

# Modulationsdotierung

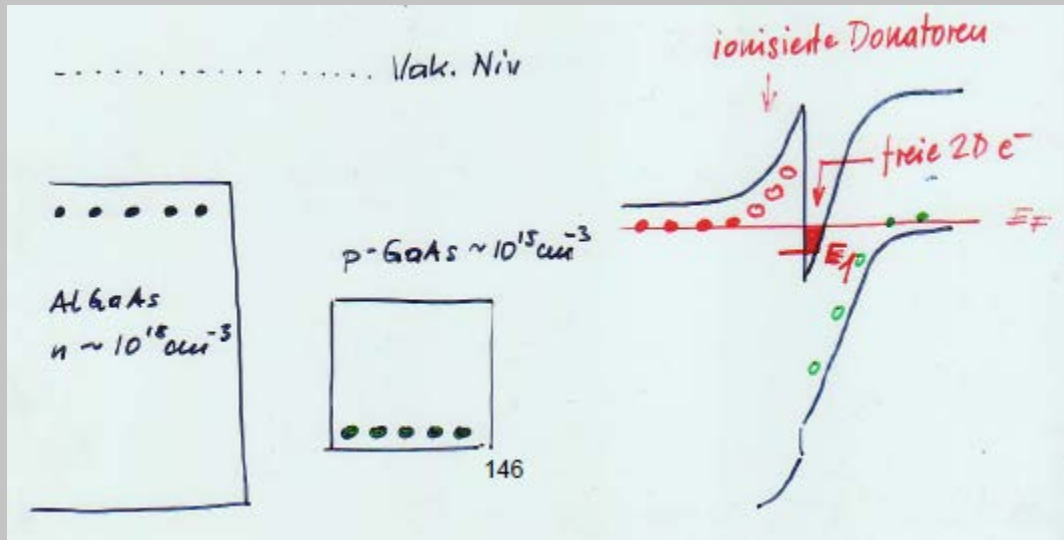
Die Dotierung ist extrem wichtig für die Funktion von HL-Bauelementen. Damit ein Donator (Akte.) Atom aber "wirksam" ist, muss es ionisiert werden.

Dann aber werden die freien Lad.tr. sehr effektiv gestreut (ionisierte StSt. Streuung)

Die Modulationsdotierung erlaubt die <sup>(Selektive Dotierung)</sup> Trennung von Ladungsträgern und ionisierten StSt.

dies gibt: sehr hohe Beweglichkeit  
Kein Ausfrühen bei tiefen Temp.

# Modulationsdotierung

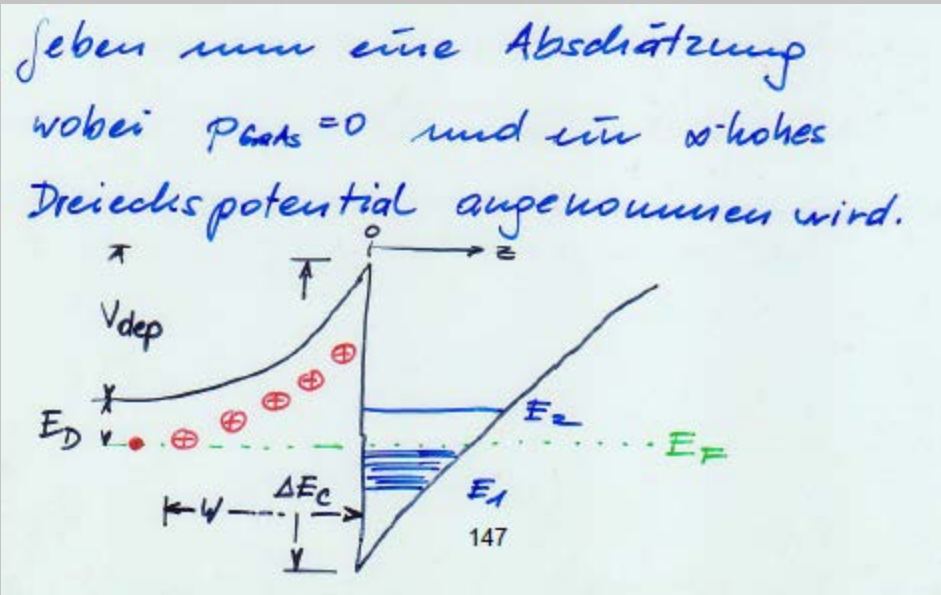


# Modulationsdotierung

Drei Mechanismen bestimmen die Ladungsverteilung in der Struktur und müssen selbstkonsistent betrachtet werden.

