

MICROMAQUINADO CON LÁSERES SÓLIDOS DE NANO Y FEMTOSEGUNDOS: COMPARACIÓN DE RESULTADOS

NANO AND FEMTOSECOND SOLID STATE LASER MICROMACHINING: COMPARISON OF RESULTS

D. Rava¹, H. Ferrero¹, L. Fidalgo², M. Agüero², A. Hnilo² y M. Kovalsky^{2*}

1. Departamento de Física, Fac. de Ciencias Exactas y Naturales – UBA
Pabellón I, Ciudad Universitaria (1428) – C.A.B.A.

2. Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones CEILAP (CITEDEF-CONICET)
Juan Bautista de La Salle 4397 – (B1603ALO) Villa Martelli – Prov. Buenos Aires – Argentina

Recibido: 20/11/13; aceptado: 10/07/14

En este trabajo se presentan los resultados de la comparación del micromaquinado láser de obleas de silicio empleando la técnica de escritura directa (direct writing) con pulsos de nanosegundos generados por la técnica de Q-switch en Nd:YAG y pulsos de femtosegundos, provenientes del Ti:Zafiro mode lockeado. Se determinaron los efectos de la redeposición de escombros (debris) y se proponen técnicas para su control.

Palabras clave: micromaquinado láser, obleas de silicio, láser de Nd:YAG

In this paper we present the comparison of direct writing silicon wafer using Q-switched pulses from a Nd:YAG laser and mode locking pulses from a Ti:Sapphire laser. We describe the debris effect in both cases and propose several techniques in order to minimize the effect.

Keywords: laser micromachining, silicon wafer, Nd:YAG laser

I. INTRODUCCIÓN

El interés en la miniaturización de dispositivos para aplicaciones en áreas de la ciencia y de la industria demanda la producción de agujeros cada vez más pequeños sobre una amplia variedad de materiales tales como acero, aluminio, cerámicos, semiconductores, plásticos y vidrios, entre otros. En particular, la técnica de micromaquinado láser permite realizar agujeros y cavidades en materiales con geometrías y dimensiones muy difíciles o imposibles de realizar usando métodos clásicos (por ejemplo, con maquinado mecánico). Cuando el haz de un láser (usualmente pulsado) interactúa con un material, se pueden producir cambios permanentes en las propiedades de este último, que no pueden lograrse fácilmente por otros medios.

Este tipo de micromaquinado emplea el mecanismo de ablación para remover el material de la superficie de un sustrato por absorción directa de la energía del láser (enfocada en una región con un diámetro típico de unos pocos a unos cientos de micrómetros) [1]. Debido a la absorción de la energía del láser, el material localmente se derrite, se vaporiza y se disipa eyectando una columna vertical de átomos neutros e ionizados. En general, el material eyectado se re-deposita y resolidifica sobre la superficie que bordea la zona mecanizada alterando la topografía en el borde y en los alrededores del agujero (efecto de *debris*) [2].

En el caso de micromaquinado con un láser de nanosegundos (figura 1), la remoción de material se produce por una combinación de evaporación y

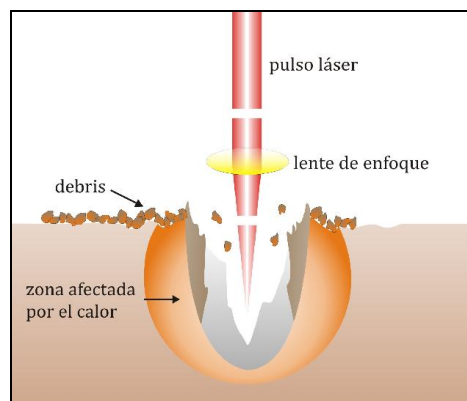


Figura 1: Esquema de la sección transversal de un agujero micromaquinado con un láser de pulsos largos.

expulsión de material fundido. En la superficie del material se absorbe la radiación proveniente del láser, provocando estados electrónicos excitados que decaen al estado fundamental mediante la emisión de fonones. En esta rápida conversión electrón-fonón tiene lugar el calentamiento del sólido depositándose una gran cantidad de energía en un volumen muy pequeño y durante un tiempo muy corto (6-12 ns), de forma que la

