



GaAs transistors

Jan Genoe
KHLim
Universitaire Campus, Gebouw B
3590 Diepenbeek
Belgium

<http://www.khlim.be/~jgenoe>

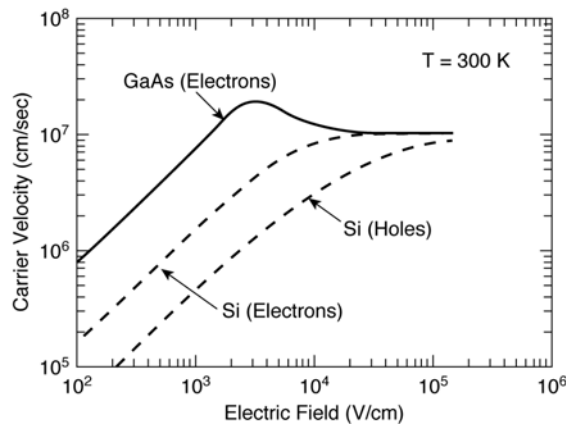




Waarom GaAs? (1)



- Veel hogere mobiliteit bij een lagere elektrisch veld
 - Bruikbaar tot veel hogere frequenties
 - Bruikbaar bij lage spanningen
 - maximum snelheid wordt reeds bekomen bij $0.3\text{V}/\mu$ (Si: $3\text{V}/\mu$)



Jan Genoe: GaAs Transistors

2



Bij hoogfrequente schakelingen gebruikt men vaak GaAs transistors en diodes. Een mooi voorbeeld hiervan is het GSM-toestel, waarvan zender en ontvanger in GaAs zijn, terwijl de rest van het circuit in Si is uitgevoerd. Maar waarom zijn de hoogfrequente delen in GaAs uitgevoerd?

Beschouwen we even de grafiek. We merken op dat de GaAs elektronen een hogere mobiliteit hebben bij een lager elektrisch veld. Immers, onder invloed van het elektrisch veld versnellen de deeltjes. Een hogere mobiliteit houdt in dat de snelheid van de elektronen hoger ligt.

Maar wat houdt dit concreet in?

Voor de frequentie:

De ladingsdragers moeten zich doorheen een transistor verplaatsen van source naar drain. Stel nu dat we slechts een zeer korte puls op de gate vuren. Bij de trage ladingsdragers zijn de ladingen nog niet over geraakt als de gate terug spert. De snelle ladingdragers geraken wel al over. De schakel frequentie voor snelle ladingsdragers kan dus hoger liggen dan deze voor de trage ladingsdragers.

Voor de spanning:

Bij een laag elektrisch veld bewegen de ladingsdragers zich ongeveer 10 keer sneller in GaAs dan in Si. Bij een groter veld verdwijnt dit snelheidsverschil echter. Hoe lang duurt het om een ladingsdrager van source naar drain te krijgen bij een gate van $1\mu\text{m}$?

SI :

GaAs :

Uit de curve kunnen we zien dat we de spanning gaan gebruiken die ons de maximale snelheid oplevert. Voor GaAs is dat $0,3\text{V}$ per μm gate lengte. Voor een gate van $0,5\mu\text{m}$ is dat dan $0,15\text{V}$.

OPMERKING:

Bij een geleider kunnen we sneller! Er zitten immers al ladingsdrager in de geleider. M.a.w. we moeten bij een geleider geen GaAs gebruiken. GaAs is enkel belangrijk bij kanalen die we ladingsvrij (of arm) kunnen maken.

Maar als GaAs zo goed is, waarom gebruiken we dan nog Si? De Si technologie evolueert sneller. De gates worden steeds kleiner, waardoor ook de spanningen lager worden en we weer sneller kunnen gaan werken.

Waarom GaAs? (2)



- Schottky Barrier Hoogte van GaAs (0.6-0.8V) is veel hoger dan bij Si (0.4-0.6 V)
- Bandgap Energie van GaAs (1.43 eV) is veel hoger dan Si (1.11 eV)
 - veel beter bestand tegen allerhande straling
 - ruimtevaarttoepassingen
 - nucleaire toepassingen
- Weerstand van het substraat (10^9 Ohm/vierkant) is veel hoger dan bij Si (10^5 Ohm/vierkant)
 - Laat toe van de devices veel beter ten opzichte van elkaar te isoleren
 - Beter beschermd tegen latch-up
 - Beter beschermd tegen ESD

Jan Genoe: GaAs Transistors

3



Schottky barrière: (een metaal op een halfgeleider dat een junctie vormt.)

