

# Un simulateur de transistor

Autor(en): **Lüscher, J. / Choquard, P.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri**

Band (Jahr): **34 (1956)**

Heft 5

PDF erstellt am: **10.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-874520>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

TECHNISCHE MITTEILUNGEN

BULLETIN TECHNIQUE

PTT

BOLLETTINO TECNICO

Herausgegeben von der Schweizerischen Post-, Telegraphen- und Telephonverwaltung. Publié par l'administration des postes, télégraphes et téléphones suisses. Pubblicato dall'amministrazione delle poste, dei telegrafi e dei telefoni svizzeri

## Un simulateur de transistor\*

Par J. Lüscher et P. Choquard, Genève

621.375.4.001.24

**Résumé.** Les auteurs décrivent un schéma analogique d'un transistor à jonction dans le cas général. Les phénomènes physiques qui prennent naissance dans le transistor sont représentés par des circuits analogiques dont les réponses reproduisent le comportement du transistor. En particulier avec un modèle analogique simplifié, construit d'après ce schéma équivalent général, on peut simuler le comportement de différents transistors soumis à des signaux de faible amplitude. Les propriétés et constantes physiques des différents éléments de ces transistors peuvent alors être déduites des circuits électriques dont les paramètres ont été convenablement ajustés.

De même, l'utilisation des simulateurs est très intéressante lorsqu'il s'agit de réaliser des circuits complexes comportant des transistors. On peut ainsi, avec l'aide des simulateurs, étudier les circuits avant la fabrication même des transistors dont les caractéristiques optimums sont ainsi déterminées à l'avance pour chaque application particulière.

### Introduction

Un transistor à jonction est un élément à trois électrodes, constitué par des semi-conducteurs de deux types qui se présentent dans l'ordre n-p-n ou p-n-p. Dans chaque région du transistor, les atomes correspondant aux impuretés existent sous forme ionisée à la température ordinaire. Les charges libres résultant de cette ionisation, à savoir électrons dans la région «n» et trous dans la région «p», suivent approximativement la loi de la distribution maxwellienne. Les trois régions appelées respectivement émetteur, base et collecteur sont séparées par des barrières. Ces barrières jouent un rôle essentiel dans le comportement non linéaire du transistor. Elles consistent essentiellement en une double couche de charges fixes et de signe contraire, créée par la différence de potentiel existant entre deux régions voisines et ceci en accord avec l'équation de Poisson. L'équilibre entre les charges mobiles positives et négatives existant dans les trois régions est régi par les lois de

**Zusammenfassung.** Die Autoren beschreiben ein Analogon zu einem Flächentransistor. Die in einem Transistor während des Betriebes sich abspielenden physikalischen Vorgänge werden durch analoges Verhalten entsprechender elektrischer Kreise direkt interpretiert. An Hand dieses allgemein gültigen Analogons wurde ein Simulator für Flächentransistoren entwickelt. Dieser Simulator erlaubt, das Verhalten verschiedener Transistoren bei Aussteuerung mit kleinen Amplituden nachzuahmen. Die zur Nachahmung eines bestimmten Transistors eingestellten Parameter der elektrischen Kreise des Simulators geben direkt Aufschluss über die physikalischen Eigenschaften der im Transistor verwendeten Materialien.

Ein solcher Simulator ist auch zur Untersuchung komplizierterer elektrischer Kreise, in denen Transistoren verwendet werden sollen, interessant. Damit ist es möglich, die günstigsten Charakteristiken und damit die optimale Dimensionierung eines Transistors für eine bestimmte Anwendung im voraus zu bestimmen.

la thermodynamique statistique, c'est-à-dire par la loi de l'action de masse et la statistique de Boltzmann.

Le fonctionnement d'un transistor, assez complexe en soi, a été apparenté à celui d'un tube à vide. Cette comparaison n'est toutefois pas très correcte, car les phénomènes de diffusion et de recombinaison qui interviennent dans un transistor n'ont pas d'équivalent dans les tubes à vide. D'autre part, on a abondamment développé, ces dernières années, des circuits équivalents en assimilant le transistor à un quadripôle. Mais cette assimilation nécessite des approximations importantes. En outre, il est difficile de trouver la relation entre les éléments du quadripôle et le mécanisme de fonctionnement du transistor. Pour cette raison, différents auteurs ont imaginé récemment des circuits analogiques donnant une interprétation plus directe des phénomènes physiques qui ont lieu dans le transistor<sup>1 2</sup>.

