

Chapitre XI: Dosimètres électroniques

Types de dosimètres électroniques

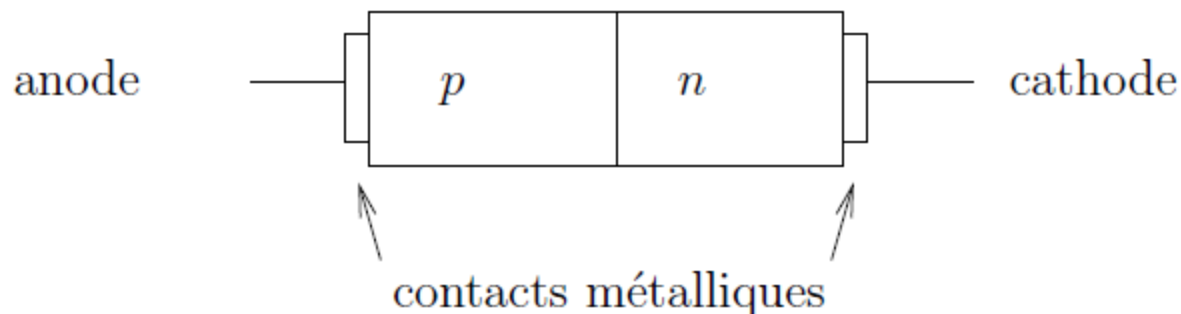
- Les dosimètres électroniques incluent à la fois des dosimètres passifs (intégrateurs) ou actifs (mesure en temps réel)
- On parlera ici de dosimètres à base de silicium (même si dosimètres à base de germanium, diamant, etc. existent aussi → moins répandus ou plus chers)
- 2 dispositifs seront considérés (→ **pas** les transistors bipolaires ou les chambres d'ionisations solides) →
 - Diode
 - MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
- Références:
 - J. Barthe, *Electronic dosimeters based on solid state detectors*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B: 184 (2001) 158–189
 - A. Holmes-Siedle, L. Adams, *Handbook of radiation effects* (Oxford Science Publication) 1994

Introduction

- Dosimètre électronique → dosimètres personnels, dosimètres pour la radiothérapie, pour la curiethérapie,...
- Si utilisé pour les dosimètres électroniques → matériau bien connu
- Plusieurs avantages du dosimètre électronique:
 1. $Z = 14$ → « relativement » tissu-équivalent → pour $E < 150$ keV → augmentation de la section efficace d'interaction par rapport aux tissus (effet photoélectrique)
 2. Meilleure sensibilité qu'un gaz (facteur 20000) dû à sa plus grande densité (facteur 2000) et à sa plus petite énergie d'ionisation (facteur 10)
 3. Plus petite taille → conditions de B-G satisfaites et possibilité d'être placé dans un volume confiné (corps humain)
 4. Bonne stabilité mécanique
 5. Possibilité de mesurer des doses ou des débits de dose
 6. Possibilité de dosimétrie neutrons (pas envisagée ici)

Dosimètre diode: Définition de la diode

- Une diode en Si \rightarrow jonction de 2 types de semiconducteurs \rightarrow
 - Diode de type p: cristal de type p (excès de h^+) avec une fine couche à la surface de type n (excès de e^-)
 - Diode de type n: cristal de type n avec une fine couche à la surface de type p
- Des contacts métalliques sont déposés sur les semiconducteurs pour constituer l'anode (contact avec la région p) et la cathode (contact avec la région n)



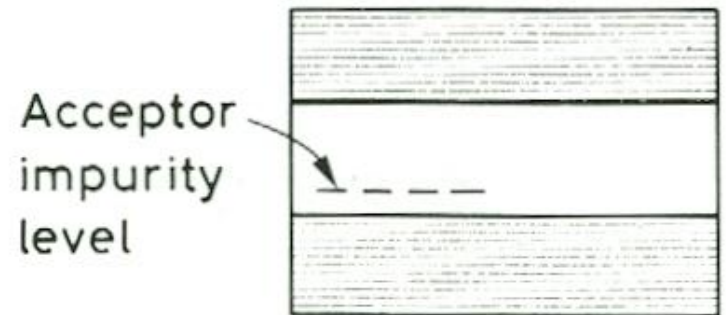
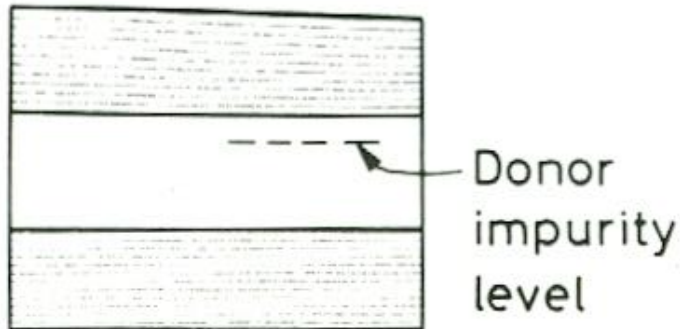
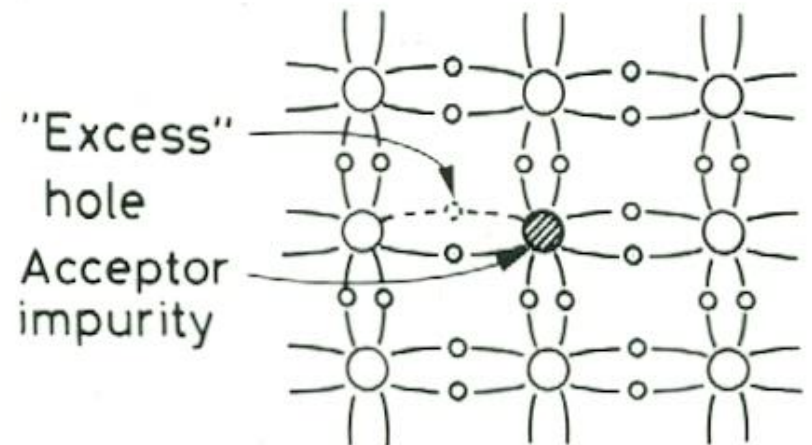
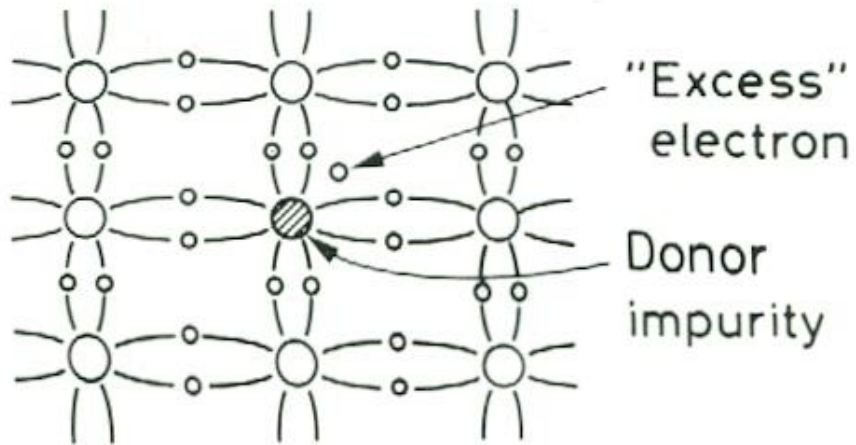
Semiconducteur de type n

- Le Silicium est tétravalent
- Si on introduit une impureté (dopage) pentavalente: arsenic, phosphore, antimoine (élément donneur) → remplacement d'un atome du réseau → un e^- supplémentaire est ajouté
- Cet e^- supplémentaire est faiblement lié → facilement excité vers la bande de conduction → présence d'un niveau localisé juste en-dessous du fond de la bande de conduction
- E d'ionisation de ce niveau localisé: qqs 0.01 eV → comparable à l' E thermique → présence d'un e^- dans la bande de conduction sans h^+ dans la bande de valence → **semiconducteur de type n**
- En pratique → concentration de donneurs $N_D \gg n_i$ (concentration de porteurs à l'équilibre pour du Si non-dopé) → concentration d'électron $n \approx N_D$ ($N_D \sim 10^{15}$ atomes/cm³)

Semiconducteur de type p

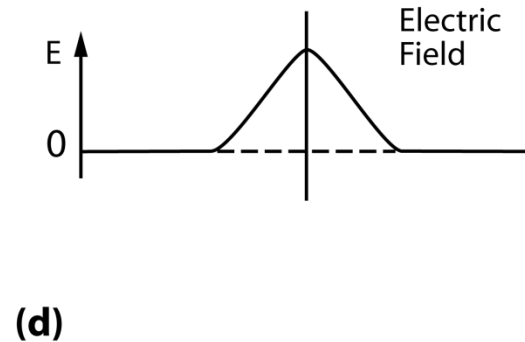
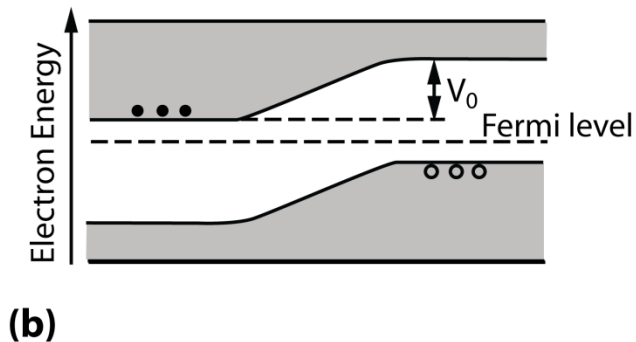
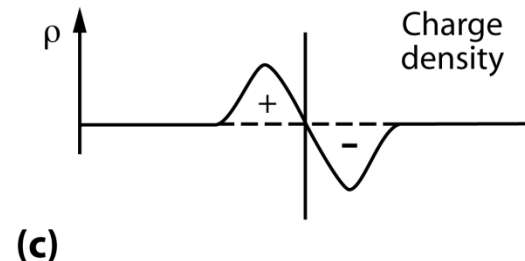
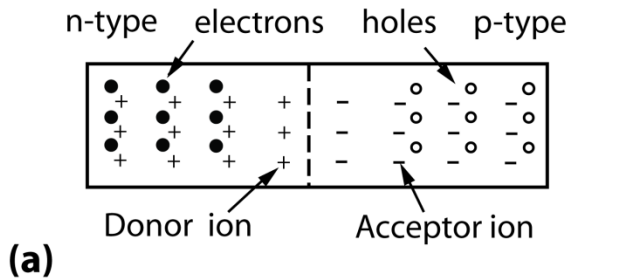
- Si une impureté trivalente est introduite (élément accepteur) comme le gallium, le bore ou l'indium → remplacement d'un atome du réseau → pas assez d'électrons → un h^+ supplémentaire est ajouté
- Un e^- capturé dans ce trou est moins lié qu'un e^- normal → niveau localisé juste au dessus du sommet de la bande de valence
- Les e^- dans la bande de valence sont facilement excités vers ce niveau localisé → trou supplémentaire dans la bande de valence sans e^- dans la bande de conduction → **semiconducteur de type p**
- En pratique → concentration d'accepteurs $N_A \gg n_i$ → concentration de trous: $p \approx N_A$ ($N_A \sim 10^{15}$ atomes/cm³)

Représentation des semiconducteurs dopés (extrinsèques)



Principe de la diode

La \neq de densité de charge implique une diffusion des e^- majoritaires de la région n vers la région p et des h^+ majoritaires de la région p vers la région n \rightarrow dans la zone de jonction \rightarrow recombinaison des e^- et des h^+ \rightarrow présence d'ions + dans la région n et d'ions - dans la région p \rightarrow champ électrique (10^3 V/cm) dans cette région (appelée zone de déplétion)



Taille de la zone de déplétion (1)

- La taille de la zone de déplétion ($= d$) dépend de la concentration en impuretés en n et p \rightarrow elle peut être déterminée à partir de l'équation de Poisson (avec ϵ la constante diélectrique) \rightarrow

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon}$$

- On considère une distribution de charge uniforme au niveau de la jonction, x_n et x_p les étendues de la zone de déplétion dans les régions n et p et un potentiel de contact $V_0 \rightarrow$

$$\rho(x) = \begin{cases} eN_D & 0 < x < x_n \\ -eN_A & -x_p < x < 0 \end{cases}$$

- Comme la charge est conservée $\rightarrow N_A x_p = N_D x_n$ (avec la concentration d'accepteurs $N_A \approx p$ et la concentration de donneurs $N_D \approx n$)

Taille de la zone de déplétion (2)

- En Intégrant l'équation de Poisson →

$$\frac{dV}{dx} = \begin{cases} -\frac{eN_D}{\varepsilon}x + C_n & 0 < x < x_n \\ \frac{eN_A}{\varepsilon}x + C_p & -x_p < x < 0 \end{cases}$$

- Comme $dV/dx = 0$ en $x=x_n$ et $x=-x_p$ →

$$\frac{dV}{dx} = \begin{cases} -\frac{eN_D}{\varepsilon}(x - x_n) & 0 < x < x_n \\ \frac{eN_A}{\varepsilon}(x + x_p) & -x_p < x < 0 \end{cases}$$

- En intégrant une fois de plus →

$$V(x) = \begin{cases} -\frac{eN_D}{\varepsilon} \left(\frac{x^2}{2} - x_n x \right) + C & 0 < x < x_n \\ \frac{eN_A}{\varepsilon} \left(\frac{x^2}{2} + x_p x \right) + C' & -x_p < x < 0 \end{cases}$$

Taille de la zone de déplétion (3)

