

En español

Nanoheteroestructuras de GaAs/ AlGaAs. Simulación y aplicación en transistores de alta movilidad

Eduardo Martín Rodríguez¹, Estrella González R.²

RESUMEN

En este trabajo se analizan las características de la heteroestructura de GaAs/AlGaAs haciendo énfasis en las propiedades de la unión de ambos semiconductores. Cuando se unen dos materiales, con diferentes anchos en las bandas prohibidas, ocurre un confinamiento de portadores que se les puede describir como un gas de electrones bidimensional.

DESSIS (*Device Simulation for Smart Integrated Systems*) es un programa de simulación que mediante modelos físicos y métodos numéricos robustos permite la simulación de dispositivos semiconductores y de heteroestructuras compuestas por elementos de los grupos III-V de la tabla periódica. Los resultados para diferentes dopajes y voltajes aplicados en la heteroestructura son presentados en este trabajo.

Los transistores de alta movilidad (HEMT, *High Electron Mobility Transistor*) son una de las aplicaciones más importantes de las propiedades de las heteroestructuras, con frecuencias de trabajo en el rango de 30 a 300 GHz. La simulación de un ejemplo de estos transistores es presentada en este trabajo, lográndose una densidad de corriente máxima en el canal de 1 A/mm² comparable con resultados reportados para transistores similares.

Palabras claves: HEMT, heteroestructuras, DESSIS, simulación.

Recibido: octubre 9 de 2009

Aceptado: febrero 7 de 2011

Introducción

El término nanotecnología es usado ampliamente cuando se habla de materiales y dispositivos electrónicos, fotónicos, magnéticos, biológicos o moleculares. Sin embargo, es oportuno aclarar que el término es válido cuando la estructura principal de los elementos anteriores presenta longitudes críticas que están en la escala nanométrica, siendo posible manipularlos ingenierilmente con la misma precisión (Beaumont, 1994). Esta última aclaración hay que tenerla muy en cuenta para el diseño y fabricación de nanosistemas heterogéneos con una alta integración y funcionalidad. En el ciclo de fabricación de cualquier dispositivo nanométrico, ocupa un lugar importante la simulación física del dispositivo con la ayuda de programas potentes. En este trabajo se utiliza DESSIS (*Device Simulation for Smart Integrated Systems*), que es

In English

GaAs/AlGaAs nanoheterostructures: simulation and application on high mobility transistors

Eduardo Martín Rodríguez,³ Estrella González R.⁴

ABSTRACT

This work analyses the features of GaAs/AlGaAs heterostructure, highlighting semiconductor junction properties. Charge confinement was produced when two materials having different band-gap were fixed; such high electron concentration is called two-dimensional electron gas (2DEG).

Device simulation for smart integrated systems (DESSIS) is simulation software which uses physical models and robust numerical methods for simulating semiconductor devices and 3-5 element heterostructures. Results for different heterostructure doping profiles and voltages are presented in this work.

High electron mobility transistors (HEMTs) are one of the most important applications for heterostructures; they work on 30 to 300 GHz frequency ranges. These transistors are simulated in this work; a 1 A/mm² high current density was obtained in the channel, such value being comparable to other values reported for similar transistors.

Keywords: HEMT, heterostructure, DESSIS, simulation.

Received: October 9th 2009

Accepted: February 7th 2011

Introduction

The word nanotechnology is widely used when talking about materials and different devices: electronic, photonic, magnetic, biological or molecular. However, it should be clarified that the term is valid when the core of the elements mentioned above have nanometer critical lengths, thereby making it possible to manipulate them with the same engineering precision (Beaumont 1994). This should be born in mind when designing and constructing heterogeneous high integration and functionality nanosystems. Physical simulation of a device using powerful software is important during nanoscale device production cycle. Device simulation for smart integrated systems (DESSIS) has been used in this paper; it is a multidimensional simulation of semiconductor devices using advanced physical models and robust numeri-

¹M.Sc. en Diseño de Sistemas Electrónicos, Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba. eduardo.marin@electrica.cujae.edu.co

²Ingeniera electricista. Ph.D. en Ciencias Técnicas, Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba. estrella@electrica.cujae.edu.co

³M.Sc. in Electronic Systems Design, Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba. eduardo.marin@electrica.cujae.edu.co

⁴Electrical engineering. Ph.D. in Technical Sciences, Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba. estrella@electrica.cujae.edu.co

En español

un simulador multidimensional de dispositivos semiconductores utilizando modelos físicos avanzados y métodos numéricos robustos.

De igual forma, DESSIS soporta la simulación de dispositivos homoestructurados y heteroestructurados compuestos por elementos de los grupos III-V de la tabla periódica. Esta última potencialidad es la utilizada para simular el comportamiento de la heteroestructura formada por arseniuro de galio (GaAs) con arseniuro de galio-aluminio (AlGaAs) y su aplicación en los transistores de alta movilidad (HEMT, *High Electron Mobility Transistor*).

Los HEMT también se conocen como HFET (*Heterostructure Field Effect Transistor*) o MODFET (*Modulation-doped FET*), transistores de efecto de campo que tienen como canal de conducción, en vez de una región dopada, como en el caso de los MOSFET, una unión entre dos materiales con bandas prohibidas diferentes; esta unión se conoce como heterounión o heterojuntura.

Los HEMT más utilizados son los basados en la combinación de GaAs/AlGaAs, aunque existe una gran variedad, en función de la aplicación a que se destinen (Chang, 2006). Otros HEMT contienen indio, y éstos generalmente presentan mejores rendimientos a altas frecuencias (Martz, 2005). Recientemente se han introducido transistores basados en nitruro de galio (GaN), los cuales presentan mejores rendimientos en alta potencia (Mishra, 2009). Un ejemplo de aplicación de estos últimos fue presentado recientemente por Fujitsu, firma que desarrolló un amplificador de potencia basado en HEMT fabricados con la heterounión de GaN/AlGaN (Fujitsu, 2010). Estos amplificadores transmiten con una capacidad 16 veces superior a su equivalente fabricado con GaAs/AlGaAs.

