

A1

**DEMANDE
DE BREVET D'INVENTION**

(21)

N° 81 12337

(54) Procédé pour fabriquer des transistors de puissance à paramètres modifiés par irradiation d'électrons.

(51) Classification internationale (Int. Cl.³). H 01 L 21/263.

(22) Date de dépôt..... 23 juin 1981.

(33) (32) (31) Priorité revendiquée : *EUA, 24 juillet 1980, n° 171.787.*

(41) Date de la mise à la disposition du
public de la demande..... B.O.P.I. — « Listes » n° 4 du 29-1-1982.

(71) Déposant : Société dite : WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION, résidant aux EUA.

(72) Invention de : Philip Leland Hower et Richard Joseph Fiedor.

(73) Titulaire : *Idem* (71)

(74) Mandataire : Bureau D. A. Casalonga, Office Josse et Petit,
8, av. Percier, 75008 Paris.

Procédé pour fabriquer des transistors de puissance à paramètres modifiés par irradiation d'électrons.

La présente invention concerne les transistors irradiés par des électrons et elle a trait, plus particulièrement, à des transistors de puissance.

Parmi les paramètres de performance importants compris dans les cahiers des charges pour les transistors de forte puissance à semi-conducteurs, on trouve le temps t_s de stockage de charges et le gain h_{fe} . Le paramètre t_s relatif au temps de stockage est une fonction de la durée de vie τ des porteurs de courant dans la matière semi-conductrice qui comprend le collecteur métallurgique du transistor. La durée de vie τ

est la caractéristique d'une région semi-conductrice désignée couramment comme étant le temps moyen durant lequel un porteur de courant excédentaire existe dans une région avant de cesser d'être un porteur de courant excédentaire (de façon caractéristique par recombinaison).

Dans les procédés de traitement actuel, il est difficile de régler la durée de vie dans les collecteurs des transistors de puissance. De façon caractéristique, τ varie de plus d'un facteur de 2, par exemple de 20 μs à 40 μs , même dans un groupe de plaquettes semi-conductrices ayant subi les mêmes phases de traitement. Cette variation de τ traduit une variation du temps de stockage t_s . La variation de t_s est néfaste dans de nombreuses applications où des réglages de circuit peuvent être nécessaires pour compenser les variations de t_s d'un dispositif à l'autre. De plus, de nombreuses applications exigent des limites en ce qui concerne le temps de stockage maximal t_s conjointement avec des limites en ce qui concerne le gain minimal h_{fe} .

La présente invention a pour objet de modifier les paramètres de transistors par irradiation.

La présente invention réside, d'une façon générale, dans un procédé de fabrication de transistors dont les paramètres électriques ont été modifiés par rapport à ceux des transistors initiaux, ce procédé consistant :

à déterminer un dosage de radiation d'électrons au cours d'un premier lot d'essais des transistors pour satisfaire à des

caractéristiques données de gain et de temps de stockage en mesurant au moins une des caractéristiques des transistors du premier lot;

5 à positionner une surface d'au moins un des dispositifs semi-conducteurs d'un second lot de transistors initiaux en vue d'une exposition à la radiation; et

10 à irradier le dispositif semi-conducteur précité ou chaque dispositif semi-conducteur dudit second lot avec des électrons portés au niveau d'énergie de radiation tel que fixé au cours de la phase de détermination.

Selon les enseignements de la présente invention, on peut améliorer la relation qui existe dans un transistor à semi-conducteurs entre le gain h_{fe} et le temps de stockage t_s de manière à situer cette relation dans des limites de spécifications prédéterminées (maxima et minima). Si le transistor peut être caractérisé grâce à une durée de vie τ , une variation de cette durée de vie τ entraîne une variation du gain h_{fe} ainsi que du temps de stockage t_s suivant une fonction prédéterminée de cette durée de vie τ . En particulier, on peut obtenir une 20 réduction du temps de stockage t_s (et du gain h_{fe}) en irradiant le transistor avec une densité de radiation prédéterminée, ce niveau de densité de radiation étant proportionnel au produit de l'intensité du flux par le temps total d'exposition.

Plus particulièrement, le transistor peut être caractérisé 25 par un gain h_{fe}^0 et un temps de stockage t_s^0 et si une application de conception particulière exige un gain minimal $h_{fe}^{\min}$ et un temps de stockage maximal $t_s^{\max}$ ($h_{fe}^0 > h_{fe}^{\min}$ et $t_s^0 > t_s^{\max}$), alors l'irradiation du transistor avec un niveau prédéterminé de densité d'électrons déterminée et spécifiée par les enseignements 30 du procédé de la présente invention, on peut réduire le temps de stockage du transistor jusqu'à une valeur inférieure ou égale à $t_s^{\max}$ tout en maintenant une valeur de gain supérieure ou égale à $h_{fe}^{\min}$. De plus, en irradiant le transistor avec un niveau prédéterminé de densité d'électrons tel que déterminé et spécifié 35 par les enseignements de la présente invention, on peut réduire à un minimum les temps de charges de stockage du transistor tout en maintenant les contraintes relatives au gain spécifié minimal $h_{fe}^{\min}$. Toutefois, en général, le procédé de la présente invention

concerne n'importe quel procédé au moyen duquel on désire diminuer le gain ou diminuer le temps de stockage d'une quantité déterminée.

En outre, ce procédé peut être utilisé pour diminuer
5 la plage des valeurs de temps de stockage dans un groupe ou une série de transistors fabriqués. Une série particulière de transistors peut être caractérisée par une plage Δt_s^o de valeur de temps de stockage comprise entre une valeur inférieure t_s^o et une valeur supérieure t_s^h . Si une application de
10 conception particulière exige une plage maximale $\Delta t_s^{\max}$ de valeurs de temps de stockage parmi une série de transistors, on peut alors, en irradiant les transistors avec un niveau de densité d'électrons déterminé et spécifié par les enseignements du procédé de la présente invention, réduire la plage des valeurs
15 du temps de stockage jusqu'à ce qu'elle soit inférieure ou égale à $\Delta t_s^{\max}$ tout en maintenant une valeur de gain de transistor supérieure ou égale à $h_{fe}^{\min}$.

On va maintenant décrire la présente invention en se référant aux dessins annexés, sur lesquels :

20 la figure 1 est un graphique montrant la relation entre la durée de vie et la densité des électrons;

la figure 2 est une vue isométrique d'un transistor, auquel est appliqué le procédé de la présente invention;

la figure 3 est un graphique de la concentration en
25 impuretés en fonction de la distance par rapport à la jonction p-n base-collecteur dans le collecteur du transistor de la figure 2;

la figure 4 est une vue en coupe du transistor de la figure 2;

30 la figure 5 est un circuit servant à déterminer le temps de stockage du transistor des figures 2 et 4;

la figure 6 est un diagramme de temps pour le fonctionnement du circuit de la figure 5;

la figure 7 est un graphique montrant la relation entre
35 la durée de vie et le gain encourant;

la figure 8 est un graphique montrant la relation entre la durée de vie et le temps de stockage; et

la figure 9 montre un appareil particulier destiné à

être utilisé avec le procédé de la présente invention.

la figure 1 est un graphique log-log montrant la relation entre la durée de vie effective τ_e des porteurs de courant dans un transistor bipolaire et la densité ou dosage ϕ_e des électrons auquel est exposé le transistor pour diverses durées de vie initiale τ_0 . Cette relation est bien connue et est représentée et expliquée dans un article rédigé par P. Rai-Choudbury et al, "Electron-Minority Carrier Lifetime Control" dans "IEEE Transactions in Electron Devices", Volume ED-23, No 8, Août 1976.

