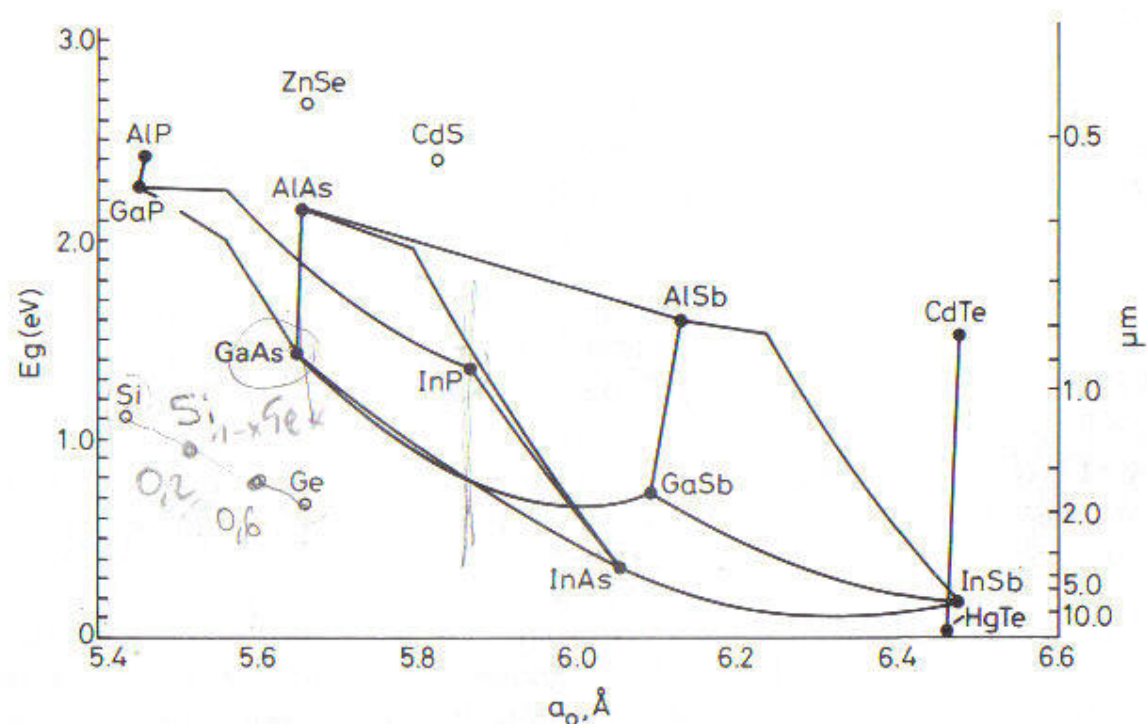


# Materiali Composti per Dispositivi Elettronici

- Variazione del parametro reticolare e dell'energy gap con la composizione per semiconduttori del gruppo III-V

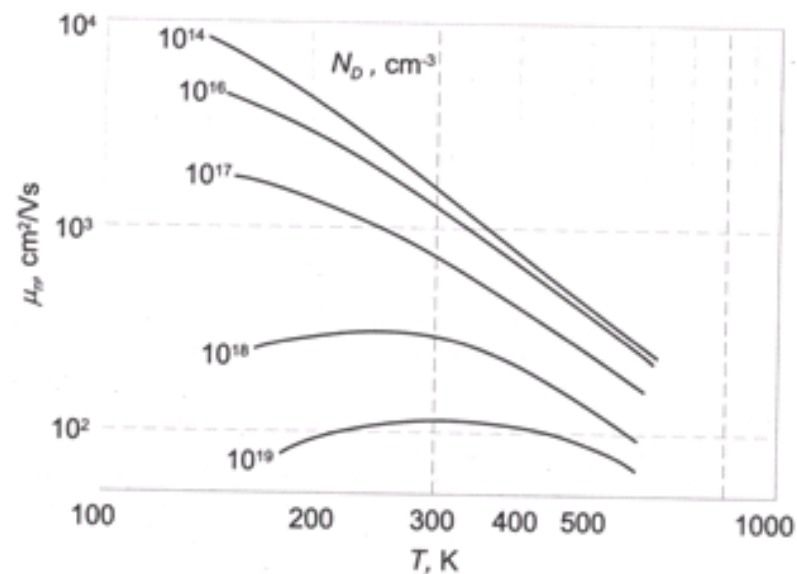


# L'HEMT – High Electron Mobility Transistor

- l'aumento della conducibilità del canale di FET si ottiene aumentando la concentrazione di drogaggio.
- Questa soluzione non è praticamente utilizzabile oltre un certo limite a causa dell'interazione dei portatori con gli ioni dei droganti che riducono significativamente la mobilità