- Les solutions étant égales en $x = 0 \rightarrow C = C'$ et comme $V(x_n) = V_0$ et $V(-x_p) = 0 \rightarrow$

$$V_0 = \frac{eN_D}{2\varepsilon}x_n^2 + C$$

$$0 = -\frac{eN_A}{2\varepsilon}x_p^2 + C$$

- En éliminant $C \rightarrow$

$$V_0 = \frac{e}{2\varepsilon}(N_D x_n^2 + N_A x_p^2)$$

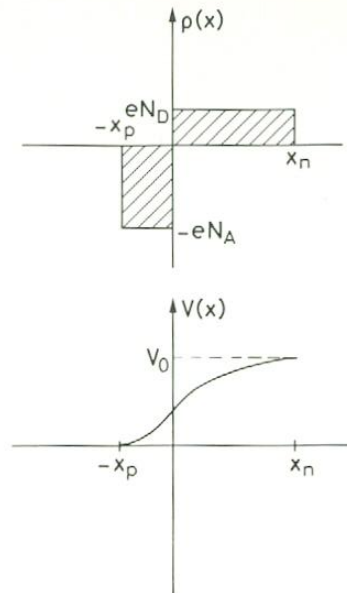
- En utilisant l'équation de conservation de la charge \rightarrow

$$x_n = \left(\frac{2\varepsilon V_0}{eN_D[1 + N_D/N_A]} \right)^{1/2} \quad \text{et} \quad x_p = \left(\frac{2\varepsilon V_0}{eN_A[1 + N_A/N_D]} \right)^{1/2}$$



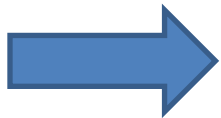
$$d = x_n + x_p$$

Taille de la zone de déplétion (4)



- En considérant, par exemple, $N_A \gg N_D \rightarrow x_n \gg x_p \rightarrow$

$$d \simeq x_n \simeq \left(\frac{2\varepsilon V_0}{eN_D} \right)^{1/2}$$

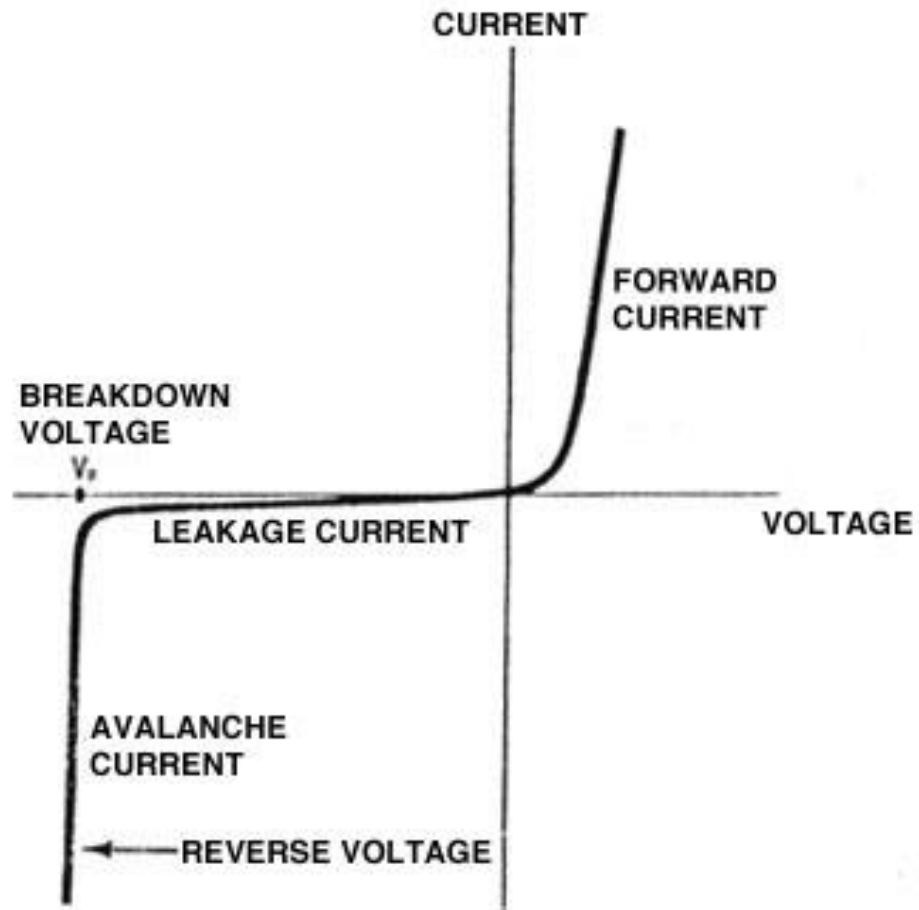


Pour Si avec $\rho = 20000 \Omega\text{cm}$ et $V_0 = 1\text{V} \rightarrow d \approx 75 \mu\text{m}$

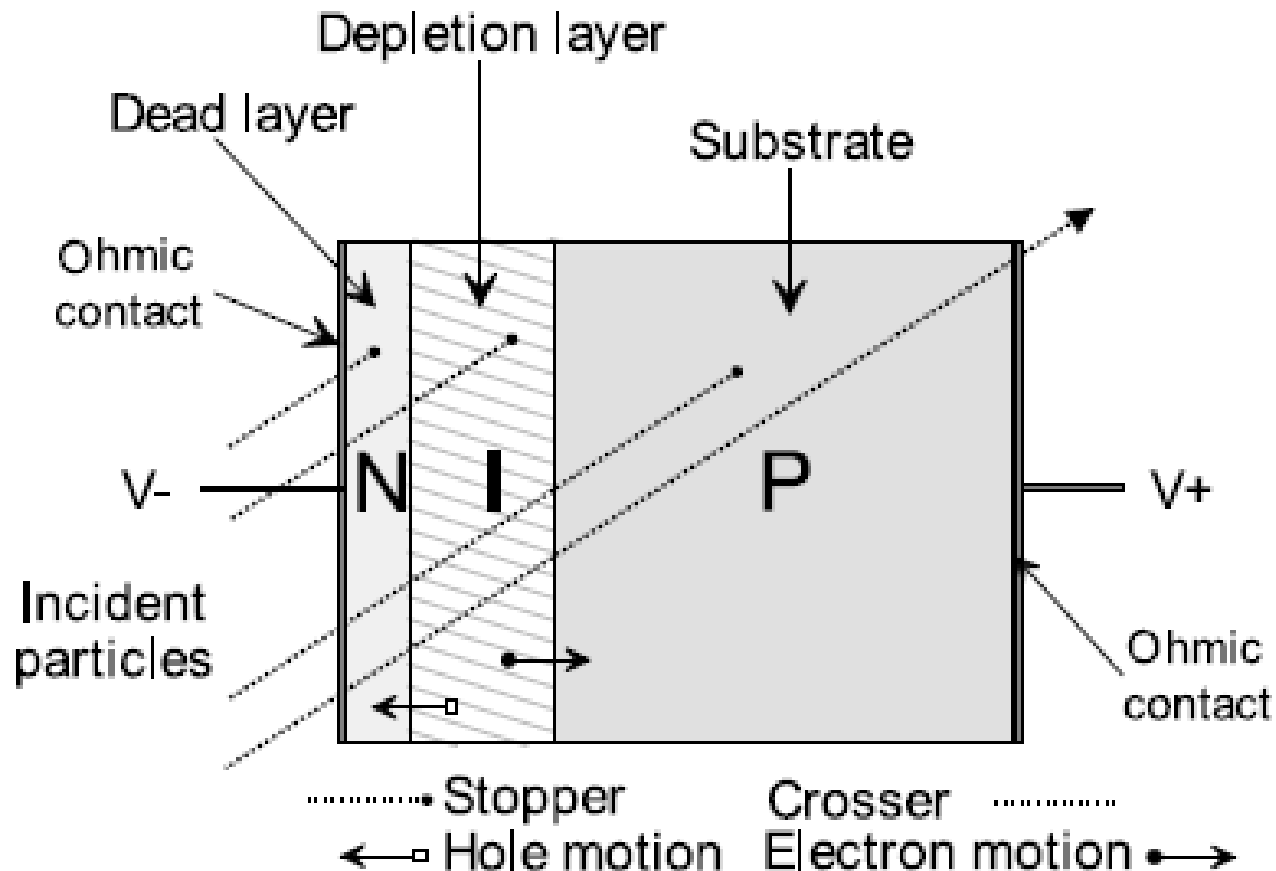
Tension appliquée

- Si une tension externe est appliquée telle que l'anode est portée à un potentiel supérieur à celui de la cathode (polarisation directe) → diminution du potentiel de la jonction → passage d'un courant → pas d'utilisation en dosimétrie
- Si une tension externe V_B est appliquée telle que l'anode portée à un potentiel négatif par rapport à celui de la cathode (polarisation inverse) → renforcement de la différence de potentiel à la jonction → pas de courant
 1. Cette tension attire les h^+ de la région p loin de la jonction (et de manière identique les e^- dans la région n → ↗ de la taille de la zone de déplétion (dans les éqs. précédentes → utilisation de $V_B + V_0 \approx V_B$ car $V_B \gg V_0$) → 5 mm dans du Si
 2. V_B limité → attention au claquage (par effet Zener ou effet d'avalanche)

Caractéristique courant - tension



Principe d'un détecteur diode (1)



Principe d'un détecteur diode (2)

- Quand un rayonnement ionisant traverse la diode → création de paires $e^- - h^+$
- Quand les paires sont créées dans la zone de déplétion ou à une distance $< L_{p,n}$, les longueurs de diffusion des porteurs, de la zone de déplétion (« partie sensible » de la diode) → soumises au champ électrique → atteignent les frontières de la zone de déplétion → impulsion de tension collectée
- Seules les paires créées dans la partie sensible de la diode ($d + L_p + L_n$) seront collectées → sensibilité de la diode \propto taille de la zone de déplétion
- La diode est utilisée en polarisation inverse pour des doses à mesurer faibles et non-polarisée pour des doses élevées (en radiothérapie) → taille de la zone de déplétion réduite au minimum
- Pour les diodes utilisées en spectrométrie → différence → la particule doit déposer toute son énergie dans la zone de déplétion → taille ↗

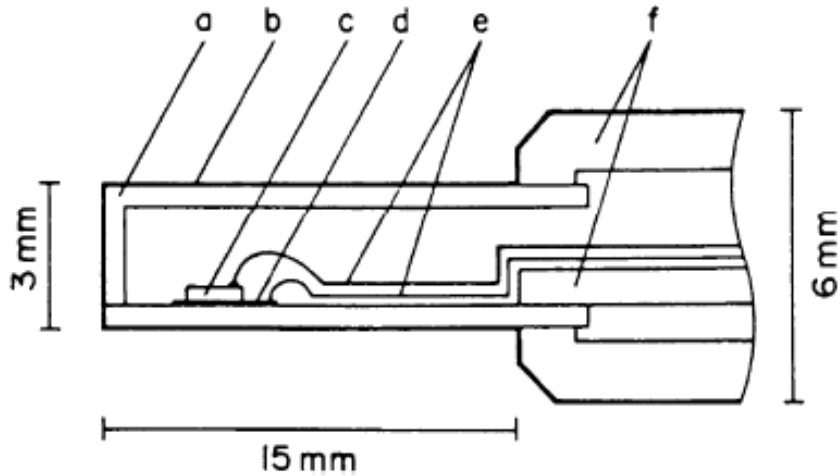
Type de diode utilisée en dosimétrie (1)

- La sensibilité d'un détecteur diode est reliée au temps de vie des porteurs de charges créés → si recombinaison → charge perdue → sensibilité \searrow
- Le temps de vie est lui-même lié à la concentration de défauts (= pièges) dans la diode
- L'irradiation va introduire des défauts supplémentaires dans le matériau (dégâts radiatifs) → sensibilité dépend de la dose et du débit de dose
- On peut montrer que le nombre de pièges supplémentaires en fonction du débit de dose créés dans un semiconducteur de type n sont plus importants que pour un type p → l'irradiation va beaucoup plus affecter la durée de vie des e^- que celle des h^+
- En pratique en dosimétrie → diode de type p (« grand » volume de type p associé à un « petit » volume de type n) car perte de sensibilité beaucoup plus importante pour les diodes de type n que de type p

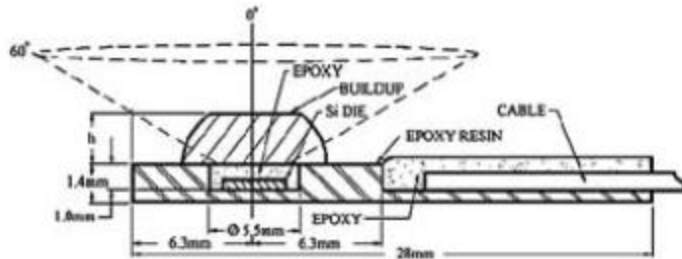
Type de diode utilisée en dosimétrie (2)

- Les diodes pour la dosimétrie sont \neq de celles utilisées en spectrométrie
- Pour minimiser les perturbations dans le milieu (règle de Bragg: pas de perturbation de la fluence par le détecteur) \rightarrow diode aussi petite que possible (dimensions classiques: $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$)
- Taille pas trop petite quand même \rightarrow sensibilité \propto taille de la zone de déplétion \rightarrow compromis à trouver
- Le matériau qui entoure la diode est important \rightarrow génération des particules chargées secondaires \rightarrow aussi tissu-équivalent que possible: contacts électriques en Al, supports en plastic, carbone,...

