

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN



Contribución al Desarrollo Tecnológico de
Transistores HEMT de AlGaIn/GaN

Autora: Dña. M^a Fátima Romero Rojo

Licenciada en C.C. Físicas

Directores:

Prof. Dr. Elías Muñoz Merino

Catedrático de Universidad

Dra. Ana Jiménez Martín

Prof. Titular de Universidad

2010

TESIS DOCTORAL: Contribución al Desarrollo Tecnológico de Transistores HEMT de AlGaIn/GaN

AUTORA: Dña. M^a Fátima Romero Rojo

DIRECTORES: Prof. Dr. Elías Muñoz Merino y Dra. Ana Jiménez Martín

El tribunal nombrado por el Mgfc. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día ~~25~~ de ~~Junio~~ de 2010, para juzgar la Tesis arriba indicada, compuesto por los siguientes doctores:


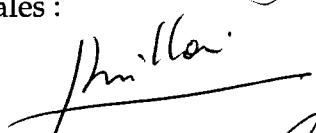
Dr. FERNANDO CASLE GÓMEZ..... (PRESIDENTE)
Dr. JUAN PIQUERAS PIQUERAS..... (VOCAL)
Dr. JOSÉ MILLÁN GÓMEZ..... (VOCAL)
Dr. GERMÁN VERGARA OGBANDO..... (VOCAL)
Dr. ALDORO PRADO MILLÁN..... (SECRETARIO)

Realizado el acto de lectura y defensa de la Tesis el día 12 de JULIO de 2010 en MADRID..... acuerda otorgarle la calificación de: Sobresaliente "cum laude"

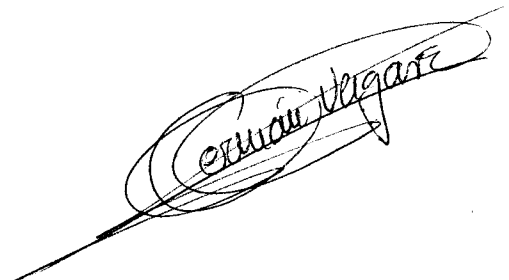
El Presidente :

El Secretario :

Los Vocales :





Resumen

Los transistores basados en nitruros se han convertido en poco tiempo en los candidatos idóneos para trabajar a alta temperatura (hasta 500°C), alta potencia de salida (40 W/mm), bajo ruido y con posibilidad de trabajar a frecuencias altas, que abarcan un amplio espectro (entre 1 y 100 GHz). Esto es debido fundamentalmente a la anchura del gap de estos materiales (GaN 3.4 eV), que les confiere una gran estabilidad térmica y una elevada tensión de ruptura (3 MV/cm), frente a otras tecnologías hasta ahora más usadas.

Estas prometedoras características son muy atractivas para muchos sectores industriales, especialmente para su uso en amplificadores de potencia en el rango de microondas y electrónica de potencia de alta eficiencia. Sin embargo, todavía queda mucho por hacer para conseguir una tecnología madura y competitiva, tanto en coste, como en fiabilidad. Uno de los aspectos críticos a combatir es la dispersión de corriente observada en la mayoría de los dispositivos. Esta dispersión ocasiona una caída en la corriente de salida y, por tanto, en potencia al operar en RF. Esta anomalía en el funcionamiento se atribuye a estados de superficie o intercara en la heteroestructura AlGaIn/GaN, originados durante el crecimiento del material y/o el proceso de fabricación del dispositivo, aunque siguen sin ser bien conocidos ni controlados.

Esta Tesis tiene como objetivo contribuir al desarrollo de los transistores de alta movilidad (HEMT, "High Electron Mobility Transistor") de AlGaIn/GaN desde el punto de vista del proceso de fabricación, que es uno de los cuellos de botella para alcanzar las prestaciones estimadas teóricamente. Para ello se han abordado algunos de los puntos más débiles del proceso de fabricación como son: la formación de contactos óhmicos de drenador y fuente, la estabilización térmica del contacto Schottky de puerta y el proceso de pasivación. Este último punto es de especial relevancia y tiene un gran protagonismo en esta Tesis, ya que uno de sus objetivos es mitigar los posibles efectos de colapso que limitan las prestaciones del dispositivo. El desarrollo de esta Tesis ha llevado consigo la fabricación y caracterización de los dispositivos, junto con un seguimiento cuidadoso de cada una de las etapas del mismo, lo que ha permitido identificar de primera mano las dificultades y limitaciones dentro de cada proceso, así como proponer soluciones específicas a los mismos.