Hoe groter de RLL bij een transistor of diode, hoe minder ladingsdragers erdoor kunnen lekken. Het nadeel is wel dat bij een grotere RLL ook een hogere spanning nodig is voor zo op te wekken of af te breken. Een Schottky diode heeft een metaal-halfgeleider barrière zodat de RLL niet veel moet veranderen om van voldoende barrière naar geleiding over te gaan. Hierdoor zijn Schottky diodes sneller. Een GaAs diode is nog sneller, maar heeft wel een iets grotere spanning nodig om zijn RLL aan te passen.

Bandgap:

Bij de recombinatie van een elektron met een gat komt er licht vrij, terwijl voor de generatie ervan licht, of beter straling, nodig is. Des te groter de bandgap, des te groter de straling moet zijn om generatie te verkrijgen. Omdat de bandgap van GaAs groter is dan deze van Si, is GaAs stralingsharder dan Si.

Substraat weerstand:

-Isolatie

De weerstand van intrinsiek (= niet-gedopeerd) GaAs is groter dan deze van Si. Hierdoor kunnen verschillende devices dichter tegen elkaar liggen zonder dat ze elkaar beïnvloeden.


-Latch-up

De theorie van Latch-up bespreken we later.

-ESD

Omdat het Si substraat beter geleidt dan GaAs is de kans op schade door ESD ook veel groter.

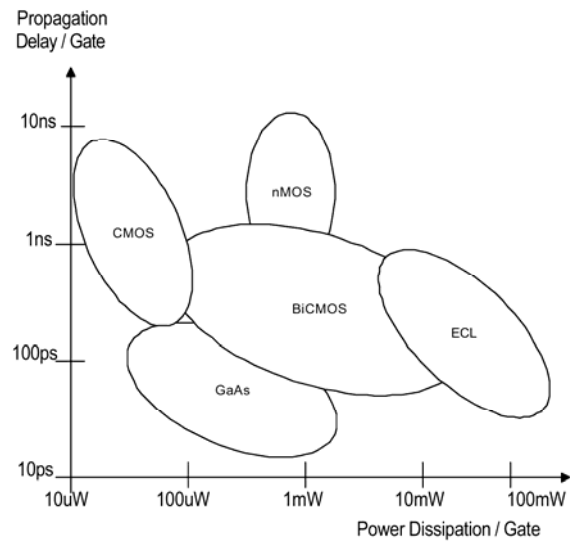
Waarom GaAs? (3)



- Veel kortere poortvertraging
- Veel hoger vermogenverbruik per poort

PS: cijferwaardes veranderen met de technologie, de verhoudingen blijven

Jan Genoe: GaAs Transistors



Ref: D. Pucknell and K. Eshraghian, Basic VLSI Design, Prentice Hall, third edition, 1994.



Waarom niet GaAs



- GaAs is veel breekbaarder dan Si
 - maximale wafer grootte is 3 tot 4 inch
- GaAs heeft geen goed oxide
- Defect densiteit in 1000 maal groter dan Si
 - geen grote circuit, veel intensiever testen
- Gatens hebben een zeer lage mobiliteit
 - geen complementaire transistors
 - geen schakelingen met laag verbruik (altijd klasse A)

Jan Genoe: GaAs Transistors

5



Breekbaar:

GaAs is zeer breekbaar. Een val van een hoogte van 2 cm is al voldoende om de GaAs wafer te doen breken.

Opmerking:

Door de andere kristal structuur klieft GaAs ook anders. GaAs breekt altijd in richtingen die loodrecht op elkaar staan. Waar het substraat breekt is niet te voorspellen, maar de richting wel. Dit heeft wel een klein voordeel: Men kan een wafer opsplitsen door er met een diamant pen krassen op te zetten en vervolgens met een pincet zachtjes te duwen. Bij Si wordt de wafer op blauwe folie gelijmd en dan met een diamant zaag in stukken gezaagd, zonder dat de folie beschadigd wordt.