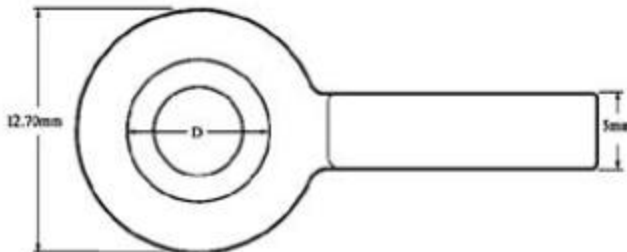
2 exemples de dosimètres diodes



- (a) polyéthylène
- (b) recouvrement carbone
- (c) diode Si
- (d) carbone epoxy
- (e) câbles en Al
- (f) PMMA



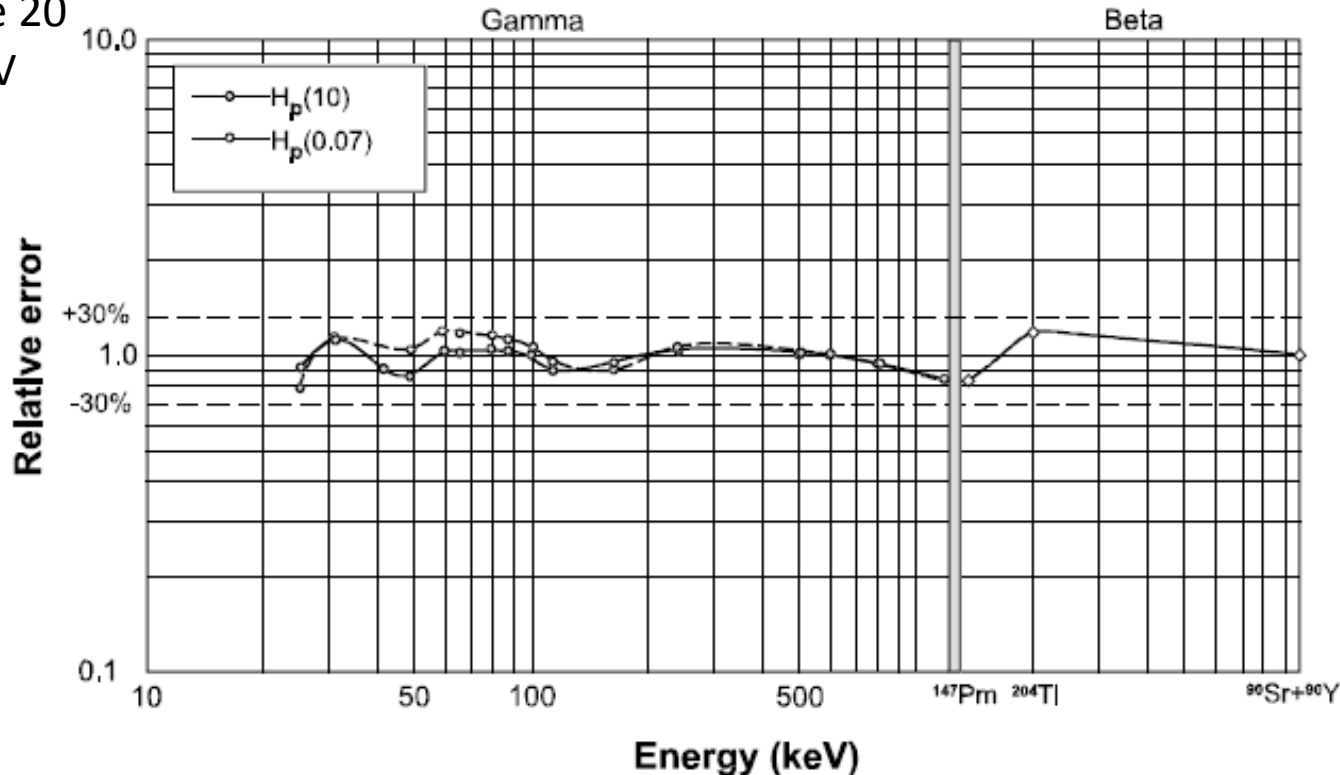
Diode développée par
Sun Nuclear Corporation



Réponse en énergie

- Difficulté pour les γ de faibles énergies \rightarrow effet photoélectrique dominant \rightarrow surestimation de la dose \rightarrow défaut \rightarrow utilisation de blindage

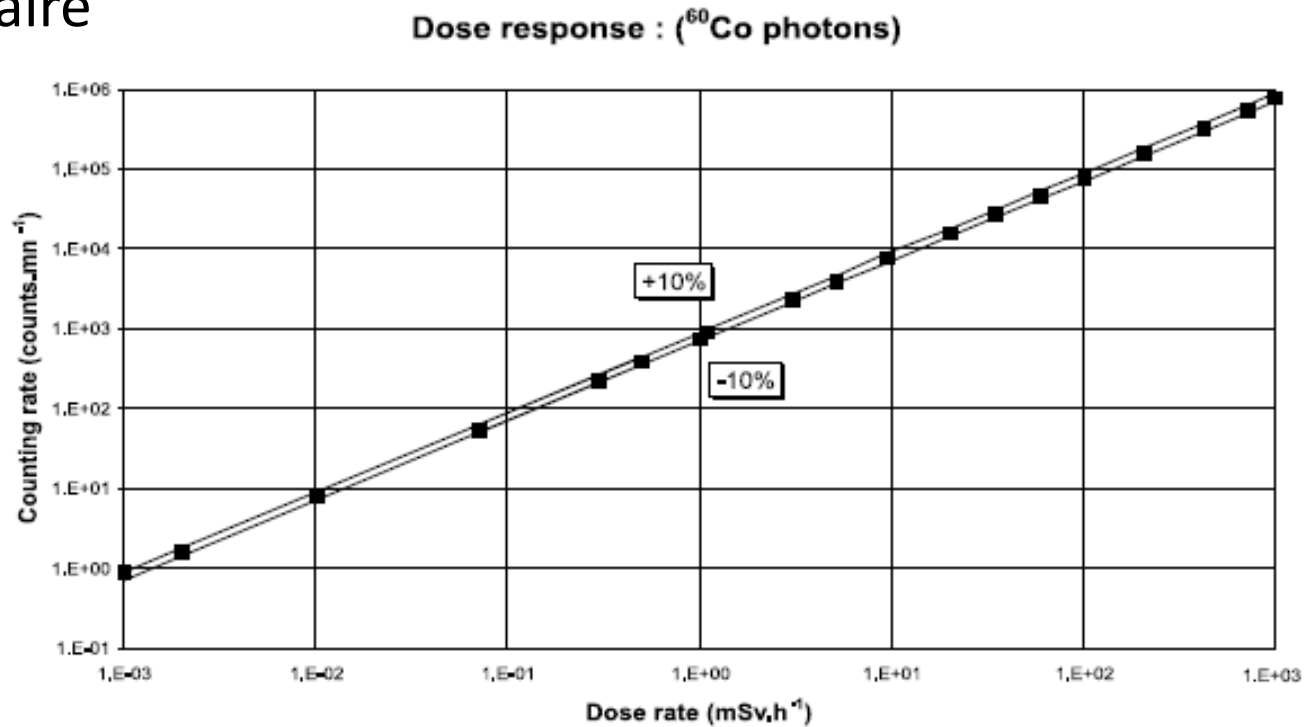
X, γ rays: de 20 keV à 6 MeV



β : > 60 keV

Réponse en dose

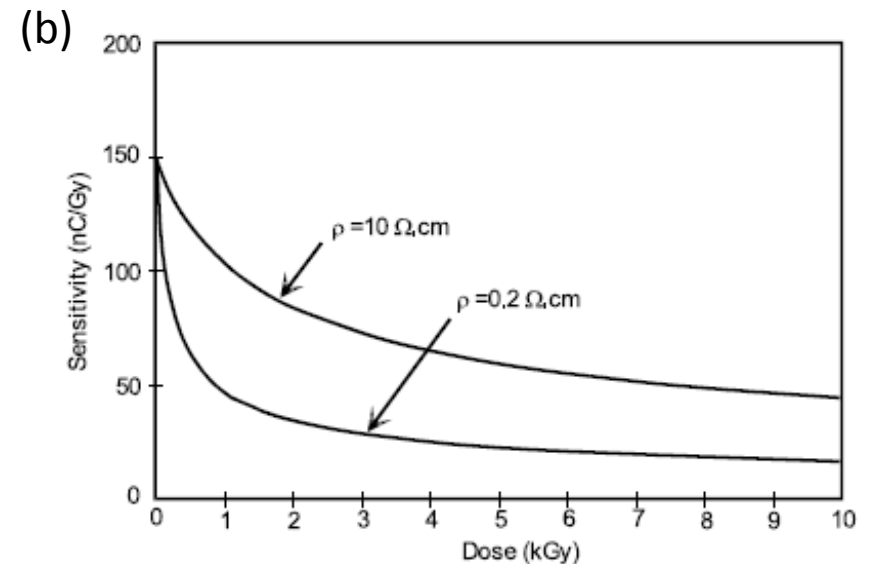
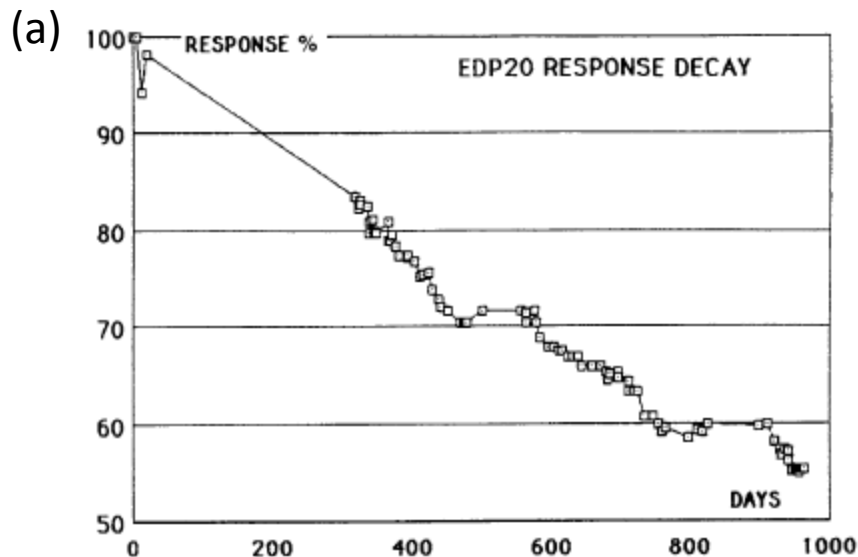
- En mode impulsion (pour les débits de doses pas trop importants → pas en radiothérapie) → réponse en dose linéaire



Dosicard: Canberra

Effet de la dose cumulée (1)

- Comme déjà dit → l'irradiation introduit des défauts supplémentaires dans le matériau
- Quand la dose \nearrow (remarque: doses élevées) → sensibilité \searrow



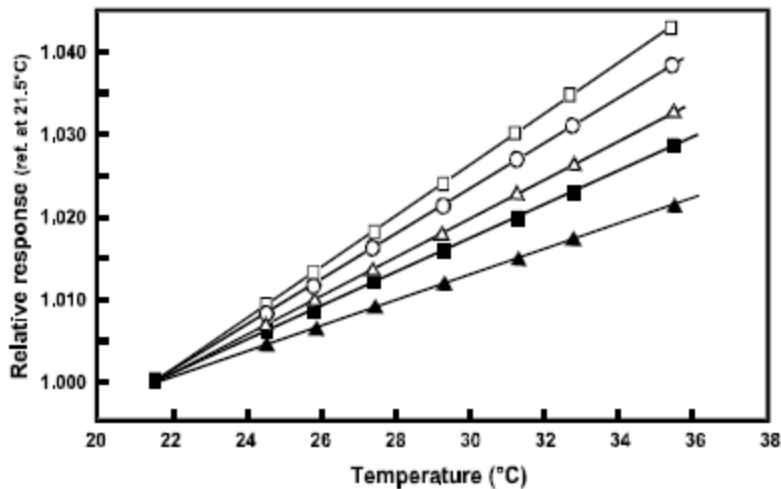
- (a) Diode EDP-20: Scanditronix - Wellhöfer → débit de dose: 45 Gy/j, γ de 25 MeV
- (b) Réponse en fonction de la dose cumulée pour des γ de 6 MeV

Effet de la dose cumulée (2)

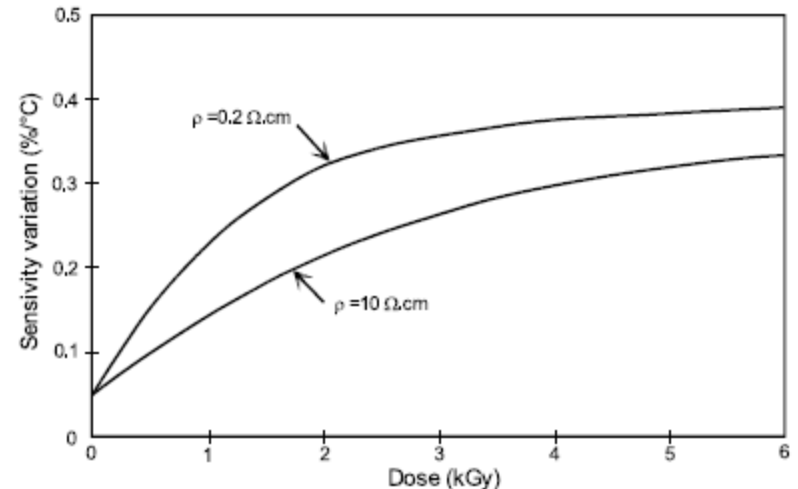
- Pour déterminer précisément la dose à un moment donné → la courbe de décroissance de la sensibilité doit être connue ainsi que la dose mesurée par la diode dans le passé → défaut
- Solution → pré-irradiation avant utilisation pour atteindre un niveau de sensibilité (environ) constant

Effet de la température

- Lorsque $T \nearrow \rightarrow$ concentration de porteurs $\nearrow \rightarrow$ grande dépendance la réponse d'une diode en fonction de $T \rightarrow$ défaut
- En pratique \rightarrow SVWT (*sensitivity variation with temperature*) = 0.1%/°C pour une diode qui n'a pas été pré-irradiée
- Pour une diode p pré-irradiée à 5 kGy (γ de 20 MeV) \rightarrow SVWT = 0.35-0.4 %/°C \rightarrow SVWT dépend de la dose cumulée (et aussi du débit de dose)