En el estudio de la formación de los contactos óhmicos (basados en Ti/Al) se ha puesto de manifiesto la gran dificultad que presentan las heteroestructuras de AlGaIn/GaN, con barreras de AlGaIn no dopadas, para obtener contactos bien definidos y con baja resistencia. En este sentido, se han estudiado algunos de los múltiples parámetros que intervienen en la formación de los contactos óhmicos, como son: espesores de las capas de metales, temperaturas de aleado o los tratamientos superficiales previos. Para ello se han estudiado dos esquemas basados en las multicapas Ti/Al/metal-barrera/Au, utilizando Ti o Ni como metal barrera. En ambos casos se ha analizado su comportamiento eléctrico, morfología superficial y composición. A pesar de las numerosas variables que intervienen en la formación de estos contactos óhmicos, se han obtenido para cada caso unas condiciones y espesores concretos que mejoran los resultados de partida.

Otra de las etapas claves en el proceso de fabricación que se ha estudiado durante el desarrollo de esta Tesis ha sido la formación del contacto Schottky de puerta. Se ha analizado la estabilidad del mismo tras ser sometido a diversos test de degradación, tanto por efecto térmico (test de almacenamiento en temperatura), eléctrico (aplicando un punto de polarización al dispositivo), o una combinación de ambos. Las metalizaciones de puerta que se han analizado son: Pt/Ti/Au, Ni/Au, y Mo/Au.

A través de este estudio se ha comprobado que el uso de contactos de puerta con metales refractarios, como el esquema Mo/Au, son una opción muy prometedora para garantizar la estabilidad térmica y eléctrica de este tipo de dispositivos, frente a otros esquemas más usados hasta ahora, como Ni/Au o Pt/Ti/Au, ya que son ligeramente más robustos. Además, haciendo uso de un modelo sencillo y suponiendo trampas de un único nivel energético se han podido caracterizar algunas de las trampas generadas tras los test de degradación. En el caso de Ni/Au tras un proceso de almacenamiento térmico a alta temperatura (350°C) durante 2000 horas se han obtenido trampas con una energía de activación de 340 meV y con tiempos de respuesta de 62 μ s.

El estudio del proceso de pasivación en el cual se ha invertido un gran esfuerzo a lo largo del desarrollo de esta Tesis se ha enfocado desde dos perspectivas. Por una parte, el estudio de la película dieléctrica que actúa como pasivante (SiN u otras alternativas, como la bicapa SiO₂/SiN o Ta₂O₅), y por otra parte, los tratamientos previos al depósito de SiN, en particular aquellos basados en plasma de N₂.

En cuanto a la película pasivante, el estudio se ha centrado básicamente en el uso de SiN depositado mediante depósito químico en fase vapor asistido con plasma (PE-CVD), analizando sus características eléctricas, ópticas y de composición en función

de las condiciones de depósito. De manera complementaria también se ha analizado el comportamiento eléctrico de los HEMT de AlGaIn/GaN, y se han relacionado con los resultados de la caracterización del pasivante.

Uno de los resultados más destacados del estudio es que la potencia RF aplicada durante el depósito de SiN puede ser un factor crítico para conseguir una adecuada capa pasivante en los transistores HEMT de AlGaIn/GaN, posiblemente por su relación con la incorporación de H. También se ha comprobado que el uso de N₂ como precursor en vez de NH₃ mejora la calidad de la superficie de contacto SiN/AlGaIn, reduciendo la densidad de carga fija en la interfase casi un orden de magnitud. Se ha obtenido un 20% menos de H enlazado en el SiN usando precursor de N₂ respecto del contenido usando NH₃. Por lo que todo indica que el contenido de H en las películas de SiN juega un papel destacado en el proceso de pasivación en los HEMT de AlGaIn/GaN. Además, se ha analizado el uso de Ta₂O₅ como alternativa de pasivante, demostrando que éste proporciona una reducción en el grado de colapso y mejora el comportamiento en frecuencia, frente a otras alternativas como la bicapa SiO₂/SiN o SiN.

