

Crecimiento y caracterización de láminas delgadas de dieléctricos de alta permitividad para su aplicación en la estructura de puerta de transistores de efecto campo

F. L. Martínez¹ y M. Toledano²

¹ Departamento de Electrónica, Tecnología de Computadoras y Proyectos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación
Universidad Politécnica de Cartagena, 30202 Cartagena.

² Departamento de Física Aplicada III, Facultad de Ciencias Físicas
Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid.

Resumen. La industria microelectrónica necesita desarrollar nuevos materiales dieléctricos que puedan sustituir al óxido de silicio en la estructura de puerta de los transistores de efecto campo CMOS, especialmente conforme nos acercamos a niveles de integración con dimensiones de tan solo 45 nm para la longitud del canal. Con este fin serán necesarios dieléctricos de mayor permitividad que el óxido de silicio, denominados genéricamente dieléctricos de alta k . La mayor constante dieléctrica de estos materiales permite incrementar el espesor del dieléctrico respecto al valor que debería tener una lámina de óxido de silicio equivalente, resolviendo así los problemas de corrientes de túnel que presenta el óxido de silicio de espesor ultra-delgado. En este artículo realizamos un resumen de algunas de las técnicas experimentales que empleamos en este área.

1 Introducción.

A medida que el nivel de integración de los transistores CMOS alcanza dimensiones cada vez más reducidas de la longitud del canal, el espesor del óxido de puerta tiene que ser también más pequeño, con objeto de mantener la misma capacidad y transconductancia de la estructura. Desde que los transistores de efecto campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET) fueron introducidos a principios de la década de los 60, cada nueva generación de dispositivos ha empleado un óxido de silicio cada vez más delgado. En las tecnologías CMOS más avanzadas fabricadas en 2005 (65 nm de longitud de la puerta) el espesor del óxido es de tan sólo 2.0 nm. Según las predicciones, cuando la longitud de la puerta descienda por debajo de 65 nm, el espesor del óxido tendrá que reducirse a menos de 1.5 nm.

Conforme el espesor del óxido se reduce, la corriente de pérdidas a través de él por efecto túnel aumenta exponencialmente. Éste es un efecto cuántico que no depende de la calidad del óxido, sino sólo de su espesor. Debido a ello puede que no sea posible emplear láminas de SiO₂ por debajo de 1.2 nm. La corriente de túnel sería tan elevada que causaría una disipación de potencia inaceptable, lo cual es especialmente crítico en sistemas electrónicos de bajo consumo (p.ej. portátiles).

La única solución es sustituir el óxido de silicio por otros dieléctricos de alta k . La mayor constante dieléctrica hace que las estructuras metal-aislante-semiconductor fabricadas con estos materiales puedan tener la misma capacidad con un espesor notablemente mayor que una lámina de SiO₂

equivalente. De esta forma se elimina el problema de las corrientes de túnel. Se suele agrupar bajo la denominación de dieléctricos de alta k a los que tienen una permitividad mayor o igual que la del nitruro de silicio ($k=7$). En comparación, la constante dieléctrica del óxido de silicio es 3.9.

2 Crecimiento de láminas delgadas de dieléctricos de alta k .

Vamos a describir en esta sección algunas técnicas utilizadas para obtener dieléctricos de alta k en forma de láminas delgadas. Nuestra mayor experiencia se encuentra en la técnica de ECR-CVD (*electron cyclotron resonance chemical vapor deposition*) para el crecimiento de nitruro de silicio (SiN_x:H) y oxinitruros de silicio (SiO_xN_y), aunque recientemente hemos empezado a trabajar con otra técnica denominada HPRS (*high pressure reactive sputtering*) para el depósito de óxido de hafnio.

2.1 ECR-CVD.

Las técnicas conocidas genéricamente como CVD (*chemical vapor deposition*, o deposición química en fase de vapor) se basan en el crecimiento de una lámina delgada del material sobre un sustrato a partir de una reacción química entre precursores en estado gaseoso. Para que la reacción química tenga lugar es necesario proporcionar la energía necesaria para superar la barrera de activación de la reacción. En los procesos de CVD de interés en microelectrónica, la forma de suministrar esta energía es mediante la ionización de las moléculas del gas, formando un plasma o gas ionizado, por lo que estos procesos suelen conocerse como PECVD (*plasma enhanced chemical vapor deposition*, o CVD activado por plasma).

Existen muchas formas de ionizar los precursores gaseosos para que estos puedan reaccionar entre sí y provocar el crecimiento de la lámina. La técnica empleada por nosotros: ECR-CVD (*electron cyclotron resonance chemical vapor deposition*, o CVD activado por resonancia ciclotrónica de electrones) presenta ciertas ventajas frente a las técnicas convencionales de PECVD, especialmente para su aplicación a dieléctricos de puerta, donde es fundamental producir el mínimo daño posible a la interfase entre el sustrato de silicio y la lámina. De lo contrario la densidad de estados interfaciales será muy elevada y el atrapamiento de carga en estos estados impedirá la modulación de la conductividad del canal por parte de la señal aplicada a la puerta.

