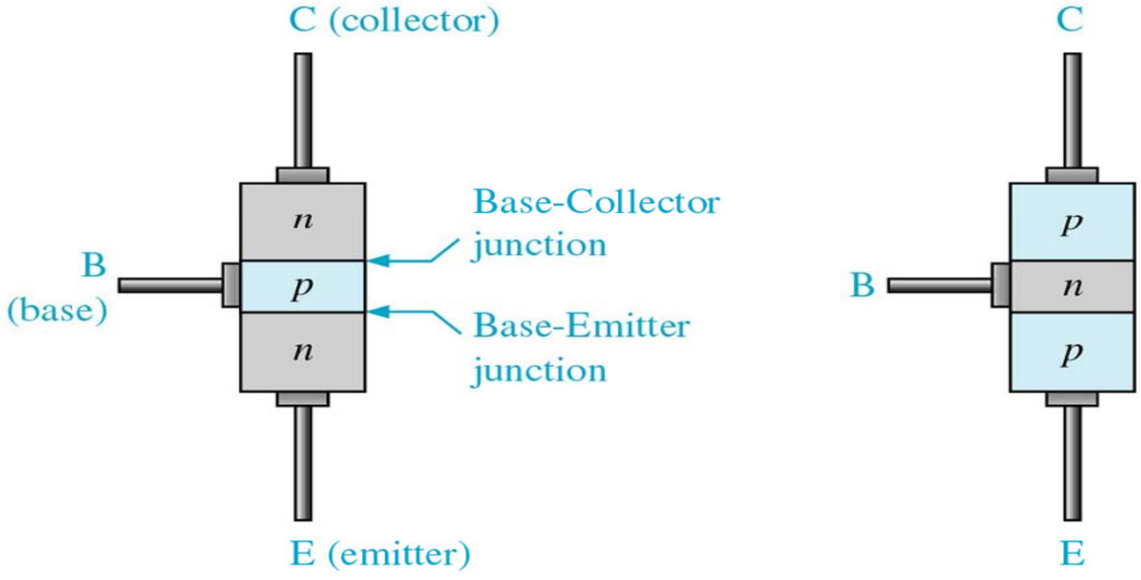
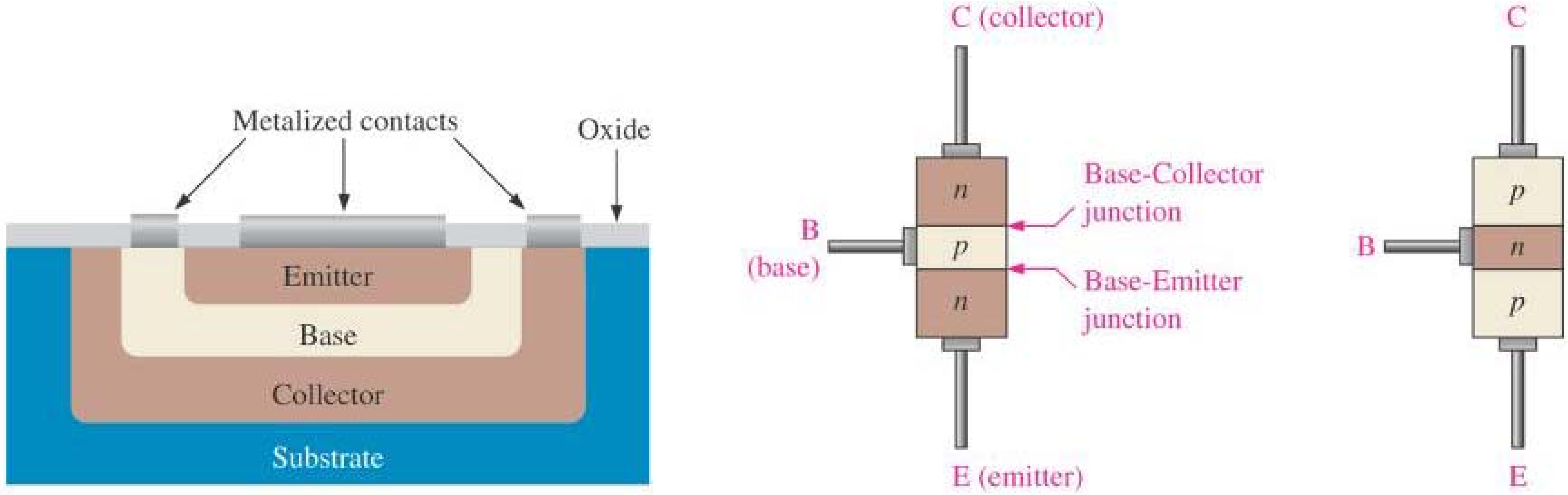
Ch. 4
Bipolar Junction Transistor (BJT)



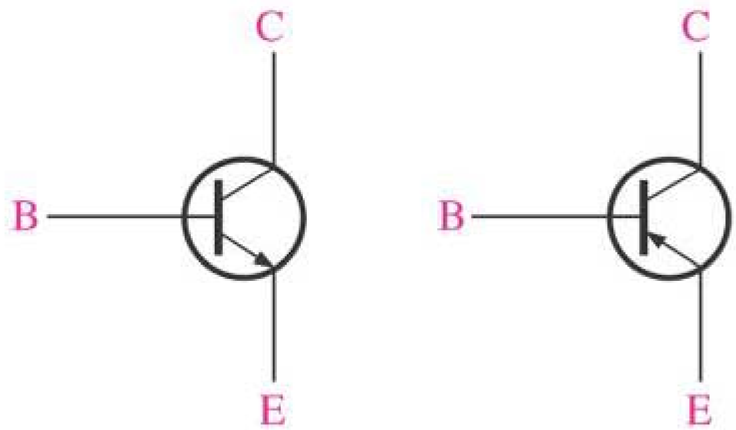
(a) *npn* (b) *pnp*

HANKYONG NATIONAL UNIV.

트랜지스터의 구조



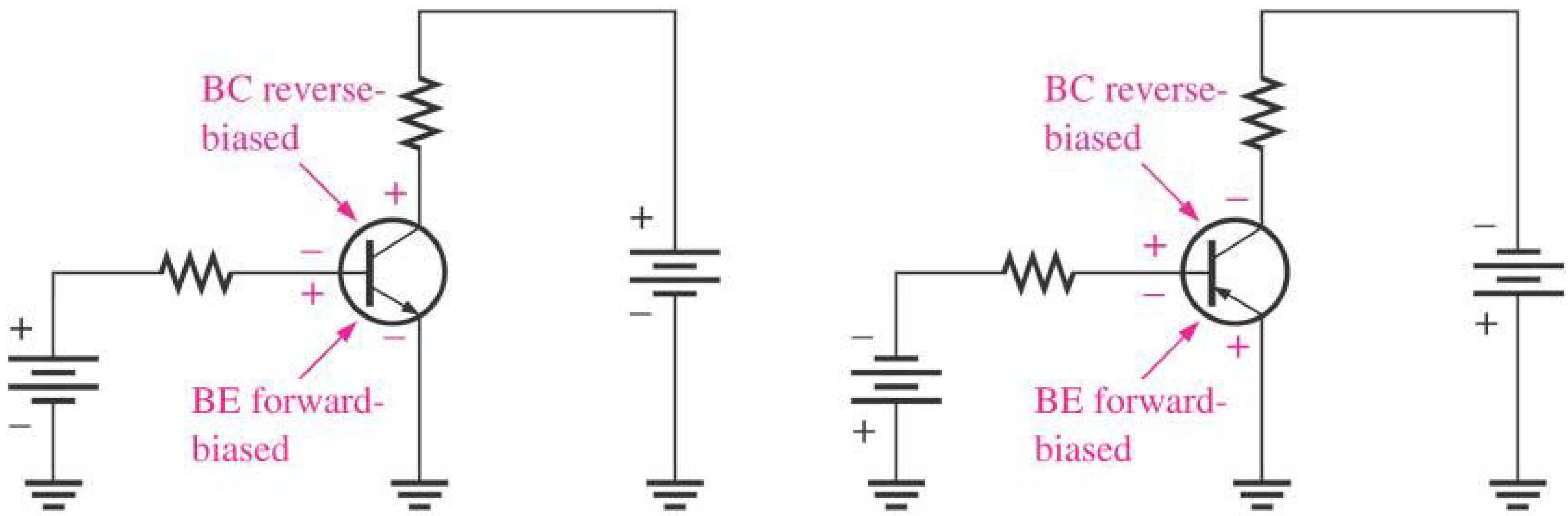
(a) Basic epitaxial planar structure (b) *npn* (c) *pnp*