GaAs heeft geen goede oxide:

Een MOS transistor is de beste transistor om zeer complexe circuits mee te realiseren omwille van het lage vermogenverbruik van circuits met MOS transistors, maar men kan ze niet realiseren in GaAs omdat het oxide dat men op GaAs kan bekomen te onregelmatig is. Een MESFET transistor kan wel in GaAs gerealiseerd worden.

Defect densiteit is groter:

Indien er een defect onder een transistor zit, is deze onbruikbaar en kan zo een stuk van het circuit een incorrecte werking geven.

Gaten hebben een zeer lage mobiliteit:

De mobiliteit van de gaten in GaAs is zeer slecht. Indien we de grafiek op pagina 2 bekijken, zien we dat de gaten er zelfs niet op vermeld staan! Hierdoor is het dan ook onmogelijk om bipolaire transistors in GaAs te maken. Unipolaire transistors in GaAs zijn wel realiseerbaar.



GaAs transistors



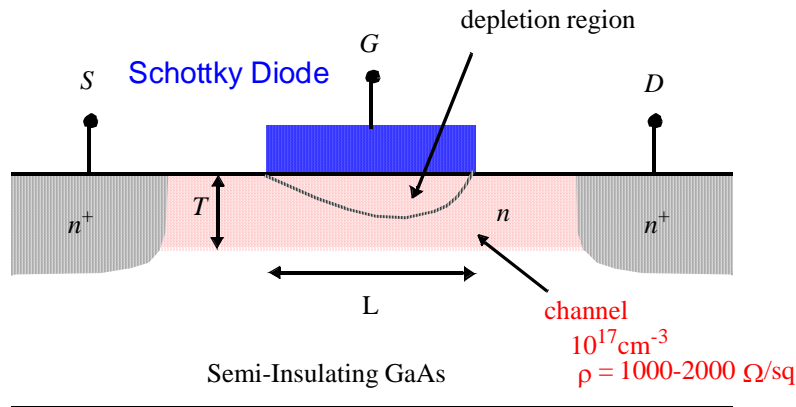
- MESFET
 - komt overeen met de Si MESFET
- HEMT
 - High Electron Mobility Transistor
 - Maakt gebruik van een AlGaAs/GaAs interface heterojunctie
- HBT
 - Heterojunctie bipolaire transistor

Jan Genoe: GaAs Transistors



MESFET

- Spanning op de gate bepaalt de RLL en dus ook het kanaal
- Er is geen tweede RLL, dus ook een kleine capaciteit naar de bulk



Jan Genoe: GaAs Transistors

7



Laten we eens eerst een Si MESFET n-kanaal transistor herhalen. De PN-junctie tussen bulk en kanaal zorgt voor een RLL die een zeer grote capaciteit oplevert. Dit levert ons een perfecte scheiding tussen kanaal en bulk, m.a.w. deze is altijd reversed gepolariseerd. Een nadeel is dat wel dat beiden condensatoren (bulk-kanaal & kanaal-schottky metaal) moeten worden opgeladen als we de drain of source spanning willen opladen. Bij de uitvoering van de MESFET in GaAs is geen RLL nodig als barrière tussen het kanaal en het substraat: de zeer grote weerstand van het substraat zorgt ervoor dat er geen geleiding is. We hebben dan ook minder capaciteit om op te laden. Dit levert ons dan een extra snelheidswinst bovenop deze van het sneller transport van elektronen.

MESFET uitvoeringen



- Depletion type
 - Bij gate spanning 0 is er een kanaal en dus geleiding
 - Een negatieve gate spanning laat toe het kanaal verder af te knippen
 - Een positieve gate spanning creëert een beter geleidend kanaal
 - V_p ligt tussen -0.7 V en -2 V
- Enhancement type
 - Bij gate spanning 0 is het kanaal reeds helemaal afgeknepen
 - Een positieve gate spanning laat toe het kanaal te openen
 - V_p ligt tussen 0 V en 0.2 V

V_p (pitch off spanning) is de spanning waarbij het kanaal juist afgeknepen is.