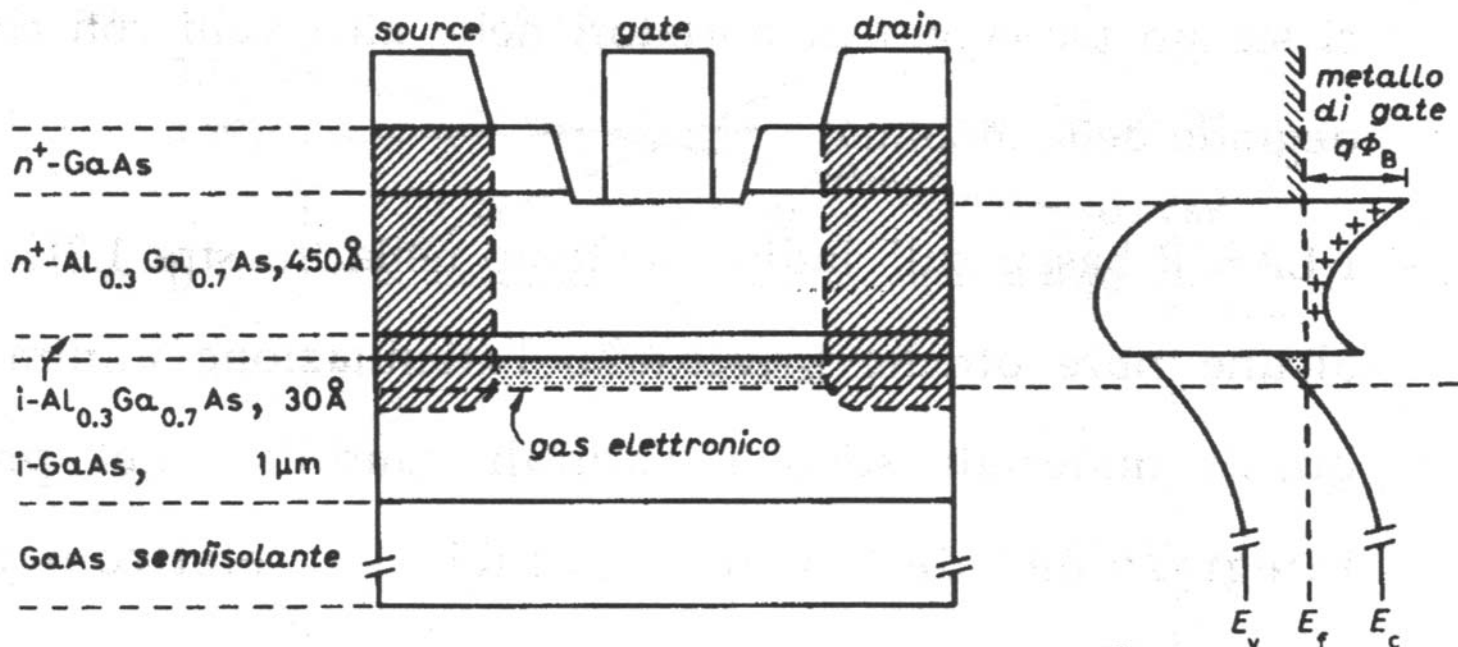
$$J_{channel} = qN_D\mu(N_D)\mathcal{E}$$

Andamento sperimentale della mobilità per basso campo in funzione della temperatura e del drogaggio



# L'HEMT – High Electron Mobility Transistor

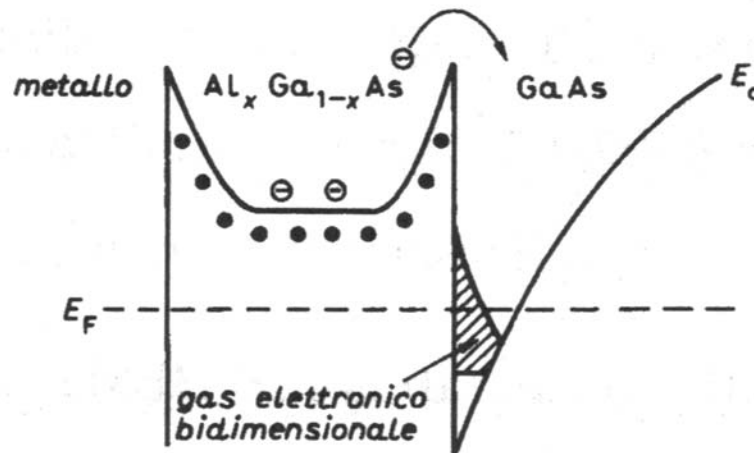
- Negli HEMT, la tecnica della modulazione di drogaggio permette di isolare gli elettroni di conduzione dagli atomi donatori che li hanno generati, questo consente:
  - di sfruttare un canale intrinseco capace di esibire le migliori caratteristiche di trasporto**
- gli elettroni di trasporto sono resi disponibili da un'altra regione di semiconduttore



Rappresentazione schematica di un HEMT a svuotamento in assenza di polarizzazione