(a) *npn* (b) *pnp*

기본적인 트랜지스터의 동작

- BE 접합
  - 순방향 바이어스
  - 공핍층 폭 좁아짐
- BC 접합
  - 역방향 바이어스
  - 공핍층 폭 넓어짐

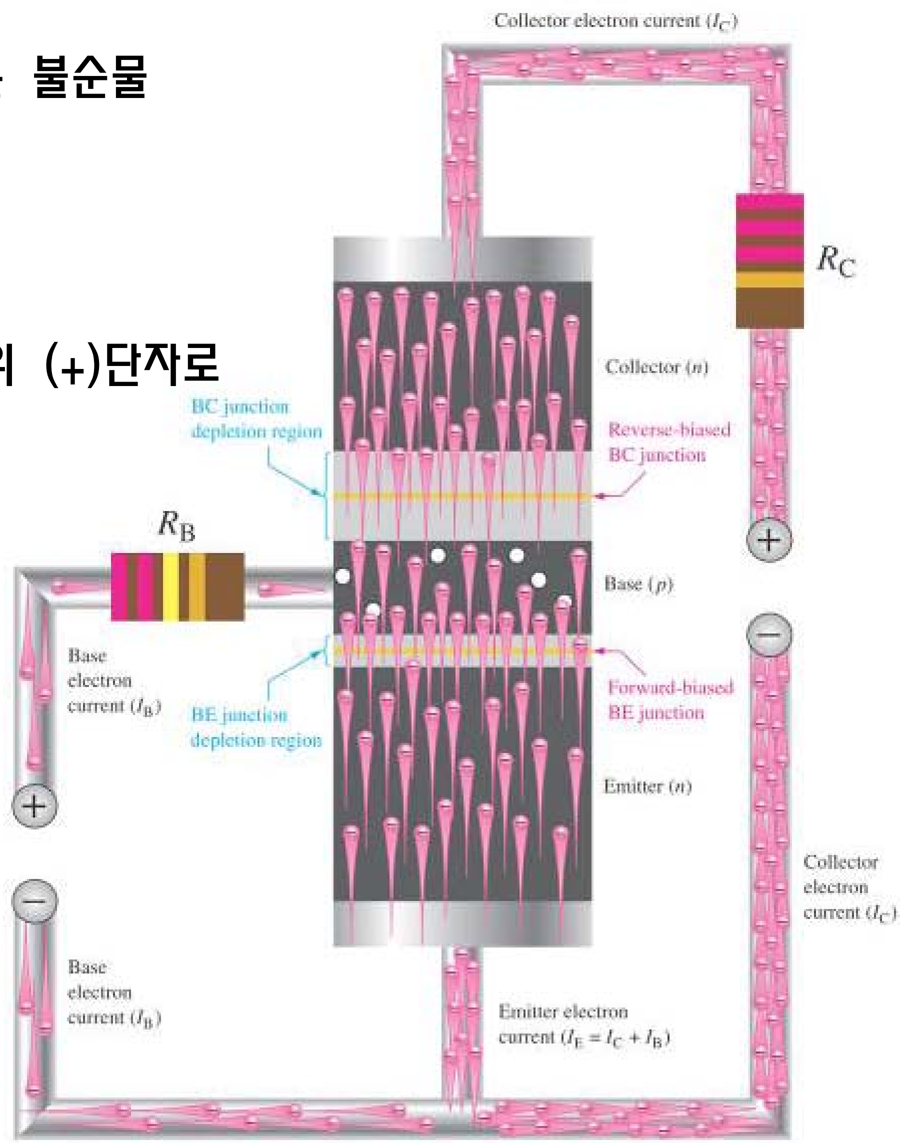


(a) *npn* (b) *pnp*

기본적인 트랜지스터의 동작

- E 영역(N)에서 B로 쉽게 확산 (전자, e)
- B 영역: 폭이 좁고 소수 정공 존재 (←적은 불순물 도핑)
- 확산된 전자는 일부만이 Base에서 재결합

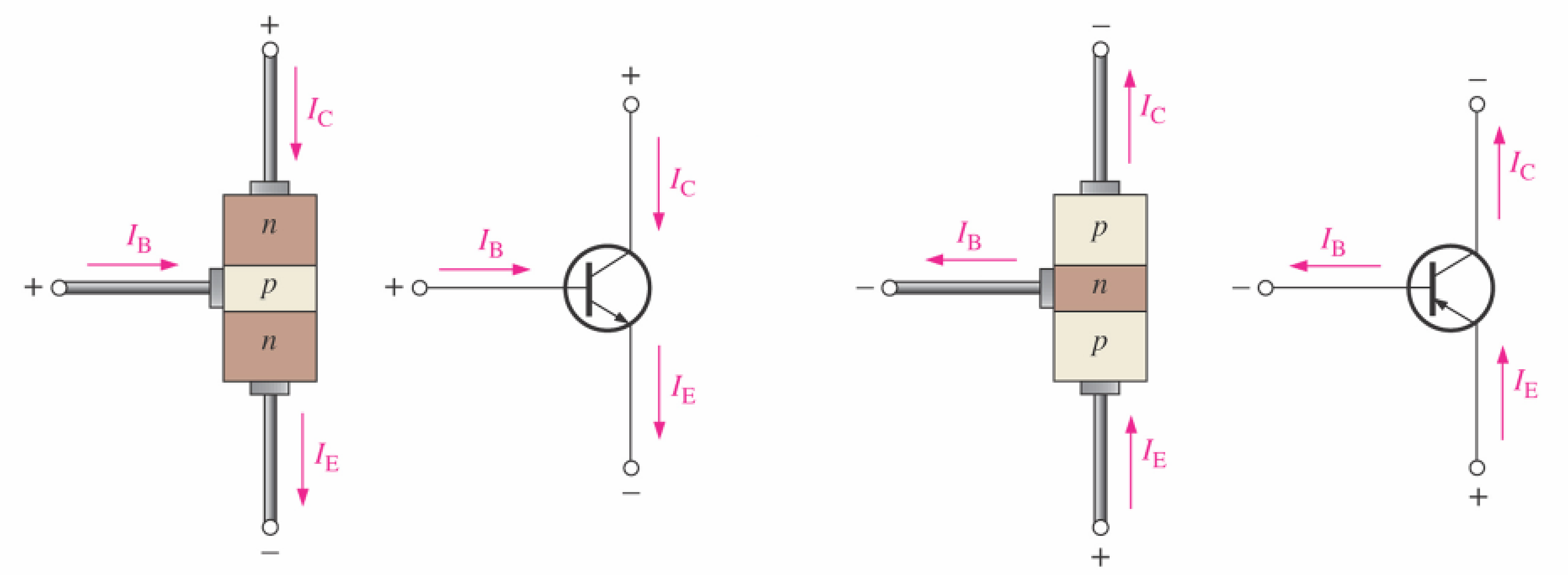
  → Base 전류
- 확산된 전자의 대부분은 BC 영역 (역방향)의 (+)단자로 이동 → Collector 전류



기본적인 트랜지스터의 동작

- BJT 전류

$$I_E = I_C + I_B$$



(a) *npn* (b) *pnp*

트랜지스터 특성과 파라미터

Yun SeopYu

- 직류 베타 (β_{DC})와 직류 알파 (α_{DC})
  - β_{DC}
    - 컬렉터 전류와 베이스 전류의 비 (전류이득)
    - 20 ~200

$$\beta_{DC} = \frac{I_C}{I_B}$$

  - α_{DC}
    - 컬렉터 전류와 이미터 전류의 비
    - 0.95 ~ 0.99 < 1

$$\alpha_{DC} = \frac{I_C}{I_E}$$

- β_{DC}와 α_{DC}의 관계
  - $I_E = I_C + I_B$ ➔ $I_E/I_C = 1 + I_B/I_C$
  - ➔ $1/\alpha_{DC} = 1 + 1/\beta_{DC} = (1 + \beta_{DC})/\beta_{DC}$

$$\beta_{DC} = \frac{\alpha_{DC}}{1-\alpha_{DC}}$$

$$\alpha_{DC} = \frac{\beta_{DC}}{1+\beta_{DC}}$$

Ex.4-1

Q. I_B =50μA, I_C =3.65mA, β_{DC} , I_E?

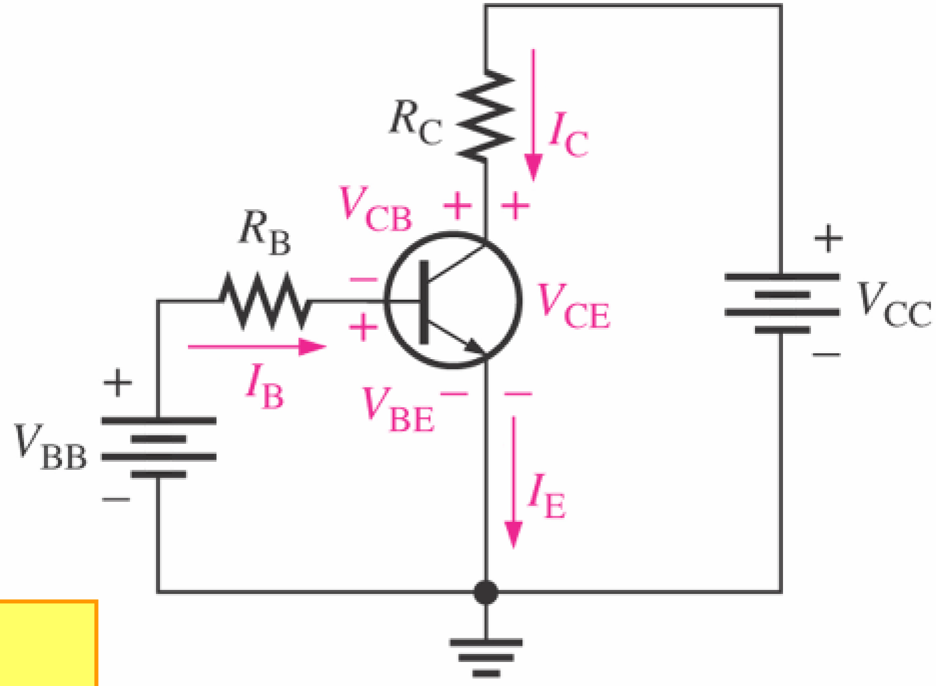
A. $\beta_{DC} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{3.65\text{mA}}{50\mu\text{A}} = 73$

$I_E = I_C + I_B$ =3.65mA+ 50μA=3.70mA

트랜지스터 특성과 파라미터

직류 전압 해석

- 전류 : I_E, I_C, I_B
- 전압 : V_{BE}, V_{CB}, V_{CE}
- 바이어스: V_{BB}, V_{CC}



$V_{BE} \cong 0.7V$: pn 접합

$I_B = (V_{BB} - V_{BE})/R_B$

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

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

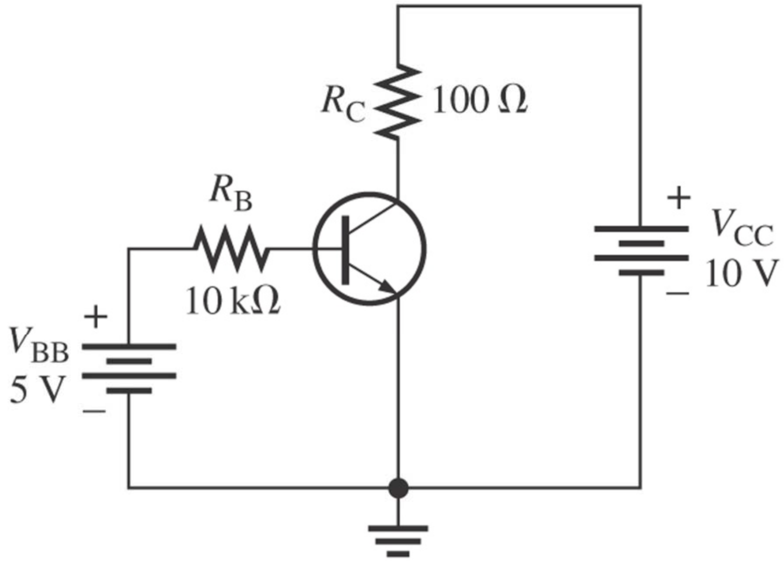
$I_E \approx I_C$ ($\leftarrow I_E = I_C/\alpha_{DC}$)

트랜지스터 특성과 파라미터

Ex.4-2

Q. 전류 : I_E, I_C, I_B 전압 : V_{BE}, V_{CB}, V_{CE} 을 구하라.

단, β_{DC} =150



A.

