

MICROTECNOLOGÍA: PROCESO DE FABRICACIÓN DE UN MICROSISTEMA

M. C. Acero, J. Esteve
Centro Nacional de Microelectrónica IMB-CNM-CSIC

En esta comunicación se presenta un curso online sobre microtecnología, impartido en el marco del Campus Virtual Iberoamericano de Tecnología (CVIT). La novedad que presenta el curso es que, a parte de consideraciones teóricas, se ofrece a los alumnos el seguimiento en directo del proceso de fabricación de un microsistema, a través de imágenes de vídeo grabadas en la sala blanca del CNM. La planificación y el desarrollo de este curso “práctico” es lo que se expone en este texto.

1. Introducción

La incorporación de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) al campo educativo ha representado una transformación tanto en la forma de enseñar como en la forma de recibir conocimientos. Estas técnicas favorecen nuevas propuestas de enseñar y de mejorar el aprendizaje, que son complementarias a las utilizadas tradicionalmente en las aulas. Las nuevas tecnologías pueden utilizarse para reforzar la educación presencial en el aula y/o para impartir cursos online.

La mayoría de los cursos online tienen un enfoque teórico-práctico en el que se suministra al alumno un temario teórico y unos ejercicios prácticos que permiten al profesor hacer un seguimiento de su progreso. En el caso de materias con un gran contenido práctico los cursos online presentan limitaciones debido a que por su propia naturaleza se hace difícil su implementación. En este contexto y dentro del Campus Virtual Iberoamericano de Tecnología (CVIT) [1], hemos propuesto un curso de Microtecnología que se enmarca en el área de tecnología microelectrónica y de microsistemas y se caracteriza por ser eminentemente práctico, o lo que es lo mismo, un curso en el que lo primordial es mostrar el “cómo se hace”.

El CVIT parte de la iniciativa de un proyecto del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), con el objetivo de impulsar la formación de alto nivel en el campo de las llamadas nuevas tecnologías de la sociedad de la información. En este sentido, ofrece una serie de cursos especializados, dictados por expertos en la materia, que las Universidades y Centros Superiores pueden incorporar a sus programas reglados para complementar o actualizar sus propios programas de formación en pregrado, postgrado o formación continuada. Las Universidades y Centros miembros o asociados al CVIT pueden ofrecer por esta vía una formación de calidad en materias en las que no dispongan de profesorado con experiencia o en aquellas en que el reducido número de alumnos potenciales no justifique los costes de su organización. En la figura 1 se muestra la pantalla de presentación del aula virtual de los cursos CVIT.

La tecnología microelectrónica y de microsistemas es una materia sobre la que se encuentra gran información en la red y sobre la que se imparten numerosos cursos, tanto en aula [2,3] como online [4,5]. En general, estos cursos tienen un alto contenido teórico, a los alumnos se les proporciona información sobre los fundamentos y las aplicaciones de las diferentes técnicas utilizadas pero ni se realizan prácticas ni ofrecen una visión práctica de los procesos tecnológicos. La presentación de los cursos varía de unos a otros, pero suele ser de tipo conferencia, en la que se va escuchando la explicación del profesor mientras se van viendo diapositivas de apoyo, o tipo libro, en cuyo caso se cuelga directamente la información que se va leyendo en la pantalla. El complemento ideal para un curso de este tipo sería una estancia práctica en una sala blanca, cosa que no siempre es posible debido



Figura 1. Pantalla de presentación del aula virtual de los cursos CVIT.

a que son laboratorios muy especializados y de acceso restringido. La mayoría de cursos no ofrece esta posibilidad debido a la dificultad que conlleva.

Por otra parte, existen cursos conocidos como “hand on MEMS” en los que se da una formación práctica de manejo de técnicas y de procesos determinados. Estos cursos requieren la presencia del alumno y sólo se pueden realizar en instituciones que dispongan del equipamiento pertinente, como son salas blancas o instalaciones para la fabricación y procesado de dispositivos microelectrónicos y microsistemas. Son cursos muy costosos y requieren una dedicación exclusiva del alumno en un laboratorio determinado, por ello sólo son justificables para personas que vayan a dedicarse profesionalmente a estas tecnologías.

El curso de Microtecnología que presentamos pretende dar una información práctica a los alumnos sin que tengan necesidad de disponer de una sala blanca. Se les propone que sigan en directo, a través de imágenes de vídeo, la fabricación de un microsistema en una sala blanca. Así, sin dejar de lado la base teórica, necesaria para la comprensión de los procesos que se realizan en cada una de las etapas, se da prioridad a la formación práctica. Con este método de aprendizaje “in situ” se consigue proporcionar a los alumnos un conocimiento global de la tecnología de fabricación de microsistemas, a la vez que se mantiene su interés, ya que al ver cómo se desarrollan los procesos, se sienten involucrados en el seguimiento del curso y en la obtención del dispositivo final.