Réponse en T pour \neq diodes



SVWT en fonction de la dose cumulée pour des γ de 6 MeV

Exemples de dosimètres personnels dans le commerce



ES600 de Labomoderne



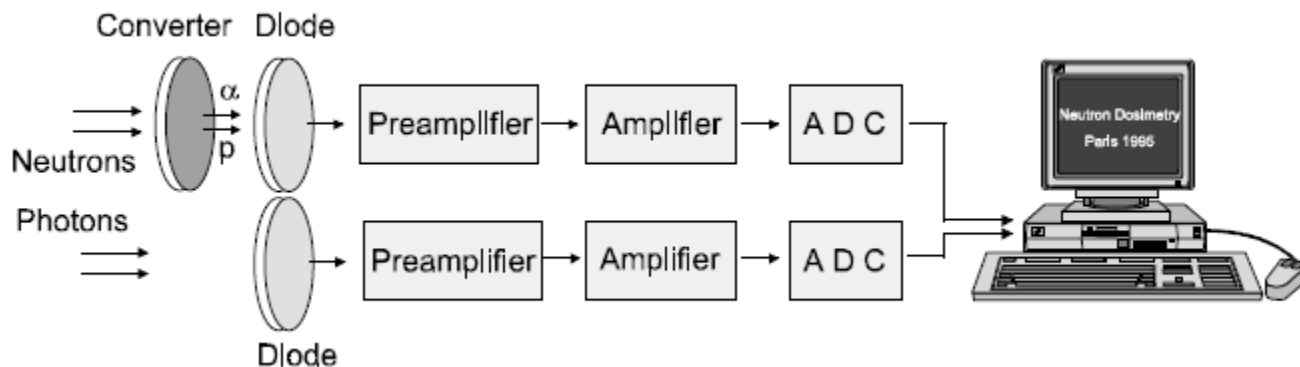
Dosicard de Canberra

Caractéristiques du ES600 et du dosicard

- Très similaires
- Pour des β et γ
- Mesure de dose: $1 \mu\text{Gy} < D < 10 \text{ Gy}$
- Mesure de débit de dose: $1 \mu\text{Gy/h} < D/h < 1 \text{ Gy/h}$
- Précision: $< \pm 15\%$ au ^{137}Cs , jusqu'à 1 Sv/h
- Mémoire EEPROM non-volatile
- Affichage digital de la dose et du débit de dose
- Alarme
- Mémorisation des données

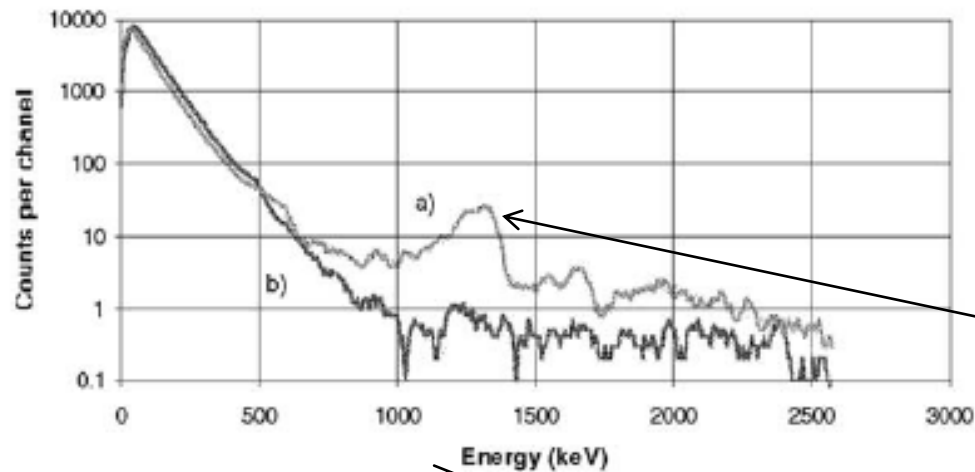
Détecteur neutrons avec diodes (1)

- Détecteur neutrons basé sur l'utilisation de 2 diodes
- Diode 1 (appelée diode neutron): couverte d'un matériau organique (plastique: PE,...) enrichi au ^{10}B ($\approx 10^{13}/\text{cm}^3$ atomes de B) \rightarrow sensible aux neutrons et aux γ
- Diode 2 (appelée diode γ): nue \rightarrow peu sensible aux neutrons et sensible aux γ
- Les 2 diodes sont placées côte à côte et \perp aux rayonnements ionisants (neutrons + γ)



Détecteur neutrons avec diodes (2)

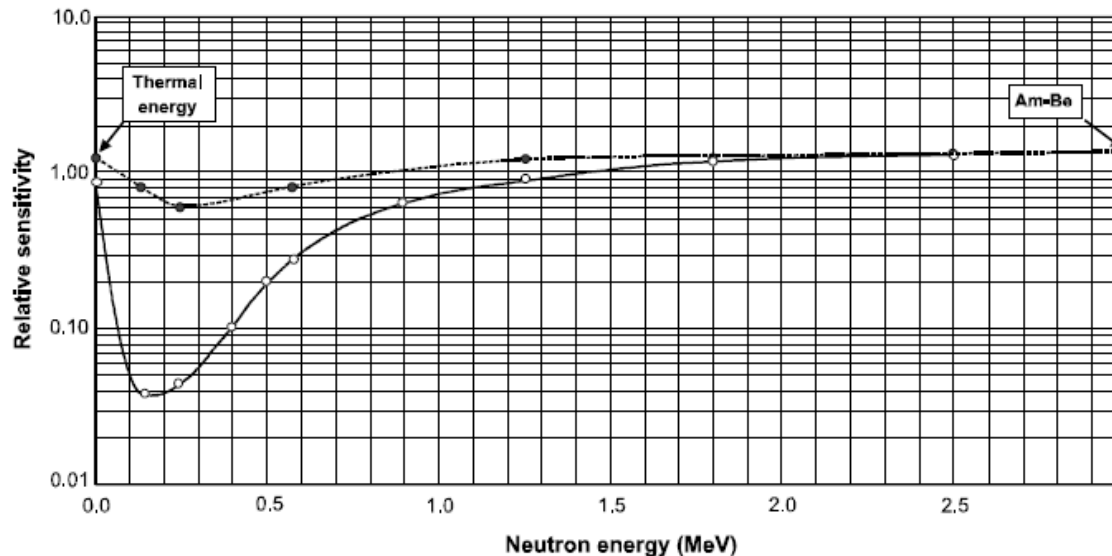
- Les neutrons interagissent avec la diode 1 de 2 manières ≠:
 1. $H(n,n)p \rightarrow$ émission de protons
 2. $^{10}B(n,\alpha)^7Li \rightarrow$ émission de α
- La différence entre les 2 signaux permet de discriminer la composante due aux γ de celle due aux neutrons



Spectre mesuré

Détecteur neutrons avec diodes (3)

- En considérant une taille importante pour la couverture plastique → modération importante des neutrons de haute E → on peut étudier des neutrons de haute E
- La quantité de ^{10}B est choisie de manière à obtenir une réponse aux neutrons thermiques égales à celle aux neutrons rapides



Détecteur neutrons avec diodes (4)

- Pour les très hautes E ($E > 10$ MEV) \rightarrow ajout de Pb
- Pour améliorer la précision pour une plage d' E importante \rightarrow système à 3 ou 4 diodes avec \neq recouvrements \rightarrow détecteur multi-éléments (détecteur Saphydose développé par l'IRSN)

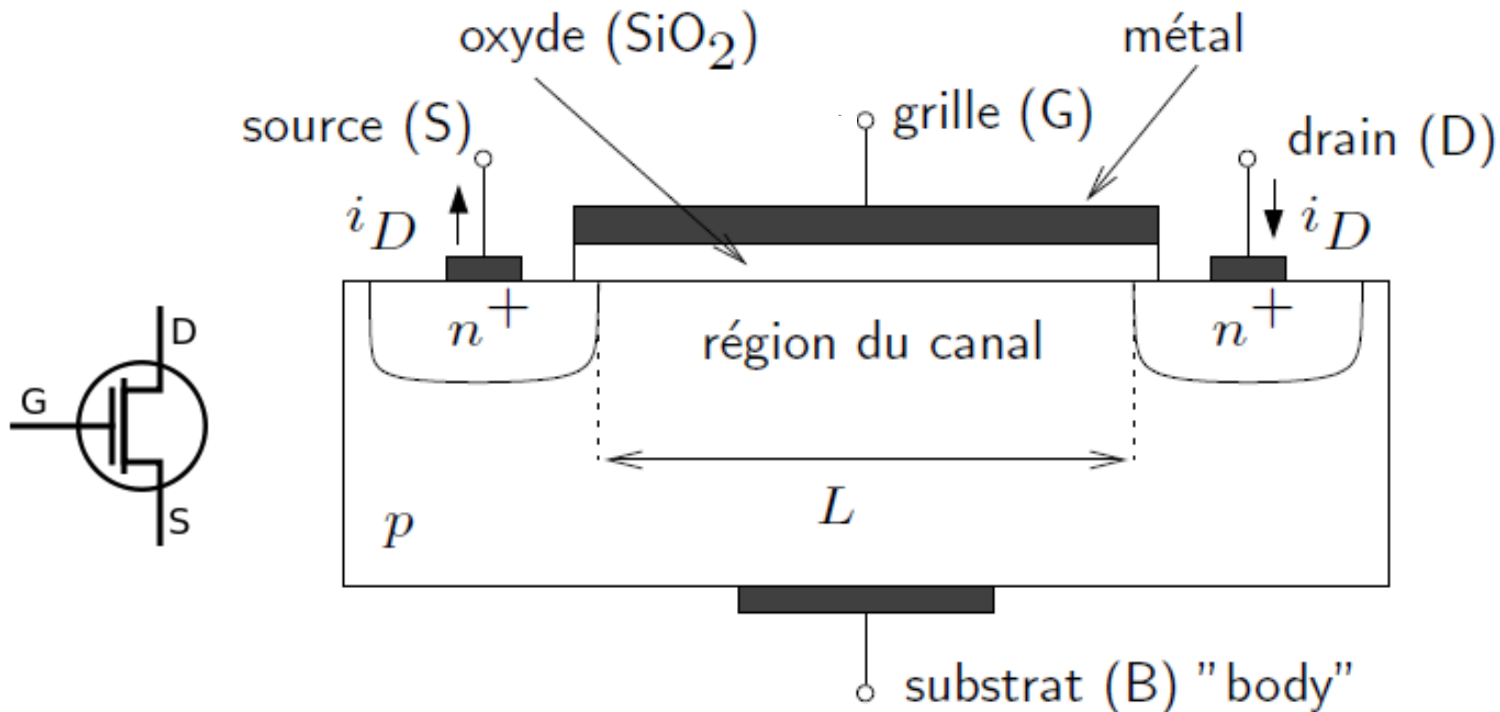


Détecteur Saphydose

Dosimètre MOSFET: Définition du MOSFET

- MOSFET → acronyme pour Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (transistor à effet de champ à structure métal-oxyde-semiconducteur)
- Transistor à effet de champ → utilisation d'un champ électrique pour contrôler la forme et la conductivité d'un « canal » dans un matériau semiconducteur → modulation du courant qui le traverse (entre la « source » et le « drain ») à l'aide d'une tension appliqué sur l'électrode centrale nommée « grille »
- Pour un MOSFET → la grille (métal ou silicium polycristallin) est électriquement isolée du substrat (semiconducteur) par un diélectrique (de type SiO_2) → pas de courant injecté par la grille
- Peut être à canal n ou p

Schéma d'un MOSFET à canal n (nMOS)



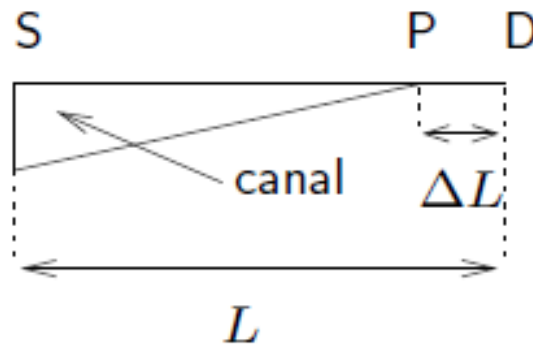
Caractéristiques typiques → $L \approx 1-40 \mu\text{m}$, épaisseur SiO₂ $\approx 0.02-0.1 \mu\text{m}$, largeur $\perp \approx 2-500 \mu\text{m}$, régions n fortement dopées (n⁺): $n \geq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Principe de fonctionnement (canal n)

- Hypothèses:
 1. $V_S = V_B$
 2. On applique une différence de potentiel positive $V_{DS} = V_D - V_S > 0$ entre le drain et la source
- En l'absence de polarisation de grille $\rightarrow V_{GB} = V_G - V_B = V_{GS} = 0 \rightarrow$ pas de courant entre la source et le drain $\rightarrow I_D = 0$
- $V_{GS} \nearrow \rightarrow$
 1. $V_{GS} \leq V_{TH} \rightarrow I_D = 0 \rightarrow$ Régime de coupure: lorsque la tension de grille est plus petite que la « tension de seuil »
 - \rightarrow h^+ repoussés vers le substrat \rightarrow création d'une zone de déplétion
 - \rightarrow e^- générés thermiquement dans le substrat ou provenant des régions n^+ sont attirés à la surface du substrat
 2. $V_{GS} > V_{TH}$ et $V_{DS} < (V_{GS} - V_{TH}) \rightarrow I_D \nearrow$ linéairement \rightarrow Régime linéaire (ou mode triode ou mode ohmique): création d'un canal de conduction peuplé d' $e^- \rightarrow$ le transistor se comporte comme une résistance
 3. $V_{GS} > V_{TH}$ et $V_{DS} > (V_{GS} - V_{TH}) \rightarrow I_D$ indépendant de V_{DS} : Régime de saturation:
 $I_D \propto (V_{GS} - V_{TH})^2$

