

# La implantación de iones

Alejandro Fonseca Duarte, Departamento de Física, Universidad de Camagüey

## RESUMEN

---

Las radiaciones de partículas atómicas se usan, entre otras cosas, para la introducción de impurezas en los sólidos (implantación de iones). Haces de iones acelerados se dirigen a chocar con la superficie de los materiales para modificar su estructura y propiedades.

En este trabajo se trata sobre las generalidades de la teoría y práctica de la implantación de iones y de su importancia en las aplicaciones en semiconductores, metales y dieléctricos. El progreso continuo en esta rama se motiva por las ventajas demostradas y el estímulo que ello representa para nuevas investigaciones y aplicaciones dentro de la Física de las radiaciones del Estado Sólido.

## ABSTRACT

---

Among other applications irradiation with atomic particles is used to introduce impurities in solids (ion implantation). An ion beam is directed to the surface of materials in order to modify its structure and properties.

In this article general features of the theory and practice of ion implantation and the importance of the method in relation with semiconductors, metals and dielectrics are treated. Continuous progress is motivated by the demonstrated advantages that stimulate new investigations and applications in this branch of the Radiation Physics of Solid State.

Debido al creciente empleo de la implantación de iones como un método efectivo de dopamiento que incluso posibilita la obtención de compuestos inusuales se ha originado una serie de interrogantes que estimulan las investigaciones y las aplicaciones de los nuevos materiales obtenidos. En la base de la obtención de estos nuevos materiales con nuevas propiedades están los mecanismos de interacción de los haces de partículas cargadas (impurezas) con los sólidos. Gran importancia tienen los procesos de formación de defectos de radiación. Los átomos de la red pueden ser desplazados de sus posiciones y así crearse los pares de Frenkel. Los iones del haz pierden su energía cinética en las colisiones elásticas (nucleares) e inelásticas (electrónicas) y también varían su estado de carga eléctrica.

Los átomos introducidos ocupan posiciones intersticiales o de sustitución. Los procesos de formación de defectos corresponden a una dinámica no completamente esclarecida que comprende los defectos aislados, sus agrupaciones, los llamados picos térmicos\*, etcétera /1.3/. Los defectos de radiación activan su movimiento a temperaturas inferiores a las que condicionan la difusión de los átomos implantados.

La implantación de iones se diferencia esencialmente del dopamiento por difusión, asimismo de la creación de recubrimientos apoyados básicamente en la difusión. Como se sabe, los procesos por difusión se activan térmicamente y el movimiento de los átomos transcurre a altas temperaturas y según un gradiente de concentración determinado por el equilibrio de solubilidad. Mientras, durante la implantación los átomos se inyectan en el sólido en virtud de su energía cinética, en particular a temperaturas bajas y ambiente, independientemente de su solubilidad en la matriz sólida.

Como la implantación afecta de manera inmediata corrientemente una capa superficial inferior a una micra la técnica se hace en especial importante al tratarse con superficies, capas delgadas, pequeñas piezas. Esto ha ocasionado una revolución tecnológica en microelectrónica, ha dado lugar al nacimiento de la metalurgia iónica o de implantación, ha permitido desarrollar la simulación del deterioro de radiación en materiales de reactores atómicos, y otras aplicaciones más en general es-