# L'HEMT – High Electron Mobility Transistor

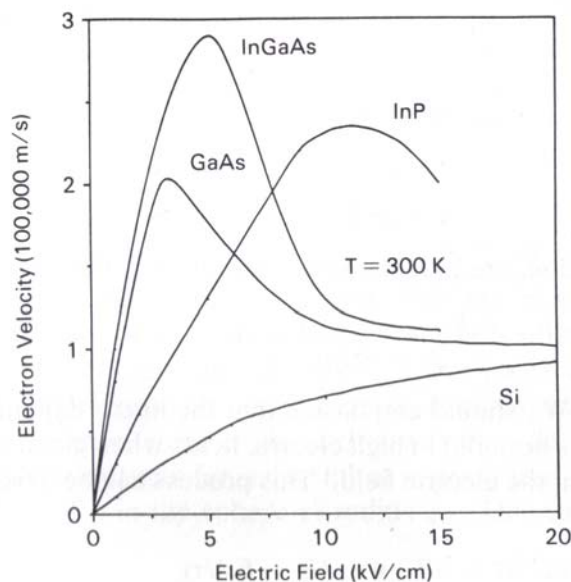
- La conduzione negli HEMT è sostenuta da un gas bidimensionale di elettroni (2DEG) localizzata all'eterogiunzione
- Rappresentazione schematica di un HEMT a svuotamento in assenza di polarizzazione



- il moto di diffusione dallo strato drogato in AlGaAs verso la buca quantica presente all'interfaccia con il GaAs per bassi campi elettrici determina il 2 dimensional electron gas (2DEG)

## L'HEMT – pseudomorfo (PHEMT)

- Un modo per aumentare le prestazioni di un HEMT è quello di usare un materiale ad elevata mobilità per la formazione del 2DEG. ad esempio il  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$



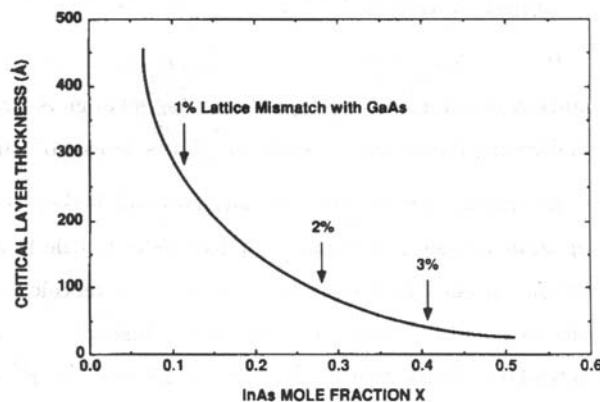
- i vantaggi sono dovuti, oltre alla elevata mobilità per bassi campi elettrici anche alla maggiore discontinuità rispetto al GaAs

$$E_G^{\text{GaAs}} = 1.42 \text{ eV} > E_G^{\text{In}_{0.47}\text{Ga}_{0.53}\text{As}} = 0.74 \text{ eV}$$

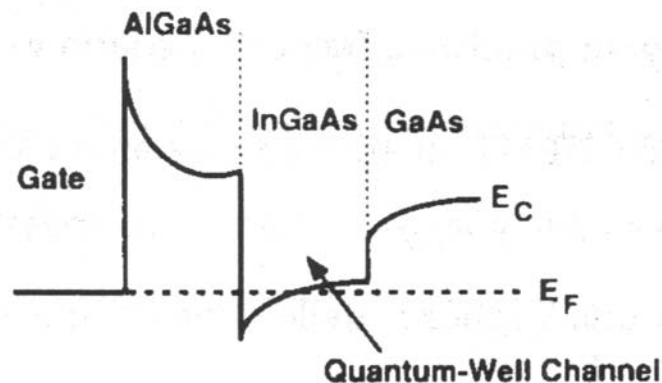


# L'HEMT – pseudomorfo

- La struttura base di un PHEMT differisce da quella convenzionale per l'aggiunta di un sottile strato, tipicamente di 70-150Å, di  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  con  $x=0.15-0.35$  tra lo strato drogato di AlGaAs ed il substrato di GaAs
- Poiché il passo reticolare tra  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  e GaAs due materiali non è lo stesso, mentre AlGaAs e GaAs, sono praticamente uguali, lo strato aggiuntivo deve essere di spessore inferiore a quello 'critico' e con una quantità di In contenuta.



