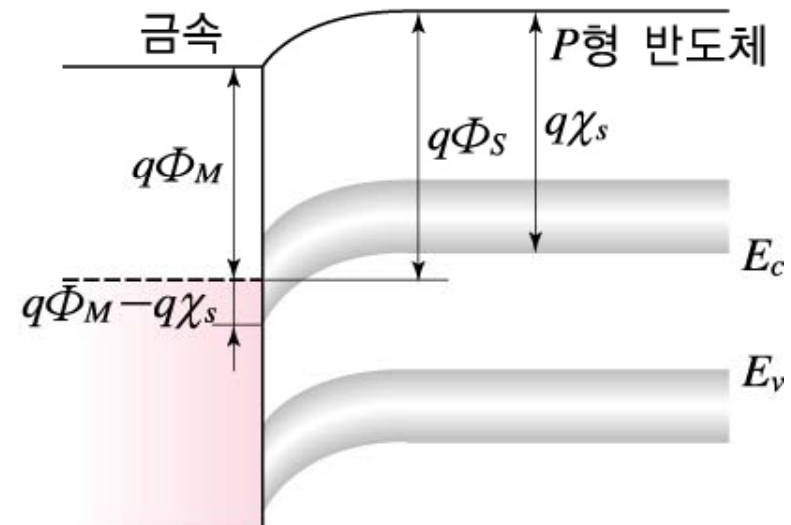
◆ 접촉특성

1. **Schottky** 장벽 : 금속의 일함수 < 반도체의 일함수 ($\Phi_M < \Phi_S$)
2. **Ohmic** 특성 : 금속의 일함수 > 반도체의 일함수 ($\Phi_M > \Phi_S$)

◆ 에너지 밴드구조



(a) 접촉 전

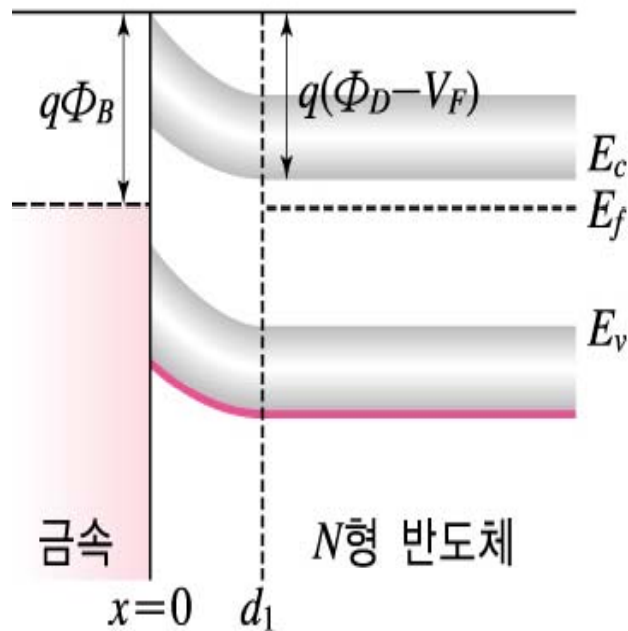


(b) 접촉 후

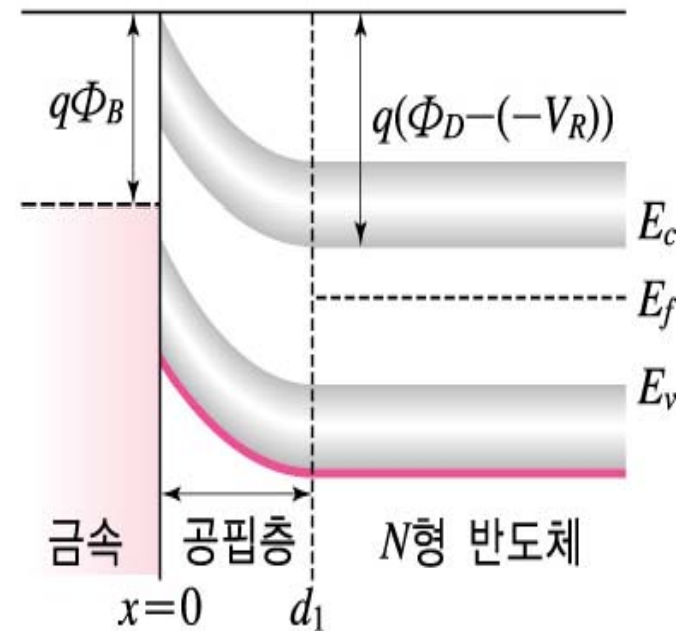
금속-반도체 접촉

◆ 바이어스 방향에 따른 에너지 밴드 구조 변화

- ◆ 순방향 바이어스(금속에서 반도체 방향) : 공핍영역 폭 좁아지고 장벽 낮아짐
- ◆ 역방향 바이어스(반도체에서 금속 방향) : 공핍영역 폭 넓어지고 장벽 높아짐

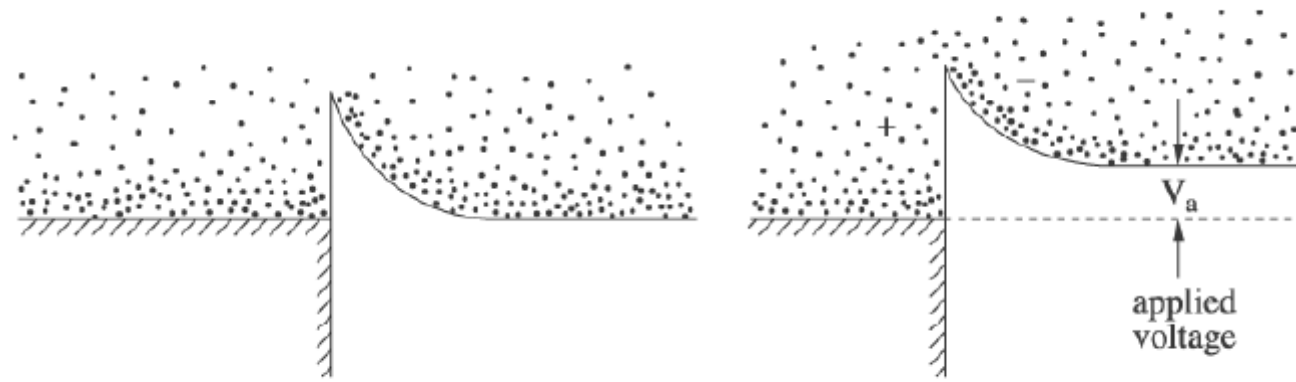


(a) 순바이어스



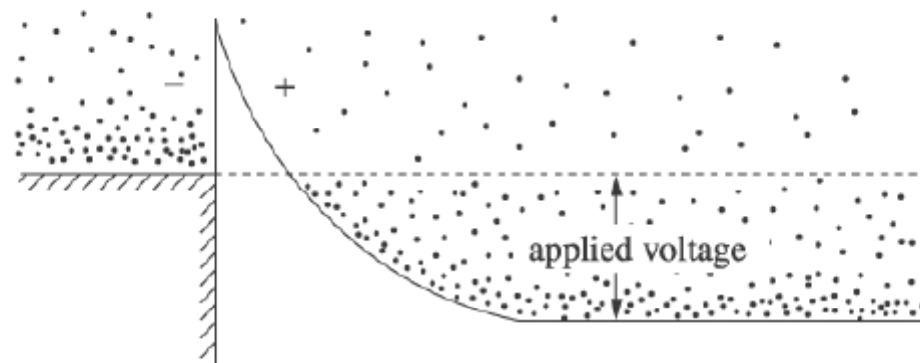
(b) 역바이어스

금속-반도체 접촉



(a) zero

(b) forward

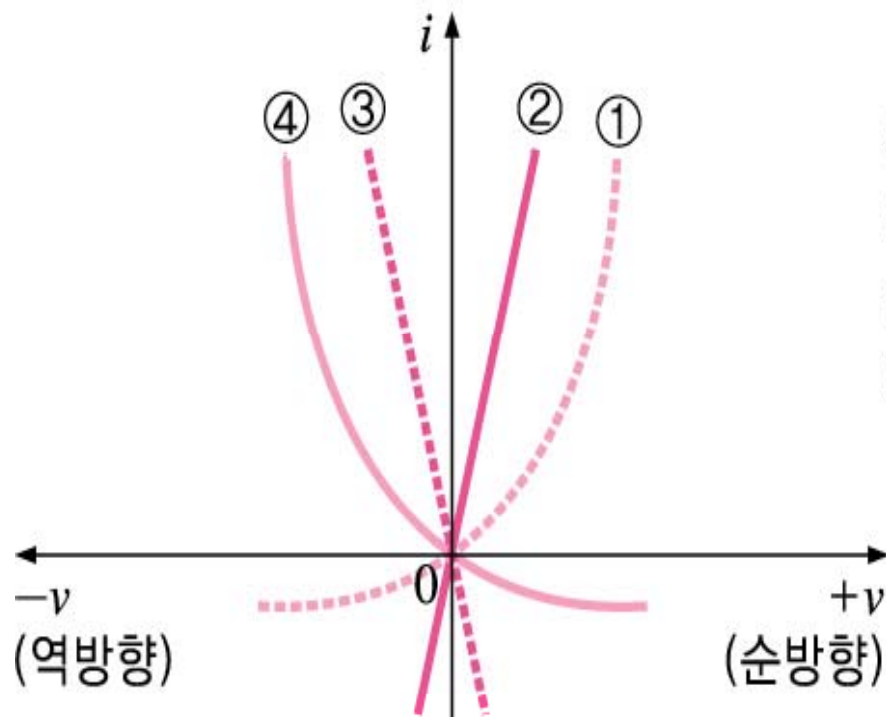


(c) reverse

열전자의 에너지 분포

금속-반도체 접촉

◆ 금속과 반도체 접촉의 전류 특성



- ① $\Phi_M > \Phi_S$ (N형 반도체) : 전자의 정류특성
- ② $\Phi_M < \Phi_S$ (N형 반도체) : 전자의 옴특성
- ③ $\Phi_M > \Phi_S$ (P형 반도체) : 전자의 옴특성
- ④ $\Phi_M < \Phi_S$ (P형 반도체) : 전자의 정류특성