Por otra parte, gran parte del desarrollo de esta Tesis se ha dedicado al estudio de tratamientos previos al depósito de SiN, en especial, al tratamiento *in situ* basado en plasma de N₂ (utilizando un sistema de PE-CVD). Los efectos de aplicar dicho tratamiento se han estudiado desde distintos puntos de vista: atendiendo a su impacto sobre la superficie del semiconductor (GaN o AlGaIn/GaN), a la carga atrapada en la interfase GaN/SiN, y al comportamiento de los HEMT de AlGaIn/GaN, tanto en régimen continuo, como pulsado, y en pequeña señal de RF. Este resultado constituye la principal contribución de esta Tesis al desarrollo tecnológico de los HEMT.

Uno de los resultados más destacados es la mejora significativa del efecto del pasivante para mitigar los efectos de colapso, observado a través de las características eléctricas de los transistores HEMT de AlGaIn/GaN al hacer uso de un pretratamiento de plasma de N₂ a baja potencia, respecto del caso tradicional con sólo limpieza de orgánicos. En particular, se ha comprobado que dicho plasma de N₂ es capaz de reducir drásticamente la densidad de trampas (con tiempos de respuesta $\tau \geq 1 \mu\text{s}$) en la zona activa de los transistores, responsables en gran medida de los efectos de colapso observados. Dicho resultado ha sido corroborado mediante medidas de iluminación en los transistores y medidas de conductancia y capacidad realizadas en estructuras MIS, donde se ha obtenido una reducción del 65% en la densidad de estados de intercara con el pretratamiento de plasma de N₂. Este comportamiento se relaciona con una posible reducción en superficie de residuos de C y O, principalmente, detectado por

espectroscopía de rayos X (XPS). Cabe destacar que además se ha conseguido una alta reproducibilidad en los resultados usando el pretratamiento con plasma. De esta manera se ha logrado un avance significativo en el proceso de fabricación de los transistores HEMT de AlGaIn/GaN.

Abstract

Nitride-based transistors have become in a short time period the ideal candidates to work at high temperature (up to 500°C), high output power (40 W/mm), low noise and with the possibility to work at high frequencies, which comprise a wide spectrum (between 1 and 100 GHz). This is mainly due to the gap width of these materials (GaN 3.4 eV), endowing them with a large thermal stability and breakdown voltage (3 MV/cm), as compared with other technologies more widely spread until now.

These promising features are highly attractive for many industrial sectors, specially for their use in power amplifiers in the microwave range, and in high-efficiency power electronics. Nevertheless, there is still much to be done to achieve a mature and competitive technology, both in terms of cost as in reliability. One of the critical aspects to be fought is the electric current dispersion observed in most devices. This dispersion causes a reduction of the output current, and thus, in power, when operating in RF. This anomaly in the dynamics is attributed to surface or interface states in the AlGaIn/GaN heterostructure created during the growth of the material and/or the fabrication process of the device, who are not yet well known or controlled.

The goal of this Thesis is to contribute to the development of AlGaIn/GaN high mobility transistors (HEMT) from the point of view of the fabrication process, which is one of the bottlenecks to reach the performances estimated in theoretical studies. For that sake some of the weakest points of the fabrication process have been analysed, such as: the creation of the ohmic contacts of drainer and source, the thermal stabilization of the gate Schottky contact, and the passivation process. This last point is of special relevance, as one of its aims is to mitigate collapse effects, and therefore it plays a key role in this Thesis. The development of this Thesis has implied the fabrication and characterization of the devices, together with a careful monitoring of the stages involved, allowing for a first-hand detection of the difficulties and limitations found within each process, followed by proposals providing specific solutions to them.

The study of the creation of ohmic contacts (based on Ti/Al) has clearly revealed the great difficulty that AlGaIn/GaN heterostructures with undoped AlGaIn barriers have to obtain well-defined, low resistance contacts. In this sense, some of the numerous parameters relevant to the creation of the ohmic contacts have been studied, namely the thicknesses of the metal layers, alloying temperatures and, for some cases, the preceding

surface treatments. Two schemes based in Ti/Al/metal-barrier/Au multilayers were studied, one using Ti as barrier metal, and another using Ni instead. In both cases their electrical behaviour, surface morphology and composition were analyzed. Instead of the large number of variables participating in the creation of these ohmic contacts, for each case concrete conditions and thicknesses improving the starting performances have been obtained.