Cette relation peut être écrite comme suit:

$$\frac{1}{\tau_e} = \frac{1}{\tau_0} + K' \phi_e \quad (1)$$

où :

τ_e est la durée de vie en secondes (s) après irradiation;
 τ_0 est la durée de vie en secondes (s) avant l'irradiation;
 K' est le coefficient en cm^2 (e-S) d'endommagement par les radiations;
 ϕ_e est la densité des électrons en e/cm^2 .

Plus directement :

$$\tau_e = \frac{\tau_0}{1 + K' \phi_e} \quad (2)$$

où ϕ_e peut être exprimé comme une fonction du produit du temps t (en secondes) durant lequel le transistor est exposé à la radiation par la densité de flux ψ_e de cette radiation, de sorte que :

$$\phi_e = f(\psi_e \cdot t) \quad (3)$$

La figure 1 comprend plusieurs courbes de 11 à 19 montrant, pour divers dosages ou densités de flux ϕ_e , la variation τ_0 dans le cas d'un transistor ayant une durée de vie initiale τ_e des porteurs de courant. Par exemple, la courbe 11 de la figure 1 montre la variation de τ_e dans le cas d'un transistor présentant une durée de vie initiale τ_0^{11} de 10 μs . Après avoir

été exposée à une densité de flux ϕ_e de 10^{13} électrons/cm², la durée de vie τ_e^{11} des porteurs d'électrons est de 5,50 μ s comme représenté par la courbe 11. Comme autre exemple, la courbe 19 de la figure 1 montre les variations de τ_e pour un transistor présentant une durée de vie initiale τ_0^{19} de 100 μ s. Après exposition à une densité de flux ϕ_e de 10^{13} électrons/cm², la durée de vie τ_e^{19} des porteurs de courant est de 10,70 μ s comme représenté par la courbe 19. Les diverses autres courbes 12 à 18 représentées sur la figure 1 montrent en outre l'effet de l'exposition, à une gamme de densités d'électrons, d'un transistor bipolaire présentant des durées de vie initiale différentes. On peut voir d'après les courbes 11 à 19 de la figure 1 que plus la durée de vie initiale τ_0 est faible pour un transistor donné, plus est faible la réduction ($\tau_0 - \tau_e$) de la durée de vie des porteurs de courant.

Le glossaire des variables et des constantes ainsi que l'index des relations et des équations que l'on a donnés ci-après seront utilisés pour faciliter la compréhension des relations et des équations expliquant le procédé de la présente invention.

Glossaire des variables et des constantes

- A_B = surface de base métallurgique (en cm²)
- A_E = surface d'émetteur métallurgique (en cm²)
- D_B = coefficient effectif de diffusion des électrons dans la base métallurgique (sans dimension)
- D_C = coefficient de diffusion des porteurs majoritaires aux hauts niveaux dans le collecteur (en cm²/seconde)
- D_{CO} = coefficient de diffusion des porteurs majoritaires aux bas niveaux dans le collecteur (en cm²/seconde)
- D_n = coefficient de diffusion des électrons, d'une façon générale, dans une couche semi-conductrice
- D_n = D_B dans la couche 114 de base
- D_n = D_{CO} dans la couche 120 de collecteur aux bas niveaux
- D_n = D_C dans la couche 120 de collecteur aux hauts niveaux
- h_B = paramètre de recombinaison pour la base (en cm⁴/sec)
- h_C = paramètre de recombinaison pour le collecteur (en cm⁴/sec)
- h_E = paramètre de recombinaison pour l'émetteur (en cm⁴/sec)

h_{FEO} = gain en courant de crête (montage en émetteur commun)
(sans dimension)

$h_{fe}Y$ = gain limité utile ou de rendement d'émetteur

I_B = courant de base (en ampères (A))

5 I_{BF} = courant de base direct (en ampères (A))

I_{BR} = courant de base inverse (en ampères (A))

I_C = courant de collecteur (en ampères (A))

k = la constante de Boltzmann = $8,62 \times 10^{-5}$ eV/°K

K' = coefficient d'endommagement de la radiation en cm^2 (e-S)

10 N_A = densité des accepteurs dans la base (en cm^{-3})

N_C = densité des donneurs dans le collecteur n (en cm^{-3})

$N_W(0)$ = concentration des porteurs en excédant à la jonction
n-n⁺ 124 à t=0 (en cm^{-3}) dans une saturation classique

q = charge des électrons en coulombs = $1,6 \times 10^{-19}$ coulombs

15 T = température absolue en degrés Kelvin dans la région
active du transistor

t_S = temps de stockage de charges (en secondes)

V_{CE} = tension continue collecteur-émetteur (en volts)

W_{BO} = largeur de la base active (en cm^2)

20 W_C = largeur de la région n de collecteur (en cm)

W_{CIB} = largeur de la base induite par le courant (en cm)

μ_{CO} = mobilité aux bas niveaux pour les porteurs majoritaires
dans le silicium (en $cm^2/V-s$)

γ_N = durée de vie dans la région de collecteur n 122

25 γ_e = durée de vie après irradiation (en secondes (s))

γ_O = durée de vie avant irradiation (en secondes (s))

ϕ_e = densité des électrons (en e/cm²)

Index des relations et des équations

30
$$B = \frac{W_C}{(h_B + h_C)\gamma_N} + \frac{I_C h_E W_C}{(h_B + h_C) q A_B D_C}$$

35
$$C = \frac{I_C}{q A_B (h_B + h_C)} \left(\frac{1}{h_{FEO}} + \frac{W_C^2}{4 D_C \gamma_N} - \frac{I_{BF}}{I_C} \right) + \frac{I_C^2 h_E}{(h_B + h_C)} \frac{(W_C / D_C)^2}{4 q^2 A_E A_B}$$

$$D_C^* = D_C^2 / D_{CO}$$

$$D_{CO} = kT\mu_{CO}/q$$

5

$$I_0 = \frac{q\mu_{CO} V_{CE} N_C A_E}{W_C}$$

10

$$N_W(0) = \frac{-B}{2} + \sqrt{\frac{B^2}{4} - C}$$

$$Q_0 = \frac{V_{CE} N_C W_C}{(4kT/q)}$$

15

$$Q_B = \int_0^{W_{BO}} N_A dx$$

20

$$\frac{Q_B}{D_B} = \int_0^{W_B} \frac{N_A}{D_n} dx$$

25

$$W_{CIB} = W_C(1 - I_0/I_C)$$

La figure 2 est une vue isométrique d'un transistor 100 sans métallisation, ce transistor 100 étant utilisé dans le procédé de la présente invention. On peut se référer à ce transistor 100 pour expliquer les variables du glossaire ci-dessus.