El curso se ha beneficiado de la infraestructura telemática ofrecida por la CVIT, se han aprovechado las ventajas que ofrecen las nuevas tecnologías, se ha aplicado una metodología novedosa, refrendada por el necesario soporte pedagógico y unas técnicas didácticas encaminadas a motivar a los alumnos desde el primer día. No se ha olvidado una parte primordial en la enseñanza y el aprendizaje como es la relación personal entre profesor-alumno y alumno-alumno. Para crear el clima de proximidad necesario y facilitar esta interrelación en la distancia, se han creado puentes telemáticos de comunicación entre todos los participantes a través de diferentes foros, un tablón de anuncios y el correo electrónico. Además, se ha contado con las ventajas adicionales que aporta un curso online que por un lado rompe las barreras de situación geográfica y horario y por otro se adapta al ritmo de aprendizaje de cada alumno concreto.

El dispositivo estudiado, un acelerómetro piezorresistivo, se ha podido fabricar gracias a que se ha contado con el soporte de la sala blanca del Centro Nacional de Microelectrónica [6], que dispone de instalaciones y equipos adecuados y de personal altamente cualificado.

2. Objetivos del curso

El objetivo global que se quiere conseguir con este curso es que los alumnos adquieran unos conocimientos básicos de tecnología de microsistemas para familiarizarse con las nuevas tecnologías. Los alumnos que siguen el curso son estudiantes y profesionales hispanohablantes que desarrollan su labor en ramas científicas, técnicas o tecnológicas. Se trata de alumnos de procedencias y formaciones

diversas que no tienen por qué dedicarse a fabricar dispositivos. En la mayoría de los casos, su interés en el curso se centra en ponerse al día adquiriendo conocimientos de las tecnologías que se están desarrollando, para poderlas incorporar a sus respectivos campos de trabajo.

Teniendo en cuenta las características del curso y los intereses de los alumnos, los objetivos concretos que se desean lograr son:

- Que los alumnos tengan conocimiento de las tecnologías de microsistemas existentes y de sus potenciales.

- Que tengan un conocimiento práctico del proceso de fabricación de microsistemas.

- Que conozcan la base teórica de las tecnologías utilizadas en la fabricación de microsistemas.

- Que sepan aplicar las técnicas expuestas a la fabricación de un microsistema concreto.

- Que sepan evaluar las tecnologías de microsistemas existentes en diferentes *foundries* abiertas a la enseñanza.

- Que puedan seguir en tiempo real el proceso de fabricación de un microsistema para que conozcan cómo se aplican en la sala blanca dichas tecnologías, cómo se combinan entre ellas para obtener el dispositivo final, que dificultades se pueden presentar y cómo se resuelven.

- Que puedan ampliar conocimientos a través de los temas propuestos en los foros.

- Que se establezcan entre los alumnos vías de comunicación donde puedan llevar a cabo discusiones de naturaleza tecnológica de las que todos salgan beneficiados.

- Formar personal cualificado para empresas, universidades o centros superiores.

Para alcanzar estos objetivos se ha elaborado un programa que intenta despertar la curiosidad de los alumnos acercándolos al tema de los microsistemas de una forma amena, para que esperen con interés los contenidos de cada día y se sientan motivados a participar activamente.

3. Metodología

El curso se ha planteado partiendo de una idea básica que es mostrar a los alumnos cómo se fabrica un microsistema, en este caso un acelerómetro piezorresistivo. Se ha escogido un acelerómetro porque es un dispositivo complejo que se adecua a las expectativas del curso: tiene una base teórica bien conocida, en su obtención se combinan tecnología microelectrónica y de microsistemas y además tiene numerosas aplicaciones comerciales: airbag, marcapasos, biomecánica, robótica, medida de vibraciones, industria aeroespacial, etc.

La mejor manera de aprender la tecnología de fabricación de un dispositivo, es seguir en directo todos los procesos que se realizan en la sala blanca desde que se escogen las obleas de silicio hasta que salen los acelerómetros.

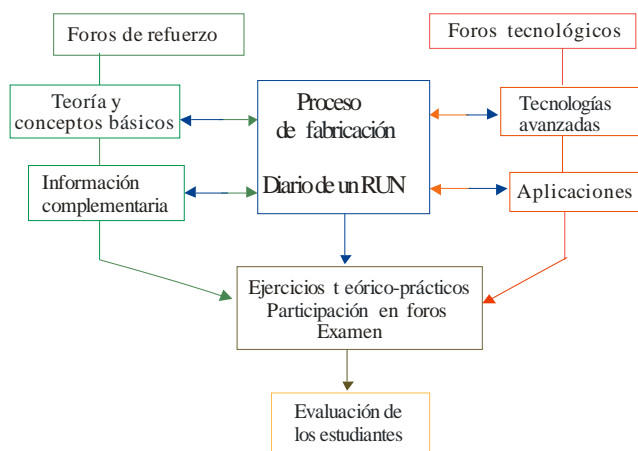


Figura 2. Esquema de la metodología utilizada en el curso.

