Análisis de materiales con haces de iones generados por un acelerador electrostático

A. CLIMENT FONT

Dpto. Física Aplicada C-XII, Universidad Autónoma Madrid Cantoblanco, E-28049 Madrid.

Un acelerador electrostático es una herramienta muy versátil para analizar materiales mediante las técnicas de haces de iones. Estas técnicas, conocidas como técnicas IBA (ion beam analysis), son ampliamente utilizadas para la caracterización cuantitativa y no destructiva de la estructura y la composición de la zona próxima a la superficie de cualquier material, hasta profundidades de 10 μm y con resolución superficial de 2 a 20 nm. Sus aplicaciones abarcan muchos campos, entre los que destacan: ciencia de materiales, microelectrónica, metalurgia, mineralogía, estudios medioambientales, ciencias biomédicas, arte y arqueología, etc. En este trabajo se revisan los principios físicos de las técnicas IBA y algunas de sus capacidades analíticas se ilustran con una selección de ejemplos.

Palabras clave: Análisis con haces de iones, caracterización de materiales, RBS, ERDA, PIXE.

Materials analysis by ion beam generated from electrostatic accelerator.

An electrostatic accelerator is a very versatile tool for the analysis of the materials elemental composition by means of ion beam based analytical techniques. These techniques known as IBA (ion beam analysis) are widely used as a quantitative and non destructive characterization of almost any material down to depth of 10 μm below the surface and with a surface resolution from 2 to 20 nm. Their applications cover a wide range of areas such as: materials science, microelectronics, environmental studies, biomedical sciences, art and archaeology, etc. In this work the general physical principles of IBA are reviewed and its capabilities are illustrated with a selection of examples.

Keywords: Ion beam analysis, characterization of materials, RBS, ERDA, PIXE

1. INTRODUCCIÓN

Bajo el nombre de análisis con haces de iones se agrupan un conjunto de técnicas de caracterización de materiales, cuya propiedad común es que utilizan como sonda un haz de iones de energías típicas de unos megaelectrónvoltios (MeV) generado por un acelerador electrostático de iones (1). Estas técnicas, aunque hoy están muy consolidadas y son herramienta habitual en muchos laboratorios de investigación en países industrialmente desarrollados, todavía no son muy conocidas en España. Recientemente, en 1998, se ha instalado en Sevilla el primer acelerador dedicado a estos fines, y el segundo está en trámite de instalación en el Campus de la Universidad Autónoma de Madrid.

Las técnicas de análisis con haces de iones tienen un marcado carácter multidisciplinar aplicándose en las más diversas áreas de la investigación como: ciencia de materiales (2), microelectrónica y materiales avanzados (3), estudios de medio ambiente (4), arqueología (5), estudio y autenticación de obras y objetos de arte (6), (7), biomédicas, etc. Referente a estas dos últimas aplicaciones cabe destacar la instalación, en funcionamiento desde 1989, del acelerador del laboratorio de los museos de Francia en el palacio del Louvre en París (8). Técnicas como el análisis de la retrodispersión elástica de iones (RBS; Rutherford backscattering spectrometry) (9) son especialmente potentes en microelectrónica y ciencia de materiales. Son técnicas cuantitativas y con las que se puede realizar

medidas absolutas. Su profundidad de análisis se adapta muy bien a los espesores típicos de películas en los componentes electrónicos de última generación ($1\text{-}10^4$ nm). Otras técnicas como la emisión de rayos X inducida por partículas (PIXE; particle induced X-ray emission) (10) permiten el análisis multielemental de una muestra compleja incluyendo los elementos traza con límites de detección de varias partes por millón.

2. LAS TÉCNICAS IBA.

Conceptualmente, los fundamentos físicos de las técnicas IBA son muy sencillos; un haz de iones de unos pocos MeV, producido por un acelerador de partículas, se hace incidir sobre el blanco, o muestra a analizar. La interacción de la partícula incidente, o proyectil, con el blanco puede dar lugar a distintos productos; partículas, electrones o fotones. Analizando de forma selectiva una propiedad de uno de los posibles productos de la interacción estaremos utilizando una u otra técnica IBA. Normalmente, la magnitud analizada es la energía mediante un detector de barrera de estado sólido, aunque se pueden medir otros parámetros como la velocidad de la partícula mediante la detección del tiempo de vuelo. En algunos casos especiales se pueden medir varios parámetros en coinci-