Jan Genoe: GaAs Transistors

8



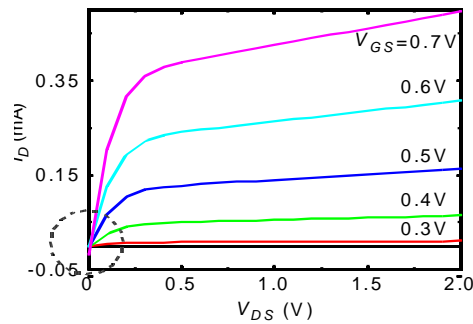
Enhancement: Dit gebeurt als het zacht gedopeerd n-gebied niet diep genoeg is. De RLL pits dan alles af. Door een positieve spanning aan te leggen kunnen we de transistor in geleiding brengen. Let wel op, de spanning voor geleiding bedraagt meestal 0,2 V. Rond de 0,6 V komt men in de buurt van de schottky spanning. Als dit gebeurt gaat de gate zich als een voorwaartse diode naar source en drain gedragen. Het resultaat is dan dat er zeer grote stromen uit de gate gaan vloeien!

Depletion: De RLL pitst het kanaal niet volledig dicht bij een gate spanning van 0V. (het zacht gedopeerd n gebied is diep genoeg). Door een negatieve spanning aan te brengen op de gate kunnen we het kanaal alsnog afpitsen. Een pitch-off spanning van minder dan -2 V vindt men niet; de lekstromen worden dan veel te groot voor nog een degelijke werking te behouden.

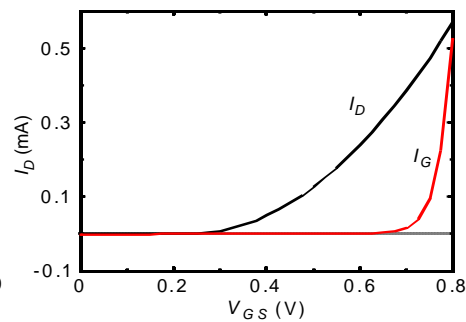
MESFET karakteristieken

- Komen zeer sterk overeen met de MOS transistor
- Een extra factor (tanh) moet worden toegevoegd om rekening te houden met de velocity saturation

$$I_D = \beta (V_{GS} - V_p)^2 (1 + \lambda V_{DS}) \tanh(\alpha V_{DS})$$



(a) I_D - V_{DS} characteristic



(b) I_D - V_{GS} characteristic ($V_{DS} = 0.5$ V)
 I_G is the current flowing into the gate.

Jan Genoe: GaAs Transistors

9



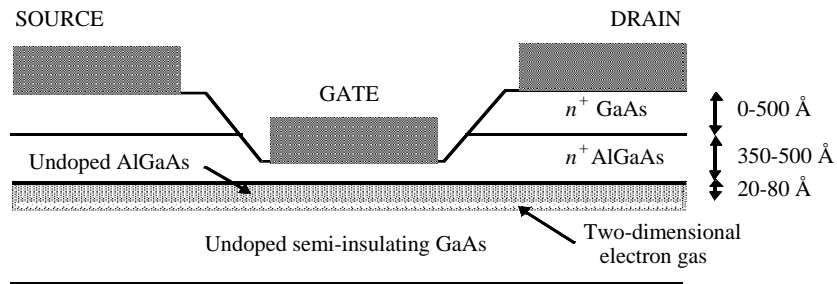
Indien het veld te groot is treedt er “velocity saturation” op; de snelheid van de elektronen daalt een beetje. Dat is dan ook de reden waarom er een tanh in de formule van de MESFET transistor staat. Deze tanh mag verwaarloosd worden indien de V_{DS} niet te groot is.

α is een constante (eenheid: 1/V) die afhankelijk van de transistor.

Let op, vanaf de schottky spanning wordt I_G vergelijkbaar met I_D en kan de transistor geen versterking meer bekomen.

HEMT

- Maakt gebruik van het 2-dimensionaal elektronengas dat ontstaat aan de interface tussen AlGaAs en GaAs
- Deze elektronen hebben een extreem hoge mobiliteit, die zelf nog verder toeneemt bij zeer lage temperaturen



Besluit



- Zal GaAs altijd de "technologie van de toekomst" blijven?
 - Waarschijnlijk zullen de intrinsieke eigenschappen van GaAs ervoor zorgen dat voor een beperkt aantal toepassingen GaAs zal blijven gebruikt worden, maar de voorsprong op Si wordt wel steeds kleiner
 - Schakelingen in de ruimte
 - Schakelingen op lage temperatuur
 - Schakelingen op hoge frequenties
 - Zender en ontvanger in GSM, al de rest in Si
 - Grote circuits zullen in GaAs nooit kunnen gemaakt worden.