La presencia real de todos los alumnos en una sala blanca durante el procesado no es posible debido a las condiciones de extrema limpieza que se requieren en un laboratorio de este tipo. Sin embargo, aprovechando las nuevas tecnologías se ha facilitado a los alumnos un acceso virtual, de modo que han podido ver en imágenes, gracias a ficheros grabados en vídeo, todos los pasos requeridos, las técnicas utilizadas, los equipos y los protocolos seguidos en sala blanca para fabricar el dispositivo objeto del curso.

Las tareas programadas se han desglosado en tres bloques diferentes, que han condicionado la metodología llevada a cabo: Bloque general de introducción teórica a los acelerómetros, bloque central de presentación de la sala blanca, preparación del proceso y fabricación del acelerómetro y bloque complementario de foros tecnológicos. En la figura 2 puede verse el esquema básico de la metodología utilizada en el curso.

1. Bloque general de introducción a los acelerómetros.

El objetivo de este bloque es familiarizar a los alumnos con el dispositivo que verán fabricar. La información teórica que se les ofrece está relacionada con el diseño de un acelerómetro, la tecnología utilizada para fabricarlo, las características tanto eléctricas como mecánicas que han de tener para cumplir su función y sus aplicaciones comerciales. El material que se incluye está compuesto por un texto explicativo que incluye esquemas, dibujos y fotografías que ayudan a comprender como es, cómo se fabrica y cómo se caracteriza un acelerómetro.

2. Bloque central. Consta de tres partes:

a) Presentación de la Sala Blanca.

La sala blanca del CNM es el espacio en el que se centra la parte experimental del curso, ya que en ella se llevan a cabo la mayoría de los procesos tecnológicos que se van a observar. Para que los alumnos comprendan la magnitud de esta instalación se les da información escrita sobre las características que hacen de las salas blancas unos laboratorios singulares.

Con ayuda de una presentación multimedia (en Power Point) y de material gráfico, se describe la sala blanca del Centro Nacional de Microelectrónica, se suministra un plano de la misma y se especifican las áreas de trabajo y los equipos de cada una de ellas, de manera que los alumnos puedan ubicar en cada momento la zona donde se desarrolla el proceso. En la figura 3 se muestran fotografías de las salas de fotolitografía, grabado químico y procesos térmicos de la sala blanca del CNM.

b) Preparación del proceso de fabricación.

El paso previo al inicio de la fabricación es la preparación de una hoja de proceso en la que se especifica una relación secuenciada de los pasos necesarios que se han de seguir para obtener el acelerómetro. En esta hoja han de aparecer todas las etapas, detallando para cada una de ellas los equipos que se han de utilizar, así como las condiciones de trabajo requeridas.



Fotolitografía



Grabados químicos



Procesos térmicos

Figura 3. Fotografías de diferentes zonas de trabajo de la sala blanca del CNM.