<sup>1</sup> Pritchard, R. L. Frequency Variations of Junction-Transistor Parameters. Proc. Inst. Radio Engrs 42 (1954), 786.

<sup>2</sup> Zawels, Jakob. Physical Theory of New Circuit Representation for Junction Transistors. J. Appl. Phys. 25 (1954), 976

\* Reproduit d'une communication faite à Bruxelles le 1<sup>er</sup> octobre 1955 lors des Journées Internationales de Calcul Analogique.

Un simulateur construit à l'aide des circuits analogiques permet de vérifier et d'analyser les hypothèses faites sur les phénomènes physiques intervenant dans un transistor. C'est l'obtention d'une interprétation directe de ces phénomènes que nous avons tentée. Nous décrivons donc un circuit analogique général d'un transistor à jonction, puis nous en déduisons un simulateur qui, d'ailleurs, a été réalisé pour des petits signaux.

**Circuit analogique général**

Considérons tout d'abord un transistor n-p-n au repos, c'est-à-dire sans tension appliquée; l'équilibre thermique est donc établi. Si l'on applique maintenant au collecteur une tension positive par rapport à la base, la barrière base-collecteur s'élargit légèrement en fonction de cette tension, mais l'équilibre thermique n'est pratiquement pas changé. En revanche, si une très petite tension positive par rapport à l'émetteur est appliquée à la base, cet équilibre est complètement rompu. Un certain nombre d'électrons sont alors injectés dans la base à partir de l'émetteur et inversement des trous contenus dans la base sont injectés dans la région de l'émetteur. L'excès Δp des trous dans l'émetteur, provoqué par cette injection, a, près de la barrière, la valeur donnée par la loi de Boltzmann.

$$\Delta p = p_n \left( \exp \frac{eV_b}{KT} - 1 \right)$$

où :

- $p_n$  = densité des trous correspondant à l'équilibre thermique dans la région «n» [ $\text{cm}^{-3}$ ]
- $e$  = valeur absolue de la charge électronique =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Cb.
- $K$  = constante de Boltzmann =  $0,857 \cdot 10^{-4}$  électron volt par degré Kelvin
- $T$  = température absolue en degrés Kelvin
- $V_b$  = tension de la barrière émetteur-base

Ces trous étant en forte minorité par rapport aux électrons, ils n'influencent pratiquement pas la distribution du potentiel dans la région «n» de l'émetteur; ce potentiel reste ainsi pratiquement constant dans toute la région. Les trous diffusent donc dans la région «n» jusqu'à ce qu'ils se recombinent. Cette diffusion est représentée par l'équation de diffusion de Shockley:

$$\frac{\delta p}{\delta t} = D_p \frac{\delta^2 p}{\delta x^2} - \frac{p - p_n}{\tau_p}$$

- $D_p$  = constante de diffusion des trous dans la région «n» [ $\text{cm}^2 \text{sec}^{-1}$ ]
- $\tau_p$  = durée de vie moyenne des trous dans la région «n» [sec]

Le dernier terme de cette équation représente la perte de trous due à la recombinaison. Ce phénomène de diffusion étant caractéristique du comportement d'un transistor, nous nous sommes attachés à en établir un circuit analogique. Une relation analogique de cette diffusion de trous est en effet donnée par la distribution des charges le long d'une ligne résistance-capacité.

$$\frac{\delta Q}{\delta t} = \frac{I}{RC} - \frac{\delta^2 Q}{\delta x^2} - \frac{G}{C} Q$$

- $Q$  = charge électrique en Cb  $\text{cm}^{-1}$
- $R$  = résistance par unité de longueur en ohms
- $C$  = capacité par unité de longueur en Farads
- $G$  = conductivité correspondant aux pertes par unité de longueur en  $\text{ohms}^{-1}$

Imaginons maintenant une source de tension produisant une charge initiale sur notre ligne donnée par:

$$Q = e \Delta p = e(p - p_n) = ep_n \left( \exp \frac{eV_b}{KT} - 1 \right)$$

Cette source de tension doit donc avoir pour valeur:

$$V_p = \frac{Q}{C_p} = \frac{ep_n}{C_p} \left( \exp \frac{eV_b}{KT} - 1 \right)$$

Elle peut être produite, d'une part, par une batterie donnant la valeur constante  $-V_B = \frac{ep_n}{C_p}$ , d'autre part, par un générateur. Ce générateur serait sous le contrôle de la tension  $V_b$  de la barrière (c'est-à-dire de la tension entre les régions de l'émetteur et de la base) et fournirait par conséquent la tension donnée par  $\frac{ep_n}{C_p} \exp. \frac{eV_b}{KT}$ . L'injection des trous dans la région de l'émetteur, leur diffusion et leur recombinaison dans cette région, peuvent donc être représentées par le circuit de la figure 1.