금속-반도체 접촉

◆ 이상적 접합 특성

- ◆ pn접합과 같은 방법으로 구함
- ◆ 공간전하영역의 전기장 E 는 포아송(Poisson) 방정식

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_0 \epsilon_s}$$

$$C = qN_d \frac{dd_1}{dV_R} = \left[\frac{q\epsilon_0 \epsilon_s N_d}{2(\phi_D + V_R)} \right]^{1/2}$$

$$E = \int \frac{qN_d}{\epsilon_0 \epsilon_s} dx = \frac{qN_d}{\epsilon_0 \epsilon_s} x + C_1$$

$$\left(\frac{1}{C} \right)^2 = \frac{2(\phi_D + V_R)}{q\epsilon_0 \epsilon_s N_d}$$

$$C_1 = -\frac{qN_d}{\epsilon_0 \epsilon_s} d_1$$

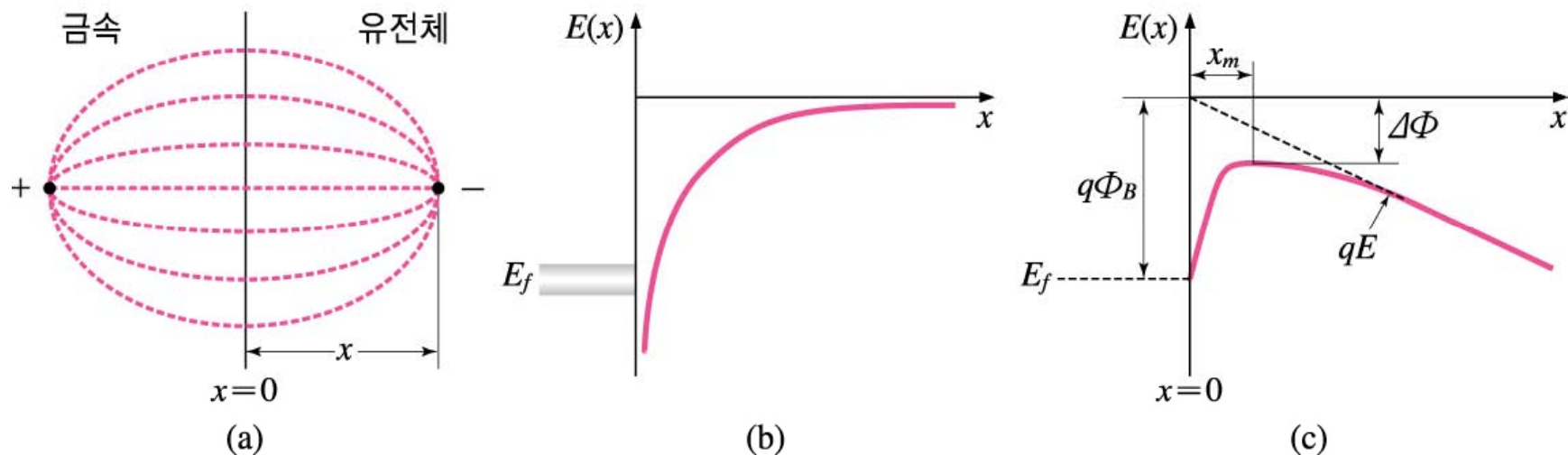
$$E = -\frac{qN_d}{\epsilon_0 \epsilon_s} (d_1 - x)$$

$$d_1 = \left[\frac{2\epsilon_0 \epsilon_s (\phi_D + V_R)}{qN_d} \right]^{1/2}$$

금속-반도체 접촉

◆ 쇼트키 효과

- 금속-절연체 경계에서 금속 표면의 전계공급과 영상전하 (image charge)의 효과
- 영상 전하 : 유전체 내에 x 만큼 거리에 있는 전자($-e$)는 전계를 생성하며 마치 영상전하 $+e$ 가 금속표면으로부터 똑 같은 거리의 금속 내부에 위치하는 것과 같은 전기력선을 발생



- 금속-유전체 경계면에서 영상전하와 전기력선
- 전기장이 0일 때 영상전하에 의한 전위 에너지 장벽의 변화
- 전기장이 일정할 때 영상전하에 의한 전위 에너지 장벽의 변화 (쇼트키 효과)

금속-반도체 접촉

◆ 쇼트키 효과 (영상력 유발 저하 효과)

* 쇼트키 장벽 저하($\Delta\Phi$)와 최대장벽 위치(x_m) 계산

$$F = \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_s(2x)^2} = -eE$$

$$x_m = \left[\frac{e}{16\pi\epsilon_0\epsilon_s E} \right]^{1/2}$$

$$-\Phi(x) = + \int_x^\infty E dx = \int_x^\infty \frac{e}{4\pi\epsilon_0\epsilon_s 4(x)^2} dx$$

$$\Delta\Phi = \left[\frac{eE}{4\pi\epsilon_0\epsilon_s} \right]^{1/2}$$

$$= \frac{-e}{16\pi\epsilon_0\epsilon_s x}$$

$$-\Phi(x) = \frac{-e}{16\pi\epsilon_0\epsilon_s x} - Ex$$

$$\frac{d(-\Phi(x))}{dx} = 0$$

쇼트키 장벽 저하가 작은 값처럼 보이지만 장벽높이와 장벽저하는 전류-전압 관계에서 지수항에 나타나게 되므로 장벽높이가 조금 변화해도 쇼트키 다이오드의 전류에 상당한 영향을 미칠 수 있다.