En la técnica ECR-CVD la zona de generación del plasma está separada de la región donde se deposita la lámina, lo que evita que las moléculas ionizadas del plasma bombardeen directamente la superficie donde está creciendo el material. Esto reduce significativamente la densidad de estados interfaciales, en comparación con otras técnicas de plasma directo.

El nombre de resonancia ciclotrónica de electrones proviene de la forma en como es generado el plasma. El proceso se realiza en vacío, como ocurre con todos los procesos de crecimiento de láminas delgadas. En el ECR existe una cámara de ionización separada de la cámara de depósito donde se sitúa el sustrato. Unos electroimanes crean un campo magnético axial en la cámara de generación del plasma. Los electrones que se encuentran allí describirán trayectorias helicoidales debido a la fuerza de Lorentz. Simultáneamente se introduce una onda



Figura 1. Fotografía del sistema de ECR-CVD. En la parte superior: cámara de ionización, en el centro: cámara de depósito, debajo de la mesa: bomba de vacío turbomolecular.

electromagnética de frecuencia de microondas polarizada con el campo eléctrico perpendicular a la dirección de propagación. La frecuencia de microondas y el campo magnético se eligen de tal forma que la frecuencia de giro de los electrones coincida con la frecuencia de oscilación del campo eléctrico. Esta condición es la que se denomina de resonancia ciclotrónica de electrones, pues los electrones se encuentran acelerados por el campo eléctrico en toda su trayectoria y de esta forma se consigue un máximo de transferencia de energía de la microonda a los electrones.

Así los electrones ganan una gran cantidad de energía y son capaces de ionizar los átomos de un gas. El gas del plasma es introducido en esta cámara a través de un controlador de flujo. En nuestro caso utilizamos nitrógeno para depositar nitruro de silicio y una mezcla de nitrógeno y oxígeno para depositar oxinitruros de silicio. Los electrones que han sido acelerados por la resonancia chocan con las moléculas del gas y les transfieren su energía, rompiendo las moléculas, arrancando electrones, y dejándolas cargadas positivamente en estados excitados. Además el flujo del campo magnético está diseñado de manera que sea divergente hacia la cámara de depósito, con lo cual los electrones son arrastrados hacia ella. Su densidad de carga negativa arrastra consigo a los átomos ionizados del plasma.

Antes de llegar a la superficie del sustrato, estos átomos excitados pasan a través de un anillo de dispersión por el cual se introduce un segundo gas precursor, en este caso un gas que contenga silicio (típicamente silano: SiH_4). En las colisiones entre los átomos del plasma y las moléculas de silano se transfiere parte de la energía del plasma y éstas resultan excitadas. Así, cuando llegan a la superficie del sustrato los dos precursores tienen energía suficiente para producir la reacción química de crecimiento de la lámina.

2.2 HPRS.

Recientemente ha surgido considerable interés en otros materiales dieléctricos de permitividad aún mayor que la del nitruro de silicio, particularmente en algunos óxidos metálicos como Ta_2O_5 , Al_2O_3 , TiO_2 , HfO_2 , etc..., siendo el óxido de hafnio el más prometedor por su mayor estabilidad térmica. Por este motivo, también nosotros hemos iniciado un intenso esfuerzo investigador en este material. Como método de depósito hemos escogido la pulverización catódica de alta presión (HPRS: *high pressure reactive sputtering*). Esta técnica pertenece al grupo de las denominadas PVD: *physical vapor deposition*, deposición en fase de vapor por métodos físicos.

Las técnicas de PVD se diferencian de las de CVD en que en ellas no se produce ninguna reacción química. Se parte del material ya fabricado con la pureza necesaria y el procedimiento consiste en arrancar de alguna forma los átomos de este trozo de material y

hacer que se vayan depositando sobre un sustrato para crecer una lámina delgada con el espesor deseado. La forma más usual de hacerlo es mediante la pulverización catódica o *sputtering*.

En la técnica de *sputtering* el trozo de material se coloca en un cátodo (llamado así porque se pondrá a una tensión negativa) y se sitúa boca abajo sobre el sustrato. Una vez realizado el vacío en la cámara se introduce un gas (oxígeno en nuestro caso) y se aplica un campo eléctrico de radiofrecuencia. El campo eléctrico acelera a los electrones y éstos, al chocar contra los átomos del gas arrancan electrones y los ionizan. Se genera así un plasma, es decir, un gas ionizado cuyos átomos o moléculas están cargados positivamente. Al estar el cátodo a una tensión negativa, atrae hacia sí a los átomos del plasma, los cuales son acelerados y chocan contra el mismo, arrancando átomos del material que van cayendo sobre el sustrato y depositándose sobre su superficie. De este modo se logra el crecimiento de la lámina sin que intervenga ninguna reacción química, por un procedimiento puramente físico.