Le courant de sortie du générateur de tension doit être égal au courant d'entrée. Si l'épaisseur de la région «n» est grande par rapport à la longueur de diffusion moyenne des trous, nous pouvons considérer la longueur de notre ligne comme infinie. C'est-à-dire que le courant des trous est transformé entièrement en courant d'électrons par recombinaison dans la région «n» représentant l'émetteur. La tension le long de la ligne représente la concentration des trous dans l'émetteur, en fonction de la distance  $x$  à partir de la barrière. Le courant aux bornes qui en résulte cor-

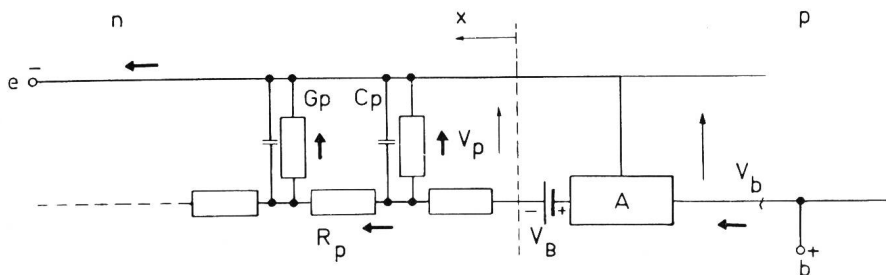


Fig. 1. Circuit analogique représentant l'injection des trous dans l'émetteur, de même que la diffusion de ces trous et leur recombinaison dans cette région

- • électrons
- ○ trous
- > courant d'électrons
- - -> courant de trous
- courant conventionnel
- F : section active en cm<sup>2</sup>

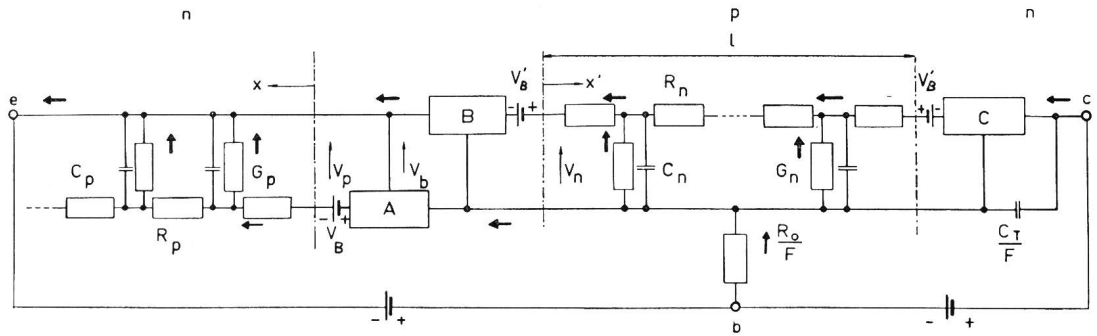
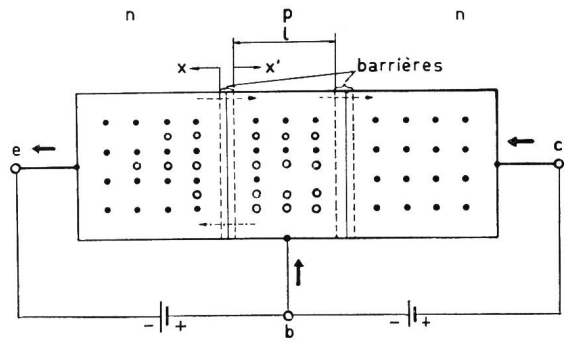


Fig. 2.  
Représentation schématique d'un transistor à jonction et son circuit analogique correspondant

respond au courant par cm<sup>2</sup> du transistor provenant de cette injection et de cette recombinaison de trous.