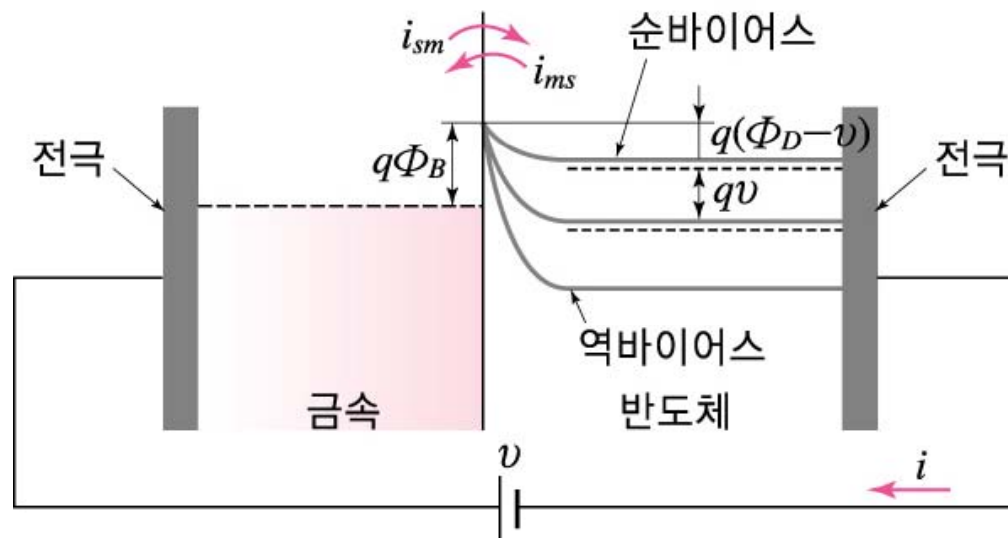
금속-반도체 접촉

◆ 쇼트키 다이오드의 전류

$$i_{sm} = I_{sm} \exp(-q\Phi_B/kT)$$

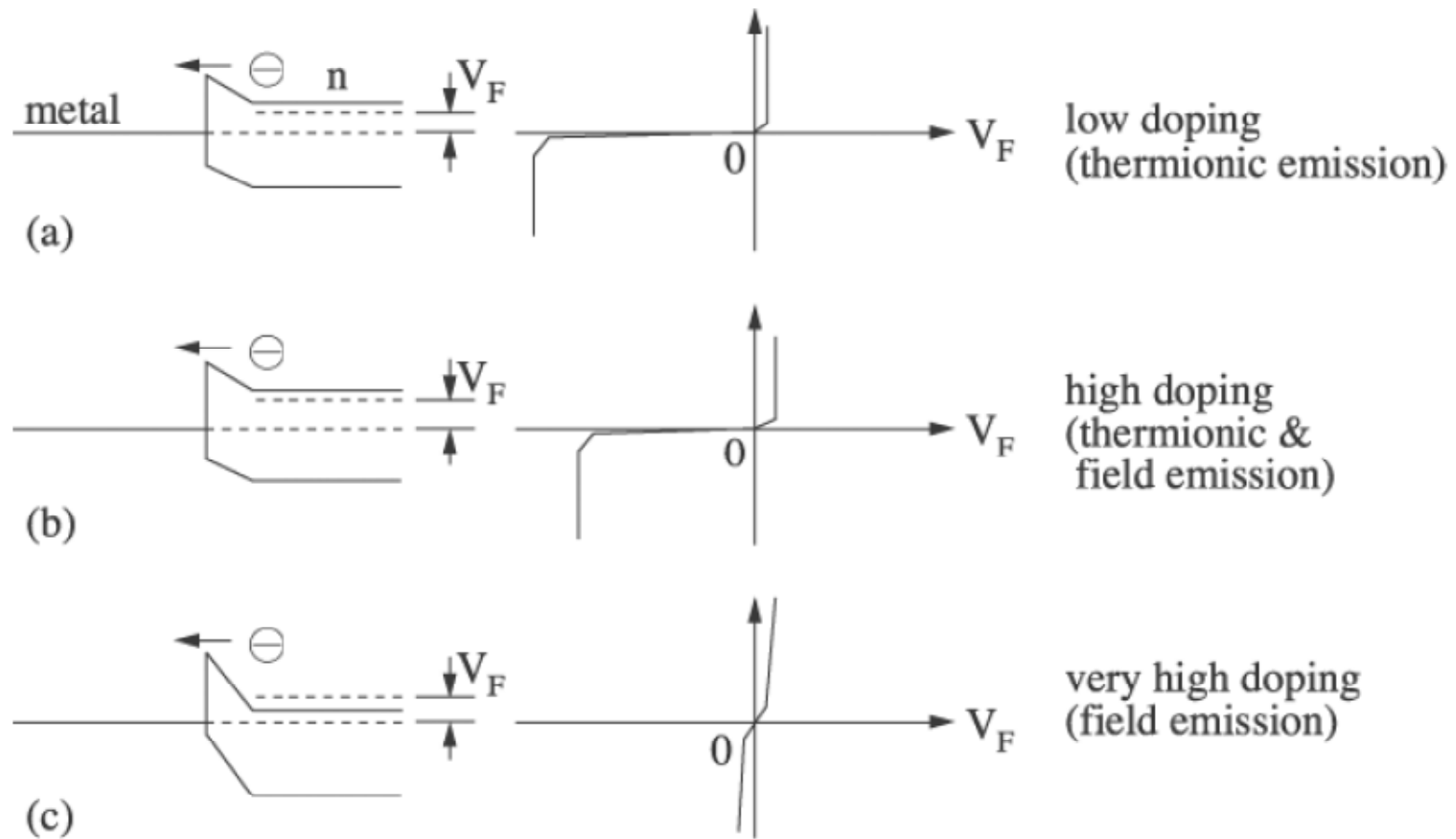
$$\begin{aligned} i_{ms} &= I_{ms} \exp(-q\Phi D/kT) \exp\{-(Ec-E_f)/kT\} \\ &= I_{ms} \exp(-q\Phi B/kT) \end{aligned}$$

- 바이어스 공급후 에너지 준위의 변화



금속-반도체 접촉

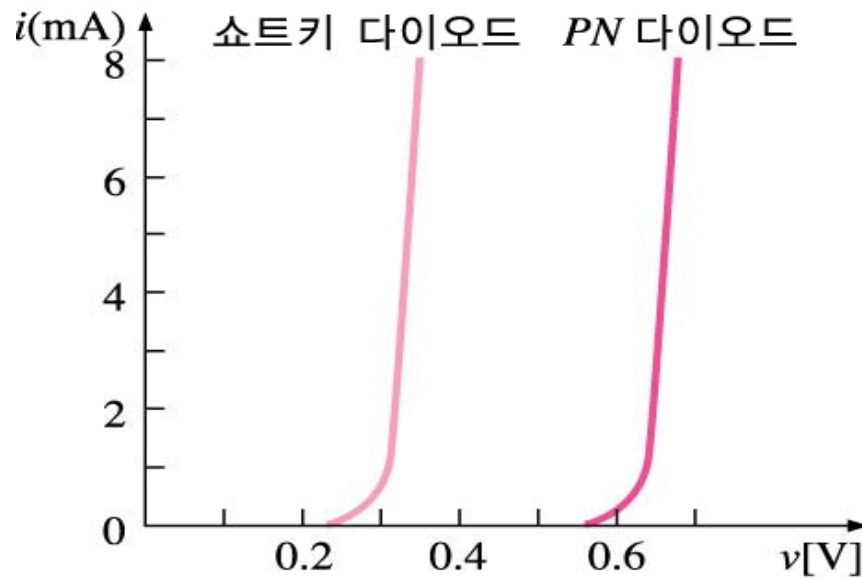
◆ n형 쇼트키 다이오드의 기판농도에 따른 전류-전압(I-V) 특성



금속-반도체 접촉

◆ 쇼트키 다이오드와 pn접합 다이오드와의 비교

1. 역포화전류 : 쇼트키 다이오드가 pn접합 다이오드보다 2~3배 큼
2. 스위칭속도 : 쇼트키 다이오드(pico) < pn접합 다이오드 (nano)
3. 전류 메커니즘 : 쇼트키 다이오드 – 다수캐리어 소자
pn접합 다이오드 – 소수캐리어 소자



(a) SBD의 특성

(SBD:schottky barrier diode)

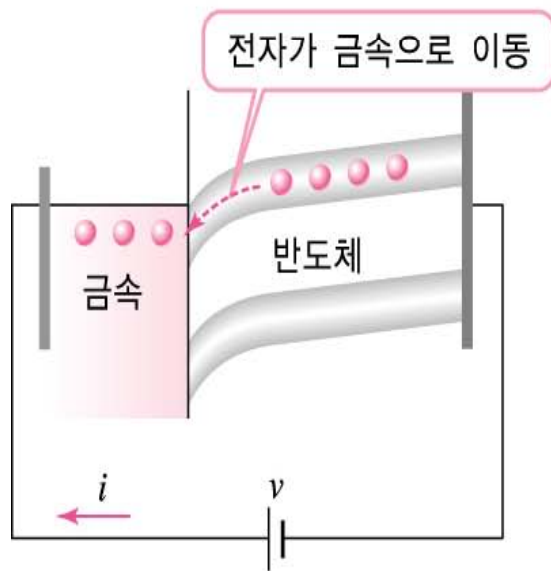


(b) SBD의 기호

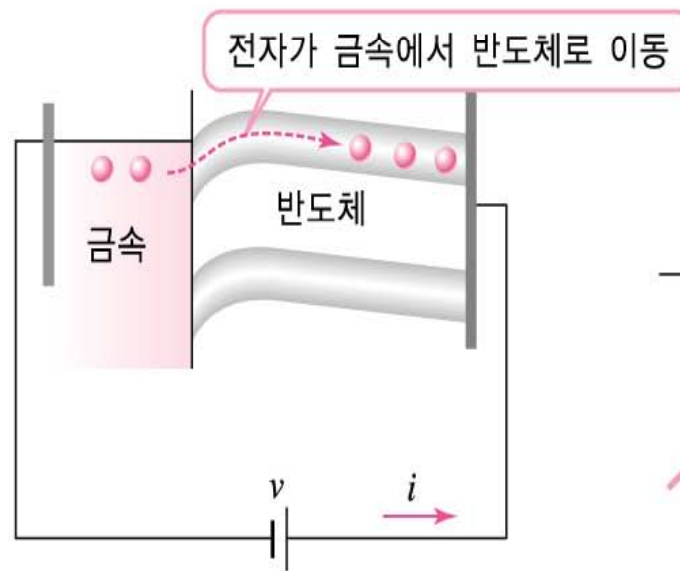
금속-반도체 접촉

◆ 옴(ohm)성 접촉

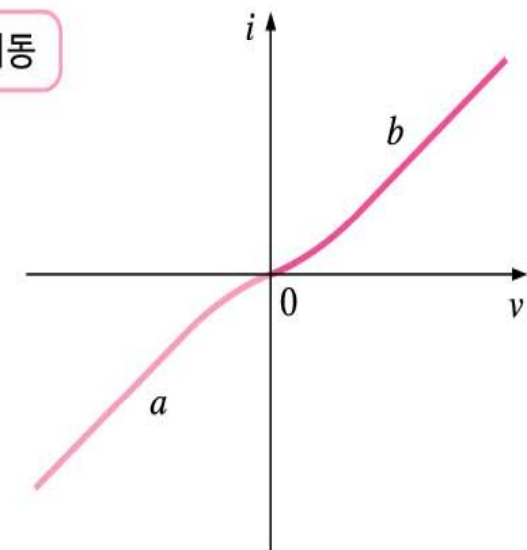
◆ 금속과 반도체 사이에 양방향으로 전류가 흐름



(a) 순바이어스



(b) 역바이어스



(c) $i-v$ 특성

- ◆ 낮게 도핑된 반도체 위에 금속을 접촉시키면 쇼트키 다이오드라는 정류성 접촉을 만들 수 있다. 금속과 반도체 사이의 이상적인 장벽 높이는 금속의 일함수와 반도체의 전자친화력의 차이가 된다.
- ◆ 금속을 기준으로 n형 반도체에 양전압을 인가하면(역방향 바이어스) 금속과 반도체 사이의 장벽은 더 높아지고 거의 전류가 흐르지 않는다.
금속을 기준으로 n형 반도체에 음전압을 인가하면(순방향 바이어스) 금속과 반도체 사이의 장벽은 낮아지고 열전자방출에 의하여 전자가 쉽게 반도체로부터 금속으로 흐르게 된다.
- ◆ 쇼트키 장벽 다이오드의 이상적인 전류-전압 특성은 pn접합 다이오드와 같다. 그러나 전류 메커니즘이 다르기 때문에 쇼트키 다이오드의 스위칭 속도가 더 빠르다.
또한 같은 순방향 바이어스 전압에서 쇼트키 다이오드는 pn접합 다이오드보다 더 큰 전류를 발생할 수 있다.
- ◆ 금속-반도체 접합은 낮은 저항 값을 가지면서 양단에 거의 전압 강하 없이 양방향으로 전류를 잘 흘려주는 저항성 접촉도 형성할 수 있다.