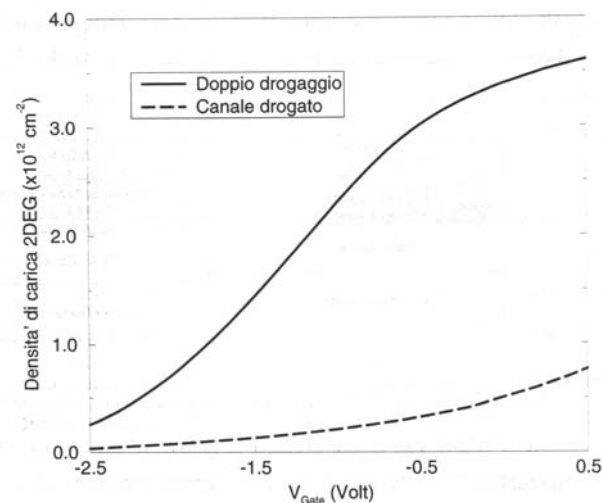
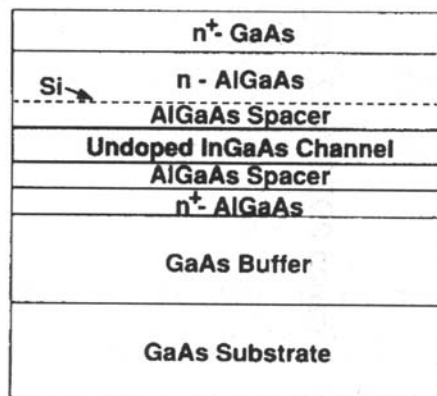
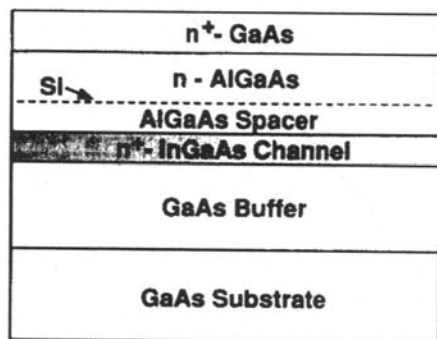
AlGaAs/InGaAs PSEUDOMORPHIC HEMT



$n^+$ - GaAs Capping Layer	$10^{18}/\text{cm}^3$ , 500Å
$n^+$ - AlGaAs Donor Layer	$10^{18}/\text{cm}^3$ , 500Å
AlGaAs Spacer Layer	Undoped, 50Å
InGaAs Channel Layer	Undoped, 200Å
2-DEG Channel	
GaAs Buffer Layer	Undoped, 1μm
Semi-Insulating GaAs Substrate	

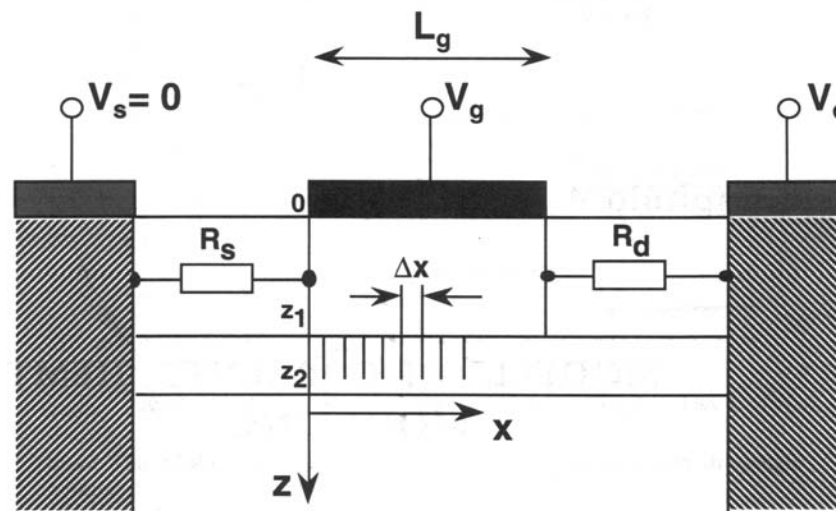
# L'HEMT – pseudomorfico

- Nelle applicazioni di potenza, il livello di drogaggio AlGaAs deve essere basso per avere basse correnti di perdita ed alte tensioni di breackdown, ma ridurrebbe la carica disponibile nel canale.
- Si ovvia con strutture a canale drogato (sx) e con doppia eterostruttura (dx)
- Mentre è chiaro l'effetto del canale drogato, introdurre una doppia eterogiunzione determina un aumento della carica nel canale pur avendo bassi livelli di drogaggio.



# Analisi di un HEMT – pseudomorfico

- L'analisi di un HEMT può essere condotta mediante due modelli monodimensionali accoppiati:
  - Il controllo della carica: trattato nella direzione di crescita
  - Trasporto elettronico: trattato nel senso longitudinale



# Controllo di Carica in un HEMT

- Il controllo della carica si risolve impostando l'equazione di Schroedinger nel dominio tridimensionale sotto il gate e separando le componenti ortogonali al canale:

$$-\frac{\hbar^2}{2m_0} \left( \frac{1}{m_x^*} \frac{d^2\Theta}{dx^2} + \frac{1}{m_y^*} \frac{d^2\Theta}{dy^2} \right) = E_{xy} \Theta(x, y)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m_0} \frac{d}{dz} \left( \frac{1}{m_z^*} \frac{d^2\Theta}{dz^2} \right) + V_C(z) \cdot \Psi_i(z) = E_i \cdot \Psi_i(z)$$

- L'autovalore  $E_i$  definisce le sotto-bande ed è del tipo:

$$E = E_i + \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m_x^*} + \frac{\hbar^2 k_y^2}{2m_y^*}$$



