

Convocatoria de ayudas de Proyectos de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico (2003)

MEMORIA CIENTÍFICO-TÉCNICA DEL PROYECTO

1 RESUMEN DE LA PROPUESTA (Debe rellenarse también en inglés)

INVESTIGADOR PRINCIPAL: STEFANO CHIUSSI

TITULO DEL PROYECTO: Procesamiento laser para nanotecnología: Capas delgadas de silicio-germanio-carbono sobre dieléctricos de alto k.

RESUMEN (debe ser breve y preciso, exponiendo sólo los aspectos más relevantes y los objetivos propuestos):

El objetivo final de este proyecto es el desarrollo de un proceso láser que permita producir recubrimientos amorfos, nano y policristalinos de aleaciones de silicio/germanio/carbono (SiGeC) sobre capas delgadas de dieléctricos de alto k. Este proceso se efectuará con un láser de excímero de ArF comercial y consistirá en dos fases: Una primera fase en la cual se depositará una película delgada de SiGeC amorfo mediante la técnica LCVD (Laser induced Chemical Vapour Deposition) y una segunda fase en la cual se modificará su estructura cristalina mediante la técnica ELC (Excimer Laser assisted Crystallisation). Estas técnicas proporcionarán recubrimientos de SiGeC amorfos de composición uniforme y espesor bien definido y permitirán su rápida transformación a material nanocristalino o policristalino sin excesivo calentamiento de la capa dieléctrica. Manteniendo ésta durante todo el proceso a temperaturas suficientemente bajas evitará su cristalización, así como la difusión o segregación de los elementos y, por tanto, supondrá la conservación de sus propiedades y de su interfase con el recubrimiento de SiGeC. Con el fin de garantizar el éxito del proceso se realizará un estudio previo de los efectos de la radiación láser sobre varios dieléctricos para determinar sus umbrales de cristalización y de segregación.

La combinación de las ventajas de aleaciones de SiGeC frente al Si puro, como la posibilidad de realizar un ajuste preciso de bandas (Ingeniería de bandas) y de los parámetros de red, con los beneficios que aportan los dieléctricos de alto k con respecto a los óxidos de silicio convencionales tanto en estructuras SOI como en dieléctricos de puerta, resulta un importante factor en la reducción de tamaño y en el aumento de las prestaciones de dispositivos en microelectrónica. Proporcionar adicionalmente la oportunidad de variar la composición del SiGeC en un amplio rango y de obtener tanto capas delgadas amorfas como nanocristalinas o policristalinas manteniendo intacta la estructura y composición del dieléctrico será, sin duda, un considerable avance en el desarrollo de dispositivos de nueva generación y una importante aportación a la ingeniería de superficies y a la nanotecnología. Además de la implementación de la técnica, cuya compatibilidad con técnicas convencionales en microelectrónica se pretende demostrar con la realización de un dispositivo MOSFET, se estudiará los procesos físico-químicos relacionados con el depósito y la cristalización de las aleaciones de SiGeC.

PROJECT TITLE: Laser Processing for Nanotechnology: Silicon-Germanium-Carbon Thin Films on High k Dielectrics.

SUMMARY:

The final goal of this project is the development of a laser assisted process for producing amorphous, nanocrystalline, and polycrystalline coatings of silicon-germanium-carbon (SiGeC) alloys on thin high-k dielectric films. This process will be performed with a commercial ArF excimer laser and consists of two steps: A first one where a thin amorphous SiGeC film is deposited via LCVD (Laser induced Chemical Vapour Deposition) and a second one where the crystalline structure is modified via ELC (Excimer Laser assisted Crystallisation). These techniques will provide amorphous coatings with uniform composition and well defined thickness as well as allow the modification of their crystalline structure to nanocrystalline or polycrystalline material without excessive heating of the underlying dielectric films. Keeping the dielectric films during the whole process at sufficiently low temperature will avoid their crystallisation, as well as the diffusion or segregation of the elements and therefore maintain their properties and the quality of the interface with the SiGeC coating. In order to guarantee the maximum success of the process, a study of the laser radiation effects on various high-k dielectrics will be also performed for determining their crystallisation and segregation thresholds.