Le transistor 100 au silicium comporte une surface supérieure 100 et une surface inférieure 102 entre lesquelles se trouve une couche 110 d'émetteur du type n formant une jonction p-n 112 avec une couche 114 de base du type p. Le collecteur 120 comprend une couche 122 du type n et une couche 126 contiguë à cette dernière, ces deux couches formant ensemble

une limite $n-n^+$ 124. La couche 122 de type n forme une jonction p-n 128 avec la couche 114 de base de type p .

La superficie A_B de base est la superficie couverte par la jonction p-n 128 et est représentée par une première zone
 5 hâchurée sur la figure 2. La superficie A_E d'émetteur est la superficie couverte essentiellement par la surface inférieure de l'émetteur n^+ 110, c'est-à-dire essentiellement la superficie couverte par le courant traversant la jonction p-n 112. La superficie A_B est, de façon caractéristique, à peu près
 10 égale à deux fois la valeur de la superficie A_E . La largeur W_{CIB} est la distance qui, dans la couche n 122 sépare la jonction p-n 128 d'une ligne 130 où la concentration en porteurs excédentaires dans la couche n 122 est nulle. La largeur W_{CO} est la
 15 distance qui, dans la base p 114, sépare la jonction p-n 128 d'une ligne 132 tangente à la partie inférieure de la jonction p-n 112. La largeur W_C est la largeur de la région 122 de collecteur de type n .

Les mesures des propriétés physiques du transistor 100 comprennent les coefficients de diffusion D_B , D_C^* , et D_{CO} , les
 20 paramètres de recombinaison h_B , h_C , et h_E , les concentrations en impuretés N_A et N_C , et la mobilité μ_{CO} aux bas niveaux. La mobilité μ_{CO} aux bas niveaux est une propriété physique de certains matériaux semi-conducteurs mesurés en $cm^2/V\text{-sec}$. La mobilité μ_{CO} aux bas niveaux pour les porteurs majoritaires
 25 dans le silicium est $1300\text{ cm}^2/V\text{-sec}$. pour un transistor npn. Les coefficients de diffusion D_C^* et D_{CO} sont fonction de μ_{CO} comme indiqué dans l'index ci-dessus. Les paramètres de recombinaison h_B , h_C et h_E représentent chacun les mesures des effets de recombinaison des porteurs minoritaires dans les régions forte-
 30 ment dopées pour les régions respectives du transistor 100. Chacun des paramètres de recombinaison peut être exprimé par

$$h = \frac{D_{eff}}{N_{eff} L_{eff}}$$

35 où :

D_{eff} = coefficient de diffusion effective pour les porteurs minoritaires;

L_{eff} = longueur de diffusion effective pour les porteurs minoritaires; et

N_{eff} = concentration effective des porteurs majoritaires

La figure 3 est un graphique dans lequel l'axe des ordonnées 50 représente la concentration en impuretés et l'axe des abscisses 60 représente la distance par rapport à la jonction base-collecteur p-n 128 dans le collecteur du transistor 100 de la figure 2. Le graphique de la figure 3 comprend des courbes 51 et 52 montrant, respectivement, la concentration en impuretés n (électrons) et p (trous) dans la couche de collecteur n 122 pour l'état de polarisation directe pendant une saturation classique comme une fonction de la distance par rapport à la jonction p-n 128. Une saturation classique dépeint un état dans lequel la jonction p-n 128 est polarisée partout en sens direct. La pente des courbes 51 et 52 est déterminée par la densité de courant dans le collecteur 120. Le graphique de la figure 3 comprend également des courbes 53 et 54 montrant respectivement la concentration en impureté n et p dans la couche 122 de collecteur n pour l'état de polarisation en sens direct pendant une quasi-saturation comme une fonction de la distance par rapport à la jonction p-n 128. Une quasi-saturation dépeint un état dans lequel la jonction p-n 128 est polarisée en sens direct uniquement sous l'émetteur 110 mais est polarisée en sens inverse partout ailleurs. La ligne 55 en traits interrompus désigne l'interface n-n⁺ 124. La courbe 53 s'incline négativement sur une certaine distance dans le collecteur n 122, ce qui traduit une diminution de la concentration en impuretés n (électrons). Après une distance égale à la largeur W_{CIB} , la pente de la courbe 53 devient nulle, ce qui traduit une concentration constante en impuretés n (électrons) équivalente à la propriété N_C . La différence entre la concentration N_C et la concentration en impuretés n (électrons) à l'interface n-n⁺ 124 exprime la concentration $N_{(W)}(0)$ en porteurs excédentaires à la jonction n-n⁺ 124.

La figure 4 est une vue en coupe par IV-IV du transistor 100 de la figure 2. La figure 4 montre une métallisation que l'on a effectuée sur le transistor 100 pour obtenir un dispositif complet et en état de marche. Une électrode de base 140 en métal

et d'une épaisseur de $8\text{ }\mu\text{m}$ est disposée sur la surface découverte de la couche 114 de base et peut être constituée par n'importe quel métal conducteur, mais l'aluminium est préférable. Une électrode d'émetteur 144 en métal et d'une épaisseur de $8\text{ }\mu\text{m}$ est disposée sur la surface découverte de la couche d'émetteur 110 et peut avoir la même composition que l'électrode 140. Une pièce 146 en molybdène et d'une épaisseur de $0,15\text{ mm}$ est disposée sur l'électrode d'émetteur 144 et une pièce 148 en molybdène et d'une épaisseur de $0,76\text{ mm}$ est disposée sur la surface découverte de la couche n^+ 126 pour former une électrode de collecteur.