# Controllo di Carica in un HEMT

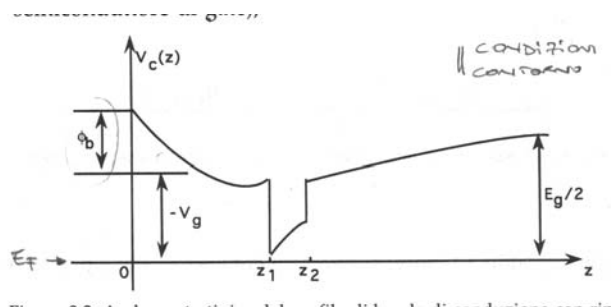
- L'eq. di Schroedinger necessita della soluzione dell'eq di Poisson per il calcolo del potenziale autoconsistente con gli autovalori  $E_i$

$$\frac{d}{dz} \left( \epsilon(z) \frac{dV(z)}{dz} \right) = -q (N_D^+(z) - n(z))$$

- Notare che questa equazione non può fornire le discontinuità di banda che vanno pertanto inserite successivamente:

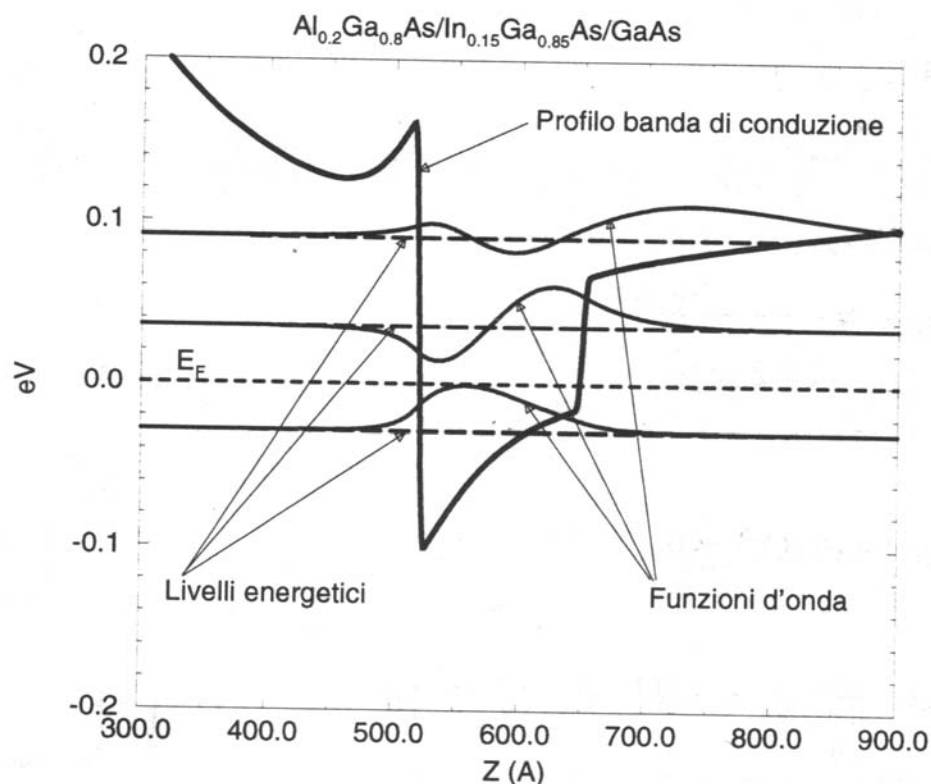
$$V_C(z) = -qV(z) + \Delta E_1(z - z_1) + \Delta E_2(z - z_2)$$

- La soluzione è solitamente svolta in modo numerico introducendo le condizioni al contorno sul gate e sul substrato



# Controllo di Carica in un HEMT

- Quantizzazione dell'energia e profilo della banda di conduzione in una struttura AlGaAs/InGaAs/GaAs