The combination of the advantages of SiGeC alloys with respect to pure Si, such as the possibility of adjusting the band gap (band gap engineering) and of the lattice parameters with the benefits of high-k dielectrics with respect to conventional Silicon oxides in SOI structures and as gate dielectrics, is an important factor in size reduction and performance enhancement of microelectronic devices. Providing the additional opportunity of varying the SiGeC composition in a wide range and of obtaining amorphous, nanocrystalline and polycrystalline thin films while keeping the composition and structure of the underlying dielectric film unchanged, will be a considerable advance in the development of new devices and an important contribution to surface engineering and to nanotechnology. Besides the implementation of the technique, and the demonstration of its compatibility with conventional techniques in microelectronic through the realisation of a MOSFET devices, a systematic study of the processes related with the growth and crystallisation of the SiGeC alloys will be performed.

2. INTRODUCCIÓN

(máximo cinco páginas)

En el siguiente proyecto se ha marcado como objetivo la producción y el tratamiento de recubrimientos del sistema ternario Silicio-Germanio-Carbono (**SiGeC**) sobre dieléctricos con alta constante dieléctrica (**dieléctricos de alto k**) para realizar nuevos dispositivos **CMOS** con altas prestaciones. Estos recubrimientos se obtendrán mediante procesos que se basan en la utilización de técnicas asistidas por láser pulsado con corta duración de pulso (15 ns). Dichas técnicas permiten **procesos rápidos y compatibles con las técnicas convencionales** utilizadas en la industria microelectrónica así como la síntesis de material fuera del equilibrio termodinámico. En tales procesos, como es sabido, es posible ajustar la composición y la estructura cristalina de los materiales tanto durante el proceso de depósito como a posteriori, mediante un tratamiento láser, pudiendo obtenerse así recubrimientos **amorfos, nanocristalinos o policristalinos**.

La variación de la composición y de la estructura cristalina del sistema ternario Silicio-Germanio-Carbono SiGeC en concreto, permite la sintonización del gap energético (**Ingeniería de bandas**) con el fin de incrementar el rendimiento la velocidad de respuesta de dispositivos CMOS de nuevo diseño. A pesar de existir ya numerosos estudios sobre los sistemas SiC y SiGe, así como algunos trabajos sobre el sistema ternario SiGeC, todavía no se ha extendido el conocimiento a la obtención de capas amorfas muy delgadas (**< 30 nm**) ni al tratamiento para alterar su microestructura. Especialmente la obtención de material nanocristalino o policristalino es de enorme interés, ya que daría respuesta a la creciente demanda tecnológica de producción de **material lo suficientemente uniforme** para su utilización en dispositivos de tamaño cada vez más reducido.

La mencionada **reducción de tamaño** de dispositivos será, según las previsiones de la industria microelectrónica resumidas en el **ITRS** (International Technology Roadmap for Semi-conductors), uno de los **objetivos primordiales** a los que se añade el diseño de una **nueva generación de dispositivos**, la **síntesis de nuevos materiales** con propiedades que permitan esta reducción de tamaño y el desarrollo de **técnicas** relacionadas con la **producción** de dichos dispositivos y de esos nuevos materiales. Uno de los caminos más prometedores para lograr el desarrollo de esta nueva generación de dispositivos encaminada hacia la **nanotecnología** se basa esencialmente en **dos conceptos**:

- a) la optimización de **aleaciones de SiGeC** para reemplazar las diferentes componentes como fuente, canal y drenaje que, hasta la fecha, están básicamente formadas por silicio
- b) el uso de **dieléctricos de alto k** para reemplazar los óxidos o oxinitruros de silicio que se emplean actualmente en las estructuras SOI (Silicon On Insulator) y como dieléctricos de puerta.

Sin embargo, la combinación de estos dos tipos de **materiales** implica una **dificultad tecnológica** no despreciable, ya que los dieléctricos de alto k más prometedores (Al_2O_3 , HfO_2 , Pr_2O_3 , ...) presentan una importante **inestabilidad térmica** pudiendo empezar a cristalizar a temperaturas relativamente bajas (<500°C). Si esta cristalización está acompañada por procesos de difusión o de segregación de los elementos se produce no sólo una grave **reducción de las prestaciones** del dieléctrico sino también el **deterioro** de la **interfase** entre el dieléctrico de alto k y el semiconductor de SiGeC. La solución de este problema está, por tanto, ligada al desarrollo de procesos de producción que eviten en cada momento un exceso de temperatura.

Para lograr este fin se pretende aplicar, en este proyecto, una **combinación de técnicas** asistidas por **láser** y desarrollar un proceso integrado que permitirá, según nuestra experiencia en el campo de dieléctricos y semiconductores, el depósito de películas de SiGeC de composición variable mediante la técnica **LCVD** (Laser induced Chemical Vapour Deposition) indirecta y su posterior modificación a material nanocristalino o policristalino mediante las técnicas **ELC** (Excimer Laser assisted Crystallisation).

