

mise au point sur les — TRANSISTORS L'EFFET DE CHAMP et ses applications

LA technique moderne, grâce aux spectaculaires réussites des technologies, laisse par omission supposer qu'elle a découvert, récemment, tout ce dont elle exploite les propriétés. Lorsqu'on feuillette des catalogues, l'illusion naît de la dernière nouveauté, du « **nec plus ultra** » de l'invention... Pourtant, sans sombrer dans le pessimisme d'« il n'y a rien de nouveau sous le soleil », il faut bien reconnaître que les **utilités d'aujourd'hui** ne sont que les **conclusions de travaux scientifiques bien antérieurs...** ce qui justifie, à nos yeux, l'entretien (onéreux) de la recherche (désintéressée), dite avancée, ou de pointe, poursuivie par des hommes passionnés (dont les salaires ne sont pas la principale cause de réjouissance!).

Ce retour au passé (qui, à l'affirmation : « Il y a plus de savants existant depuis ces dix dernières années, qu'il y en eut depuis la préhistoire », rétorque par une boutade : « Oui, mais heureusement que les premiers ont été là puisque nous leur devons tout »), ce retour au passé, donc, se justifie pour notre propos, car l'« effet de champ » qui procure de beaux jours des fabricants de transistors est « une vieille invention » de la première moitié du XX^e siècle, due génie de Lilienfeld (1928), qui mit, ainsi, en évidence, l'**action de l'électricité sur... l'électricité (1)**.

Nous allons, donc, étudier ce phénomène, aussi nous faudra-t-il d'abord le présenter, puis déterminer la manière employée pour le réaliser à moindre coût et enfin produire le panorama de ses applications pratiques.

1. DÉFINITION DE L'EFFET DE CHAMP

1. Théorie élémentaire.

Fidèle au principe pédagogique auquel nous nous sommes conformés dans cette série d'articles, nous ne progresserons, ici, encore, que pas à pas.

Dans l'appellation « effet de champ », deux termes sont à connaître : « effet » et « champ », avant de bien comprendre ce qu'ils signifient lorsqu'on les accole.

En physique, on nomme « effet », la **conséquence** d'une action spécifique (dite **cause** ou **raison**). L'effet est mesuré à l'aide d'équipements plus ou moins perfectionnés (ne pas écrire « sophistiqués », ce mot ayant en Français le sens de « précieux », de « snob »...). Il est, à la fois, une **réponse particulière** à une **stimulation donnée**, tout autant qu'une **excitation modulante**, à son tour, tel autre phénomène, au **rythme de ses propres variations**.

Lorsque, dans une **portion de l'espace**, règnent des **forces électriques**, opérant toutes sortes d'influences sur des **charges fixes et mobiles**, qui y sont insérées, ou y circulent librement, il se crée un **champ (2)**, rapport entre une **tension et une distance**, ce qui s'exprime (unités pratiques) en [V/cm]. Si une particule, de charge q , se trouve sous la dépendance d'un champ électrique E , la force F (qui s'applique sur elle) est égale à $(q.E)$, en unités C.G.S. (e.s.). Si le corpuscule est immobile à l'origine, le chemin l qu'il parcourt dans le vide pendant le temps t , après animation, s'établit

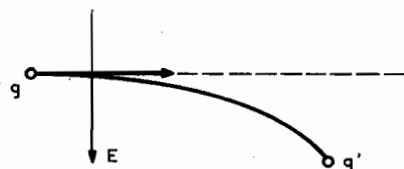


Fig. 1.1 - Trajectoire d'une particule électrique modifiée par un champ électrique E qui est perpendiculaire au trajet initial.

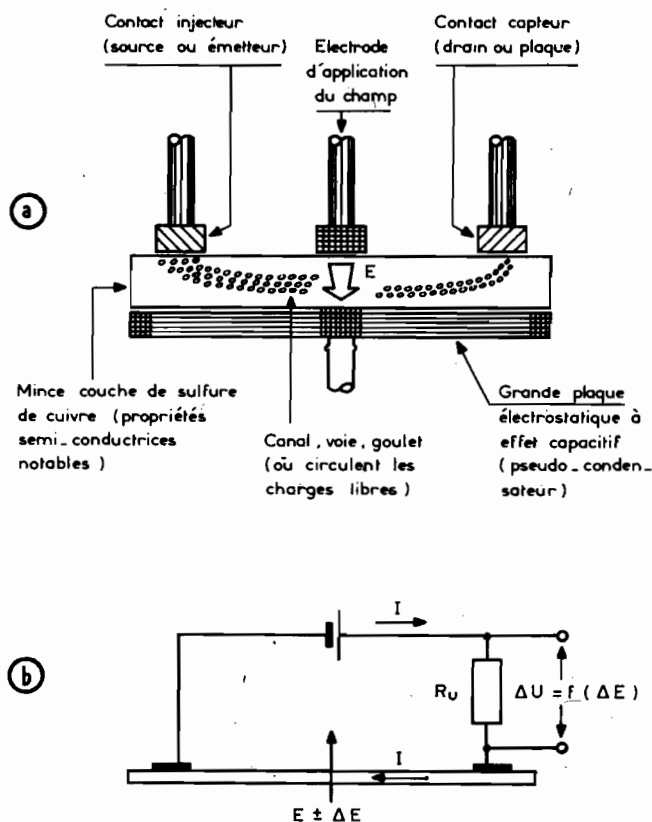


Fig. 1.2 - Disposition des électrodes sur une lamelle de sulfure de cuivre pour mettre en évidence l'effet de champ (a); principe de la découverte de ce processus par Lilienfeld (b).

à partir de la formule :

$$l = \frac{1}{2} \cdot t^2$$

$$= \frac{1}{2} \frac{F}{m_e} \cdot t^2 = \frac{1}{2} \frac{q \cdot E}{m_e} \cdot t^2$$

avec m_e , masse réelle du corpuscule, animé d'une vitesse v . Si la particule possède une vitesse initiale v_0 , de direction perpendiculaire (dans les ouvrages savants, on écrit pour montrer que l'on a des lettres « orthogonale »... mais cela ne change rien à l'affaire!) le mouvement résulte

tant (conjonction des deux actions, de E et de v_0) es: d'allure **parabolique** (Fig. 1-1).

Le rapport q/m_e de la charge électrique élémentaire q (égale à $1,6 \times 10^{-19}$ coulomb [Cb]) à la masse du corpuscule m_e considéré (pour un électron, pour un trou, $m_e = 9,1 \times 10^{-31}$ kilogramme, [kg]) vaut $1,76 \times 10^{11}$ [Cb/kg].

L'« effet de champ » se traduit par la **modulation qu'impose un champ électrique perpendiculaire à un faisceau d'électrons**, (ou de trous) émanant d'une « source » et capté par un

« drain », passant dans un **canal** (ou **voie de transfert**) sur lequel E agit. Si E est périodique, (alternatif, ou pulsé) le **pinceau électronique**, émergeant au drain, reproduit fidèlement ses variations (y compris les fluctuations perturbatrices, surtout si elles découlent de la présence du champ E).

La figure 1-2 reprend le dispositif qui permit à Lilienfeld la découverte de ce phénomène.

Le **champ électronique**, en agissant sur les porteurs, qui constituent le courant I , a fait varier la **résistance du substrat semi-conducteur**. On dira qu'il joue sur la **mobilité μ** des charges

libres et que la **conductivité σ** (inverse de la **résistivité ρ** du matériau) s'en ressent.