dencia, lo que permite hacer un análisis selectivo de determinados elementos o reducir los niveles de ruido. El conocimiento de las posibles interacciones y fenómenos que ocurren durante el transporte de iones a través de la materia, permite que los resultados de las medidas con técnicas IBA sean cuantificables con cierta facilidad y, lo que es especialmente útil, que se puedan realizar medidas absolutas sin necesidad de muestras de referencia. Evidentemente hacer medidas absolutas requiere una calibración muy precisa de todos los parámetros experimentales, lo cual no es siempre fácil. Por ello casi todos los usuarios de estas técnicas suelen usar muestras de referencia para la calibración de algunos de los parámetros más difíciles de determinar con una buena precisión y exactitud, como el ángulo sólido del detector o la dosis de irradiación de la muestra por el haz. Sin embargo, hay que destacar que una única muestra de referencia es suficiente para la calibración, independientemente de la naturaleza de las muestras a medir, cosa que no ocurre en muchas otras técnicas analíticas. A continuación se resumirán brevemente las técnicas más utilizadas, presentando algunos ejemplos.

2.1. Colisiones elásticas

Cuando la distancia mínima entre los dos núcleos que interactúan es mayor que su radio nuclear, únicamente las fuerzas coulombianas juegan un papel relevante dando lugar a una interacción nuclear elástica. La cinemática del proceso está gobernada por el principio de conservación de la energía y del momento lineal de los choques elásticos. El análisis de la energía del proyectil dispersado con ángulos superiores a 90° da lugar a la técnica RBS. Si, por el contrario, se analiza la energía del átomo de la muestra desplazado tenemos la técnica ERD

Figura 1. (a) Esquema de la colisión elástica. RBS detecta el proyectil dispersado y ERD el átomo de la muestra desplazado. (b) Disposición experimental para RBS y ERD.

(elastic recoil detection). En ambos casos la medición de la energía de la partícula, conociendo la masa y energía del proyectil incidente, permite deducir la masa de la partícula del blanco que interviene en la colisión. La probabilidad de detectar una de las dos partículas bajo un determinado ángulo, la sección eficaz de dispersión, viene dada teóricamente por la fórmula de Rutherford (11). En muchas situaciones prácticas esta fórmula se cumple con desviaciones menores al 2%. Más adelante veremos casos en que existen desviaciones y de las que se puede sacar partido. Un caso de gran relevancia donde no se cumple dicha fórmula es el caso del "channeling" o canalización que permite estudiar una gama muy interesante de problemas en muestras cristalinas (12). El proyectil, va perdiendo energía a medida que penetra en la muestra. Su poder de frenado depende del tipo de proyectil su energía y la composición del material (13). Tenemos, por lo tanto, todos los ingredientes para deducir el perfil de concentración en profundidad.

La Fig. 1 muestra esquemáticamente este proceso de colisión elástica junto con la disposición experimental en RBS y ERD.

La técnica RBS es especialmente útil para estudiar películas delgadas de un material más pesado que el sustrato que las sustenta. Ello es debido a que la energía del proyectil después del choque es tanto mayor cuanto mayor sea la masa de la partícula que lo dispersa, con lo que en el espectro RBS las "señales" de la película delgada aparecerán a energías más altas que las señales del sustrato y, por tanto, libres de ruido de fondo que limitarían la obtención de información. Por esta razón la técnica RBS ha sido ampliamente usada en la década de los 80 para estudiar la cinética de formación de los siliciuros (14). En la Fig. 2 se representa un espectro RBS de una muestra de Si en la que se ha implantado Cr a una energía de 300 keV y en una dosis nominal de 144×10^{15} átomos cm^{-2} . En este caso aunque el Cr esté alojado a cierta profundidad en la matriz de Si, la diferencia de masa con el Si es suficiente como para que su señal aparezca a mayor energía que la del sustrato.

Un análisis detallado del espectro nos permite obtener parámetros relevantes de la implantación, tales como la cantidad de material implantado, el rango proyectado o profundidad

Figura 2. Espectro RBS obtenido con un haz de He de 2 MeV con un ángulo de dispersión, θ , de 170° , de una muestra de Si implantado con Cr a 300 keV. La señal de Cr se observa claramente en una zona libre de ruido. El rango de implantación proyectado que se obtiene es 284 nm.

del máximo de implantación y el perfil de la implantación incluyendo su asimetría (skewness). Las medidas del espectro de la Fig. 2 ajustadas con el programa de simulación RUMP (15), dan como resultado un rango proyectado de 284 nm y muestran la existencia de dicha asimetría. El perfil se ajusta a dos medias gaussianas, de forma que la distribución a mayor profundidad presentaba una semianchura a mitad del máximo (HWHM) menor (86 nm) que la distribución más externa (117 nm) (16). La simulación de la implantación con el programa TRIM (17) reproduce fielmente la asimetría del perfil, dando un rango proyectado de 282 nm y semianchuras internas y externas de 91 nm y 115 nm, respectivamente. La imprecisión de estas medidas se estima en un 5%.