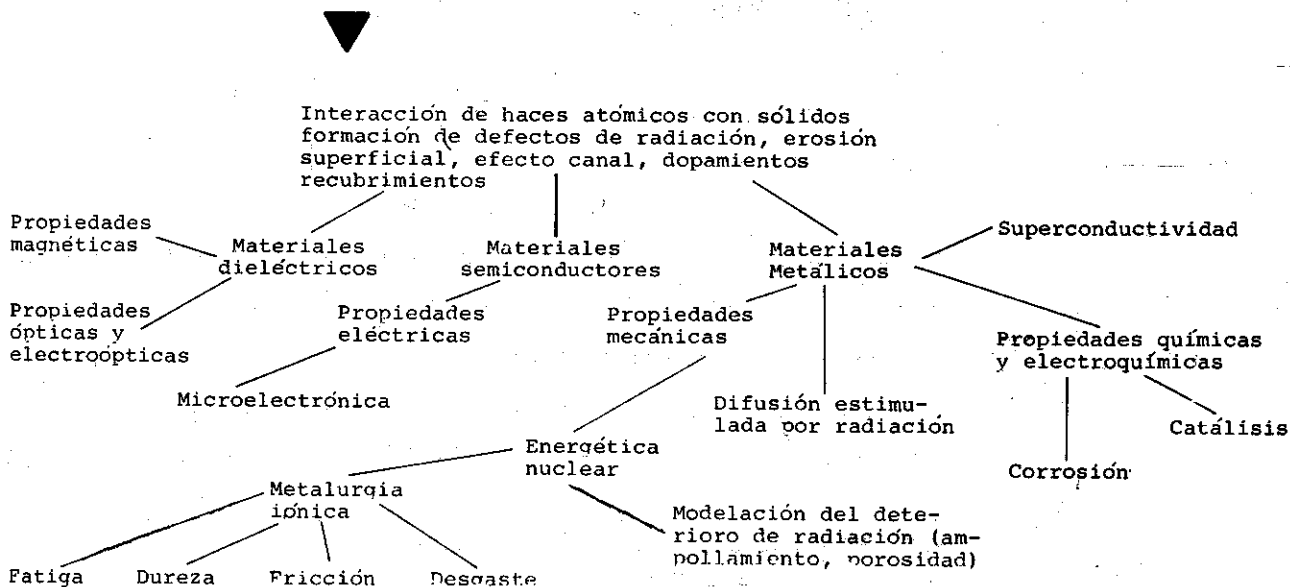
---

\* Una muy compleja zona de defectos promovida por las pérdidas energéticas de un ión pesado hacia el final de su trayectoria en el sólido.

quematizadas en la tabla I /4-8/. Las aplicaciones en microelectrónica, metalurgia iónica y energética nuclear son de gran interés para el desarrollo industrial.

Los países que más activamente trabajan en las investigaciones y práctica de la implantación de iones son Estados Unidos, Unión Soviética, Japón, Inglaterra, República Federal Alemana, Canadá, Africa del Sur, Francia, Dinamarca, Holanda, Italia, República Democrática Alemana, Hungría y China. Desde los años sesenta se vienen celebrando con regularidad eventos científicos sobre temas relativos. Los materiales de muchas de esas conferencias se han publicado, también han sido publicadas muy complejas monografías y artículos sobre el tema /4-17/.

Tabla I. Algunos efectos y aplicaciones de la implantación de iones. (Física y Química del estado sólido, Ciencia de las superficies, Ciencia de los materiales)



## EL PROCEDIMIENTO

En el laboratorio la implantación se realiza mediante un acelerador de iones (implantador), figura 1 /18-22/.

La aceleración tiene lugar bajo la acción de un campo electrostático en el interior de una cámara enrarecida ( $p \sim 10^{-6}$  Torr) en la que se encuentra, en un extremo, la fuente de iones, y en el otro, el sólido objeto de implantación. En la práctica se trabaja con energías de decenas o de cientos de keV, las dosis de iones pueden alcanzar el orden de  $10^{18}$  ion/cm<sup>2</sup> para aplicaciones en metales, entre  $10^{14}$  y  $10^{16}$  ion/cm<sup>2</sup> para aplicaciones en semiconductores y ser aún menores para aplicaciones en dieléctricos; la densidad de corriente de iones generalmente está cercana a  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Con tales parámetros se obtienen capas modificadas en la superficie de las muestras de unos cientos de angstroms. La distribución de impurezas se caracteriza por su perfil de concentración aproximadamente gaussiano, expresión (1), con un máximo a una distancia  $R_p$  bajo la superficie (sólido amorfo; se excluye toda redistribución de impurezas, e.g., debido a difusión estimulada por radiación)

$$f(x) = \frac{\phi}{\Delta R_p \sqrt{2\pi}} \exp - \frac{(x - R_p)^2}{2(\Delta R_p)^2} \quad (1)$$

donde:

$f(x)$  - concentración de iones (ion/cm<sup>3</sup>) en la dirección del haz incidente, perpendicular a la superficie;

$\phi$  - dosis de implantación (ion/cm<sup>2</sup>);

$R_p$  y  $\Delta R_p$  - valor medio y desviación cuadrática media del alcance proyectado, respectivamente de los iones en la dirección