Another key stage in the fabrication process analyzed has been the creation of the gate Schottky contact, analyzing its stability after being subject to different degradation tests, either due to thermal effect (storage test in temperature), electrical (by applying a bias to the device) or a combination of both. The gate metallizations analyzed were Pt/Ti/Au, Ni/Au, and Mo/Au.

This study has ascertained that the use of contact gates with refractory metals, such as the scheme Mo/Au, are a highly promising option to guarantee the thermal and electrical stability of this kind of devices, due to their slightly larger robustness as compared to other schemes more spread, like Ni/Au or Pt/Ti/Au. Moreover, making use of a simple toy model and assuming single-level energy traps, some of the traps generated in the devices after the degradation tests could be characterized. In the case of Ni/Au, after a thermal storage process at high temperature (350°C) lasting 2000 hours, traps were obtained with an activation energy of 340 meV, with response times of 62 μ s.

The study of the passivation process, to whom a great effort has been devoted throughout the development of this Thesis, has been performed from two perspectives. On the one side, the study of the dielectric film acting as passivator (SiN or other alternatives like the SiO₂/SiN or Ta₂O₅ bilayer) and, on the other side, the treatments preceding the deposit of SiN, particularly those based in N₂ plasma.

Regarding the passivation film, the analysis has been focussed basically in the use of SiN deposited using plasma-enhanced chemical vapor deposition (PE-CVD), analyzing its electrical, optical and compositional characteristics as a function of the deposition conditions. In a complementary way, through the electrical behaviour of the AlGaIn/GaN HEMTs, they have been also analyzed, and the results have been discussed and linked to the ones obtained in the characterization of the passivator.

One of the most outstanding results found in this study is the fact that the RF power applied during the deposition of SiN can be a critical factor to obtain an adequate passivation layer in the AlGaIn/GaN HEMTs, probably due to its relation with the H incorporation. On the other hand, it has been verified that the use of N₂ instead of NH₃ as precursor improves the quality of the SiN/AlGaIn contact surface, reducing the fixed

charge density at the interphase by almost one order of magnitude. Moreover, a decrease of a 20% of bonded H in the SiN has been obtained using the N₂ precursor gas. All these facts point towards an important role of the content of H in SiN films in the passivation process of AlGaIn/GaN HEMTs. The use of Ta₂O₅ as passivation alternative was analyzed as well, showing a reduction of the collapse degree and an improvement in frequency, as compared to other alternatives like the SiO₂/SiN bilayer or SiN.

On the other hand, a considerable part of this Thesis has been devoted to the study of treatments preceding the deposit of SiN, specially the *in situ* treatment based in N₂ plasma (performed using the PE-CVD technique). The effects due to this treatment have been studied from different points of view, namely its impact on the semiconductor surface (GaN or AlGaIn/GaN), the charge trapped at the GaN/SiN interface, and the behaviour of AlGaIn/GaN HEMTs, both in continuous and pulsed regime, and in small RF signal. This result constitutes the main contribution of this Thesis to the technological development of HEMTs.

One of the most relevant results is the significant improvement of the electrical characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs to mitigate collapse effects by using a low-power N₂ plasma pretreatment, instead of the traditional case cleaning only organic compounds. Particularly it has been verified that such N₂ plasma is capable of drastically reducing the trap density (with time responses $\tau \geq 1\mu\text{s}$) in the transistors' active zone, responsible to a great extent of the observed collapse effects. This result has been corroborated by lighting measurements in the transistors and by conductance and capacity measurements in MIS structures, where a reduction of a 65% in the interface density of states has been obtained using the N₂ plasma pretreatment. This behaviour is related with a probable decrease at the surface mainly of C and O residues, detected with X-ray spectroscopy (XPS) after the N₂ plasma treatment. It may be emphasized that a high reproducibility of the results using the plasma pretreatment has been reached. In this way, a significant step forward in the fabrication process of AlGaIn/GaN HEMTs has been achieved.