Para ciertas energías del proyectil, y dependiendo de la combinación proyectil-átomo de la muestra, la sección eficaz de dispersión difiere de los valores predichos por la fórmula de Rutherford, produciéndose resonancias que en algunos casos puede aumentar este valor considerablemente, hecho que permite aumentar la sensibilidad de detección para el elemento en cuestión. En la Fig. 3 se muestran dos espectros RBS correspondientes a una película delgada de nitruro de silicio (600 nm) con hidrógeno incorporado, obtenidos con haz de He a 2,8 y 3,7 MeV. En principio, este caso es desfavorable para RBS porque hay elementos de la película delgada más ligeros que el sustrato y, efectivamente, la señal de N aparece superpuesta con la señal del Si del sustrato. Para 2,8 MeV la sección eficaz del He con el N tiene un valor de unas 0,6 veces el valor Rutherford, mientras que para 3,7 MeV esta relación es aproximadamente 9 (18). La variación de sensibilidad para detectar el N es evidente. El contenido en H de la muestra no se puede detectar, ya que la configuración experimental de RBS solo permite detectar elementos más pesados que el ion del haz.

En un experimento ERD convencional se pone una película absorbente entre la muestra y el detector para frenar los iones del haz incidente dispersados con ángulos bajos, ya que estos son muy numerosos y saturarían el sistema de medida enmascarando la información útil. El espesor de la película se elige de tal forma que, a su vez, no frene los átomos de la muestra que queremos detectar. Esto solo se consigue si éstos, los áto-

mos que queremos detectar, son más ligeros que el haz. Esta técnica se ha usado con éxito para obtener perfiles de concentración de H con haces de He (19). Según lo expuesto, es claro que RBS y ERD son dos técnicas analíticas complementarias. En la Figura 4 se muestra el espectro ERD obtenido con un haz de Si de 28 MeV correspondiente a la película cuyos espectros RBS se ilustran en la Fig. 3.

El uso de iones semipesados en la técnica ERD presenta ciertas ventajas, ya que aumenta la sección eficaz de colisión (varía como Z^2 del proyectil) a la vez que permite detectar más elementos. La elección de Si como elemento del haz para experimentos ERD es adecuado ya que permite detectar todos los elementos ligeros comprendidos entre el H y el O, que mediante RBS convencional con He, o bien tienen una sección eficaz muy pequeña, o simplemente no se pueden detectar (H). En el espectro ERD de la Fig. 4 se aprecia claramente el H y el N, elementos componentes de la película delgada más ligeros que el Si. La señal de H es más estrecha que la de N, debida al menor poder de frenado del H, aunque los dos elementos están distribuidos uniformemente en la película, y así lo confirma la simulación representada en línea continua en la figura. La simulación esta hecha con el programa SIMNRA (20). Con el fin de obtener información cuantitativa, el tratamiento de un espectro RBS es más sencillo que el ERD, aunque conceptualmente sea el mismo problema. Efectivamente, en RBS solo se ha de seguir la pista a una sola partícula, tanto en el camino de entrada a la muestra como en el de salida, mientras que en ERD la partícula que se sigue en el camino de entrada es la del haz, y para el de salida hay que tener en cuenta tantas tabulaciones de poder de frenado como partículas de la muestra detectadas. Además, en ERD, se suma el problema de tener que evaluar la pérdida de energía en la película absorbente (12 μm de Mylar en el caso de la Fig. 4). Debido a que los poderes de frenado en muchos casos se conocen con imprecisiones mayores que un 7 o 10 %, la técnica de cuantificar espectros comparando un espectro real con el simulado mediante un programa informático, se debe efectuar con ciertas precauciones. Otro hecho fácilmente observable en el espectro de la Fig. 4 es la peor resolución en profundidad cuanto mayor sea el

