

**Question # 1 (25 points) Le transistor bipolaire BJT.**

**-a)** Soit un transistor bipolaire de type npn dont le gain en courant est  $\beta$ . Expliquez ce qui arrive au niveau microscopique dans le transistor quand la tension base-émetteur  $V_{be}$  est soudainement augmentée par une impulsion échelon (step-funtion impulse). Expliquer le facteur de gain et décrire la nature des différentes composantes de courant qui entrent en jeu au niveau microscopique.

**Réponse :** (Se référer à la figure de la page 42). Avant l'application de l'impulsion échelon on avait à la jonction base-émetteur une barrière d'énergie potentiel  $qV_{bi}$  qui retenait les trous du côté base et les électrons du côté émetteur. Quand la tension base émetteur  $V_{be}$  est soudainement augmentée, disons à la valeur  $V_{be}$ , la barrière d'énergie potentielle entre l'émetteur et la base est **soudainement diminuée à  $q(V_{bi} - V_{be})$** , ce qui provoque d'une part l'injection de trous de la base à l'émetteur et d'autre part l'injection d'électrons de l'émetteur à la base. Cette injection correspond pour chaque sorte de porteur de charge à un courant de diffusion qui est proportionnel au gradient de population du porteur de charge. Comme le **dopage de l'émetteur est beaucoup plus grand que le dopage de la base**, par un facteur de 100 ou plus, un nombre beaucoup plus grand d'électrons sont injectés dans la base que de trous sont injectés de la base vers l'émetteur. Les électrons injectés diffusent par marche aléatoire vers la jonction base collecteur, pour ensuite dévaler "la pente de ski" que présente la jonction collecteur-base en forte polarisation inverse.

De leur côté **les trous injectés dans l'émetteur se recombinent** avec les très nombreux électrons et disparaissent presque totalement.

Deux autres composantes de courant à mentionner sont les faibles courants de trous et d'électrons dans la base qui se recombinent. Ils sont minimes dans les dispositifs modernes parce que la base est très mince, étant d'une épaisseur de 800 nm ou moins.

**-b)** On peut transformer un transistor de gain  $\beta$  en phototransistor en déconnectant le fil électrique reliant la base (base ouverte, open base) et en dirigeant la lumière à détecter sur la jonction collecteur-base. Supposez que la majorité de l'énergie lumineuse est convertie en paires d'électrons-trous dans la jonction base-collecteur qui est en forte polarisation inverse (reverse bias ou back-bias). Quelle est la destination ultime d'un courant de trous  $I_p$  photocréé dans la jonction base-collecteur et quelle sera dans ces circonstances la valeur du courant  $I_n$  d'électrons collectés au collecteur?

**Réponse :** **Les trous photocréés** dans la "pente de ski" ne peuvent qu'aller vers la base (ils "flottent comme des bulles d'air sous la "glace" du gap) et de là **vers l'émetteur** puisque le fil de base est déconnecté (base flottante). C'est leur destination ultime. Une fois dans l'émetteur ils se recombinent avec des électrons et disparaissent. Le courant de trous  $I_p$  ainsi injecté dans l'émetteur correspond à un abaissement de la barrière de potentiel  $V_{be}$  tel qu'**un courant d'électrons de valeur  $\beta I_p$  est injecté** dans la base. Ce courant diffuse vers la "pente de ski" de la jonction base-collecteur et la dévale, s'ajoutant au courant  $I_n = I_p$  directement créé par la lumière. Le courant d'électrons au collecteur sera donc  **$(\beta + 1)I_p$**  avec le signe choisi pour indiquer des électrons entrant dans le collecteur à partir de la jonction base-collecteur.

**-c)** Le transistor BJT npn fournit non seulement un gain en courant mais aussi un gain en puissance considérable puisque les électrons dévalent une pente de potentiel allant jusque dans les kilovolts. Quel phénomène physique vient limiter la tension ultime qu'on puisse appliquer au collecteur d'un

transistor? Expliquer brièvement. Est-ce que ce phénomène a une autre utilité en électronique ou en opto-électronique?

**Réponse :** c'est le phénomène du **claquage** qui peut se produire soit par **multiplication en avalanche** des électrons et des trous, soit **par effet tunnel** des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction. Dans les deux cas le phénomène se produit quand le champ électrique dépasse une valeur seuil qui est de l'ordre du million de volts par centimètre. Les diodes Zener sont une des applications du phénomène de claquage en électronique. Les photodiodes à gain optique causé par la multiplication en avalanche (**photodiodes à avalanche**) sont très utiles pour détecter un seul photon avec une précision temporelle de l'ordre de 50 ps.

## Question #2 (25 points) Le transistor à effet de champ MESFET.

**-a)** Considérez un MESFET construit sur un substrat semi-isolant de GaAs recouvert par une couche épitaxiale de 330 nm d'épaisseur dopée n avec  $N_d = 2 \times 10^{17}$  donneurs/cm<sup>3</sup>. On utilise l'or comme électrode de grille. La barrière de Schottky est 0.8 électron-volts, la source est à la masse. Pour une tension de grille à la masse ( $V_G = 0$ ) calculez la barrière d'énergie potentielle  $eV_{bi}$  qui confine les électrons sous la grille. Quelle est dans ce cas l'épaisseur de la zone déplétée sous la grille?