Desde finales de los años setenta comenzó a hablarse de circuitos integrados utilizando GaAs, o más general, de compuestos III-V (Notthoff and Zuleeg, 1975). Ya se empezaba a hablar de un posible límite para el tamaño de los dispositivos fabricados en silicio y la tecnología basada en GaAs a encontrar su lugar.

En 1985 apareció en el mercado el primer HEMT inventado por los japoneses Minura y Yokoyama, el transistor de menor ruido que se conocía hasta el momento, permitiendo además trabajar en el rango de las microondas, por lo que encontró una rápida aplicación en sistemas de telecomunicaciones, tanto radial como terrestre (Fukuta, 1999). Una de las líneas de desarrollo de las nanotecnologías ha estado enfocada en la fabricación de dispositivos electrónicos basados en semiconductores compuestos, ya sean combinaciones de los grupos III-V o II-VI, siendo posible así la fabricación de dispositivos de pequeño tamaño con un bajo consumo de potencia y, en el caso de los transistores, con una densidad electrónica elevada.

Aplicaciones que trabajan en el rango de frecuencia de 30-300 GHz demandan dispositivos activos, como es el caso de los transistores de alta movilidad, en este caso llamados MMW HEMT (*Milimeter-Wave HEMT*). Las antenas que trabajan en esta longitud de onda tienen que ser de un tamaño inferior a 1 mm, y sería muy conveniente que la modulación electrónica estuviera inmediatamente después de la antena, logrando así dispositivos muy compactos, ideales para comunicaciones a cortas distancias, por ejemplo en aplicaciones de redes de sensores (Thayne, 2004).

In English

cal methods.

DESSIS supports homostructured or heterostructured devices consisting of elements from periodic table groups 3-5. This software potential was used for simulating gallium arsenide (GaAs) and gallium aluminum arsenide (AlGaAs) heterostructure behavior and its application in high mobility transistors (HEMT).

HEMT, also known as heterostructure field effect transistors (HFET) or modulation-doped FET (MODFET) are a type of field effect transistor incorporating a conduction channel (rather than a doped region as in MOSFET), being a junction between two materials having different band-gaps. This is known as a heterojunction.

The most used HEMTs are based on a combination of GaAs/AlGaAs, although there is a wide variety of them depending on the application in which are they going to be used (Chang 2006). Other HEMTs contain Indio; they generally have better performance at high frequencies (Martz 2005). Gallium nitride-based (GaN) transistors have been introduced recently, presenting better performance at high power (Mishra 2009). An example of applying the latter was recently presented by Fujitsu who developed a power amplifier based on the heterojunction of HEMTs made with GaN/AlGaN (Fujitsu 2010). These amplifiers provided transmission capacity 16 times higher than the equivalent with GaAs/AlGaAs.

Talk about integrated circuits using GaAs or 3-5 compounds began in the late 1970s (Notthoff and Zuleeg 1975). Silicon's limits were beginning to be envisioned and this new technology began to find its place.

The first HEMT appeared on the market in 1985; it was invented by Minuro and Yokoyama from Japan. This was the transistor having the lowest noise at the time; it also led to work in the microwave range. These transistors found rapid applications in radio and terrestrial telecommunication systems (Fukuta 1999). One nanotechnology development line has focused on manufacturing compound semiconductor-based electronic devices (i.e. 3-5 or 2-6 combinations) leading to small devices being made having low power consumption and transistors having high electronic density.

Applications working in the 30-300 GHz frequency range require active devices, such as high mobility transistors, called MMW HEMT (Milimeter-Wave HEMT). Antennas working on this wavelength must be smaller than 1mm and it is highly desirable that electronic modulation is immediately after the antenna, thus achieving very compact devices suitable for communication over short distances, for example in sensor network applications (Thayne 2004).

Considerando las dimensiones críticas de un MMW HEMT, para un dispositivo bien diseñado el largo del canal determina la frecuencia de operación; mientras más pequeño sea, más rápido es el dispositivo. Sin embargo, no sólo basta con esto, también deben tener la menor resistencia posible, a tal punto que hasta el último Ohm tiene que ser tomado en cuenta. En estos diseños la simulación juega un papel fundamental.

Los resultados que se ofrecen en este trabajo son una primera aproximación a la fabricación en tamaño nanométrico de transistores de alta movilidad utilizando la heteroestructura de GaAs/AlGaAs. Se presenta, en primer lugar, el comportamiento de las bandas de energía en la heteroestructura y cómo varía ante diferentes situaciones. También se simula el comportamiento de la densidad de corriente en el canal de un prototipo de transistor de alta movilidad, y finalmente se analizan los resultados obtenidos y se comparan con otros reportados para dispositivos similares.

Materiales y métodos

Características fundamentales de la heteroestructura GaAs/AlGaAs

La utilización del arseniuro de galio (GaAs) en sustitución del silicio, como material semiconductor base en dispositivos activos, ha sido de gran interés debido a que la movilidad de los electrones en el GaAs es seis veces superior a la del silicio (8.600 cm²/Vs del GaAs por 1.350 cm²/Vs del Si).

De esta forma surgieron los MESFET (*Metal Semiconductor Field Effect Transistors*) fabricados con GaAs, donde la movilidad de los electrones es mayor que en el silicio. Los sistemas electrónicos basados en transistores MESFET son más rápidos que los basados en FET de silicio, y se conocen por sus extraordinarias capacidades en velocidad (Rashid, 2000). No obstante, al igual que otros transistores del tipo FET, la capa semiconductor de GaAs debe ser dopada para permitir la movilidad de los electrones por medio de ellas. En cualquier caso estos electrones son ralentizados por las colisiones que sufren con las impurezas dopantes. Los HEMT resuelven este problema.

Los HEMT son transistores tipo FET, en el que se reemplaza el canal de conducción por una juntura en la que se unen dos materiales semiconductores con diferentes brechas entre las bandas de conducción y de valencia, es decir, distintos anchos en las bandas prohibidas. De esta forma se produce una capa muy delgada en la cual el nivel de Fermi está por encima de la banda de conducción. Al confinamiento de los portadores se le describe como un gas de electrones bidimensional. En la figura 1 se exhibe un esquema con las capas para una heteroestructura de GaAs/AlGaAs, en la parte b) se muestra el diagrama aproximado de las bandas de energías y se señala con una flecha el lugar donde se forma el gas de electrones bidimensional.