Figura 3 Espectros RBS de una película de nitruro de silicio de unos 600 nm de espesor obtenidos con He a 2,8 MeV y 3,7 MeV. El ángulo de dispersión, θ , es de 164° en ambos casos. El aumento de sensibilidad para detectar N aumenta unas 15 veces a 3,7 MeV gracias a la resonancia que ocurre a esta energía. La línea continua en ambos espectros es la simulación hecha con el programa SIMNRA.

número atómico del elemento detectado. Esto se aprecia viendo la anchura del borde de alta energía de la señal (en la figura donde están situadas las flechas indicando el elemento). Esta anchura tiene fundamentalmente dos componentes, la peor resolución por parte del detector a medida que aumenta el número atómico de la partícula detectada (21), y el straggling, que también aumenta con el número atómico, de la partícula al atravesar la película absorbente.

La detección de diversos tipos de partículas en la técnica ERD hace que sea muy interesante la utilización de otro tipo de detectores, que miden en coincidencia con la detección de energía otro parámetro físico, por ejemplo la velocidad de las partículas. Con estos dos parámetros se determina de forma unívoca la masa de la partícula, permitiendo separar señales de partículas de distinto tipo que tienen la misma energía. Un ejemplo es la técnica de ERD con detección del tiempo, conocida como TOF-ERD. (22).

2.2. Interacciones partícula electrón

Entre las diferentes técnicas IBA, la técnica PIXE es una en la que menos procesos nucleares intervienen ya que el fotón que se detecta proviene de interacciones entre electrones de la corteza atómica. La técnica PIXE desarrollada hace casi 30 años en la Universidad de Lund (23), es hoy en día utilizada por muchos laboratorios. En la Fig. 5 se representa un esquema del proceso PIXE, que consiste en la detección de rayos X emitidos por transiciones electrónicas desde niveles externos hacia niveles más profundos, que están vacíos debido a las colisiones entre los iones del haz incidente y los átomos de la muestra.

La elevada sección eficaz atómica de ionización de niveles profundos junto con el bajo ruido de fondo, hacen que esta técnica sea muy adecuada para análisis de elementos traza en muchos tipos de muestras. Los mejores resultados se obtienen usando iones ligeros con energías de 2 a 5 MeV/uma.

Figura 4. Espectro ERD de la misma muestra de nitruro de silicio que en la Fig. 3. El ángulo de dispersión, Φ , es 30° . El perfil de hidrógeno se muestra claramente con una anchura de unos 450 keV. El perfil de N es más ancho, unos 3500 keV, debido al mayor poder de frenado del N comparado con el del H, aunque los dos elementos están uniformemente distribuidos en el mismo espesor. La línea continua representa el espectro simulado por el programa SIMNRA.

Los iones incidentes pueden arrancar electrones de niveles profundos, quedando los átomos de la muestra en un estado excitado. En el proceso de desexcitación se emite radiación X característica de cada elemento. La técnica PIXE consiste precisamente en analizar estos fotones, determinándose de forma unívoca los componentes de la muestra incluso a niveles traza. En la Fig. 6 se muestran dos espectros PIXE en los que se han señalado los picos más significativos que reflejan la composición del aerosol urbano de Madrid. A través de filtros de acetato de celulosa se ha hecho pasar un determinado volumen de aire. Una muestra de las partículas en suspensión es retenida por el filtro y su análisis mediante PIXE determina la composición elemental del aerosol. En este experimento se recogieron filtros durante una semana a un ritmo de ocho por día, siendo el tiempo de recolección de cada filtro de tres horas (24). Comparando los dos espectros se puede apreciar claramente que el espectro del filtro recolectado de 18:30 a 21:30 presenta picos más intensos, esto es; está más cargado de partículas que el filtro recolectado de 21:30 a 0:30, indicando el paso de una hora punta de tráfico rodado a un periodo más tranquilo. Cada uno de estos espectros se obtiene en tiempos cortos, unos cinco minutos, y puede dar información de concentraciones de hasta 20 elementos, siendo el proceso de cuantificación bastante rápido gracias a la utilización de programas informáticos. La gran cantidad de datos obtenidos permite la aplicación de métodos estadísticos multivariantes, como análisis de factores y componentes principales, para la asignación de fuentes contaminantes (25).

