

LEY DE MOORE, NANOTECNOLOGÍA Y NANOCIENCIAS: SÍNTESIS Y MODIFICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS MEDIANTE LA IMPLANTACIÓN DE IONES

Dr. Juan Carlos Cheang Wong

Investigador Titular B. Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México

cheang@fisica.unam.mx

LEY DE MOORE, NANOTECNOLOGÍA Y NANOCIENCIAS: SÍNTESIS Y MODIFICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS MEDIANTE LA IMPLANTACIÓN DE IONES

Resumen

En este artículo resaltamos la importancia y el efecto que la nanotecnología y en general las nanociencias tendrán en la vida diaria de todos nosotros debido a las potenciales aplicaciones tecnológicas por venir. Como ejemplo presentamos la llamada ley de Moore, que constituye actualmente la motivación principal de la industria microelectrónica y de semiconductores para encontrar mejores materiales y para desarrollar dispositivos electrónicos más compactos, más rápidos, más eficientes y sobretodo más baratos. Esta carrera tecnológica nos lleva a la búsqueda de otros materiales con características novedosas, como son las nanopartículas metálicas que presentan propiedades ópticas muy importantes.

En este trabajo de investigación sintetizamos nanopartículas metálicas de oro, plata o cobre por medio de la técnica de implantación de iones usando el acelerador Peletrón del Instituto de Física de la UNAM. Estudiamos la dependencia del diámetro y de la distribución de tamaños de las nanopartículas con los parámetros de la implantación (tipo de ion, energía, dosis de implantación) y con los parámetros de los tratamientos térmicos posteriores (temperatura y atmósfera utilizada). Las muestras se caracterizaron por medio de la técnica de absorción óptica y de microscopía electrónica de transmisión. Los resultados indican que efectivamente obtenemos nanopartículas con diámetros del orden de 3 nm y que además presentan facetas. Por otro lado, comparada con una atmósfera oxidante, la atmósfera reductora promueve la formación de una mayor cantidad de nanopartículas de plata.

Palabras clave: Nanotecnología, Nanopartículas, Implantación de iones, Propiedades ópticas, Ley de Moore.

MOORE'S LAW, NANOTECHNOLOGY AND NANOSCIENCES: SYNTHESIS AND MODIFICATION OF NANOPARTICLES USING ION IMPLANTATION

Abstract

No one can deny the impact of the nanotechnology revolution in our everyday life, even if some forthcoming technological applications seem unimaginable today. Moore's Law, for example, has been the driving force behind the creation of increasingly complex, small and faster systems in the microelectronics and semiconductors industry. This technological race leads us to the search of materials with new properties, such as metallic nanoparticles exhibiting very interesting optical properties. At the UNAM's Instituto de Física, we prepare metallic nanoparticles by means of the ion implantation technique using a Pelletron accelerator. We study the dependence of the nanoparticle size on the experimental parameters related to the implantation (ion type, energy, implantation dose) and to the thermal treatments (temperature, atmosphere). The samples were characterized by optical absorption measurements and transmission electron microscopy.

Keywords: Nanotechnology, Nanoparticles, Ion implantation, Optical properties, Moore's law.

INTRODUCCIÓN

Cada día es más frecuente escuchar los términos nanotecnología, nanomateriales, nanoestructuras, etc., en conversaciones de la vida cotidiana, pero para la mayoría de las personas aun es difícil imaginar estos términos fuera del contexto científico o de la ciencia ficción. Sin embargo, es innegable el impacto que el estudio de las nanociencias y los desarrollos nanotecnológicos tendrán en los ámbitos social, cultural, y económico de nuestra vida diaria.

Las nanociencias se pueden describir como aquellas que estudian estructuras u objetos con al menos una de sus dimensiones en la escala del nanómetro (nm). El prefijo "nano" viene del latín "nanus", que significa muy pequeño o enano, y entonces un nanómetro corresponde a la millonésima parte de un milímetro. Para tener un punto de comparación podemos decir que un cabello humano tiene 100000 nm de grueso, que el diámetro de una molécula de ADN es de 2.5 nm y que el diámetro de un átomo es de un tercio de nanómetro. El análisis de dichas estructuras incluye la caracterización de sus propiedades (sean químicas, mecánicas, electrónicas, ópticas o magnéticas), y el estudio de la interacción que tienen con otras nanoestructuras, con ondas electromagnéticas, con medios biológicos, etcétera.