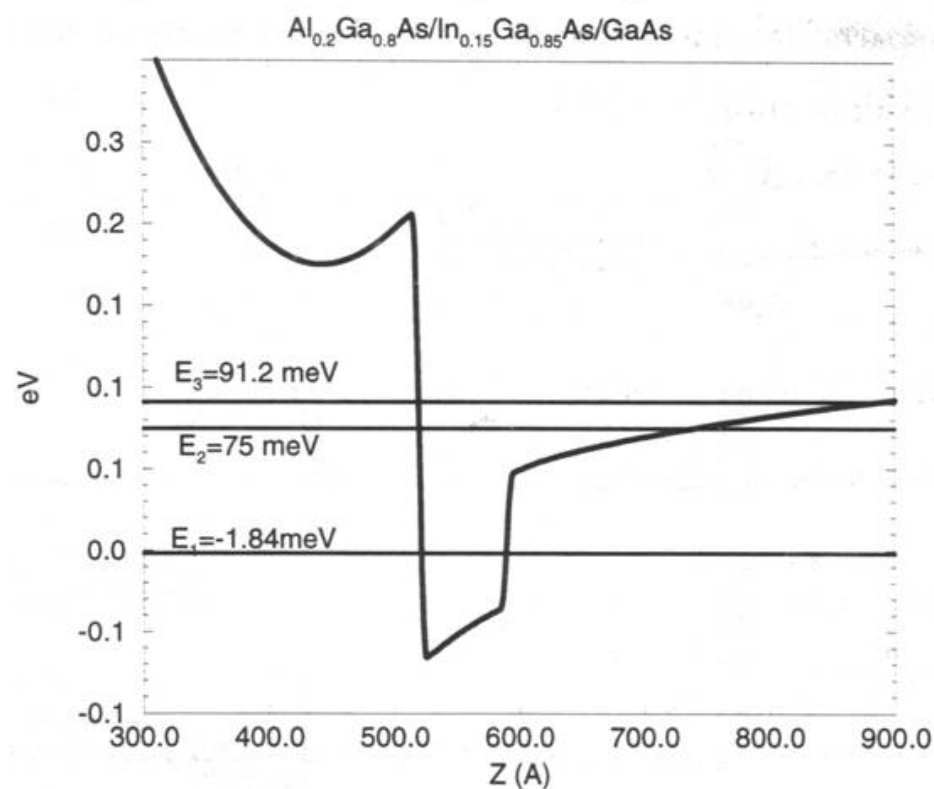


# Controllo di Carica in un HEMT

- Risultati relativi all'analisi numerica del controllo di carica.
- Probabilità di occupazione dei livelli mediante la funzione di distribuzione di Fermi-Dirac, per uno strato di InGaAs di 7nm:  $P(E1)=0.77$ ,  $P(E2)=0.20$ ,  $P(E3)=0.03$ , livello di fermi  $E_f=0$

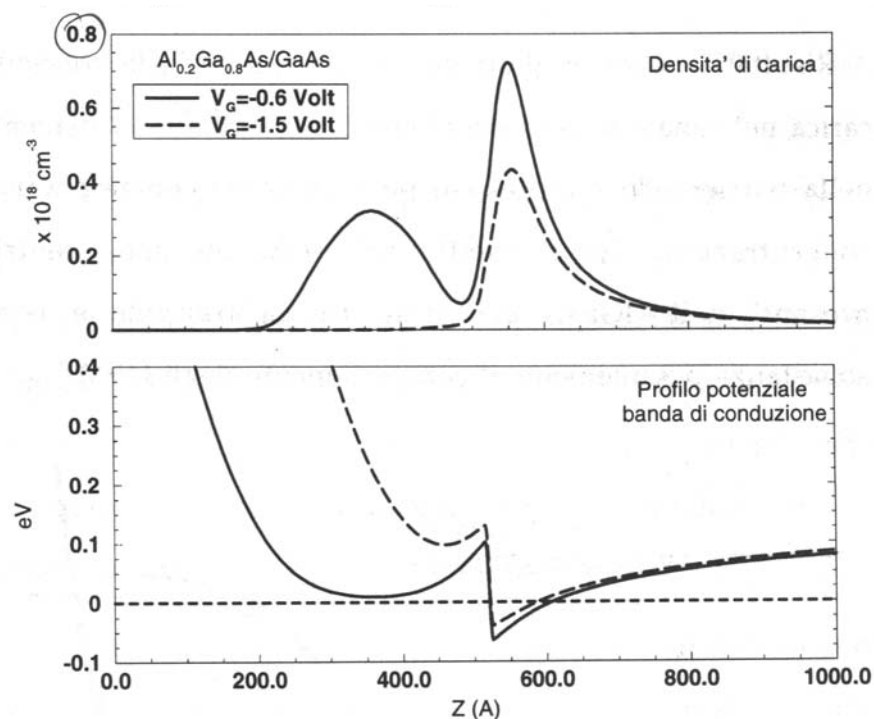
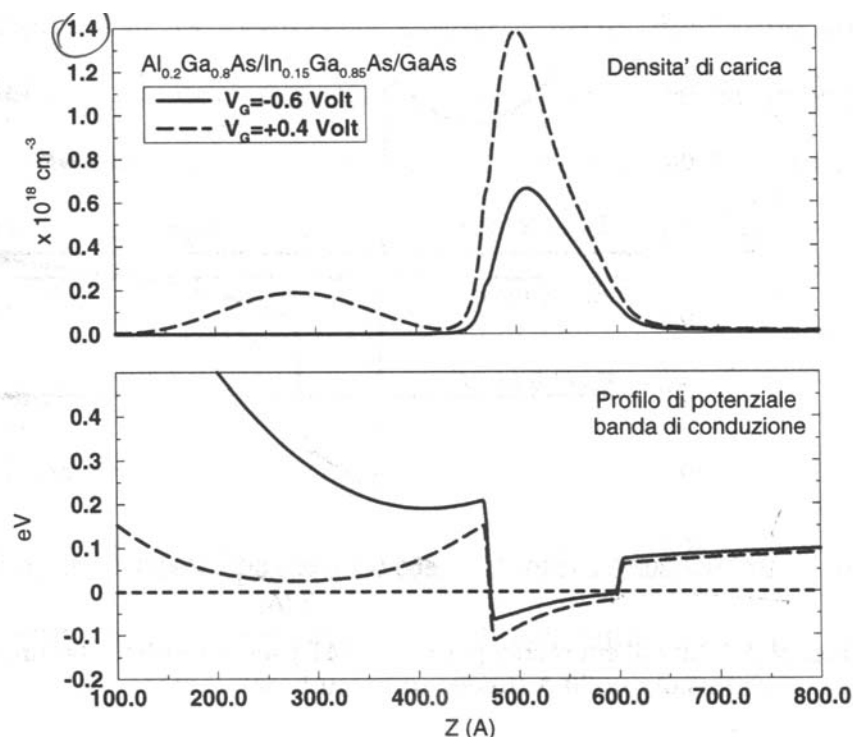
Tipico PHEMT