$V_{BE} \cong 0.7V$: pn 접합

$I_B = (V_{BB} - V_{BE})/R_B = (5-0.7)/10k = 430\mu A$

$I_C = \beta_{DC} I_B = (150)(430\mu A) = 64.5mA$

$I_E = I_C + I_B = 64.5mA + 430\ \mu A = 64.9mA$

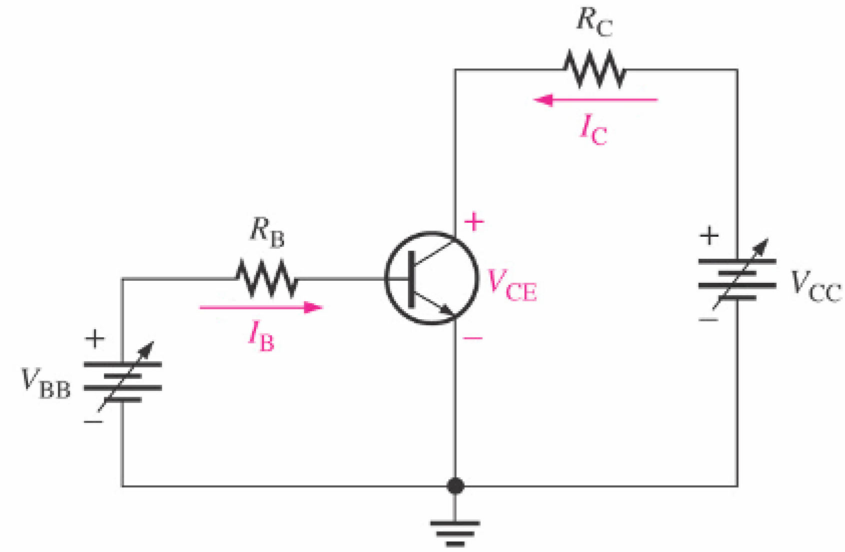
$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 10V - (64.5mA)(100\Omega)$

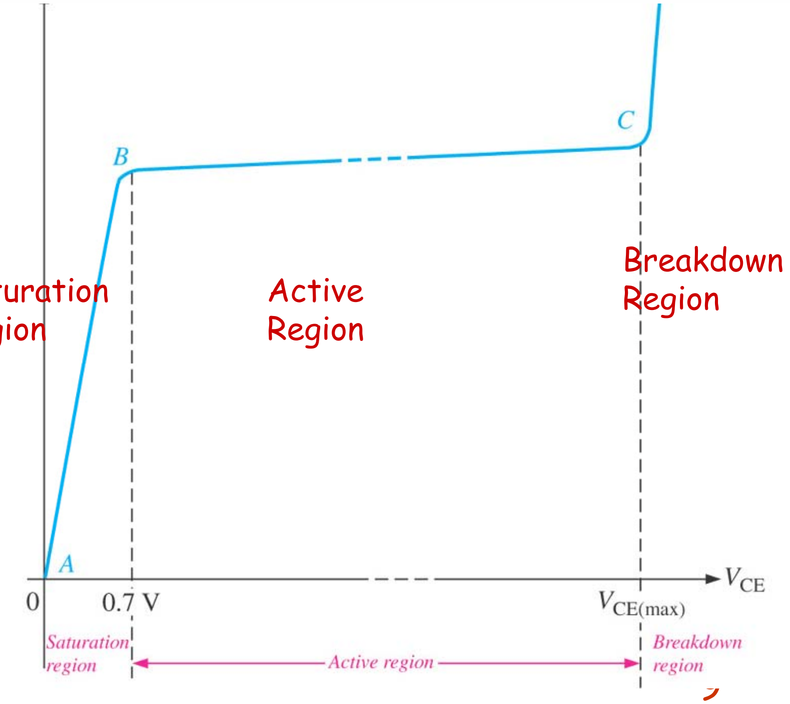
$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} = 3.55V - 0.7V = 2.85V$

트랜지스터 특성과 파라미터

- Collector 특성 곡선
  - I_C-V_{CE} 그래프(일정한 I_B에 대하여)
- 포화 영역(saturation)
  - $0<V_{CE} < 0.7$
  - BE, BC: 순방향
  - V_{CC} 증가 → V_{CE} 증가 (0.7V이하) → I_C 증가
- 활성영역 (선형영역)
  - $V_{CE} > 0.7V$
  - BE: 순방향, BC: 역방향
  - I_C는 I_B에 의존 ($\leftarrow I_C = \beta_{DC} I_B$)

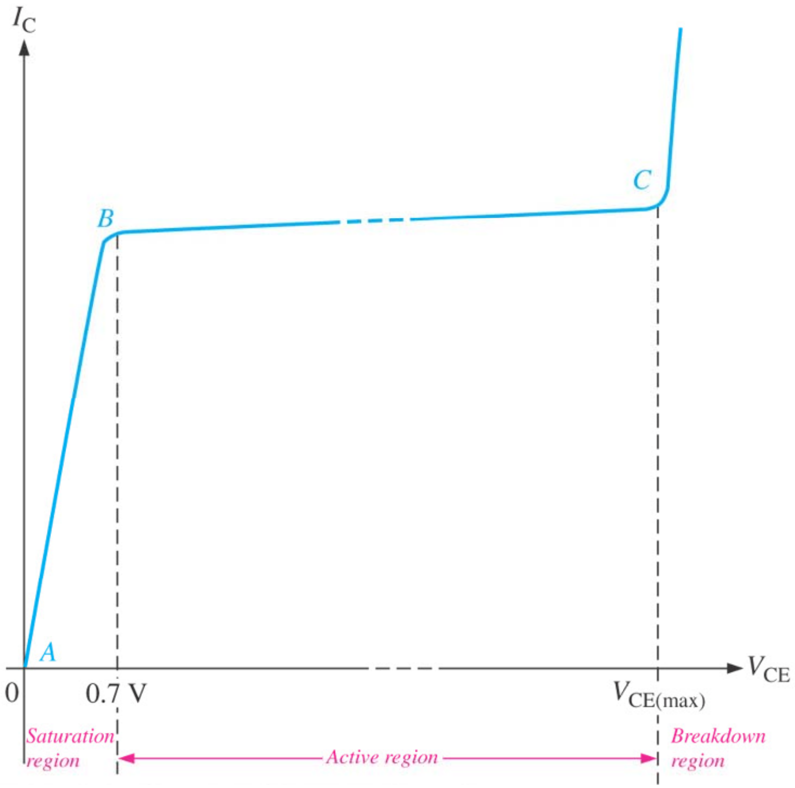
  ➔V_{CE} 계속 증가 하더라도 I_B 고정 →Ic 일정
- 항복영역
  - BC사이의 강한 역방향 바이어스 전압으로 인해 I_C 전류의 급격한 증가 → breakdown 발생