La figure 5 montre un circuit servant à déterminer le temps t_s de stockage de charges du transistor 100. Sur la figure 5, les mêmes références désignent les parties correspondantes des figures précédentes. Une résistance R_L est montée entre une source d'alimentation V_{cc} et l'électrode de collecteur 148. L'électrode d'émetteur 146 est reliée à la masse et l'émetteur de base 140 est relié à une source de courant $i_B(t)$. La source de courant $i_B(t)$ comprend, d'une part, des sources d'énergie électrique V_1 et V_2 comportant chacune une borne positive et une borne négative et, d'autre part, des résistances R_1 et R_2 . La source de courant $i_B(t)$ comprend aussi un commutateur S_1 unipolaire à deux directions comportant un pôle P_1 et des plots π_1 et π_2 . La borne négative de la source d'énergie électrique V_1 est reliée à la masse et la borne positive de cette source est reliée à l'une des extrémités de la résistance R_1 . L'autre extrémité de la résistance R_1 est reliée au plot π_1 du commutateur. La borne positive de la source d'énergie V_2 est reliée à la masse et la borne négative de cette source est reliée à une des extrémités de la résistance R_2 . L'autre extrémité de la résistance R_2 est reliée au plot π_2 de l'interrupteur. Le temps de stockage de charges est la période de temps nécessaire pour que le courant I_C de collecteur diminue jusqu'à une valeur égale à $0,9 I_C$ après qu'un courant de polarisation inverse I_{BR} a été appliqué au transistor 100. La figure 6 montre un diagramme de temps servant à déterminer le temps de stockage t_s dans le cas du transistor 100. Les courbes 150 et 152 montrent les valeurs instantanées $i_C(t)$ et $i_B(t)$ du courant de collecteur et du courant de base, respectivement. A un moment

t_0 , un courant de base I_{BF} de polarisation en sens direct est appliqué à l'électrode de base 140 du transistor 100 comme représenté par la courbe 152 de la figure 6 au moment t_0 , ceci se traduisant par un courant I_C dans l'électrode de collecteur 148. Au moment t_1 , le courant de base I_{BR} de polarisation en sens inverse est substitué au courant de base I_{BF} comme le montre la courbe 152 sur la figure 6 au moment t_1 . Le courant de collecteur I_C diminue jusqu'à une valeur égale à $0,9 I_C$ à un moment t_2 . La période de temps qui s'écoule entre le moment t_1 et le moment t_2 est le temps de stockage t_s .

On a déterminé qu'une relation existe entre le gain en courant h_{fe} et la durée de vie τ_N des porteurs dans le collecteur. La relation est illustrée par la courbe 30 de la figure 7. L'équation à partir de laquelle est calculée ou tracée la courbe 30 est :

$$h_{fe} = f(\tau_N) = h_{fe0} \gamma / (1 + \delta) \quad (4)$$

où

$$h_{fe} \gamma = \frac{h_{fe0}}{1 + \frac{Q_0 D_B}{Q_B D_C^*} \left(\frac{I_C^2 + I_0^2}{I_0 I_C} - 2 \right)} \quad (5)$$

et

$$\delta \triangleq h_{fe} \gamma (W_{CIB}^2 / (4 D_C \tau_N)) \quad (6)$$

où les variables, les constantes et les relations figurant dans les équations (4), (5) et (6) sont données en détail dans le glossaire ci-dessus des variables et constantes ainsi que dans l'index ci-dessus des relations et des équations. D'une façon plus directe, la relation entre le gain h_{fe} , la densité ϕ_e d'électrons et τ_0 peut être exprimée comme suit :

$$h_{fe} = f(\phi_e) = \frac{h_{fe0} \gamma}{1 + \frac{W_{CIB}^2 h_{fe0} \gamma (1 + K' \phi_e)}{4 D_C \tau_N}} \quad (7)$$

Pour la courbe 30 tracée sur la figure 7, les variables de l'équation (7) ont les valeurs suivantes :

$$\begin{aligned}
 I_C &= 50 \text{ A} \\
 V_{CE} &= 2,5 \text{ V} \\
 h_E &= 2 \times 10^{-14} \text{ cm}^{-4}/\text{S} \\
 A_E &= 1 \text{ cm}^2 \\
 W_C &= 50 \times 10^{-4} \text{ cm} \\
 N_C &= 1.4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \\
 h_{fe0} &= 25
 \end{aligned}$$

On a également déterminé qu'il existe une relation entre le temps de stockage t_s dans un transistor et la durée de vie effective γ_B de transit dans la base du même transistor. La figure 8 est un graphique contenant une courbe 40 qui montre la relation entre t_s et γ_B dans un transistor. L'équation à partir de laquelle la courbe 40 est tracée est :

$$t_s = f(\gamma_B) = \gamma_B \ln \left[1 + \frac{N_W(0)W_C(A_B/A_E)}{\frac{N_W(0)W_C}{2} + \frac{I_{BR}\gamma_B}{qA_E}} \right] \quad (8)$$

et où

$$\gamma_B = \frac{I_C}{I_{BF}} \left[\frac{W_C^2}{4D_C} + \frac{qA_B}{I_C} N_W(0)W_C \right] \quad (9)$$

où les variables, les constantes et les relations figurant dans l'équation (8) sont indiquées en détail dans le glossaire ci-dessus des variables et des constantes ainsi que dans l'index ci-dessus des relations et des équations.

Plus directement, l'équation (8) peut être exprimée comme une fonction de la densité ϕ_e d'électrons et de la durée de vie initiale γ_N :

$$t_s = \frac{\gamma_N}{1+\gamma_N K' \phi_e} \ln \frac{(1+N_W(0)W_C(A_B/A_E))(1+\gamma_N K' \phi_e)}{\frac{I_C W_C^2}{4qD_C A_E} (1+\gamma_N K' \phi_e) + \frac{I_{BR}}{qA_E} \gamma_N} \quad (10)$$

5

Pour la courbe 40 tracée sur la figure 8 , les variables de l'équation (9) ont les valeurs suivantes :

10

$$I_C = 50A$$

$$I_{BF} = I_{BR} = 4A$$

$$h_E = 2 \times 10^{-14} \text{ cm}^{-4}/S$$

$$h_B + h_C = 2h_E$$

15

$$A_E = 1 \text{ cm}^2$$

$$W_C = 50 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

$$N_C = 1,4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

En se basant sur l'équation (1) et les courbes 11 à 19 de la figure 1, on peut utiliser un dosage déterminé ϕ_e de radiation pour diminuer la durée de vie γ_N et on peut utiliser ensuite la durée de vie γ_N pour calculer la relation entre le dosage de radiation ϕ_e et le gain h_{fe} à l'aide de l'équation (7) et de la figure 7 ainsi que la relation entre le dosage ϕ_e de radiation et le temps de stockage t_s à l'aide de l'équation (9) et de la figure 8.