En la figura 1 a) las capas que forman la heteroestructura comienzan por un sustrato semi-aislante, sobre el que se deposita por crecimiento epitaxial una capa de GaAs no dopada con un ancho de banda prohibida significativamente inferior al que tienen las capas dopadas de AlGaAs que le continúan. Esta diferencia en el ancho de las bandas prohibidas provoca que los electrones generados en la capa fina tipo N de AlGaAs caigan en la capa de GaAs, dejando completamente vacía la capa anterior

Considering MMW HEMT critical dimensions for a well-designed device, channel length determines the operating frequency (i.e. the smaller the faster the device). However, this is not enough; they must also have the least possible resistance and even the last Ohm has to be taken into account. Simulation plays a fundamental role in such designs.

The results presented in this paper are a first approach to nano-scale fabrication of high-mobility transistors using GaAs/AlGaAs heterostructure. The behaviour of energy bands for different situations is presented and the behaviour of current density in a channel for a high mobility transistor prototype is simulated and results are analysed and compared to those for other reports for similar devices.

Materials and Methods

Key features of GaAs / AlGaAs heterostructure

Using gallium arsenide (GaAs) to replace silicon as semiconductor material in active devices has been of great interest because electron mobility in GaAs is six times higher than that for silicon (8,600 cm²/Vs for GaAs and 1,350 cm²/Vs for Si).

Thus metal semiconductor field effect transistors MESFET came to be fabricated with GaAs, where electron mobility was higher than in silicon. MESFET circuits are faster than other types of silicon-based FET circuits and are known for their extraordinary speed (Rashid 2000). However, like other FET transistors, the GaAs semiconducting layer has to be doped to ensure electron mobility through it. These electrons slow down due to collisions with doping impurities. HEMTs resolve this problem.

HEMTs are FET transistors, the conduction channel being replaced by a junction where two semiconductor materials having different band gaps are joined. There is a very thin layer in which the Fermi level is above the conduction band. Carrier confinement is described as two-dimensional electron gas. Figure 1 gives a diagram of electron gas formation for a GaAs/AlGaAs heterostructure.

Figure 1a) shows that the layers forming the heterostructure begin with a semi-insulating substrate on which non-doped GaAs layer is deposited by epitaxial growth; it has a significantly lower band-gap than the AlGaAs-doped layers which follow. The different band-gap is why the electrons generated in the n-type AlGaAs thin layer all migrate to the GaAs layer left empty by the previous layer due to the heterojunction formed by the two materials having a different band-gap, forming a quantum well in

En español

debido a que la heterounión creada por dos materiales de diferente ancho de banda prohibida forma un pozo cuántico en la banda de conducción en el lado del GaAs, como se observa en la figura 1 b), donde los electrones se pueden mover rápidamente sin colisionar con ninguna impureza ya que esta capa no está dopada, y de la que además no pueden escapar. El efecto resultante es la creación de una capa sumamente fina llamada gas de electrones bidimensional, con mucha concentración de electrones conductores con altísima movilidad, dando al canal una muy baja resistividad. La x en la figura indica la cantidad de Al presente en el compuesto ternario. Un incremento de esta x en el AlGaAs incrementa la energía del gap de este compuesto, provocando un incremento en el confinamiento de electrones en la región del gas de electrones bidimensional.

El esquema de la figura 1 b) es aproximado, ya que un diagrama correcto requiere resolver la ecuación de Poisson teniendo en cuenta el dopaje de cada una de las capas y el espacio de carga resultante.

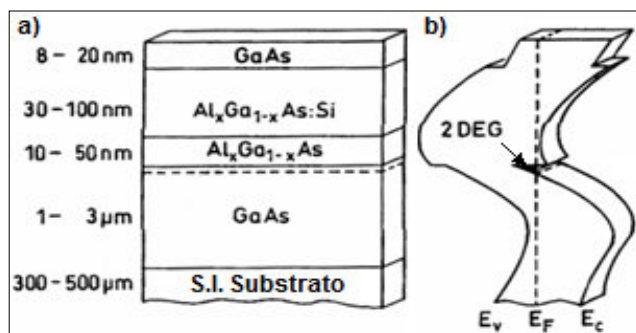


Figura 1. a) Esquema de las diferentes capas de una heteroestructura de GaAs/AlGaAs. b) Esquema aproximado de las bandas de energía, se señala la formación del gas de electrones en dos dimensiones.

En los HEMT, como en todos los transistores de efecto de campo, la tensión aplicada a la compuerta del transistor modifica la conductividad de la capa resultante de la formación del gas de electrones bidimensional. El voltaje aplicado entre fuente y drenaje provoca la rápida circulación de los electrones confinados en el canal.

Debido a las condiciones anteriores los portadores de carga adquieren una muy alta movilidad y gran velocidad de saturación, habilitándolos para reaccionar a campos que varían a muy altas frecuencias, reduciéndose significativamente el efecto de dispersión que los átomos de dopaje producen sobre los portadores de carga y aminorando en gran medida el ruido que este dispositivo emite.

Normalmente los dos materiales semiconductores tienen la misma estructura cristalina, permitiendo un adecuado ajuste entre ellos, esto con el objetivo de evitar que los portadores queden atrapados en las discontinuidades que se podrían producir, reduciendo su rendimiento (Cho 1994).

Características generales del programa DESSIS

DESSIS simula numéricamente el comportamiento eléctrico de un dispositivo semiconductor aislado o varios dispositivos físicos combinados en un circuito. Terminales de corrientes [A], voltajes [V] y cargas [C] son computados sobre la base de ecuaciones físicas que describen la distribución de carga y los mecanismos de conducción. Un dispositivo semiconductor real, como un

In English

the GaAs conduction band (Figure 1 b). Here, electrons are able to move rapidly without hitting any impurities because this layer is non-doped and electrons are confined inside. The resultant effect is the formation of a very thin layer called two-dimension electron gas, having a great electron concentration and high carrier mobility, giving the channel very low resistivity. The x in the figure indicates the amount of Al present in the ternary compound. Increased x value in AlGaAs increases this compound's band-gap, causing a growth in the number of electrons confined in the two-dimension electron gas.

