

# A New Field-Effect Transistor with Selectively Doped $GaAs/n - Al_xGa_{1-x}As$ Heterojunction

Discussie & kwalitatieve analyse

Jelle Verstraaten, 500236946  
`jelle@benext.nl`  
E-technology  
Halfgeleiders  
Erik Steuten  
16 juni 2015

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Discussie</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Resultaten</b>	<b>3</b>
3.1	Figuur 1a . . . . .	3
3.2	Figuur 1b . . . . .	3
3.3	Figuur 2 . . . . .	4
3.4	Figuur 3 . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Experimenten</b>	<b>6</b>
4.1	Capaciteit-voltage-profilering . . . . .	6
4.2	Stroom-voltage-karakteristiekbepaling . . . . .	6
<b>5</b>	<b>Referenties</b>	<b>6</b>

## 1 Inleiding

Het artikel dat behandeld wordt, “A New Field-Effect Transistor with Selectively Doped  $GaAs/n - Al_xGa_{1-x}As$  Heterojunction”, is geschreven door Takashi Mimura, Satoshi Hiyamizu, Toshio Fuji en Kazuo Nanbu in 1980. Het artikel is gepubliceerd in het Japanese Journal of Applied Physics (JJAP). Alle artikelen in dit paper zijn gepeer-reviewed. Het artikel borduurd voort een artikel an Dingle et al (Bell Laboratories): “Electron mobilities in modulation-doped semiconductor heterojunction superlattices”.

Het artikel is gepubliceerd dit in opdracht van Fujitsu Laboratories Ltd. Fujitsu was geïnteresseerd in het vercommercializeren van de ontdekking die gedaan is door Dingle. Nadat Dingle zijn onderzoek had gepubliceerd ontstond er namelijk een ware race om de eerste te zijn die deze technologie werkend te krijgen.

Er is een patent van Daniel Delagebeaudeuf en Trong L Nuyen, “Field effect transistor with a high cut-off frequency”. Dit patent borduurd voort op het werk van Mimura et al. en Dingle et al. Beide waren werkzaam bij Thomson-CSF. Dit lab was in staat waren een betere variant van de transistor te fabriceren.

De abstract is duidelijk om geeft meteen aan waarom dit nieuwe type FET interessant is. De reden is dat deze FET veel (tot 3x) hogere frequenties aankan dan de huidige ontwerpen.

In de inleiding wordt duidelijk gemaakt dat dit artikel voortborduert op het artikel van Dingle et al. In dit artikel wordt een nieuw fenomeen gerapporteerd, namelijk de hogere mobiliteit van elektronen in AlGaAs/GaAs heterojunction. In dit artikel wordt verder gegaan met deze ontdekking en wordt gekeken hoe deze hogere mobiliteit gebruikt kan worden in nieuwe halfgeleider componenten. Deze inleiding geeft een goed beeld van de context waarin het artikel geschreven is.

