

Résumé de cours M1 Microélectronique

Module : Physique des composants semi-conducteurs 2

Aperçu sur les hétérojonctions et le HBT

Prof. Abdelhamid BENHAYA

Directeur du Laboratoire d'Electronique Avancée
Responsable Salle Blanche

Département d'Electronique
Faculté de Technologie
Université Batna 2

<https://youtu.be/MOjjirkQ75o>

Domaines d'intérêt:

Technologie des semi-conducteurs
(Matériaux et dispositifs photovoltaïques)

e-mail: a.benhaya@univ-batna2.dz
benhaya_abdelhamid@yahoo.fr

Tel: +213 (0)7 73 87 37 84

Aperçu sur les hétérojonctions et le HBT (Heterojunction Bipolar transistor)

Plan

Hétérojonctions

Transistor bipolaire à hétérojonction

BIBLIOGRAPHIE

Langue Anglaise

1. Marius Grundmann, The Physics of Semiconductors, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
2. S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, JOHN WILEY & SONS, 2007.
3. <http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/contents.htm>

Langue Française

1. A. Vapaille et R. Castagné, Dispositifs et circuits semi-conducteurs, Physique et technologie, Dunod, 1987.
2. CHRISTIAN ET HELENE NGÖ, Introduction à la physique des semi-conducteurs, Dunod, 1998.
3. H. MATHIEU, physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Dunod, 2001.
4. <https://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/>
5. <http://koeniguer.perso.cegetel.net/ips/ips.html>

Aperçu sur les hétérojonctions et le HBT (Heterojunction Bipolar transistor)

1^{ère} Partie
Hétérojonctions

Aperçu sur les hétérojonctions

- **1. Homojonction**

- Lorsqu'on réalise une jonction entre deux matériaux identiques, on dit qu'on a une homojonction ou jonction tout court.

- **2. Hétérojonction**

- Dans le cas où la jonction réunit deux matériaux différents, on dit qu'on a une hétérojonction.

□ Dans la technologie des semi-conducteurs, les hétérojonctions les plus intéressantes sont celles qui sont constituées de matériaux semi-conducteurs ayant un gap et un paramètre de maille très proches, car, sur le plan théorique, on peut aborder le problème en supposant que :

✓ Dans le volume, la structure électronique de chacun des matériaux ne change pas.

✓ A l'interface, il s'agit simplement d'une transition brutale des propriétés électroniques d'un matériau à l'autre.

Aperçu sur les hétérojonctions

Conditions de réalisation d'une hétérojonction

Pour réaliser une hétérojonction, on fait croître une couche d'un semi-conducteur 2 sur un semi-conducteur 1.

Pour réussir cette réalisation, il faut que :

- Les 2 semi-conducteurs présentent **la même symétrie** dans **le plan de l'interface**;
- Les **paramètres cristallins** soient **voisins** (adaptation de maille à 1 %);
- Les **coefficients de dilatation thermiques** soient **proches** (réalisations à hautes températures).

Aperçu sur les hétérojonctions

Matériaux utilisés

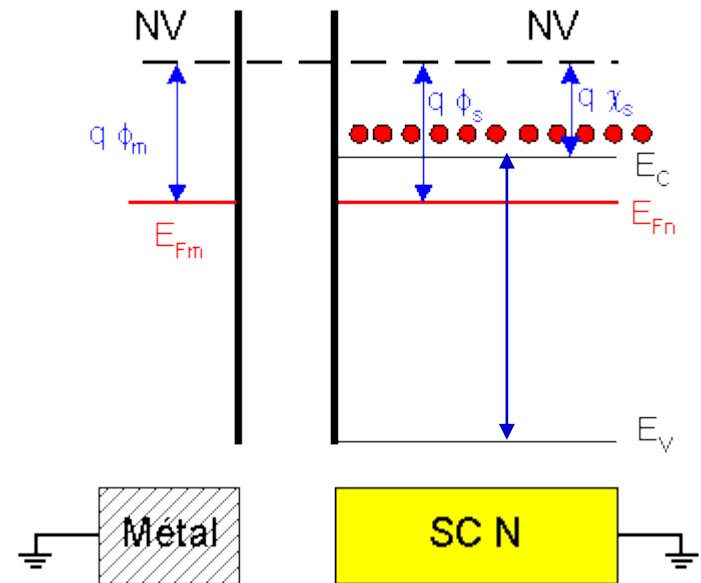
Les matériaux les plus rencontrés sont :

- **GaAs** sur **Ge** (structures zinc-blende sur diamant, paramètre de maille $5,6531 \text{ \AA}$ sur $5,6575 \text{ \AA}$) utilisé dans la réalisation d'hétérotransistors.
- **GaAlAs** sur **GaAs** (structures zinc blende, paramètre de maille varie de $5,6531 \text{ \AA}$ pour GaAs à $5,6622 \text{ \AA}$ pour AlAs) utilisé dans la réalisation d'hétérotransistors, de diodes électroluminescentes et de diodes lasers.