Por otro lado, la nanotecnología correspondería a la capacidad técnica para modificar y manipular la materia para poder desarrollar estructuras o dispositivos funcionales, con dimensiones inferiores a los 100 nm, para potenciales aplicaciones tecnológicas [1,2]. Por ejemplo, una estructura típica en los dispositivos producidos por la industria microelectrónica sería cientos de veces más grande que una nanoestructura con dimensiones inferiores a unas pocas decenas de nanómetros. Actualmente, las estructuras más pequeñas que se han alcanzado en transistores para circuitos integrados hechos en laboratorios de investigación van de los 10 a los 20 nanómetros, es decir, una décima parte de las dimensiones que encontramos actualmente dentro de los circuitos integrados comerciales.

Así, el desarrollo de la industria de la microelectrónica hacia dispositivos más pequeños, más rápidos, más eficientes y más baratos ha sido impulsado desde hace 40 años por la llamada Ley de Moore que describimos en la siguiente sección. Por el momento basta decir que las nanociencias no son sólo un paso más hacia la miniaturización de los dispositivos actuales, sino un terreno cualitativamente nuevo, completamente dominado por la mecánica cuántica, donde lo pequeño puede ser esencialmente diferente. En efecto, la materia modificada a la nanoescala puede presentar propiedades o fenómenos intrínsecos de la escala atómica que son fundamentalmente diferentes de los que habitualmente observamos a mayor escala.

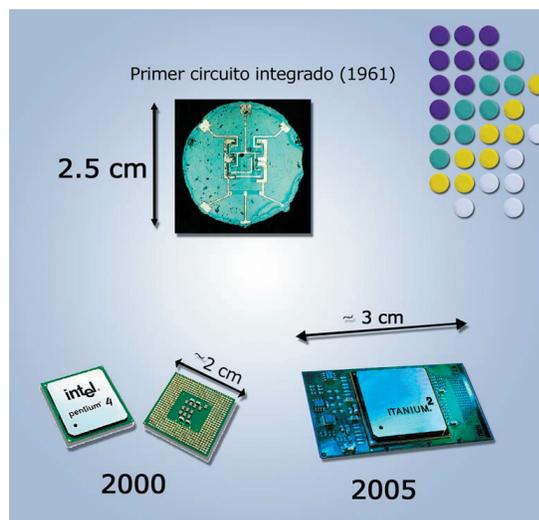
Como lo describimos más adelante en este artículo, en el Instituto de Física de la UNAM estamos trabajando desde 1996 en la síntesis y caracterización de nanopartículas metálicas en muestras de sílice (SiO₂) por medio de la técnica de implantación de iones, usando el acelerador Peletrón.

Nuestro objetivo no solamente es lograr un mejor entendimiento de los mecanismos responsables de la formación y de las propiedades ópticas de estas nanopartículas, sino también producir materiales ópticamente activos para potenciales aplicaciones tecnológicas en la optoelectrónica. Los dispositivos optoelectrónicos son aquellos que combinan la óptica con la electrónica (por ejemplo, circuitos integrados híbridos que funcionarían con luz y electricidad) y su desarrollo nos permitiría contribuir a que la ley de Moore siga siendo válida por muchos años más.

LEY DE MOORE

En 1965, Gordon Moore (co-fundador en 1968 de la compañía Intel) afirmó que el número de transistores por centímetro cuadrado en un circuito integrado se duplicaba cada año y que la tendencia continuaría durante las siguientes dos décadas.

Más tarde, en 1975, modificó su propia afirmación y predijo que el ritmo bajaría, y que la densidad de transistores se duplicaría aproximadamente cada 18 meses.



Esta progresión de crecimiento exponencial de la densidad de transistores, o sea, el duplicar la capacidad de los microprocesadores cada año y medio, es lo que se considera actualmente como la Ley de Moore. En abril de 2005 se cumplieron 40 años de la ley de Moore y la industria de la microelectrónica estima que seguirá siendo válida al menos otros 20 años.

