PRÉAMPLIFICATEUR DE CHARGE A FAIBLE BRUIT POUR DÉTECTEUR AU GERMANIUM

Par J. DESCHAMPS, J. C. LE SCORNET, L. MARCUS,
Institut de Physique Nucléaire, Faculté des Sciences, Orsay.

Résumé. — Étude et réalisation d'un préamplificateur de charge à très faible bruit utilisant un transistor à effet de champ refroidi, associé à un détecteur gamma au germanium.

Abstract. — Results on a very low noise charge sensitive preamplifier using a cooled field effect transistor for a germanium lithium drift gamma detector are described.

Les techniques de détection des rayonnements gamma ont été récemment améliorées par l'utilisation, comme processus d'identification, de l'ionisation produite par ce rayonnement dans la zone intrinsèque d'une diode à semiconducteur.

Afin d'obtenir des détecteurs d'efficacité suffisante, on utilise, de préférence au silicium, du germanium, en raison de son nombre atomique plus élevé et on réalise au sein de ce semiconducteur une zone compensée par migration d'ions. Cette zone se comporte vis-à-vis de l'ionisation et de la collection des charges ainsi créées de manière identique à une zone intrinsèque mais pouvant atteindre plusieurs millimètres d'épaisseur.

De telles diodes ou « jonctions » au germanium, de structure planaire, permettent d'obtenir des résolutions de quelques keV pour des rayonnements gamma d'énergie comprise entre 0 et 3 MeV. Cependant, pour pouvoir tirer parti des performances que l'on peut attendre de l'utilisation de tels détecteurs, il est nécessaire que ceux-ci soient associés à des préamplificateurs qui ne contribuent que pour une faible part au bruit total.

On peut considérer que, pour les préamplificateurs de charge généralement utilisés, la résolution est limitée essentiellement par les performances de l'élément d'entrée, et c'est à ce niveau que des améliorations importantes ont pu être apportées par l'emploi de transistors à effet de champ.

Nous avons ainsi réalisé un préamplificateur ayant une résolution propre à 0 picofarad de 0,45 keV et une pente de 0,04 keV par picofarad, qui nous a permis d'obtenir avec un détecteur germanium des résolutions de 1,08 keV sur le ^{57}Co (122 keV) et de 2,2 keV sur le ^{60}Co (1 333 keV). Ce préamplificateur fonctionne actuellement depuis quatre mois sans dérive apparente.

Analyse du bruit à l'entrée du préamplificateur. —

Les récents développements et les performances des transistors à effet de champ (T.E.C.), plus particulièrement à basse température, nous ont conduits à les utiliser comme élément de tête d'un préamplificateur de charge.

Dans ce cas, les sources de bruit à l'entrée sont d'une part le détecteur, d'autre part le transistor à effet de champ lui-même et les résistances associées. On peut schématiser ces différentes sources par deux générateurs :

- Un générateur de tension représentant le bruit thermique et le bruit de scintillation du canal du T.E.C.
- Un générateur de courant représentant le bruit dû aux courants de fuite du détecteur (I_D) et de la « porte » du T.E.C. (I_G) ainsi que celui des résistances d'entrée.

Ces calculs effectués par F. S. Goulding [1] et repris au Laboratoire par A. Marion [2] ont montré que la résultante de ces deux sources de bruit, après amplification et filtrage, pouvait se traduire par une valeur quadratique moyenne du bruit en sortie exprimée comme une charge équivalente à l'entrée :

$$\frac{1}{Q^2} = A \frac{kT}{g_m \tau} C_T^2 + BC_T^2 + C \frac{kT}{R_0} \tau + D(I_D + I_G) \tau$$

où A, B, C, D sont les constantes du T.E.C.

C_T la capacité totale à l'entrée, égale à la somme des capacités d'entrée du T.E.C. et du détecteur,

$\frac{g_m}{T}$ la pente du transistor à effet de champ, la température en degré Kelvin du T.E.C.,

k la constante de Boltzmann,

- R_e la résultante des résistances d'entrée (résistance de fuite du T.E.C. et du détecteur),
 I_D le courant de fuite du détecteur,
 I_G le courant de fuite de la « porte » du T.E.C.,
 τ la bande passante du filtre.

Afin de minimiser $\bar{Q}^2$, il faut essayer d'optimiser la valeur des différents paramètres qui interviennent.