Agradecimientos

En este apartado quiero manifestar mi agradecimiento a todas aquellas personas que de una forma u otra han contribuido a que esta Tesis saliera adelante. ¡¡Muchas gracias por vuestra ayuda inestimable!!

En primer lugar querría agradecer a mis co-directores de Tesis, el Prof. Dr. Elías Muñoz y la Dra. Ana Jiménez, que me abrieran las puertas al mundo de la investigación y me ofrecieran la oportunidad de trabajar en uno de los laboratorios más prestigiosos de España en el campo de los dispositivos electrónicos. También, gracias al Dr. Elías Muñoz, tuve ocasión de participar en un proyecto Europeo de reconocido prestigio internacional y entrar en contacto directo con investigadores de primera línea. Quiero agradecer el esfuerzo y dedicación con que me han atendido mis co-directores durante estos años, con un elevado espíritu de sacrificio que valoro enormemente. ¡Gracias por vuestra paciencia!

Los primeros años de Tesis tuve la suerte de coincidir con Yago y Pablo (de Indra), de los que guardo magníficos recuerdos, tanto en lo profesional como en lo personal. ¡Gracias por vuestra confianza, vuestro apoyo, vuestros acertados consejos y vuestra amistad! También tuve ocasión desde el principio de vivir muy de cerca el mundo de la fabricación de dispositivos (con frecuencia, tan poco agradecida...) y dejarme empapar de la experiencia de Alicia y Mayte, que mucho me ayudaron y de las que también guardo muy buenos recuerdos. En esta misma línea querría expresar mi agradecimiento a los técnicos de laboratorio que posteriormente se incorporaron al equipo (David, Jota y, más recientemente, Maika), destacando la gran ayuda de David en múltiples procesos. ¡Muchas gracias David!

Por otra parte, cómo hablar del laboratorio sin mencionar a Fernando y Óscar, siempre dispuestos a ayudar, y cuya importante labor pasa con frecuencia desapercibida, pero que me gustaría elogiar. ¡Gracias Fernando y Óscar por vuestra ayuda y disponibilidad! También quiero destacar la labor de administración, llevada a cabo por Montse y Mariano fundamentalmente. ¡Muchas gracias por vuestra atención y paciencia en los innumerables trámites burocráticos a realizar, sobre todo en la etapa final!

Estoy muy agradecida al Dr. Alejandro Braña por su ayuda y dedicación al comienzo de la Tesis que fueron de gran importancia para mí. Asimismo querría mencionar el apoyo de mis compañeros del "grupo de transistores". Algunos estuvieron

poco tiempo, como Julia, Vicky, Andrés Tallos, Milena, pero de todos ellos guardo muy buenos recuerdos. Desearía agradecer a Fernando González-Posada (ya doctor), su ayuda con las medidas de AFM y sus palabras de ánimo en momentos difíciles. Asimismo quiero manifestar mi gratitud a Roberto Cuervo por su inestimable ayuda en el laboratorio, principalmente con las medidas de RF, con la estación de alta y baja temperatura, la máquina cortadora de obleas, etc. Además, he tenido la ocasión de compartir con él en los últimos años mis alegrías y frustraciones en muchos resultados experimentales, y sus consejos siempre me han dado ánimos para seguir adelante. ¡¡Muchas gracias Rober por todo!! Quiero mostrar mi agradecimiento al Dr. Javier Miguel, con quien tuve la suerte de poder trabajar unos meses y a quien admiro tanto en el plano profesional como en el personal. ¡Gracias Javi por tu amabilidad y por echarme una mano con el montaje experimental! También querría encomiar al Dr. Carlos Rivera, que siempre ha estado dispuesto a prestarme su tiempo para discutir sobre cualquier cuestión teórica o experimental que le planteara y cuyos comentarios siempre me han ayudado mucho en la interpretación de resultados.

Quiero expresar mi gratitud de modo muy especial a mis compañeros Sergio Fernández, Juan Pereiro y Javier Grandal (ya doctores), que entraron en el ISOM el mismo año que yo, y con quienes he tenido la ocasión de compartir el arduo camino del Doctorado. ¡¡Gracias por vuestros ánimos, vuestra amistad y vuestro apoyo en los momentos difíciles!!