Dans tout **semi-conducteur N**, (voir fig. (1-3) on trouve en allant de l'extérieur vers l'intérieur, **trois régions** qui, du point de vue électrique, sont **très différentes** :

— **La surface (1)** (ou, plus précisément, la **pellicule superficielle**, de faible épaisseur) est fortement négative, parce que chargée par des électrons fixés aux atomes superficiels (très actifs à la suite des traitements technologiques suivis)* ; ces électrons ont émigré hors de la **zone sous-surface** dite :

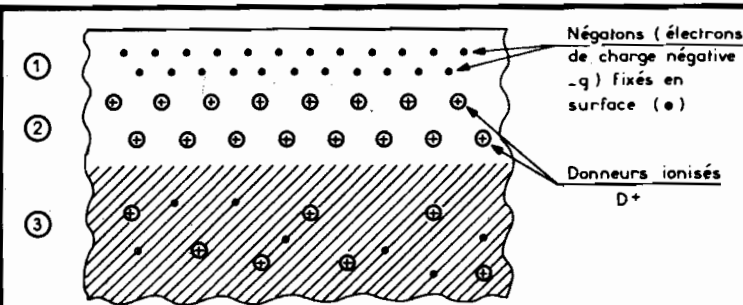


Fig. 1.3 - Coupe dans un semi-conducteur de type N (donneurs ionisés D^+) au voisinage de la surface du matériau.

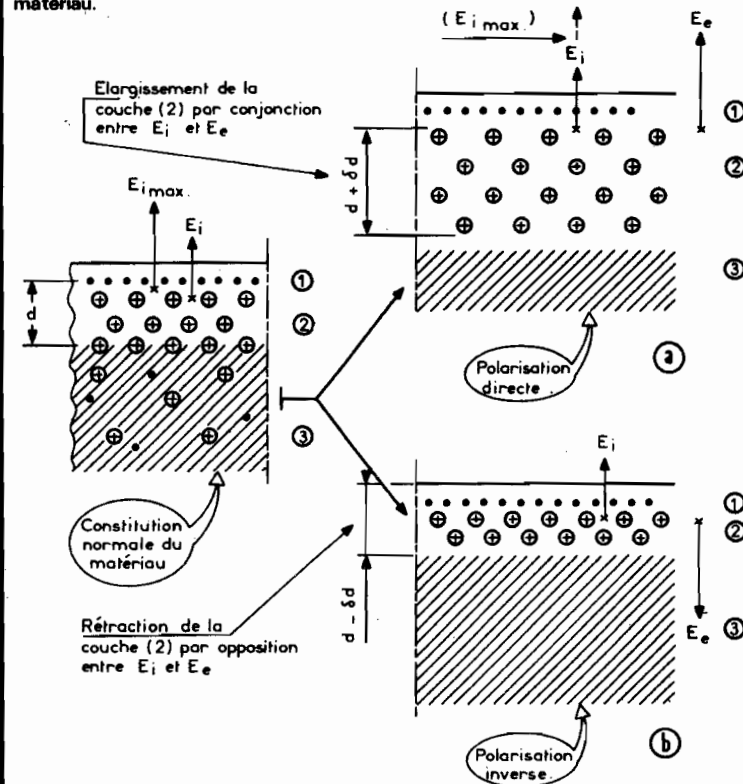


Fig. 1.4 - Action du sens du champ électrique dû à une tension extérieure appliquée au volume du matériau ; bien observer qu'à l'état normal (semi-conducteur extrinsèque) il existe un champ électrique interne à ceux des forces de valence et coulombiennes qui existent dans le substrat (a) ; élargissement de la zone neutre (2) quand le champ surajouté E_e possède le même sens que le champ interne E_i (b) ; raccourcissement de la région (2) lorsque E_e et E_i se contraignent (c) ; il s'ensuit qu'un champ basculant du côté positif au côté négatif module la largeur de (2) d'où des variations de résistance.

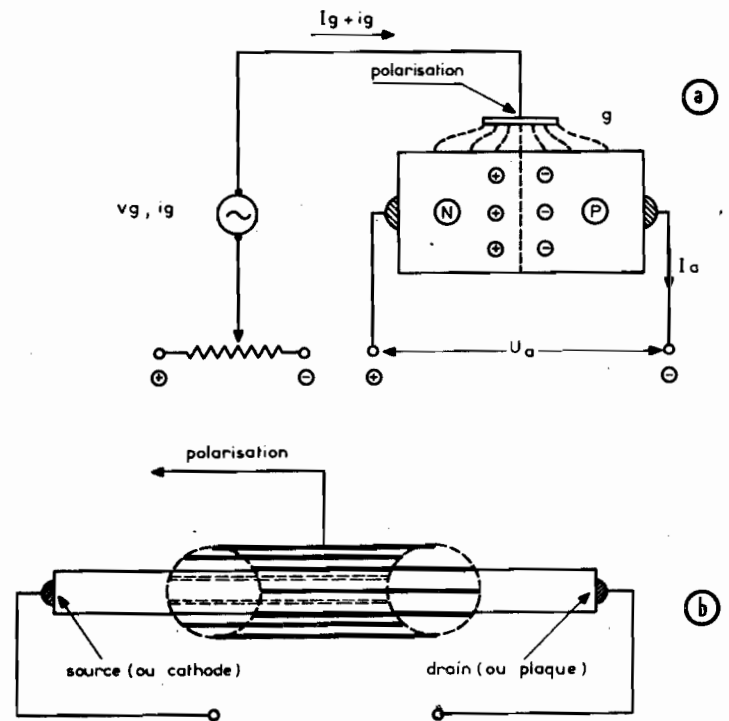


Fig. 1.5 - Influence d'une électrode extérieure g sur une jonction diode PN (unipolaire) par variation de champ électrique (a) ; disposition de la porte excitative sous forme d'une « cage d'écureuil » (b).

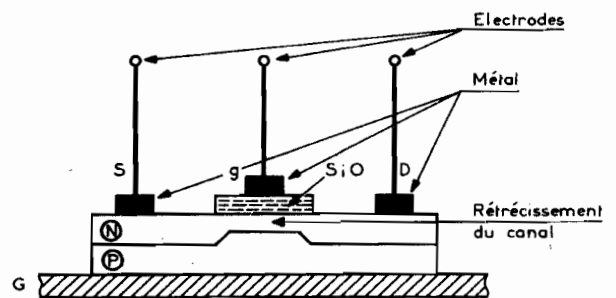


Fig. 1.6 - Réalisation d'un transistor (T) à effet (E) de champ (C) (ou FET : field effect transistor) avec diélectrique (dioxyde de silicium SiO_2) intercalé entre la porte (ou grille) et le substrat semi-conducteur N ; observer la réduction de la zone N sous l'électrode de commande g (rétrécissement du « canal » ou voie de passage obligée des électrons injectés en S, source et récupérés au drain D) ; il s'ensuit une meilleure répartition des charges mobiles, avec diminution du bruit en $1/f$ (dit de « flicker ») ou de scintillation basse-fréquence).

— **Région de charge d'espace positive** (2), qui doit cet état aux ions donneurs (D^+) abandonnés par des porteurs, piégés dans la couche superficielle précédente ;
 — **Région neutre** (3) ; nous revenons là au matériau semi-conducteur classique (ici de type N), doté de **donneurs excités** mais accompagnés d'autant de **négatons libres** à l'entour (nuage électronique de Drude), avec **quelques trous mobiles** (en petite quantité, d'où leur nom de « porteurs minoritaires »).

Pratiquement, il y a **passage progressif** de la région de charge d'espace (2) à la région neutre (3). La façon dont cette **transition** (douce, ou abrupte) est opérée, en fabrication, correspond à ce qu'il est convenu de nommer un **profil technologique** (qui dépend des procédés retenus : diffusion des produits, épitaxie, ou croissance orientée par apport continu de corps réactifs, etc.) (4). Nous nous sommes intéressés dans les lignes ci-dessus à un **semi-conducteur extrinsèque** (puisque dopé avec des donneurs positifs) **du type N** (à comportement négatif, les porteurs majoritaires étant des négatons, ou électrons négatifs). Dans le cas d'un **substrat de type O**, il faut changer les signes des charges, par rapport à ceux représentés sur la figure 1-3. (5) et introduire des accepteurs $A^{(-)}$ aux lieux et places des donneurs $D^{(+)}$.