25

L'exemple ci-après doit servir à illustrer et à clarifier le procédé de la présente invention :

EXEMPLE

Une application de conception particulière exige, c'est-à-dire spécifie :

30

$$h_{fe}^D \geq 10 \text{ (gain minimal)}$$

$$t_s^D \leq 2 \text{ us (temps de stockage maximal); et}$$

35

un processus particulier de fabrication donne un groupe ou série de transistors présentant une durée de vie utile γ_0 des porteurs où :

$$\lambda_0 = 40 \mu s.$$

A partir des équations (7) et (9) et des courbes 30 et 40, on déduit :

$$h_{fe}^0 = 11,9 \text{ (gain du groupe de transistors après le processus de fabrication);}$$

$$t_s^0 = 3,3 \mu s \text{ (temps de stockage de charge des transistors après le processus de fabrication);}$$

h_{fe}^0 dépasse le gain spécifié ou requis h_{fe}^d mais t_s^0 est supérieur au temps de stockage spécifié t_s^d mais ne satisfait pas aux exigences de conception. En supposant que l'on désire que la série de transistors présente des caractéristiques de fonctionnement telles que le gain h_{fe}^ϕ après irradiation soit aussi grand que possible bien que le temps de stockage t_s^ϕ soit réduit après irradiation au point de satisfaire les exigences de conception ($t_s^\phi \leq t_s^d$), on peut déterminer ou calculer le dosage approprié ϕ_e en utilisant les courbes 16 et 40 et l'équation (1) et l'équation (8) ou (9), respectivement, à l'aide desquelles les courbes 16 et 40 sont obtenues. Pour un temps de stockage t_s^ϕ de 2 μs après irradiation, il faut obtenir après irradiation une durée de vie τ_e telle que :

$$\tau_e = 11 \mu s,$$

cette relation étant obtenue à l'aide de la courbe 40 de la figure 8. Sur la figure 1, la courbe 16 représente la relation entre la durée de vie τ_e après irradiation et le dosage ϕ_e de radiation pour un transistor présentant une durée de vie initiale τ_0^{40} telle que :

$$\tau_0^{40} = 40 \mu s.$$

En examinant la courbe 16 de la figure 1, on peut observer que le dosage approprié ϕ_e de radiation nécessaire pour entraîner une durée de vie τ_e de 10 μs est d'environ 8×10^{12} électrons/cm² qui entraîne, à son tour, un temps de stockage t_s^ϕ après irradiation des 2 μs . En examinant la courbe 30 de la figure 7, on peut observer que pour une durée de vie τ_e de 11 μs , le gain h_{fe}^ϕ pour un transistor de la série de cet exemple (1) se trouve réduit de 11,9 à 10,6, ce gain h_{fe}^ϕ après irradiation étant le gain h_{fe}^ϕ le plus grand possible donné pour un temps de stockage

$t_{se}^{\phi} \leq 2 \mu s$ exigé par les spécifications de conception pour un gain initial h_{fe}^0 de 11,9.

En continuant avec les spécifications de conception et les caractéristiques de fonctionnement des transistors de cet exemple (1) et en supposant que l'on désire que cette série de transistors de cet exemple (1) présentent des caractéristiques de fonctionnement telles que le temps de stockage t_{se}^{ϕ} après irradiation soit aussi faible que possible tout en maintenant le gain h_{fe}^{ϕ} après irradiation à une valeur supérieure ou égale au gain spécifié de h_{fe}^d de conception, on peut déterminer le dosage approprié ϕ_e de radiation en utilisant les courbes 16 et 40 et les équations (1) et (7), respectivement, à partir desquelles sont obtenues les courbes 16 et 30. Pour un gain h_{fe}^{ϕ} de 10 après irradiation, il faut après irradiation une durée de vie τ_e telle que :

$$\tau_e = 8 \mu s,$$

cette relation étant obtenue à l'aide de la courbe 30 de la figure 7. En examinant la courbe 16, on peut observer que le dosage approprié ϕ_e de radiation nécessaire pour entraîner une durée de vie τ_e de 8 μs est d'environ $1,015 \times 10^{13} \text{ e/cm}^2$ qui, à son tour, entraîne un gain h_{fe}^{ϕ} de 10 après irradiation. En examinant la courbe 40 de la figure 8, on peut observer que pour une durée de vie τ_e de 8 μs , le temps de stockage pour un transistor de la série de cet exemple (1) se trouve réduit de 3,3 μs à un temps de stockage t_{se}^{ϕ} après irradiation de 1,5 μs qui est le temps de stockage possible minimal t_{se}^{ϕ} pour un transistor de la série de cet exemple (1) avec un gain donné $h_{fe}^{\phi} \geq 10$ et avec les conditions initiales données $h_{fe}^0 = 11,9$ et $t_s^0 = 3,3 \mu s$.

La figure 9 montre un procédé préféré d'irradiation du transistor 100 des figures 2,4 et 5. L'appareil de la figure 9 comprend un moyen 60 d'irradiation destiné à fournir une radiation 62 d'électrons, les électrons de ladite radiation se trouvant à un niveau d'énergie d'environ 2 MeV, mais, de toute façon, le niveau d'énergie de ladite radiation doit être suffisant pour modifier la durée de vie ou temps de recombinaison dans la couche 122 de collecteur. Une courroie transporteuse 64 sur laquelle est disposé le transistor 100

est placée sous le moyen d'irradiation 60. Le transistor 100 doit être orienté de manière telle que sa surface supérieure 101 soit tout d'abord exposée à la radiation 62. La courroie 64 doit être déplacée à une vitesse prédéterminée de manière telle que le temps total durant lequel le transistor 100 est exposé, soit suffisant pour donner l'exposition à une densité d'électrons prédéterminée.

Bien que l'on ait décrit la présente invention dans le cas de son mode de réalisation préféré, il va de soi que cette description n'est donnée qu'à titre purement illustratif et non limitatif et que des variantes ou modifications peuvent y être apportées dans le cadre de la présente invention.

L'homme de métier comprendra que le procédé de la présente invention peut être mis en oeuvre de diverses façons et peut prendre des formes et des applications diverses autres que celles décrites précédemment. Par exemple, le procédé de la présente invention peut être mis en oeuvre dans le cas où une application de conception particulière exige un temps de stockage t_s^d , tel que :

$$t_s^d = t_{s0} + \Delta r_e^d$$

où t_{s0} = temps de stockage spécifié

et $t_e^d \leq 1 \mu s$

et un procédé de fabrication particulier d'un groupe ou séries de transistors présentant une gamme de durée de vie τ_0 , procédé dans lequel on détermine, par exemple, par analyse statistique que la variation des temps de stockage de transistor fabriqué dépasse la variation requise.

De plus, le procédé de la présente invention est appliqué à des transistors npn de sorte que, aux endroits de la description qui précède où l'on se réfère à des accepteurs et des donneurs, il faudrait substituer des donneurs et des accepteurs, respectivement, dans le cas où l'on utiliserait un transistor du type pnp. En outre, aux endroits de la description qui précède où l'on se réfère à des électrons et des trous, il faudrait substituer des trous et des électrons, respectivement, dans le cas où l'on utiliserait un transistor du type pnp.

Il est important de remarquer que bien qu'un moyen d'irradiation d'électrons soit utilisé pour expliquer le

procédé de la présente invention, ce moyen n'est donné qu'à titre purement illustratif et non limitatif. D'autres moyens classiques d'irradiation, (par exemple un moyen d'irradiation de protons) peuvent être envisagés et, en fait, le cadre de

5 la présente invention comprend n'importe quel moyen permettant de modifier la durée de vie des porteurs dans le transistor à semi-conducteurs, par exemple un dopage par de l'or.