*mkovalsky@citedef.gob.ar

temperatura superficial del blanco se eleva y aparece una interfaz sólido-líquido que se mueve hacia el interior. La interfaz entre el material ya fundido y el sólido continúa avanzando mientras el material se vaporiza en forma de pluma. La absorción fotónica por parte del vapor del material da origen a la formación de un plasma constituido por toda una variedad de elementos, como iones, moléculas y otras especies e incluso pequeñas gotas, partículas del material constitutivo del blanco, que son arrancadas íntegramente de él. Este plasma es extremadamente caliente (se ponen en juego temperaturas del orden de los 15000°K). Una vez formada la pluma ésta se va a propagar en dirección normal al blanco. Este efecto es muy conocido y empleado en la técnica de espectroscopía de plasma inducido por láser conocida como (LIBS) (Laser induced Breakdown spectroscopy) [3]. Sin embargo, si se emplea un láser de femtosegundos, el mecanismo de ablación es un poco diferente. A medida que el pulso decrece, el tiempo de interacción es más corto. En este caso, el intenso campo electromagnético agita toda la estructura electrónica del material causando su ruptura debido a la repulsión entre los átomos (explosión de Coulomb) y haciendo que una pequeña cantidad de material se transforme en un plasma ionizado [4]. En este proceso la energía se deposita en el material antes de que produzca el efecto de difusión térmica, permitiendo remover material del sustrato sin calentar de manera significativa el entorno de la región micromaquinada.

Con un láser de nanosegundos en 1064 nm es posible micromaquinar piezas que sean de una calidad suficiente para algunas aplicaciones, evitando de esta manera emplear láseres extremadamente costosos como aquellos que emiten pulsos de femtosegundos. En este trabajo se presentan los avances obtenidos en el campo del micromaquinado con pulsos de nanosegundos empleando un láser de Nd: YAG con Q-switch activo construido en el CEILAP y los resultados preliminares obtenidos con un láser de femtosegundos.

II. MICROMAQUINADO EN OBLEAS DE SILICIO

Láser de Nd:YAG pulsado

El láser de Nd: YAG con Q-switch activo consta de un cabezal de bombeo (RBA G20-1C2, Northrop Grumman) que contiene la barra de Nd:YAG bombeada transversalmente por nueve arrays de diodos láser de emisión continua en 808 nm . El cabezal (barra láser - diodos) se mantiene refrigerado a una temperatura aproximada de 25°C haciendo circular una mezcla de agua desmineralizada y etilenglicol por el interior del módulo. Para generar pulsos con una duración de nanosegundos se implementó la técnica de Q-switch activo usando un modulador acusto-óptico (AOM) ubicado entre el cabezal de bombeo y el espejo de salida (figura 2). El AOM utilizado permite modificar a voluntad la frecuencia de repetición de los pulsos en un rango de 1 Hz a 80 kHz . Después de muchos ensayos, en este trabajo se empleó una cavidad lineal de 27 cm de

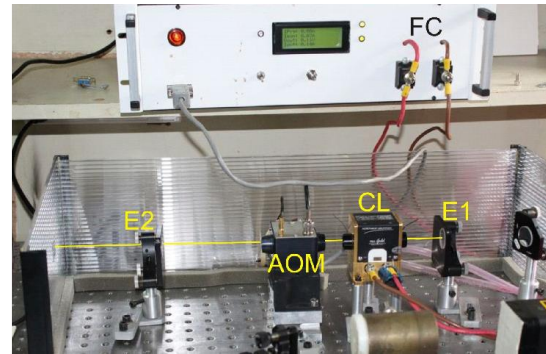


Figura 2: Láser de Nd:YAG con Q-switch activo. CL: cabezal de bombeo. E1: espejo de fondo. E2: espejo de salida. AOM: modulador acusto-óptico. FC: fuente de corriente que alimenta el cabezal de bombeo.

curvatura y una reflectividad del 80%, y un espejo de fondo plano de alta reflectividad (HR). Para esta configuración la divergencia del haz del láser es de $\approx 5\text{ mrad}$. En la figura 3 se muestra la variación de la energía por pulso en función de la frecuencia de repetición del láser ($1 - 15\text{ kHz}$) para una corriente de bombeo fija de 19 A . Los resultados muestran que la máxima energía por pulso, medida con esta configuración, es de 5 mJ y se registra a una frecuencia de 1 kHz . En estas condiciones, la potencia media del láser es de 5 W con un ancho del pulso (FWHM) de $(70 \pm 2)\text{ ns}$. En la figura 4 puede observarse el perfil