3 Caracterización: medidas de composición.

Una vez que se ha obtenido el material, se procede a su caracterización por diversas técnicas. Uno de los primeros pasos es conocer su composición y la concentración de cada uno de los elementos presentes. Nuestro grupo cuenta con una amplia experiencia de colaboración con el acelerador de iones (ISL: *Ionen Strahl Laboratorium*) del instituto Hahn-Meitner de Berlín para las medidas de composición mediante HI-ERDA: *Heavy Ion Elastic Recoil Detection Analysis* (análisis mediante detección de retrocesos elásticos por iones pesados).

En la técnica de ERDA un haz de iones bombardea la muestra bajo un ángulo rasante y arranca átomos de la misma. Como consecuencia del choque estos átomos experimentan un retroceso elástico y salen dispersados en múltiples direcciones. Los que salen despedidos en una dirección determinada llegan a un

detector de tiempo de vuelo (TOF: *time of flight*) y energía (E) que mide su velocidad y energía cinética. En una representación gráfica de TOF frente a E (Fig. 2) estos puntos experimentales se agrupan en ramas de acuerdo con la masa de cada uno de los elementos detectados. Dentro de cada rama de la gráfica, los átomos con menor energía proceden del interior de la muestra, ya que en su trayecto a través de la misma los iones incidentes y los átomos arrancados van perdiendo energía.

4 Conclusiones

La sustitución del óxido de silicio en la estructura de puerta de los transistores de efecto campo por otros dieléctricos de mayor permitividad parece un paso inevitable a medio e incluso a corto plazo. Entre los dieléctricos a considerar, el nitruro y el oxinitruro de silicio pueden ser una primera solución, pero a la larga otros materiales con una constante dieléctrica aún mayor serán necesarios. Entre ellos, el óxido de hafnio es uno de los más prometedores por su estabilidad térmica sobre el silicio.

Para lograr la aplicación de estos materiales será necesario perfeccionar los procedimientos de crecimiento de estas láminas delgadas hasta conseguir unas características suficientemente buenas y, no menos importante, una tecnología de fabricación susceptible de ser introducida en las actuales líneas de producción a un coste asumible por la industria.

Las tecnologías descritas en este artículo: ECR-CVD para nitruros y oxinitruros de silicio y HPRS para óxido de hafnio, poseen algunas características que las hacen particularmente prometedoras en cuanto a uno de los parámetros más delicados de la estructura MOS: la densidad de estados electrónicos en la interfase entre el dieléctrico y el semiconductor. Sin embargo, el paso definitivo de la industria hacia un material y una tecnología determinada todavía no está dado y las grandes empresas del sector de los semiconductores están invirtiendo considerables esfuerzos de investigación y desarrollo en este campo.

Numerosas técnicas de caracterización de materiales y dispositivos sirven de ayuda en este difícil camino hacia el material que sustituirá al óxido de silicio en el corazón del MOSFET. Una de las primeras caracterizaciones que debe hacerse del material obtenido es analizar su composición. Con este fin la técnica HI-ERDA presenta ciertas ventajas frente a otros métodos, especialmente por ser capaz de determinar las concentraciones absolutas de todos los átomos presentes sin necesidad de ningún estándar de referencia. Asimismo también puede detectar átomos de impurezas en concentraciones muy bajas y, bajo ciertas condiciones, realizar perfiles de concentración en profundidad.

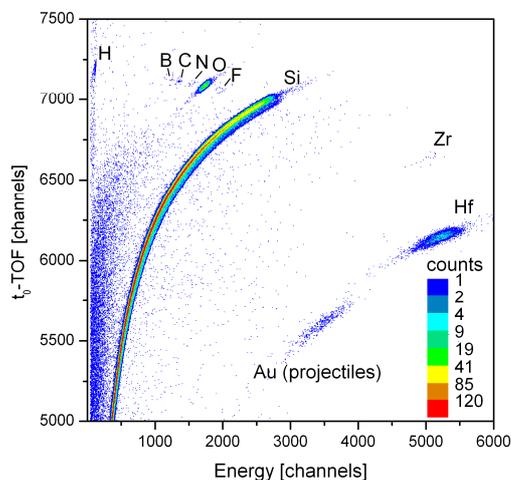


Fig.2. Diagrama de tiempo de vuelo frente a energía para una muestra de HfO₂