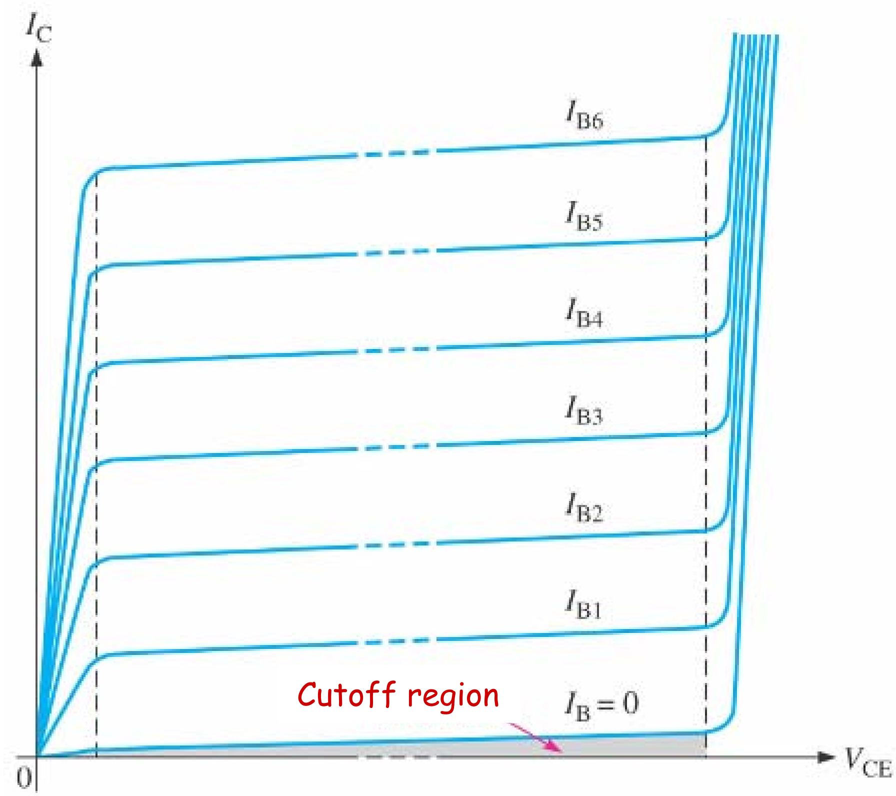




트랜지스터 특성과 파라미터

- Collector 특성 곡선
  - I_B 증가 → I_C증가



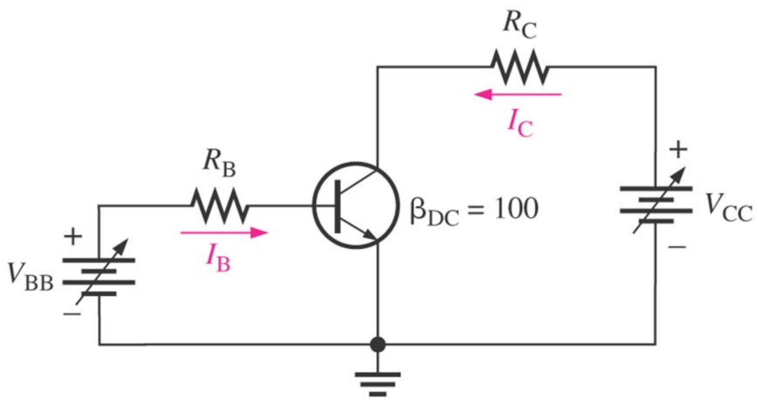


트랜지스터 특성과 파라미터

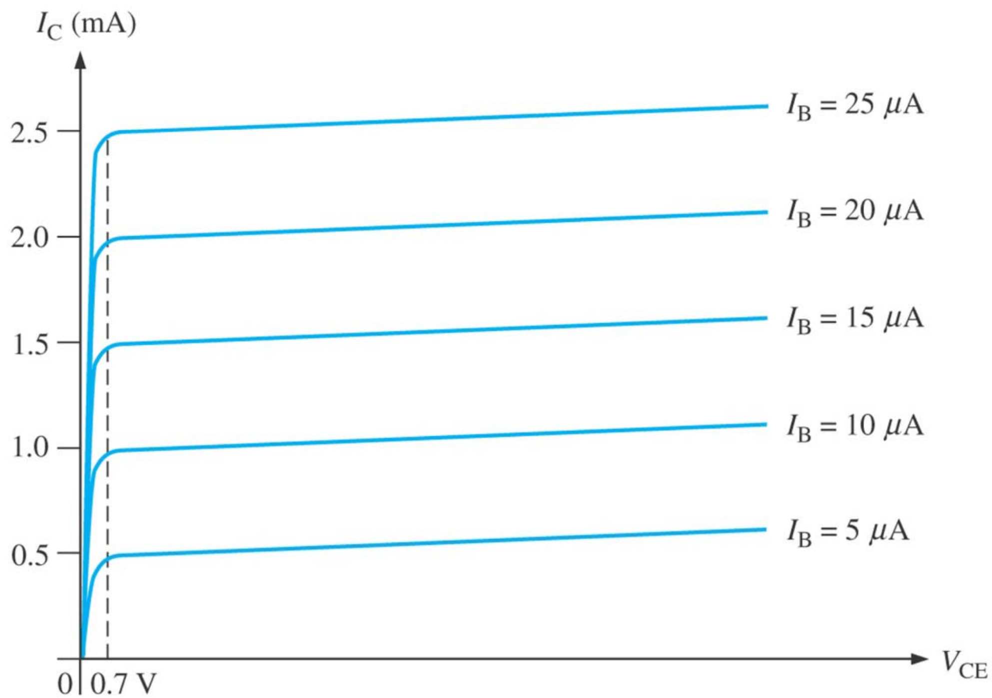
Ex.4-3

Q. I_B=5μA ~ 25 μA 까지 5 μA 씩 증가할 때 컬렉터 특성곡선을 그려라

단, β_{DC} =100



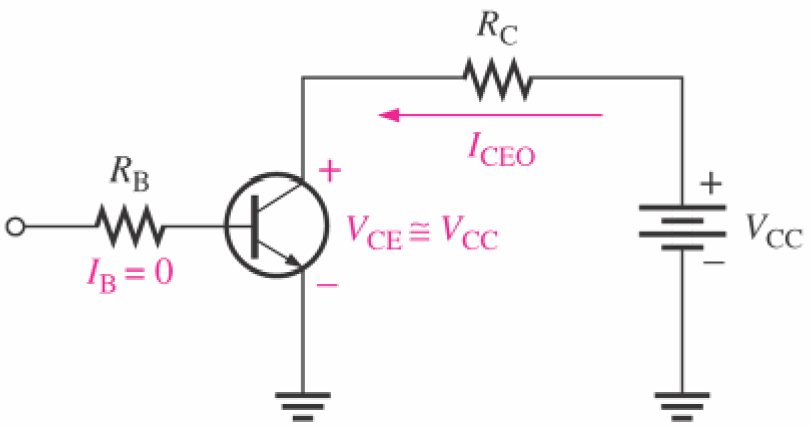
A.



트랜지스터 특성과 파라미터

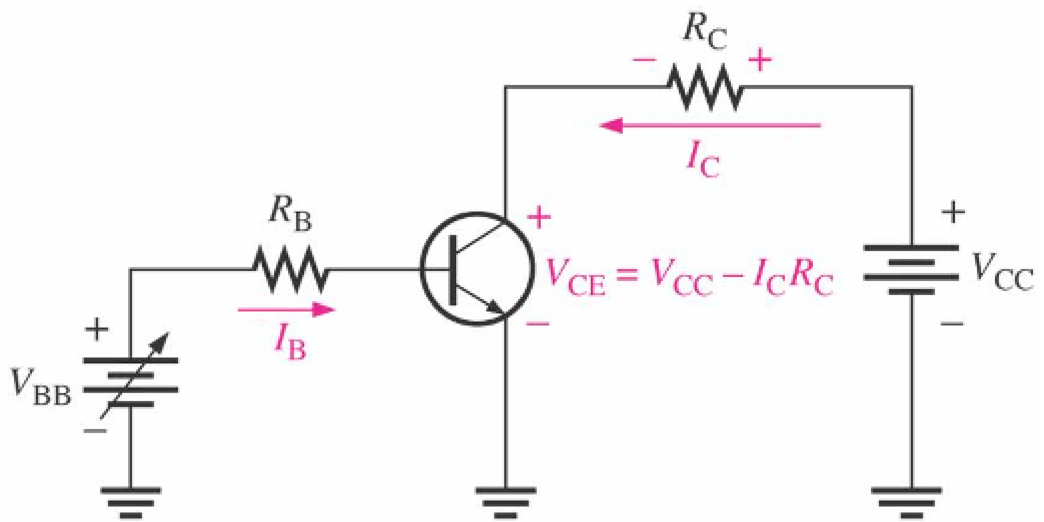
- 차단 (Cutoff) 점
  - I_B = 0 일때
  - $I_C = I_{CEO}$

    (매우 적은 양의 컬렉터 직류 누설전류)



- 포화 (saturation) 점
  - I_B 증가 → I_C 증가 ($I_C = \beta I_B$) → V_{CE} 감소 ($V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$)

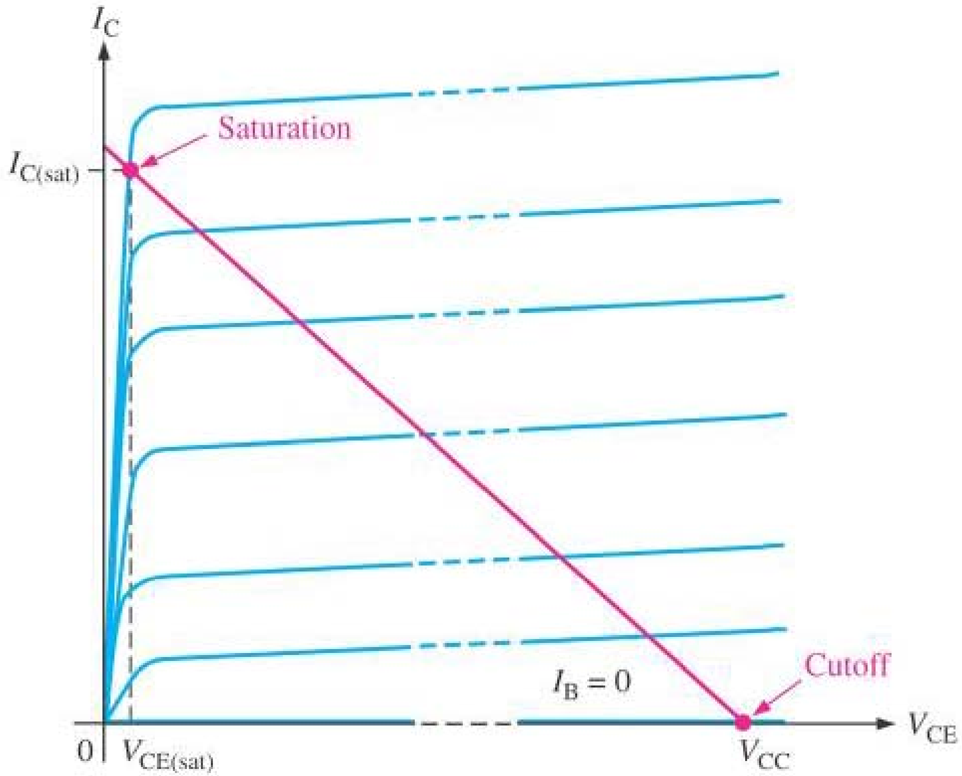
    → V_{CE} 가 $V_{CE(sat)}$ 도달 → I_B 가 증가 해도 더 이상 I_C 가 증가하지 않는다.



트랜지스터 특성과 파라미터

- 직류 부하선 (DC load line)
  - 차단점과 포화점을 연결한 선
    - 차단점 (I_C=0, V_{CE} = V_{CC})
    - 포화점(I_C= $I_{C(sat)}$ V_{CE}=$V_{(sat)}$)
  - (예)-직류해석에서

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

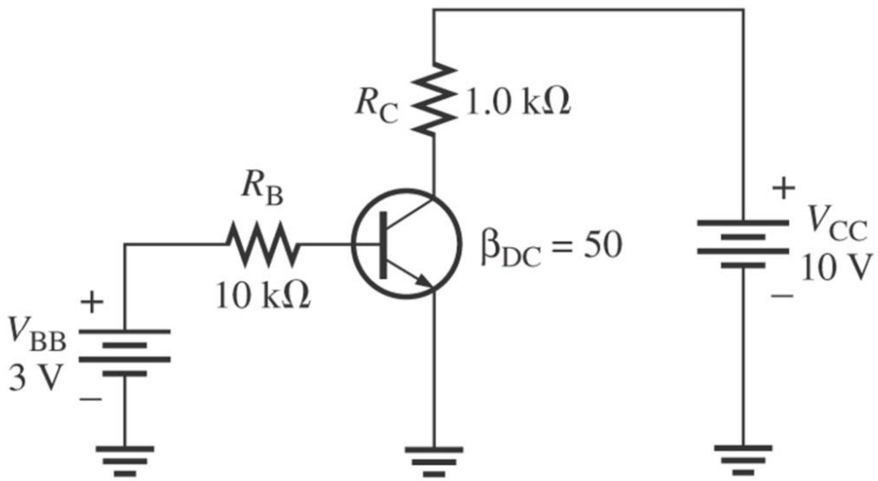


트랜지스터 특성과 파라미터

Ex.4-4

Q. 포화 인지 아닌지 판단하라

단, $V_{CE}(sat)$=0.2V



A.