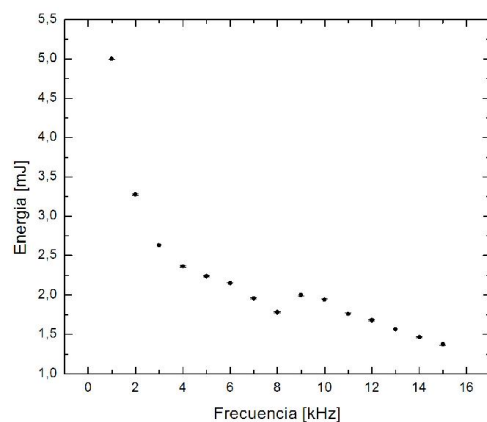


Figura 3: Dependencia de la energía por pulso con la frecuencia de repetición del láser. Corriente de bombeo: 19 A . Notar que a 1 kHz se obtiene la máxima energía por pulso (5 mJ).

temporal del pulso del láser y una imagen del spot del haz. Al variar f_{rep} la forma del pulso no se modificó ni tampoco cambió el spot del haz.

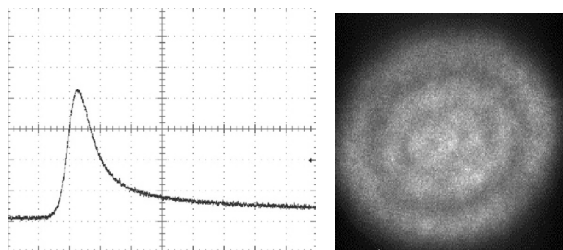


Figura 4: derecha: Perfil temporal de un pulso típico de Q-switch e imagen del spot del haz (corriente de bombeo: 19 A, frecuencia de repetición: 1kHz).

Plataforma de micromaquinado

Con el fin de implementar la técnica de “escritura directa” (direct writing) [5], se diseñó la estación de micromaquinado láser que se presenta en la figura 5. La radiación del láser se acopló a un sistema de posicionamiento con control por motores por pasos en los ejes x, y (Zeber Technology, modelo LA60A). El recorrido máximo de estos motores es de 60 mm y su resolución es de 0.1 μm . Los motores se controlan mediante un software diseñado en este laboratorio [5]. Con este paquete, el usuario puede variar a voluntad la frecuencia de repetición de los pulsos de Q-switch y el tiempo de exposición de la muestra. El haz del láser se enfoca sobre el sustrato a micromaquinar usando una lente de (1.75 ± 0.25) cm de distancia focal. La lente se encuentra montada sobre una plataforma de desplazamiento lineal con paso micrométrico que permite controlar su distancia a la muestra.

Con este sistema, acoplado al láser de Nd:YAG, se realizaron los experimentos de ablación sobre obleas de silicio, variando los parámetros del láser, y se estudiaron distintas técnicas para la reducción del efecto de debris.

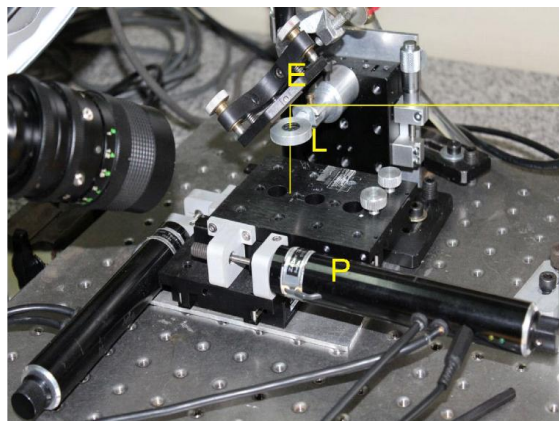


Figura 5: Estación de micromaquinado. E: espejo HR para 1064 nm. L: lente de enfoque. P: plataforma xy con motores paso a paso. La línea amarilla señala el camino del haz.