REVENDICATIONS

1. Procédé pour fabriquer des transistors dont les paramètres électriques ont été modifiés par rapport à ceux des transistors initiaux, ce procédé étant caractérisé par le fait qu'il consiste :

à déterminer un dosage de radiation électronique dans un premier lot d'essai des transistors pour satisfaire des caractéristiques données de gain et de temps de stockage de charges par la mesure d'au moins une caractéristique des transistors du premier lot;

à positionner une surface d'au moins un des dispositifs semi-conducteurs d'un second lot de transistors initiaux en vue d'une exposition à la radiation; et

à irradier le dispositif semi-conducteur précité ou chaque dispositif semi-conducteur dudit second lot avec des électrons se trouvant au niveau d'énergie de radiation déterminé pendant la phase de détermination.

2. Procédé suivant la revendication 1, caractérisé par le fait que la détermination du niveau d'énergie comprend la mesure du gain et du temps de stockage de charges des transistors irradiés dudit premier lot d'essai.

3. Procédé suivant les revendications 1 ou 2, caractérisé par le fait que l'on détermine la radiation en établissant le gain limité utile ou de rendement d'émetteur, la largeur de la base induite par le courant, la durée de vie avant irradiation, le coefficient d'endommagement de la radiation et le coefficient de diffusion des porteurs majoritaires aux hauts niveaux dans le collecteur, en divisant le gain limité utile ou de rendement d'émetteur par 1 plus une première quantité égale au quotient entre, d'une part, la largeur de base multipliée par le gain limité multiplié par une seconde quantité égale à 1 plus la durée de vie avant irradiation multipliée par le coefficient d'endommagement de la radiation multiplié par la densité de flux d'électrons, et d'autre part, quatre fois le coefficient de diffusion des porteurs majoritaires multiplié par la durée de vie avant irradiation.

4. Procédé suivant l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé par le fait que le temps de stockage

de charges est déterminé par la durée de vie avant irradiation divisée par une troisième quantité égale à 1 plus la durée de vie multipliée par le coefficient d'endommagement de la radiation multiplié par la densité de flux d'électrons, ladite

5 troisième quantité étant multipliée par le logarithme naturel d'une quatrième quantité égale au quotient entre une cinquième et une sixième quantité, ladite cinquième quantité comprenant une septième quantité égale à 1 plus la concentration en porteurs excédentaires à la saturation multipliée par la largeur

10 de la région de collecteurs multipliée par le quotient de la superficie de la base métallurgique divisée par la superficie d'émetteur métallurgique, cette septième quantité étant multipliée par 1 plus le produit de la durée de vie avant irradiation par le coefficient d'endommagement de la radiation et la

15 densité de flux d'électrons, ladite sixième quantité comprenant une huitième quantité égale au quotient d'un courant de collecteur donné multiplié par la largeur du collecteur porté au carré divisé par quatre fois la charge d'électrons multipliée par le coefficient de diffusion de porteurs majoritaires aux

20 hauts niveaux dans le collecteur multiplié par la superficie de l'émetteur métallurgique, le quotient venant d'être mentionné étant multiplié par 1 plus le produit de la durée de vie avant irradiation et par le coefficient d'endommagement de la radiation ainsi que par la densité de flux d'électrons, ladite

25 sixième quantité comprenant, en outre, ladite huitième quantité plus le produit du courant de base inverse par la durée de vie avant irradiation divisée par la charge d'électrons multipliée par la superficie d'émetteur métallurgique.