La température de fonctionnement du T.E.C. étant liée proportionnellement à $\bar{Q}^2$, il importe de refroidir l'élément de tête. Par ailleurs, et dans une certaine limite, à basse température, la pente g_m du T.E.C. augmente, ce qui contribue à abaisser le bruit.

La capacité d'un détecteur planaire au germanium pouvant être faible mais restant liée à la géométrie de celui-ci, il est nécessaire pour diminuer C_T de

disposer d'un T.E.C. ayant une capacité d'entrée minimum. De même, le courant de fuite du détecteur, bien que faible (10^{-9} A) pour les bonnes jonctions, ne pouvant être notablement réduit en dessous de cette valeur, il importe de choisir un T.E.C. ayant un courant de fuite aussi faible que possible : ceci permet, en outre, d'utiliser une résistance d'entrée très élevée (10^9 ohms).

En ce qui concerne le T.E.C., on voit que les paramètres qui interviennent essentiellement dans son choix sont : la pente g_m , la capacité d'entrée C_e et le courant de fuite I_G , ce qui conduit à caractériser les performances d'un T.E.C. par un facteur de mérite f , tel que $f = g_m/C_e$, utile pour opérer un choix.

Lorsque l'on refroidit le T.E.C., sa pente g_m augmente jusqu'à un maximum, obtenu pour des valeurs différentes de T suivant les transistors, valeurs com-

FIG. 1. — Étude de la résolution en fonction de la capacité d'entrée pour différentes constantes de temps.

FIG. 2. — Variation de la résolution et de la pente en fonction des constantes de temps pour différentes capacités à température ambiante et à 140 °K.

prises en général entre 80 °K et 180 °K. Cependant, on constate expérimentalement que les meilleures résolutions ne sont pas atteintes pour cette température, mais pour une valeur moins basse ; ceci pouvant peut-être s'expliquer par un accroissement de la probabilité de piégeage des porteurs dans le canal, liée à une diminution de T . Il convient donc de rechercher la température optimum de fonctionnement pour chaque type de transistor.

Trois types de transistors ont été étudiés en fonction de leurs caractéristiques (2N 3684 ; UC 200 ; 2N 3823) et suivant leur réponse en température ; nous avons trouvé que les meilleurs résultats étaient obtenus avec le 2N 3823, refroidi aux environs de 140 °K.

Pour minimiser $\bar{Q}^2$, il importe aussi de déterminer la valeur optimum de la bande passante τ de l'amplificateur. Dans l'expression de $\bar{Q}^2$, si I_D et I_G sont effectivement suffisamment faibles pour qu'on puisse choisir R_0 très grand, le terme $C \frac{kT}{R_0} \tau$ devient négligeable devant $D(I_D + I_G) \tau$; d'autre part, le terme BC_T^2 étant petit devant les autres, on peut en première approximation déterminer la valeur de τ qui minimise $\bar{Q}^2$:

$$(\bar{Q}^2)_{\text{réduit}} = A \frac{kT}{g_m \tau} C_T^2 + D(I_D + I_G) \tau$$

$$\tau_{\text{optimum}} = C_T \sqrt{\frac{A}{D} \frac{kT}{g_m(I_D + I_G)}}$$

Expérimentalement, nous avons étudié les variations de la résolution en fonction de τ et de la capacité totale d'entrée ; nous avons trouvé l'existence d'un optimum (fig. 1 et 2).

Schéma du préamplificateur. — L'étage d'entrée (fig. 3) est un cascode parallèle dont l'élément de tête est un transistor du type 2N 3823 [3]. Les valeurs élevées et variables en fonction de la température du courant de saturation du T.E.C. ainsi que la nécessité d'avoir pour le transistor Q_2 une charge d'émetteur Z_1 supérieure à son impédance d'entrée nous ont amenés à utiliser une inductance L_1 pour l'attaque de Q_2 . Le transistor Q_2 est connecté en charge dynamique dans le cascode et attaque directement un étage de sortie symétrique à basse impédance. Une réaction positive par la capacité C_1 sur Q_2 permet d'améliorer le produit « gain bande » du préamplificateur [4].

FIG. 3. — Schéma du préamplificateur.

FIG. 4

FIG. 4. — Cryostat et préamplificateur avant montage du détecteur.

FIG. 5. — Spectre du ^{57}Co .