Microagujeros con láser de nanosegundos: estudio del efecto de debris

El silicio es un material de interés en muchas áreas de la industria (por ejemplo, en microelectrónica) y se

sabe que la absorción de este material es mayor a medida que disminuye la longitud de onda del láser, con un máximo de absorción en la región del UV cercano. Sin embargo, en este trabajo se estudió el desempeño de un láser de Nd:YAG ($\lambda = 1064$ nm) sobre esta clase de sustrato por ser los equipos más ampliamente difundidos en la industria.

En base a un estudio previo, variando diferentes parámetros del láser y del proceso de micromaquinado (frecuencia de repetición del láser, energía por pulso, tiempo de exposición de la muestra, distancia entre la lente de enfoque y el sustrato), se encontraron los parámetros óptimos del proceso en obleas de silicio de 300 μm de espesor [7]. El control de estos parámetros es indispensable para conseguir reducir la cantidad de residuos superficiales y el exceso de material fundido en las paredes del agujero. Sin embargo, el tratamiento previo que recibe la muestra es fundamental si se quiere conseguir agujeros o surcos con bordes bien definidos. Un efecto típico que aparece, en especial cuando se realiza micromaquinado con láseres de nanosegundos, es el debris (re-deposición de material fundido sobre la superficie por ablación láser). Para disminuir este efecto se ensayaron diferentes técnicas:

- i. recubrir la muestra con una fina capa de laca hidrosoluble basada en copolímeros de acetato de vinilo
- ii. sumergir la muestra en agua
- iii. colocar un cubreobjetos sobre la muestra

Con la primera técnica los residuos se depositan sobre la capa de laca reduciendo el contacto con la superficie del material.

En cambio, cuando la muestra se sumerge en agua (quedando cubierta en su totalidad por una delgada capa de 1 mm a 2 mm de espesor), la mayoría de los residuos generados en el proceso de ablación láser permanecen suspendidos en el líquido, sin entrar en contacto con la superficie del sustrato. Este procedimiento además facilita la limpieza de la muestra una vez finalizado el micromaquinado.

Finalmente, si se coloca un cubreobjetos (lámina de vidrio de ≈ 200 μm de espesor) sobre la oblea de silicio, la columna de material eyectado durante el proceso de ablación se adhiere, en su mayoría, a la cara del cubreobjetos que está en contacto con el sustrato. Esto evita que el material removido quede suspendido en el aire y se re-deposite en los bordes del agujero.

Una vez finalizado el proceso de micromaquinado, independientemente del tratamiento empleado para reducir el debris, es necesario limpiar cuidadosamente la muestra. Todas las mediciones se realizaron empleando una potencia media de 1.7 W, con una energía por pulso de 1.7 mJ y con un tiempo de exposición de 2 s (energía total = 3,4 J). La duración de pulso de Q-switch fue de 55 ns. Para reducir la energía por pulso se colocaron filtros neutros en el camino del haz.

Microagujeros con láser de femtosegundos

En la figura 6 se muestra la estación de micromaquinado que se encuentra montada en el CIOP (Centro de investigaciones Ópticas, La Plata), diseñada

para escritura directa. La plataforma de desplazamiento xyz motorizada tiene una resolución de $0,1 \mu\text{m}$ y un recorrido máximo de 50 mm . Para el micromaquinado de las muestras se empleó la facilidad de femtosegundos (láser de Titanio Zafiro) del CIOP. El láser emite pulsos de 70 fs a una frecuencia de repetición de 1 kHz en la longitud de onda de 800 nm y 1 mJ de energía por pulso. Con este dispositivo se realizaron una serie agujeros en obleas de silicio variando el tiempo de exposición de la muestra.

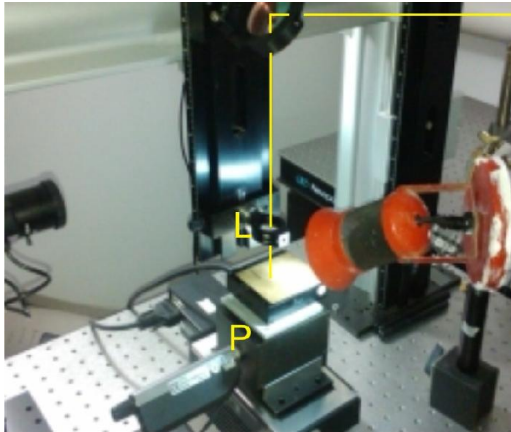


Figura 6: Estación de micromaquinado del CIOP. L: lente de enfoque. P: plataforma xyz con motores paso a paso. La línea amarilla señala el camino del haz.