Aperçu sur les hétérojonctions

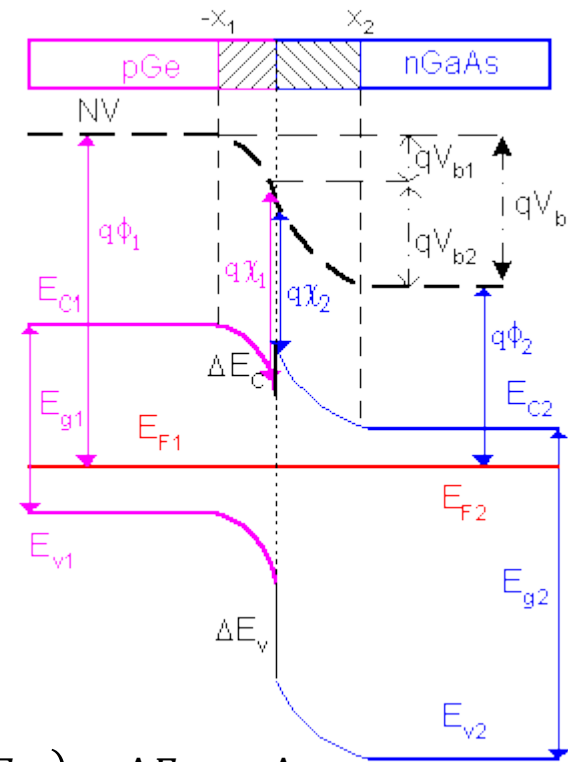
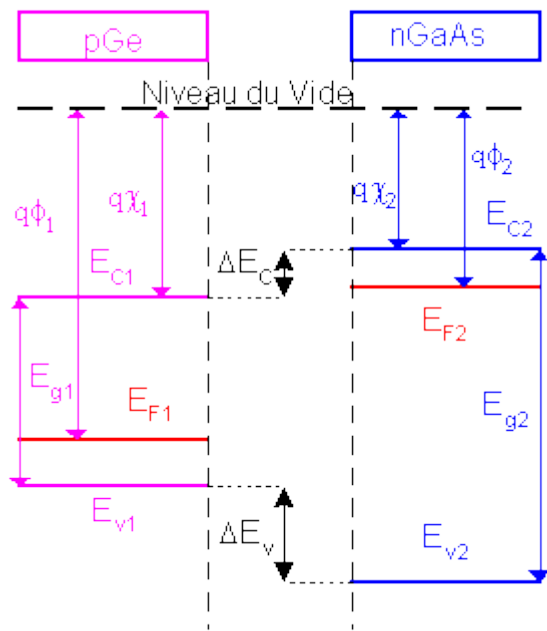
Paramètres d'un semi-conducteur

- **Niveau du Vide** (vacuum level) :
Energie d'un électron dans le vide sans énergie cinétique.
- **Travail de sortie $q\phi$** (work function) :
Distance qui sépare le niveau de **FERMI** du **niveau du Vide**.
 - Ordre de grandeur: **2.2 à 5.7 eV** pour les métaux;
 - **Dépend du dopage** pour les semi-conducteurs.
- **Affinité électronique $q\chi$** (electron affinity) : Distance qui sépare le **minimum de la Bande de Conduction** du **niveau de vide**



La bande interdite:
Distance énergétique $E_c - E_v$

Aperçu sur les hétérojonctions



$$\Delta E_c = q(\chi_1 - \chi_2)$$

$$\Delta E_v = (q\chi_2 + E_{g2}) - (q\chi_1 + E_{g1}) = \Delta E_g - q\Delta\chi$$

$$qV_b = q\phi_1 - q\phi_2 = qV_{b1} + qV_{b2}$$

Diagramme énergétique d'une hétérojonction avant et après contact

Aperçu sur les hétérojonctions

Offset des bandes

Le **saut à l'interface** est appelé **offset** des bandes de valence et de conduction.