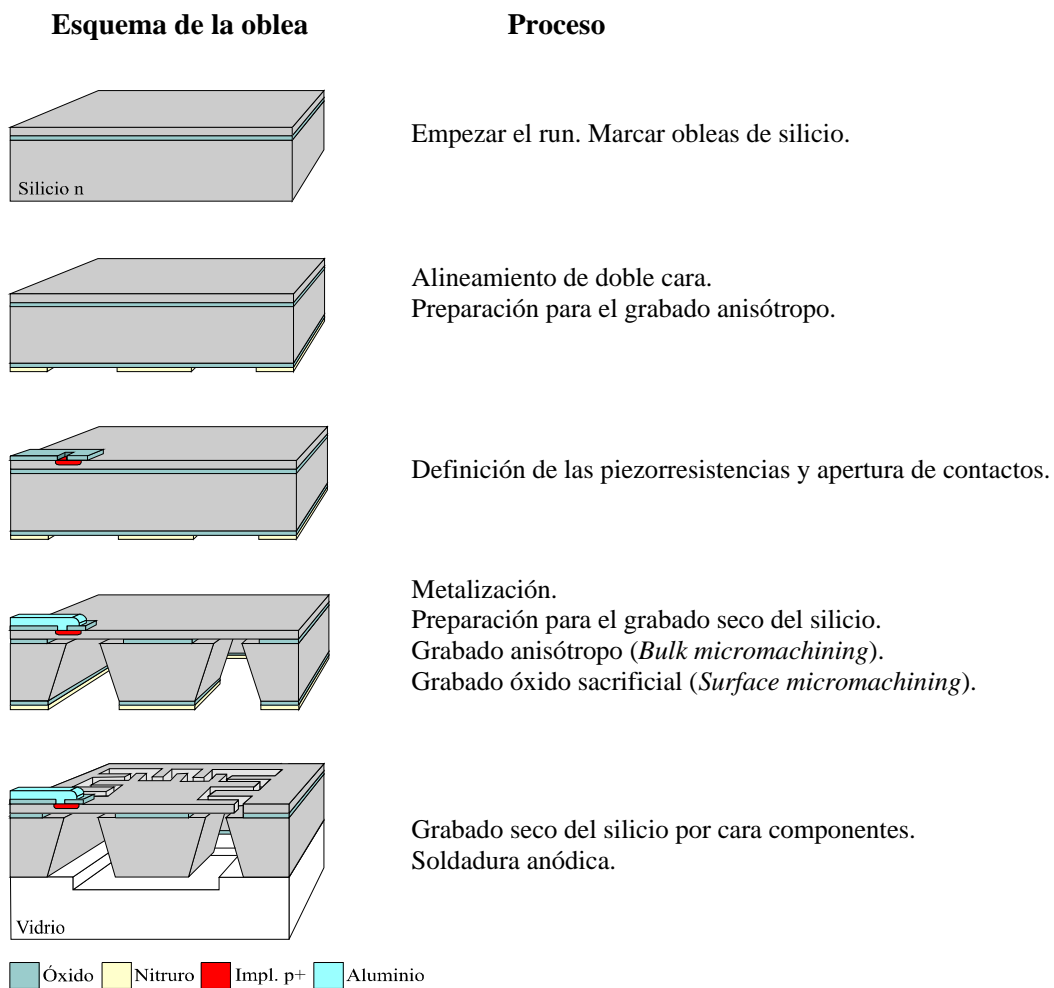


Figura 4. Esquema del proceso de fabricación de un acelerómetro piezorresistivo.

La hoja de proceso ha de ser aprobada por los ingenieros responsables de sala blanca. Con el fin de ayudar a los alumnos a seguir la fabricación de los acelerómetros, se les proporcionan todos los pasos detallados del proceso, así como esquemas de los substratos en los que se pueden ver las transformaciones que tienen lugar después de pasar por las diferentes etapas (figura 4).

c) Diario del proceso de fabricación.

Una vez aprobada la hoja de proceso empieza la parte más espectacular del curso: el seguimiento de la fabricación. Los alumnos van a ver los cambios que experimenta una oblea de silicio desde que se escoge hasta que se transforma en una serie de acelerómetros. La fabricación también es la parte más complicada del curso y la que marca la duración del mismo. Una vez que comienza, el tiempo que dura el proceso depende de muchos factores: disponibilidad de las personas que trabajan en la sala blanca, disponibilidad de los equipos necesarios, cantidad de procesos que se realizan a la vez, número de etapas estándar y no estándar del proceso, o circunstancias imprevistas que pueden o no suceder.

Desde el momento que empieza el procesado, se acompaña a la persona que tiene a su cargo las obleas y se graban en vídeo todos los pasos de cada una de las etapas que se van efectuando. La obtención de las imágenes no siempre ha sido una tarea fácil, ya que las obleas pasan por etapas que son complicadas de grabar, debido a la complejidad de los equipos en los que se realizan y al tiempo de duración de los procesos, que algunas veces es de pocos segundos.

En todos los casos, pero especialmente en los que han supuesto una mayor dificultad, se ha tenido la ayuda inestimable de las personas que trabajan en la Sala Blanca, que han colaborado desinteresada y pacientemente, permitiendo la grabación de su labor diaria.

Una vez hechas las grabaciones originales, se visionan las diferentes secuencias y con la ayuda de un editor de vídeo se eliminan de ellas las partes poco representativas, y se unen adecuadamente para obtener un vídeo en el que se aprecie de forma continua la totalidad del proceso. La mayoría de los vídeos obtenidos tienen un tamaño demasiado grande para ser incorporados directamente al curso, por lo que es necesario dividirlos en dos o más ficheros. Con estos vídeos se consigue que los alumnos vean lo que pasa diariamente en la sala blanca: el desarrollo de las etapas, el área de trabajo donde se realizan y de los equipos que se utilizan. Eso sí, reciben la información con un día de retraso. Ese día es necesario para poder procesar las imágenes, ordenar los datos que se recogen y obtener los ficheros que finalmente se incorporan al curso.

Además de los vídeos, a los alumnos se les da cada día un informe detallado de los pasos que se han realizado, comentando cada uno de ellos y valorando su importancia en el proceso global. Se comentan las incidencias que se presentan y las soluciones que se dan en cada momento. Se exponen los resultados que se van obteniendo y se añaden fotografías que muestran las zonas más representativas de los sustratos después de cada proceso, de modo que puedan seguirse los cambios que se van produciendo. Se ofrece información teórica de las técnicas más relevantes que se han utilizado y se recomiendan páginas *web* donde se pueden ampliar conocimientos. Una vez concluida la fabricación de los acelerómetros se envía a los alumnos dispositivos de cada uno de los diseños obtenidos para que puedan observarlos y hacer las caracterizaciones que consideren oportunas.

En la figura 5 se muestran fotografías del anverso y el reverso de una oblea con acelerómetros y un detalle del dorso de uno de ellos.

3. Bloque complementario. Foros tecnológicos

En paralelo al diario del proceso, se han planteado cuatro foros relacionados con la tecnología de microistemas, que contribuyen a completar la información expuesta en el curso, estimulando la curiosidad de los estudiantes. Los foros tecnológicos son espacios virtuales en los que se requiere una participación activa por parte de los alumnos. Cada semana se presenta un tema, y el profesor dirige el contenido del foro a través de cuestiones que plantea a los alumnos y que ellos han de desarrollar buscando información. Como punto de partida se les sugiere la visita a algunas páginas *web* y a partir de ellas se les anima a investigar en otras diferentes.