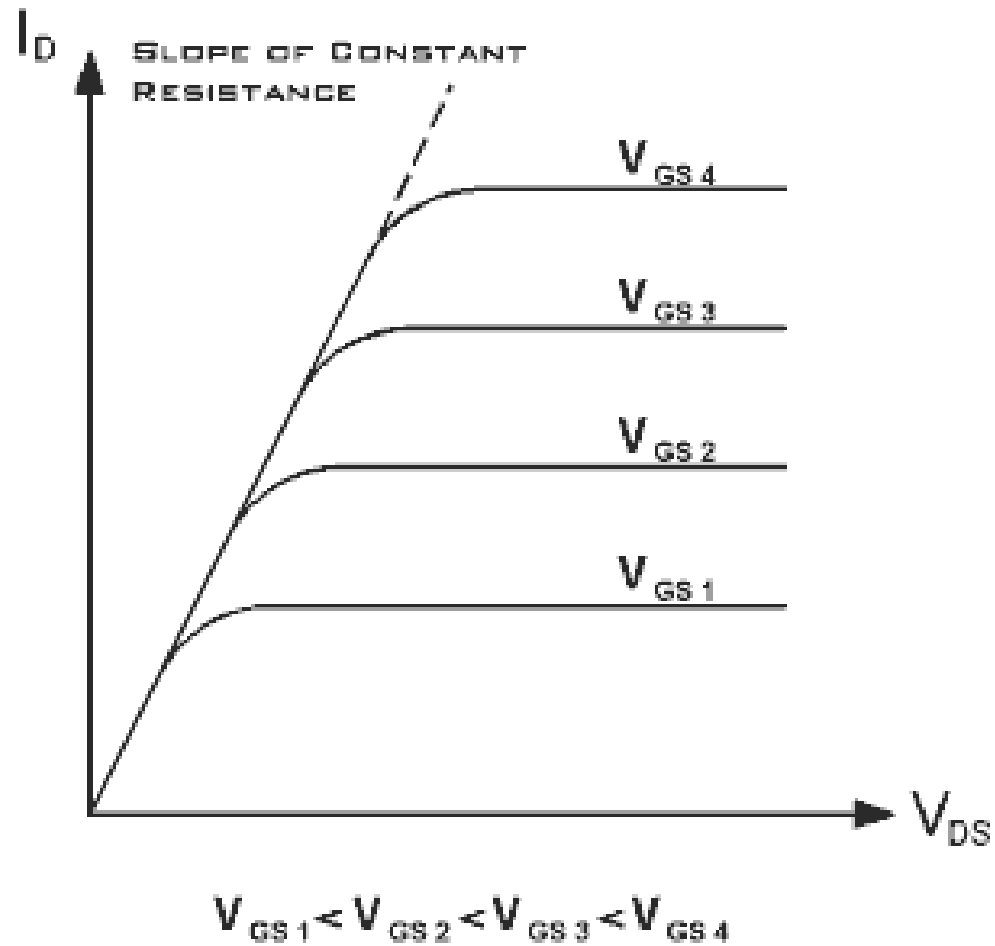
Régime de saturation

- Considérons $V_{GS} > V_{TH} \rightarrow$ Lorsque $V_{DS} \nearrow \rightarrow V_D > V_S \rightarrow V_G - V_D < V_G - V_S \rightarrow V_{GD} < V_{GS} \rightarrow$ la densité d' e^- diminue dans le canal du côté drain \rightarrow le canal est pincé en un point P, voisin du drain $\rightarrow \nearrow$ de la résistance du canal \rightarrow saturation de I_D



- I_D est donc indépendant (en pratique \rightarrow faiblement dépendant) de V_{DS} et contrôle principalement par V_{GS}

Courbes caractéristiques $I_D = f(V_{DS})$



Courbe caractéristique $I_D = f(V_{GS})$

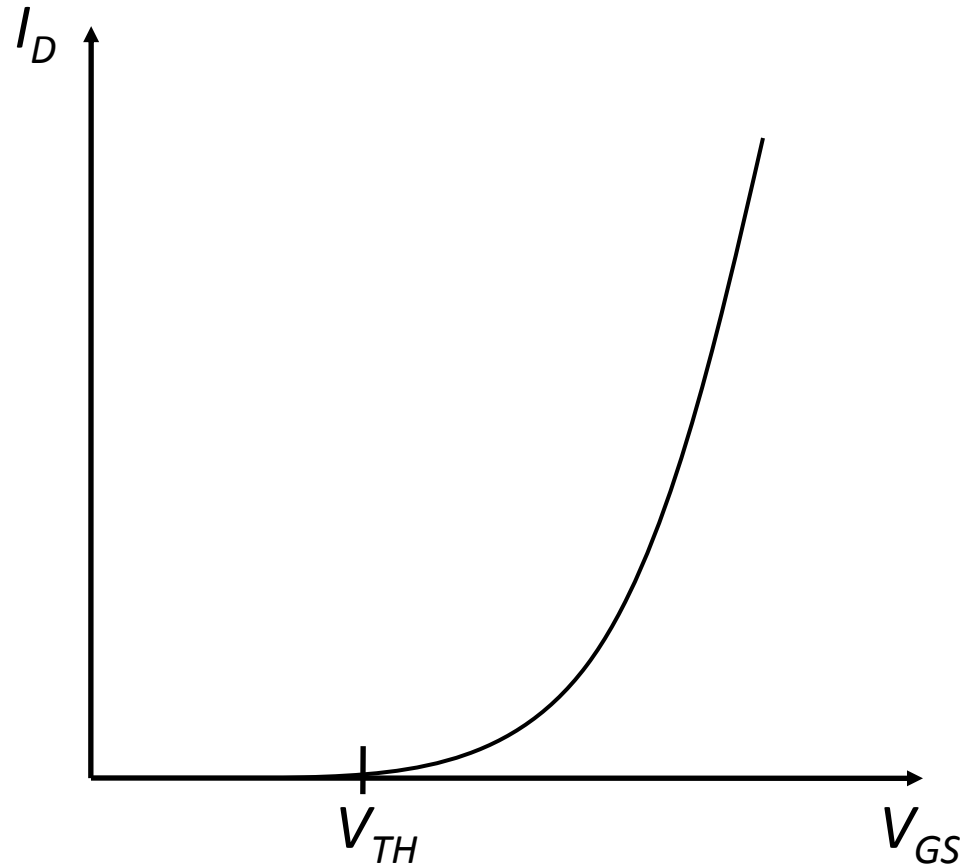
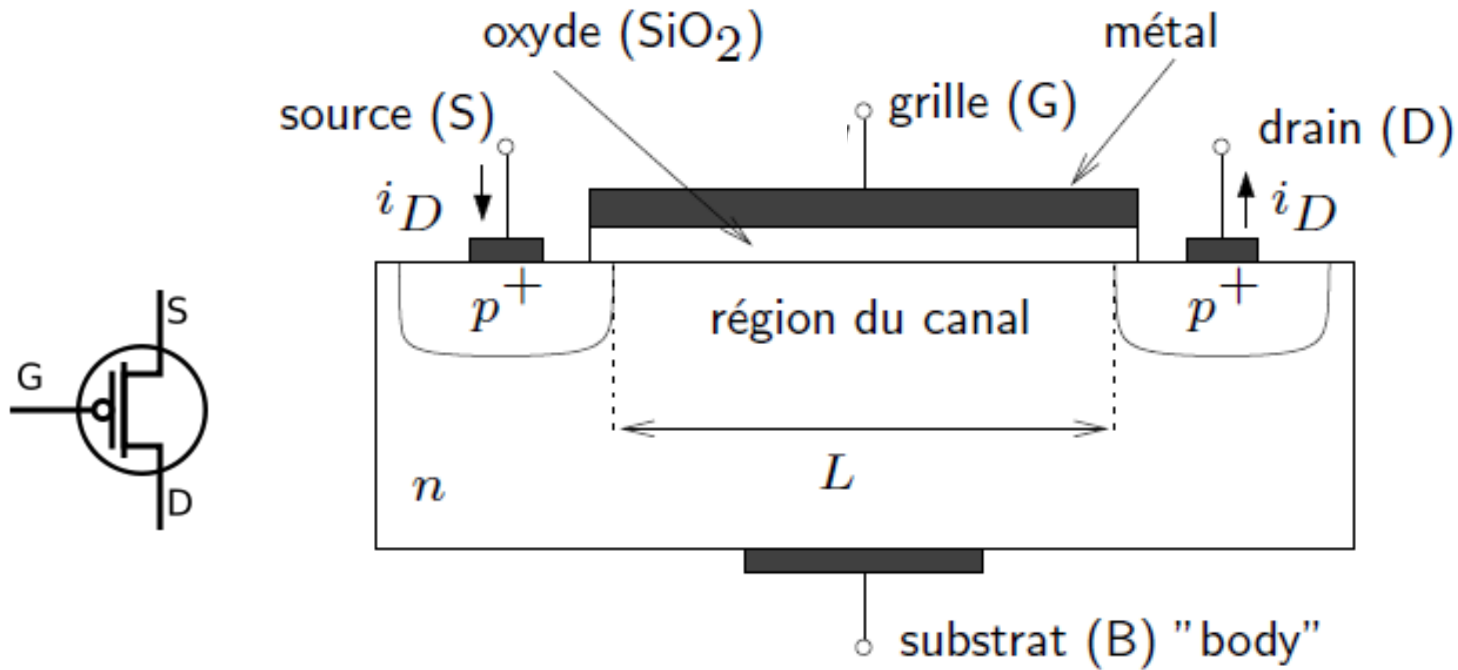


Schéma d'un MOSFET à canal p (pMOS)

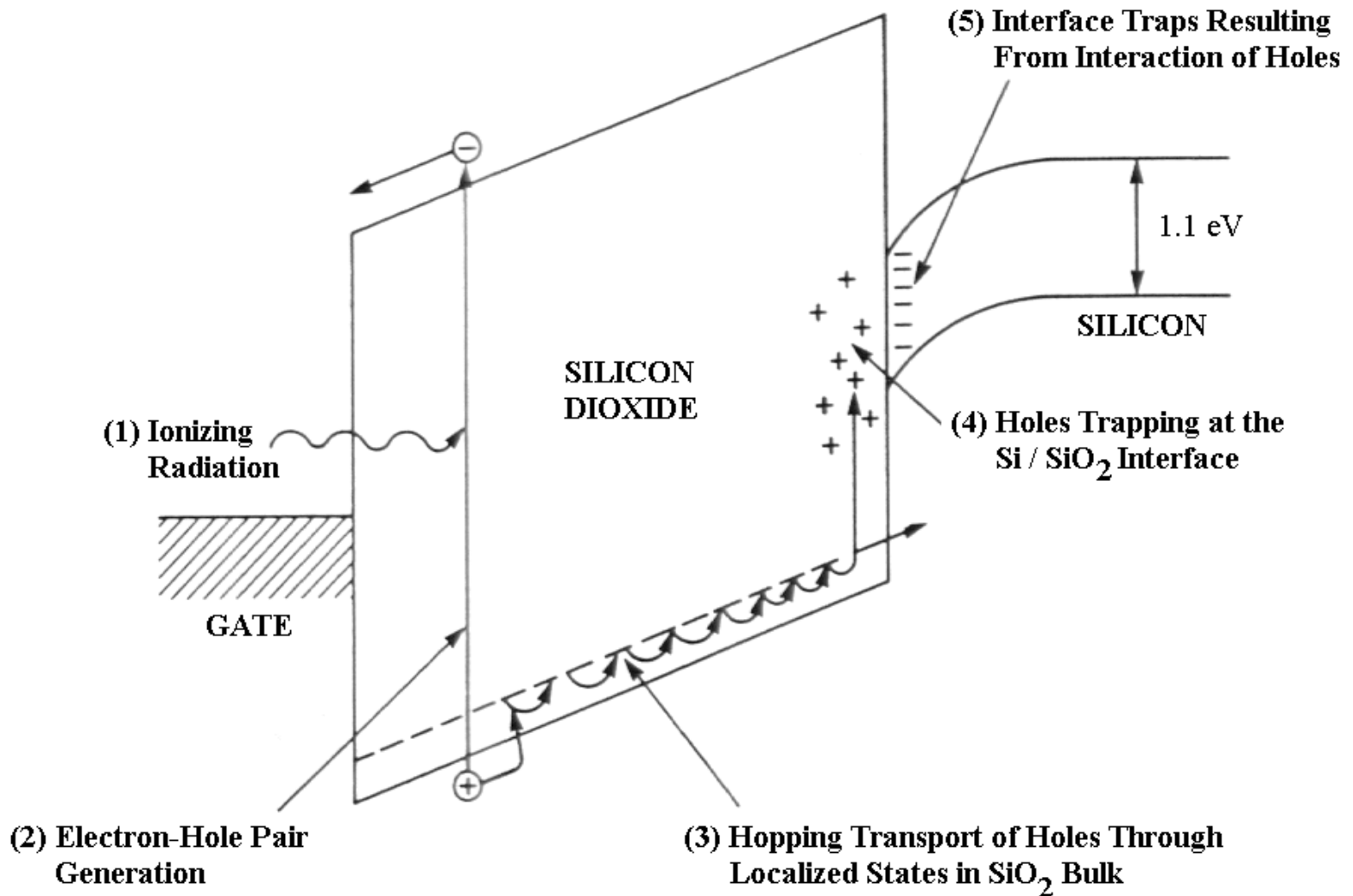


Similaire à un MOSFET à canal n mais les régions dopées sont inversées, I_D est inversé, V_{GS} et V_{DS} ont des polarités inversées et le courant de drain est transporté par des h^+

Effets des rayonnements sur un MOSFET (1)