- 1) Die elektrischen Ladungen nahe dem Interface bestimmen die Bandverbiegung im Kanal und der Barriere
- 2) Die Energie der quantisierten (2D) Zustände im Kanal
- 3) Im Thermodyn. Gleichgewicht bestimmt die Fermi Energie die Konz. der beweglichen Elektronen im Kanal.

# Modulationsdotierung



# Modulationsdotierung

Nach dem Transfer von  $N_s$  Elektronen in den Kanal ist das  $\vec{E}$ -Feld (gerad) gleich

$$E = N_s e / \epsilon_0 \epsilon$$

$$\phi(z) = -Ez \quad (\text{Potential})$$

$E$  Feld zwischen  
Flächenlad.

damit

$$E_1 = \left( \frac{\hbar^2}{2m^*} \right)^{1/3} \left( \frac{q}{8} \pi e^2 N_s / \epsilon \epsilon_0 \right)^{2/3}$$

Bei  $T=0$  und thermodyn. Gleichgew.  
erhält man den höchsten gefüllten  
Zustand bei  $E_F$

$$E = E_1 + \frac{N_s}{S_{2D}} = E_1 + \frac{\pi \hbar^2 N_s}{m^*}$$

2D-Zustandsdichte

# Modulationsdotierung

Dies ist aber gleich der Vol. Fermi E. in AlGaAs, die am Interface durch das Elektrostat. Pot. der ionisierten Donatoren,  $V_{dep}$ , heruntergedrückt wird.

$$V_{dep} = - \int_{z=0}^{-W} \mathbb{E} dz = - \int_0^{-W} \frac{e N_D z}{\epsilon \epsilon_0} dz = \frac{e N_D W^2}{2 \epsilon \epsilon_0}$$

die gibt (bei  $z=0$ )

$$\Delta E_c = E_1 + \frac{\pi \hbar^2 N_s}{m^*} + E_D + e V_{dep}$$

wobei angenommen wird, dass die Fermi E. am Donatorniveau "gepinnt" ist.

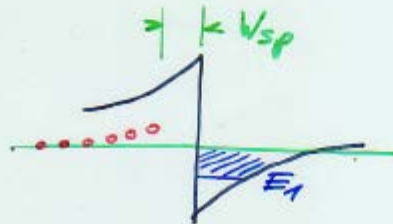
Mit  $N_s = N_d W$  erhält man

$$\Delta E_c - \underbrace{\frac{e^2 N_s^2}{2 \epsilon \epsilon_0 N_D}}_{e V_{dep}} - E_D = E_1(N_s) + \frac{N_s \pi \hbar^2}{m^*}$$

# Modulationsdotierung

Diese (und andere) Rechnungen berücksichtigen allerdings nicht, dass für unvoll.  $\Delta E_c$  die Wellenfunktion der Elektronen in die Barriere eindringt, was zu Coulomb Str. führt.

Bei realen Strukturen wird daher eine undotierte "spacer" Lage in der AlGaAs Barriere eingebaut. (Wsp)



# Modulationsdotierung

Eine Vergrößerung von  $W_{sp}$  führt zu kleinerer Coulomb Wkt. und damit zu größerer Beweglichkeit der Elektronen

Grenze für  $W_{sp}$ :

Das  $\vec{E}$ -Feld im spacer ist konst (keine Raumlad). Daher baut sich Pot. auf, das aber keine Ladungen in den Kanal abgibt (keine Donatoren)

Daher verringert größeres  $W_{sp}$  die Ladungsträger Konz.  $N_s$



# Modulationsdotierung

Die Streuung von Ladungsträgern im Kanal durch Donatoren in der Barriere hängt vom Formfaktor der Coulomb w.w. ab

$$F(q, z) = \int dz' |\chi(z')|^2 \exp(-q|z-z'|)$$

↑
Wellenfunktion
↑

Position d. Störstelle
Streuvektor

$$q = 2k (\sin \theta / z)$$

↑
↑

e<sup>-</sup> Wellenvektor
Streuwinkel

Bei tiefen Temperaturen ist  $k \propto k_F$

# Modulationsdotierung

d.h.  $k_F$  nimmt zu mit steigendem  $N_S$   
dies bedeutet aber, daß  $F(q, z)$  nur von  
Bedeutung für kleine Streuwinkel  $\theta$ .  
Die Kleinwinkelstreuung ist aber  
wenig wirksam bei der Impulsrelaxations-  
zeit  $T_p$  die in die Berechnlichkeit  
eingeht. (Wegen des Faktors  $(1 - \cos \theta)$   
in dem Integral des Impulsverlustes)  
 $\Rightarrow$  Kanalberechnlichkeit steigt mit  
 $\left. \begin{array}{l} W_{sp} \\ N_S \end{array} \right\} \Rightarrow$  es gibt maximale Bew.