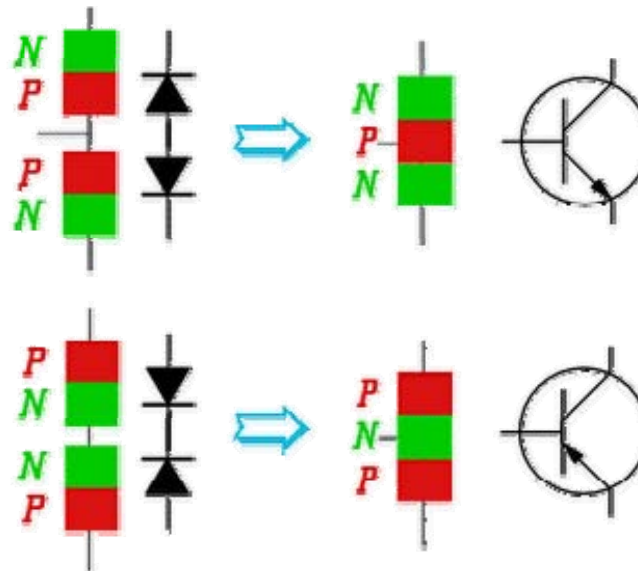
트랜지스터(Transistor)



- ◆ 다이오드 : 정류기능, 수동소자, 2단자 소자
- ◆ 트랜지스터 : 능동소자, 3단자 소자, 두 단자에 인가된 전압에 따라 한 단자에서 전류를 제어하는 소자.
 - ◆ 전기적 신호를 증폭하기 위한 선형 증폭기로 사용
 - ◆ 전자 스위치로 사용
- ◆ 기본 트랜지스터 종류
 1. 바이폴라(bipolar) 트랜지스터
 2. 금속-산화막-반도체 트랜지스터(MOSFET)
 3. 접합 전계효과트랜지스터(JFET)

바이폴라 트랜지스터 (Bipolar Transistor)

- ◆ 바이폴라 트랜지스터는 전압 제어 전류원임.
- ◆ 기본 구조
 - ◆ **이미터** : 트랜지스터에 있어서 캐리어(전자 또는 정공)를 주입시키는 부분으로 베이스와의 사이에 순방향 전압(p형쪽에 +극을 n형쪽에 대하여 -극)이 가해진다. (불순물을 많이 도핑 ++)
 - ◆ **베이스** : 트랜지스터에 있어서 이미터로부터 주입된 캐리어(전자 또는 정공)의 이동을 제어하기 위한 전류를 공급하는 부분을 말하며, 구조상 중앙의 좁은 부분이 베이스이다. (불순물을 중간정도 도핑 + , 폭을 매우 좁게)
 - ◆ **컬렉터** : 트랜지스터에 있어서 캐리어(전자 또는 정공)를 모으는 부분으로 베이스와의 사이에 역방향 전압이 가해진다. (불순물을 적게 도핑, 폭을 매우 넓게)

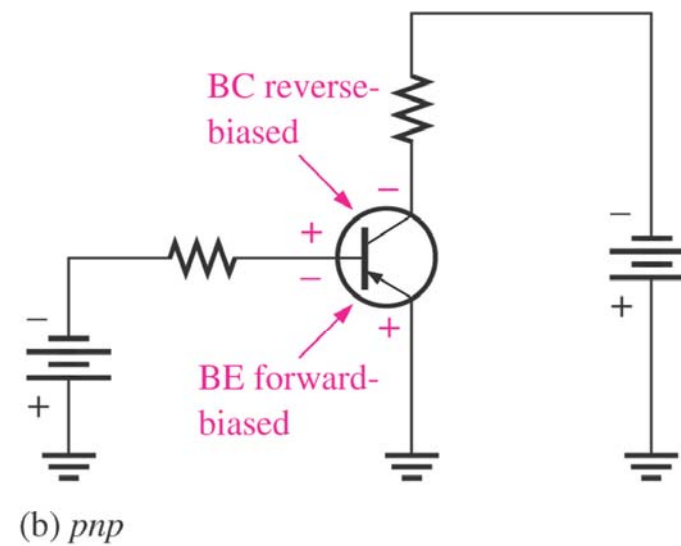
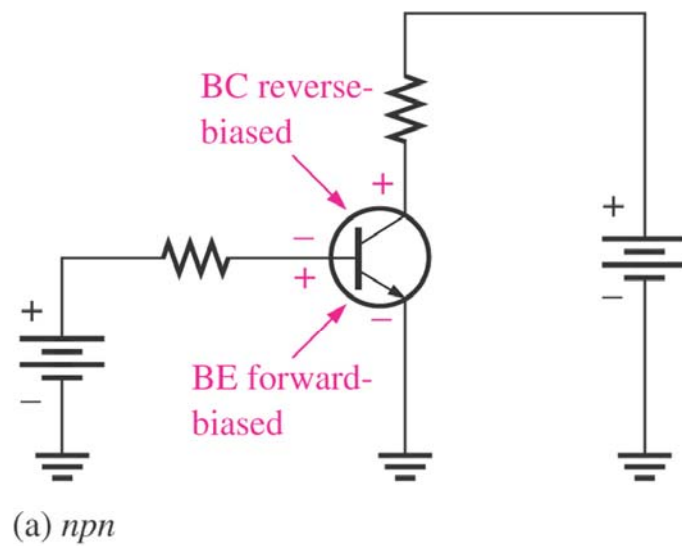


바이폴라트랜지스터

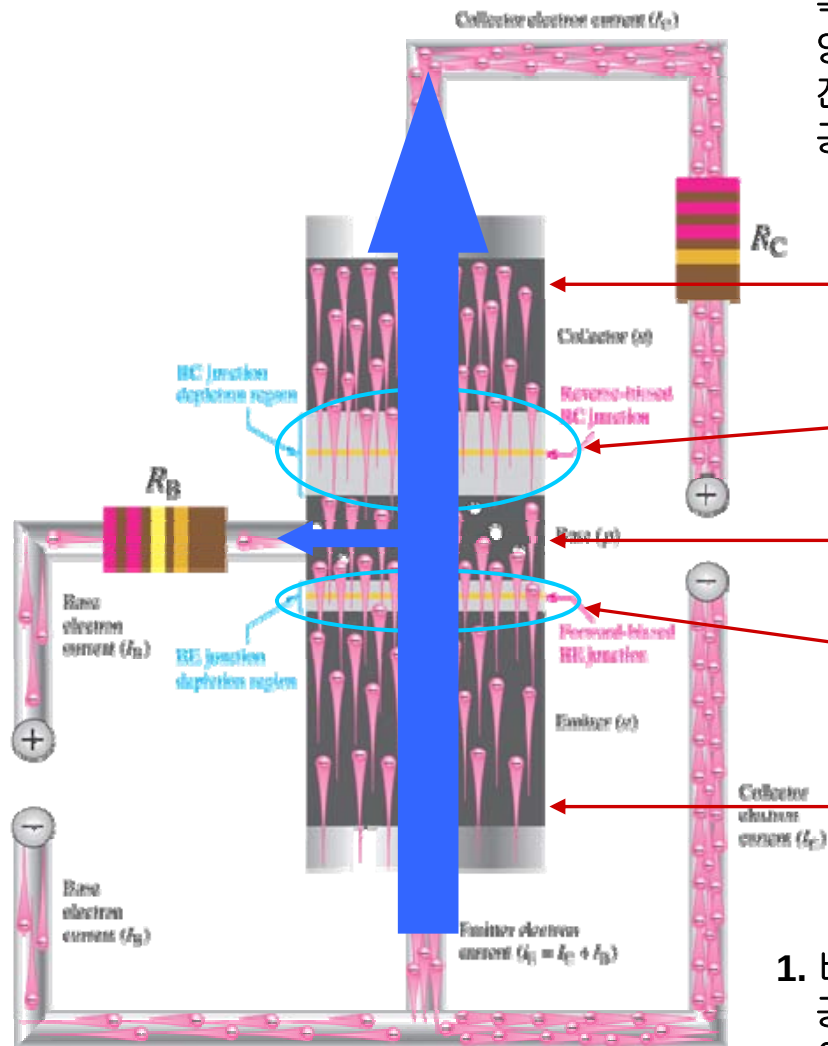
◆ 기본 동작

◆ 트랜지스터를 증폭하기 위한 바이어스

- BE Junction : 순방향 바이어스
- BC Junction : 역방향 바이어스



바이폴라트랜지스터



2. 베이스-컬렉터가 역방향으로 바이어스 : **BC** 공핍층의 폭 넓어짐 : 이미터로부터 좁고 얇게 도핑된 베이스 영역으로 흘러간 재결합을 하지 못한 대부분의 전자들은 **BC** 공핍영역으로 확산해 들어감.(컬렉터 공급전압의 인력에 의해 전자 당김)