The diagram shown in Figure 1b) is approximate because a correct diagram requires solving Poisson's equation, taking into account each layer's doping and the resulting charge space.

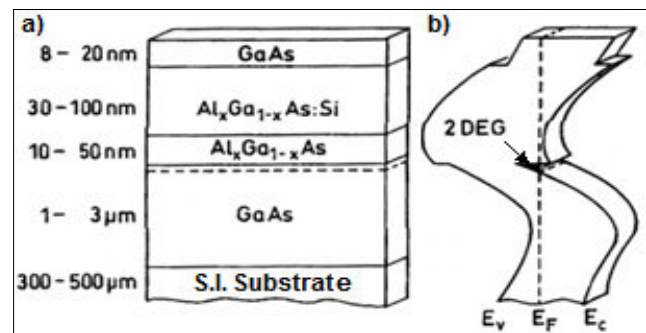


Figure 1. a) GaAs/AlGaAs heterostructure layers. b) Approximate diagram of energy bands, the two-dimension electron gas is shown.

In HEMTs, as in any FET transistor, gate voltage causes changes in conductivity in the two-dimension electron gas. The applied voltage between source and drain causes fast circulation for the electrons confined in the channel.

Due to the above conditions, charge carriers acquire very high mobility and high saturation speed, enabling them to react in the presence of very high frequency fields. The scattering effect produced on charge carriers by doping atoms becomes significantly reduced, meaning that the noise emitted by the device also becomes greatly reduced.

Normally, the two semiconductor materials have the same crystal structure for a suitable fit between them to prevent carriers being trapped in discontinuities that might occur, thereby lowering their performance (Cho 1994).

General DESSIS software features

DESSIS numerically simulates the electrical behaviour of a single semiconductor device or several physical devices combined in a circuit. Terminal currents [A], voltage [V] and charges [C] are computed on the basis of physical equations describing charge distribution and conduction mechanisms. A real semiconductor device, such as a transistor, is represented in the simulator as a

En español

transistor, es representado en el simulador como un dispositivo "virtual" cuyas propiedades físicas son discretizadas en una cuadrícula o malla no uniforme de nodos.

Por lo tanto, un dispositivo virtual es una aproximación de un dispositivo real, cuya estructura es descrita utilizando la herramienta ISE TCAD por dos ficheros:

- El fichero de mallado o geometría, que contiene una descripción de las regiones del dispositivo, como son: condiciones de fronteras, tipos de material y las localizaciones de los contactos eléctricos. Este archivo también contiene la ubicación de todos los nodos y su conectividad.
- El fichero de datos o dopaje contiene las propiedades del dispositivo, como son los perfiles de dopaje y la forma en que los datos se asocian con los nodos discretos.

Las características de DESSIS son muchas y variadas. Éstas pueden ser resumidas en las siguientes:

- Contiene una gran cantidad de modelos para dispositivos físicos y efectos en dispositivos semiconductores (modelos de difusión, termodinámicos e hidrodinámicos).
- Soporte general para diferentes geometrías (1D, 2D y 3D).
- Un paquete extensivo para soluciones no lineales.
- Permite la interacción entre modelos de dispositivos electro-térmicos y modelos de circuitos diseñados en SPICE.

Puntos fundamentales sobre DESSIS en la simulación

Los ficheros de geometría y datos, mencionados anteriormente, son generados utilizando la herramienta MDRAW dentro del paquete ISE TCAD. Estos ficheros se generan de acuerdo a la geometría, perfiles de dopaje y cargas que sean aplicados al sistema de estudio.

El programa DESSIS utiliza como fichero principal el *.cmd*, el cual debe ser copiado en el directorio de trabajo (es posible copiar un fichero *.cmd* que haya sido usado en otra simulación y modificarlo). Para editar el fichero *.cmd* se utiliza "VI tool", una herramienta de edición de texto accesible desde la línea de comandos del sistema operativo *Linux*. El fichero principal está dividido por secciones, cuyo contenido debe ser reprogramado de acuerdo a la simulación que se vaya a realizar. Por ejemplo, en la sección "Input files" hay que poner los nombres de los ficheros de entrada que fueron generados en MDRAW.

Luego es necesario crear el fichero *.par*, que va a contener todos los parámetros de los materiales presentes en el diseño. Este fichero se genera escribiendo la sintaxis: *dessis-L <filename.cmd>* en la línea de comandos. De esta forma DESSIS crea el archivo *models.par*, el cual tiene los parámetros de todos los materiales presentes en la estructura.

A continuación, y por su importancia, se hace referencia a cambios que son necesarios hacer en el fichero *.cmd*. Por ejemplo, cuando se trabaja con materiales ternarios, o más generalmente cuaternarios, es obligatorio declarar la fracción molar dentro de la sección "Physic". En la simulación realizada en este trabajo lo siguiente fue incluido:

In English

virtual device whose physical properties are discretized in a grid or non-uniform mesh nodes.

Therefore, a virtual device is an approximation of a real device whose structure is described using the ISE TCAD tool by two files:

- A meshing or geometry file containing a description of the device regions, such as: boundary conditions, material types and locations of electrical outlets. This file also contains the location of all nodes and their connectivity; and
- A doping data file or device containing properties such as doping profiles and the way in which data is associated with discrete nodes.

DESSIS has many features. These can be summarised by the following:

- It contains a lot of models for physical devices and effects on semiconductor devices (thermodynamic and hydrodynamic diffusion models);
- General support for different geometries (1D, 2D and 3D);
- An extensive package for nonlinear solutions; and
- It allows interaction between electrothermal device models and circuit models designed in SPICE.

Main points about simulation using DESSIS

The geometry files and data mentioned above were generated using the tools in the MDRAW ISE TCAD package; such files were generated according to the geometry, doping profiles and loads which are applied to the system being studied.