**Réponse :** On calcule d'abord l'écart de Fermi :

$$e\phi_F^M = k_B T \times \ln(N_C/N_d) = 0.026 \ln(4.7 \times 10^{17}/2 \times 10^{17}) = 22 \text{ meV.} \quad (1)$$

$$\text{On a donc : } eV_{bi} = e(\phi_b - \phi_F^M) = 0.8 - 0.022 = 0.778 \text{ eV.} \quad (2)$$

La zone de déplétion sous la grille a l'épaisseur :

$$d(x) = [2\varepsilon(V_{bi} - V_G)/qN_d]^{1/2} \quad (3)$$

$$\text{Avec } V_G = 0 \text{ on a : } d(x) = [2 \times 12.9 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 0.778 / (1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^{23})]^{1/2} \quad (4)$$

$$d(x) = 74.5 \times 10^{-9} \text{ m} = 74.5 \text{ nm}$$

**-b)** Quelle tension de grille (valeur et signe) minimum pourra complètement dépléter le canal de conduction n?

**Réponse :** En (3) on prend  $d(x) = 330 \text{ nm}$ , ce qui donne pour  $V_{bi} - V_G$  :

$$V_{bi} - V_G = qN_d d^2(x)/2\varepsilon = 1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^{23} \times (330 \times 10^{-9})^2 / (2 \times 12.9 \times 8.85 \times 10^{-12}) = 15.26 \text{ volts.}$$

$$\text{D'où } V_G = V_T = 0.778 - 15.26 = -14.48 \text{ volts} \quad (5)$$

Notez que la formule (3) pour  $V_p$  à la page 47 des notes, avec  $h = d(x)$  donne le même résultat.

**-c)** Les régions immédiatement sous les électrodes sont dopées n+ (i.e.  $2 \times 10^{18}$  et davantage donneurs par cm<sup>3</sup>), dans quel but? Expliquez brièvement.

Réponse : le dopage très fort vise à éliminer ou grande emnt réduire l'effet rectificateur de la barrière de Schottky qui se manifeste quand un métal est déposé sur un semiconducteur. Quand le dopage est très fort la zone déplétion sous la barrière de Schottky est très mince et les électrons la traversent aisément par effet tunnel.

**:Question # 3 (35 points) Le MOSFET.** Considérer le MOSFET classique construit sur un substrat en silicium dopé de type p à  $4 \times 10^{16}$  /cm<sup>3</sup>. La grille est isolée du silicium par une couche de silice (oxyde de silicium SiO<sub>2</sub>, constante diélectrique 3.9) de 45 nm d'épaisseur. Supposer que le choix du matériau est tel que  $V_{fb}$  (flat band voltage) est nul.

**-a)** Comparer à l'aide de dessins l'effet d'appliquer une tension d'une part négative et d'autre part positive à la grille sur les courbes décrivant les bandes d'énergie et sur la densité d'électrons et de trous en fonction de  $x$ , l'axe  $x$  étant perpendiculaire à la grille.

**-b)** quelle doit être la valeur de la tension  $V_G$  (valeur et signe) sur la grille pour créer un canal d'inversion sous la silice (tension de seuil  $V_T$ ); expliquez l'origine du "2" dans  $V_s = 2 \phi_F$ .

Réponse : On a :

$$V_T = V_{fb} + V_{ox} + V_s \quad (1)$$

$$\text{Ici } V_{fb} = 0 \text{ et } V_s = 2 \phi_F = 2 \times k_B T \times \ln(N_a/n_i) = 2 \times 0.026 \ln(4 \times 10^{16}/10^{10}) = 2 \times 0.395 = 0.79 \text{ volt} \quad (2)$$

$$V_{ox} = Q_s/C_{ox} = Q_s d_{ox}/\epsilon_{ox} = (4\epsilon_s e N_a \phi_F)^{1/2} d_{ox}/\epsilon_{ox}$$

$$Q_s = (4 \times 12.9 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 4 \times 10^{22} \times 0.395)^{1/2} = 1.074 \times 10^{-3} \text{ Coulomb/m}^2 \quad (3)$$

$$V_{ox} = 1.074 \times 10^{-3} \times 45 \times 10^{-9} / (3.9 \times 8.85 \times 10^{-12}) = 1.40 \text{ volt} \quad (4)$$

$$V_T = 0.79 + 1.4 = 2.19 \text{ volt} \quad (5)$$

**-c)** pour les conditions en **-b)** porter en graphique avec les valeurs numériques, la densité de toutes les charges en fonction de  $x$  en indiquant brièvement leur nature et leur rôle;

**-d)** Quel élément physique distingue fondamentalement la construction d'un MOSFET par rapport à un MESFET et quel est son paramètre d'importance vitale. Quelle devra-t-être la plage de valeurs de ce paramètre en 2006 pour rencontrer les objectifs de la célèbre "Roadmap to the future"?

**Question #4 (15 points). Miniprojet.** Les informations données dans les réponses seront gardées par Michel Duguay de façon strictement confidentielle.

**-a)** À votre connaissance, quelle est l'avantage significatif de votre innovation sur la compétition? Ou bien, s'il n'y a aucune compétition connue, quel est son avantage du point de vue du consommateur?

**-b)** Quelle autre idée a été considérée puis mise de côté par votre équipe, et pour quelle raison?

**-c)** Quelle est l'importance d'écrire ses idées innovatrices dans un cahier relié et de faire signer par un témoin qui n'est pas un co-inventeur ou un membre de la parenté? L'avez-vous fait?