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_C} = \frac{10V - 0.2V}{1.0k\Omega} = \frac{9.8V}{1.0k\Omega} = 9.8mA$$

$I_{c(sat)}$ 을 만들기에 충분할 정도로 I_B가 크다고 보면

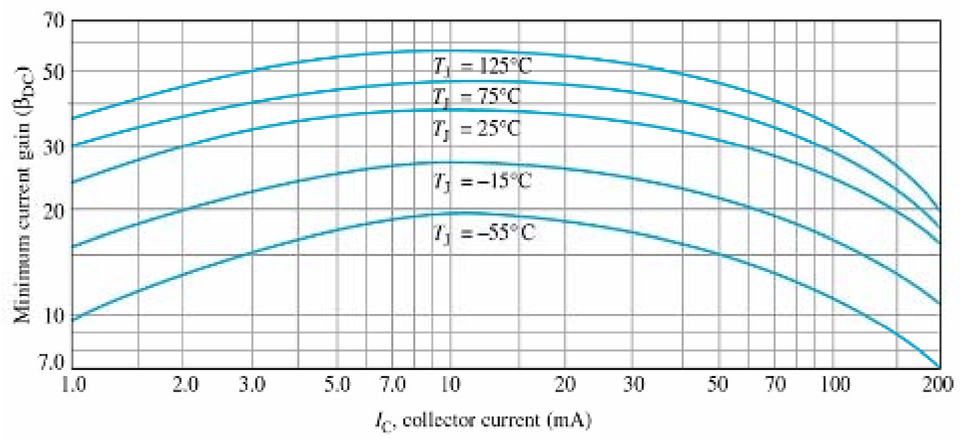
$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{3V - 0.7V}{10k\Omega} = \frac{2.3V}{10k\Omega} = 0.23mA$$

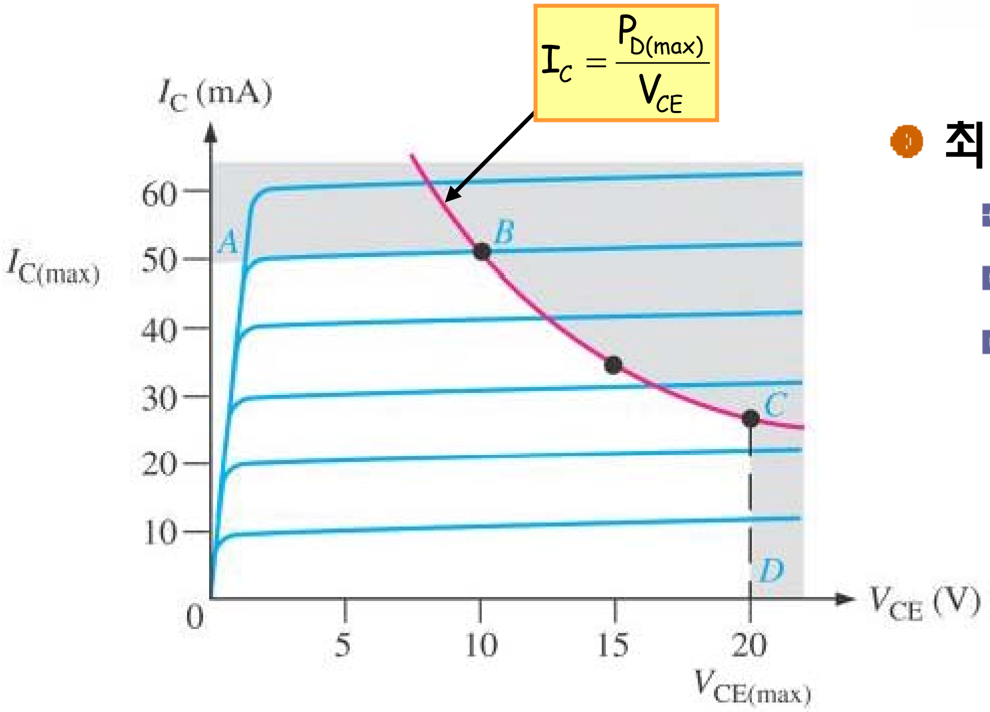
$$I_C = \beta_{DC} I_B = (50)(0.23mA) = 11.5mA$$

트랜지스터는 포화되었고 I_C는 11.5mA에 도달할 수 없다.

트랜지스터 특성과 파라미터

- β_{DC} 의 상세정보:
  - BJT를 시험하는데 필요한 중요 파라미터
  - 컬렉터 전류와 온도에 따라서 변화
    - 온도에 따라 변화
      - 온도 증가 → β_{DC} 증가
    - I_C 값에 따라 변화





(a)

- 최대 트랜지스터 정격
  - 최대 정격: 동작상의 제한
  - V_{CE} 와 I_{CE} 는 동시에 최대값을 가질 수 없다.
  - 최대 소비전력 $P_{D(max)} = I_C V_{CE}$

$P_{D(max)}$	V_{CE}	I_C
500 mW	5 V	100 mA
500 mW	10 V	50 mA
500 mW	15 V	33 mA
500 mW	20 V	25 mA

(b)

Ex.4-5

Q. V_{CE}=6V로 동작,최대정격이 250mW라면 트랜지스터가 견딜 수 있는 최대 컬렉터 전류는?

A. $$I_C = \frac{P_{D(max)}}{V_{CE}} = \frac{250mW}{6V} = 41.7mA$$

트랜지스터 특성과 파라미터

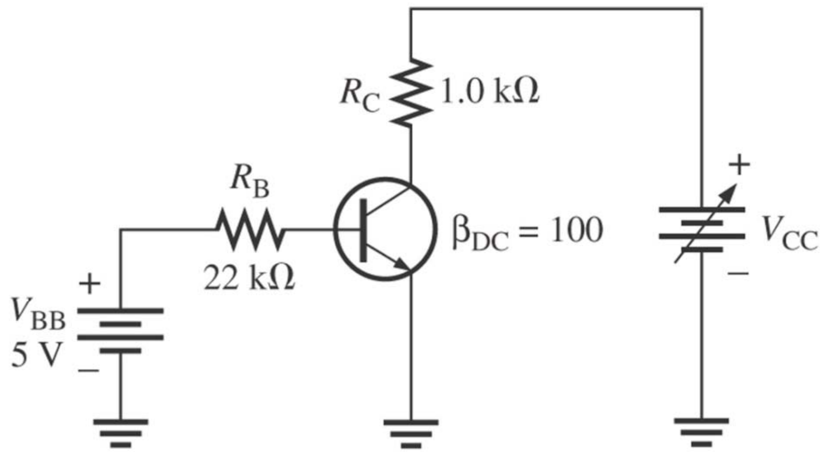
Ex.4-6 **Q.** P_D(max)=800mW, $V_{CE(max)}$=15V, $I_{C(max)}$=100mA. 정격을 초과하지 않는 범위에서 인가할 수 있는 최대 V_{CC} ?, 어떤 정격이 먼저 초과?

A.

$$I_B = \frac{V_{BB}-V_{BE}}{R_B} = \frac{5V-0.7V}{22k\Omega} = 195\mu A$$

$$I_C = \beta_{DC} I_B = (100)(195\mu A) = 19.5mA$$

$$V_{R_C} = I_C R_C = (1.95mA)(1.0k\Omega) = 19.5V$$



V_{CE}=$V_{CE(max)}$=15V 일 때 V_{CC} 값

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

$$V_{CC(max)} = V_{CE(max)} + V_{R_C} = 15V + 19.5V = 34.5V$$

V_{CC}가 $V_{CE(max)}$를 초과되기 전 34.5V까지 증가 가능 단, 이 시점에서 $P_{D(max)}$ 가 최과될지 알 수 없다.

$$P_D = V_{CE(max)} I_C = (15V)(19.5mA) = 293mW$$

$P_{D(max)}$ 가 800mW 이므로 V_{CC}가=34.5V 일때 초과되지 않음. $V_{CE(max)}$를=15V는 이 경우 제한 정격이 된다.
만약 베이스전류가 흐르지 않아 Tr을 off상태로 만들면 V_{CC} 전압 전부가 Tr에 걸리게 되어 $V_{CE(max)}$ 가 제일 먼저 정격을 초과

트랜지스터 특성과 파라미터

- $P_{D(max)}$ 의 경감
  - $P_{D(max)}$ at 25 ℃
  - 온도 증가 → $P_{D(max)}$ 감소
  - $P_{D(max)}$ 의 경감계수 [mW/ ºC]

Ex.4-7

Q. $P_{D(max)}$ at 25 ℃ = 1 W, 경감계수 = 5mW/ ℃, 70 ℃ 의 $P_{D(max)}$?

A.

$P_{D(max)}$ = $P_{D(max)}$ (25 ℃) - (경감계수)(70 ℃ − 25 ℃)

= 1 - (5m)(45)

= 775 mW

증폭기로서의 트랜지스터

- 직류 (DC)와 교류 (AC)
  - 직류량: I_C, I_B
  - 교류량: I_c, I_b, I_e
  - 내부저항: r`
  - 외부저항: R_E (직류), R_e (교류)

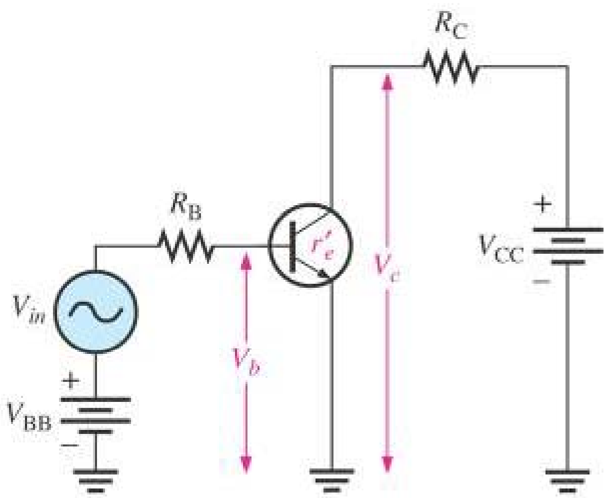
- 트랜지스터 증폭
  - 전류증폭 (β)
  - $r`_e$: 내부 교류 이미터저항
    (매우 낮은 저항 ← BE 순방

$$I_e \approx I_c = \frac{V_b}{r_e'}$$

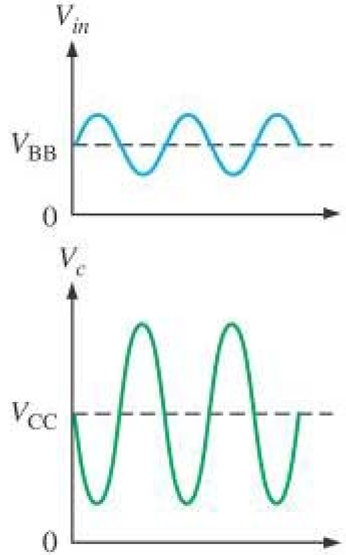
$$V_c = I_c R_C$$

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

$$A_v = \frac{V_c}{V_b} \approx \frac{I_e R_C}{I_e r_e'} \approx \frac{R_C}{r_e'}$$