DESSIS uses the main *.cmd* file which must be copied into the working directory (a *.cmd* file can be copied which has been used in other simulation and modified). The VI tool is used for editing the *.cmd* file which is a text-editing tool accessible from *Linux* operating system command line. The main file is divided by sections whose contents have to be reprogrammed according to the planned simulation. For example, the names of input files generated in MDRAW must be in the "Input files".

A *.par* file must then be created; it will contain all materials parameters in the design. This file is generated by typing: *dessis-L <filename.cmd>* in the command line. DESSIS thus creates the *models.par* file which has parameters for all materials in the structure.

Now, and due to their importance, mandatory changes in the *.cmd* file are described. For example, when working with ternary or quaternary materials, the molar fraction inside the physical section must be declared. The following were included in this simulation:

En español

MoleFraction (x Fraction = 0,3

```
RegionName = ["Region_1"]) # The Region_1 represent
the AlGaAs layer
```

Como se observa, definir la región del diseño donde se encuentra el elemento ternario es importante. El valor de x en el elemento ternario AlGaAs es tratado como $Al(x)Ga(1-x)As$.

Para obtener la distribución de las bandas en la heteroestructura es necesario indicar en la sección "Solve" que se va a resolver la ecuación Poisson, quedando de la forma siguiente:

```
Solve{
...
Poisson coupled {poisson electron hole}
...
}
```

Por último, es necesario poner en la sección "Plot" los siguientes comandos:

```
Plot {
hQuasiFermi
eQuasiFermi
EffectiveBandGap
ValenceBandEnergy
ConductionBandEnergy
.....
}
```

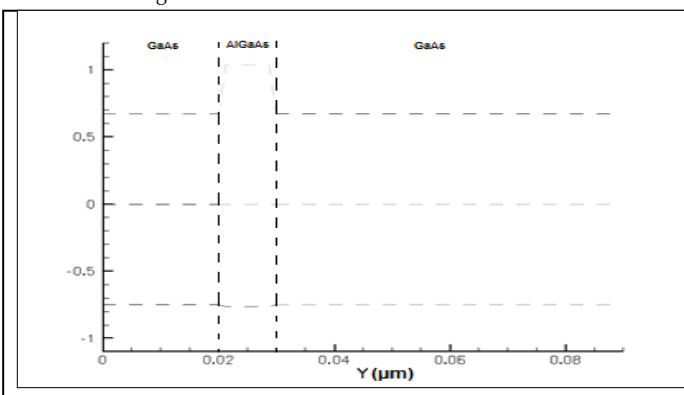
Resultados y discusión

Simulación de la heteroestructura y del HEMT utilizando DESSIS

Se presenta en primer lugar la simulación del comportamiento de las bandas de energía en la heteroestructura y su variación ante diferentes situaciones. También se simula el comportamiento de la densidad de corriente en el canal de un prototipo de transistor de alta movilidad, y finalmente se analizan los resultados obtenidos y se comparan con otros reportados para dispositivos similares.

Estructura de banda en la heteroestructura de GaAs/AlGaAs ante diferentes situaciones

Primero se simuló el comportamiento de la estructura de bandas para una heteroestructura con las siguientes dimensiones GaAs ($0,02 \mu\text{m}$) / AlGaAs($0,01 \mu\text{m}$) / GaAs($0,06 \mu\text{m}$). El resultado se muestra en la figura 2.



In English

molefraction (xfraction=0.3

```
regionname=["region_1"]) # the region_1 represents
the AlGaAs layer
```

As seen, it is very important to define the region where the ternary element is. The x value in the ternary element AlGaAs is treated as $Al(x)Ga(1-x)As$.

It has to be defined in the "solve" section that the Poisson equation is to be solved to obtain energy band distribution in the heterostructure:

```
solve{
...
Poisson coupled {Poisson electron hole}
...
}
```

The following commands must be defined in the "plot" section:

```
Plot {
hQuasiFermi
eQuasiFermi
EffectiveBandGap
ValenceBandEnergy
ConductionBandEnergy
.....
}
```

Results and Discussion

Simulation of heterostructure and HEMT using DESSIS.

Simulating the energy bands in heterostructure is presented and their behaviour in different situations. The behaviour of current density in the channel of a high mobility transistor prototype is also simulated and results are analysed and compared with those for similar devices.

Band structure in the GaAs/AlGaAs heterostructure in different situations

Band structure behaviour was first simulated for the following heterostructure dimensions: GaAs ($0.02 \mu\text{m}$) / AlGaAs ($0.01 \mu\text{m}$) / GaAs ($0.06 \mu\text{m}$). The result is shown in Figure 2.

Figura 2. Estructura de bandas para la heteroestructura de GaAs/AlGaAs/GaAs. No es aplicado ningún dopaje, ni cargas de voltaje.

Figure 2. Band structure for GaAs/AlGaAs/GaAs heterostructure. Doping, voltage or charges were not applied

En español

In English

Esta simulación es sin aplicar perfiles de dopaje en la heteroestructura. Tampoco se aplicaron cargas de voltaje al sistema. Es posible observar la diferencia en el *gap* de las bandas de energía del GaAs y el AlGaAs, resultando la formación de discontinuidades en la estructura de las bandas de energía en la interfaz de la heteroestructura.

Heteroestructura de GaAs/AlGaAs dopada con fósforo

La figura 3 muestra el diagrama de bandas para la heteroestructura de GaAs/AlGaAs dopada con fósforo, siendo posible observar cómo el nivel de Fermi se acerca a la banda de conducción debido al dopaje con un elemento donador. En esta simulación, no se aplicó fuente de voltaje.

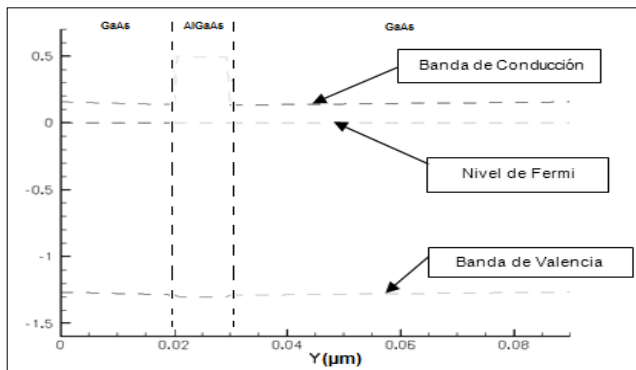


Figura 3. Estructura de bandas para la heteroestructura de GaAs/AlGaAs dopada con fósforo, sin voltaje aplicado.