Para todos nosotros realmente es difícil imaginar la enorme cantidad de transistores que constituyen actualmente un circuito integrado o un microprocesador de computadora.

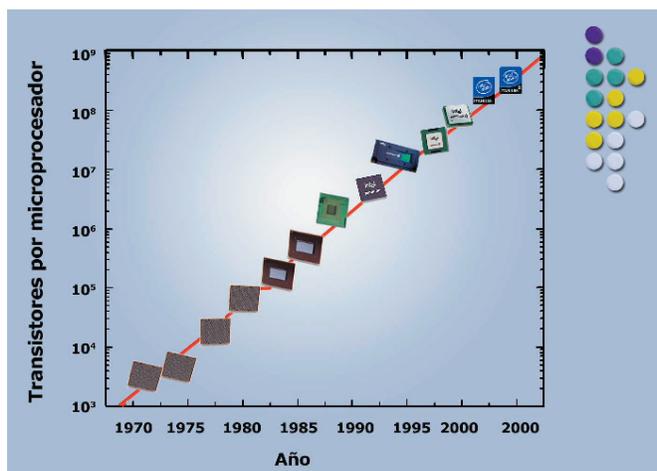
En la Fig. 1 se muestra la evolución en los circuitos integrados desde 1961 a la fecha, donde el microprocesador "Itanium 2" de Intel está constituido por la inimaginable cantidad de 410 millones de transistores.

La cantidad de transistores en un procesador de computadora se puede ver en la Fig. 2.

Microprocesador	Año	Cantidad de Transistores
4004	1971	2,250
8008	1972	2,500
8080	1974	5,000
8086	1978	29,000
286	1982	120,000
Intel386™	1985	275,000
Intel® Pentium®	1989	1,180,000
Intel® Pentium® II	1993	3,100,000
Intel® Pentium® III	1997	7,500,000
Intel® Pentium® 4	1999	24,000,000
Intel® Itanium®	2000	42,000,000
Intel® Itanium®	2002	220,000,000
Intel® Itanium® 2	2003	410,000,000

En la Fig. 3 se puede corroborar que la predicción del crecimiento exponencial en el número de transistores en los procesadores Intel se ha cumplido de acuerdo a la ley de Moore. Todo parece indicar que la ley de Moore pasó de ser una profecía auto cumplida por la industria microelectrónica a una obligación que los fabricantes de semiconductores deben de cumplir para poder vender sus productos a precios más competitivos. Así, si en 1954 el precio de un transistor era de casi 6 dólares, actualmente su precio es menor a una mil millonésima parte de un dólar, o sea, menor a un nanodólar. La supervivencia de la ley de Moore dependerá seguramente de los resultados de las investigaciones en el área de las nanociencias, que llevarán a la industria de la alta tecnología a otros caminos como la nanoelectrónica, la optoelectrónica e incluso, la bioelectrónica. Por lo tanto, todavía nos quedan muchas cosas por ver en el futuro cercano, y la única limitación tal vez sea un dimensión de nivel fundamental, como lo es el tamaño del átomo mismo.

Síntesis y caracterización de nanopartículas metálicas



Podemos decir que los primeros nanotecnólogos, aun sin saberlo ellos mismos, fueron artesanos que hace más de 1000 años ya trabajaban el vidrio y el decorado de la cerámica [3]. En efecto, usadas en vitrales y pinturas, las nanopartículas metálicas les confieren sus intensas y coloridas tonalidades, en las que nanopartículas de oro están presentes en los vidrios de color rojo y nanopartículas de plata en los amarillos. Más recientemente, las propiedades ópticas de nanopartículas de diversos metales han provocado gran interés por su potencial uso como catalizadores, sensores, en dispositivos optoelectrónicos, etc. Su importancia creciente también se ilustra con su uso para diagnósticos médicos y en productos farmacéuticos diseñados para atacar específicamente ciertas enfermedades o destruir tumores malignos.

Los Primeros Nanotecnólogos

Desde hace más de mil años los artesanos vitralistas sabían que al agregar pequeñas cantidades de oro o plata durante la fabricación del vidrio podían producir las tonalidades rojas y amarillas en los vitrales. Los científicos de hoy saben que pequeñas cantidades de nanopartículas permiten cambiar las propiedades de los materiales.