농도가 낮게 전자로 도핑
: n형 반도체

BC접합이 역방향 바이어스
: 공핍층의 폭이 넓어짐

농도가 중간정도로 정공으로 도핑
: p형 반도체

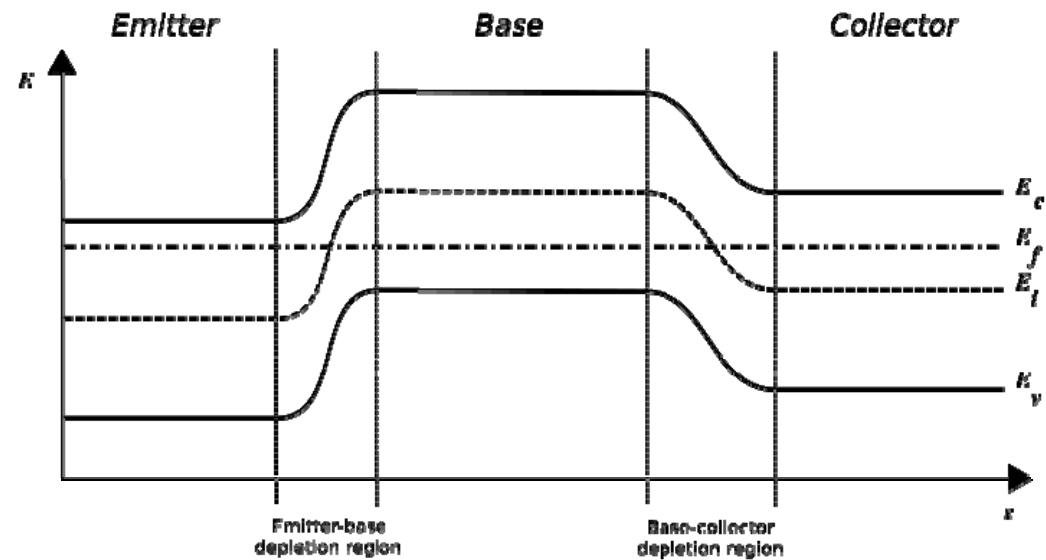
BE접합이 순방향 바이어스
: 공핍층의 폭이 좁아짐

농도가 가장 높게 전자로 도핑
: n형 반도체

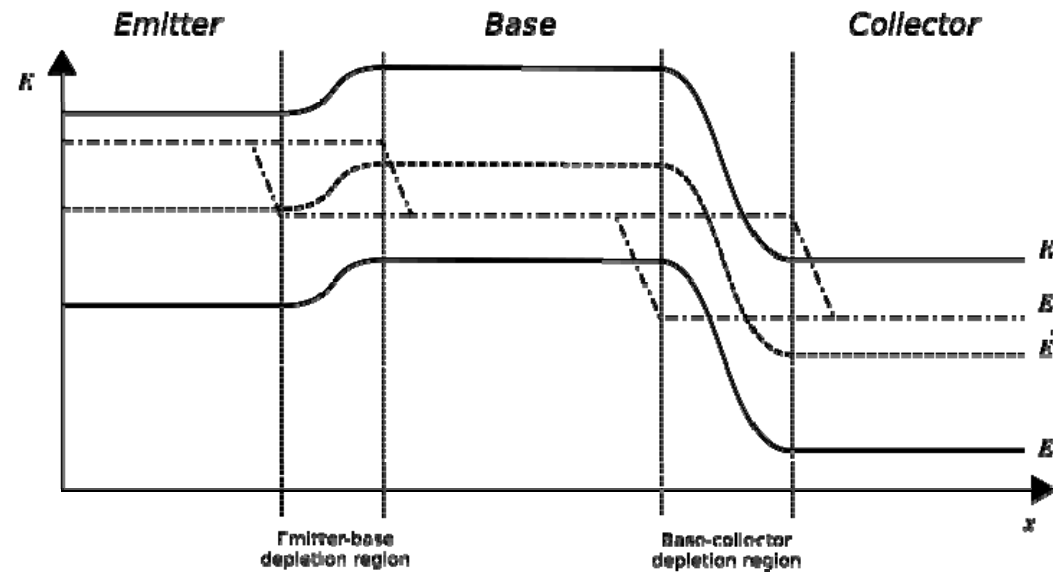
1. 베이스-이미터가 순방향으로 바이어스 : **BE** 공핍층의 폭 좁아짐 : 전도대의 자유전자들이 n형 이미터에서 p형 베이스로 확산

NPN 바이폴라 트랜지스터 에너지 밴드

열평형상태



순방향 활성화



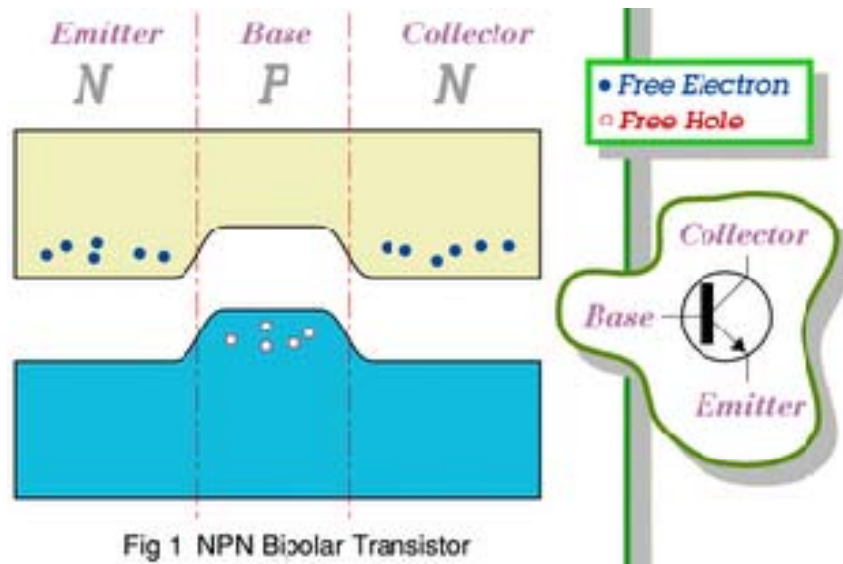
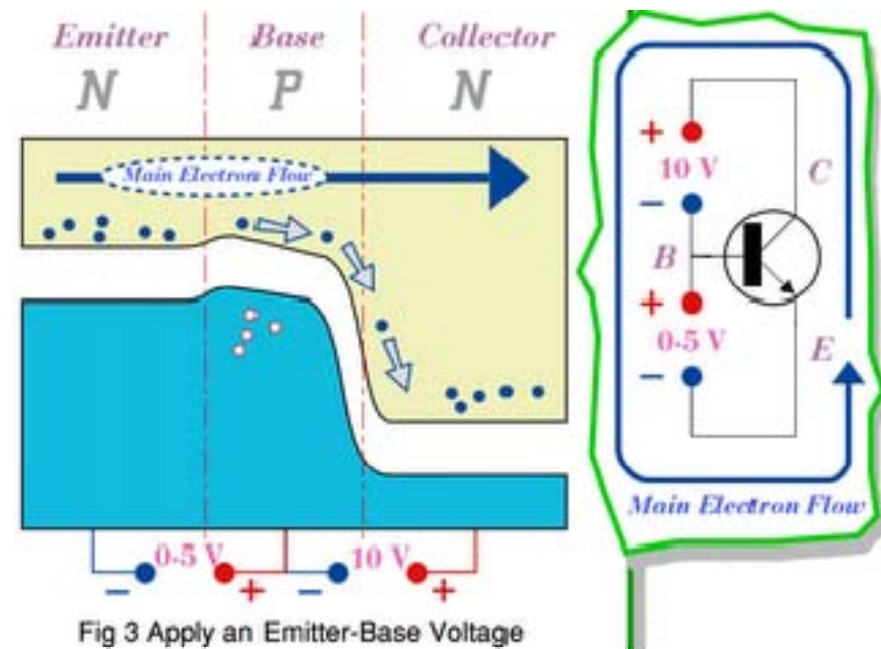


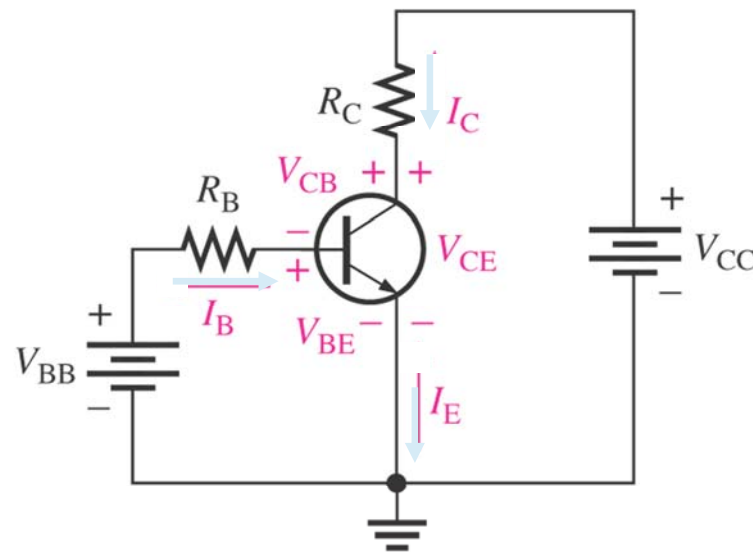
Fig 1 NPN Bipolar Transistor



전류 전압 해석

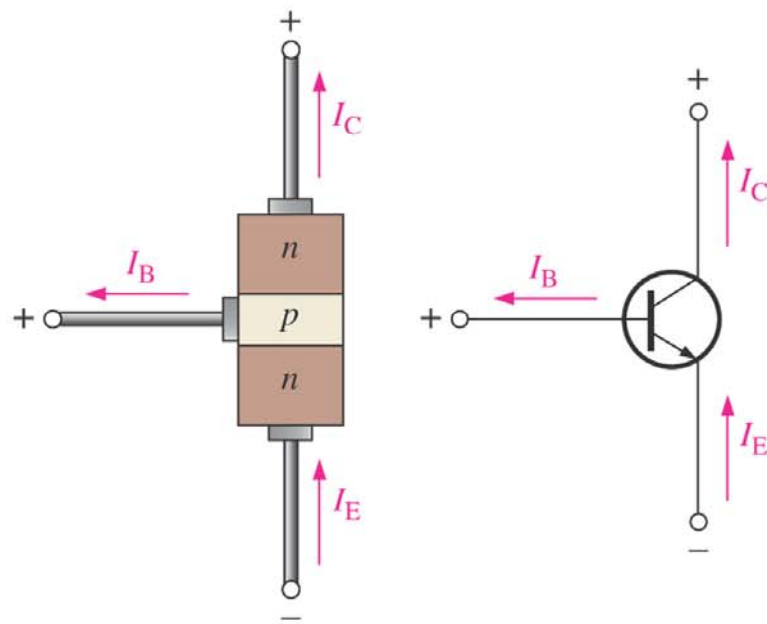
◆ 전압 및 전류 정의

- I_B : 베이스 전류(dc)
- I_E : 에미터 전류(dc)
- I_C : 컬렉터 전류(dc)
- V_{BE} : 베이스와 에미터 사이의 직류전압
- V_{CB} : 베이스와 컬렉터 사이의 직류전압
- V_{CE} : 컬렉터와 에미터 사이의 직류전압