# Modulationsdotierung

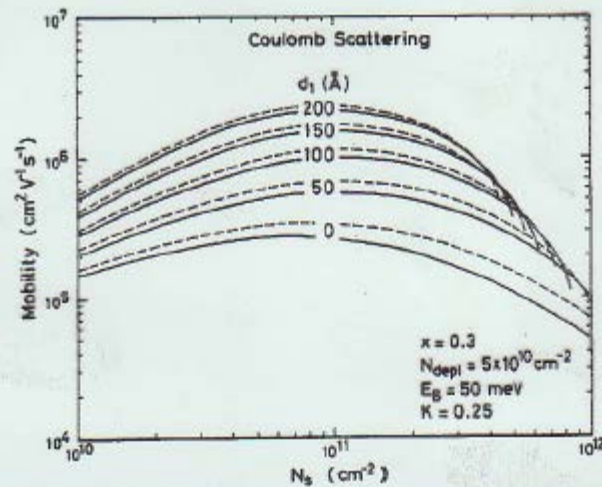


FIG. 55. Influence of Coulomb scattering as a function of channel carrier density  $N_s$  and spacer-layer thickness  $d_s$ . The increase in  $N_s$  is determined by a change in the doping concentration of the GaAlAs barrier. As long as  $N_s$  is smaller than  $N_{\text{dep}}$ , the main effect of increasing  $N_s$  is to reduce the scattering rate because of increased electron velocity and channel-impurity screening. Above that value, Coulomb scattering by remote donors in the GaAlAs barrier takes over and decreases the mobility (Reprinted with permission from *J. Phys. Soc. Jpn.* 51, 3900, T. Ando (1982).)

# MODFET - HEMT

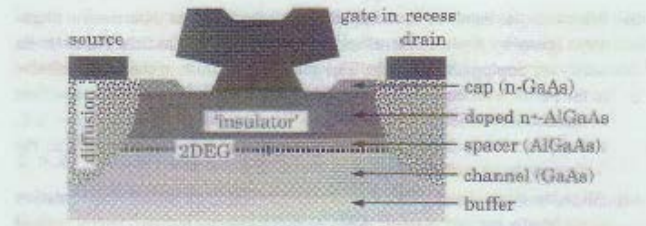


FIGURE 3.11. Simplified cross-section through a high-frequency GaAs-AlGaAs MODFET.

Anwendung der Modulationsdot.  
im FET  $\Rightarrow$  MODFET

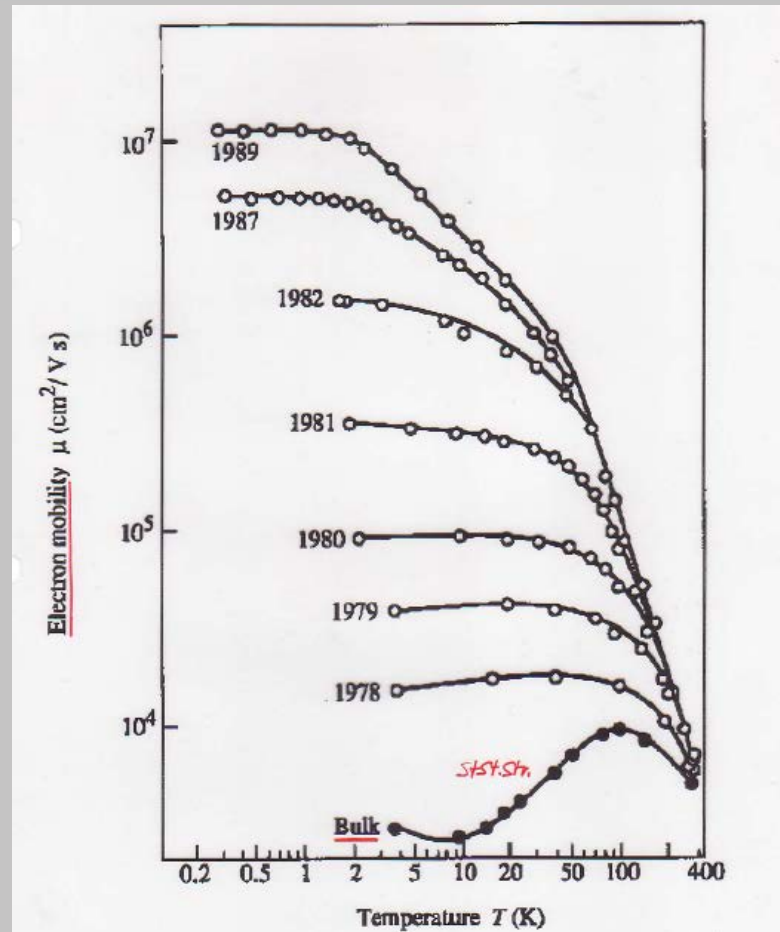
Hohe Beweglichkeit (bei RT!)