Partículas de oro en vidrio		Partículas de plata en vidrio	
Diámetro: 25 nm Forma: esfera Color reflejado:		Diámetro: 100 nm Forma: esfera Color reflejado:	
Si los vitralistas modernos hubieran podido controlar el tamaño y la forma de las nanopartículas, hubieran producido otros colores a partir del oro y plata.			
Diámetro: 50 nm Forma: esfera Color reflejado:		Diámetro: 40 nm Forma: esfera Color reflejado:	
Diámetro: 100 nm Forma: esfera Color reflejado:		Diámetro: 100 nm Forma: prisma Color reflejado:	

Fuente: Institute of Nanotechnology, Heriott-Watt University

Como ya se dijo, las nanopartículas podrían ser esenciales para el desarrollo de la optoelectrónica, o sea, la combinación de la óptica con la electrónica para producir dispositivos que funcionen tanto con luz como con electricidad. Así, también se está estudiando ampliamente la síntesis de nanopartículas metálicas y/o semiconductoras en diversos materiales, ya que las primeras presentan propiedades ópticas no lineales muy importantes, y las segundas de fotoluminiscencia (capacidad que tienen para emitir luz cuando se les ilumina o cuando se les hace pasar una corriente eléctrica). En ambos casos, las propiedades (en particular las ópticas) que presentan estas partículas dependen fundamentalmente del tamaño, la forma y la distribución espacial de las nanopartícula en la muestra. Finalmente, el objetivo de nuestra investigación es estudiar las nuevas propiedades que presentan estos materiales a la escala nanométrica, su dependencia con el tamaño y la forma, y la correlación que guardan con los parámetros asociados con métodos de preparación de nanopartículas [4].

En este trabajo nos interesamos en sintetizar nanopartículas metálicas de oro, plata o cobre dentro de una matriz de SiO₂, ya que éstas presentan propiedades ópticas muy interesantes con potenciales aplicaciones tecnológicas en la optoelectrónica.

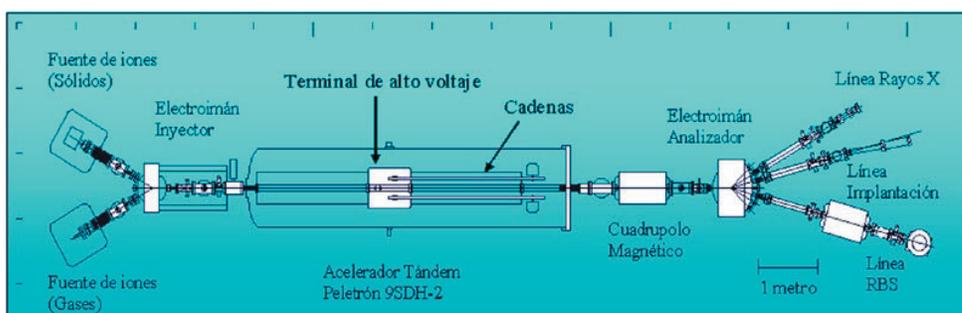
La técnica que utilizamos es la implantación de iones y para ello usamos el acelerador Peletrón del Instituto de Física. Como su nombre lo indica, el Peletrón es un equipo con el que podemos acelerar iones de prácticamente cualquier elemento de la tabla periódica a energías mayores a los 2 MeV (megaelectronvolts).



Acelerador Peletrón de 3 Magavolts, IF-UNAM

En la Fig. 6 explicamos brevemente cómo funciona el acelerador Peletrón.

La implantación de iones con energías muy altas nos permite introducir "a la fuerza" casi cualquier elemento al interior de la muestra a la que queremos modificar sus propiedades. De esta manera los iones, al ir atravesando la muestra, interactúan con los átomos que la constituyen y se producen distintos fenómenos físicos que modifican las propiedades.