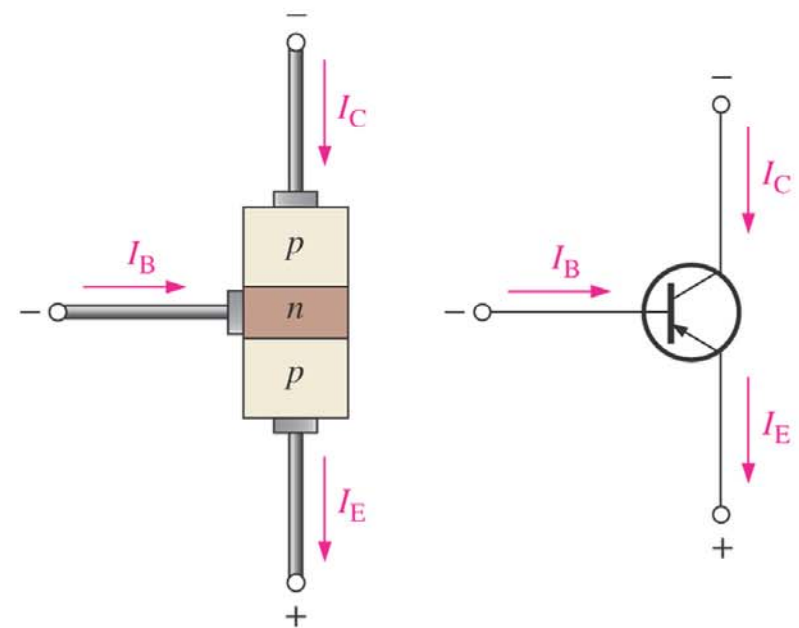


트랜지스터 전류

$$I_E = I_C + I_B$$



(a) npn



(b) pnp

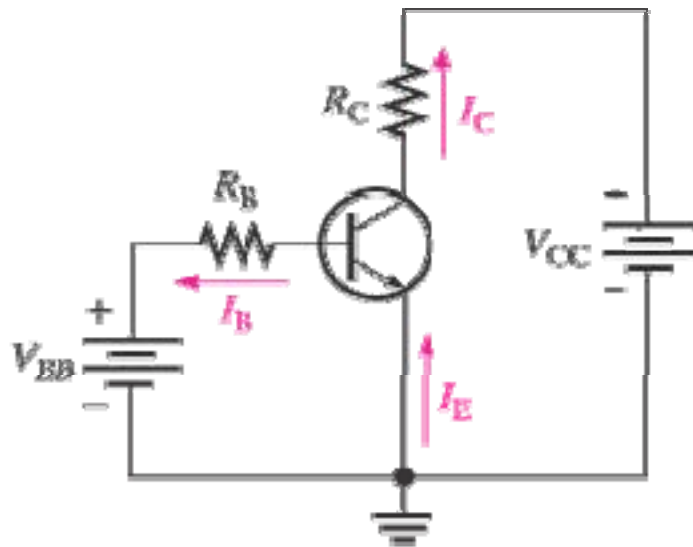
트랜지스터 특성과 파라미터

◆ 직류베타 (공통 이미터 전류 이득)

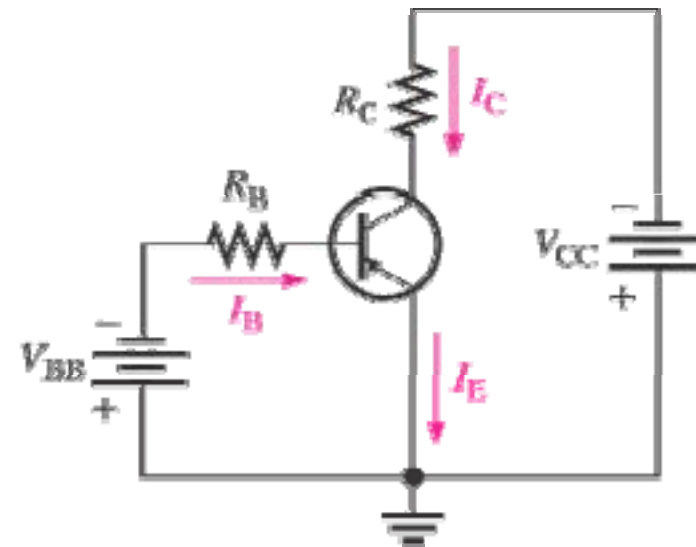
- $\beta_{DC} = I_C / I_B$ (β_{DC} : 20~200 이상, hybrid parameter에서 h_{fe} 로 표시)
- 직류 전류이득, 정적 순방향 전류 전달비

◆ 직류알파 (공통 베이스 전류 이득)

- $\alpha_{DC} = I_C / I_E$ (α_{DC} : 0.95 ~ 0.99) : 항상 1보다 적음
- 전자 전달률



(a) npn



(b) pnp

전류 전압 해석(계속)

$$V_{BE} \approx 0.7V$$

$$V_{R_B} = V_{BB} - V_{BE}$$

$$\text{where } V_{R_B} = I_B R_B$$

$$I_B R_B = V_{BB} - V_{BE}$$

$$\therefore I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

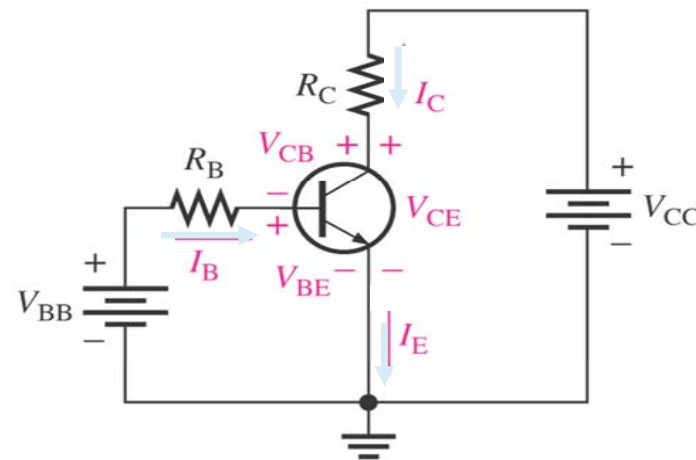
$$V_{CE} = V_{CC} - V_{RC}$$

$$\text{where } V_{RC} = I_C R_C$$

$$\therefore V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = V_{CC} - \beta_{DC} I_B R_C \quad (\because I_C = \beta_{DC} I_B)$$

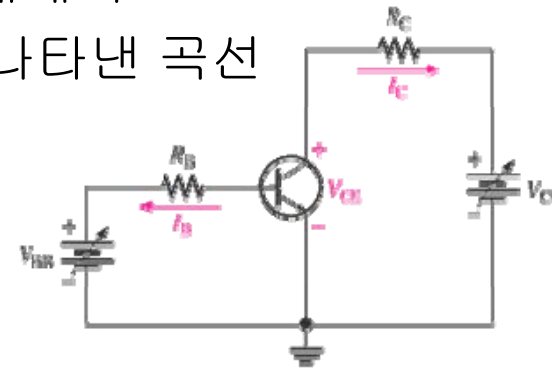
$$V_{CE} = V_{BE} + V_{CB}$$

$$\therefore V_{CB} = V_{CE} - V_{BE}$$

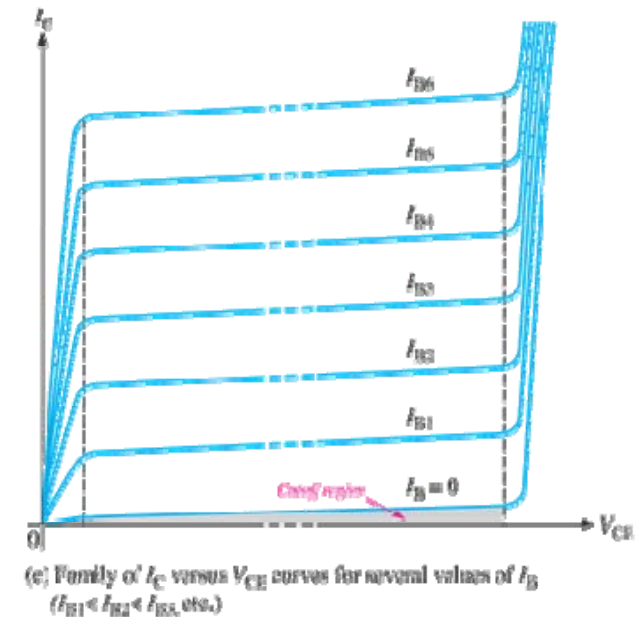
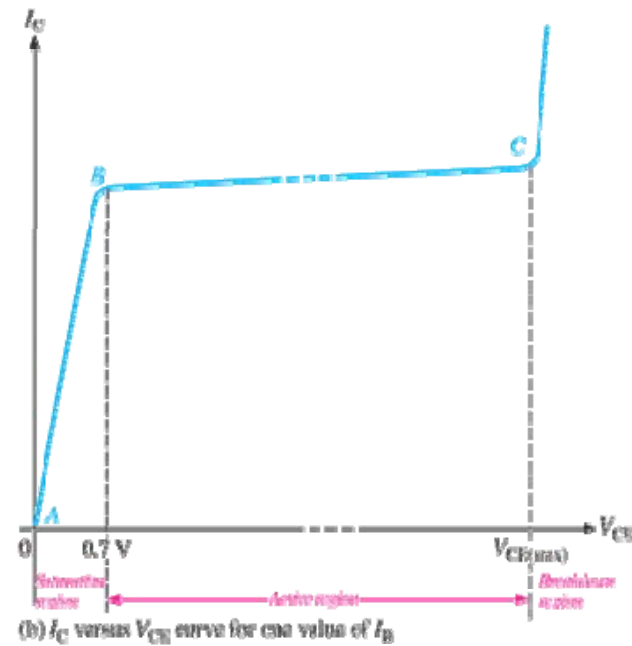