Las figuras siguientes muestran el comportamiento de la estructura dopada con fósforo bajo la acción del voltaje aplicado. En este caso veremos el comportamiento para 1 V y 2 V. La figura 4 (1 V aplicado) señala una pequeña inclinación en las bandas de valencia y conducción, evidenciándose el inicio del agotamiento de los huecos.

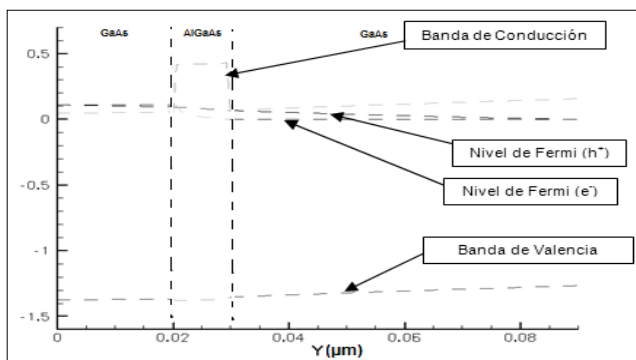


Figura 4. Estructura de bandas para la heteroestructura de GaAs/AlGaAs dopada con fósforo, 1 V aplicado.

En la siguiente figura (5) es más evidente el agotamiento de los huecos y la alta acumulación de electrones que se alcanza, siendo posible la obtención de una muy alta corriente de cargas negativas en la heteroestructura.

Comportamiento de la densidad de corriente en el canal del HEMT

La heteroestructura AlGaAs/GaAs puede ser usada para fabricar un transistor de efecto de campo basado en GaAs, llamado HEMT, como ya se vio, utilizando la heterounión de una capa

Doping profiles were not applied to the heterostructure in this simulation, nor were voltage loads applied to the system. A difference in GaAs and AlGaAs energy band gap may be noticed resulting from discontinuities forming in energy band structure at heterostructure interface.

GaAs/AlGaAs heterostructure doped with phosphorus

Figure 3 shows the band diagram for a GaAs/AlGaAs heterostructure doped with phosphorus, making it possible to observe how the Fermi level approached the conduction band due to the doping effect with a donor element. Voltage source was not applied in this simulation.

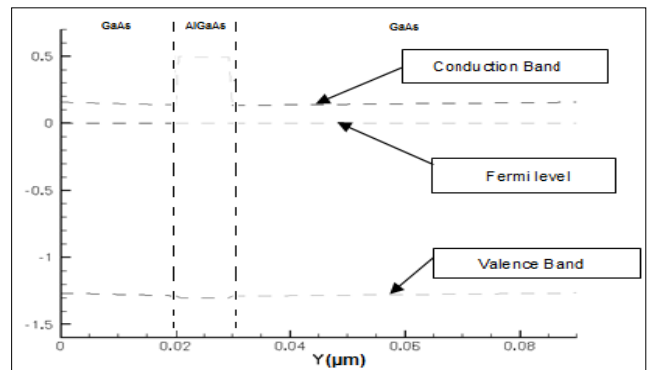


Figure 3. Structure band for GaAs/AlGaAs/GaAs heterostructure doped with phosphorus, without applied voltage

The following Figures show the behaviour of a phosphorus-doped structure when voltage was applied; in this case, behaviour for 1V and 2V can be seen. Figure 4 (1V applied) shows a small tilt in valence and conduction bands, demonstrating the beginning of hole depletion.

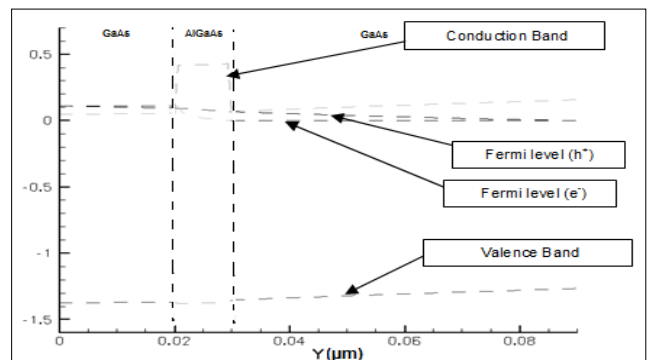


Figure 4. GaAs/AlGaAs/GaAs heterostructure structure band doped with phosphorus, 1V applied.

Hole depletion is more evident in the following Figure (5) and high electron accumulation was reached. A very high negative charge current could be obtained in the heterostructure.

Current density pattern in the HEMT channel

AlGaAs/GaAs heterostructure can be used for fabricating a GaAs-based field effect transistor (called HEMT as seen above), using a heterojunction from a thin AlGaAs layer having highly-doped

En español

fin de AlGaAs altamente dopada con impurezas tipo n, y una capa no dopada, o poco dopada, de GaAs.

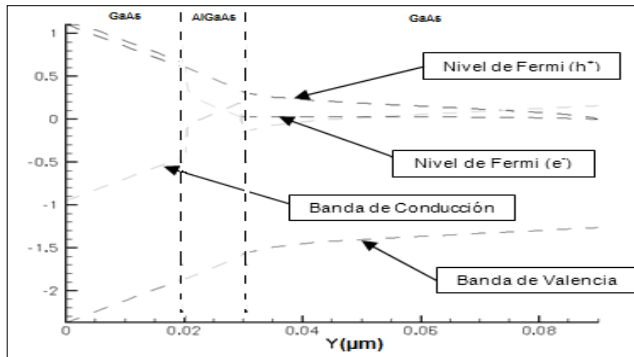


Figura 5. Estructura de bandas para la heteroestructura de GaAs/AlGaAs dopada con fósforo, 2 V aplicado.