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



(b) Waveforms

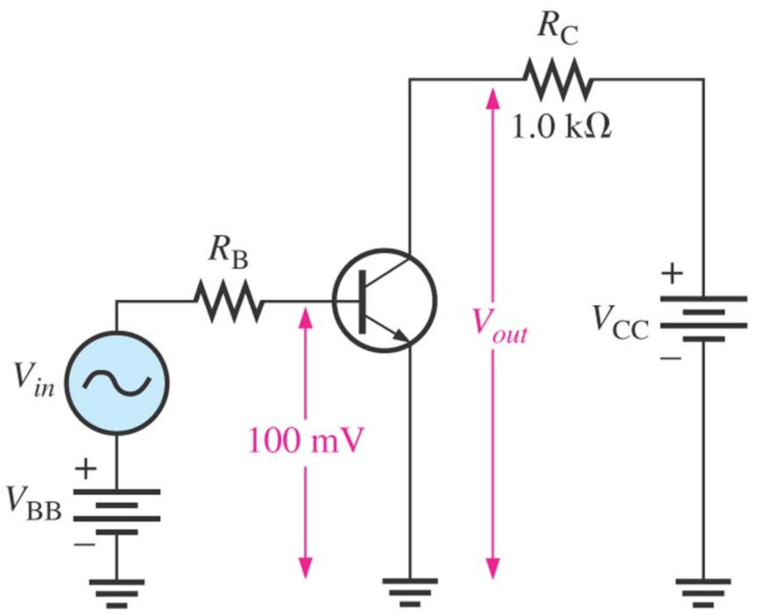
증폭기로서의 트랜지스터

Ex.4-9

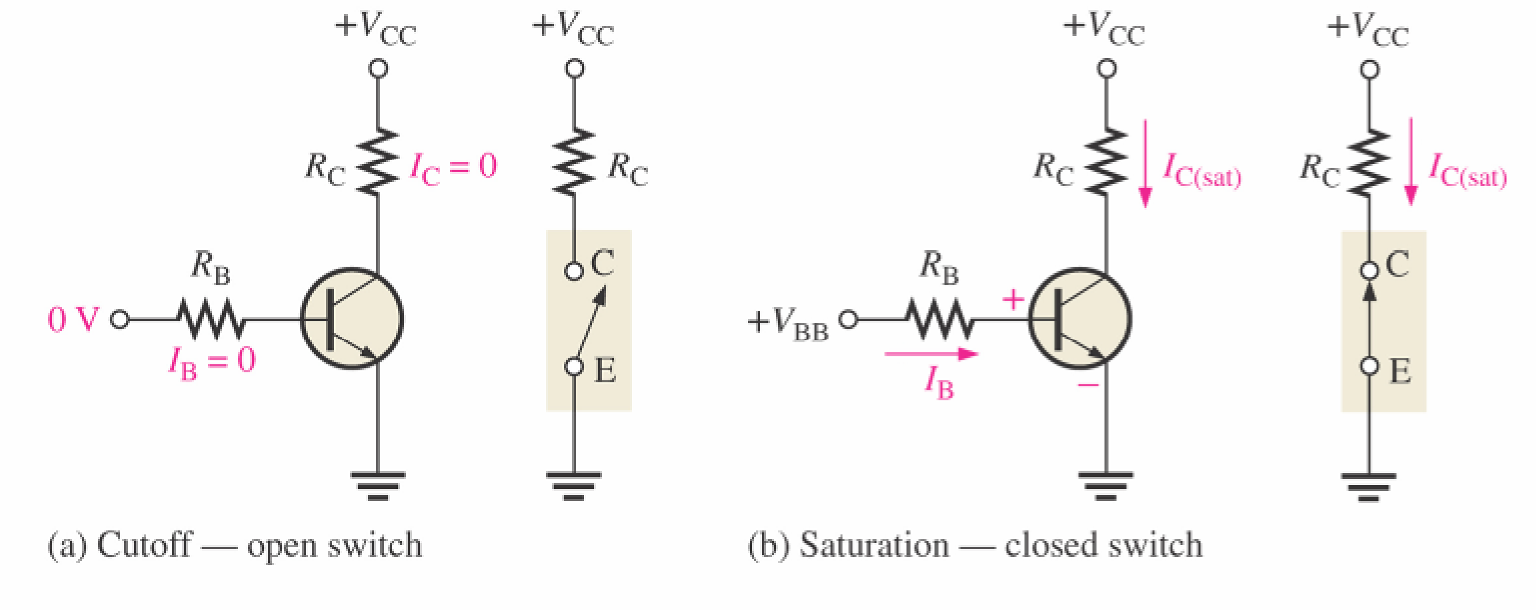
Q. r'_e=50Ω 일때 전압이득과 교류출력전압?

$$A_v \approx \frac{R_C}{r_e'} = \frac{1.0k\Omega}{50\Omega} = 20$$

$$V_{out} = A_v V_b = (20)(100mV) = 2V_{rms}$$



스위치로서의 트랜지스터



- 차단조건
  - I_B = 0 → 차단 → 개방 (open)
  - $V_{CE(sat)}$ = V_{CC} → switch off
- 포화조건
  - BE 순방향 바이어스 → $I_{C(sat)} = (V_{CC} - V_{CE(sat)})/R_C$
  - $V_{CE(sat)} << V_{CC}$ → $I_{C(sat)} = V_{CC}/R_C$ (switch on)
  - $I_{B(min)} = (I_{C(sat)})/\beta_{DC}$: 포화되기 위해 필요한 Base 전류의 최소의 전류값

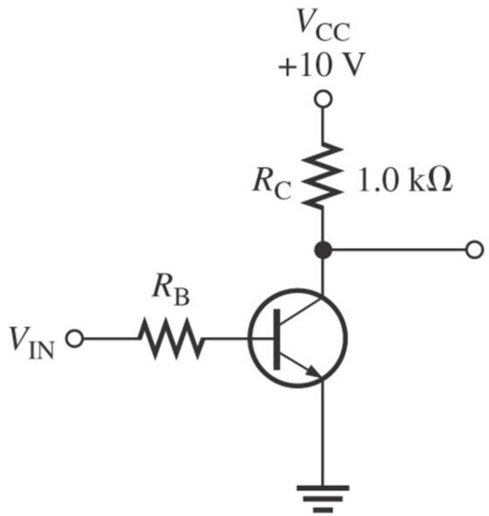
스위치로서의 트랜지스터

Ex.4-10

Q. (a) V_{IN}=0V 일 때 V_{CE}?

(b) β_{DC} 가 포화되기 위한 최소 I_B ?

(c) V_{IN}=5V일때 R_B의 최소값



A.

(a) V_{IN}=0일때 Tr 차단→ 스위치 개방

$V_{CE} = V_{CC} = 10V$

(b) $V_{CE(sat)}$)/무시가능 하므로(0V로 가정)

$I_{C(sat)} = V_{CC} / R_C = 10V/1.0k\Omega = 10mA$

$I_{B(min)} = I_{C(sat)} / \beta_{DC} = 10mA/200 = 50\mu A$

(c) Tr 이 on 되었을 때 V_{BE}=0.7

$V_{R_B} = V_{IN} - V_{BE} = 5V - 0.7V = 4.3V$

50μA 의 최소 I_B를 흘리는데 필요한 R_B의 최대값

$R_{B(max)} = V_{R_B} / I_{B(min)} = 4.3V/50\ \mu A = 86k\Omega$

스위치로서의 트랜지스터

Ex.4-11

Q. LED발광을 위해 30mA필요, Tr이 포화되기위한 입력구형파 전압? 단, 포화를 확실히 시키기위해 베이스전류 최소값의 두 배 값 사용, V_{CC}=9V, $V_{CE(sat)}$=0.3V, R_C=270 Ω, R_B=3.3 kΩ, β_{DC}=50.

A.

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_C} = \frac{9V - 0.3V}{270\Omega} = 32.2mA$$

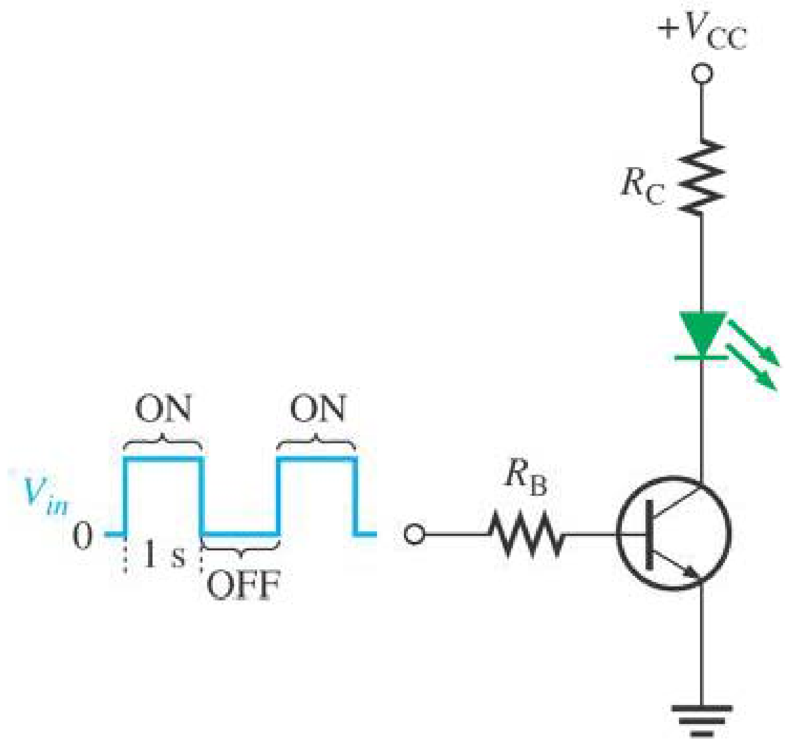
$$I_{B(min)} = \frac{I_{C(sat)}}{\beta_{DC}} = \frac{32.2mA}{50} = 644\mu A$$