컬렉터 특성곡선

- ◆ I_B 를 특정값으로 고정시킨 상태에서
 - V_{CE} 변화에 따른 I_C 의 변화를 나타낸 곡선

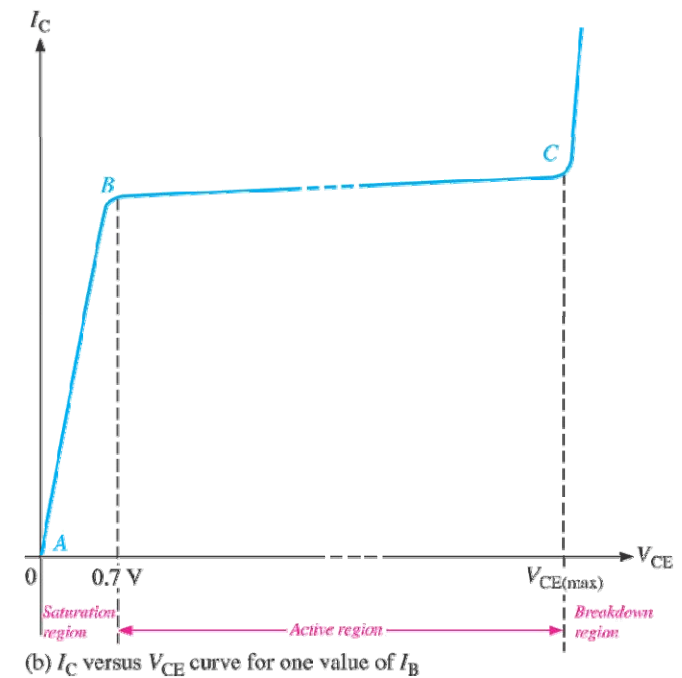
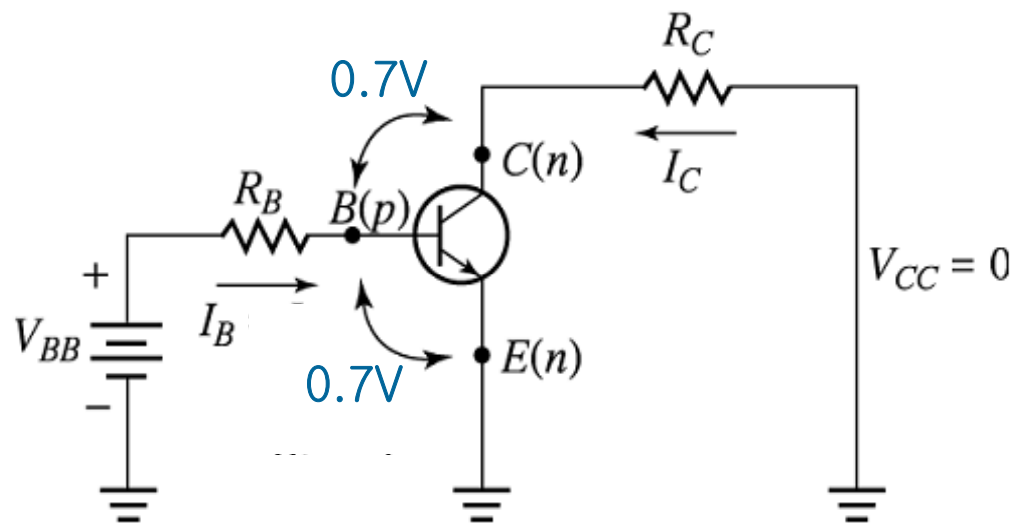


(a) Circuit



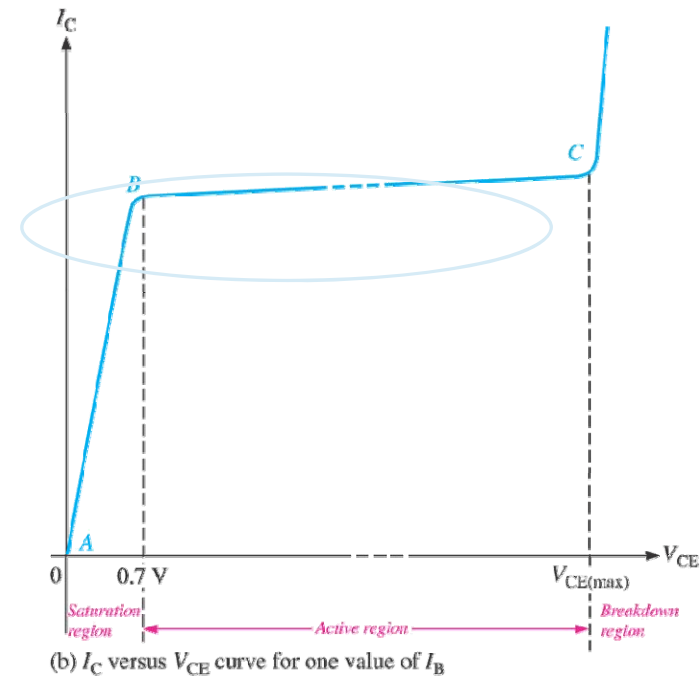
포화영역 (Saturation Region)

- ◆ I_B 가 어떤 값을 갖도록 V_{BB} 를 고정하고(0이 아님), $V_{CC} = 0$ 으로 함
 - BE : 순방향 바이어스
 - BC : 순방향 바이어스
- ◆ 그림의 A-B 구간



활성 영역 (Active Region)

- ◆ V_{CE} 가 0.7V를 초과할 때
 - BE : 순방향 바이어스
 - BC : 역방향 바이어스
- ◆ 특정 I_B 값으로 고정시킨 상황에서, V_{CE} 를 계속 증가시켜도 I_C 는 더 이상 상승하지 못하고 일정하게 됨
- ◆ $I_C = \beta_{DC} I_B$ 의 관계가 성립되는 영역
- ◆ 그림의 B-C 구간



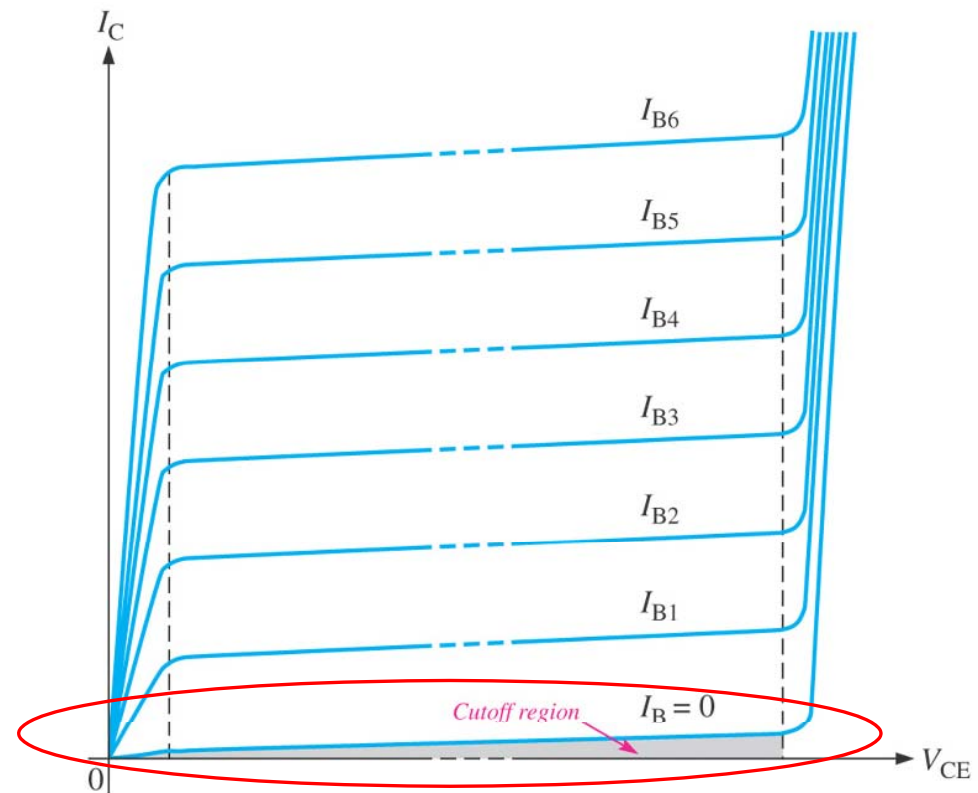
차단영역 (Cutoff Region)