## 2 Discussie

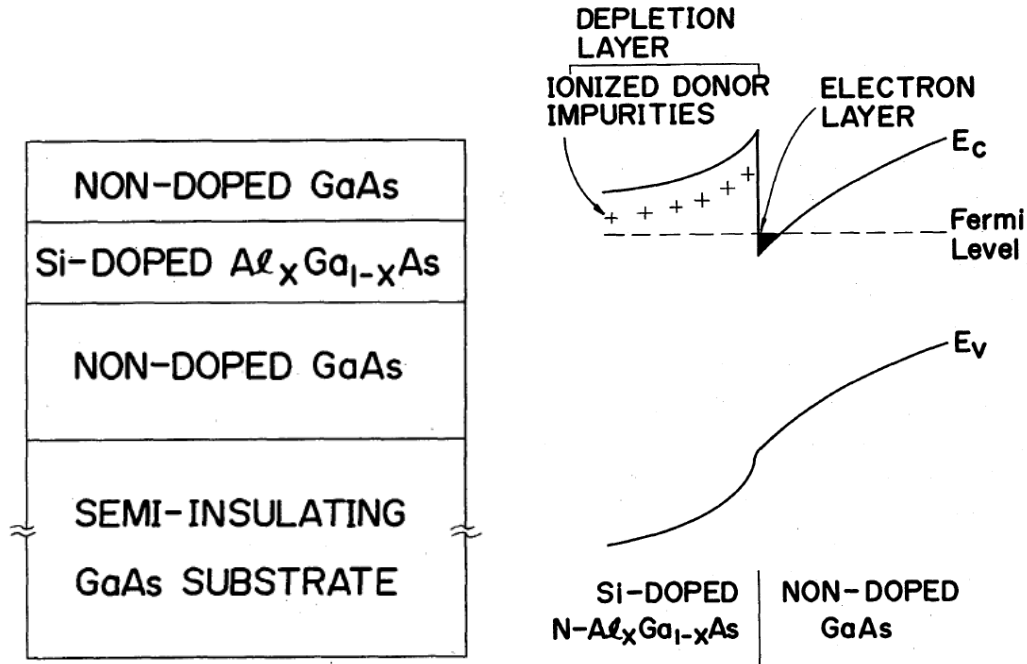
De hoofdvraag van dit artikel is: “Kan de hogere elektronmobiliteit van een heterojunction gebruikt worden voor het fabriceren van een snellere transistor?”. Deze hoofdvraag wordt experimenteel bevestigd door het creëren van onder andere transistoren, diodes en hall-bruggen en het testen hiervan.

Om deze vraag te beantwoorden is gekozen voor een kwantitatieve onderzoeksmethode. Om te kijken of het mogelijk was om transistoren te maken zijn deze eerst gefabriceerd, waarna deze getest zijn. Hierbij werd specifiek gekeken of deze dezelfde verschijnselen vertonen als die uit het voorgaande onderzoek van Dingle et al. Daarna zijn de karakteristieken van deze nieuwe transistor vergeleken met een andere type transistor dat hetzelfde doel heeft.

De resultaten van de testen bevestigen de voorgaande bevindingen van Dingle et al. en wijzen erop dat er een 2-dimensionaal elektrongas ontstaat. Ook wordt aangetoond dat het mogelijk is om het elektrongas te moduleren door het drain-voltage  $V_{DS}$  op de transistor te variëren. Deze resultaten zijn belangrijk omdat hiermee de onderzoeksvraag beantwoord kan worden. Ook kan uit deze resultaten afgeleid worden dat dit nieuwe transistorontwerp, op hoge frequenties, inderdaad beter werkt dan andere ontwerpen.

### 3 Resultaten

In het artikel worden verschillende testen gedaan om te controleren of de transistor werkt zoals wordt verwacht. In de figuren 1a en 1b wordt toegelicht hoe de heterojunction die getest is, is opgebouwd. Hierbij gekeken naar zowel de fysieke structuur (figuur 1a) als naar de bandenstructuur (figuur 1b). In figuur 2 wordt gekeken of het effect van het 2-dimensionaal elektrongas gereproduceerd kan worden en hoe sterk dat is.



(a) De fysieke opbouw van de getestte heterojunction

(b) Opbouw van de bandenstructuur van de getestte heterojunction

#### 3.1 Figuur 1a

In figuur 1a wordt de fysieke opbouw van de getestte heterojunction schematisch weergegeven. In de tekst wordt toegelicht wat de afmetingen van de lagen zijn en hoe sterk deze gedoteerd zijn.

Ook wordt aangegeven dat deze structuur gecreeërd is met behulp van MBE (molecular beam epitaxy). Dit is een manier om hoogkristalliene lagen aan te brengen op een substraat.

#### 3.2 Figuur 1b

In figuur 1b wordt gekeken naar de elektrische bandenstructuur van de heterojunction. In dit diagram wordt geïllustreerd hoe de bandenstructuur ervoor zorgt dat er een 2-dimensionaal elektrongas ontstaat.