Los electrones generados en la capa de AlGaAs caen completamente a la capa de GaAs y, debido a la diferencia en el gap de los materiales se crea como un cañón, donde los electrones se pueden mover con mucha rapidez sin colisionar con ninguna impureza. Ésta es la principal ventaja de los HEMT sobre los MESFET, al crearse un canal libre de las impurezas provocadas por el dopaje, de esa forma los electrones se mueven con total libertad. Esto reduce el ruido, permite trabajar a altas frecuencias e incrementa la ganancia de los transistores. En la figura siguiente se muestra el diagrama del HEMT que fue simulado en DESSIS.

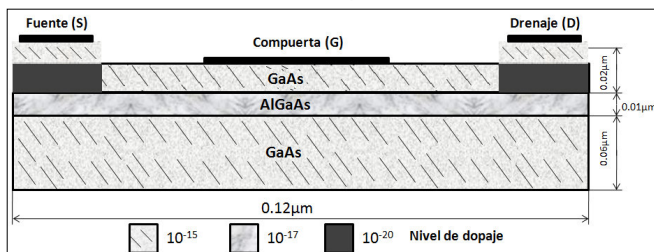


Figura 6. Esquema del HEMT, dibujado en MDRAW, para su simulación en DESSIS.

La creación del gas de electrones bidimensional en la capa poco dopada de GaAs provoca una gran acumulación de electrones, que puede ser modulada también por el efecto del voltaje de compuerta (V_G). Estos transistores tienen una característica unipolar. El voltaje aplicado entre fuente y drenaje orienta los electrones y permite la conducción de corriente en el canal.

La simulación fue realizada para $V_{SD} = -1$ V, $V_G = 1$ V. El diagrama de las bandas de energía y el comportamiento de la densidad de corriente se muestran en las siguientes figuras.

Según la ayuda de DESSIS el valor de la densidad de corriente se encuentra expresado en $[A/cm^2]$, por lo que el valor máximo de la densidad de corriente en el canal del HEMT es de $1 A/mm^2$. En la figura 8 puede observarse cómo el valor máximo para la densidad de corriente se alcanza justo en el lugar donde se crea el gas de electrones bidimensional, es decir, en la interfaz entre la capa de AlGaAs dopada y la capa de GaAs poco dopada.

En un artículo donde se exponen los resultados del estudio de un HEMT con tecnología III-V y 50 nm de largo del canal (Thayne, 2004), se reporta una densidad de $0,9 A/mm^2$ para un $V_{DS} = 1,2$ V y $V_G = 0$ V, valor similar al obtenido en la simulación en DESSIS del prototipo de HEMT.

In English

n-type impurity and a thin undoped or slightly doped GaAs layer.

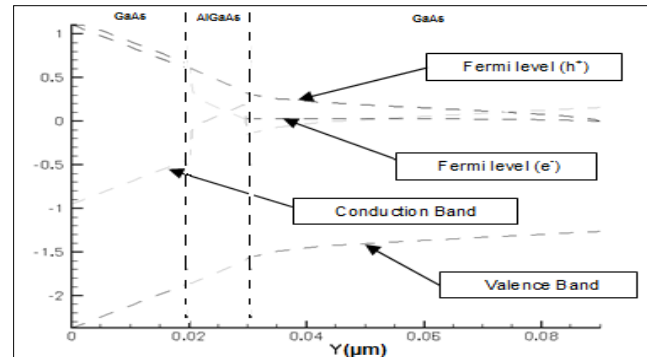


Figure 5. GaAs/AlGaAs/GaAs heterostructure band for structure doped with phosphorus, 2V applied.

The electrons produced in the AlGaAs layer fell entirely to the GaAs layer and an electron beam was created in the material's gap due to the difference, where electrons could move very quickly without colliding with any impurity. The main advantage of HEMTs on MESFETs was to create a conduction channel free of impurities caused by doping so that electrons could move freely. Such improvement reduced noise and allowed working at high frequencies and increased transistor gain. The following figure shows the diagram for a DESSIS-simulated HEMT.

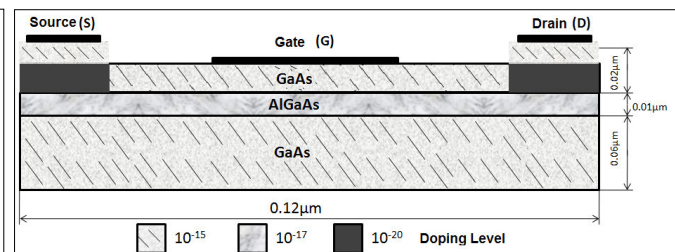


Figure 6. Outline of the HEMT, drawn in MDRAW, for DESSIS simulation

Two-dimensional electron gas formation in a GaAs slightly doped layer caused a large accumulation of electrons. This could also be modulated by the effect of gate voltage (V_G). These transistors have a unipolar characteristic. The voltage applied between source and drain guided the electrons and allowed current conduction in the channel.

The simulation was performed for $V_{SD} = -1$ V, $V_G = 1$ V. The energy band diagram and current density pattern is shown in Figures 7 and 8.

According to DESSIS, current density value was expressed in $[A/cm^2]$ so that maximum current density in the HEMT channel was $1 A/mm^2$. Figure 8 shows that the maximum value for current density occurred at the place where the two-dimensional electron gas was, i.e. in the interface between the doped AlGaAs layer and the low doped GaAs layer.

An article setting out the results of a HEMT with 3-5 technology and 50 nm channel length (Thayne 2004), reported $0.9 A/mm^2$ current density for $V_{DS} = 1.2$ V and $V_G = 0$ V. These values were similar to those obtained in HEMT prototype simulation using DESSIS.

En español

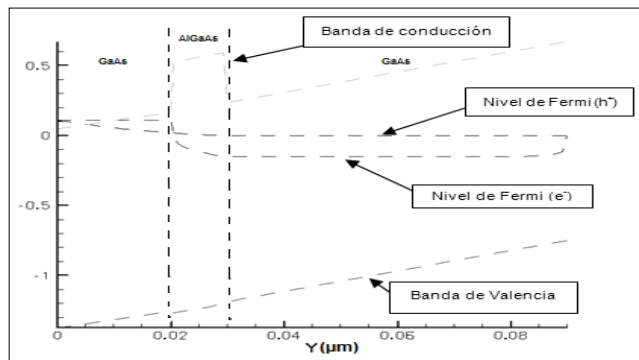


Figura 7. Diagrama de bandas para la heteroestructura en el HEMT, con $V_{DS} = -1\text{ V}$, $V_G = 1\text{ V}$.