◆ $V_{BB} = 0$ 으로 하여 $I_B = 0$ 으로 고정시킨 후, V_{CC} 를 계속 증가시키면

- BE : 역방향 바이어스
- BC : 역방향 바이어스

◆ I_C 는 전류가 흐르지 않음

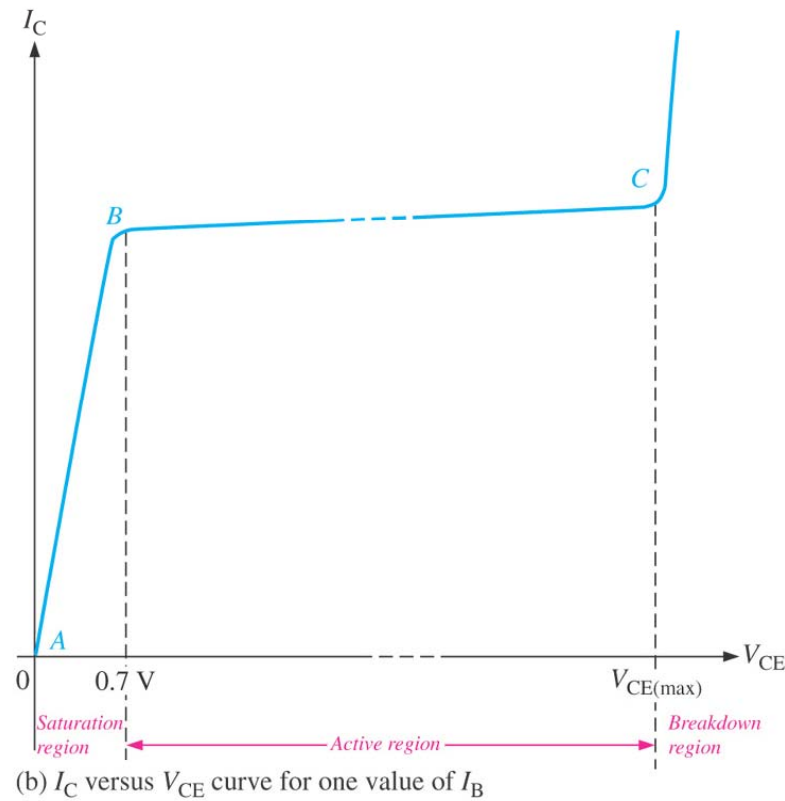
- 차단됨 : 차단 영역



(c) Family of I_C versus V_{CE} curves for several values of I_B
 ($I_{B1} < I_{B2} < I_{B3}$, etc.)

항복영역 (Breakdown Region)

- ◆ V_{CE} 가 아주 높은 전압에 도달하면 **BE** 접합은 항복이 일어남
 - I_C 가 급격히 상승
 - $V_{CE(max)}$ 값은 넘지 않는 범위에서 트랜지스터를 사용해야 함



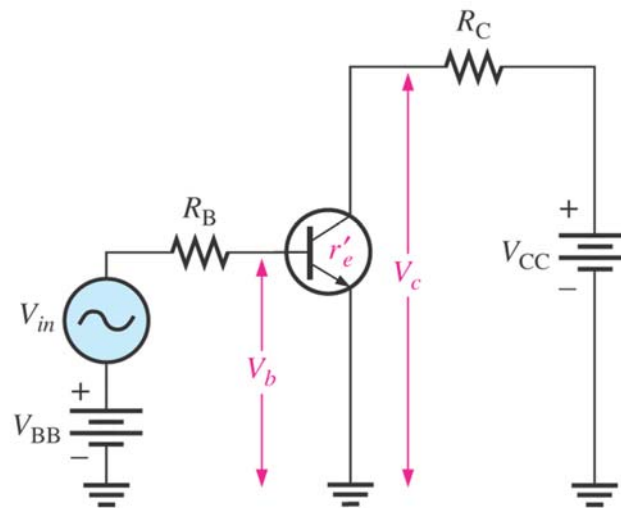
npn트랜지스터일때 각 영역별 바이어스

	B-E	B-C	기 능
활성영역 Active Region	순방향 Forward	역방향 Reverse	증폭 Amplification
포화영역 Saturation Region	Forward	Forward	on
차단영역 Cutoff Region	Reverse	Reverse	off

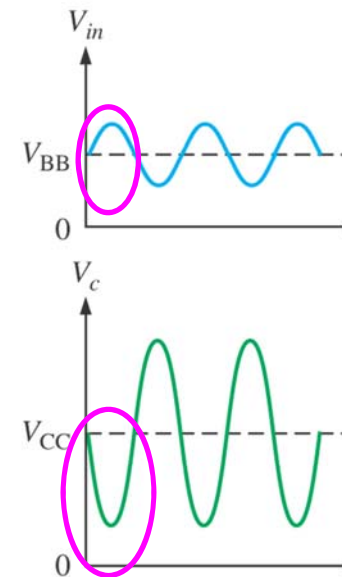
증폭기로서의 트랜지스터

◆ 활성영역에서 동작하도록 바이어스 되었을 때 증폭기로 동작함

- BE : 순방향 바이어스
 - **BE**접합은 낮은 저항을 가짐
- BC : 역방향 바이어스
 - **BC**접합은 높은 저항을 가짐

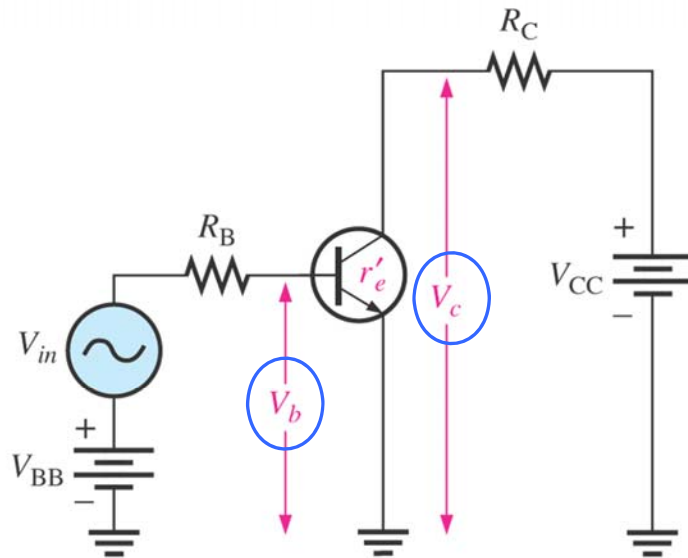


(a) Circuit with ac input voltage V_{in} and dc bias voltage superimposed



(b) Waveforms

증폭기로서의 트랜지스터(계속)



$$I_e \approx I_c \quad (\because I_c \gg I_b)$$

$$I_e \approx I_c = \frac{V_b}{r'_e}$$

$$V_c = I_c R_C$$

$$V_{in} = V_b + I_b R_B$$

$$\therefore V_b = V_{in} - I_b R_B$$

교류전압 이득 A_v

$$A_v = \frac{V_c}{V_b}$$

where $V_c = I_c R_C = I_e R_C$ and $V_b = I_e r'_e$

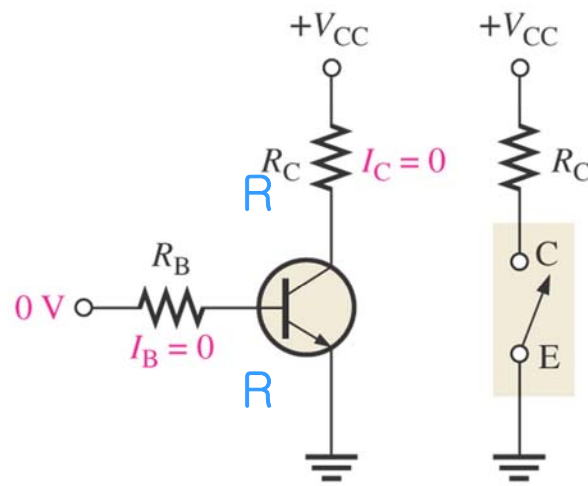
then $A_v = \frac{V_c}{V_b} \cong \frac{I_e R_c}{I_e r'_e}$

$$\therefore A_v = \frac{R_c}{r'_e}$$

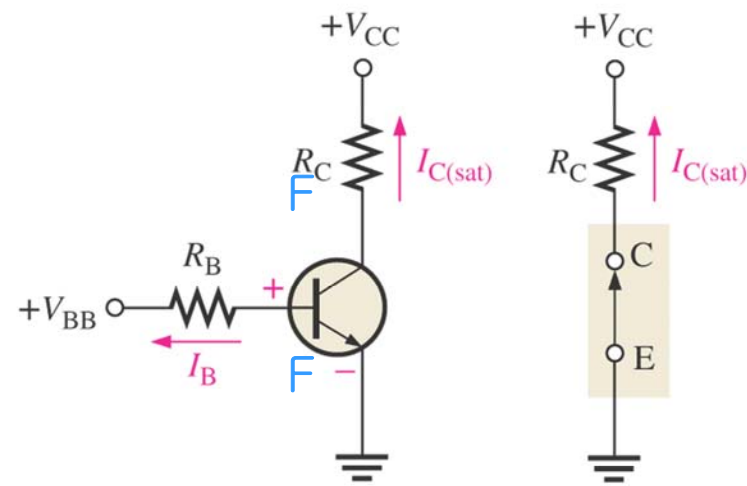
스위치로서의 트랜지스터

◆ 차단영역과 포화영역이 되도록 바이어스 함

- 차단영역 : **switch-off**
- 포화영역 : **switch-on**



(a) Cutoff — open switch



(b) Saturation — closed switch

$$V_{CE(cutoff)} = V_{CC}$$

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_C} \cong \frac{V_{CC}}{R_C} (\because V_{CC} \gg V_{CE(sat)})$$

$$I_{B(min)} = \frac{I_{C(sat)}}{\beta_{DC}}$$



- ◆ 순방향-활성 모드에서 **B-E**접합은 순방향 바이어스, **B-C**접합은 역방향 바이어스
- ◆ 이미터로부터 다수 캐리어는 베이스에 소수 캐리어로 주입된다. 이런 소수 캐리어는 베이스에서 **B-C** 공간전하 영역까지 확산하며, 이들은 공간전하 영역에서 컬렉터로 흘러나간다.
- ◆ 트랜지스터가 순방향-활성 모드 동작으로 바이어스 시킬 때, 트랜지스터의 한 단자에서 전류(컬렉터 전류)는 다른 두 단자에 인가한 전압(**B-E** 전압)으로 조절한다.
- ◆ 트랜지스터는 증폭기, 스위칭 소자로 사용된다.