1/7

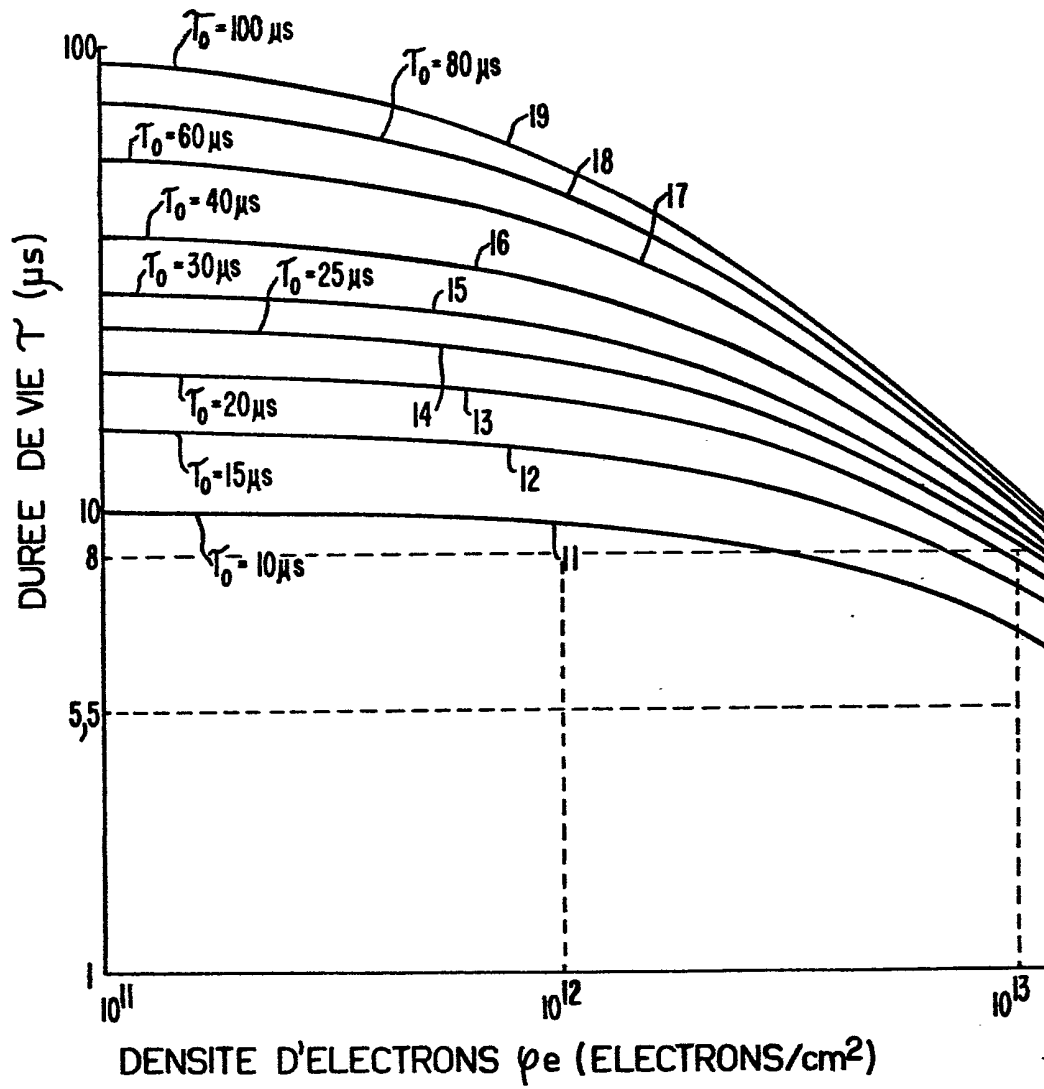
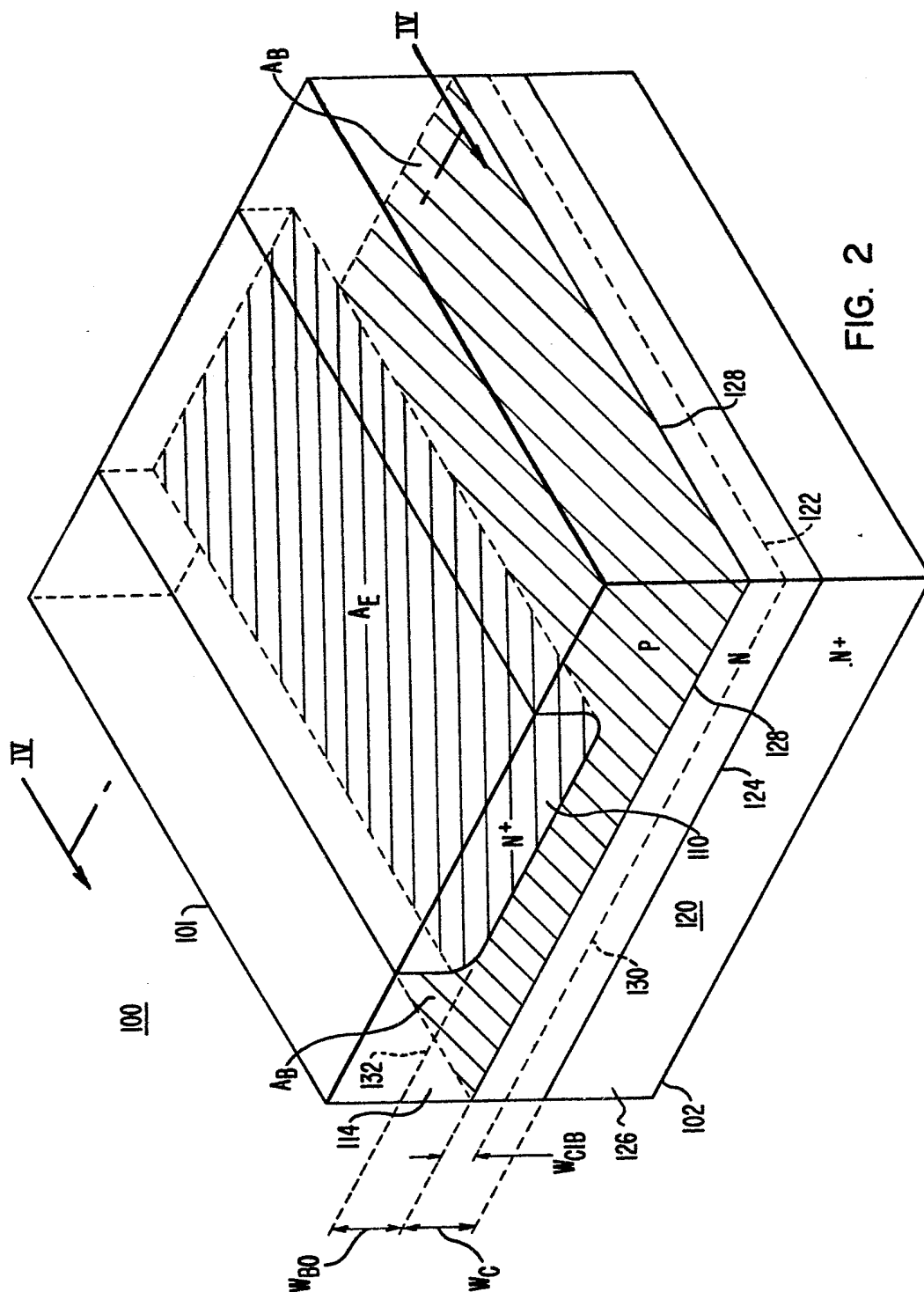
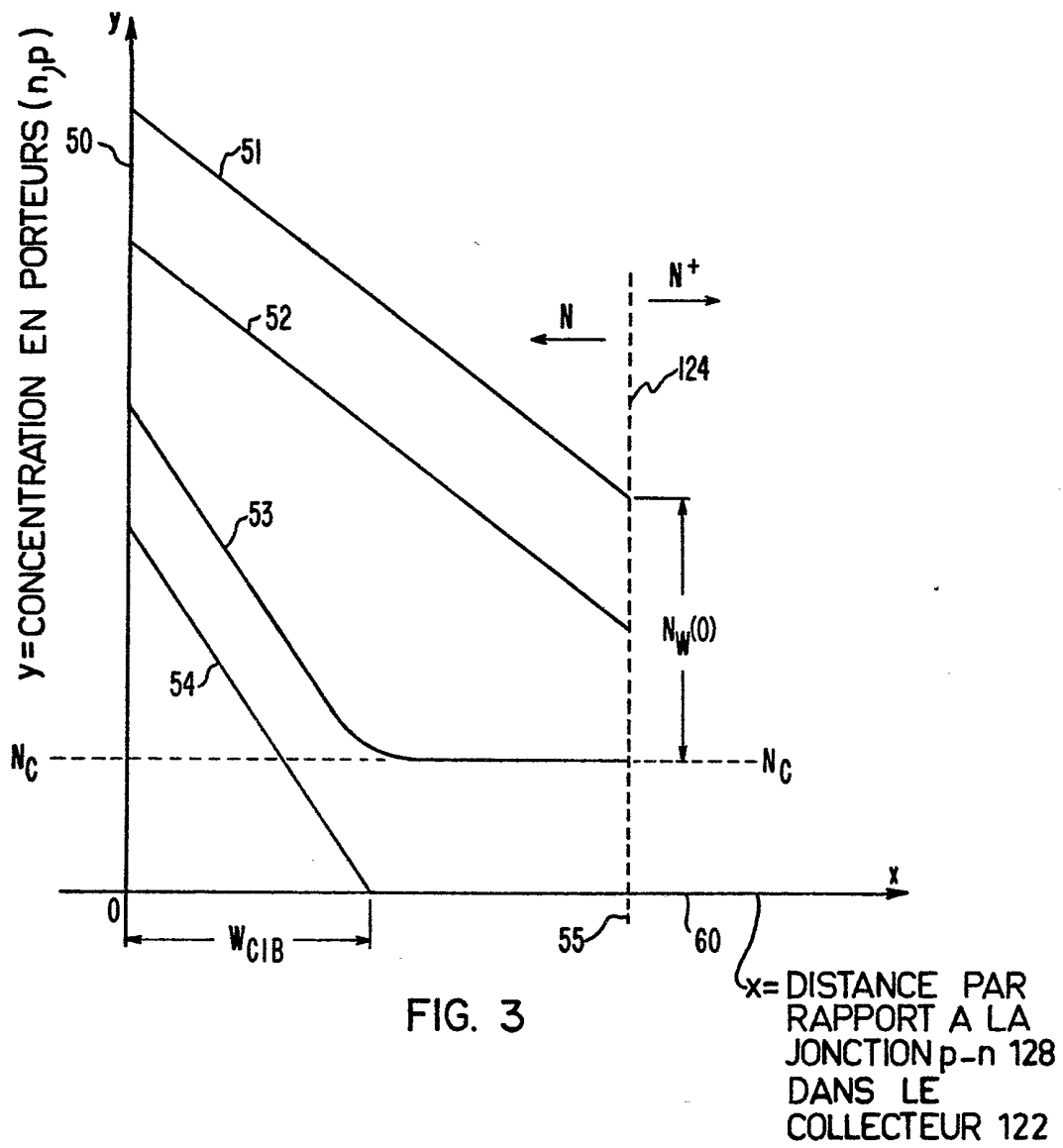