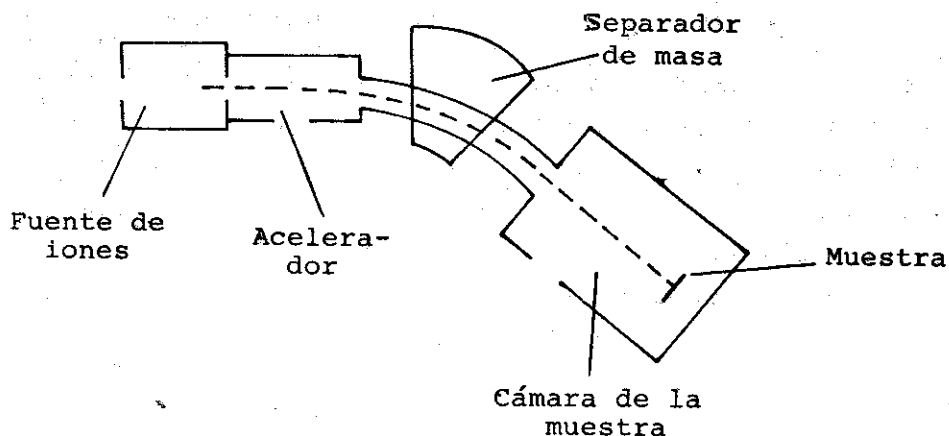


Figura 1. Esquema de un implantador de iones./18-22/

x; ambas funciones de la energía E del haz.

En la figura 2 se muestran gráficos y parámetros de la distribución. Una serie de factores contribuyen a la modificación del perfil de la forma asumida: la estructura cristalina del sólido determina ciertas direcciones y planos (canales) para los cuales los iones alcanzan una mayor profundidad por experimentar un menor número de colisiones elásticas; la erosión de la superficie debido a que se expelen átomos por la acción de los choques, asimismo otros átomos pueden ser impelidos en profundidad y producir otras colisiones correlacionadas (según una dirección) o no correlacionadas (cascadas de colisiones). En suma el perfil de distribución de impurezas y defectos es una función del potencial de interacción entre los átomos, de la energía E, del número atómico y de la masa atómica  $Z_1, M_1$  y  $Z_2, M_2$  del ion y del sólido respectivamente.

### VENTAJAS DE LA IMPLANTACIÓN DE IONES

Muchos detalles y perspectivas de la implantación de iones pueden encontrarse en la literatura /8,23-27/. Seguidamente se enumeran de manera resumida, algunas de las ventajas del método:

- 1) en principio cualquier ion puede ser introducido en cualquier sólido,

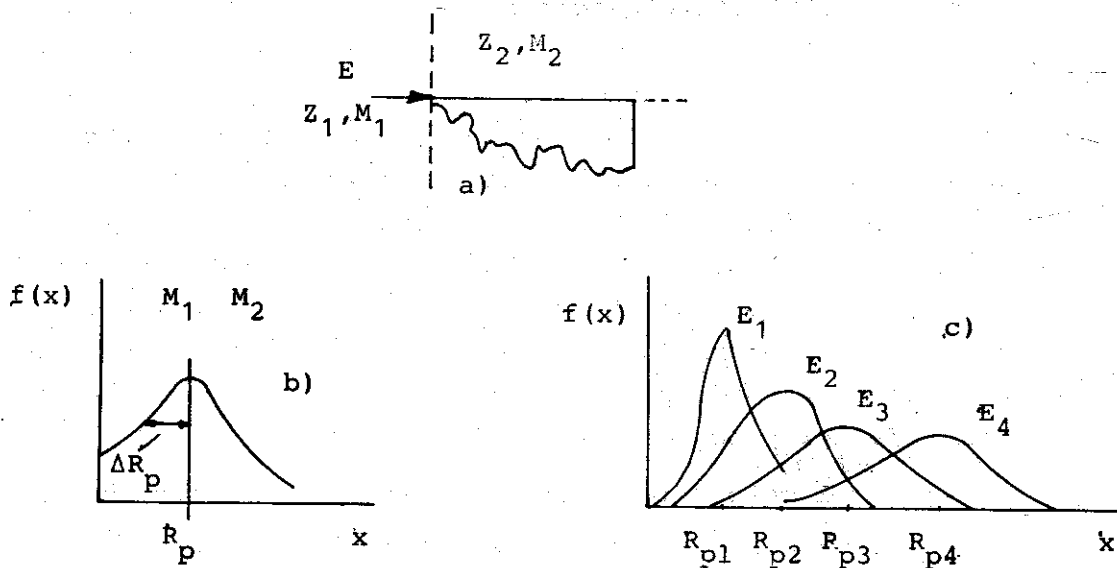


Figura 2. a) Trayectoria del ión; b) aproximación gaussiana de la distribución de impurezas; c) perfil de concentración obtenido por la implantación a diferentes energías:

$$1000 \text{ keV} > \dots E_4 > E_3 > E_2 > E_1 \dots > 10 \text{ keV}$$

$$10 \text{ \AA} > \dots R_{p4} > R_{p3} > R_{p2} > R_{p1} \dots > 10 \text{ \AA}$$

E -energía del haz incidente;  $Z_1, M_1$  y  $Z_2, M_2$  -número atómico y masa atómica del ión y del sólido (amorfo), respectivamente.