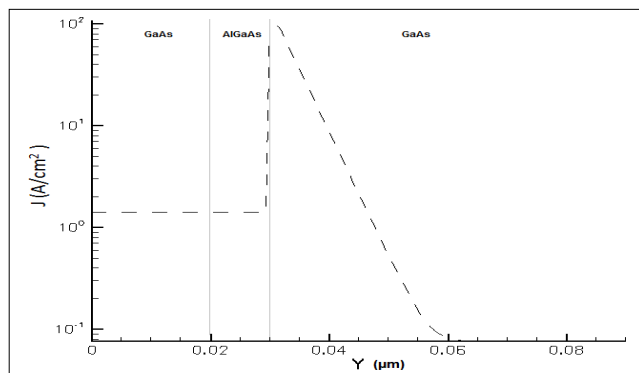


Figura 8. Densidad de corriente alcanzada en el canal del HEMT.

In English

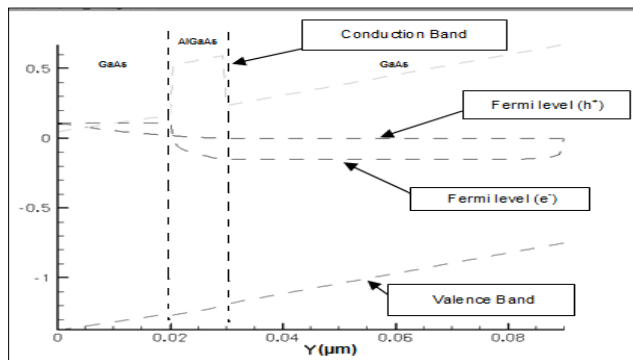


Figure 7. Band diagram for HEMT heterostructure with $V_{DS} = -1\text{ V}$, $V_G = 1\text{ V}$.

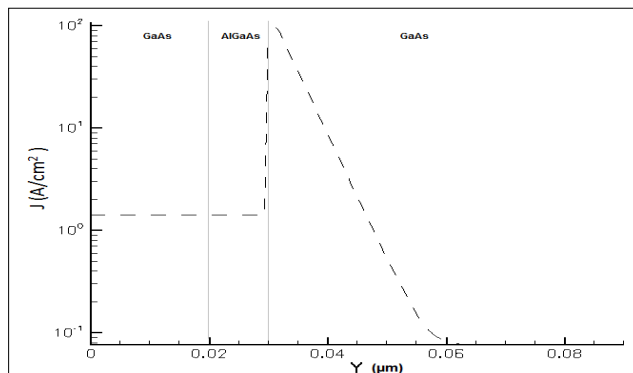


Figure 8. Current density achieved in the HEMT channel

Conclusiones

Este trabajo marca el inicio en la simulación de nanoestructuras semiconductoras, lo cual, sin dudas, constituye un buen resultado. Se ha logrado simular el comportamiento de las bandas de energías en la heteroestructura sin dopar o dopada con fósforo. También se analiza el comportamiento de la estructura dopada con fósforo aplicándole voltajes de 1 V y 2 V, respectivamente.

Por último, son obtenidos de la simulación los valores de la densidad de corriente en el HEMT. Se aprecia cómo el mayor valor de corriente se alcanza justo en la capa donde se encuentra el gas de electrones bidimensional, obteniéndose valores comparables con diseños reportados por otros autores y demostrándose así la valía del modelo implementado en DESSIS.

Las investigaciones enfocadas a la obtención de dispositivos activos que trabajen a altas frecuencias, y sean pequeños, confiables y duraderos, constituyen un punto clave en estos días para la comunidad científica. Lograr diseños novedosos y eficientes constituye un gran reto; de ahí la importancia de una simulación eficiente del comportamiento de estos dispositivos.

Referencias / Referencias

Beamont, S. P., The applications of nanotechnology in electronic devices., IEEE Proceeding, 1994.
 Chang, W. C., Improving breakdown voltage in AlGaAs/GaAs HEMT by gate oxidation., Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 8(1), 2006.

Conclusions

This work marks the beginning of simulating semiconductor nanostructures, which is undoubtedly a good result. Energy band patterns in the undoped heterostructure or that doped with phosphorous were obtained by simulation. The phosphorus doped structure pattern was also analysed by applying 1V and 2V voltages.

Current density values in HEMT were obtained from the simulation. The largest current value only occurred in the layer where the two-dimensional electron gas was. The values obtained were comparable with those reported by other authors. The good performance of a model implemented in DESSIS would thus seem to have been demonstrated.

This research focused on fabricating small reliable and durable devices operating at high frequencies; these represent a key point these days for the scientific community. Achieving innovative and efficient designs are a big challenge, hence the importance of efficiently simulating these devices' behaviour.

Cho, A. Y., Molecular Beam Epitaxy., AIP, 1994.
 Fujitsu., Fujitsu develops GaN HEMT power amplifier featuring world's highest output in millimeter-wave W-Band., from <http://www.physorg.com/news205606729.html>., 2010.
 Fukuta, M., History of HEMT Transistors., Journal of the JSPE, 1999.

Martz, C., InP HEMT - Indium Phosphide High Electron Mobility Transistor., NASA Scientific and Technical Aerospace Reports, 43(15), 2005.

Mishra, U. K., AlGaIn/GaN HEMTs: An overview of device operation and applications. Electrical & Computer Engineering Department., Santa Barbara, California, University of California. Ph.D., 2009.

Nothhoff, J. K., Zuleeg, R., High speed, low power GaAs JFET

integrated circuits., IEDM Dig. Tech., Papers: 624, 1975.

Rashid, M. H., Circuitos microelectrónicos, análisis y diseño., University of Florida, 2000.

Thayne, I., Enabling nanofabrication., DTI Public Service Review, 2004.

Thayne, I., Very high performance 50nm T-gate III-V HEMTs enabled by Robust Nanofabrication Technologies., 4th IEEE Conference on Nanotechnology, 2004.