

Del borde del dado al borde del arreglo de pads (llamado en inglés *bondframe*) que representan el límite del área en dónde se colocan los dispositivos existe una franja de 250 [μm] que debe respetarse para que los cortes que se hacen sobre la oblea para obtener los dados no afecten a las máquinas creadas.

En el subdirectorio *CamelLibrary*, dentro del directorio de instalación de MemsPro se encuentra el archivo de ejemplo *f29.tdb* que contiene un *bondframe* que respeta las reglas de diseño del proceso PolyMumps y puede resultar útil para armar el dado final que se enviará a fabricación.

A partir de la máscara de cada dispositivo debe crearse una celda y posteriormente hacer una instancia de dicha celda en el archivo en dónde se armará el dado. Esto es con el propósito de facilitar los procesos de actualización de máscaras de los que nunca se está exento. Es común que existan correcciones de último minuto que pueden realizarse en los archivos originales del dispositivo y automáticamente se reflejarán en la máscara general que se envíe a fabricación, sin necesidad de alterar el acomodo del resto de los dispositivos en la superficie del dado.

9.4. Conclusiones y trabajo futuro

Las conclusiones después de trabajar por varios meses en la presente tesis, son de dos tipos, unas de naturaleza técnica acerca del contenido del trabajo mismo y otras de naturaleza académica acerca de la formación que todo ingeniero debiera obtener a su paso por nuestra facultad. Dado el carácter más general de éstas últimas, serán abordadas en primera instancia.

Sin duda el diseño de MEMS es un campo de la ingeniería altamente formativo dada su naturaleza aplicada y multidisciplinaria que exige conocimientos de matemáticas, mecánica de fluidos, electromagnetismo, termodinámica, mecánica de materiales, diseño mecánico, microelectrónica, microlitografía, física de semiconductores, programación y teoría de control, así como el manejo de diversas metodologías de diseño, simulación, optimización, fabricación y pruebas para obtener cualquier tipo de microdispositivo con el que se desee trabajar. Por estas razones, resulta importante la incorporación en la oferta académica de las carreras derivadas de la ingeniería eléctrica (ingeniería en computación, ingeniería en electrónica, ingeniería eléctrica e ingeniería en telecomunicaciones) y la ingeniería mecánica (ingeniería mecánica, ingeniería mecatrónica e ingeniería industrial) al, menos de un par de materias sobre sistemas microelectromecánicos y en el mediano plazo ofrecer una opción terminal o especialidad en microelectrónica y sistemas microelectromecánicos.

Es necesario dar continuidad al esfuerzo de equipamiento, iniciado con el apoyo de la Secretaría de Economía para reforzar el laboratorio con que actualmente cuenta la facultad de ingeniería de la UNAM, para ampliar sus capacidades con equipos como:

1. Equipos para electroenchapado, deposición física de vapor y deposición química de vapor
2. Equipo para encapsulado y fusión de materiales (wafer bonder, die attach & molding)
3. Equipos de análisis térmico
4. Tarjetas electrónicas para la adquisición de datos
5. Fuentes de poder de precisión y programables
6. Mesas antivibratorias
7. Licencias para software de análisis multifísico: Ansys y Comsol
8. Licencias para software de diseño de Mems: MemsPro
9. Licencias para software de diseño mecánico: SolidWorks e Inventor
10. Licencias para software de conversión de formatos de archivos CAD

También es necesario que la Facultad de Ingeniería de la UNAM haga un esfuerzo por disponer de un laboratorio de manufactura de sistemas microelectromecánicos y circuitos integrados con el fin de impulsar estas áreas que son la actualidad en la manufactura de dispositivos electrónicos, sensores y sistemas automáticos. Ójala los esfuerzos institucionales de crecimiento se orienten hacia estas áreas que hoy por hoy marcan la pauta en la ingeniería eléctrica y se invierta en el equipamiento y capacitación de profesores para fortalecer la currícula de las carreras relacionadas con estas tecnologías.

En cuanto a las conclusiones técnicas del trabajo, éstas pueden resumirse en:

1. El proceso PolyMumps resulta adecuado para la creación de acelerómetros con capacidad de registro de aceleraciones en el orden de las 10 a las 100 miligravedades, por lo que califican como dispositivos para aplicaciones de instrumentación.
2. Además, dados los valores de las frecuencias naturales de oscilación que se lograron con los dispositivos (entre 20 y 40 [khz]), bien pueden emplearse para la detección de vibraciones anómalas en equipos de generación eléctrica y en motores.
3. La metodología seguida para el análisis, diseño, simulación y creación de las máscaras de los dispositivos puede resultar una buena guía didáctica para impartir un curso sobre sistemas microelectromecánicos de nivel licenciatura.
4. El uso de técnicas y software de simulación por elemento finito y análisis multifísico puede mejorar mucho la formulación de hipótesis sobre el funcionamiento de los dispositivos y aportar elementos valiosos para su diseño.
5. El diseño electromecánico es tan sólo una parte del proceso de diseño y creación de sistemas microelectromecánicos, lo relativo a su embalaje e integración con la electrónica de alimentación y control resulta igualmente crucial para el adecuado funcionamiento del dispositivo, sin embargo, ambos aspectos quedan fuera del alcance del presente trabajo.