- 2) las impurezas pueden alcanzar una determinada concentración con independencia de la solubilidad entre los elementos de que se trate;
- 3) el proceso permite prácticamente una completa automatización y casi un 100 % de reproducción de las propiedades de los materiales creados;
- 4) la implantación se realiza a un vacío bastante alto, lo cual asegura un elevado grado de limpieza junto con la elección (separación por masas) magnética de los iones;
- 5) la distribución de impurezas se controla mediante la variación de parámetros eléctricos en el acelerador;
- 6) la temperatura de implantación se puede variar en amplios márgenes;
- 7) la implantación, realizada en un laboratorio, puede modelar (simular) en unas horas los deterioros de radiación por neutrones, acumulados durante muchos años.

No hace mucho /28/ se ha comenzado a usar un nuevo método de implantación por pulsos de iones, que permite realizar el dopamiento y el recocido de los defectos en un solo acto.

#### *Semiconductores*

Si bien el primer dispositivo electrónico de estado sólido construido por los métodos de difusión fue realizado en 1948 /29/, ya en 1954 /30/ se reportaba la posibilidad del uso de la implantación de iones con esos mismos fines de realización. Hoy se ha demostrado que todo tipo de dispositivo semiconductor se puede elaborar con excelentes cualidades mediante la implantación de iones /8,26/. Esta técnica se emplea corrientemente para la producción en serie de circuitos integrados y de otros elementos microelectrónicos. Como ejemplo de aplicación en la tecnología planar, en la figura 3 se da la geometría de un transistor MOS de efecto de campo obtenido por implantación. En /21/ puede leerse sobre la secuencia de los procesos de su fabricación.

La productividad del método (millones de elementos fabricados por un acelerador en un año), casi el 100 % de reproducción de los procesos y sus ventajas en la región submicrométrica (sólo limitadas por las posibilidades de la litografía) son de extraordinario interés para la microelectrónica.

#### *Metales*

Amén de otras aplicaciones de los metales implantados hay que señalar la aparición de la así llamada metalurgia iónica o de implantación, cuyo propósito es la creación controlada de nuevas fases y precipitados en

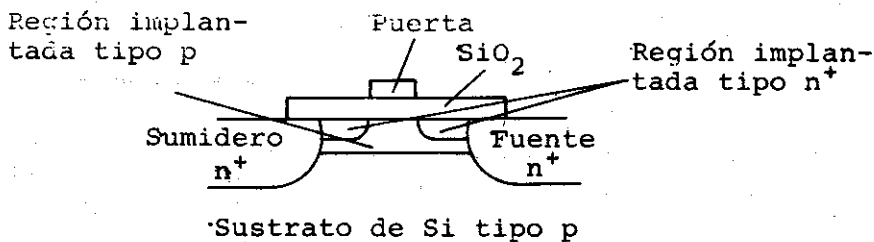


Figura 3. MOSFET elaborado por implantación./21,31-33/

las capas superficiales metálicas para mejorar las propiedades de fatiga, fricción, desgaste, dureza, corrosión, estabilidad ante las radiaciones, etcétera. Las investigaciones se ha realizado tanto en capas delgadas /34,35/ como en muestras masivas /36-38/. Hay que tener presente que los procesos de implantación no se someten a la termodinámica del equilibrio de solubilidad de los sólidos. Así en la capa implantada se pueden obtener soluciones sobresaturadas, compuestos metaestables, transiciones al estado amorfo. Es de particular interés teórico y práctico que los efectos de la implantación sean también notables a profundidades mucho mayores que el alcance medio proyectado  $R_p$ . Este es el caso de la observación del aumento de la microdureza del hierro y del cobalto implantados con iones de carbono (50 keV) mostrado en la figura 4 /38/.