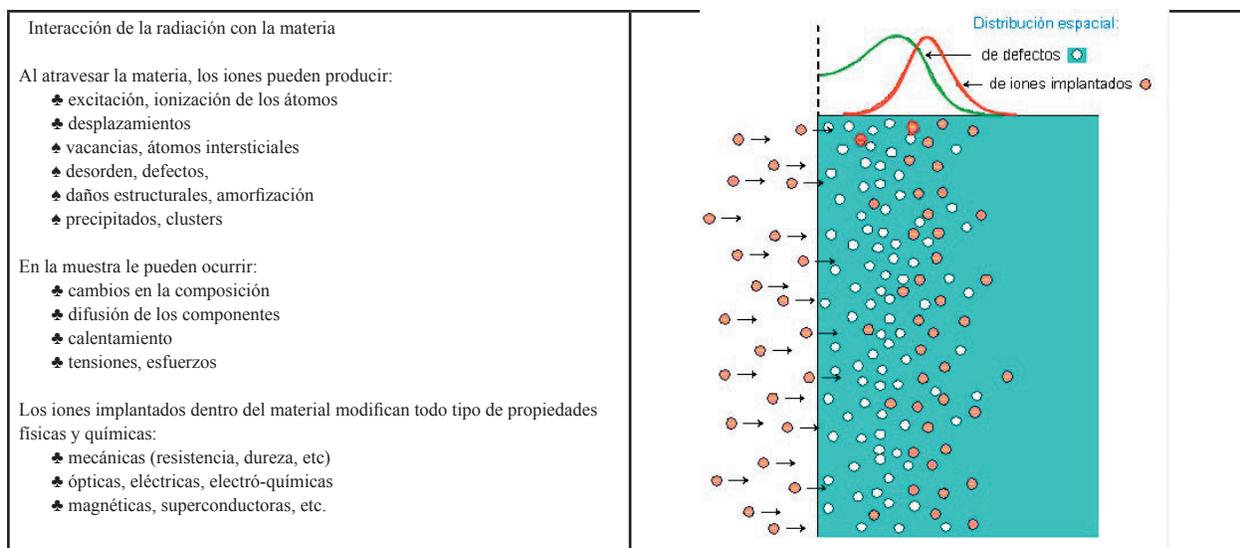
¿Cómo funciona el acelerador Peletrón?

Una cadena formada por barras de metal (llamadas pellets) y plástico lleva carga eléctrica de una fuente de alta tensión positiva a la terminal, situada en el centro del acelerador. Las fuentes de iones producen iones negativos (a partir de elementos sólidos o gaseosos), que son atraídos y acelerados por la terminal, dándoles una energía inicial que depende de la tensión en la terminal.

En el centro de la terminal hay una nube de nitrógeno, que arranca electrones de los iones acelerados, convirtiéndolos entonces en iones positivos. Éstos son ahora empujados por la terminal, dándoles una segunda aceleración y aumentando su energía.

El electroimán selector desvía los iones positivos hacia las líneas de experimentación, seleccionando su carga, masa y energía.

La Fig. 7 nos indica esquemáticamente cómo los iones quedan implantados a una cierta profundidad respecto a la superficie de la muestra y los defectos creados al atravesarla. Generalmente es necesario efectuar tratamientos térmicos para lograr la formación de las nanopartículas a partir de los átomos implantados mediante la nucleación y crecimiento de las mismas [5-7].



Los parámetros experimentales de nuestros experimentos para producir nanopartículas metálicas en SiO₂ son los siguientes [8,12]:

* Usamos muestras de cuarzo (SiO₂) de alta pureza.

* Realizamos la implantación de iones a temperatura ambiente:

Tipo de ion: oro (Au), plata (Ag) o cobre (Cu).

Energía: 2 MeV.

Dosis: 1×10¹⁶ hasta 2×10¹⁷ iones/cm² (cantidad de iones implantados).

* Efectuamos tratamientos térmicos a las muestras después de implantar:

Temperaturas: 300°C, 600°C y 900°C.

Tiempo: 1 hora.

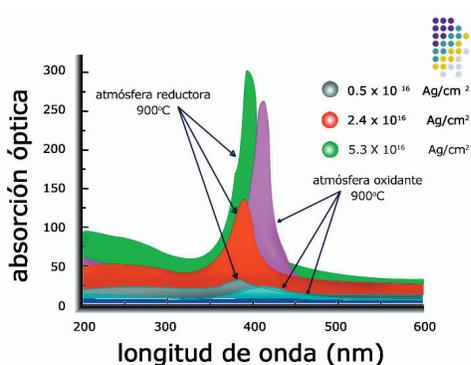
Atmósferas utilizadas:

- atmósfera reductora (50% N₂+50% H₂).
- atmósfera oxidante (aire).