Offset de la bande de conduction

$$\Delta E_C = q\chi_1 - q\chi_2 = q\Delta\chi$$

C'est la différence entre le minimum de la bande de conduction des deux matériaux :

Offset de la bande de valence

C'est la différence entre le maximum de la bande de valence des deux matériaux :

$$\Delta E_V = (q\chi_2 + E_{g2}) - (q\chi_1 + E_{g1}) = \Delta E_g - q\Delta\chi$$

Remarque1 : On constate, d'après ce qui précède que :

$$\Delta E_C + \Delta E_V = \Delta E_g$$

Aperçu sur les hétérojonctions

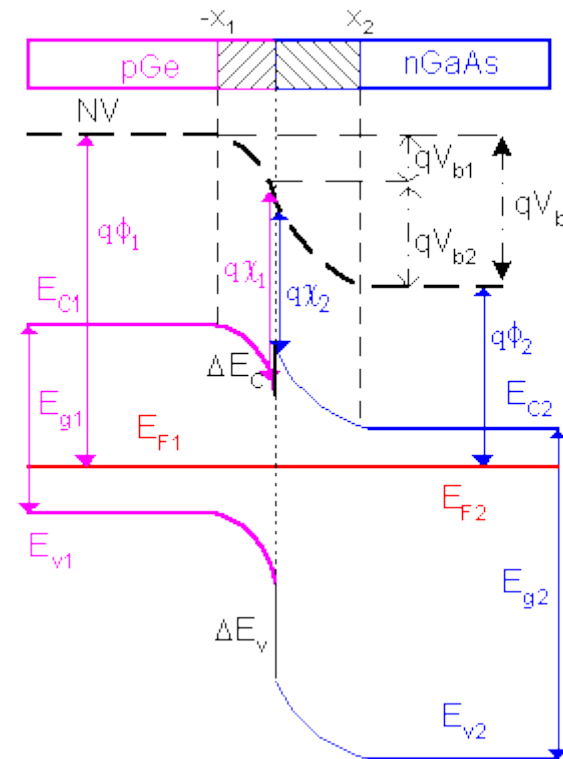
Barrières de potentiel

La diffusion des électrons du GaAs 'N' vers le Ge "P" est bloquée par une barrière de potentiel qV_{b1}

La diffusion des trous de Ge vers GaAs est bloquée par une barrière qV_{b2}

La barrière de potentiel total est telle que :

$$qV_b = q\phi_1 - q\phi_2 = qV_{b1} + qV_{b2}$$



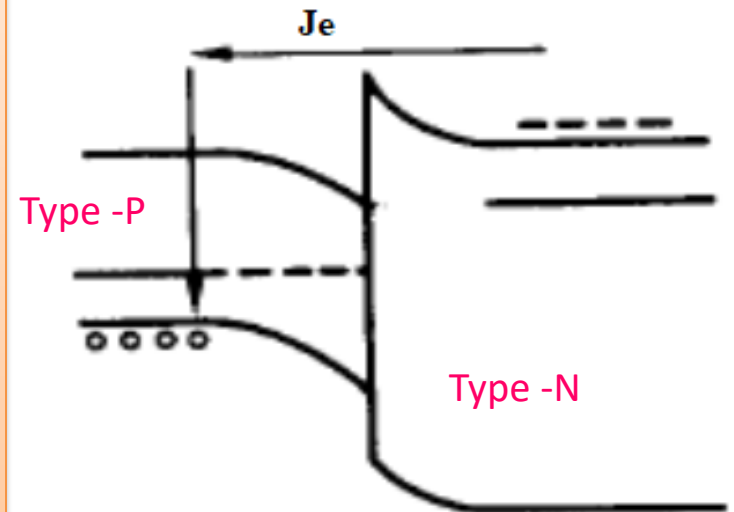
Aperçu sur les hétérojonctions

Mécanismes de passage du courant (cas anisotype)

Modèle d'Anderson

Pour une jonction anisotype **polarisée en direct**, le passage d'électrons de la région N vers la région P se fait **par dessus le spike** avec recombinaison avec les trous de la région P.

Pas d'injection de trous de la région P dans la région N à cause **de la barrière de potentiel accrue** de ΔE_v .

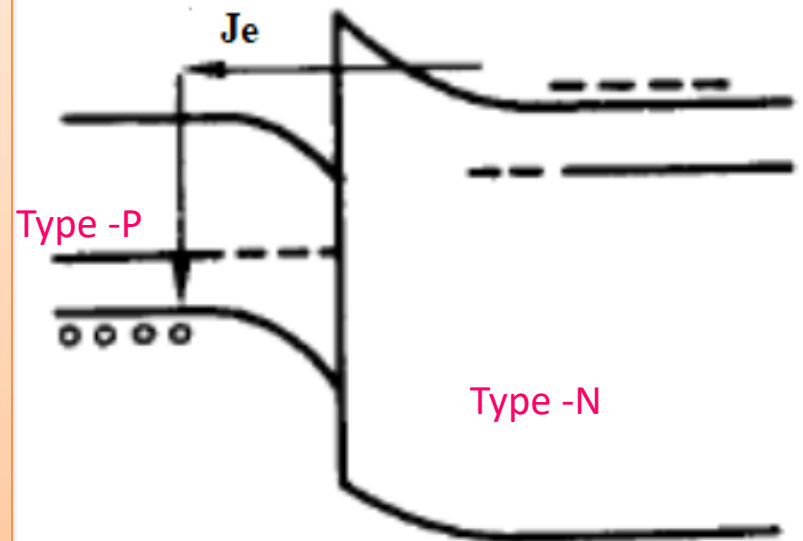


Aperçu sur les hétérojonctions

Mécanismes de passage du courant (cas anisotype)

Modèle de Rediker

le passage d'électrons de la région N vers la région P se fait **par effet tunnel à travers le spike** avec recombinaison avec les trous de la région P.