HF Bauteil (Satelliteneempf.)

meist aus GaAs - AlGaAs ( $\Delta E_c$  klein)  
oder ( $\Delta E_c$  größer)

$In_{0,5}Ga_{0,5}As$  -  $In_{0,52}Al_{0,48}As$  auf  $InP$   
(strained layer)

# Beweglichkeiten von MODFET



Electron mobilities in selectively doped AlGaAs/GaAs heterostructures (open circles) as a function of temperature for different years. The mobility of bulk GaAs ( $N_D = 2 \times 10^{17}$  cm<sup>-3</sup>, solid circles) is shown for comparison (Pfeiffer et al., 1989a).

# Spacer layers

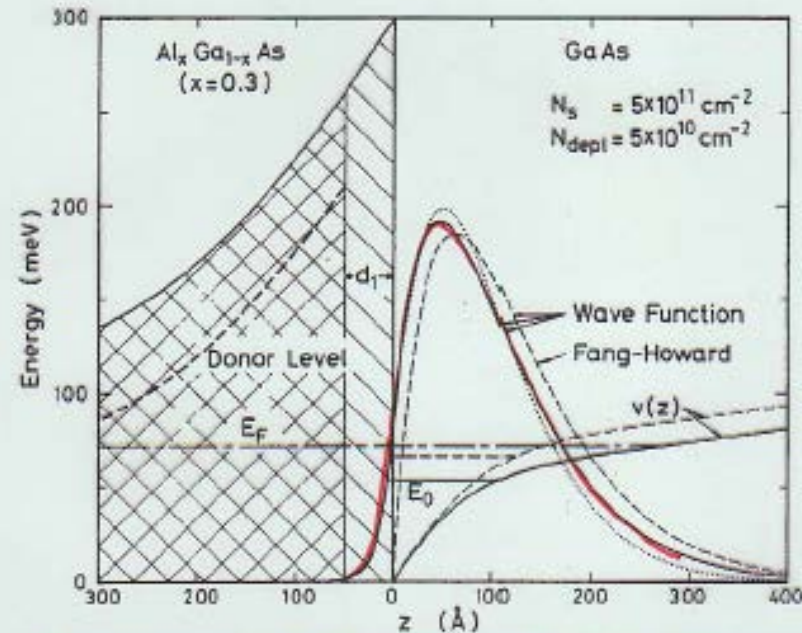
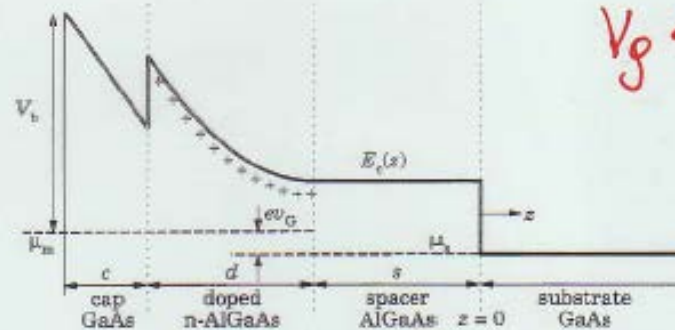


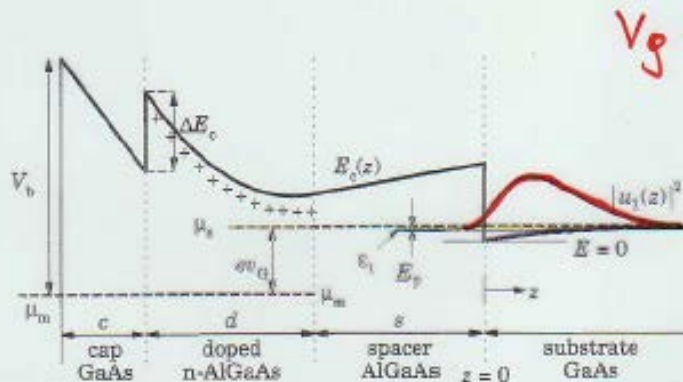
FIG. 21. Calculated energy levels and wave functions of the GaAlAs/GaAs selectively doped interface. The Fang-Howard variational wave function (no penetration in the barrier) is shown (---). The variational wave functions [Eqs. (44) and (45)] are also shown (—). The line (· · ·) represents the numerical calculation, which includes correlation effects. The different confining potentials  $V(z)$  are shown. The spacer thickness is 50 Å and the donor binding energy of GaAlAs has been chosen as 50 meV (Reprinted with permission from the *J. Phys. Soc. Jpn.* 51, 3893, T. Ando (1982).)