El objetivo de estos foros es que los alumnos completen su aprendizaje indagando en los temas que se les propone y elaborando un trabajo personal sobre cada uno de ellos. Mientras lo realizan tienen la posibilidad de hacer consultas y sugerencias al profesor a través del propio foro, si desean que su consulta esté abierta a sus compañeros, o del correo electrónico en caso de que quieran un intercambio privado de información.



Figura 5. Anverso y reverso de un sustrato terminado. Detalle del dorso.

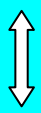
	Microtecnología	Foros
1ª semana	Teoría de acelerómetros. Definición y preparación del proceso de fabricación. Descripción de la Sala Blanca del CNM.	FORO 1: Acelerómetros
2ª semana	 RUN de fabricación de los acelerómetros en la Sala Blanca del CNM	FORO 2: Tecnología de microsistemas
3ª semana		FORO 3: Aplicaciones
4ª semana		FORO 4: Nanotecnología
5ª semana	En función de las incidencias del proceso de fabricación. Evaluación de los conocimientos de los alumnos mediante un supuesto práctico	

Tabla 1. Programación del curso.

Una vez acabado el trabajo, los alumnos lo envían a través del foro, en el que se hace una puesta en común y se abre un debate sobre cada tema concreto. Los foros propuestos en este curso han sido: Acelerómetros, Tecnología de fabricación de microsistemas, Aplicaciones de los microsistemas y Nuevas aplicaciones y Tecnologías avanzadas: Nanotecnología.

La duración del curso se estima entre 4 y 5 semanas, dependiendo de la planificación de las etapas en sala blanca y de las posibles incidencias que surjan durante la fabricación. En la tabla 1 se indica la programación prevista para cada una de las semanas del curso. La primera semana se dedica a introducir a los alumnos en la teoría de acelerómetros, a preparar el proceso de fabricación y describir la sala blanca. A partir de la segunda semana comienza la fabricación, que en principio está previsto que dure tres semanas. Se deja una semana de margen por si se alarga el proceso y en esta semana también se hace la evaluación final de los alumnos. La dedicación recomendada a los alumnos para un seguimiento óptimo del curso es de 2 a 3 horas diarias.

4. Soporte didáctico y pedagógico

Los contenidos educativos que se imparten online no llegan a los alumnos de igual forma que los impartidos en un curso asistencial. En un curso convencional la información llega al alumno de forma más cálida por la interacción directa que se establece entre las personas presentes en el aula. El profesor recibe las reacciones del alumno y sus dudas en el mismo momento de producirse la exposición y puede utilizar inmediatamente los recursos que considere oportunos para ayudarlo. Como contrapartida, en muchos casos, aunque el alumno preste un alto grado de atención, no puede hacer acopio de toda la información que se le ofrece en la clase.

En un curso online los conocimientos se ven reforzados debido a que toda la información que se ofrece queda puesta en el curso y los alumnos pueden consultarla a su antojo, todas las veces que consideren oportuno. La falta de contacto interpersonal queda contrarrestada con un adecuado soporte pedagógico que potencia la comunicación entre los participantes.

El soporte didáctico y pedagógico que se ha puesto al servicio de este curso es amplio y variado. Se han aprovechado todos los recursos que están al alcance de los profesores, y se han adaptado para su incorporación a un curso online. En esta adaptación ha sido de gran ayuda la experiencia educativa de los profesores, que se ha visto enriquecida gracias a la preparación de este curso.

Los recursos didácticos que se han utilizado al preparar el material educativo de esta asignatura han tenido en cuenta los intereses del alumno y su soledad cuando se enfrenta al curso. En este sentido, se ha hecho un esfuerzo para que el aprendizaje resulte ameno y estimulante; se pretende

sorprender al alumno para captar su atención e inducirle a concentrarse espontáneamente en los contenidos de la asignatura.

El material expuesto, tanto el teórico como el audiovisual, se ha preparado especialmente para el curso. En su elaboración se han tenido en cuenta aspectos educativos y técnicos. Por un lado se presentan los contenidos de forma amena, con una gran cantidad de imágenes que ilustran la esencia de la asignatura y por otro se aprovechan las posibilidades que ofrece la tecnología para que los alumnos se sientan cómodos y se manejen con facilidad en el curso. En cualquier caso, la intención final es mantener el interés de los alumnos, contribuir a satisfacer las expectativas que podían tener depositadas en el curso y facilitar su aprendizaje.

Para realizar este curso se han aprovechado los siguientes recursos:

- La sala blanca del Centro Nacional de Microelectrónica, en la que trabajan profesionales altamente cualificados que han hecho posible la fabricación del acelerómetro. La sala está dotada con todos los equipos necesarios para fabricar dispositivos microelectrónicos, además de micro y nanosistemas: hornos de oxidación, de difusión y de deposición; implantador iónico, metalizadoras, equipos de grabado en seco, baños para grabados húmedos, sala de fotolitografía, sala de inspección con microscopios ópticos, interferómetro, perfilómetro y elipsómetro. Gracias a la oportunidad de haber contado con acceso libre a esta instalación, se ha podido mostrar el trabajo diario que se realiza en su interior, concretándolo en el dispositivo específico que se presenta en el curso.