Seule la **région neutre** (3) est **conductrice**. Comme la surface (1) (charges immobiles) et la région positive (2) se trouvent dépourvues de porteurs libres, elles sont « **isolantes** » (propriétés diélectriques). Les porteurs, qui proviennent de la région neutre (3), et qui tentent de pénétrer dans la zone de charge spatiale (2) sont **violemment refoulés** par le champ électrique interne E_2 , dû à l'existence de la double couche électrique des donneurs et des électrons superficiels. La surface (1) et la région positive (2) constituent, par conséquent, une **couche de barrage**, ou **colline de potentiel**, à l'intérieur de laquelle il y a disparition, ou **appauvrissement** de charges mobiles (on dit qu'il y a « **déplétion** »... toutefois, ne perdons jamais de vue que des électrons demeurent en faible proportion dans (2) par suite d'effets physiques, parasites, de

* Ceci explique la nécessité des procédés de « passivation » c'est-à-dire de « désactivation maximale » des surfaces.

« dégradation », de « tunnel », etc.) (6).

Le champ électronique interne E_2 est perpendiculaire (les « matheux » disent « normal ») à la surface du semi-conducteur. Si on lui superpose un champ d'origine externe E_e , l'épaisseur de la **couche de barrage** d varie en fonction du sens d'application de E_e :

- d augmente (élargissement) si E_e est de même orientation que E_1 (fig. 1-4a) ;
- d diminue (constriction) si E_e s'oppose à E_1 (fig. 1-4b).

Ainsi, la largeur de la région conductrice (zone neutre 3) varie comme (2), avec le **champ appliqué**, d'où la **modulation de la conductance** du semi-conducteur, parcouru par une intensité parallèle à la tranche superficielle. Un champ extérieur E_e , continu, variable, périodique, impulsionnel, aléatoire, etc. reflète ses propres déformations sur le courant I, donc, le triture, au rythme de ses variations, qui peuvent, dès lors, se trouver amplifiées, ou amoindries, suivant l'importance de la contribution des corpuscules participant à l'établissement de l'intensité I.

Le champ appliqué E_e sert, en premier ressort, à charger les « états de surface », c'est-à-dire à **activer** les donneurs D^+ pour les contraindre à placer leurs électrons dans la couche (1) qui en est

avide (cas d'un substrat de type N). Il s'ensuit **qu'une fraction, seulement, de la charge induite entraîne la variation de conductance** ($\delta\sigma$).

L'équation générale du fonctionnement, sans entrer dans le détail mathématique des fonctions f_1 et f_2 (voir ci-dessous) s'exprime, en tenant compte des paramètres définis dans les lignes précédentes :

$$\sigma \pm \delta\sigma = f_1 \left(\frac{d \pm \delta d}{f_2(E_i, E_e, I)} \right)$$

δd , $\delta\sigma$, représentent de petites variations finies (mesurables) de l'épaisseur d de la région (2) et de la conductivité σ du matériau. On pourrait parler d'un effet de modulation de section (section offerte au passage du courant I, évidemment).

1.2 - REALISATIONS

Les Américains Shockley, Dacey, Ross, Stuetzer, les Français Grosvalet, Martin, Tetzner présentèrent, à la suite de divers calculs théoriques, des réalisations dont les noms sont bien connus des initiés. En premier lieu, la littérature traite du « **fiel-distorsion** » (field : champ en anglais) selon un montage reproduit figure 1.5 a et b. La **base B** des transistors tripolaires classiques y a été supprimée. Une électrode de

commande g , à **effet capacitif**, lui a été substituée (fig. 1.5a). On l'appelle grille (g , ou gate : porte dans la langue de Shakespeare) (7). Primitivement, cette grille avait été montée en « cage d'écureuil », entourant le barreau semi-conducteur en son milieu (fig. 1.5b). On devine le côté pratique de la chose... et sa fragilité. Le « **statistor** » (fig. 1.6) glissa sous la mince lamelle métallique g , une **pellicule de silice** SiO_2 (oxyde de silicium), fabricant de la sorte un « **condensateur MOS** » (métal - oxyde - semi-conducteur) qui est, **incontestablement**, à l'origine des technologies actuelles des « **MOS-FET** » (métal - oxyde - semi-conducteur/field effect transistor) mais aussi des structures « **MIS** » (métal - insulator - semi-conducteur) qui sont d'une grande utilité pour des emplois aussi variés qu'étendus (et qui ne cessent de s'accroître) bien qu'en micro-ondes le **produit gain x bande passante** de ces dispositifs reste inférieur à celui des transistors bipolaires. Le **tecnétron**, configuration cylindrique (fig. 1.7a) recommandée par Tetzner, est un **barreau semi-conducteur à section circulaire** qui tire le maximum de l'effet de champ par rapport à la disposition laminaire (fig. 1.7b). Quant à l'**alcatron** (fig. 1.7c) il fut étudié par le regretté professeur Grosvalet et son équipe de brillants chercheurs

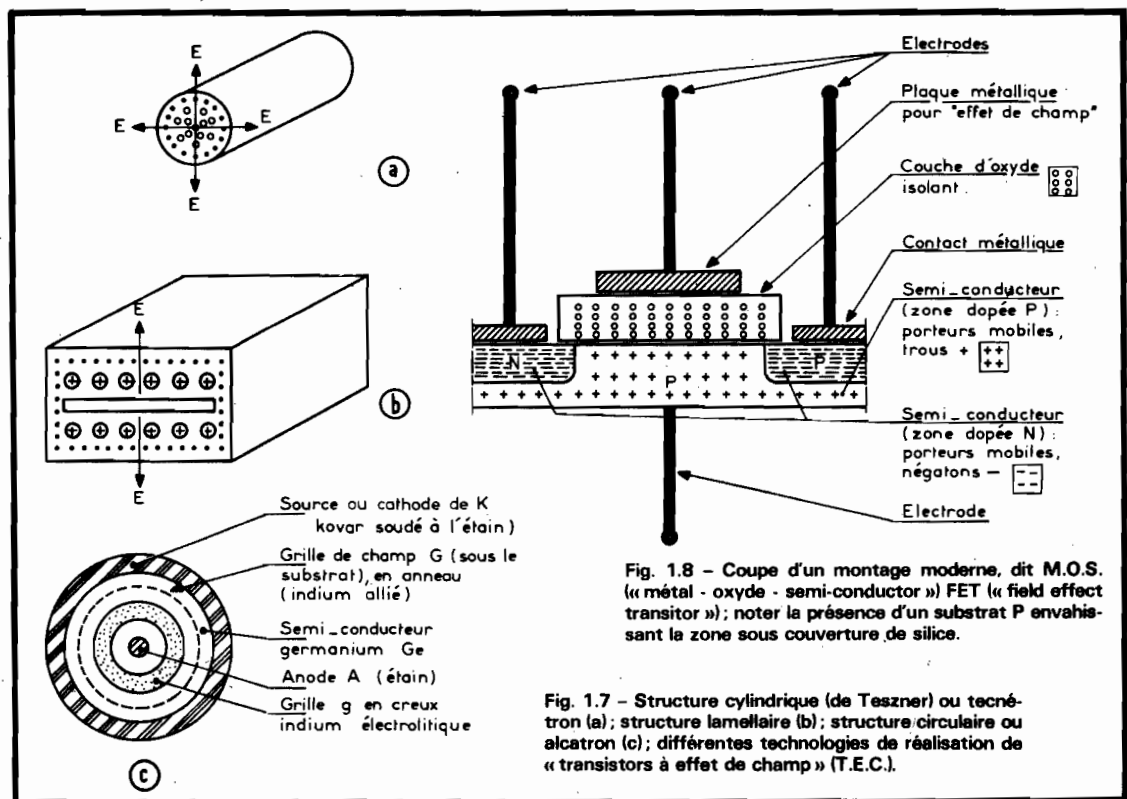


Fig. 1.8 - Coupe d'un montage moderne, dit M.O.S. (« métal - oxyde - semi-conducteur ») FET (« field effect transistor ») ; noter la présence d'un substrat P envahissant la zone sous couverture de silice.

