

問題D

nnp形バイポーラトランジスタの電流-電圧特性は、図1に示したように4つの動作領域に分類される。ここに、 I_C はコレクタ電流、 V_{CE} はコレクタ・エミッタ電圧であり、ベース電流 I_B を I_{B1} から I_{B5} まで増加させたときの特性をそれぞれ示している。以下の間に答えよ。

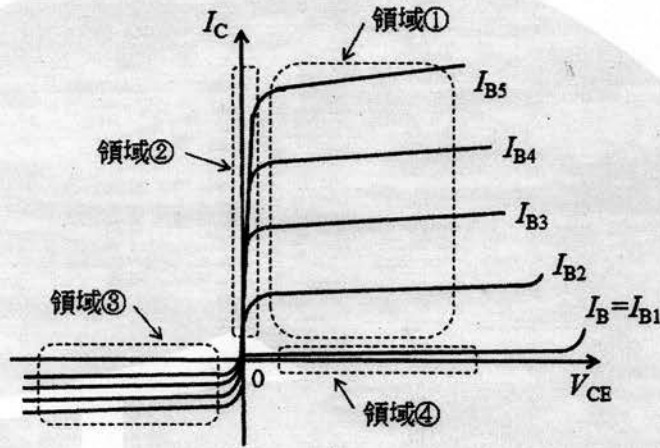


図1

- (1) 領域①～④の動作状態を、それぞれ何と呼ぶか。
- (2) 領域①及び③はともに増幅特性を示しているが、電流増幅率 $\beta = I_C / I_B$ に大きな差があるのはなぜか説明せよ。
- (3) 領域①において、コレクタ・エミッタ電圧 V_{CE} を増加させるとコレクタ電流 I_C が徐々に増加していくのはなぜか説明せよ。またこの効果を何と呼ぶか。
- (4) ベース層幅 W は電子の拡散長 L_n に比べて十分小さいとする($W \ll L_n$)。以下の(a)および(b)について、p形ベース層中の少数キャリア(電子)密度 n_B の分布を、エミッタ・ベース接合端からの距離 x ($0 \leq x \leq W$)の関数として描け。ただし、両軸とも線形スケールとせよ。またベース層中の熱平衡時の電子密度 n_{B0} も図中に示せ。
 - (a) 領域①。
 - (b) 領域②。なお(a)との違いを明確に示せ。
- (5) $W \ll L_n$ が成り立つとき、p形ベース層に注入された電子はベース層を拡散していく。電子の拡散係数を D_n とおくと、拡散速度 $v_n(x)$ は次式で近似できる。

$$v_n(x) \approx \frac{D_n}{W-x} \quad (i)$$

式(i)を用いて、電子のベース走行時間 t_B の式を求めよ。

また $W = 3 \times 10^{-6}$ [m]、 $D_n = 6 \times 10^{-3}$ [$m^2 s^{-1}$]のとき、 t_B を計算せよ。

- (6) npn形バイポーラトランジスタを用いた図2に示すエミッタ接地回路において、時刻 $t=0$ のときスイッチをオンにしてベース電流 $I_B = I_{B4}$ を流すと、トランジスタの動作点は、図3に示したように I_B の増大とともに負荷直線に沿ってS点へ移る。ここに、 V_{CC} はコレクタバイアス電圧、 R_L はコレクタに接続された負荷抵抗である。このとき、ベース層中の電子電荷密度を Q_B 、ベース層における電子の寿命時間を τ_{nB} として、ベース電流 I_B は式(ii)で表せる。これより Q_B の時間応答の式を導出せよ。

$$I_B = \frac{Q_B}{\tau_{nB}} + \frac{dQ_B}{dt} \quad (ii)$$

さらに図4を解答用紙に書き写し、電子電荷密度 Q_B 及びコレクタ電流 I_C の時間変化を描け。ただし、スイッチは $t=0$ のときオンにし、 $I_C = I_{C4}$ が流れて十分な時間が経過した $t=t_1$ のときオフにする。また領域①から領域②へ移行する直前の（また逆過程において領域②から領域①へ移行直後の）電子電荷密度を Q_{BS} とする。