2.3. Otras interacciones

Si la energía del proyectil es suficiente para superar la barrera de repulsión coulombiana, la colisión proyectil-blanco puede dar lugar a reacciones nucleares con la emisión de nuevas partículas o rayos gamma, lo que se conoce como NRA (nuclear reaction analysis) y PIGE (particle induced gamma-ray emission). Estos procesos tienen la ventaja de ser selectivos, esto es que solo ocurren para ciertas combinaciones proyectil-blanco, obteniéndose señales libres de ruido. Un ejemplo típico, ampliamente usado en estudios de oxidación es el uso de la reacción $^{16}\text{O}(d, p)^{17}\text{O}^*$ (26) que permite obtener mediante un sencillo análisis la cantidad de oxígeno incorporado en la muestra con una precisión del 2 %.

Figura 5. Esquema del proceso PIXE

La técnica PIGE (particle induced gamma-ray emission) es la equivalente a PIXE para excitaciones nucleares. Esta técnica es útil como complemento de otras como PIXE, pues permite la detección de elementos ligeros, Be por ejemplo, a los que no se puede acceder con PIXE.

2.4. El microhaz

La posibilidad de delimitar la sección del haz de iones al tamaño de $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ e incluso menos, tiene un gran impacto en muchas situaciones analíticas en todos los campos (27, 28, 29). La técnica resultante se suele denominar microsonda nuclear o microscopía nuclear. Dado que la reducción del tamaño del haz implica una reducción de corriente para mantener la densidad dentro de los límites en que no dañe al material bajo análisis, la técnica PIXE, con su gran sección eficaz, ha sido una de las más utilizadas con focalización del haz, dando lugar a lo que se ha llamado micro-PIXE. No obstante otras técnicas IBA como RBS también se utilizan con microhaz (30). La gran ventaja, además de la mejora en resolución lateral, estriba en posibilidad de sincronizar barridos horizontales y verticales del microhaz y obtener mapas de composición elemental de la muestra.

3. CONCLUSIONES

Las técnicas IBA son de gran utilidad en el estudio de la composición elemental de los materiales. Además del carácter analítico multielemental y ser no destructivas, ofrecen posibilidades únicas en algunos aspectos específicos en los que se podría destacar la realización de medidas absolutas o la facilidad de utilizar una única muestra para calibrar cualquier muestra.

También tiene sus limitaciones por lo que es de gran importancia la colaboración con especialistas de otras técnicas que aportan información complementaria. Una de las limitaciones es su carácter nuclear que las hace ciegas al estado químico de los componentes de la materia. Técnicas como XPS pueden ser

de gran ayuda para complementar la información. PIXE, que como se ha dicho es la menos nuclear, se basa en transiciones electrónicas en niveles profundos del átomo, con lo que la influencia química es escasa. Recientemente se está prestando atención a la influencia del entorno químico en el poder de frenado, pero parece que los efectos no son lo suficientemente fuertes como para ser detectados y obtener información de forma unívoca.

Finalmente, la elección de una técnica concreta dentro del amplio abanico que ofrece IBA dependerá, entre otras consideraciones, del problema que se quiera resolver. Así, si se quiere detectar elementos traza PIXE puede ser la técnica más conveniente, mientras que si se quiere obtener el perfil de concentración en profundidad de un determinado elemento recurriremos a RBS o ERD, dependiendo de que el elemento de interés sea, o no, más pesado que la matriz que lo alberga.

AGRADECIMIENTOS

Una parte del trabajo expuesto en este artículo se ha realizado gracias a una estancia de investigación en Sandia National Laboratories, EEUU, concedida por el MEC al autor. (referencia PR95-543).

BIBLIOGRAFÍA

1. "New uses of ion accelerators", J.F. Ziegler (editor). Plenum Press, (New York 1975).
2. C. Uslu, D.H. Lee, Y. Berta, B. Park, D.B. Poker y L. Riester, "Enhanced surface hardness in nitrogen-implanted silicon carbide", Nucl. Instr. and Meth. B **118**, 693-697 (1996).
3. D.N. Jamieson, Nucl. Instr. and Meth. B **136-138**, 1-8 (1998).
4. K.G. Malmqvist, "Ion beam analysis for the environment", Nucl. Instr. and Meth. B **85**, 84-94 (1994).
5. A. Climent-Font, G. Demortier, C. Palcio, I. Montero, J.L. Ruvalcaba-Sil, y D. Díaz, "Characterization of archaeological bronzes using PIXE, PIGE, RBS and AES spectrometries", Nucl. Instr. and Meth. B **134**, 229-236 (1998).
6. J.D. MacArthur, P. del Carmine, F. Lucarelli y P.A. Mandò, "Identification of pigments in some colours on miniatures from the medieval age and early renaissance", Nucl. Instr. and Meth. B **45**, 315-321 (1990).
7. F. Watt y J.P. Landsberg, "Nuclear microscopy: biomedical applications", Nucl. Instr. and Meth. B **77** 249-260 (1993).