Fig. 1.7 - Structure cylindrique (de Tetzner) ou tecnétron (a) ; structure laminaire (b) ; structure circulaire ou alcatron (c) ; différentes technologies de réalisation de « transistors à effet de champ » (T.E.C.).

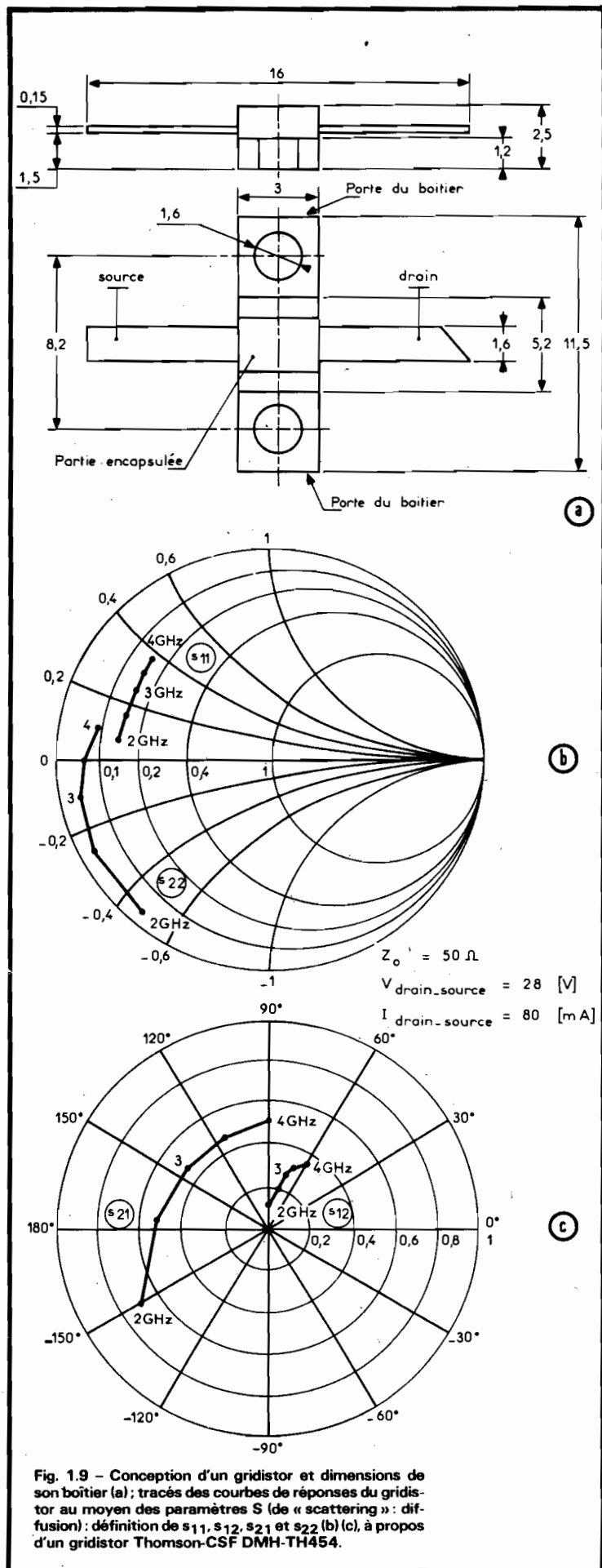


Fig. 1.9 - Conception d'un gridistor et dimensions de son boîtier (a); tracés des courbes de réponses du gridistor au moyen des paramètres S (de « scattering »: diffusion): définition de s_{11} , s_{12} , s_{21} et s_{22} (b) (c), à propos d'un gridistor Thomson-CSF DMH-TH454.

(Tribes, Motsch) du Centre de Recherches physico-chimiques de la C.S.F.

Les « MOS-FET's » (que les Français devraient traduire par « T.E.C.-S.O.M. »: « Transistors à effet de champ dans un semi-conducteur passivé par un oxyde sous métal » comme celui dessiné figure 1.8, ont permis de mieux connaître les surfaces passivées par des couches non-conductrices épaisses. Le potentiel de surface est rendu variable dans la **région d'inversion** (région (1) surchargée en particules négatives formant alors une « surpopulation » locale, selon la langue des statisticiens, c'est-à-dire que les porteurs y sont en surnombre) au moyen d'une tension externe V_g . La conductivité, alors imputable aux **porteurs minoritaires** en excès (dans la zone de déplétion - 2) est mesurée comme une fonction F_2 du champ E_c conséquence de V_g .

Comme il existe des centres chargés dans la couche isolante (insulator) d'oxyde (diélectrique), la tension appliquée, nécessaire, pour procurer une conductance donnée, diffère des valeurs théoriques (calculs de Shockley, Dacey, Ross, avec corrections de Grosvalet, Tribes, Lemée). En se servant d'une **injection spectrale** (un signal d'amplitudes variées avec un grand étalement de fréquences, du continu aux H.F., voire aux VHF) comme paramètre additionnel, des taux de relaxation pour différents processus de charge, peuvent être déterminés et on précise ainsi la notion de **durée de vie** (des centres fixes et des porteurs).

Le gridistor (8) (Teszner-G-Ricquel), comme celui de la figure 1.9(a,b,c) combine les avantages de l'effet de champ et de l'injection de porteurs minoritaires (sous polarisation inverse). Le principe maintenu est celui du « **fieldtron (9) à striction** (resserrement) **centripète** (vers l'axe médium) mais les structures retenues sont toujours à multicanaux soit, disposés en « brosse » (fig. 1.10a) soit, distribués en « peigne » (fig. 1.10b). Des masques à réseaux carré ou circulaire sont employés dans le premier cas. Des masques à créneaux « à la grecque » servent aux évaporations et à la diffusion des contacts dans le second système (fig. 1.11).

Certains montages récents utilisent une couche protectrice de nitrure de silicium (Si_3N_4) qui empêche diverses oxydations thermiques du silicium, grâce à son inertie envers l'oxygène

(1 000 [A] de nitrure suffisent pour garantir 10 heures de chauffage des pièces à 1.150°). La méthode de Morandi (physicien italien) est expliquée par les figures 1.12a et suivantes.