A lo largo de esta Tesis he tenido la fortuna de estar en contacto directo con numerosos grupos de investigación que no quisiera dejar de mencionar, pues han contribuido enormemente a completar el trabajo realizado. Querría agradecer al Dr. Aurelio Climent-Font que nos abriera las puertas del Centro de Micro-Análisis de Materiales (CMAM), y al Dr. Raúl Gago y al próximo doctor Andrés Redondo por estar siempre dispuestos a cooperar y facilitarnos las medidas de composición por haces de iones (RBS, ERD, XANES), que han permitido profundizar en el estudio de la pasivación y los contactos óhmicos. Quiero destacar la ayuda prestada por Andrés, con quien he interactuado más directamente en la interpretación de los resultados y con quien he ido a la par en el desarrollo de esta Tesis, especialmente en la etapa final. ¡Ya está hecho! ¡¡Enhorabuena!!

También quisiera agradecer la colaboración establecida con el Dr. Carlos Palacio del Departamento de Física Aplicada, de la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM), para llevar a cabo las medidas de AES en el estudio de los contactos óhmicos y las medidas de XPS en el estudio del tratamiento con plasma de N₂.

Asimismo, desearía agradecer junto con el Dr. Calos Palacio, a Diego Alonso y a Domingo Díaz por su paciencia y dedicación en la realización de dichas medidas.

Querría agradecer también la colaboración mantenida al inicio de esta Tesis con el Centro de Investigación y Desarrollo de la Armada (CIDA), y la ayuda prestada por la Dra. Marina Verdú y el Dr. Fernando José Sánchez en los depósitos de pasivante de SiN. En esta línea querría agradecer además la colaboración con el Departamento de Física Aplicada III de la Facultad de C. C. Físicas de la Universidad Complutense de Madrid, en especial al Dr. Álvaro del Prado por su dedicación y ayuda en el estudio del SiN.

Me gustaría expresar mi gratitud al Dr. Didier Théron y la Dra. Sophie Barbet de la Universidad de Lille (Francia), así como al Dr. Emilio Lora, la Dra. Gemma Rius y al Dr. Francesc Pérez-Murano, del Centro Nacional de Microelectrónica (CNM) de Barcelona, que me facilitaran completar el estudio de tratamiento con plasma de N₂ con medidas de AFM y KFM. ¡Muchas gracias a todos!

Una de las experiencias más enriquecedoras a lo largo de esta Tesis ha sido mi estancia en los laboratorios de Alcatel-Thales III-V Lab (en Francia), donde tuve ocasión de colaborar con un grupo de investigación de primera línea dirigido por el Dr. Sylvain Delage. Estoy muy agradecida a los doctores Thierry Dean, Mikaël Richard, Erwan Morvan, Marie-Antoinette Di Forte-Poisson, Raphaël Aubry, Alberto Sozza, etc, quienes me permitieron hacer un estudio comparativo de pasivación usando Ta₂O₅.

También querría manifestar mi agradecimiento a los doctores Christian Dua de Alcatel-Thales III-V Lab (en Francia), Mike Uren de QinetiQ (en U.K.) y Marco Peroni de SELEX SI (en Italia), todos ellos participantes en el proyecto KORRIGAN, con quienes he tenido la fortuna de discutir resultados de mi Tesis y cuyos comentarios me permitieron profundizar en el conocimiento de los fenómenos.

De modo muy especial quiero destacar la suerte que he tenido de poder colaborar con la Dra. Isabel Tanarro (del CSIC) y la Dra. M^a Mar Sanz, cuyo apoyo, dedicación y ayuda desinteresada han sido para mí de un gran valor, tanto desde el punto de vista profesional como personal y a quienes tengo en muy alta estima. ¡Gracias por todo!

Durante estos años he tenido la ocasión de disfrutar de un excelente ambiente de trabajo gracias a mis compañeros de "batalla" que nunca olvidaré. A algunos ya los he mencionado anteriormente, y a otros no quiero dejar de mencionarlos, pues con todos ellos he compartido muy buenos momentos: Rocío San Román, Ana Bengoechea, Eugenio Sillero, Gema Tabares, Miguel Montes, Álvaro Navarro, la reciente Dra. Raquel Gargallo, Zarko, Miguel del Moral, el Dr. Jorge Pedrós, Manu, Juan G., Sara Martín, ... y

aquéllos con los que tuve ocasión de coincidir brevemente al comienzo de la Tesis, entre los que quiero destacar a los doctores José Luis Pau, Esperanza Luna, Jelena Ristic, Susana Fernández, Adrián Hierro, José M^a Ulloa, etc.