- L'irradiation d'un MOSFET se fait en mode passif ($V_{GS} = 0$) ou en mode actif ($V_{GS} > 0$) $\rightarrow V_{GS} > 0 \rightarrow \searrow$ la recombinaison \rightarrow réponse plus sensible et plus linéaire
- Les rayonnements ionisants génèrent des paires $e^- - h^+$ dans le métal, la couche d'oxyde et le semiconducteur qui constituent le MOSFET
- Dans le métal et le semiconducteur, les paires $e^- - h^+$ sont rapidement éliminées car ces matériaux présentent une faible résistance
- Au contraire dans le SiO_2 ($W \approx 17 \pm 1$ eV pour du SiO_2) \rightarrow les paires, soit se recombinent immédiatement, soit se séparent à cause de l'action du champ électrique présent \rightarrow cependant, comportement \neq dû à leur mobilité \neq (5 à 12 ordres de grandeur)
- Supposons une tension $V_{GS} > 0$
 - \rightarrow les e^- migrent vers la grille et, dû à leur mobilité importante ($\mu = 20 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1}\text{s}^{-1}$) \rightarrow atteignent le métal et sortent de l'oxyde en un temps ≤ 1 ps
 - \rightarrow les h^+ migrent vers l'interface SiO_2 -Si plus lentement dû à leur faible mobilité (fortement dépendante de T $\rightarrow \mu = 10^{-4}$ - $10^{-11} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1}\text{s}^{-1}$) et s'accumulent à l'interface (tjs dans l'oxyde) \rightarrow apparition d'une charge + \rightarrow modification de la caractéristique du MOSFET

Effets des rayonnements sur un MOSFET (2)

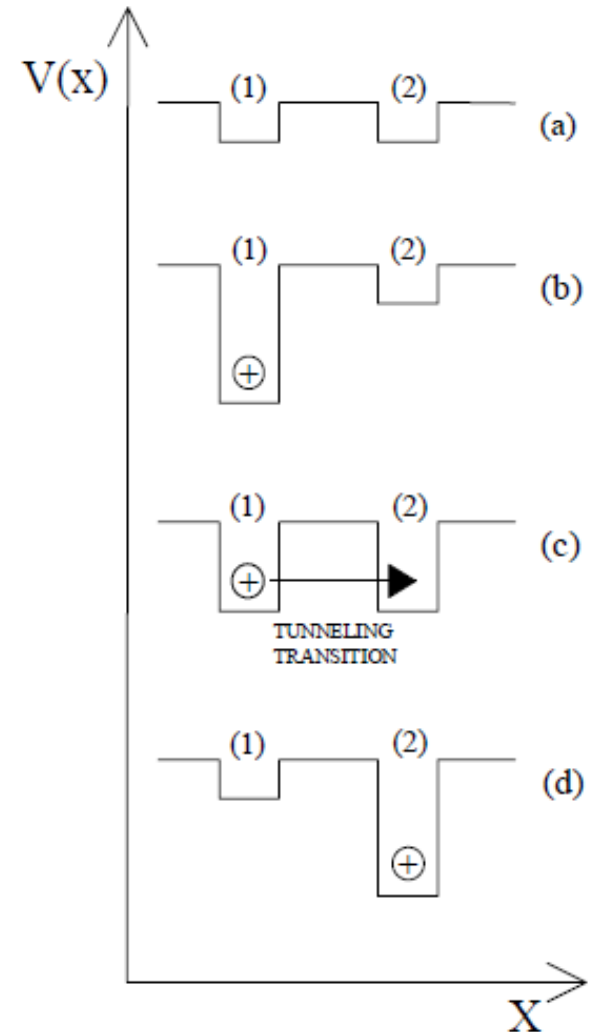


Transport des h^+ dans le SiO_2

- Dû à la faible mobilité des h^+ → le transport dans l'oxyde peut prendre qqes secondes (dépend de T)
- Modèle pour le transport des h^+ dans le SiO_2 → « Small Polaron Hopping » (SPH): transport (ou saut) de polaron (quasi-particule composée d'une charge et de son champ de polarisation) petit (chargée confinée dans un petit volume)
- Modèle SPH basé sur l'interaction forte entre le h^+ et le réseau → l'interaction provoque une distorsion du réseau à proximité du h^+ → \searrow de l'énergie du système
- Le h^+ polarise le milieu → cette polarisation interagit en retour avec la charge → implique une grande distorsion du réseau à proximité du h^+ → localisation du h^+ sur un site précis → \nearrow de la masse effective du h^+
- Ce porteur piégé est appelé un petit polaron

Modèle SPH

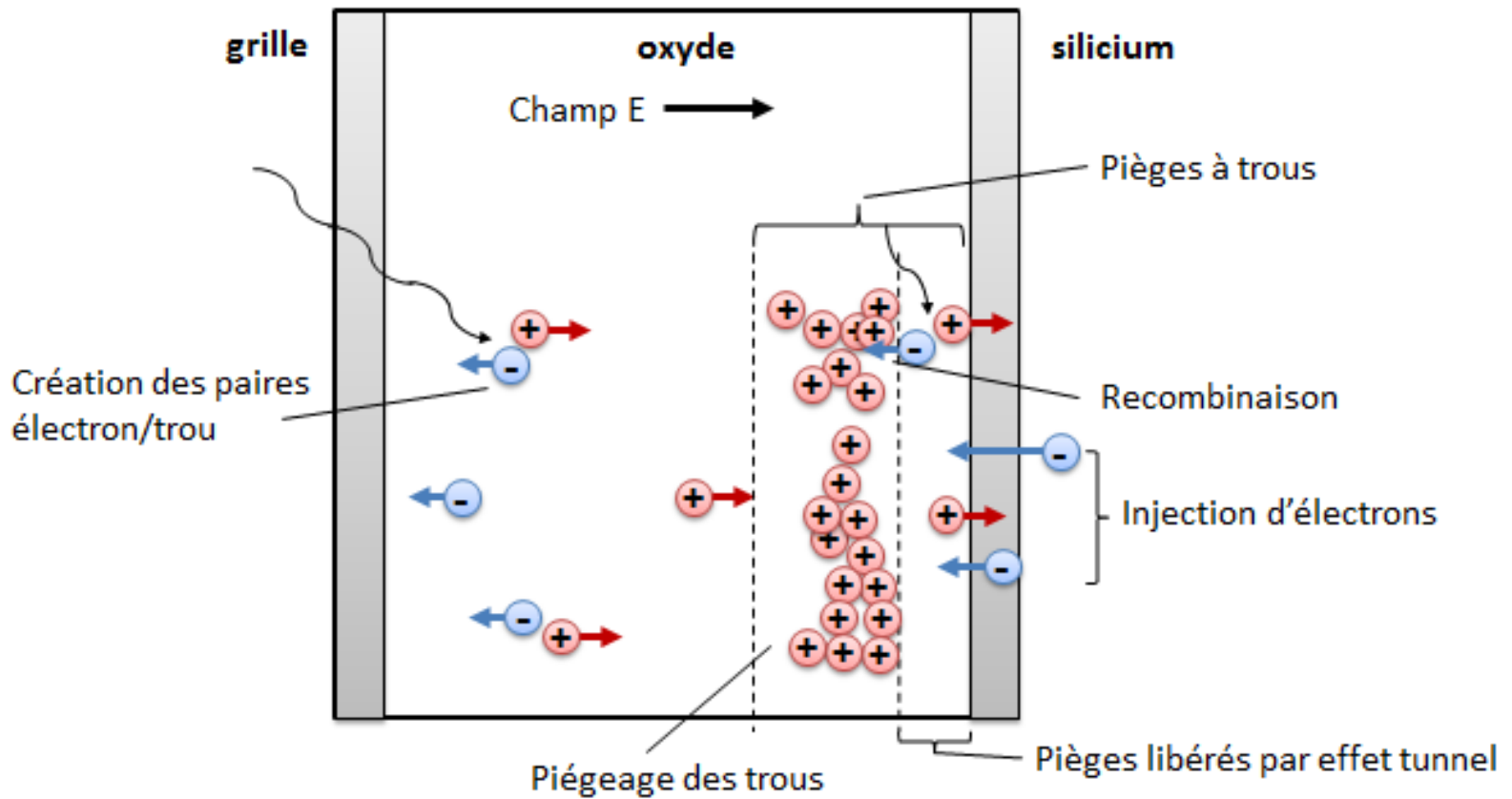
- a) Pièges localisés initialement vides
- b) Capture d'un h^+ par un site \rightarrow distorsion du potentiel du réseau au niveau site occupé
- c) Fluctuations thermiques du système \rightarrow interaction avec un autre site \rightarrow transfert du h^+ par effet tunnel
- d) État final



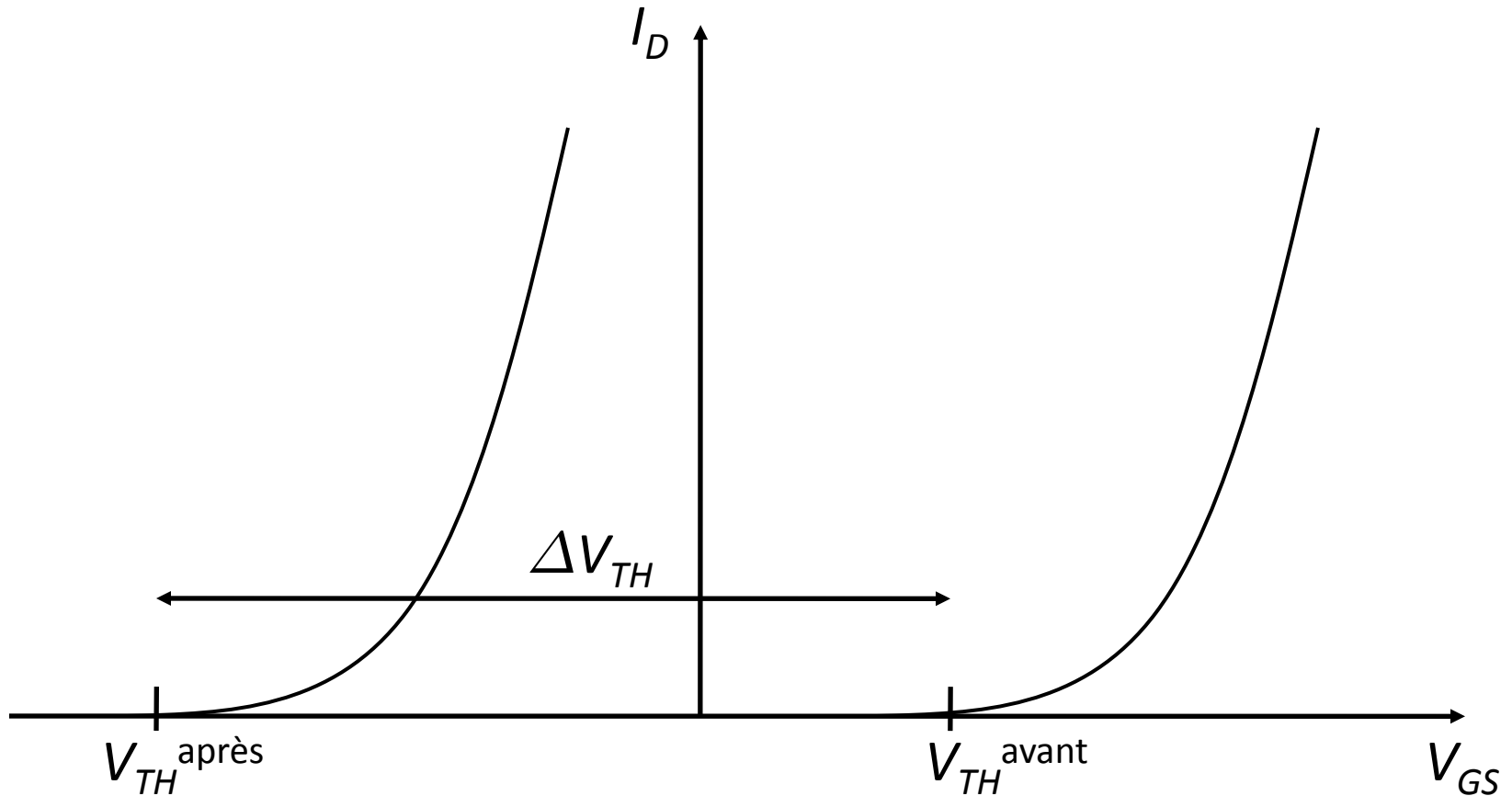
Piégeage des h^+ à l'interface $\text{SiO}_2\text{-Si}$ (1)

- Après que les h^+ générés par le rayonnement ionisant ont complètement traversé la couche d'oxyde \rightarrow accumulation des h^+ à l'interface $\text{SiO}_2\text{-Si}$ \rightarrow apparition d'une charge Q_T^+ à l'interface $\text{SiO}_2\text{-Si}$
- En conséquence \rightarrow apparition d'une charge image $-$ à la surface du semiconducteur
 - \rightarrow joue un rôle contributif dans la formation du canal n pour nMOS et à l'inverse \rightarrow tension à appliquer à la grille pour former le canal n plus petite $\rightarrow V_{TH} \searrow$
 - \rightarrow s'oppose à la formation du canal p pour un pMOS $\rightarrow |V_{GS}|$ à appliquer \nearrow pour avoir formation du canal p $\rightarrow V_{TH} \searrow$
- Q_T implique une modification (négative) ΔV_{TH} de la tension de seuil V_{TH} (mais aussi dans une moindre mesure du courant de fuite) \rightarrow shift de la caractéristique $I_D - V_{GS}$
- Cette modification ΔV_{TH} peut se maintenir durant des années
- ΔV_{TH} est une mesure de la dose absorbée dans l'oxyde

Piégeage des h^+ à l'interface $\text{SiO}_2\text{-Si}$ (2)



Modification de la caractéristique $I_D - V_{GS}$



Modification de la caractéristique $I_D - V_{GS}$ pour un nMOS soumis à un rayonnement ionisant