$I_B = 2I_{B(min)}$사용

$$I_B = \frac{V_{R_B}}{R_B} = \frac{V_{in} - V_{BE}}{R_B} = \frac{V_{in} - 0.7V}{3.3k\Omega}$$

$$V_{in} - 0.7V = 2I_{B(min)}R_B = (1.29mA)(3.3k\Omega)$$

$$V_{in} = (1.29mA)(3.3k\Omega 3 + 0.7V = 4.96V$$



Data Sheets

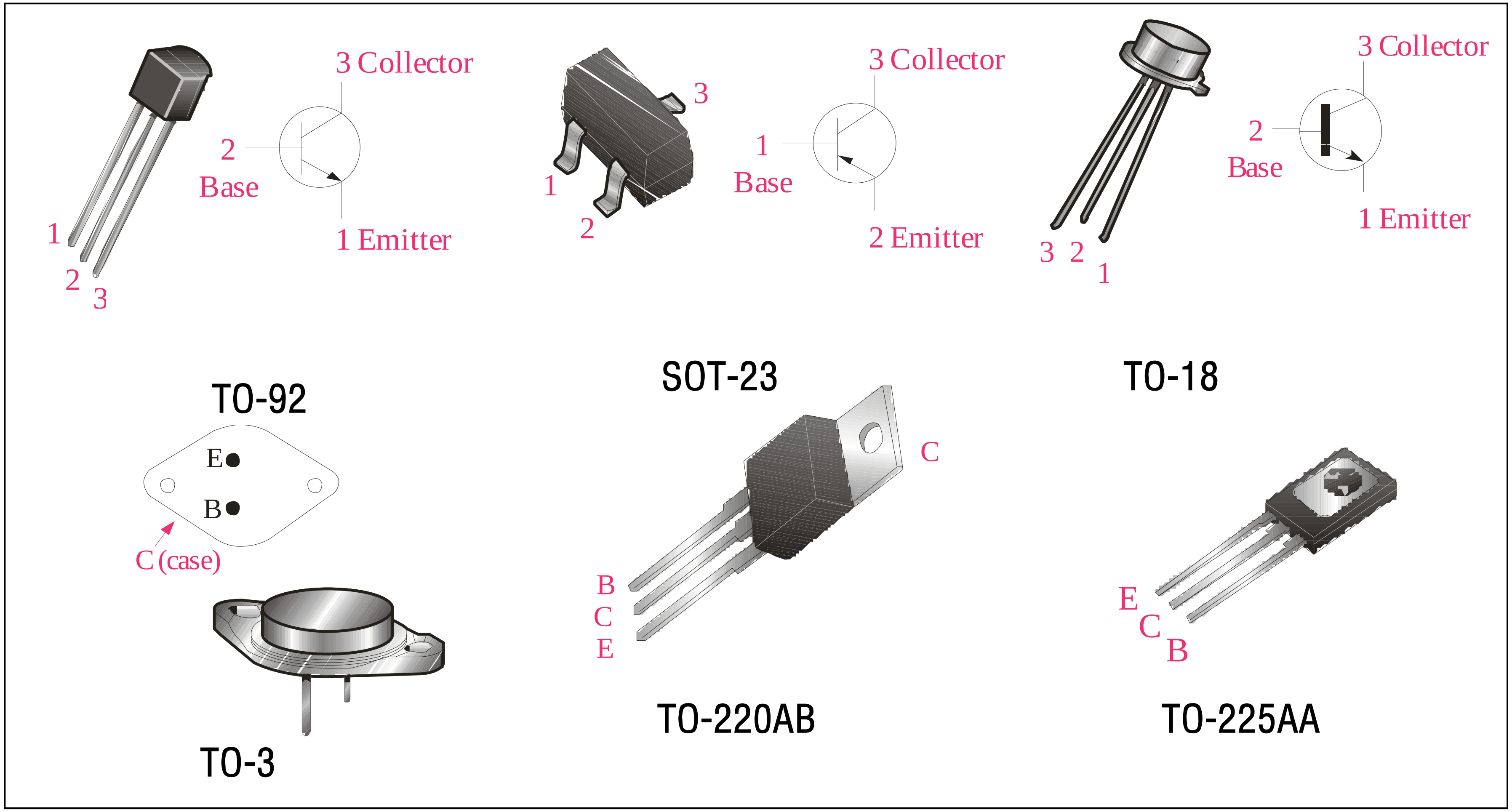
Yun SeopYu

Data sheets give manufacturer's specifications for maximum operating conditions, thermal, and electrical characteristics.
For example, an electrical characteristic is β_{DC}, which is given as h_{FE}. The 2N3904 shows a range of β's on the data sheet from 100 to 300 for I_C = 10 mA.

Characteristic		Symbol	Min	Max	Unit
ON Characteristics					
DC current gain		h_{FE}			–
(I_C = 0.1 mA dc, V_{CE} = 1.0 V dc)	2N3903		20	–	
	2N3904		40	–	
(I_C = 1.0 mA dc, V_{CE} = 1.0 V dc)	2N3903		35	–	
	2N3904		70	–	
(I_C = 10 mA dc, V_{CE} = 1.0 V dc)	2N3903		50	150	
	2N3904		100	300	
(I_C = 50 mA dc, V_{CE} = 1.0 V dc)	2N3903		30	–	
	2N3904		60	–	
(I_C = 100 mA dc, V_{CE} = 1.0 V dc)	2N3903		15	–	
	2N3904		30	–	

A Sample of Common Transistor Packages

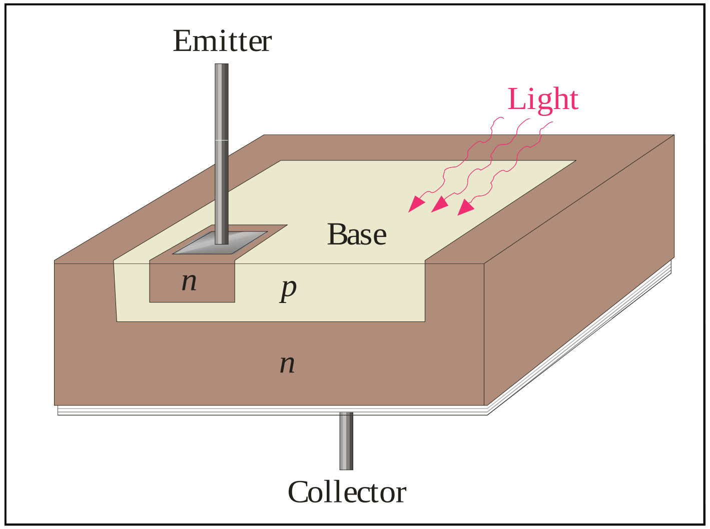
Yun SeopYu



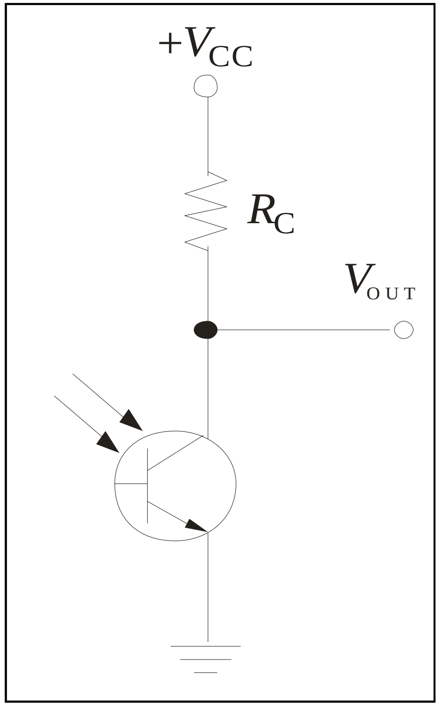
Phototransistor

Yun SeopYu

A phototransistor produces base current when light strikes the exposed photosensitive base region, which is the active area. Phototransistors have high gain and are more sensitive to light than photodiodes.

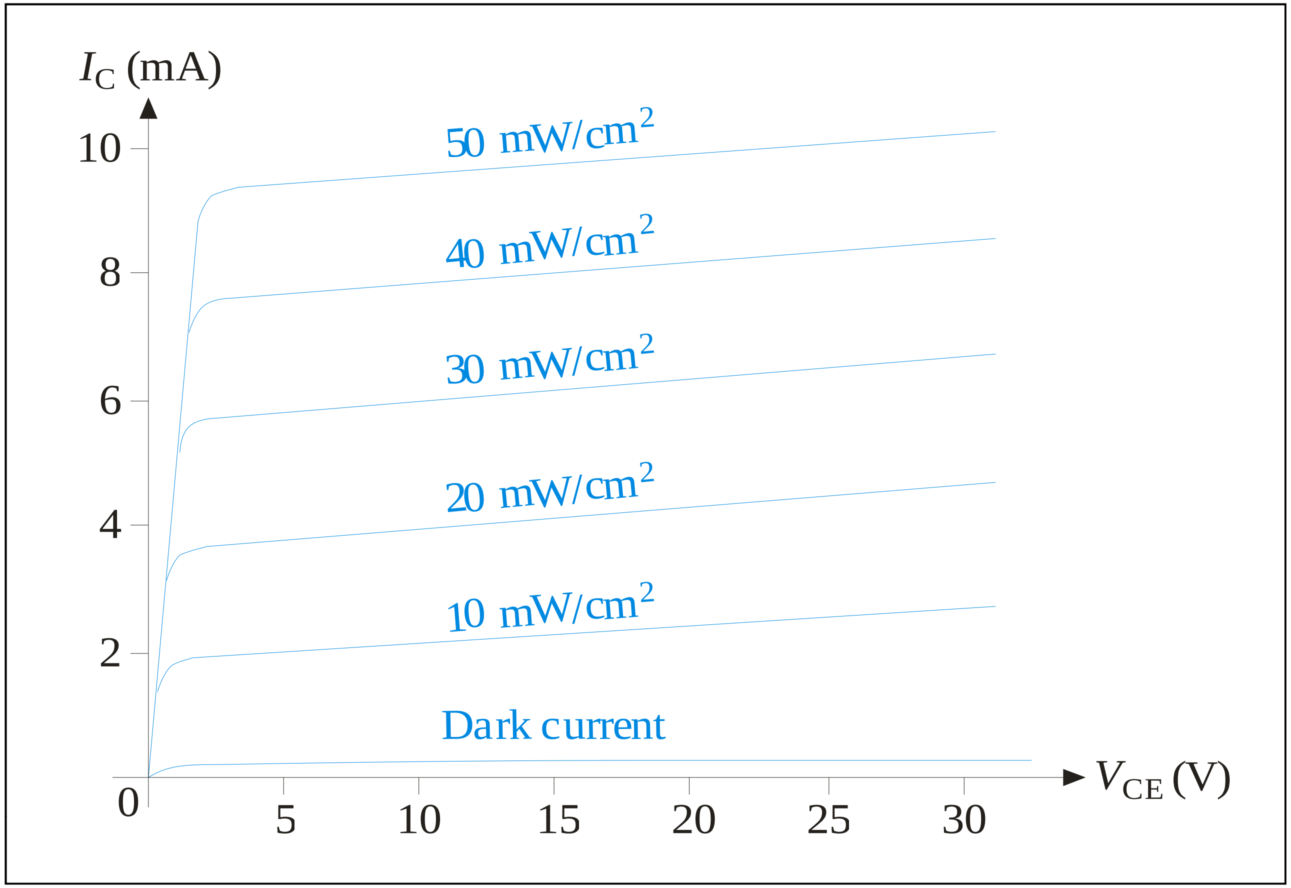


In a typical circuit the base lead is left open. In the circuit shown, the output voltage is maximum with no light and drops with increasing light.