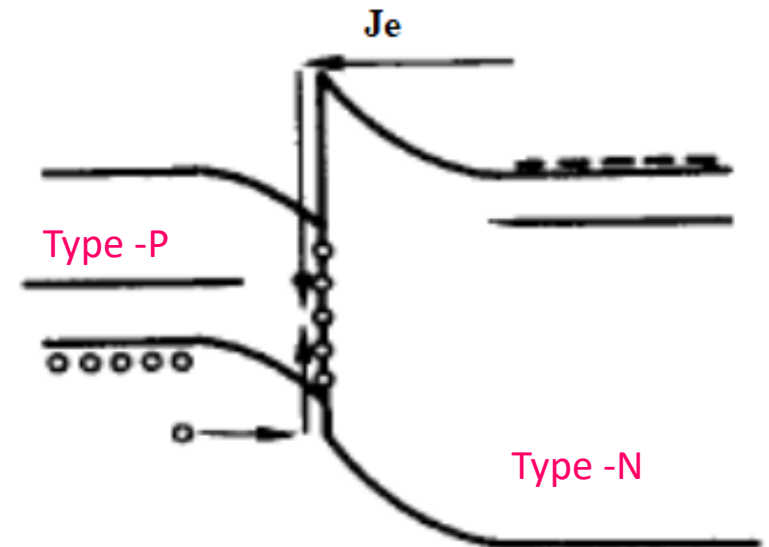


Aperçu sur les hétérojonctions

Mécanismes de passage du courant
(cas anisotype)

Modèle de Dolega

Dans ce cas, il y a **intervention des états d'interface** qui capturent les **électrons** de la région N et **les trous** de la région P et **assurent la recombinaison** des deux types de porteurs de charge.



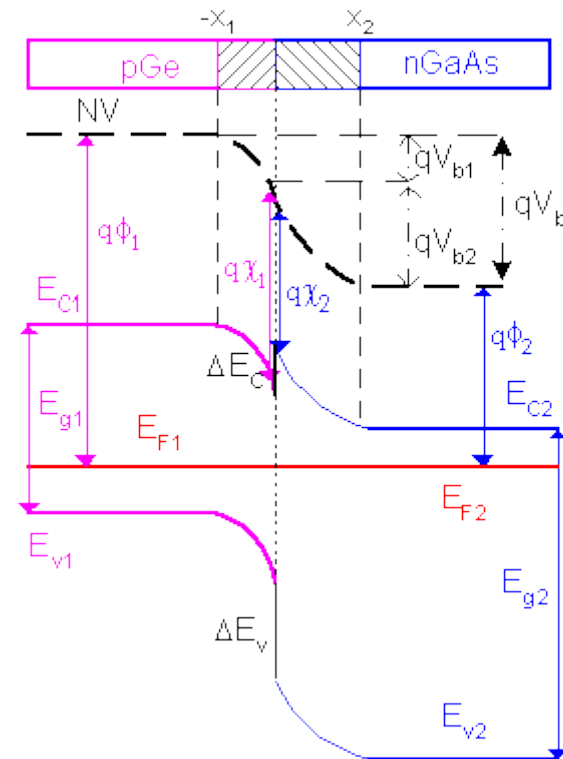
Aperçu sur les hétérojonctions

Zone de charges d'espace

L'extension de la zone de charges d'espace (ZCE) des deux cotés de la structure est donnée par:

$$x_1 = \sqrt{\frac{2 \epsilon_1 \epsilon_2 N_D V_b}{q N_A (\epsilon_2 N_D + \epsilon_1 N_A)}}$$

$$x_2 = \sqrt{\frac{2 \epsilon_1 \epsilon_2 N_A V_b}{q N_D (\epsilon_2 N_D + \epsilon_1 N_A)}}$$