50nm
$n^+$ - $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$
2nm $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ non drogato
13 nm $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ non drogato
500 nm GaAs non drogato
Buffer
2 $\mu m$ GaAs
Substrato



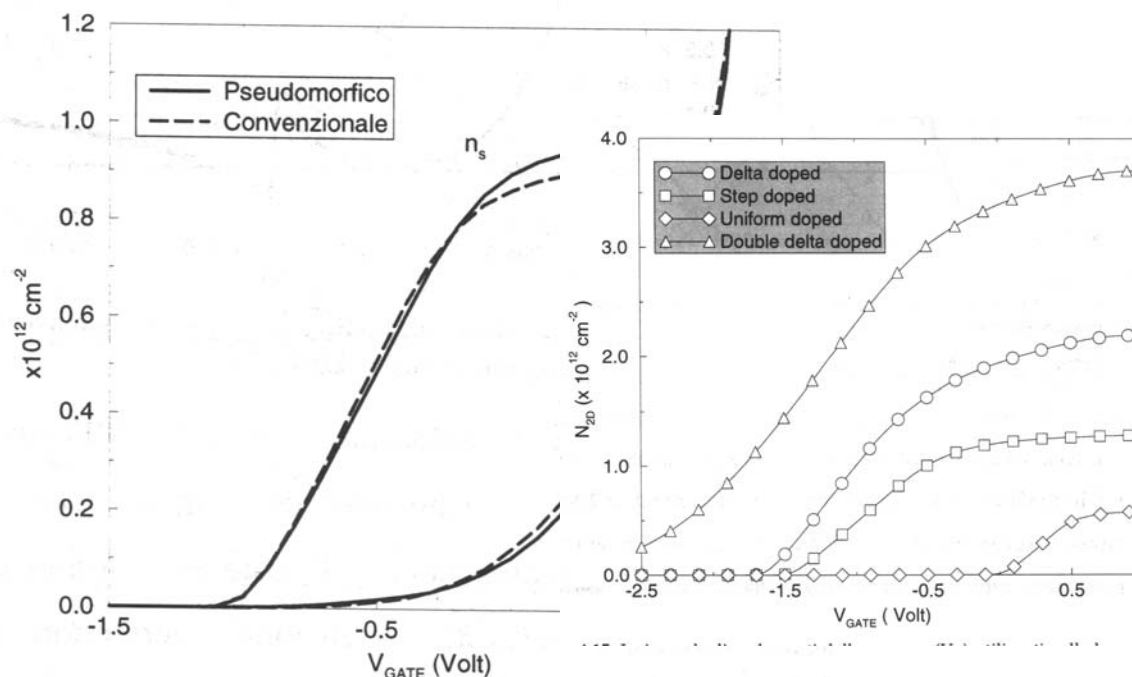
# Controllo di Carica in un HEMT

- Concentrazione dei portatori con drogaggio uniforme del AlGaAs pari a  $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  (sx) e senza lo strato di InGaAs (dx), si noti i livelli assoluti di concentrazione e l'effetto parassita