III. RESULTADOS

Con pulsos de nanosegundos

En las figuras 7-10, se presentan imágenes de los microagujeros registradas con un microscopio electrónico. El sustrato de la figura 7 no cuenta con ninguna clase de tratamiento previo en su superficie. Esto hace que sea más difícil retirar, en la etapa de limpieza, el material re-depositado alrededor del agujero. Entre la muestra tratada con una capa de laca (figura 8) y la muestra al aire libre (figura 7) no se aprecia una disminución apreciable en el efecto de

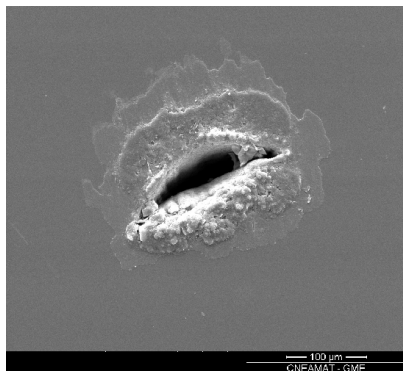


Figura 7: Muestra "desnuda" (en contacto con el aire ambiente). Dimensiones del agujero: $63 \mu\text{m}$ (ancho), $126 \mu\text{m}$ (largo).

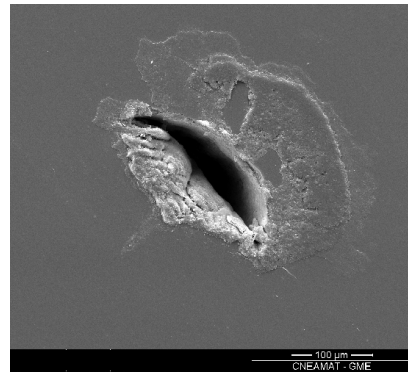


Figura 8: Muestra recubierta con una capa de laca. Dimensiones del agujero: $75 \mu\text{m}$ (ancho), $152 \mu\text{m}$ (largo).

debris. A pesar del tratamiento previo que recibió el sustrato de la figura 8, aún quedan residuos superficiales que afectan la calidad del agujero micromaquinado.

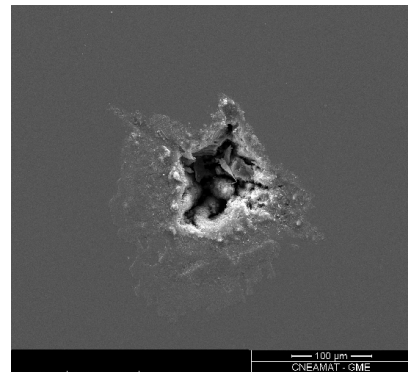


Figura 9: Muestra con cubreobjetos. Dimensiones del agujero: $104 \mu\text{m}$ (ancho), $123 \mu\text{m}$ (largo).

Sin embargo, este efecto se reduce notablemente en el microagujero de la figura 9, donde el sustrato fue recubierto con un cubreobjetos. Se sospecha que los escombros observados se depositaron en la etapa de limpieza.

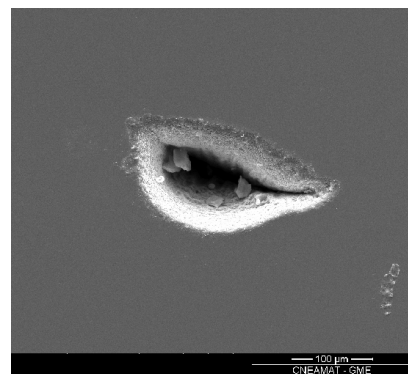


Figura 10: Muestra sumergida en agua. Dimensiones del agujero: $135 \mu\text{m}$ (ancho), $171 \mu\text{m}$ (largo).

Claramente, el resultado más satisfactorio se obtuvo con la muestra sumergida en agua (figura 10). Su superficie se observa completamente limpia y apenas se distinguen unos pocos escombros en el interior del

agujero. También puede apreciarse que el borde del agujero se encuentra mejor definido que en las muestras discutidas arriba.