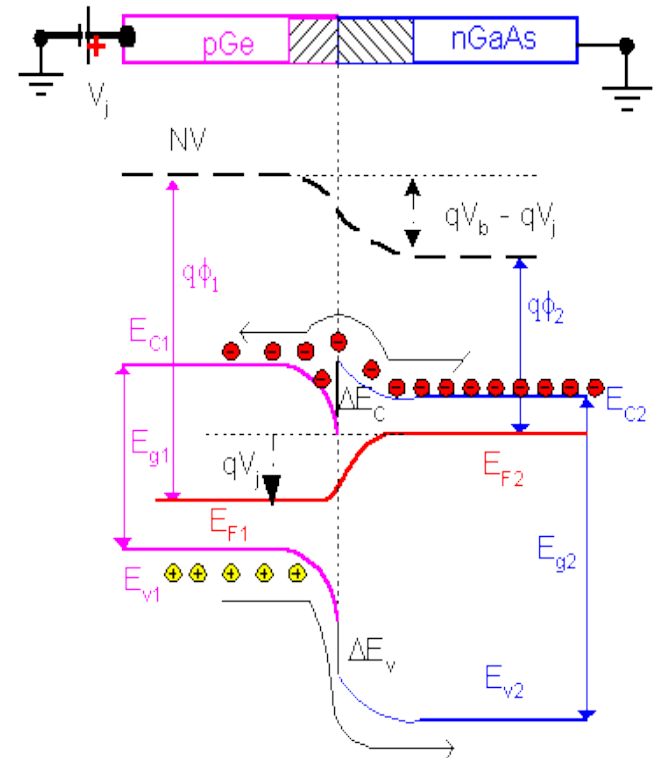
Aperçu sur les hétérojonctions

Hétérojonction polarisée en direct

Il ya **diminution de la barrière** de potentiel qui s'oppose aux passage des électrons majoritaires de 2 vers 1 .

Par contre, les **trous majoritaires de 1** doivent franchir **une barrière** de potentiel **beaucoup plus grande** pour aller en 2. Il en résulte que $J_p \ll J_n$.

Le **courant direct** qui en résulte est **essentiellement constitué** par les porteurs majoritaires du semi-conducteur 2

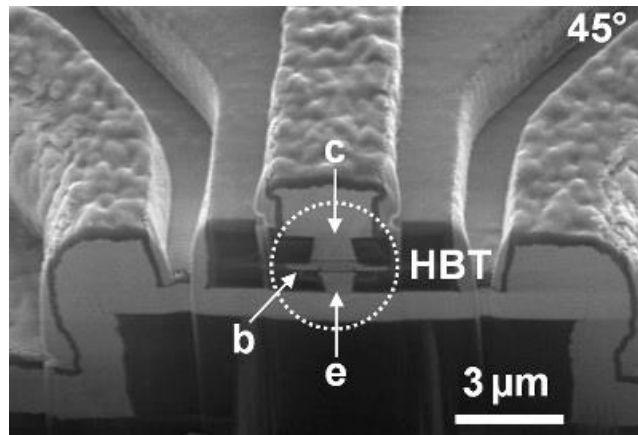


Aperçu sur les hétérojonctions

Remarques importantes

Rappelons que l'étude des hétérojonction n'est pas une chose facile. Il est à noter que:

- Le modèle présenté ci-dessus est une approximation grossière valable uniquement pour les hétérojonctions Ge-GaAs et GaAs-GaAlAs où le désaccord de maille à la jonction métallurgique est faible ($\approx 1\%$)
- Dans le cas où le désaccord de maille devient important (4 % pour Ge-Si), Il y a apparition d'une densité importante d'états de surface, et en plus du courant de diffusion précédent, il existe un courant tunnel et un courant d'émission.



Aperçu sur les hétérojonctions et

le HBT (Heterojunction Bipolar transistor)

2^{ème} Partie

HBT

Transistor bipolaire à hétérojonction

Aperçu sur le HBT

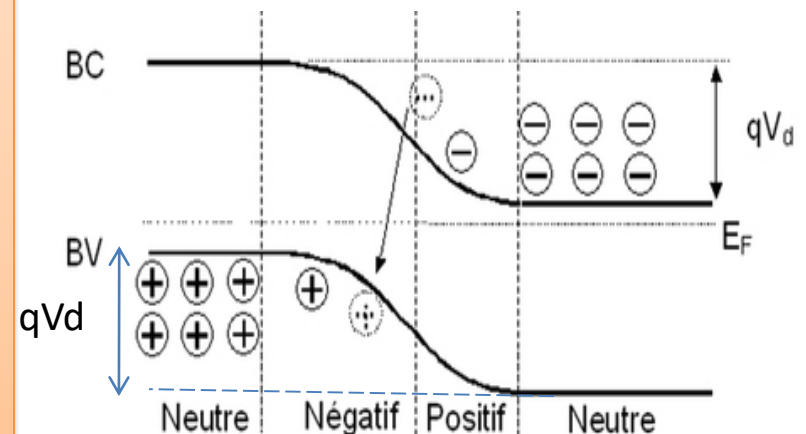
Points faibles du BJT

Une bonne efficacité d'injection émetteur-base, requiert un **fort dopage** de **l'émetteur** et une **base mince** et **faiblement dopée**.