Le raisonnement concernant les trous injectés dans la région « n » peut également être fait pour les électrons injectés dans la région « p » de la base à partir de l'émetteur. Puisque les électrons ont une charge négative; la tension  $V_n$  correspondant à l'excès de la concentration des électrons dans la région « p » près de la barrière émetteur-base devient négative.

Sa valeur est donnée par l'expression :

$$V_n = - \frac{en_p}{C_n} \left( \exp \frac{eV_b}{KT} - 1 \right)$$

$n_p$  = densité des électrons correspondant à l'équilibre thermique dans la région « p » de la base.

La concentration des électrons dans la région « p » près de la barrière qui s'est formée entre le collecteur et la base est de nouveau donnée par la loi de Boltzmann

$$n_n = n_p \left( \exp \frac{-eV_c}{KT} - 1 \right)$$

$V_c$  = tension de la barrière base-collecteur

Puisque la tension du collecteur est toujours relativement élevée, le terme variable de cette équation peut être négligé. Il suffit donc d'introduire dans le circuit analogique une pile donnant la tension constante égale à  $V'_B = \frac{en_p}{C_n}$ .

Tous les électrons qui arrivent par diffusion à la barrière base-collecteur sont immédiatement attirés par la tension du collecteur. Les effets de cette barrière pourraient donc être représentés dans notre circuit analogique par un amplificateur dont l'impédance d'entrée est extrêmement basse et l'impé-

dance de sortie infinie. Le courant d'entrée doit toujours être égal au courant de sortie. Un tel amplificateur pourrait par exemple être approximativement représenté par une pentode ayant une pente extrêmement raide et dont la grille serait à la masse.

Notre circuit analogique peut maintenant être représenté par la figure 2 :

Le générateur de tension A (impédance de sortie 0) est contrôlé par la tension  $V_b$  à la barrière émetteur-base; il en est de même pour le générateur B qui est contrôlé par la tension  $V_b$ , mais avec polarité inversée. L'amplification de tension du générateur A est :

$$\mu_A = \frac{\delta V_p}{\delta V_b} = \frac{e^2 p_n}{KTC_p} \exp \frac{eV_b}{KT}$$

et celle du générateur B est :

$$\mu_B = \frac{e^2 n_p}{KTC_n} \exp \frac{eV_b}{KT}$$

Le coefficient de diffusion des trous dans la région « n » est donné par :

$$\frac{1}{R_p C_p} = D_p$$

et le coefficient de diffusion des électrons dans la région « p » par :

$$\frac{1}{R_n C_n} = D_n$$

De même les durées de vie moyennes sont représentées par les constantes de temps :

$$\frac{C_p}{G_D} = \tau_p \quad \text{et} \quad \frac{C_n}{G_n} = \tau_n$$

La distribution des densités des trous dans l'émetteur et des électrons dans la base est représentée par la distribution de tension sur les lignes correspondantes.

Le circuit interprète donc directement les phénomènes de diffusion qui ont lieu dans les différentes régions du transistor et il permet d'introduire logiquement d'autres éléments importants ou de prévoir l'influence d'autres phénomènes. Nous nous contenterons ici de mentionner les effets les plus importants.

Pour minimiser une conduction de surface, le transistor est construit de telle façon que la base s'étende en dehors de la région où interviennent les phénomènes de diffusion. C'est entre cette région de diffusion et la prise de courant de la base que se trouve donc une faible résistance  $R_0$ . La valeur de cette résistance dépend des matériaux et des dimensions géométriques de la base. Elle est donc pratiquement constante et elle a une importance majeure pour le comportement en haute fréquence du transistor à cause de la charge capacitive résultant des phénomènes de diffusion. Un autre élément important est représenté par la capacité  $C_T$  de la barrière base-collecteur. Puisque la largeur de la barrière change avec la tension appliquée entre le collecteur et la base, deux effets en résultent:

1. La largeur de la région de la base, où le phénomène de diffusion se manifeste, dépend de cette tension.

Pour notre circuit analogique, cela signifierait que la longueur de la ligne correspondante serait contrôlée par la tension collecteur-base. Il en résulte une impédance de sortie du transistor qui n'est pas infiniment grande.

2. Pour la plupart des transistors, cet effet peut être négligé. La capacité qui existe entre le collecteur et la partie de la base où la diffusion se manifeste (voir figure 2) change en fonction de cette même tension.