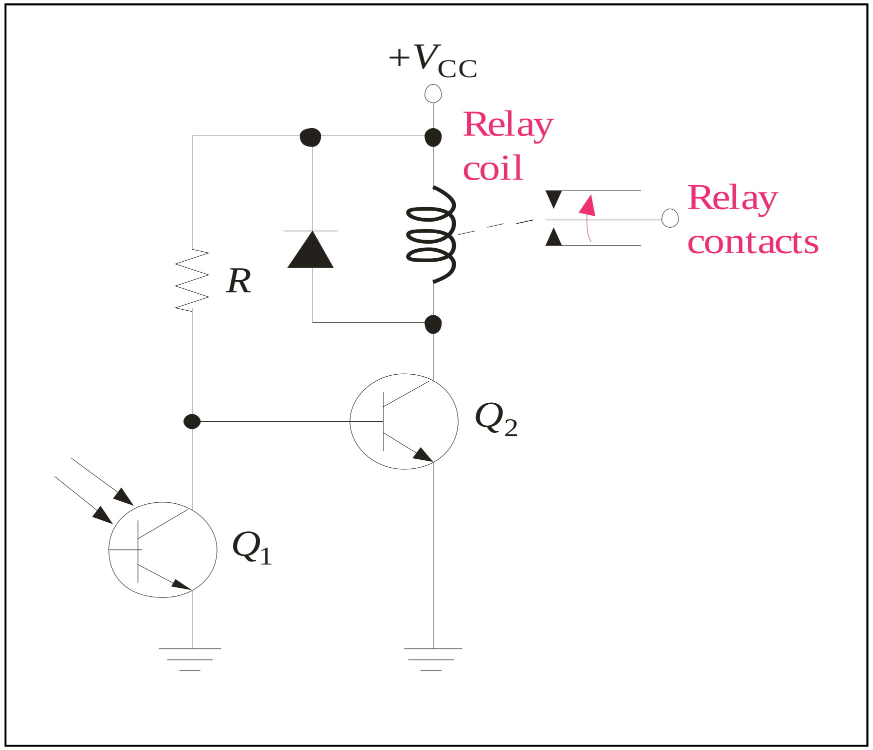
Phototransistor

The characteristic curves for a phototransistor are based on light flux (mW/cm^2) to the base rather than base current in an ordinary transistor.

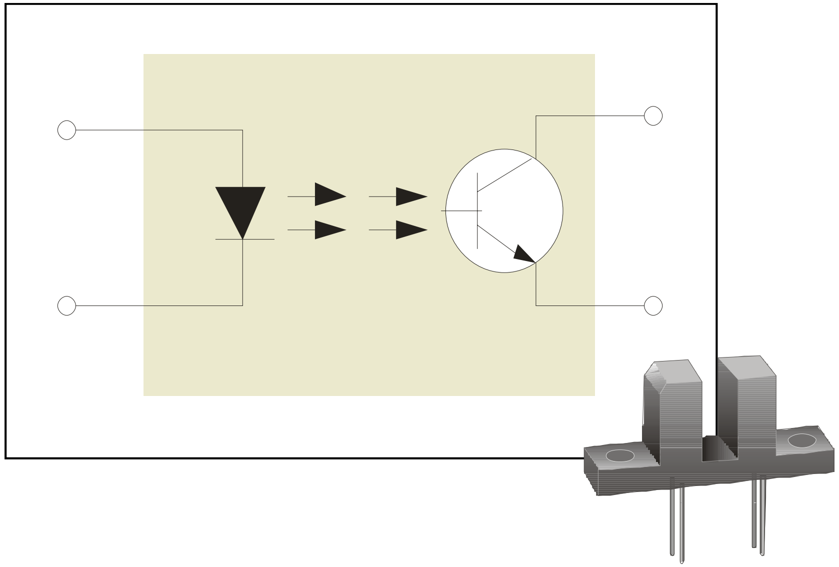


Phototransistor

Yun SeopYu



With no incident light, Q_1 will be biased OFF. Q_2 will be forward-biased through R and is ON. Collector current in Q_2 causes the relay to be energized.



An optocoupler is a single package containing an LED and a phototransistor. Optical couplers transfer a signal from one circuit to another while providing a high degree of isolation.

Homework:

All Examples

Selected Problems (P.216 ~ 219): 1, 6, 12, 13, 17(a), 18, 20(b), 22, 23, 27, 29, 32

PROBLEMS

Answers to all odd-numbered problems are at the end of the book.

Yun SeopYu

BASIC PROBLEMS

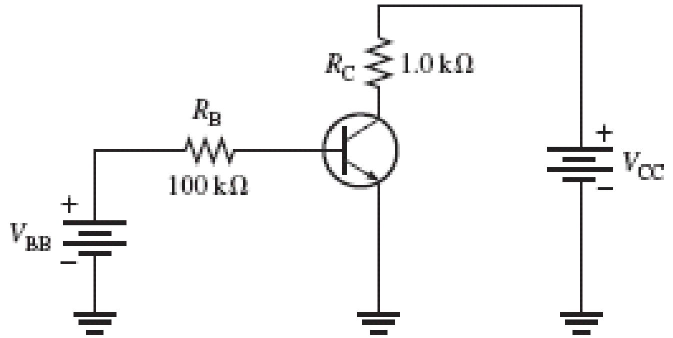
Section 4–1 **Bipolar Junction Transistor (BJT) Structure**

1. What are the majority carriers in the base region of an *npn* transistor called?

8. A certain transistor has an $I_C = 25$ mA and an $I_B = 200\ \mu$A. Determine the β_{DC}.

12. A base current of 50 μA is applied to the transistor in Figure 4–53, and a voltage of 5 V is dropped across R_C. Determine the β_{DC} of the transistor.

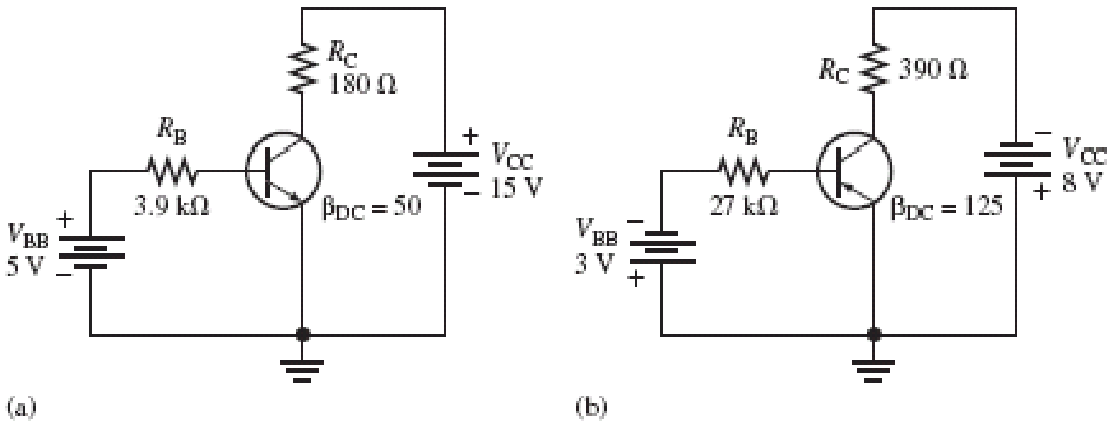
▶ FIGURE 4–53



13. Calculate α_{DC} for the transistor in Problem 12.

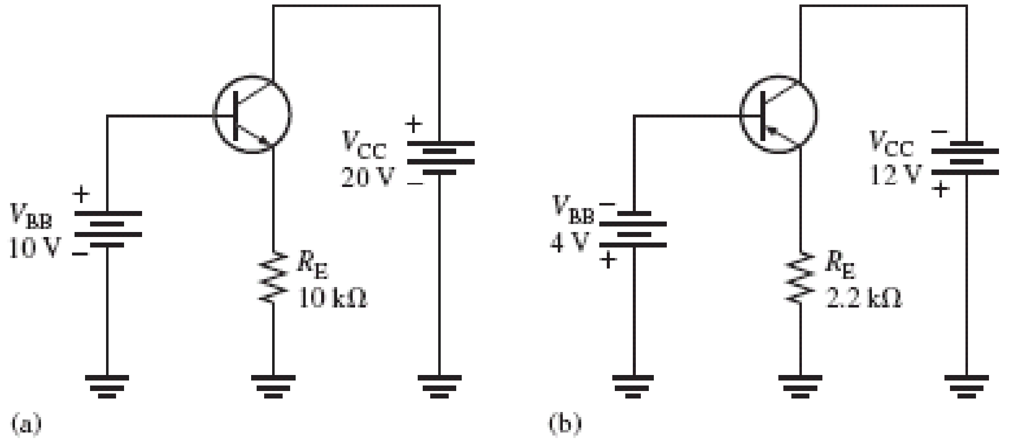
17. Find V_{CE}, V_{BE}, and V_{CB} in both circuits of Figure 4–55.

18. Determine whether or not the transistors in Figure 4–55 are saturated.



▲ FIGURE 4–55

20. Determine the terminal voltages of each transistor with respect to ground for each circuit in Figure 4–57. Also determine V_{CE}, V_{BE}, and V_{CB}.



▲ FIGURE 4–57

22. A certain transistor is to be operated at a collector current of 50 mA. How high can V_{CE} go without exceeding a $P_{D(max)}$ of 1.2 W?

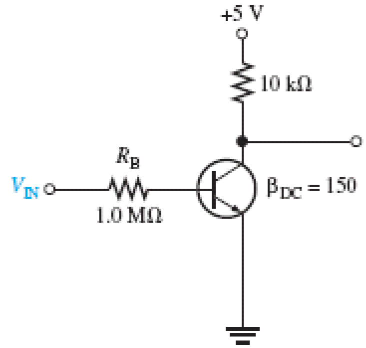
23. The power dissipation derating factor for a certain transistor is 1 mW/°C. The $P_{D(max)}$ is 0.5 W at 25°C. What is $P_{D(max)}$ at 100°C?

27. Determine the value of the collector resistor in an *npn* transistor amplifier with $\beta_{DC} = 250$, $V_{BB} = 2.5$ V, $V_{CC} = 9$ V, $V_{CE} = 4$ V, and $R_B = 100$ kΩ.

29. Determine $I_{C(sat)}$ for the transistor in Figure 4–58. What is the value of I_B necessary to produce saturation? What minimum value of V_{IN} is necessary for saturation? Assume $V_{CE(sat)} = 0$ V.

32. Determine the emitter current in the phototransistor circuit in Figure 4–60 if, for each lm/m^2 of light intensity, 1 μA of base current is produced in the phototransistor.

▶ FIGURE 4–58



▶ FIGURE 4–60