Expression mathématique de ΔV_{TH}

- En mode actif ($V_{GS} > 0$) \rightarrow soient q : la charge de e^- , ϵ_{ox} : la permittivité de l'oxyde, ρ_{ox} : la densité de l'oxyde, W : l'énergie pour créer une paire $e^- - h^+$, $f_y(E)$: la fraction de charges créées qui ne se recombinent pas, $f_t(E)$: la fraction de trous piégés, d_{ox} : l'épaisseur de la couche d'oxyde, D : la dose \rightarrow

$$\Delta V_{TH} = -\frac{q}{\epsilon} \frac{\rho_{ox}}{W} f_y f_t d_{ox}^2 D$$

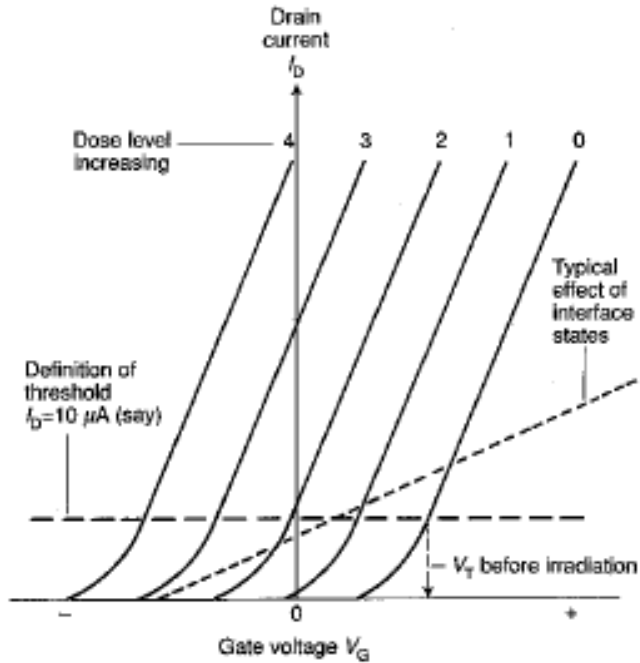
- En mode passif ($V_{GS} = 0$) \rightarrow diminution de sensibilité et perte de linéarité \rightarrow

$$\Delta V_{TH} \propto d_{ox}^2 D^{0.4}$$

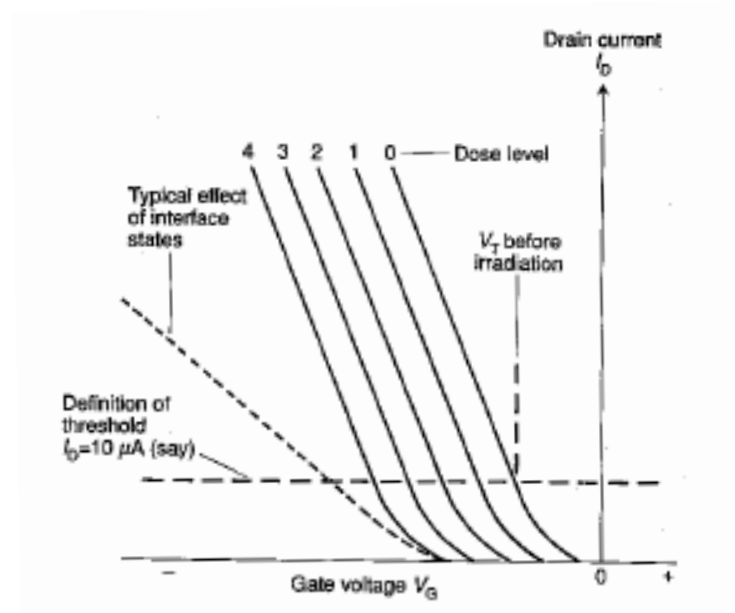
Autre effet des rayonnements sur un MOSFET (1)

- Un autre effet des rayonnements sur un MOSFET $\rightarrow \nearrow$ du nombre de pièges (pls ordres de grandeur) à l'interface $\text{SiO}_2\text{-Si}$ (« interface » signifie des 2 côtés \rightarrow dans le Si et dans le SiO_2)
- Phénomène pas encore complètement expliqué
- Constatation $\rightarrow \frac{1}{2}$ des pièges créés par l'irradiation sont donneurs et $\frac{1}{2}$ sont accepteurs \rightarrow dans le Si plus de pièges (des 2 types) \rightarrow que ce soit pour un nMOS ou un pMOS \rightarrow plus de difficultés pour obtenir le canal $\rightarrow |V_{TH}| \nearrow$ (+ distorsion de la caractéristique)
- Pour un pMOS \rightarrow cet effet s'additionne à ΔV_{TH} (car $\Delta V_{TH} < 0$) dû au piégeage des h^+
- Pour un nMOS \rightarrow cet effet contrebalance ΔV_{TH}
- En pratique \rightarrow utilisation d'un pMOS

Modification de $I_D - V_{GS}$ (effet global)



nMOS



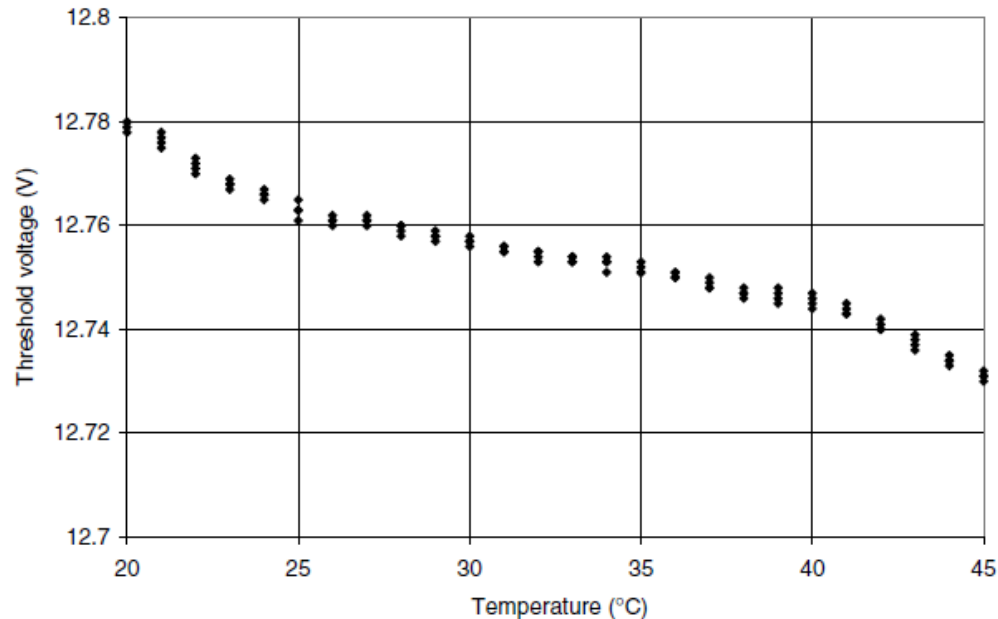
pMOS

Remarques sur l'utilisation du MOSFET

- Limite de détection inférieure « relativement élevée » → utilisation principale en radiothérapie et curiethérapie
- Pour les dosimètres MOSFET « classiques » dans le commerce → limite inférieure ≈ 1 cGy
- Recherche pour une amélioration de cette limite inférieure → actuellement: $\approx 100 \mu\text{Gy}$
- Mesure disponible à tout moment → dose ou débit de dose
- Le shift ΔV_{TH} dû à une précédente mesure doit être connu (car accumulation des h^+ dans l'isolant)
- Temps de vie limité d'un détecteur MOSFET

Effet de la température

- Très sensible à la température (→ identique aux diodes) → apparition d'un terme ΔV_{TH}^{temp}



- Entre 20 °C et 40 °C → 50 mV de \neq pour ΔV_{TH} → 10 cGy de \neq
- Généralement → 1 °C → $\Delta V_{TH}^{temp} = 4 - 5 \text{ mV}$

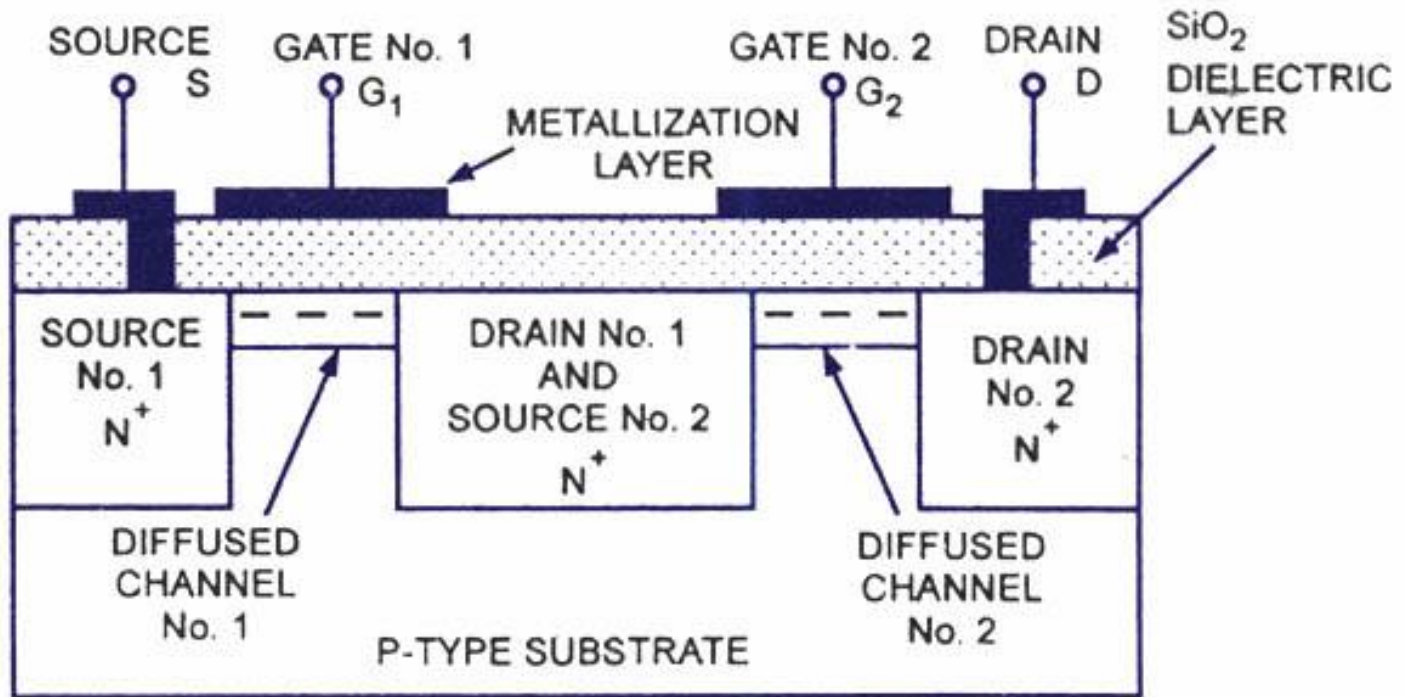
Solution au problème de T: dual MOSFET

- Dual MOSFET: 2 MOSFET identiques, fabriquée sue le même chip de Si et opérant à 2 tensions de grille \neq
- Durant l'irradiation \rightarrow chaque élément fournit un shift de la tension \rightarrow la \neq entre les 2 shifts de tension fournira une réponse \propto à la dose

$$\begin{aligned}\Delta V_{TH} &= (\Delta V_{TH}^1 - \Delta V_{TH}^{temp}) - (\Delta V_{TH}^2 - \Delta V_{TH}^{temp}) \\ &= \Delta V_{TH}^1 - \Delta V_{TH}^2\end{aligned}$$