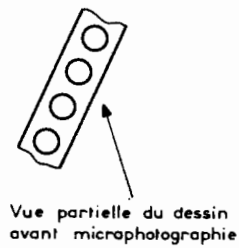
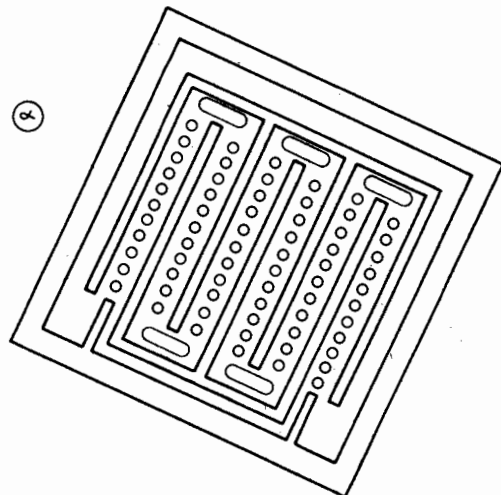
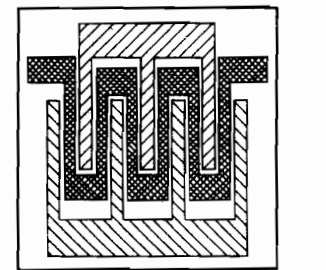
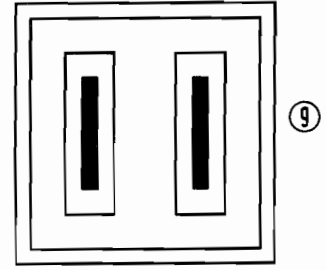
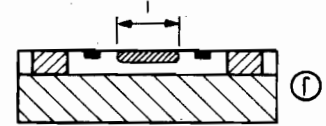
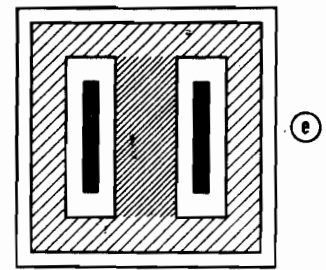
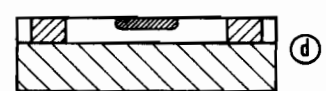
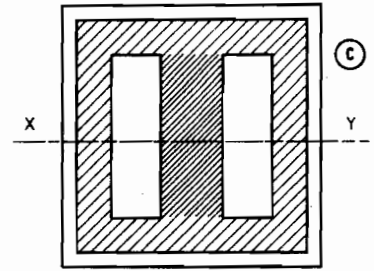
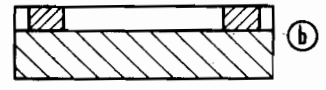
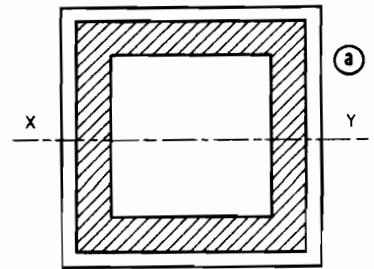
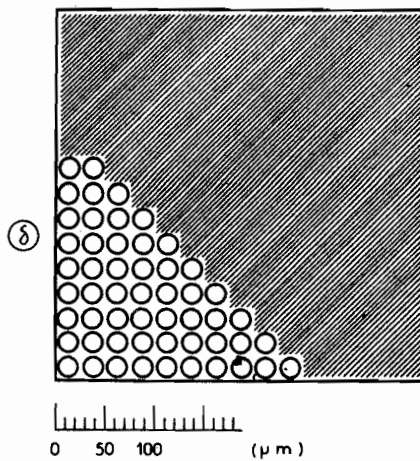
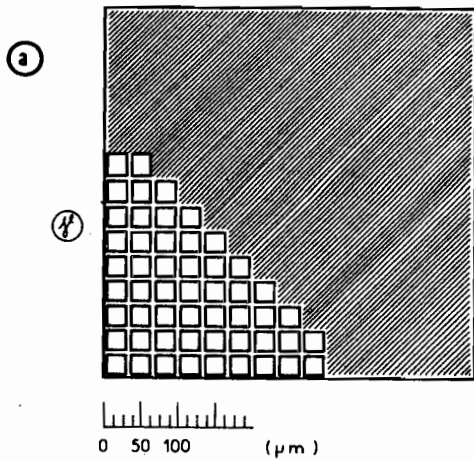
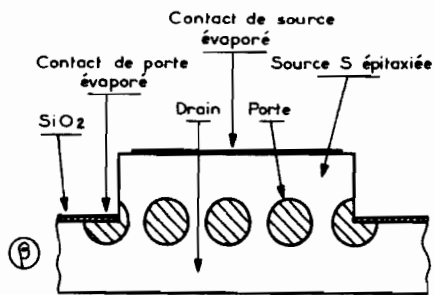
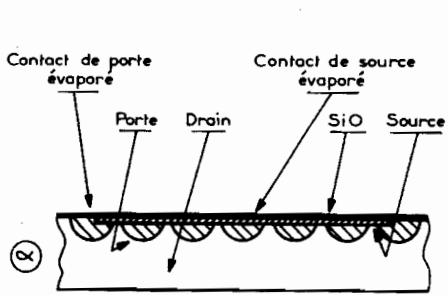
Maintes autres technologies peuvent prétendre au succès. Il en est deux qui sont particulièrement répandues, à savoir, la méthode S.O.S. et la méthode L.O.C.O.S., toutes deux rattachées à la structure M.O.S.-F.E.T.

La première introduit un substrat particulièrement isolant, le saphir (S.O.S. signifie « Silicon On Sapphire »: silicium sur saphir) pour pallier les inconvénients du semi-conducteur substrat (pour plus de développements se reporter au cours sur les circuits intégrés de l'I.T.P.); on trouve, dans cette famille (dont nous parlerons encore dans la suite de cet article) des C-MOS/SOS, où l'on voit figurer des T.E.C. complémentaires, les uns à canaux N, les autres à canaux P, travaillant à 2 nanosecondes [ns] ou 10^{-9} [s], à une puissance de 30 à 50 [mW] dans les réalisations en cours d'étude.

La seconde retient toujours cette notion de complémentarité mais l'isolement entre les différents circuits intégrés relève du procédé LOCOS (R.T.C.) qui décrit une oxydation très localisée mais profonde dans les mailles du semi-conducteur support, avec traitement de nitrure selon le principe qui vient d'être rémemoré. Nous y reviendrons plus tard.

1.3 - RESUME DU PARAGRAPHE 1

Les transistors à effet de champ (T.E.C., voir J.-P. Cémichen, en bibliographie) appartiennent à la famille des dispositifs à une seule jonction, ou monopolaire, sans être pour autant des Unijonctions, (U.J.T. en anglais). Ces composants sont des... diodes à deux contacts de base (généralement nommés B_1 et B_2) purement ohmiques (sans effet capacitif ni inductif) avec injection de porteurs mobiles (négatifs ou trous) par un émetteur E. La conductance n'y est pas modulée comme dans les T.E.C., en revanche, ils offrent une **caractéristique de transfert $I = f(V)$ à résistance dynamique négative** (qui se manifeste par un surcroît d'énergie,



(b)

(c)

(d)

Fig. 1.10

Fig. 1.11

(h)