En micromaquinado con láser, además de la calidad del modo del haz (idealmente TEM₀₀), también es importante evitar la distorsión del frente de onda cuando el haz atraviesa la lente de enfoque. En particular, la forma alargada de los agujeros que se observan en las figuras 7, 8 y 10 puede deberse a una aberración de “coma” con origen en la lente de enfoque ya sea por algún defecto presente en la misma o por problemas de alineación entre el haz del láser y la lente. Este mismo efecto puede hallarse en el spot de la Fig.4

Con pulsos de femtosegundos

Con el láser de femtosegundos se realizaron agujeros sobre las mismas muestras de silicio empleadas con el Nd:YAG. Se controló el tiempo de exposición de la muestra para que la energía total recibida fuera del mismo orden que en el caso del láser de nanosegundos. En la figura 11 se observa que, a pesar de lo que indica la teoría, se produce redeposición de material sobre la muestra. También se observa deterioro en el entorno del agujero con presencia de material fundido.

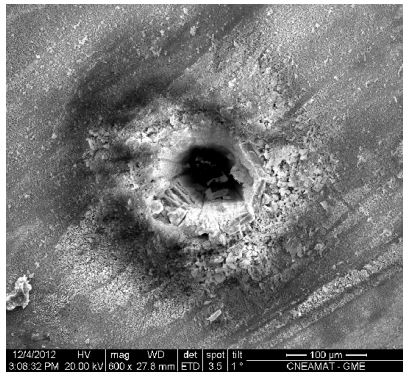


Figura 11 : Muestra sin recubrimiento impactada por el láser de femtosegundos. Nótese la redeposición de debris en el contorno del agujero.

IV. CONCLUSIONES

Se obtuvieron los primeros resultados satisfactorios al lograr ablación controlada sobre obleas de silicio con miras al diseño de microcircuitos. Se realizaron diversos ensayos para optimizar los parámetros del láser y de los posicionadores.

Para el régimen de pulsos de nanosegundos se montó una plataforma controlada por un software de diseño

propio, se estableció un protocolo de limpieza y se determinó que la energía mínima para perforación de las muestras es de 3,5 J.

Se observó que el método más efectivo para la reducción del efecto de debris fue sumergir las muestras en agua.

De la comparación de las muestras maquinadas con el Ti:Zafiro y el Nd:YAG, observamos que los agujeros hechos con el láser de femtosegundos presentan una forma más redondeada y mejor definición. Esto puede deberse, más allá de que la muestra copia la forma del modo, a que el haz del Nd:YAG no estaba bien enfocado sobre la muestra y/o que la lente empleada presentaba aberraciones tipo coma. Este último efecto es evidente observando la forma ovalada de las muestras maquinadas con el láser de nanosegundos. Por otro lado, las muestras maquinadas con el láser de femtosegundos presentaban, contrariamente a lo esperado, los mismos efectos de debris sobre el borde de los microagujeros.

De la observación de las muestras surge que las del Ti:Zafiro están “quemadas” o sobre expuestas, es decir que se entregó más energía que la necesaria para hacer el agujero. Dado que la energía total entregada a la oblea de silicio era la misma que en el caso del Nd:YAG, donde las muestras no fueron quemadas, concluimos que los pulsos de femtosegundos presentan una tasa de ablación mayor que los de nanosegundos, para el caso particular de obleas de silicio.

REFERENCIAS

- 1 - W. Menz, J. Mohr y O. Paul, “*Microsystem technology*”, WILEY-VCH, Alemania (2001).
- 2 - K. Sugioka, M. Meunier y A. Piqué, “*Laser precision microfabrication*”, Springer, New York, USA (2010).
- 3 - D. Cremers, L. Radziemski, “*Handbook of Laser induced Breakdown spectroscopy*”, Wiley & Sons, New Jersey, USA (2013).
- 4 - W. Steen y J. Mazumder, “*Laser material processing*”, Springer, New York (2010).
- 5 - N. Dahotre y S. Harimkar, “*Laser fabrication and machining of materials*”, Springer, New York (2008).
- 6 - M. Nonaka et al. “Imágenes 2D de alta resolución micromaquinadas con láseres de nanosegundos” enviada a ANALES AFA 2013.
- 7 - H Ferrero, D. Rava “Parámetros óptimos para el micromaquinado de precisión con láseres de nanosegundos” Informe Final de las materias Laboratorio 6 y Laboratorio 7, Facultad de Ciencias Exactas, UBA, Agosto 2012.