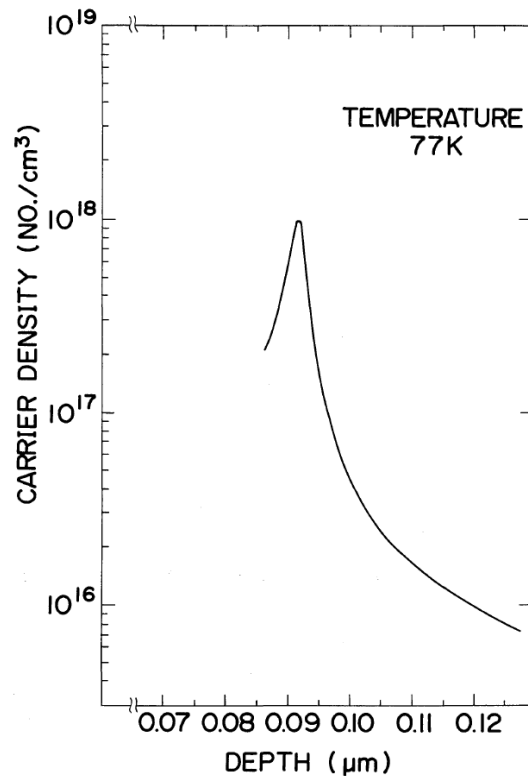
Er wordt in het artikel weinig ingegaan op waarom er sprake is van “electron-confinement” en waarom de elektronen van de donor naar de GaAs-laag migreren. Dit wordt kort aangestipt in de introductie van het artikel. Hier wordt verwezen naar de metingen van Dingle et al. en uitgelegt dat de elektronen naar de GaAs-laag migreren omdat deze een hogere “elektronenaffiniteit” heeft. Dit houdt in de elektronen makkelijker kunnen bewegen in de GaAs-laag, omdat ze hier niet afgeremd worden door de donoronzuiverheden.

### 3.3 Figuur 2

In figuur 2 wordt de “apparent carrier profile” weergegeven zoals gemeten op 77K. De “apparent carrier profile” geeft aan wat de lading (elektronen)dichtheid is op een bepaalde diepte van het substraat.

Dit dichtheidsprofiel is gemeten met behulp van een “differential capacitance feedback profiler”. Door een voltage over de heterojunction te zetten en dan capaciteit te bepalen kan volgens Kroëmer et al. bepaald worden hoeveel ladingdragers er aanwezig zijn op een bepaalde diepte.

De duidelijk waarneembare piek kan duiden op de aanwezigheid van een 2-dimensionaal elektrongas.



Figuur 2: Dichtheid van ladingdragers als functie van de doorsnee van de heterojunction. Er is een duidelijk waarneembare piek die kan mogelijk ontstaan door de aanwezigheid van een 2-dimensionaal elektrongas