FIG. 1



3/7



4/7

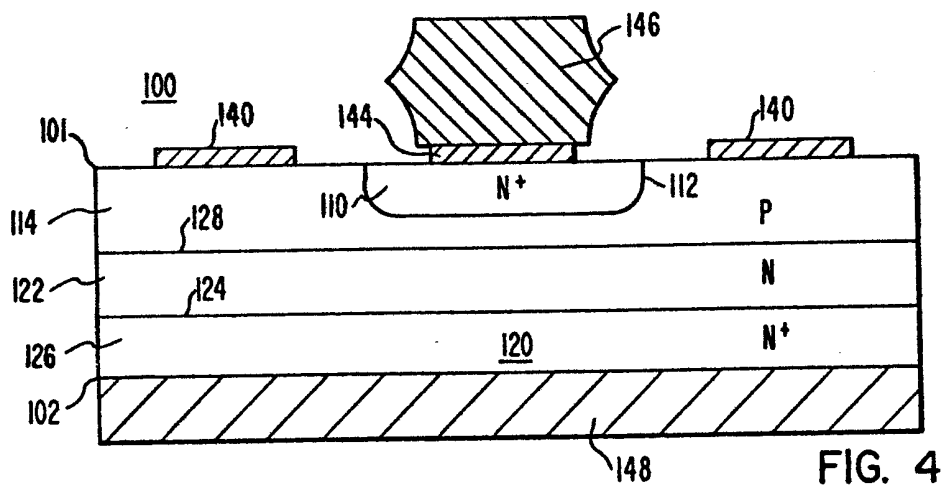


FIG. 4

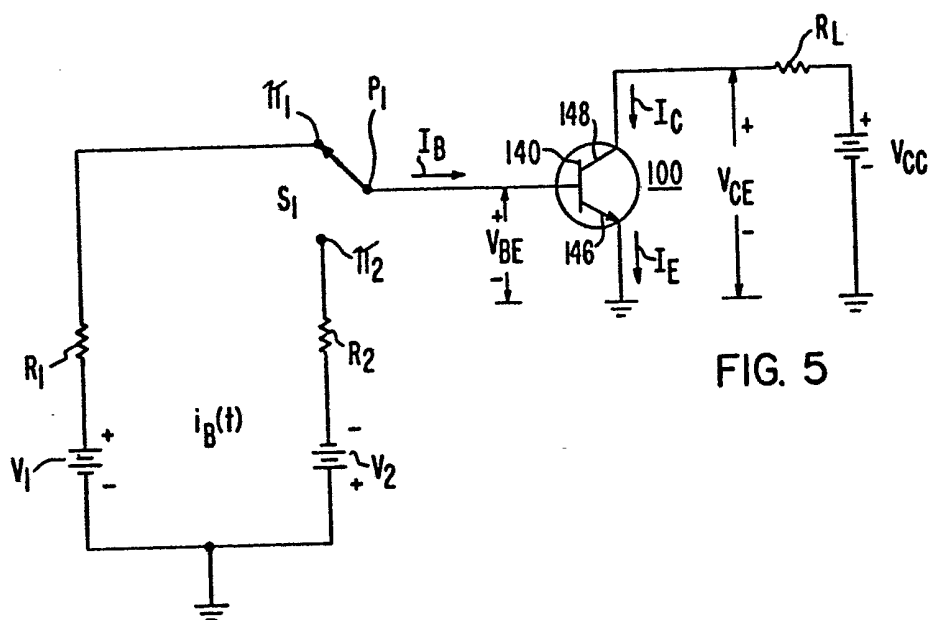


FIG. 5

6/7

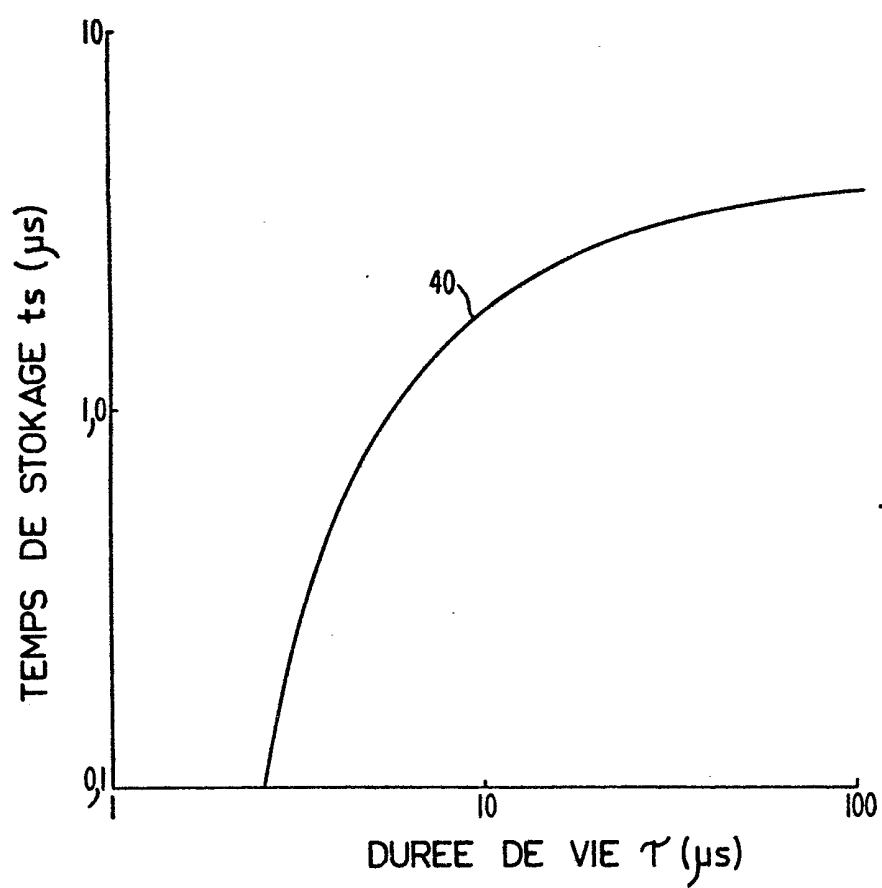


FIG. 8

7/7