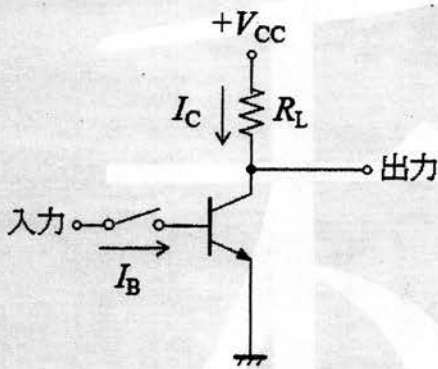


図2

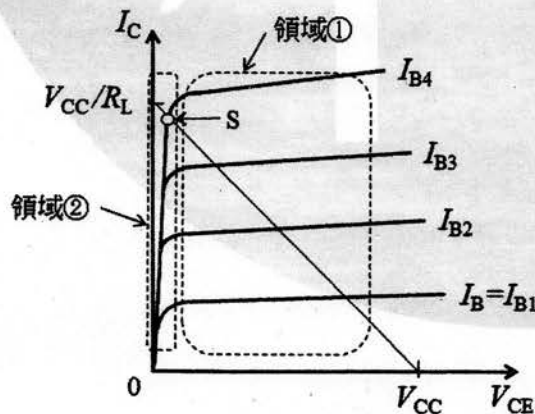


図3

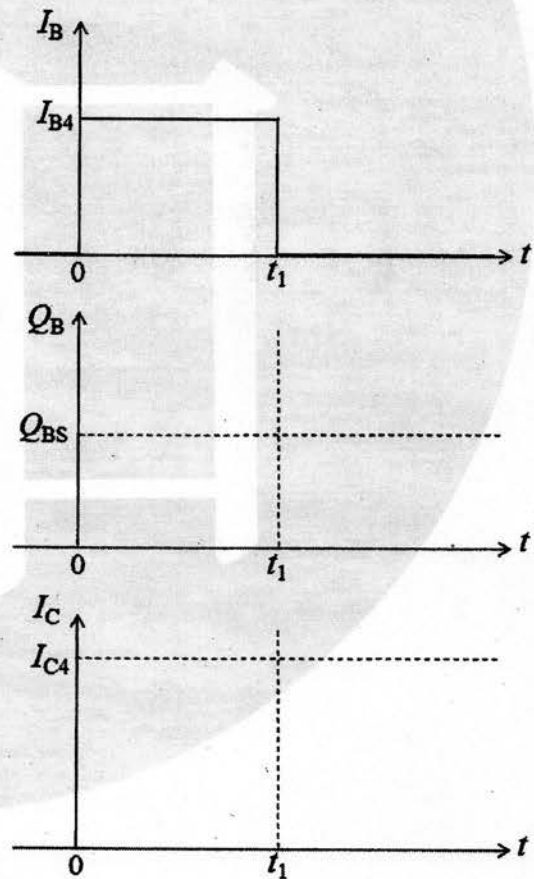


図4

Problem D

The current-voltage characteristics of an npn bipolar transistor can be categorized into 4 regions as shown in Fig. 1. Here I_C is the collector current and V_{CE} is the collector-emitter voltage. The characteristics with base current I_B increasing from I_{B1} to I_{B5} are plotted. Answer the following questions.

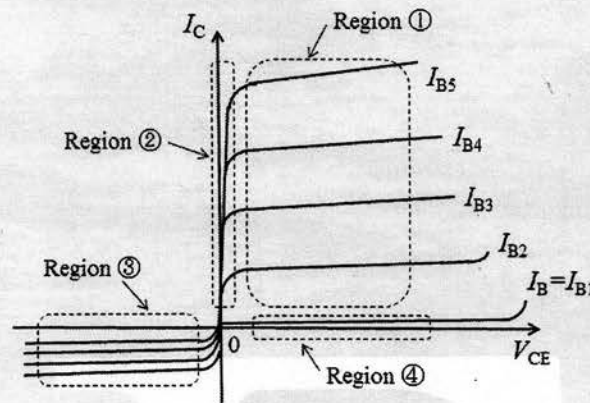


Fig. 1

- (1) What is the name of each operation mode of the transistor in Region ① through ④?
- (2) Amplifier characteristics are observed in both Region ① and ③, but there is a large difference in the current amplification factor $\beta = I_C / I_B$. Explain the reason.
- (3) Describe the reason why the collector current I_C gradually increases with increasing collector-emitter voltage V_{CE} in Region ①. What is this effect called?
- (4) Assume that the base layer width W is sufficiently shorter than the electron diffusion length L_n ($W \ll L_n$). Plot a graph of the minority carrier (electron) density in the p-type base region n_B as a function of distance x from the edge of emitter-base junction ($0 \leq x \leq W$) for each of the following cases (a) and (b). Use a linear scale in both axes. Also, indicate the electron density in the base region at thermal equilibrium n_{B0} in the same graph.
 - (a) Region ①.
 - (b) Region ②. Show clearly the differences from (a).
- (5) If $W \ll L_n$ is satisfied, the injected electrons in the p-type base region diffuse across the base. With a diffusion coefficient D_n , an approximate diffusion velocity $v_n(x)$ can be written as,

$$v_n(x) \approx \frac{D_n}{W-x}. \quad (i)$$

Determine the base transit time t_B by using Eq. (i).