El trabajo futuro puede resumirse en los siguientes puntos:

1. La parte más importante del trabajo futuro es el envío a fabricación de los dispositivos propuestos en la presente tesis para realizar su caracterización mecánica y eléctrica en el laboratorio y ver su correspondencia con lo señalado por las simulaciones por computadora, sin embargo, esto depende de la disponibilidad de recursos para solventar los gastos de una corrida en PolyMumps, que son de alrededor de 6 mil dólares americanos, y el acceso a equipo para el encapsulado al vacío y la realización de las conexiones eléctricas entre el dado de semiconductor y algún empaque electrónico estándar.
2. Como parte del trabajo que puede desarrollarse posteriormente, está la realización de las simulaciones mecánicas y electromecánicas de los dispositivos aquí propuestos, utilizando algún software de elemento finito capaz de trabajar con acoplamientos multifísicos (como son los casos de Ansys Multiphysics o Comsol), ello con la finalidad de verificar posibles discrepancias con los resultados (desplazamiento, velocidad y aceleración de la masa de prueba y su transducción a voltaje) obtenidos mediante las simulaciones desarrolladas en Matlab. A partir de dichas discrepancias sería posible ajustar los parámetros de diseño y mejorar la respuesta del sistema.
3. Dentro de las mejoras para el desempeño que pueden realizarse a los dispositivos propuestos se encuentra el mejor aprovechamiento del control en lazo cerrado del dispositivo, que hasta este momento se modeló como uno del tipo proporcional como parte del diseño del sistema y que se simuló en Matlab (la constante de proporcionalidad del control, k , está determinada por la ganancia del amplificador operacional colocado en el lazo de realimentación). Sin embargo, la respuesta del sistema puede controlarse mucho mejor al incorporar un control proporcional integral derivativo (PID) que aumente la amplitud de la respuesta, mejore su tiempo de subida, disminuya el sobreimpulso y reduzca las oscilaciones.

4. Otra parte importante del trabajo por desarrollar corresponde a la extensión del presente trabajo hacia el diseño de acelerómetros tridimensionales (que registren cualquier variación en la aceleración de un cuerpo en movimiento tridimensional, es decir, con componentes en x, y y z). Los acelerómetros propuestos en esta tesis, están diseñados para registrar variaciones en la dirección ortogonal al actuador electrostático, si se hace coincidir esta dirección con uno de los ejes de movimiento se tendrán registros de aceleración en dicha dirección. Puede modificarse la suspensión y realizarse un nuevo arreglo de actuadores electrostáticos para lograr registros en las dos direcciones que definen el plano del dado que contiene al acelerómetro (por simplicidad, supónganse x y y). Por otra parte, podrían simplemente colocarse un par de acelerómetros, como los presentados en esta tesis, de modo tal que uno de ellos registrara en la dirección de un eje de movimiento y el otro se colocaría rotándolo 90 grados hacia la izquierda o la derecha para registrar en la dirección del otro eje de movimiento que define el plano que contiene los acelerómetros. Para lograr registros en el que se podría llamar eje z , puede aprovecharse el hecho de que la placa de nivelación debajo de cada masa de prueba (y que en el proceso PolyMumps se fabrica con la capa de proceso Poly0) de los acelerómetros puede formar junto con ésta un capacitor variable de placas paralelas, la masa de prueba (plaza móvil del capacitor variable) sostenida mediante la suspensión del acelerómetro, también experimenta desplazamientos que la aproximan a la placa de nivelación, dado que dichos desplazamientos generarán variaciones en la capacitancia, puede aprovecharse este hecho y el modelo del sistema como uno del tipo masa-resorte-amortiguador para averiguar la aceleración que experimenta el dispositivo en la dirección z .
5. Diseñar acelerómetros aprovechando las características de fabricación que ofrecen los otros procesos de bajo costo ofrecidos por la empresa Memscap Inc. tales como MetalMumps y SOIMumps.
6. Finalmente, las herramientas de modelado, simulación y el aprovechamiento de las particularidades del proceso de fabricación PolyMumps abordadas en el presente trabajo podrían aprovecharse para el diseño de giroscopios planares que servirían como instrumentos de registro de cambios de dirección en movimientos contenidos en un plano.