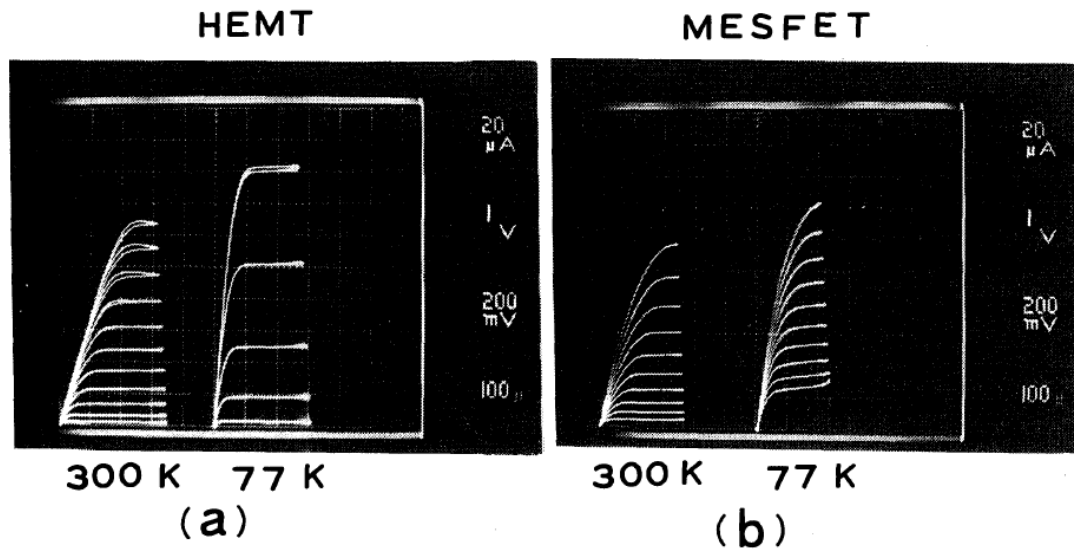
### 3.4 Figuur 3

In figuur 3 wordt het stroom-voltage-karakteristiek van het nieuwe type transistor vergeleken met een bestaand type transistor op 300K en op 77K. Er wordt duidelijk toegelicht wat de afmetingen van de heterojunction zijn en op welke voltage en amperage er gemeten is. Ook wordt duidelijk aangegeven wat de schaal is van het grafiek.

Uit de grafieken is duidelijk af te leiden dat het nieuwe type transistor (figuur 3a) voornamelijk op lage temperaturen een veel betere geleiding heeft dan op hogere temperatuur. Dit is voornamelijk om dat de elektronmobiliteit toeneemt op lage temperaturen. Dit is te zien aan de grotere spreiding tussen de lijnen in figuur 3a. Deze lijnen drukken

de waarden uit in geleiding ( $G_m$ ) of wel  $1/R$ . In het artikel wordt daarna aangetoond dat een beter geleiding direct te vertalen is naar een hogere bandbreedte voor de transistor.

De onderzoekers hebben geprobeerd om de vergelijkingstransistor zoveel mogelijk hetzelfde te krijgen als het nieuwe type. De nieuwe HEMT-transistor heeft, zoals te zien in figuur 2, rond de heterojunction een ladingdichtheid van minimaal  $\pm 2 \cdot 10^{17}/\text{cm}^3$ . De MESFET waarmee vergeleken wordt is daarom zo gedoteerd dat deze een ladingdichtheid van  $1.0 \cdot 10^{17}/\text{cm}^3$  heeft. Ook is geprobeerd om de gate-, source- en drain-geometrie hetzelfde te houden zodat deze dezelfde capaciteit hebben.



Figuur 3: Vergelijking van de stroom-voltage-karakteristiek van een HEMT-FET(a) en een MESFET(b)

## 4 Experimenten

Voor het testen van het nieuwe type transistor zijn 2 testen gedaan: capaciteit-voltage-profilering en stroom-voltage-karakteristiek bepaling.

### 4.1 Capaciteit-voltage-profilering

Capaciteit-voltage-profilering of CV-profilering is een techniek die gebruikt wordt om de interne structuur van een heterojunction te bepalen. Door een spanning over de heterojunction te zetten wordt een “depletion-region” gecreeërd. Deze bevat geen elektronen of gaten meer, maar heeft nog wel een intrinsieke lading vanwege de aanwezig donoratomen. Deze intrinsieke lading creeërt een capaciteit die meetbaar is. Door de spanning over de heterojunction te variëren kan de “depletion-region” groter of kleiner gemaakt worden, waardoor gekeken kan worden naar verschillende delen van de heterojunction.

De resultaten van deze test zijn te vinden in figuur 2 van het artikel. In dit grafiek is de gemeten capaciteit omgezet naar een ladingsdichtheid.

### 4.2 Stroom-voltage-karakteristiekbepaling

De stroom-voltage-karakteristiek of IV-curve is een manier waarop de parameters van een transistor bepaald kunnen worden. Door een vaste stroom aan te bieden op de gate (of base) van een transistor en de spanning over de source-drain of (collector-emitter) te variëren kan bepaald worden wanneer de transistor volledig “aan” is en hoe lineair de versterking is van de transistor. Ook kan de zogenaamde “small-signal applification” of  $H_{fe}$  bepaald worden.

## 5 Referenties

Het artikel gebruikt de ACS of American Chemical Society referentiestijl. Deze stijl volgt de volgende format: Achternaam, Initialen.; Achternaam, Initialen. tijdschrift. jaar, Volume, paginas.

Alle referenties in het artikel komen slechts 1 keer voor, maar het belangrijkste artikel is het eerst vermeldde artikel: “Electron mobilities in modulation-doped semiconductor heterojunction superlattices”. De wetenschappers hebben namelijk geprobeerd