- Recursos audiovisuales: cámara de vídeo, cámaras fotográficas independientes o asociadas a microscopios ópticos o electrónicos, con los que se han obtenido las imágenes que se han añadido al curso y que han ilustrado los diferentes procesos tecnológicos, los equipos utilizados o los cambios experimentados en los sustratos.

- Programas de edición de vídeos, que se han utilizado para obtener una secuencia continua a partir de las secuencias grabadas para cada proceso concreto y para adecuar el tiempo de duración de los vídeos al tamaño que han de tener los ficheros para poder colocarlos en el curso.

- Bibliografía. Se ha proporcionado información bibliográfica directamente y a través de diferentes informes y exposiciones, tanto de la parte teórica del curso, como de cada uno de los procesos tecnológicos utilizados.

- Páginas *web* recomendadas. Se ha sugerido la visita a determinadas páginas *web* para aumentar conocimientos teóricos, para tener idea de los diferentes microsistemas que se ofrecen en el mercado y estar al tanto de las empresas que ofrecen la posibilidad de fabricarlos.

- Acelerómetros. Una vez finalizado el curso se han enviado a los alumnos muestras de los acelerómetros que se han visto fabricar. En la figura 6 se muestran fotografías de dos acelerómetros diferentes.

El soporte pedagógico que se ofrece a los alumnos se realiza a través de una tutoría desglosada en diferentes foros. La comunicación entre profesor y alumnos no siempre se establece en el mismo instante debido a que un curso de este tipo tiene la ventaja de que puede seguirse desde localizaciones geográficas diferentes, con horarios no coincidentes. El profesor entra en el curso cada día a una hora determinada para comentar y solucionar las cuestiones planteadas desde la última conexión.

Los alumnos disponen de diferentes espacios de intercomunicación:

- Foro de consultas al tutor, a través del que se pueden hacer preguntas directas al profesor. En este foro se establece una comunicación individual y directa entre el profesor y cada uno de los alumnos por separado.

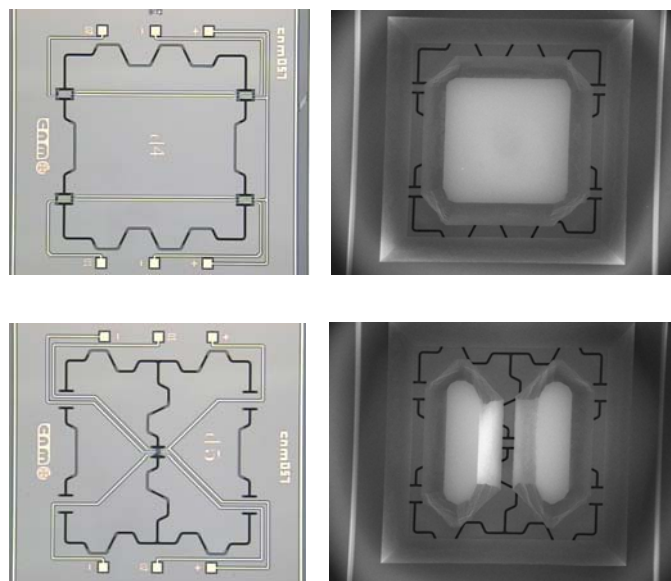


Figura 6. Anverso y reverso de dos acelerómetros diferentes.

En un curso como el que nos ocupa, en el que se hace un seguimiento en directo de un determinado proceso tecnológico, los alumnos ven imágenes que difícilmente han podido ver antes, a no ser que hayan trabajado en una sala blanca. Esto suscita preguntas y comentarios referentes tanto al proceso concreto que ven efectuar como a la forma de manipular los sustratos, a los equipos utilizados o al espacio donde se realiza. Son cuestiones que difícilmente se plantean en un curso teórico y a las que normalmente no se da respuesta en los textos disponibles en la red ni en los tratados de tecnología microelectrónica.

Para comentar y contestar las dudas tanto teóricas como prácticas que puedan surgir, se ha creado este foro en el que la comunicación entre los participantes no tiene por qué establecerse en el mismo instante ni por supuesto desde el mismo sitio. El profesor pone en la *web* la materia correspondiente a cada día concreto y los alumnos la reciben cuando se conectan al curso. De la misma manera que cada alumno puede ajustar el proceso de aprendizaje a su ritmo de trabajo personal y adaptar el curso a su horario, también puede hacer preguntas al profesor en cualquier momento del día. Éste se conecta cada día a una hora determinada para comentar y solucionar en el menor plazo de tiempo posible, las cuestiones planteadas.

- Foro de estudios en el que se plantean a los alumnos diferentes ejercicios relativos a la tecnología que están viendo y aprendiendo. Se trata de unos supuestos prácticos que deben desarrollar.