Calculate t_B , given $W = 3 \times 10^{-6}$ [m] and $D_n = 6 \times 10^{-3}$ [m²s⁻¹].

- (6) In the common-emitter circuit using an npn bipolar transistor as shown in Fig. 2, when the switch is turned on at time $t=0$ and the base current of $I_B = I_{B4}$ flows, the operating point of the transistor moves along the load line to point S with increasing I_B as shown in Fig. 3. Here V_{CC} is the collector bias voltage and R_L is the load resistor connected to the collector. Given the electron charge density in the base as Q_B and the electron lifetime in the base as τ_{nB} , the base current I_B is expressed by Eq. (ii). From this, derive the equation for the transient response of Q_B .

$$I_B = \frac{Q_B}{\tau_{nB}} + \frac{dQ_B}{dt} \quad (ii)$$

Further, copy Fig. 4 on the answer sheet and draw the time responses of electron charge density Q_B and the collector current I_C . Assume that the switch is turned on at $t=0$, and turned off at $t=t_1$ when $I_C = I_{C4}$ flows for a sufficient time. The electron charge density just before the transition from Region ① to Region ② (or just after the transition from Region ② to Region ①) is given as Q_{BS} .

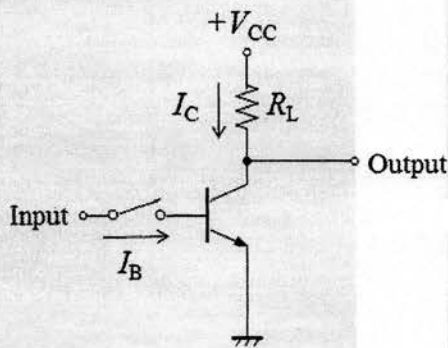


Fig. 2

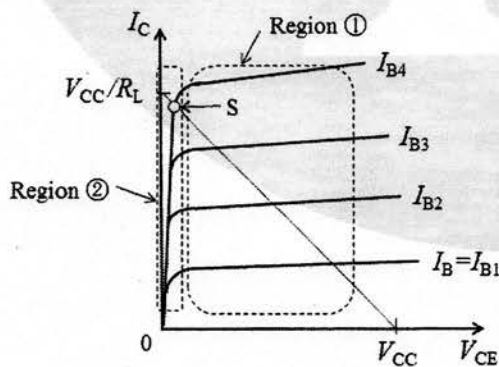


Fig. 3

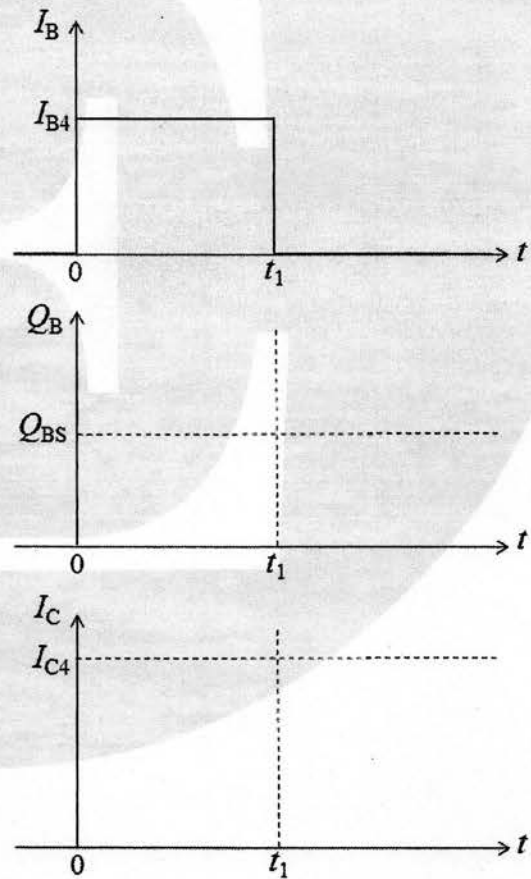


Fig. 4