Figura 6. Espectros PIXE de dos filtros de acetato de celulosa por los que se ha hecho pasar aire, reteniendo una muestra de las partículas en suspensión. Las muestras se recolectaron en mayo de 1992 en la ciudad de Madrid. Los espectros se han obtenido con un haz de protones de 2,5 MeV.

8. M-Menu, "IBA in the museum: why AGLAE", Nucl. Instr. Meth. B **45**, 597-603 (1990).
9. "Backscattering spectrometry" W.K. Chu, J.M. Mayer y M.A. Nicolet. Academic Press, (New York, 1978).
10. "PIXE: A Novel Technique for Elemental Analysis", S.A. Johanson y J.L. Campbell. John Wiley & Sons, (Chichester, 1988).
11. C.G. Darwin, Phil. Mag. **28**, 449-462 (1914).
12. D.S. Gemmell, Rev. Mod. Phys. **46**, 129-138 (1974).
13. J.F. Ziegler, J.P. Biersack, y U. Littmark en "The Stopping and Ranges of Ions in Matter", editado por J.F. Ziegler. Pergamon, (New York, 1985), Vol. 1.
14. A. Climent y S.J. Fonash, "Growth and electrical characterization of palladium silicide contacts on dry-etched silicon surfaces" J. Appl. Phys. **56** (4), 1063-1069 (1984).
15. L.R. Doolittle, "Algorithms for the rapid simulation of Rutherford backscattering spectra", Nucl. Instr. and Meth. B **9**, 344-351 (1985).
16. A. Climent-Font, U. Wätjen, H. Bax y L. Palmetshofer, "Characterization of high-dose implants of Co and Cr in Si by RBS", Vacuum **42** (13) 795-799 (1991).
17. J.P. Biersack y L.G. Hagmark, Nucl. Instr. and Meth. **174**, 257- (1980).
18. "Handbook of modern ion beam materials analysis", J.R. Tesmer y M. Nastasi eds. Materials Research Society, Pittsburgh, Pennsylvania (1995).
19. B.L. Doyle y P.S. Peercy, "Technique for profiling ^1H with 2.5 MeV Van de Graaff accelerators", Appl. Phys. Lett. **34**, 811-813 (1979).
20. M. Mayer, SIMNRA User's Guide, Report IPP 9/113, Max-Planck-Institute für Plasmaphysik, Garching (1997).
21. D.J. O'Connor y TAN Chunyu, "Application of heavy ions to high depth resolution RBS", Nucl. Instr. and Meth. B **36**, 178-188 (1989).
22. A. Climent-Font, J.C. Banks y B.L. Doyle, "Quantitative analysis with heavy ion E-TOF-ERD", a publicarse en Nucl. Instr. and Meth B **161-163**, 255-259 (2000).
23. T.B. Johansson, R. Akselsson y S.A.E. Johansson, Nucl. Instr. and Meth. **84**, 151 (1970).
24. A. Climent-Font, E. Swietlichy y A. Revuelta, "Characterization of the air pollution in the urban area of Madrid", Nucl. Instr. and Meth. B **85**, 830-835 (1994).
25. W. Maenhaut and J. Cafmayer, "Particle induced X-ray emission analysis and multivariate techniques: An application to the study of the sources of respirable atmospheric particles in Gent, Belgium", J. Trace and Microprobe Techniques, **5**(2&3), 135-158 (1987).
26. G. Amsel, J.P. Nadai, E. d'Artemare, D. David, E. Girard y J. Moulin, "Microanalysis by direct observation of nuclear reactions using a 2 MeV Van de Graaff", Nucl. Instr. and Meth. **92**, 481-515 (1971).
27. F. Watt, "The nuclear microprobe: a unique instrument" Nucl. Instr. and Meth. B **130**, 1-8 (1997).
28. M. Takai, "Nuclear microprobe development and application to microelectronics", Nucl. Instr. and Meth. B **85** 664-675 (1994).
29. D.N. Jamieson, "Recent applications of nuclear microprobe analysis to frontier materials", Nucl. Instr. and Meth. B **130**, 706-716 (1997).
30. C.L. Churms y R. Pretorius, "Three dimensional RBS on the Faure nuclear microprobe", Nucl. Instr. and Meth. B **85**, 699-702 (1994).