Las preguntas, dudas y consultas que aparecen al realizar el trabajo se recogen en este foro y son contestadas tanto por el profesor como por el resto de los alumnos, que pueden hacer sugerencias y aportar ideas. Este foro no es personalizado, está abierto a la vez a todos los participantes del curso, por lo que actúa como una sala de estudios virtual, en la que se establece un intercambio global de información.

- Foros tecnológicos sobre temas concretos en los que a través de preguntas el profesor guía a los alumnos en la búsqueda de información sobre materias que amplían y complementan los contenidos dados en el curso. La participación en este foro es obligada, ya que los alumnos han de presentar en él sus trabajos sobre cada uno de los temas tratados. En el foro se hace una puesta en común y se abren debates en los que participan los alumnos y el profesor.

- Correo electrónico. Este medio pueden utilizarlo tanto los alumnos como el profesor cuando consideran que es oportuno mantener un intercambio privado de mensajes. El profesor lo utiliza para responder preguntas y/o asesorar a un alumno determinado.

- Tablón de anuncios. En este espacio se informa a los alumnos de los eventos que se producen durante el curso. Por ejemplo, se pueden anunciar tanto posibles incidencias que pueden causar retrasos en el proceso de fabricación de los dispositivos, como el inicio de cada uno de los foros tecnológicos.

5. Seguimiento y evaluación de los alumnos

La evaluación del proceso de aprendizaje de los alumnos se realiza a partir del seguimiento personalizado que se ha ido haciendo durante el curso. Se ha tenido en cuenta la participación de los alumnos en los diferentes foros, la resolución de los ejercicios que se han ido planteando, los trabajos que han presentado y sus respuestas a un examen en el que se les han planteado dos supuestos prácticos que han de resolver.

Los ejercicios que se han ido planteando a lo largo del curso tienen como objeto que los alumnos vean que el campo de los microsistemas abarca una gran variedad de dispositivos, y con la base que les proporciona la información que han recibido durante el seguimiento de la fabricación del acelerómetro sean capaces de dar respuesta al diseño y la fabricación de otro tipo de dispositivos.

Aunque el protocolo de los cursos CVIT prevé la realización de un examen presencial en un lugar concreto a una hora determinada, debido a la naturaleza de este curso, se ha optado por efectuar la prueba final de una forma diferente. A los alumnos se les ha dado el examen y se les ha dejado una semana de tiempo para dar respuesta a las cuestiones de índole teórico-práctica que se les exponen. En este tiempo pueden buscar la información que consideren oportuna y también pueden consultar a título personal con el profesor las dudas que les surjan.

6. Valoración del curso

La valoración de este curso puede hacerse desde el punto de vista de la naturaleza del curso (online) y desde el punto de vista de los contenidos que se ofrecen en él, de la forma de presentarlos y del aprovechamiento por parte de los alumnos.

Este curso ha gozado de las ventajas que ofrecen los cursos online, que son varias y dignas de tener en cuenta. Al ser un curso que se va incorporando día a día a la red, los alumnos no están condicionados por hacer acto de presencia en un lugar concreto a una hora determinada. En este sentido, el curso lo han seguido a la vez alumnos desde España y desde diferentes países de América del Sur. Cada uno ha podido adaptar el seguimiento del curso a su agenda y a sus circunstancias particulares, sin que haya variado la calidad de su aprendizaje.

Desde el punto de vista del aprendizaje, el curso se ha adaptado a las necesidades de cada alumno, dando respuesta a sus inquietudes particulares y permitiendo que cada uno haya aprendido siguiendo el ritmo de trabajo que más se ha acomodado a sus características personales. El curso ha permitido establecer una interacción entre el profesor y los alumnos y entre los alumnos entre sí, lo que ha garantizado un aprendizaje dinámico y un enriquecimiento mutuo debido a la cooperación entre los participantes.

Por todo ello, este curso puede considerarse en muchos aspectos un curso personalizado, en el que se ha ofrecido a los alumnos conocimientos que pueden ser de su interés, a través de las prestaciones que ha ofrecido la infraestructura telemática de la CVIT que ha sido de gran ayuda, ya

que de una forma sencilla ha permitido a los profesores la incorporación de la materia al curso, a los alumnos la consulta de dicha materia todas las veces que han considerado necesarias, y a unos y otros la utilización de los diferentes espacios virtuales establecidos por el sistema.

Desde el punto de vista de los contenidos, la preparación de este curso ha representado un enorme trabajo, tanto por la preparación del material teórico-práctico que se ha impartido en el curso, como por el contenido que se ha dado a los foros complementarios que se han ido proponiendo.

Durante el curso se realiza un proceso real de fabricación de acelerómetros en la sala blanca, para su seguimiento se ha grabado diariamente el material audiovisual, se ha procesado y se ha completado con la información teórico-práctica necesaria para explicar y dar contenido a las imágenes. El resultado se ha colocado puntualmente en el curso, con un desfase de un día respecto al tiempo real de fabricación. En este proceso ha habido un trabajo de coordinación y cooperación con el personal de sala blanca.