- Caracterización de las muestras:
- Absorción óptica.
- Microscopía electrónica por transmisión.

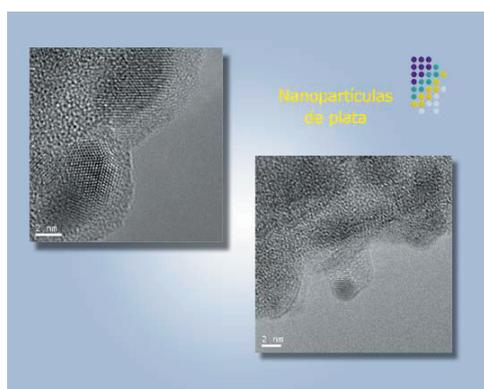
Como ya dijimos, las propiedades ópticas de las nanopartículas metálicas dependen de su tamaño, forma y distribución espacial dentro de la muestra [3]. Todos estos factores se pueden modificar al variar los parámetros experimentales de la implantación (tipo de ion, dosis de implantación, energía, corriente de haz) y de los tratamientos térmicos posteriores (temperatura, duración y tipo de atmósfera utilizada).

Nuestras investigaciones sistemáticas nos han permitido lograr un mejor entendimiento de los mecanismos de crecimiento de las nanopartículas y un control de su tamaño, forma y distribución. Como ejemplo de los métodos de caracterización utilizados para demostrar la formación de nanopartículas en la muestra de cuarzo tenemos la absorción óptica. Las nanopartículas metálicas absorben radiación óptica a la longitud de onda correspondiente a la resonancia del plasmon de superficie. Este plasmon de superficie es una especie de huella digital que indica inequívocamente la existencia de nanopartículas en la muestra de cuarzo.



En el caso de nanopartículas de plata el pico del plasmon aparece a una longitud de onda alrededor de los 400 nm y su posición exacta depende del diámetro, de la forma y de la distribución de tamaños de las nanopartículas [6,9,12]. En la Fig. 8 se pueden observar los picos correspondientes al plasmon de superficie asociado a la presencia de nanopartículas. La intensidad de este plasmon de superficie aumenta con la dosis de Ag implantada, lo que significa que con una dosis mayor favorecemos la formación de más nanopartículas de plata. Un comportamiento similar ocurre al aumentar la temperatura de los tratamientos térmicos. Por otro lado, en el espectro de absorción también podemos notar el efecto del tipo de atmósfera utilizada durante los recocidos.

Así, el plasmon de superficie es más intenso, para una misma dosis de implantación, cuando el tratamiento térmico se realiza en una atmósfera reductora. Esto significa que, comparada con la atmósfera oxidante, una atmósfera reductora promueve la formación de una mayor cantidad de nanopartículas de plata.



Otra técnica de caracterización que nos permite corroborar la existencia de nanopartículas en nuestras muestras es la microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM). En la Fig. 9 podemos observar que el tamaño de las nanopartículas de plata es del orden de 2-3 nm de diámetro. Estos valores coinciden con los que calculamos a partir del ancho del pico del plasmon de superficie correspondiente. A partir de estudios más detallados de las imágenes de HRTEM confirmamos además que las nanopartículas presentan facetas. En conclusión, en el caso de nanopartículas metálicas hemos determinado correlaciones importantes entre los parámetros de implantación y de tratamientos térmicos y su influencia en el diámetro y la distribución de tamaños de las nanopartículas.

Por otro lado, para nosotros no solamente es importante sintetizar nanopartículas con tamaños homogéneos, sino que resulta esencial modificar en forma controlada su forma, ya que de ésta dependen también sus propiedades. Recientemente hemos logrado modificar la forma de las nanopartículas metálicas, como lo demuestran los espectros de absorción óptica. Todos estos resultados nos hacen pensar que en un futuro no muy lejano lograremos aplicar nuestras investigaciones de ciencia básica hacia un desarrollo tecnológico como son las guías de onda.