Si les **épaisseurs** et les **dopages** sont **similaires**, l'efficacité **tombe vers 50%**.

Ceci **est dû** au fait que **la barrière de potentiel** est **la même** pour les **électrons** et les **trous**.

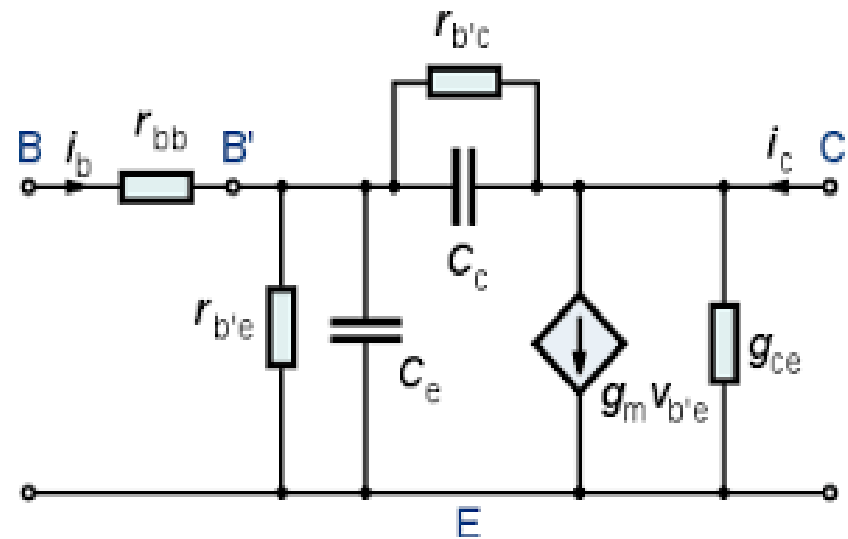
$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{D_p E W_{BN} A_B}{D_n B W_{EN} D_E}}$$



Aperçu sur le HBT

Points faibles du BJT (suite)

D'autre part, le faible dopage de la base introduit une résistance importante et donc une importante constante de temps ($\tau=RC$).

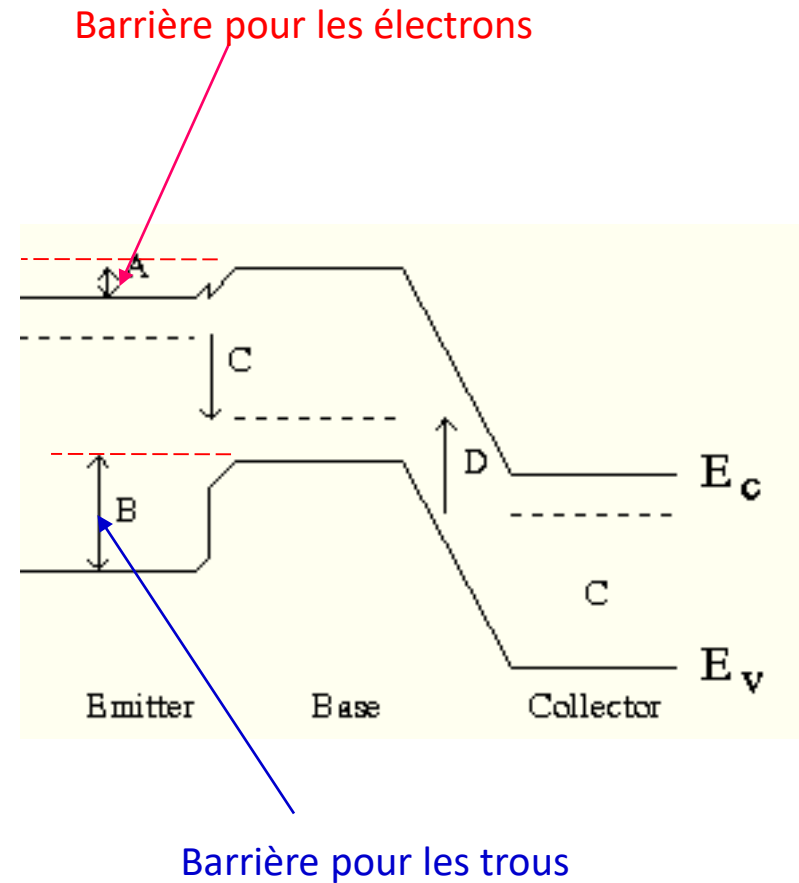


Aperçu sur le HBT

HBT comme solution

Pour le HBT, la barrière de potentiel pour les électrons est faible par rapport à la barrière des trous.