- Pour un dual MOSFET \rightarrow variation de ≈ 0.015 mV/ $^{\circ}$ C

Dual MOSFET

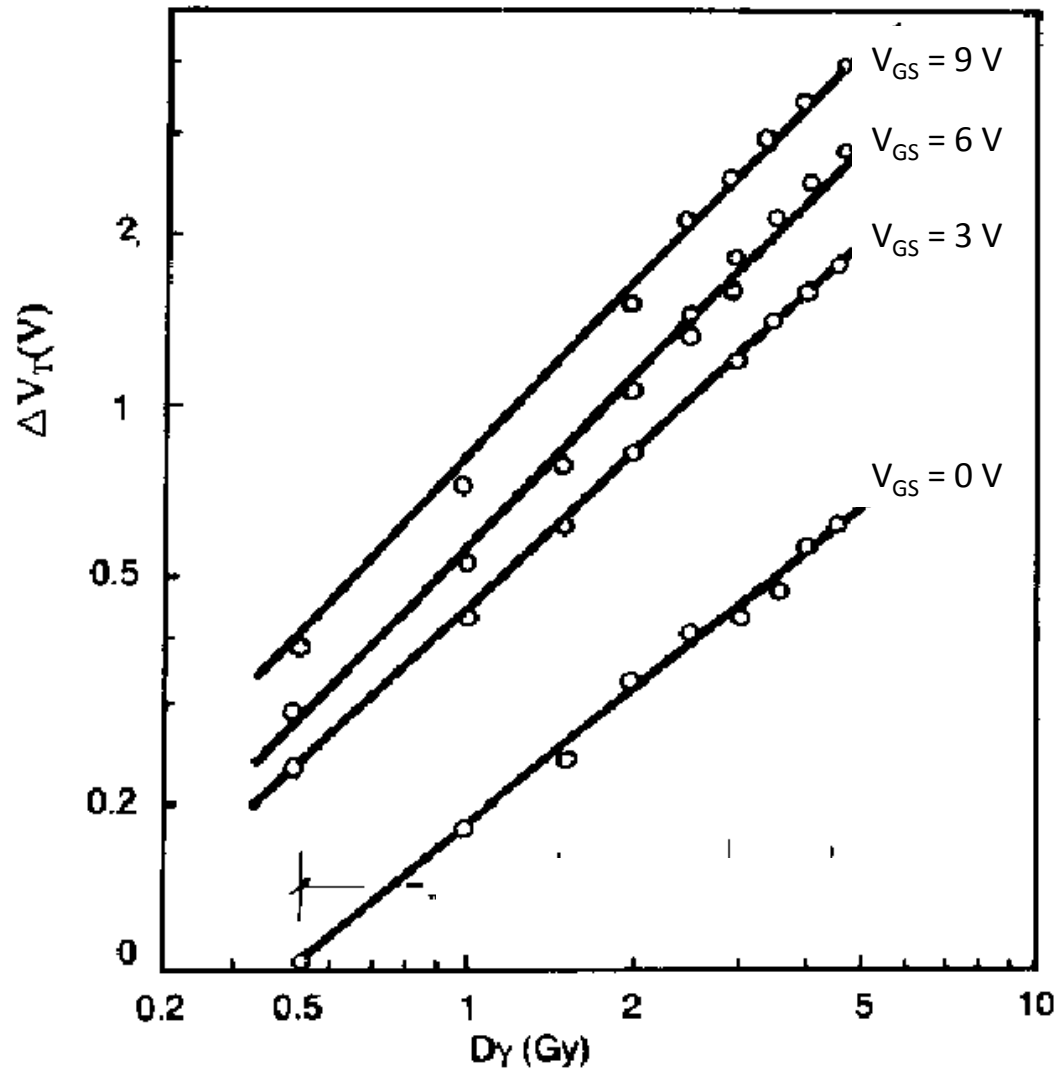


Dual-Gate N-Channel Depletion Type MOSFET

RADFET

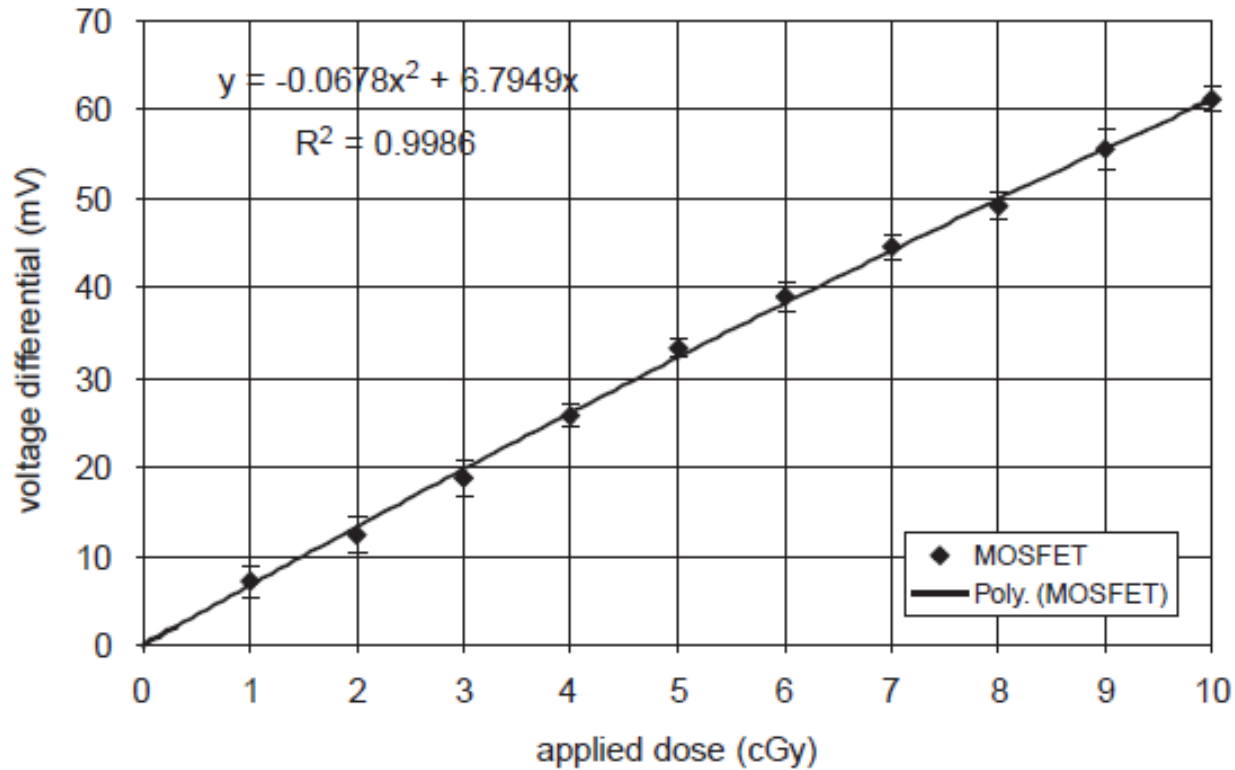
- Pour améliorer la sensibilité du détecteur → plusieurs MOSFET relié → RADFET (RADiAtion-sensing Field-Effect Transistor)
- Propriétés identiques au dual MOSFET mais plus grande sensibilité $< \mu\text{Gy}$ « de manière théorique » → en pratique moins bon

Réponse en fonction de la dose: doses élevées



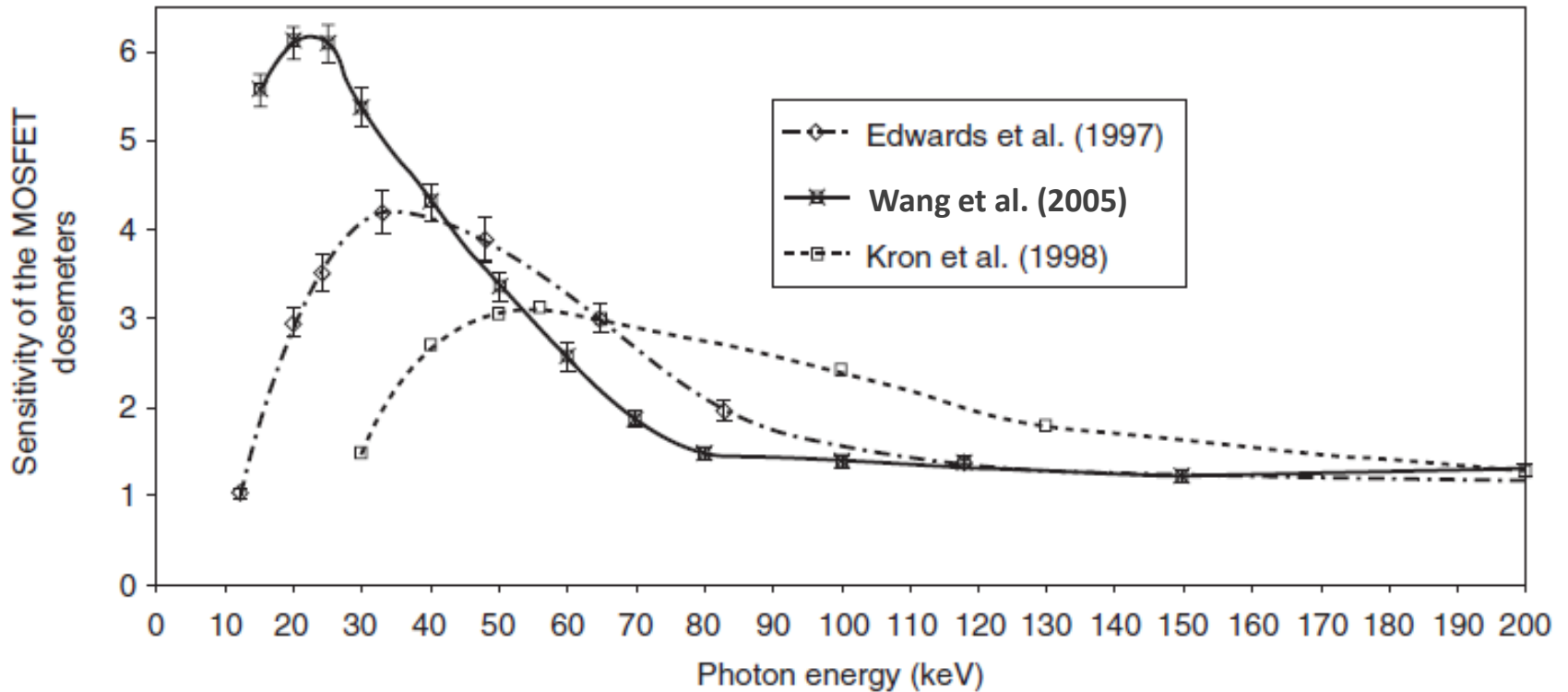
nMOS pour des γ de 1 MeV

Réponse en fonction de la dose: doses faibles



Dual pMOS pour des γ de 6 MeV

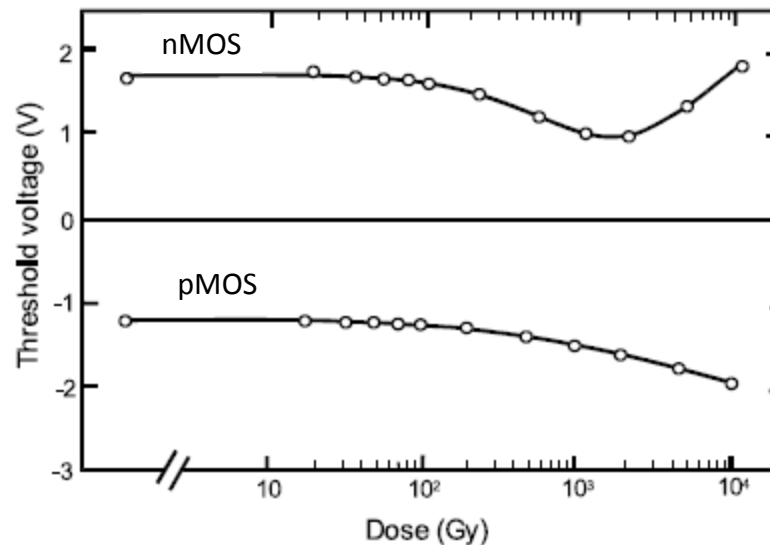
Réponse en énergie



Réponse en énergie obtenue par \neq études (γ de 6 MeV) pour \neq MOSFET \rightarrow dans tous les cas \rightarrow non-linéarité pour $E < 100$ keV

Effet de la dose cumulée

- Comme pour les diodes → l'irradiation introduit des défauts supplémentaires dans le matériau → modification de la sensibilité en fonction de la dose (pour des doses élevées)

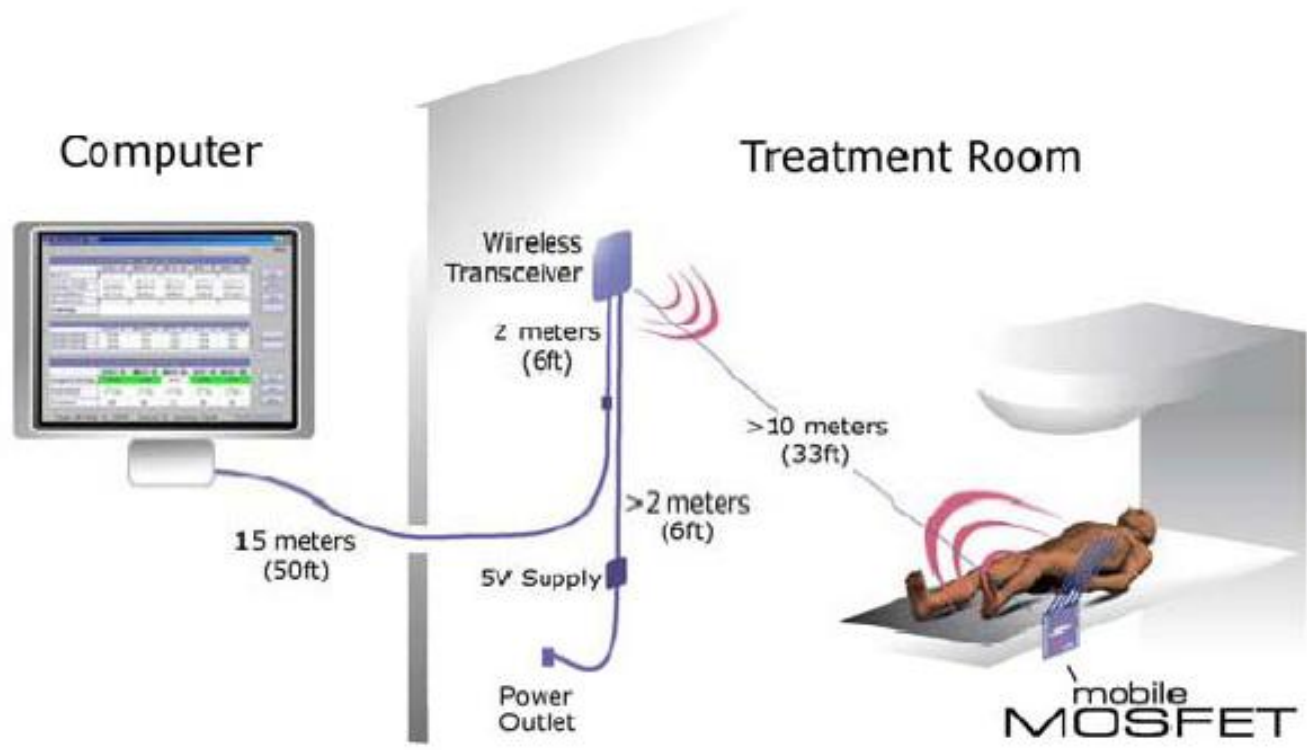


- Comportement ≠ pour des nMOS et pMOS ↔ car ≠ types de défauts et donc de pièges

Comparaison TLD-Diode-MOSFET

| Dosimeter | advantages | disadvantages |
|----------------|--|--|
| (micro) MOSFET | <ul style="list-style-type: none"> small sensitive volume small physical size real time dose information simple dose read-out neglectible beam perturbation lack of correction factors energy independent | <ul style="list-style-type: none"> limited life-time limited intrinsic precision |
| Diode | <ul style="list-style-type: none"> high intrinsic precision high sensitivity real time dose information simple dose read-out | <ul style="list-style-type: none"> energy dependent temperature dependence dose-rate dependence dependence of response on accumulated dose sensitivity changes as a result of changes in source-surface-distance (SSD), collimator size, and the presence of a wedge or tray special care needed to ensure constancy of response |
| TLD | <ul style="list-style-type: none"> desired shape and size cheap neglectible beam perturbation shape and size is variable extended life-time many TLDs can be exposed in single exposure | <ul style="list-style-type: none"> no real time dose information time consuming procedure for dose read-out limited intrinsic precision signal erased during readout easy to lose reading accurate results require care |

Applications (1)



Mobile MOSFET system de Best Medical → wireless

Applications (2)



OneDose MOSFET system de Sichel Technologies Inc. → wireless