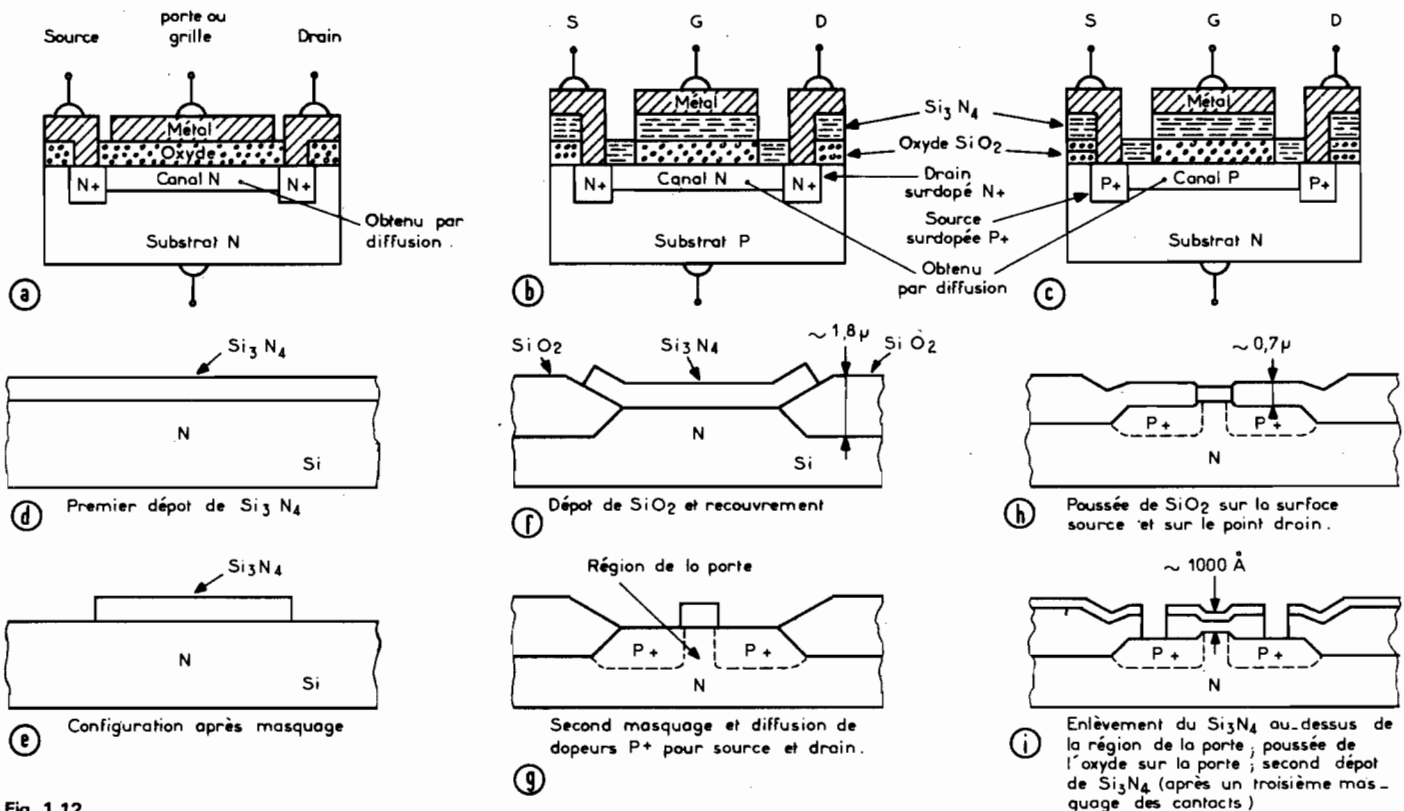


Fig. 1.12

Fig. 1.10 - Section transversale d'une « structure en brosse » (« brush ») intégrée par la méthode de la double diffusion (α - a); section transversale d'une « structure en brosse » obtenue par déposition épitaxiale (β - a), c'est-à-dire par apport, en surface, de matériau complémentaire (transport gazeux); deux types de masques pour oxydation destinés à la confection d'une « structure en brosse », avec des mailles carrées (γ - a) et des mailles circulaires (δ - a); les dimensions des échelles sont fixées en micromètres (μm) ou microns; structure d'un gridistor obtenu par la technologie dite du « peigne » (« comb ») avec intégration dense de composants actifs (z - b); masques, actuellement, employés pour assurer ce type de fabrication, pour la diffusion de la grille du T.E.C. (β - b) et pour la diffusion des contacts de source et de drain (γ - b); les ingrédients apportés se déposent et pénètrent sur toutes les zones non protégées par les masques.

Fig. 1.11 - Méthode de construction d'un T.E.C., selon J.-P. Œmichen (voir biblio.).

- La première étape de réalisation d'un T.E.C. est la diffusion profonde, dans la zone épitaxiale N (en blanc) qui surmonte un substrat de type P (en gris), d'un « caisson d'isolement », sorte de cadre de type P+ (en gris foncé) qui traverse entièrement la zone N et rejoint le substrat P. En (a) la vue de dessus de la plaquette; en (b) la coupe suivant x-y.

- La seconde étape de réalisation d'un T.E.C. consiste à

diffuser une zone P, moins profonde, qui rejoint le caisson d'isolement, mais ne traverse pas la zone N, laissant subsister le canal.

En (c), vue de dessus; en (d), vue latérale en coupe. - La dernière diffusion à réaliser pour obtenir le T.E.C. est celle de deux zones N+ (en noir), qui permettront d'établir les contacts de drain et de source (e).

Aspect final du produit :

- Vue en coupe (f) et de dessus (g) de la structure d'un T.E.C. à jonction. Les zones foncées sont deux zones diffusées N+ servant à réaliser les contacts sur les extrémités du « canal » (zone N, claire, comprise entre le substrat de type P et la barre diffusée supérieure, de type P). Ces deux contacts s'appellent la « source » et le « drain » (leur rôle est symétrique) et la barre de type P, reliée au substrat P, s'appelle la « grille » du T.E.C. La cote 1 représente la longueur du canal.

Il convient cependant de noter une remarque (h) :

- Pour accroître la largeur du canal sans augmenter abusivement les dimensions de la plaquette de silicium sur laquelle est réalisé le T.E.C. un bon moyen consiste à réaliser une zone de grille en forme de grecoque, serpentant entre les zones N+ de source et de drain (en hachures plus légères), qui ont la forme de peignes « interdigités » (dont les « doigts » entrent les uns dans les autres).

Nous retrouvons ici la préoccupation soulevée par le masquage (cf fig. 10-a et b).

Fig. 1.12 - Dans la simple structure à couche d'oxyde intercalée entre grille et canal des T.E.C. (a) il reste des zones non protégées contre des agents polluants du diélectrique, aussi utilise-t-on, pour pallier cet inconvénient et améliorer les caractéristiques de l'ensemble, une technique supplémentaire dite de nitruration (nitru de silicium Si_3N_4) déterminée par le physicien italien Morandi tant pour les substrats extrinsèques P (dopés d'accepteurs), schéma (b), que pour les substrats extrinsèques N (dopés de donneurs), schéma (c); le processus technologique ainsi suggéré a été appelé « Planox » dans la littérature (« planar » + « oxydation ») associant au procédé « mesa » des transistors (diffusion et érosion) le système M.O.S., mais de surcroît, au prime abord, ici, le matériau semi-conducteur extrinsèque, par exemple du silicium N est recouvert de nitru de silicium (d), puis les aires retenues pour implanter les régions actives sont découpées à l'acide phosphorique (e); le silicium est alors déposé (f); une nouvelle élimination du nitru de silicium permet la diffusion des régions P+, réversibles, source et de drain (g); puis on protège la partie découpée (h) et l'opération s'achève par les classiques manipulations d'évaporation d'aluminium, de masquage et d'alliages intermétalliques pour favoriser de bons contacts ohmiques (sans effets inductifs, ni capacitifs).

comme dans le cas des diodes Esaki, dites « à effet tunnel »).

Les T.E.C. comprennent trois groupes qui seront disséqués au cours du paragraphe 2. Nous ne retiendrons, pour l'instant, que :

131 - Les transistors à effet de champ monopolaires, à jonction unique PN, où se rangent les technétrans, les alcatrons et diverses structures lamellaires...

132 - Les T.E.C. à grille isolée (G.I.) qui englobent les fieldistors

(ou fieldtrons), les statistors, puis les M.O.S. (métal - oxyde - semi-conducteurs), les M.I.S. (métal - insulated - semi-conductors), etc.

133 - Les T.E.C. complexes, qui comportent plus de trois électrodes (tétrodes, multi-odes...), qui sont à l'origine des dispositifs à grande échelle d'intégration (L.S.I.: large scale integration) (10); on les rencontre dans les mémoires mortes, programmables, à accès aléatoires, dans les

multiplexeurs, dans les microprocesseurs, etc., dont nous aurons à évoquer les spécificités plus tard.

B. MARIN

Bibliographie : J.-P. Œmichen : « Transistors à effet de champ » - éditions Radio.

H. Arciszewski : « Mesures sur les transistors » - collection Technique et Scientifique du CNET.

Cours I.T.P. d'Enseignement Programmé : « Les Circuits Intégrés » - Notes d'application Motorola, Texas, Sescosem, National Semi-Conductors, Fairchild.

APPENDICE I :

LE CHAMP ELECTRIQUE

Pour bien assimiler la notion de champ électrique, il convient de revenir aux lois de Coulomb. Les célèbres expériences de ce physicien, réalisées en 1785, à l'aide d'un dispositif qu'il avait inventé, la « balance de torsion », (fig. Ap. I.1) fondée sur ses idées quant à l'élasticité des corps, ont montré que les **charges électriques** (désormais exprimées par une unité métrologique qui porte son nom, le coulomb [Cb]) de **mêmes signes algébriques** (plus (+) - plus (+), moins (-) - moins (-)) se repoussent (répulsion mutuelle) tandis que les charges de signes contraires s'attirent (attraction mutuelle).