En supposant, comme on l'a fait jusqu'ici, que les impuretés sont réparties uniformément dans la base et dans le collecteur, cette capacité varie d'une manière inversement proportionnelle à la racine carrée de la tension base-collecteur et devrait donc en principe être contrôlée de cette même manière dans notre circuit analogique.

### Simulateur pour petits signaux

Un simulateur satisfaisant à toutes ces conditions serait certainement compliqué à réaliser. Cependant, ce circuit analogique montre dans quel sens un transistor devrait être conçu pour réaliser certaines performances.

Du circuit analogique général, on peut, par exemple, déduire un simulateur valable pour les petits signaux alternatifs. Si la largeur effective de la base est petite par rapport à la longueur de diffusion moyenne des électrons, la ligne RC correspondante du circuit analogique (qui se termine par une impédance extrême-

ment basse) peut être représentée par les éléments suivants: une résistance  $R_n l$ , une perte à l'entrée  $\frac{1}{2} G_n l$  et une capacité  $\frac{1}{2} C_n l$  en parallèle.

Le courant collecteur devient donc:

$$i_c = \frac{V_n - V'_B}{R_n l} F = \frac{e n_p}{C_n R_n l} F \exp \frac{e V_b}{K T}$$

c'est-à-dire:

$$i_c = F \frac{e n_p D_n}{l} \exp \frac{e V_b}{K T}$$

On exprime la loi d'action de masse dans le cas de l'équilibre thermique par la relation

$$p n = i^2$$

$i$  = concentration des électrons, égale à la concentration des trous si la matière est intrinsèque (c'est-à-dire parfaitement pure)

Si le «doping»  $n_n$  de la région émettrice est très grand par rapport à celui de la base, la tension

$$V_p = \frac{e p_n}{C_p} \left( \exp \frac{e V_b}{K T} - 1 \right)$$

dans le circuit analogique devient très petite d'après

$$\text{cette loi } \left( p_n = \frac{i^2}{n_n} \right)$$

et le courant qui en résulte peut être négligé.

L'impédance d'entrée provenant des effets de diffusion et de recombinaison dans la base consiste donc en une résistance dynamique  $r_b = \frac{1}{F \mu_B \frac{1}{2} G_n l}$

c'est-à-dire  $r_b = \frac{2}{F} \frac{K T}{e^2 n_p} \frac{\tau_n}{l} \exp \left( - \frac{e V_b}{K T} \right)$  et en

une capacité dynamique

$$c_b = F \mu_B \frac{1}{2} C_n l = \frac{F}{2} \frac{e^2 n_p}{K T} l \exp \frac{e V_b}{K T} \text{ en parallèle.}$$

Les éléments actifs B et C pourraient être représentés en principe par une seule pentode dont la pente serait:

$$S = \frac{\delta i_c}{\delta V_b} = F \cdot \frac{e^2 n_p D_n}{l K T} \exp \frac{e V_b}{K T}$$

Les pentes qui résulteraient de cette relation dépassent cependant largement celles des pentodes normales, et un amplificateur à large bande, dont l'amplification est réglable, doit être introduit, comme le montre le schéma de principe du simulateur (fig. 3). Tous les paramètres du transistor, dont nous connaissons maintenant les significations physiques, peuvent alors être déterminés très rapidement en fonction du point de travail à l'aide d'un tel simulateur.

En voici très brièvement le procédé:

1. Le transistor à étudier et le simulateur, court-circuités à la sortie, sont contrôlés à la base par une

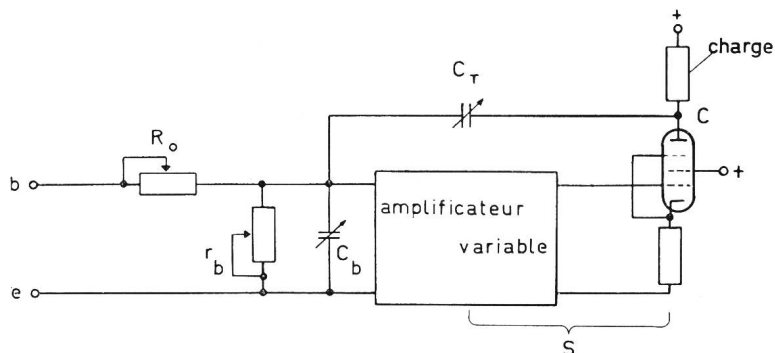


Fig. 3. Principe d'un simulateur de transistor à jonction pour de petits signaux alternatifs

source de courant donnant des impulsions rectangulaires. Les deux courbes de tension aux entrées sont comparées en se servant d'un commutateur électronique et d'un oscillographe. La courbe de la tension d'entrée du transistor à simuler a en général la forme suivante (fig. 4).