Pour ce schéma, le gain mesuré sans contre-réaction est de 3 000 à la température ambiante et de 7 000 à 140 °K, le temps de montée de l'impulsion avec une capacité de contre-réaction $C_{er} = 0,5$ pF est de 60 nanosecondes pour une capacité détecteur C_D nulle. La sensibilité ramenée au détecteur germanium est de 0,11 volt par MeV.

Remarquons que l'utilisation de plusieurs transistors à effet de champ montés en parallèle se traduisant par une augmentation de g_m mais aussi de C_e , il ne devient intéressant d'utiliser cette configuration que pour les détecteurs ayant une capacité importante (> 10 pF). La liaison entre le détecteur et le préamplificateur peut être envisagée de deux façons : d'une part, la liaison alternative par l'intermédiaire d'une capacité de couplage qui présente l'avantage de per-

mettre une électrode du détecteur à la masse mais introduit des capacités parasites de liaison relativement importantes ; d'autre part, la liaison continue qui minimise les capacités parasites mais nécessite un isolement complet du détecteur ainsi qu'un faible courant de fuite de ce dernier. C'est cette dernière solution que nous avons choisie en isolant le détecteur du cryostat par un disque d'oxyde de béryllium.

Les mesures de résolution ont été effectuées avec un amplificateur Tennelec TC 200, en mesurant le bruit de sortie au voltmètre RMS, après étalonnage avec un détecteur au germanium. Nous avons obtenu, à température ambiante, une résolution, à capacité d'entrée nulle de 0,85 keV, et une pente de 0,054 keV par pF ; en refroidissant le T.E.C. à 140 °K, nous avons obtenu une résolution de 0,45 keV avec une

FIG. 6. — Spectre du ^{60}Co .

pente de 0,04 keV par pF. Dans ces deux séries de mesures, les constantes de différenciation et d'intégration égales entre elles étaient de 3,2 μs .

Cryostat et détecteur au germanium. — Nous avons utilisé des détecteurs au germanium de notre fabrication du type à zone compensée par migration de lithium et de structure planaire.

Les jonctions sont utilisées dans des cryostats du type canne [5] où le vide est maintenu par un piège moléculaire (fig. 4).

Nous avons utilisé pour le montage du T.E.C. deux dispositions équivalentes. La première consiste à monter le transistor dans un radiateur, préalablement poli, et relié à la tige de cuivre centrale du cryostat par une

lampe de crysocal. Le gradient de température dans la lame ainsi que les pertes par rayonnement dans le radiateur permettent d'ajuster la température du transistor à sa valeur optimale. Le second procédé consiste à introduire le T.E.C. dans un logement aux dimensions exactes du boîtier, percé dans une pièce de téflon, serrée elle-même sur le plateau supportant la jonction. Un calcul de gradient thermique, vérifié par l'expérience, montre qu'en considérant une dissipation thermique de 80 mW dans le T.E.C., et en utilisant une pièce de téflon ayant une section de 1 cm^2 , on atteint 140 °K à une distance de 11 à 15 mm du plateau.

Conclusions. — Des spectres du ^{57}Co , du ^{60}Co et du ^{203}Hg (fig. 5, 6 et 7) permettent de juger des réso-

FIG. 7. — Spectre du ^{203}Hg .

lutions obtenues avec un détecteur au germanium. Cette réalisation qui paraît actuellement facilement reproductible nous permet d'envisager son utilisation dans de nombreux cas de spectrométrie nucléaire. Une

amélioration attendue et probable dans un proche avenir du facteur de mérite des T.E.C. devrait permettre d'obtenir des performances plus intéressantes.

Manuscrit reçu le 17 janvier 1967.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] GOULDING (F. S.), Semi-Conductor detectors for Nuclear Spectrometry, Lawrence Radiation Laboratory, University of California, UCRL 16231, 1965.
- [2] MARION (A.), Thèse 3^e cycle, Institut de Physique Nucléaire, Faculté des Sciences, Orsay.
- [3] RADEKA (V.), The Field Effect Transistor, its Characteristics and Applications, IEEE Transactions on Nuclear Science, 1964, vol. NS, 11, 3, 358-364.
- [4] NYBAKEN (T. W.) et VALI (V.), A preamplifier for cooled lithium ion-drifted semiconductor detectors, Nuclear instruments and Methods, 1965, 32, 1, 121-124.
- [5] BUHLER (S.), MARCUS (L.), Cold Finger cryostats for lithium drifted germanium detectors ; à paraître dans : Nuclear Instruments and Methods.