Appelons Q_1 [Cb] et Q_2 [Cb] deux charges électriques (liées à un support, dont un bras mobile porte l'une d'entre elles). Mettons

ces charges face à face, sans rien présumer de leurs natures positives ou négatives. Une certaine action (d'attraction ou de répulsion) s'exerce qui se traduit par une force F , telle que (voir fig. Ap. I.1, fig. Ap. I.2, fig. Ap. I.3) :

$$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \cdot \frac{r}{r}$$

La grandeur r , mesurée en mètres [m] est la distance séparant les charges en interaction soit au début de l'expérience ; les **lettres grasses F** et r caractérisent des **grandeurs vectorielles**, c'est-à-dire, affectées d'une **origine** (centre de coordonnées, au croisement des abscisses et des ordonnées d'un diagramme cartésien en Ox et en Oy, par exemple), d'une **direction** (ligne d'orientation) d'un **sens** (positif ou négatif, comme en algèbre des axes fléchés) et d'une **valeur métrique**, figurée par un nombre donné d'unités métrologiques ; r indique

donc la distance entre Q_1 et Q_2 par une flèche qui représente un vecteur dans l'espace libre où l'attraction (ou la répulsion) s'opère ; la constante k , extraite des tableaux des résultats de la manipulation, est, aujourd'hui, parfaitement définie : il s'agit de l'inverse du produit de la permittivité (« constante diélectrique ») ϵ_0 du vide par le nombre 4π d'où :

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

L'introduction du facteur 4π s'explique pour rationaliser (rendre cohérent) le système d'unités (Giorgi) dit M.K.S. (mètre, kilogramme, seconde) C (Coulomb, ou unité électrostatique de charge... alors qu'en électrodynamique nous trouverions l'ampère [A], intensité du courant) ; en effet, l'insertion de 4π , ici, soulage l'écriture des formules, usuellement, recontrées en pratique.

Nous aboutissons ainsi à une expression de la force F que nous écrivons :

$$F = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \times q_1 \times \frac{r}{r^3} \right) \cdot q_2 = q_2 \cdot E$$

afin de laisser ressortir une nouvelle grandeur vectorielle, le **champ électrique E** , établi en volts par mètre, [V]/[m]. Il apparaît, de la sorte, que le champ électrique résulte de la présence d'une charge, incluse dans chacun des points constituant un certain volume de l'espace sur lequel se trouve appliquée une différence de potentiel, en volts [V].

A propos de ϵ_0 , nous ajouterons, afin de faire œuvre de physicien, que :

$$\epsilon_0 = [8,854 \ 34 \pm \ 0,000 \ 06] \times 10^{-12}$$

mesurée en farads par mètre ([F]/[m]) dans le système M.K.S.C. (ou, d'ailleurs,

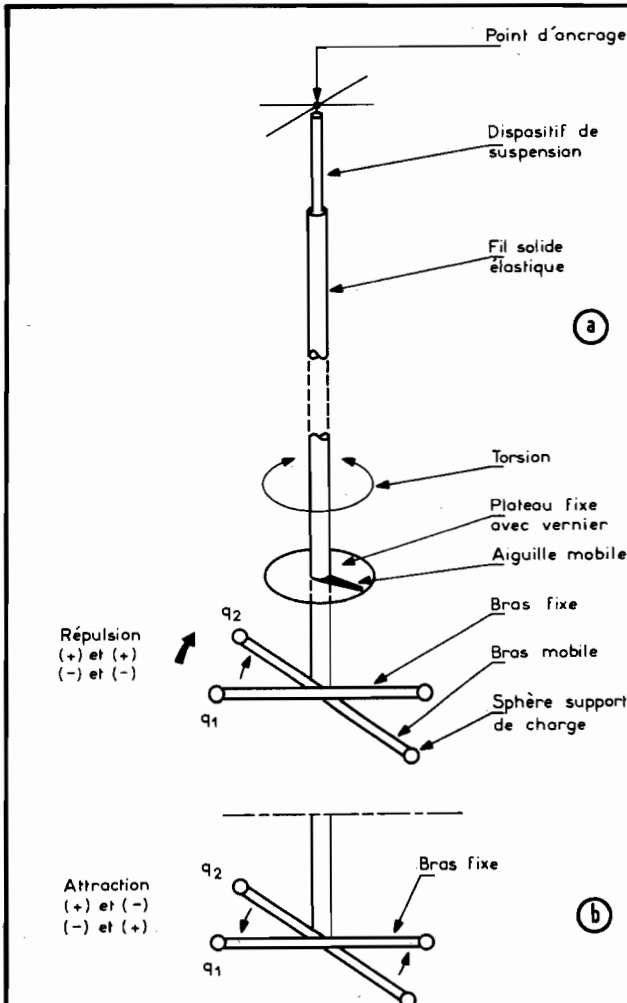


Fig. Ap. I.1 - Balance de torsion de Coulomb avec explications de la répulsion par des charges électriques de mêmes signes (a) et de l'attraction par des charges fixes (électrostatiques) de signes opposés (b).

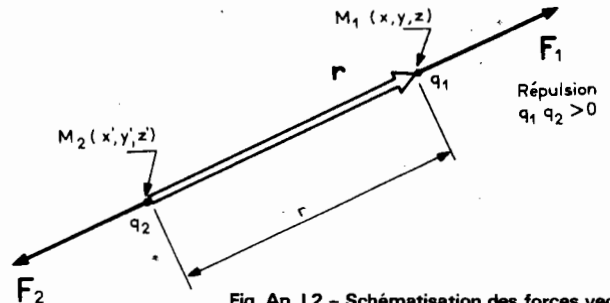


Fig. Ap. I.2 - Schématisation des forces vectorielles et de la distance d'interaction entre deux charges de même signes.

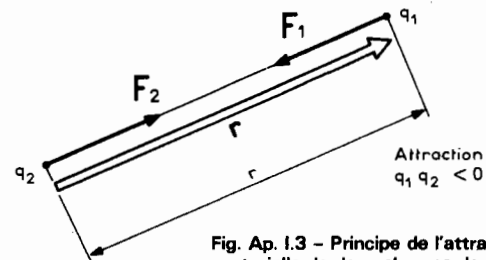


Fig. Ap. I.3 - Principe de l'attraction et représentation vectorielle de deux charges de signes contraires.

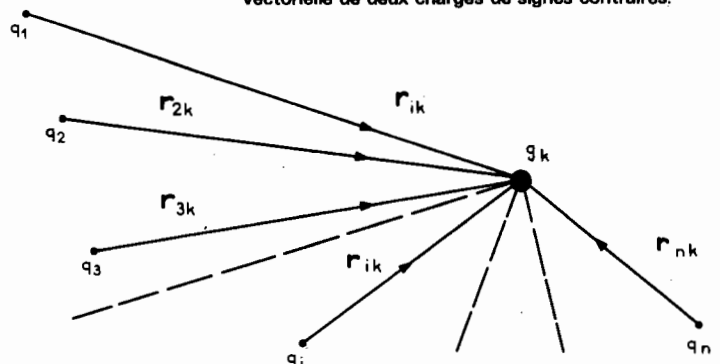


Fig. Ap. I.4 - Influences de n charges sur une seule d'entre elles supposée isolée ; en réalité les interactions sont mutuelles et il s'agit-là d'une vue descriptive destinée à expliquer l'établissement de la formule du texte.

M.K.S.A., des électriciens); la théorie de l'électromagnétisme prouve que :

$$\epsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2}$$

avec π , égal, comme ci-dessus, au rapport de la circonférence, à son diamètre, soit 3,141 59 et c , célérité (ou vélocité, ou vitesse) de l'onde lumineuse dans le vide (précisément intersidéral) qui a pour valeur moyenne (statistiquement et macroscopiquement) :

$$c = [2,997\ 900 \pm 0,000\ 007] \times 10^8 \text{ [m]/[s]}$$

Nous écrivons, contrairement à l'opinion répandue, **valeur moyenne**, car cette **vitesse n'est pas invariante** au niveau ultramicroscopique de la matière (voir relativité générale de la physique corpusculaire).