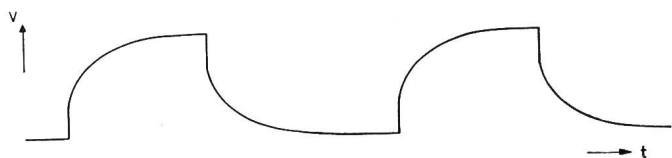


Fig. 4. Tension d'entrée d'un transistor à jonction, alimenté par une source de courant donnant des impulsions de forme rectangulaire

La chute initiale de la tension est déterminée par  $R_o$ , puis son amplitude peut être ajustée par  $r_b$ . Enfin, la partie exponentielle peut être reproduite par un ajustage de  $C_b$ . Si l'on peut ajuster correctement ces trois paramètres, c'est-à-dire faire coïncider les deux courbes, on peut conclure que la partie réelle de l'impédance d'entrée du transistor est indépendante de la fréquence. Il en est de même pour la capacité effective qui rentre dans l'expression de la partie imaginaire. Dans ce cas, les hypothèses initiales sont justifiées, à savoir que le courant dans l'émetteur peut être négligé et que l'épaisseur de la base est assez petite pour que la ligne correspondante puisse être remplacée par une seule résistance, une perditance et une capacité.

Des essais, réalisés avec des transistors RCA 2N34, ont montré que la courbe des tensions d'entrée pouvait en effet être parfaitement reproduite par l'ajustement de ces trois paramètres. L'oscillogramme suivant en est un exemple (fig. 5).

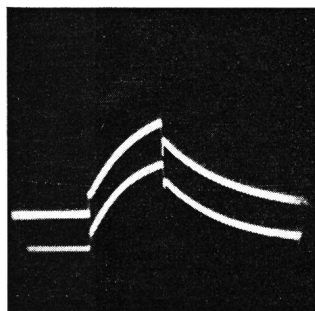


Fig. 5. Oscillogramme de la tension d'entrée d'un transistor et de son simulateur alimentés par une source de courant donnant des impulsions de forme rectangulaire

Il est important de noter la relation :

$$r_b C_b = \tau_n$$

On peut donc mesurer dans ce cas la durée de vie moyenne des électrons dans la matière de la base.

2. Si le transistor et le simulateur sont ensuite chargés sur une impédance égale dont la valeur est relativement élevée, les paramètres  $S$  et  $C_T$  peuvent être ajustés en comparant les signaux de sortie. L'oscillogramme (fig. 6) montre les impulsions de sortie après ajustement de ces deux paramètres.

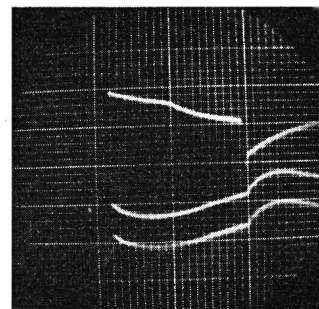


Fig. 6. Oscillogramme de la tension de sortie d'un transistor et de son simulateur contrôlés par une tension de la forme indiquée par la ligne supérieure

Dans le cas particulier, la tension d'entrée a été imposée et elle est marquée par la ligne supérieure de l'oscillogramme.

Une autre relation importante est :

$$r_b \cdot S = \frac{i_c}{i_b} = 2 \frac{D_n \tau_n}{l^2}$$

c'est-à-dire: l'amplification du courant est un invariant caractéristique d'un transistor à jonction.

Un tel simulateur, par ailleurs extrêmement simple, n'est pas seulement intéressant pour la détermination rapide des paramètres importants du transistor, il est aussi très utile lorsqu'il s'agit de réaliser des circuits complexes comportant des transistors.

Citons par exemple l'étude des conditions de stabilité des systèmes à contre-réaction. On peut ainsi déterminer les caractéristiques optimums d'un transistor pour une application particulière avant de s'engager à le fabriquer, ce qui est toujours une opération coûteuse.

Adresse des auteurs: Battelle Memorial Institute Laboratoires de Genève, route de Drize 7, Carouge-Genève.