Conclusion: On peut doper fortement la base pour réduire la constante du temps $\tau=RC$ sans affecter l'efficacité d'injection.



Aperçu sur le HBT

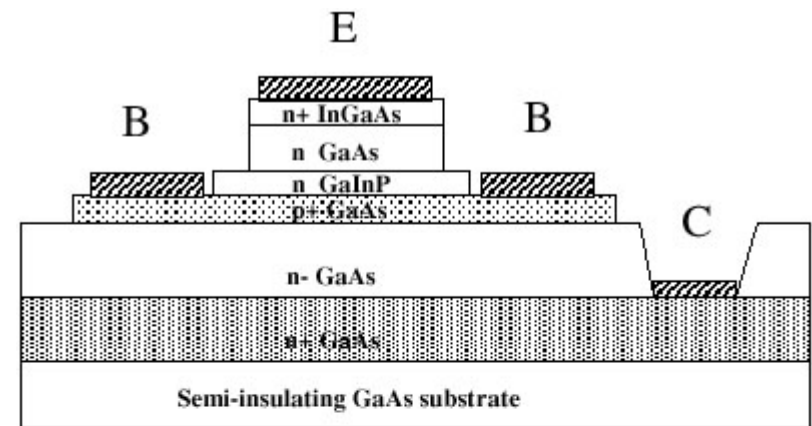
Matériaux utilisés

Les matériaux les plus utilisés sont:

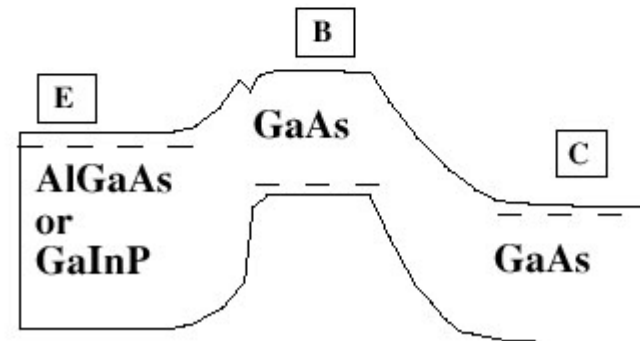
- AlGaAs ou GaInP pour l'émetteur;
- GaAs pour la base et le collecteur.

Avantages de ces matériaux

Ces matériaux ont une **grande mobilité** et des **capacités parasites réduites**, ce qui fait d'eux des matériaux de choix pour les **application HF** et les **composants de puissance**.



(a)



(b)

Aperçu sur le HBT

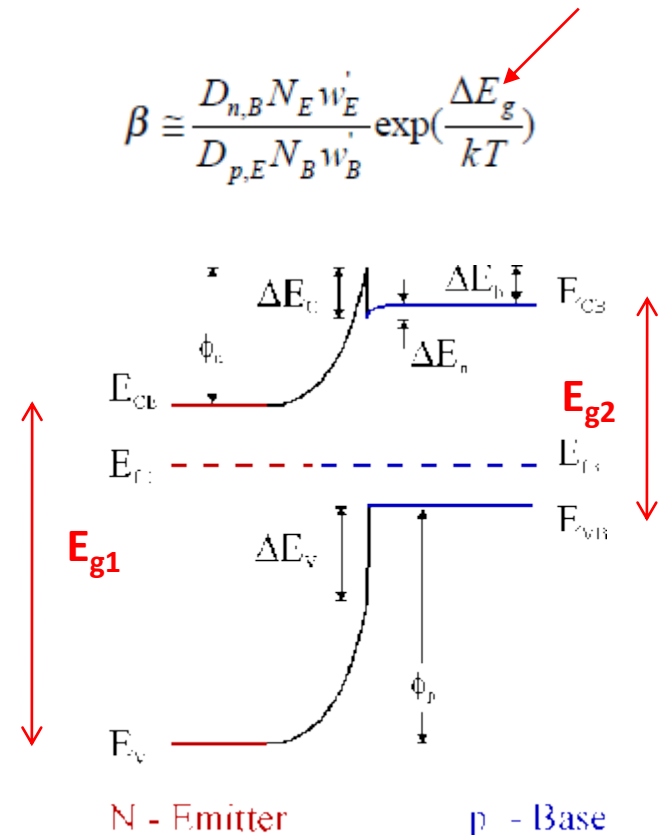
Amélioration du gain en courant

Le gain en courant dépend de façon exponentielle de la différence d'énergie entre les bandes interdites ΔE_g .