La utilización de un **láser excímero de ArF** permite que la combinación de estas dos técnicas reúna varias ventajas como el depósito a **bajas temperaturas del sustrato (típicamente 200°C)** y una cristalización de volúmenes bien definidos en tiempos muy cortos, es decir, en el rango de nanosegundos. Estos procesos de **recristalización ultra-rápidos**, que no suelen ser necesariamente gobernados por el equilibrio termodinámico, pueden producir estructuras cristalinas de composición y estructura poco habitual, es decir **estructuras "congeladas"** de tamaño de grano inferior a 50 nm. Una ventaja adicional es, que al irradiar semiconductores amorfos de SiGeC con radiación

proveniente de este tipo de láseres se garantiza, debido a su corta longitud de ondas (**193 nm**), que la radiación sea absorbida sólo en las capas superficiales del semiconductor y, en consecuencia, minimizar posibles efectos térmicos o fotoinducidos debidos a la penetración de la radiación en el dieléctrico. Este tipo de **Ingeniería de superficies** permitirá que, mediante el conjunto de las dos técnicas láser LCVD y ELC, se recubran capas delgadas de dieléctricos de alto k con **aleaciones de SiGeC amorfas, nano y policristalinas**, evitando tanto la cristalización de la capa dieléctrica como la difusión de los elementos entre las capas dieléctricas y el recubrimiento semiconductor o la segregación de elementos en sus respectivas capas.

Para estudiar la fiabilidad de este proceso integrado se realizará al final del proyecto un dispositivo **MOSFET vertical** en el cual se utilizará un dieléctrico de alto k como aislante en una estructura SOI y como dieléctrico de puerta y, por otra parte, un semiconductor de SiGeC amorfo, nanocristalino o policristalino como canal, drenaje y fuente. La elección del material y de la estructura cristalina adecuada está, por supuesto, sujeto a los resultados que se obtendrán a lo largo del proyecto. La producción de las componentes semiconductoras de este dispositivo mediante técnicas láser alternativas implicaría una prometedora nueva aportación a la **ingeniería de superficies** y un importante avance hacia la **nanotecnología**

El **gran potencial** de estos procesos asistidos por láser no sólo a **nivel científico** sino también a **nivel industrial** ya se conoce, como demuestra la producción industrial de transistores de películas delgadas (TFT). La aplicación de estas técnicas a grandes áreas suponía un problema tecnológico, hoy ya solucionado, que implica bien el empleo de láseres de alta potencia o bien de un barrido del haz sobre el área a recubrir. La explotación de este tipo de procesos se produce, hasta la fecha, mayoritariamente en la industria de los países asiáticos, y se prevé un creciente interés por parte de la industria europea.

La producción de estas aleaciones de SiGeC sobre dieléctricos de alto k mediante las técnicas asistidas por láser, y el estudio de los parámetros de proceso que influyen sobre las características y la calidad del material (composición, estructura, segregación, etc.) así como su aplicación en un dispositivo de microelectrónica supondrá no sólo un avance en los conocimientos acerca del sistema ternario SiGeC y su aplicación en recubrimientos amorfos, nanocristalinos y policristalinos sino también un punto de partida imprescindible para una posterior elaboración, planificación y consecución de nuevos proyectos nacionales e internacionales en varias **áreas prioritarias científico-tecnológicas del Plan Nacional y del Plan Europeo**.

Referencias:

- T.J.King, J. P.McVittie, K.C.Saraswat, J.R.Pfiester, IEEE Trans.Electron.Devices, 41 (1994) 228
- W.C.Lee, Y.C.King, T.J.King, C.Hu, IEEE Electron.Dev.Lett., 19 (1998) 247
- J.S.Im, H.J.Kim, Appl. Phys. Lett. 64, (1994) 2303
- I.W.Boyd, J.Zhang, Solid-State Electronics 45 (201) 1413
- S.D.Wilk, R.M.Wallace, J.M.Anthony, J.Applied Physics, 89 (2001) 5243
- <http://public.itrs.net>
- S.Martelli, I.Vianey, R.Larciprete, E.Borsella, J.Castro, S.Chiussi, and B.León, J. Appl. Phys. 82 (1997) 147
- R.A.Soref, J.Appl.Phys.70 (1991) 2470
- N.Yamauchi, R.Reif, J.Appl.Phys.75 (1994)3235
- I.Tsunoda,T.Nagata, A.Kenjo, T.Fado,M.Miyao, Mater Sci.Eng. B89 (2002) 336
- D.Bäuerle, Springer Verlag Berlin Heidelberg Bew York, ISBN 3-540-66891-8
- V.V.Gupta, H.J.Song, J.S.Im, Appl.Phys.Lett.71 (1997) 99
- N.Jiang, L.Zang, R.L.Jiang, S.M.Zhu, P.Han, X.B.Liu, X.M.Cheng, R.H.Wang, Y.D.Zheng, X.N.Hu, J.X.Fang, Appl.Phys.A 68 (1999) 457D.V.Singh, K.Rim, T.O.Mitchell, J.L.Hoyt, J.F.Gibboms, J.Appl.Phys. 85 (1999) 978
- H.P.Herman, Chem.Rev. 89 (1989) 1323
- S.Chiussi, C.Serra, J.Serra, P.González, B.León, G.Andrä, J.Bergmann, F.Falk, F.Fabbri, L.Fornarini, S.Martelli, F.Rinaldi, Appl.Surf,Science 186 (2002) 166
- E.López, S.Chiussi, C.Serra, J.Serra, P.González, B.León, M.Pérez-Amor, Appl.Surf.Science (2003) (*en prensa*)
- S.Chiussi, E.López, J.Serra, P.González, C.Serra, B.León, F.Fabbri, L.Fornarini, S.Martelli, Appl.Surf.Science (2003) (*en prensa*)
- K.Yuki, K.Toyoda, T.Takagi, Y.Kanzawa, K.Nozaawa, T.Saitoh, M.Kubo, Jpn.J.Appl.Phys 40 (2001) 2633
- C.Tolksdorf, C.Fink, J.Schulze, S.SedelMayer, W.Hansch, W. Werner, W.Kanert, I.Eisele, Materials Science and Engineering B89 (2002) 439
- J.Schulze, C.Fink, T.Sulima, I.Eisele, W.Hansch, Thin Solid Films 380 (2000) 154
- H.S.Kang, Y.W.Kim, K.S.Chung, K.M.Nam, K.Bae, N.I.Lee, C.B.Oh, K.I.Kim, S.Park, K.P.Suh (Samsung, Korea): Technical Digest IEDM-2001 (2001) 241
- N.Sugii, D.Hisamoto, K.Washio, N.Yokoyama, S.Kimura (Hitachi, Japan): Technical Digest IEDM-2001 (2001) 737

3. OBJETIVOS DEL PROYECTO

(máximo dos páginas)

3.1 HIPÓTESIS DE PARTIDA, RELEVANCIA DEL TEMA Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

Según las previsiones de la industria microelectrónica Europea, Norteamericana y Asiática que se resumen en el ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors), el **objetivo primordial** de la próxima década será el desarrollo de nuevos **dispositivos** de tamaño siempre más reducidos, de nuevos **materiales** cuyas propiedades permitan esta reducción de tamaño y a **técnicas** relacionadas con la producción de dichos dispositivos y nuevos materiales. El desarrollo de esta nueva generación de dispositivos se basa esencialmente en **dos conceptos**:

- c) el uso de **dieléctricos de alto k** para reemplazar los óxidos de silicio que se emplean actualmente en las estructuras SOI (Silicon On Insulator) y como dieléctricos de puerta y,
- d) la optimización de **aleaciones de SiGeC** para reemplazar los diferentes componentes que, hasta la fecha, están básicamente formados por silicio.

Si bien está ya demostrado que con los materiales dieléctricos de alto k y los semiconductores de SiGeC se logra una considerable mejora en las prestaciones de los dispositivos, se detecta la falta de **técnicas alternativas** que permitan la **ingeniería de superficies** y así dar el paso a la **nanotecnología**. Teniendo en cuenta este propósito, es evidente que se deben desarrollar técnicas que permitan producir una gran variedad de capas muy delgadas a baja temperatura y evitar la difusión de los elementos entre ellas para garantizar interfases de gran calidad. Para lograr este fin se propone, en este proyecto, la combinación de 2 técnicas asistidas por láser:

- a) la técnica **LCVD** (*Laser induced Chemical Vapour Deposition*), con la cual se demostró la capacidad de producir a bajas temperaturas aleaciones de **SiGeC amorfo** con composición y espesor muy uniformes y bien definidos.
- b) la técnica **ELC** (*Excimer Laser assisted Crystallization*) que permite transformar la estructura cristalina de las mismas produciendo **recubrimientos nanocristalinos o policristalinos** sin calentar el sustrato y, por tanto, sin inducir la cristalización del dieléctrico o la segregación de sus elementos.