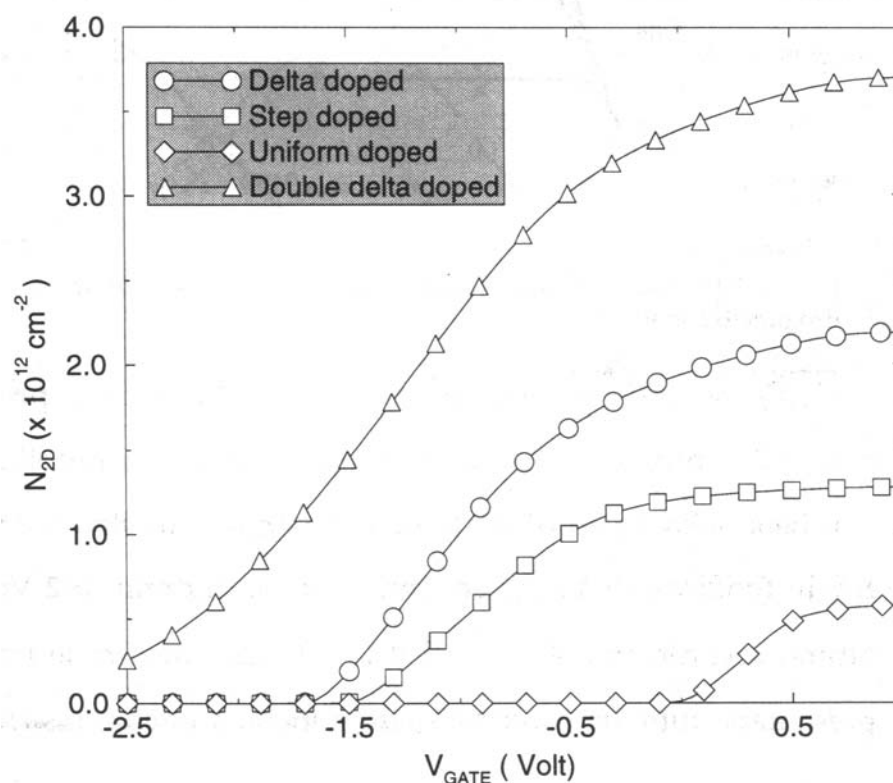
# Controllo di Carica in un HEMT

- l'effetto della carica nel canale parassita, nb, deve essere ridotto ponendo questo canale in pinch-off.
- Non si osserva sostanziale differenza tra PHEMT e HEMT convenzionale



# Controllo di Carica in un HEMT

- La tecnica numerica permette l'analisi della densità di carica per diversi tipi di drogaggio, ottimizzati per alta potenza (double delta doped), linearità (delta) e switching (step)



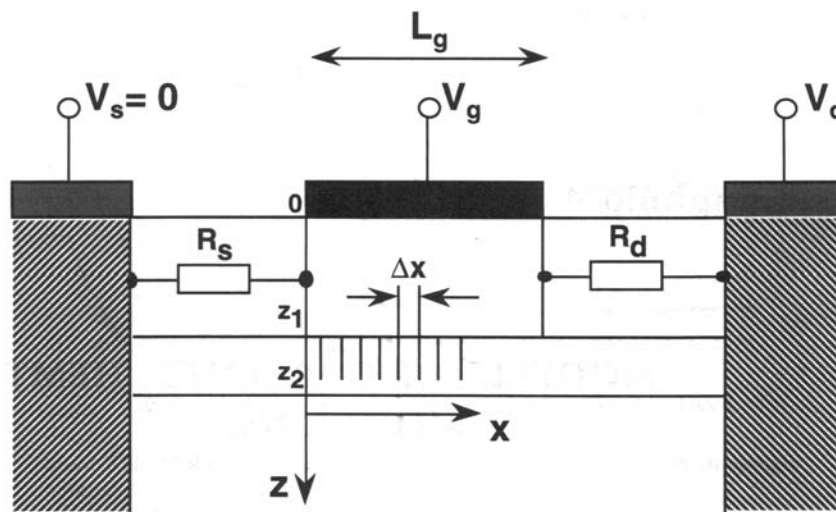
# Modello di idrodinamico quasi-bidimensionale

- Modello di corrente, trasporto elettronico: trattato nel senso longitudinale
- Viene eliminata la variabile  $Z$ , introducendo l'integrale:

$$n_S(V_G) = \int_{z_1}^{z_2} n(V_G, z) dz$$

- Mentre la densità di carica alla generica posizione nel canale è:

$$n(x) = n_S(V_G - V_{CH}(x))$$



# Modello di idrodinamico quasi-bidimensionale

- Possiamo scrivere l'eq. di Poisson nel canale come:

$$\frac{d}{dx} (\varepsilon(z) F_x(x, z)) + \frac{d}{dz} (\varepsilon(z) F_z(x, z)) = q (N_D^+(x, z) - n(x, z))$$

- Ipotizziamo che il campo elettrico  $F_x$  dipenda solo da  $x$  e che la variazione della costante dielettrica sia trascurabile.
- Integrando in  $z$  tra  $z_1$  e  $z_2$  si ha:

$$\frac{dF_x}{dx} \Delta_z + \Delta F_z(x) = -\frac{q}{\varepsilon} N(x)$$

- con

$$N(x) = q \int_{z_1}^{z_2} (N_D^+(x, z) - n(x, z)) dz$$



# Modello di idrodinamico quasi-bidimensionale

- D'altro canto riscrivendo l'eq. di Poisson in  $z$  si ha:

$$\Delta F_z(x) = -\frac{q}{\varepsilon} [n_s (V_G - V_{CH}(x))]$$

- Infine possiamo scrivere le equazioni del modello idrodinamico

$$I_{DS} = -qZN(x)v(x)$$

$$\frac{dv(x)}{dx} = -\frac{qF_x(x)}{m^*(w)v(x)} - \frac{1}{\tau_m(w)}$$

$$\frac{dw(x)}{dx} = -qF_x(x) - \frac{w(x) - w_0}{m^*(w)\tau_w(w)}$$



# Modello di idrodinamico quasi-bidimensionale

- Andamenti delle correnti e transconduttanze per HEMT con diversa lunghezza di canale