Conséquence:

On peut obtenir un très grand gain de courant dans un transistor bipolaire à hétérojonction, même si la densité de dopage de base, N_B , est significativement plus grande que la densité de dopage émetteur, N_E .

$$\beta \cong \frac{D_{n,B} N_E w'_E}{D_{p,E} N_B w'_B} \exp\left(\frac{\Delta E_g}{kT}\right)$$



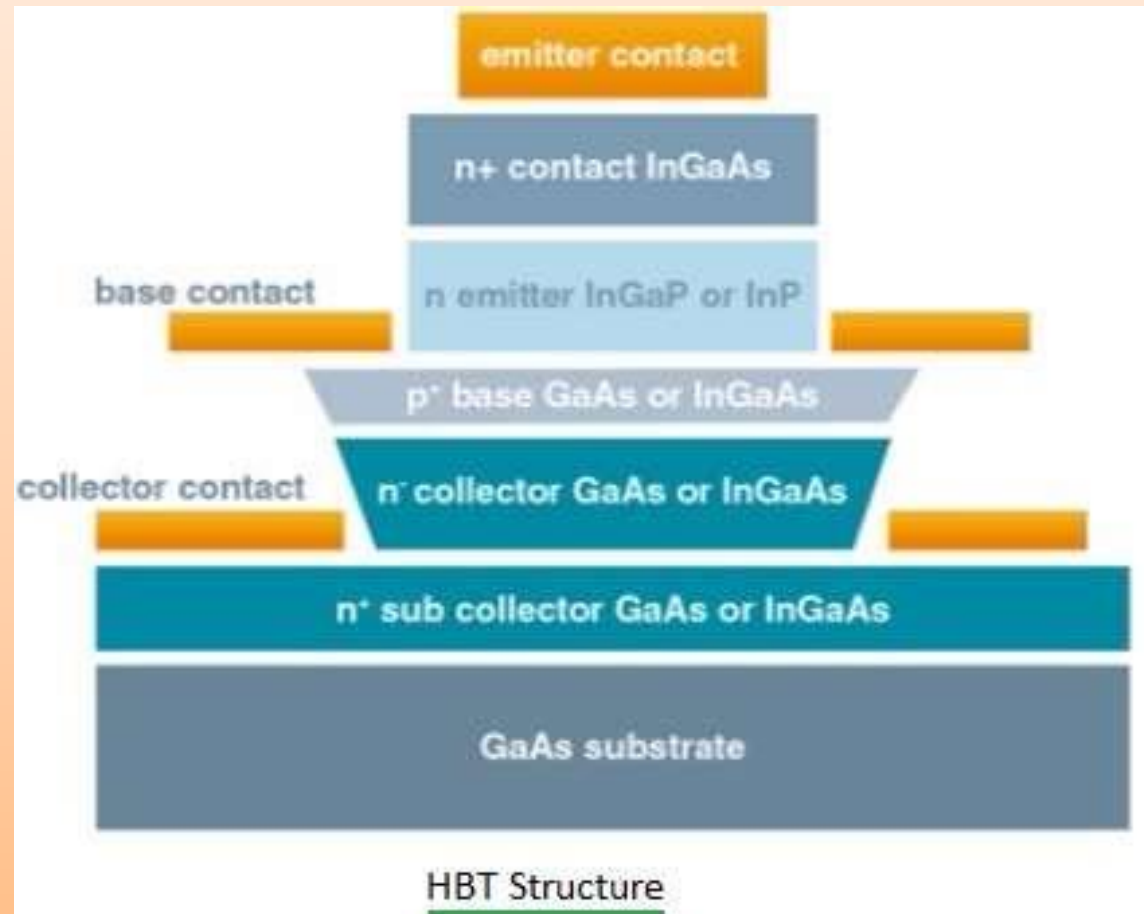
Aperçu sur le HBT

Conditions sur les bandes interdites

- ❑ L'émetteur d'un HBT typique présente une bande interdite plus importante que sa base.
- ❑ Cette différence devrait être d'environ 0,2 à 0,4 eV pour une performance optimale.
- ❑ Une plus petite différence ne fournit qu'une amélioration minime par rapport aux dispositifs d'homojonction.
- ❑ Une plus grande différence fait que le gain dépend fortement de la température et crée un pic distinct dans le diagramme d'énergie, ce qui limite à son tour le courant.

Aperçu sur le HBT

Exemple de HBT



Aperçu sur le HBT

Avantages du HBT

- Base **fortement dopée** $\Rightarrow R_B \searrow \Rightarrow \tau = RC \searrow$;
- Le **dopage de base élevé** garantit que lorsque la **polarisation inverse** du collecteur de base est **augmentée**, il y a un **changement minimum** dans la **largeur de base** rendant le **dispositif approprié** pour l'application **de puissance élevée**;
- **Capacité inférieure de la base émetteur** puisque les **émetteurs à large bande interdite** n'ont plus besoin d'être **plus dopés** que la **base**; dans une application à micro-ondes, **une capacité d'émetteur inférieure** réduit **significativement le bruit**.