# HEMT

Selbst konsistente Rechnung



**FIGURE 9.2.** Band diagram through the same modulation-doped layers as in Figure 9.1 at threshold  $n_{2D} = 0$ , the Fermi level brushes  $E_c$  in the channel, and  $v_G = v_T < 0$ . [Modelling program courtesy of Prof. G. L. Snider, University of Notre Dame.]



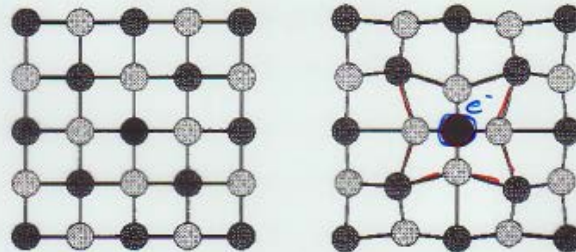
**FIGURE 9.1.** Self-consistent solution of the conduction band  $E_c(z)$  through modulation-doped layers with a positive gate bias  $v_G = 0.2$  V and  $n_{2D} = 3 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$  electrons in the 2DEG [Modelling program courtesy of Prof. G. L. Snider, University of Notre Dame.]

# DX-Zentren

## Donatoren in AlGaAs: DX-Zentren

In manchen HL bricht das einfache Bild der H-Atomartigen Donatoren zusammen:

Die am Donator lokalisierte Ladung verzerrt das Gitter in der Umgebung



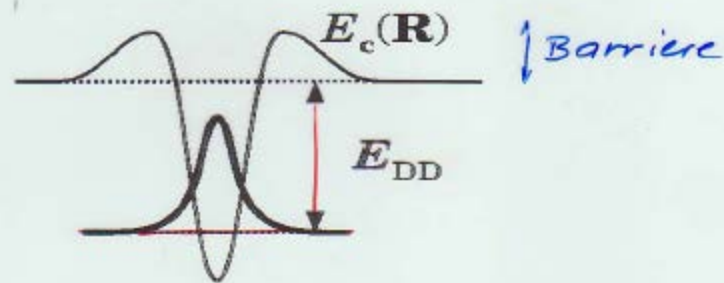
⇒ Elektron stärker gebunden  
(in AlGaAs ( $x=0.3$ ) ca.  $0.12\text{ eV}$ )

⇒ Es entsteht eine Barriere für den Einfang der Elektronen



# DX-Zentren

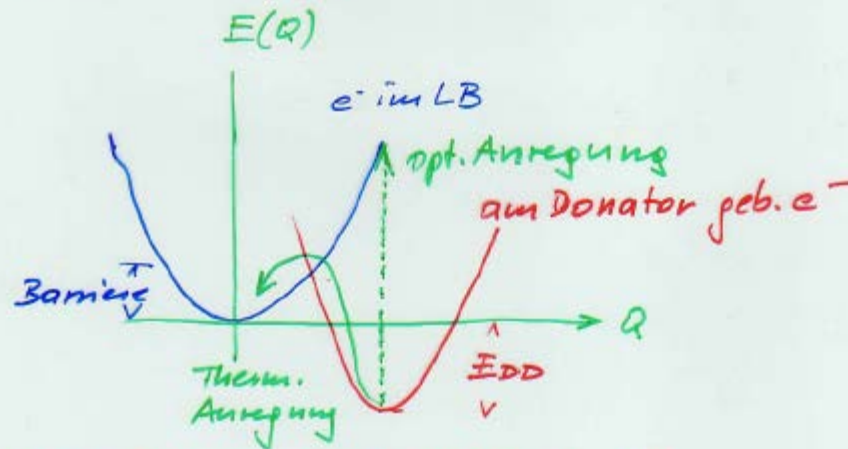
Insgesamt ergibt sich dann  
ein St.St. Potential dieser Form



Besser ist dies im Konfigurations-  
koordinaten Modell zu verstehen

# DX-Zentren

Besser ist dies im Konfigurations-  
 Koordinaten Modell zu verstehen  
 Die Konf. Koordinate  $Q$  beschreibt  
 eine Verzerrung des Gitters



- $\Rightarrow$  Eintrieren der Leitfähigkeit
- $\Rightarrow$  Persistente Photoleitung