Por otro lado, se han ido atendiendo las cuestiones que han llegado a los foros de consulta y a los foros tecnológicos. Se han propuesto trabajos teóricos y teórico-prácticos que han abierto diálogos, y han suscitado comentarios y preguntas a las que se ha contestado con puntualidad para orientar a los alumnos y animarlos a continuar con el trabajo personal que requiere el aprendizaje de la materia.

Las dificultades que se han encontrado al preparar este curso están relacionadas con el planteamiento intrínseco que se le ha dado, y se centran en el proceso de fabricación del acelerómetro piezorresistivo. Al presentar un proceso en tiempo real estamos condicionados por las incidencias, unas veces previsibles y otras no, que se derivan de la fabricación de un producto. Esto hace que al comenzar el curso se pueda hacer una previsión de su duración, pero no se pueda saber la fecha exacta que acabará. Tampoco se puede asegurar que todos los sustratos de partida lleguen hasta el final del proceso en las mismas condiciones.

La fabricación de un microsistema es un proceso complejo en el que los sustratos pasan por muchas etapas: grabados húmedos, secos, oxidaciones térmicas, deposición de dieléctricos, implantaciones iónicas, fotolitografías, metalizaciones, etc. Para realizar estas etapas se requiere que un número considerable de equipos e instalaciones funcionen perfectamente. En general suele ser así, pero hay circunstancias del todo impredecibles (por ejemplo un corte en el fluido eléctrico) que pueden retrasar un proceso o incluso obligar a empezarlo de nuevo.

Al plantear el curso se asumieron este tipo de riesgos y se incorporaron a la filosofía del mismo, ya que se quería dar a los alumnos una visión real de lo que representa la fabricación de un microsistema. Sin embargo, es cierto que durante los diecisiete días que ha durado el proceso, hemos estado condicionados por la incertidumbre de no saber que incidencias podían presentarse y sobre todo por desconocer cómo y cuando se llegaría al final.

Una vez concluido el curso, la valoración del mismo por parte de los profesores es muy positiva, teniendo en cuenta la constancia con que los alumnos lo han seguido, su participación en las actividades propuestas, el interés que han manifestado y los contenidos que han asimilado.

La valoración del curso por parte de los alumnos también ha sido muy positiva. En general esperaban un curso convencional y les ha sorprendido gratamente lo que han recibido, tanto por los contenidos como por la forma de presentarlos.

7. Conclusión

El curso de Microtecnología que se ha presentado tiene la peculiaridad de ofrecer a los estudiantes una visión práctica de la tecnología propia de las disciplinas de microelectrónica y

microsistemas. La novedad es que los alumnos han seguido en tiempo real la fabricación de un acelerómetro piezorresistivo, a través de imágenes de vídeo y se les ha suministrado la base teórica necesaria para seguir el proceso, así como información complementaria a través de diferentes foros tecnológicos. En la preparación del curso se han aprovechado los recursos que ofrecen las nuevas tecnologías y las instalaciones disponibles en la sala blanca del Centro Nacional de Microelectrónica. A los alumnos se les ha ofrecido soporte pedagógico a través de diferentes foros que les han permitido establecer una relación fluida con el tutor y entre ellos mismos.

El enfoque que se da en el curso de la fabricación de un acelerómetro es de utilidad para los alumnos que siguen el curso, pero también para las universidades y centros superiores de los que proceden, ya que pueden disponer de una herramienta didáctica con la que complementar los programas de formación que ofrecen.

Respecto al futuro del curso de Microtecnología, se podría ampliar la oferta educativa mostrando el proceso de fabricación de diferentes microsistemas, de la misma forma que se ha hecho con los acelerómetros piezorresistivos. Además, podría plantearse un curso complementario a este, intentando que fuera más interactivo para que los alumnos tuvieran una participación más directa, incluso en el planteamiento del propio proceso de fabricación. En este sentido, se podría establecer una interacción alumnos-sala blanca, tutelada por los profesores, de manera que los propios alumnos podrían plantearse la obtención de un dispositivo concreto y encargarse del diseño y la petición del proceso a sala blanca. El seguimiento del proceso sería a través de imágenes grabadas, tal como se ha expuesto en el curso de Microtecnología y con el acceso por parte de los alumnos al programa de gestión de los equipos de sala blanca.

Referencias

- [1] Campus Virtual Iberoamericano de Tecnología: <http://oaid.uab.es/cvit/>
- [2] Europractice: <http://www.europractice.com/>
- [3] Fondation Suisse pour la Recherche en Microtechnique: <http://www.fsrm.ch/>
- [4] Euspen Vision Online: <http://www.euspen.com/>
- [5] J.D. Adams, B.S. Rogers, L.J. Leifer. *Microtechnology, Nanotechnology, and the Scanning-Probe Microscope: An Innovative Course. IEEE Transactions on Education.* 47(1), 51-56 (2004).
- [6] Centro Nacional de Microelectrónica CNM-CSIC: <http://www.cnm.es/>