Por todo lo que hemos discutido, es evidente que la nanotecnología es una ciencia multi-disciplinaria, que involucra a la Biología, la Química, la Ciencia de Materiales y la Ingeniería, con la Física como su eje fundamental. Nosotros, en el Instituto de Física de la UNAM, estamos desarrollando trabajos de gran calidad e interés científico, como la síntesis, caracterización y modificación de nanopartículas metálicas y semiconductoras que, como ya lo dijimos, nos llevarán a potenciales aplicaciones tecnológicas.

Para finalizar, podemos decir que sin lugar a dudas, la nanotecnología será la ciencia del siglo XXI y nos traerá innumerables desarrollos en la industria electrónica y de la información, y en general en aplicaciones médicas, industriales y medioambientales. La nanotecnología no solamente está abriendo el camino a la próxima revolución industrial, sino que el impacto social, cultural y económico que tendrá en nuestra vida diaria es apenas imaginable, ya que al igual que el automóvil y la computadora, la nanotecnología bien puede cambiar al mundo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] GONELLA, F.; MAZZOLDI, P. Handbook of Nanostructured Materials and Nanotechnology, Vol 4, Edited by Nalwa, H. S., San Diego: Academic Press, 2000.
- [2] KREIBIG, U.; VOLLMER, M. Optical Properties of Metal Clusters. Berlín:Springer, 1995.
- [3] MIE, G. Ann. Phys., 1908, 25: 377.
- [4] ARNOLD G. W.; MAZZOLDI, P. Ion Beam Modification of Insulators. MAZZOLDI, P.; ARNOLD, G. W. (edits.) Amsterdam: Elsevier, 1987.
- [5] WOOD, R. A.; TOWNSEND, P. D.; SKELLAND, N. D.; HOLE, D. E.; BARTON, J.; AFONSO, C. N. "Annealing of ion implanted silver colloids in glass". J. Appl. Phys. , 1993, 74: 5754-5756.
- [6] BATTAGLIN, G.; CATTARUZZA, E.; GONELLA, F.; MATTEI, G.; MAZZOLDI, P.; SADA, C.; ZHANG, X. "Formation of metal-alloy nanoclusters in silica by ion implantation and annealing in selected atmosphere" Nucl. Instr. and Meth., 2000, B 166–167: 857-863.
- [7] MIOTELLO, A.; DE MARCHI, G.; MATTEI, G.; MAZZOLDI, P.; SADA, C. "Clustering of gold atoms in ion-implanted silica after thermal annealing in different atmospheres". Phys. Rev., 2001, B 63: 75409.
- [8] CHEANG-WONG, J.C.; OLIVER, A.; CRESPO, A.; HERNÁNDEZ, J.M.; MUÑOZ, E.; ESPEJEL-MORALES, R. "Dependence of the optical properties on the ion implanted depth profiles in fused quartz after a sequential implantation with Si and Au ions". Nucl. Instr. and Meth., 2000, B 161-163: 1058-1063.
- [9] CHEANG-WONG, J.C.; OLIVER, A.; ROIZ, J.; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, L.; HERNÁNDEZ, J.M.; CRESPO-SOSA, A. "Relationship between the Ag depth profiles and the nanoparticle formation in Ag-implanted silica". Journal of Physics: Condensed Matter, 2001, 13: 10207-10219.
- [10] OLIVER, A.; CHEANG-WONG, J.C.; ROIZ, J.; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, L.; HERNÁNDEZ, J.M.; CRESPO-SOSA, A.; MUÑOZ, E. "Metallic nanoparticle formation in ion-implanted silica after thermal annealing in reducing or oxidizing atmospheres". Nucl. Instr. and Meth., 2002, B 191: 333-336.
- [11] BARTHO, C.; DUONG, P.H.; OLIVER, A.; CHEANG-WONG, J.C.; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, L.; CRESPO-SOSA, A.; ITOH, T.; LAVALLARD, P. "Silicon nanocrystals and defects produced by silicon and silicon-and-gold implantation in silica". Journal of Applied Physics, 2003, 93: 10110-10113.
- [12] ROIZ, J.; OLIVER, A.; MUÑOZ, E.; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, L.; HERNÁNDEZ, J.M.; CHEANG-WONG, J.C. Modification of the optical properties of Ag-implanted silica by annealing in two different atmospheres. Journal of Applied Physics, 2004, 95: 1783-1791.