3.2 ANTECEDENTES Y RESULTADOS PREVIOS

Como se puede apreciar en el **historial del grupo** (apartado 6) y en los **currículum vitae** de los investigadores del mismo se dispone de una amplia experiencia en las aplicaciones de técnicas asistidas por láser como son la **LCVD** y la **ELC**. Especialmente en el campo del **sistema ternario SiGeC** se inició hace unos años un **estudio exhaustivo sobre la producción y modificación estructural** de recubrimientos de estos materiales, que fue parcialmente financiada por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (Proyecto MAT2000-1050). Los resultados de estos estudios consisten, entre otros, en el diseño y la puesta a punto de un sistema de vacío optimizado para las técnicas LCVD y ELC, el depósito a bajas temperaturas de aleaciones amorfas de SiGeC con diferentes estequiometrías y con espesores uniformes tanto en áreas hasta 3" de diámetro como en pequeñas superficies predeterminadas, la cristalización de estos recubrimientos, y el estudio de la segregación de los elementos debida a una elevada fluencia de radiación láser y un alto número de pulsos. Solamente los resultados obtenidos en los últimos 2 años fueron, hasta la fecha, parte esencial de un Proyecto Fin de Carrera en Ingeniería Industrial, una Tesis de licenciatura en Tecnología Láser, 4 contribuciones tipo "poster" a congresos internacionales y 3 publicaciones aceptadas en revistas de prestigio internacional. En este contexto se prevé también la presentación de una tesis doctoral, una patente internacional y varias contribuciones a congresos y a revistas internacionales que se está preparando. En cuanto al diseño y la realización de novedosos dispositivos para microelectrónica y la elección así como la producción de dieléctricos de alta constante dieléctrica se cuenta con la participación de un investigador (J.Schulze) cuya experiencia en estos campos se refleja claramente en su currículum vitae.

3.3 OBJETIVOS CONCRETOS

Los **objetivos concretos** de esta propuesta se ajustan, a nuestro entender, tanto a las **líneas generales** como a varios **objetivos científico-técnicos prioritarios** del “PROGRAMA NACIONAL DE MATERIALES”.

Tal como indican las diferentes tareas que se presenta en el **Plan de Trabajo** (Apartado 4 de la solicitud), se estudiará y realizará en las:

1. *Tareas 1 y 3:* El diseño y la producción de **láminas delgadas** de materiales amorfos basados en las aleaciones de **SiGe** con estequiometría ajustada para aplicaciones en microelectrónica tal como sugiere el **objetivo científico-técnico prioritario 6.2**.
2. *Tareas 2 y 3:* Un estudio sobre los umbrales de cristalización y de segregación en **nuevos materiales aislantes** para aplicaciones eléctricas como son los dieléctricos de alto k (HfO_2 , Pr_2O_3 , Al_2O_3 , ...), tarea que se enmarca en el **objetivo científico-técnico prioritario 7.2**.
3. *Tareas 4 y 5:* La cristalización de los **recubrimientos semiconductores** con el fin de obtener, además de las anteriormente mencionadas **películas amorfas**, también **capas nanocristalinas y policristalinas** para aplicaciones concretas en microelectrónica (**objetivo científico-técnico prioritario 6.1**).
4. *Tarea 6:* Un **estudio de la segregación** de los elementos pertenecientes al sustrato aislante y al recubrimiento semiconductor y una **simulación del proceso** de cristalización tal como exigen las líneas generales del “PROGRAMA NACIONAL DE MATERIALES”
5. *Tarea 7:* La realización de un dispositivo **MOSFET vertical** en el cual se utilizará un dieléctrico de alto k como aislante en una estructura SOI y como dieléctrico de puerta y, por otra parte, un semiconductor de SiGeC amorfo, nanocristalino o policristalino como canal, drenaje y fuente. La elección del material y de la estructura cristalina adecuada está, por supuesto, sujeto a los resultados que se obtendrán a lo largo del proyecto. En principio se propone la realización de un “**Surround high-k gate MOSFET con canal intrínstico de SiGeC**”. La producción de las componentes semiconductoras de este dispositivo mediante técnicas láser alternativas implicaría una prometedora nueva aportación a la **ingeniería de superficies** y un importante avance hacia la **nanotecnología (objetivos científico-técnicos prioritarios 10.1 y 10.2)**.