Si de **nombreuses charges ponctuelles** (c'est-à-dire d'infimes dimensions, supposées sphériques) $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_i, Q_j, \dots, Q_n$ (avec n , indice désignant la dernière considérée d'entre elles) agissant sur une charge (prise, arbitrairement, comme isolée) Q_k , la force F résultera de la somme

géométrique des forces individuelles exercées par chacune des charges sur celle-là (Q_k); il vient, alors (fig. Ap. 4) :

$$F_k = \frac{q_k}{4\pi \epsilon_0} \sum_{i=1}^{i=n} q_i \frac{r_{ik}}{r_{ik}^3} = q_k \cdot E_k$$

en posant :

$$E_k = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \sum_{i=1}^{i=n} q_i \frac{r_{ik}}{r_{ik}^3} = \sum_{i=1}^{i=n} E_{ik}$$

Le symbole Σ souligne l'opération somme, ou addition, effectuée sur chaque terme qui le suit; l'indice double ik marque la relation qui attache q_i à q_k .

APPENDICE II :

CONSIDERATIONS GÉNÉRALES SUR LE PARAGRAPHE 1

Les différents articles à propos des transistors que nous avons publiés à partir du numéro 1473 de cette revue, nous ont permis de préciser bien des données qui nous ont été fort utiles ici. Faisons le point de ces considérations élémentaires mais indispensables à qui veut poursuivre.

Les **composants passifs** (RLC) transmettent le signal appliqué, aux prix, d'actions très simples (retard, différenciation, intégration, etc.). Les **composants actifs** (discrets, ou intégrés, quelle qu'en soit l'échelle... c'est-à-dire leur densité d'implantation sur un même substrat) amplifient, inversent, comparent, modulent (etc.) l'information qui leur parvient, grâce aux différentes formes de l'énergie qu'ils reçoivent d'une source extérieure et qu'ils accommodent au gré de leurs modalités internes. La concentration en éléments dopeurs est de l'ordre de un atome (donneur ou accepteur) pour dix mille atomes du maté-

riau purifié au millionième en fabrication.

Les pastilles de circuits intégrés, ou « puces » (de l'argot technique), présentent une superficie moyenne de 1 à 2 mm², sur laquelle on pique des micro-éléments actifs de 0,1 à 0,2 mm².

La localisation précise des petites surfaces d'où sera ôtée la couche protectrice d'oxyde, dans le but d'un dopage du matériau sous-jacent, est permise par l'emploi d'un corps appelé « photorésist » (qui augmente de résistance, au sens de tenue mécanique après exposition à la lumière, ici, le rayonnement ultra-violet intense). Exposé à la source U.V., le « photorésist » se polymérise et se transforme en composé chimiquement indifférent aux solvants et aux acides.

Quant aux circuits intégrés, nous les comprenons, désormais, comme des modules fonctionnels complets, de haute fiabilité, à prix de revient compétitif. Nous les avons bien séparés, et nos lecteurs doivent s'en souvenir, en T.E.C. à jonction, pourvus d'un canal, par le fabricant, et en M.O.S.-F.E.T. dans lesquels le

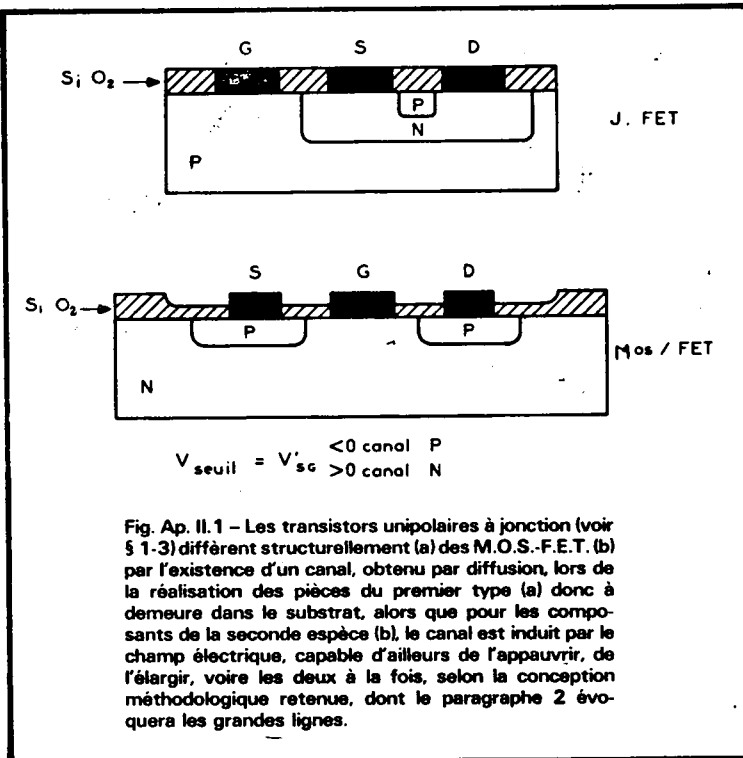


Fig. Ap. II.1 - Les transistors unipolaires à jonction (voir § 1-3) diffèrent structurellement (a) des M.O.S.-F.E.T. (b) par l'existence d'un canal, obtenu par diffusion, lors de la réalisation des pièces du premier type (a) donc à demeure dans le substrat, alors que pour les composants de la seconde espèce (b), le canal est induit par le champ électrique, capable d'ailleurs de l'appauvrir, de l'élargir, voire les deux à la fois, selon la conception méthodologique retenue, dont le paragraphe 2 évoquera les grandes lignes.

passage des charges mobiles est rendu possible par induction d'une voie de transfert en présence du champ électrique. La fig.

Ap. II.1 condense cette définition essentielle, à défaut de laquelle la suite de cet exposé serait rendue incompréhensible.

(1) Brevet américain (U.S. patent) n. 1 745 175 du 28 janvier 1930 (cité par J.-P. Emichen - voir bibliographie).

(2) Voir appendice I : Le champ électrique.

(3) Ceci explique la nécessité des procédés de « passivation » c'est-à-dire de « désactivation maximale » des surfaces.

(4) Nous nous réservons d'expliquer ce que sont ces procédés dans la suite de cette série d'articles.

(5) Dans un semi-conducteur de type P, les porteurs majoritaires sont des

« trous », positifs; ce sont des « lacunes de négatons » et non pas des « positions », ou électrons positifs, pourtant comme eux, de charge élémentaire (+9). La conduction par trous est assurée par des sauts successifs, à rebours de la part des charges mobiles négatives.

(6) La « physique du solide », en usine, ne connaît pas les « états purs » des cours d'enseignement, au contraire, traite-t-elle des combinaisons nocives de phénomènes divers, afin d'en éliminer, au mieux, les effets perturbateurs dans les réalisations mises sur le marché.

(7) Nos lecteurs sont conviés à prononcer Chék'spîrre et non pas « Chat qui expire », la race féline leur en voudrait !

(8) Gridistor est une appellation commerciale protégée par dépôt et enregistrement légal, sous tutelle du CNET (S. Teszner). Le modèle de la figure 1.9 (a, b, c) est un TH454 de la Thomson-CSF (DMH) qui travaille à 2 GHz et délivre 500 mW (amplificateur de classe A).

(9) Ou « fieldistor » en anglais.

(10) L'intégration à moyenne échelle (M.S.I.) correspond à des composants

électroniques intégrés (C.E.I.) de complexité comprise entre 10 et 100 portes par pastille, tandis que la L.S.I. s'intéresse à des implantations de plus de cent grilles par plaquette entière (voir l'excellent enseignement I.T.P. sur les Circuits intégrés, 4e leçon).

Bien noter ici que la complexité n'est pas la complication. Le complexe n'est pas le difficile à comprendre (ou compliqué) mais le résultat d'une structure fonctionnelle dense, avec un agencement subtil des parties. L'électronique intelligente des systèmes d'armes modernes approche d'ailleurs la complexité du réseau nerveux humain