También quiero resaltar de modo significativo el apoyo y la ayuda que me ha brindado el Dr. Fernando Calle. ¡Gracias por la confianza que has depositado en mí! Asimismo quiero agradecer la ayuda prestada en muchos momentos por el Dr. Álvaro de Guzmán, que siempre ha estado dispuesto a ayudarme. ¡Muchas gracias Álvaro!

Del grupo de magnéticos deseo expresar mi agradecimiento al Dr. Claudio Aroca, que siempre ha conseguido contagiarme su optimismo y buen humor. También quiero agradecer al Dr. Marco Maicas por su ayuda técnica y los ánimos recibidos durante estos años, y al Dr. José Luis Prieto, por su simpatía y su ayuda con las medidas de EDS. Además, quiero resaltar el compañerismo del Dr. Lucas Pérez, la Dra. Rocío Ranchal, el Dr. Miguel González, el Dr. David Ciudad y los recientes doctorandos Johanna, Miguel Romera, etc.

Quiero agradecer de modo especial a uno de mis grandes apoyos morales durante el desarrollo de esta Tesis, que aun siendo de distintos grupos de trabajo, siempre ha estado dispuesto a escucharme y animarme, y cuyos consejos siempre me han servido de muchísima ayuda. ¡Muchas gracias Juan Antonio! Tampoco quiero dejar de agradecer los ánimos recibidos en los pasillos y el interés por el estado de mi Tesis, de los doctores Andrés de Santos, Octavio Nieto-Taladriz, Enrique Calleja, Carlos Angulo, Pedro Sánchez, Miguel Ángel Sánchez, etc., así como la atención y ayuda prestadas por el Dr. José Ignacio Izpura.

Esta Tesis no podría haber llegado a su fin sin la ayuda inestimable de mi familia y amigos, a quienes tengo que agradecer enormemente su paciencia, apoyo y comprensión, especialmente en los momentos difíciles.

Quiero expresar mi agradecimiento de modo muy especial a mi padre, por sus ánimos, consejos acertados y gran apoyo moral, que me hace ver día a día que el esfuerzo merece la pena y tiene su recompensa. ¡Muchas gracias por tu apoyo incondicional y la ilusión que te hace ver la Tesis acabada!

También quiero expresar un profundo agradecimiento a mi madre, principalmente por su paciencia. Siempre pensaste que después de terminar Físicas, los libros iban a desaparecer de mi habitación, y a pesar de no entender cómo podía seguir estudiando año tras año, me apoyaste hasta el final. ¡Muchas gracias!

Quiero agradecer también a mis hermanos, cuñados y futuros cuñados. A aquellos seres queridos que nos han dejado en los últimos meses, y que siempre tuvieron palabras de ánimo, aun sin saber qué era eso de la Tesis. Otros se fueron hace ya más tiempo, pero siempre tendré presentes su cariño y orientación en el difícil camino de la investigación.

También quisiera agradecer a mis futuros suegros (Ana y Eugenio), que siempre han estado dispuestos a ayudarme y apoyarme a lo largo de esta Tesis. ¡Muchas gracias por vuestra ayuda!

Quiero manifestar mi gratitud a D. Fulgencio, D. Mario y D. Aurelio. Vuestras palabras de ánimo y el interés que siempre habéis mostrado por mí y por mi Tesis siempre me han reconfortado. ¡Muchas gracias por acordaros de mí en estos momentos!

Y no por ser el último en mencionar es menos importante, por supuesto quiero agradecer de manera muy especial a mi novio y futuro marido, José, sus ánimos y gran apoyo moral que tanto me han ayudado durante este camino, sobre todo en los momentos difíciles. ¡Gracias por tu paciencia y tu comprensión durante estos años! ¡Gracias por estar ahí siempre y por ser como eres!

Esta Tesis no hubiese sido posible sin la ayuda de "Alguien" muy especial, que sin Su luz nada hubiese sido posible.