#### Dieléctricos

Aquí las aplicaciones no son menos importantes que en los casos anteriores. Por ejemplo, para la construcción de guías de ondas electromagnéticas en la región visible del espectro se emplea la variación del

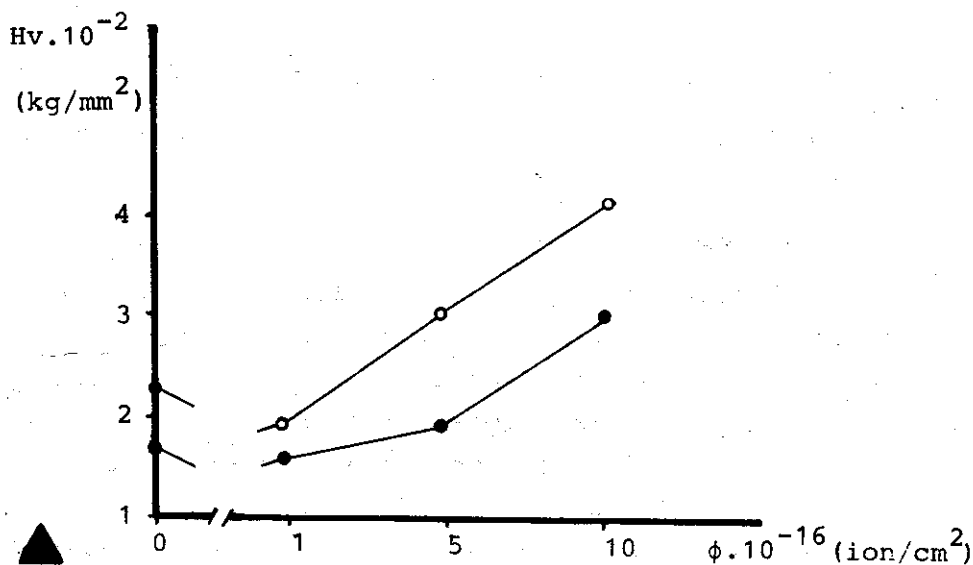


Figura 4. Dependencia de la microdureza del Fe (.) y del Co (o) respecto a la dosis de iones de carbono (50 keV).

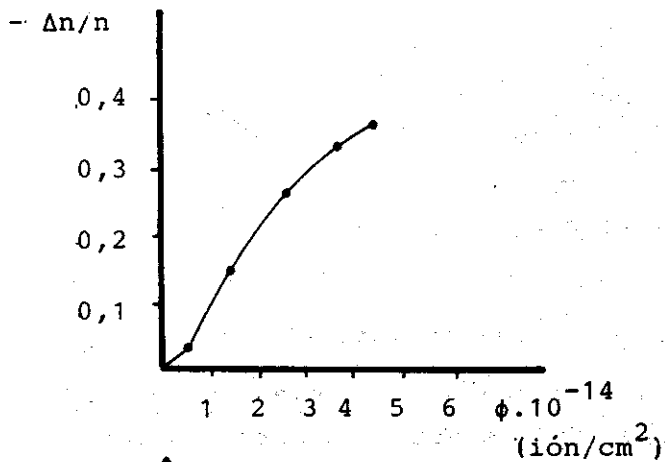


Figura 5. Variación del índice de refracción del cuarzo con la dosis de iones de neón (38 KeV). /39/

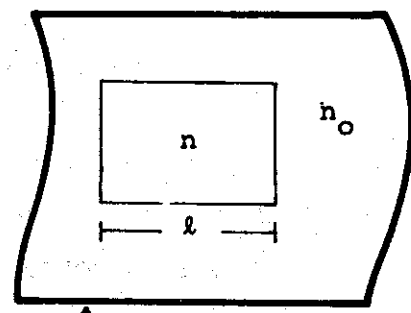


Figura 6. Guía de ondas de vidrio para luz visible:  $n_0$  - índice de refracción del vidrio antes de la implantación;  $n$  - después de implantado. /40/

índice de refracción de una sustancia vitrea con la concentración de iones implantados. En la figura 5 se da la dependencia del índice de refracción del cuarzo respecto a la dosis de iones de neón (38 keV) /39/.

El vidrio puede llegar a aumentar su índice de refracción entre 10 y 20 % por efecto de la implantación. Para la construcción de una guía de onda el índice  $n$  puede variarse de manera que la luz de longitud de onda  $\lambda$  se propague básicamente por una región de ancho  $l$ . Se cumple que /40/

$$n = \frac{n_0}{1 - 3(\lambda/l)} \quad (2)$$

donde:  
 $n_0$  - índice de refracción del vidrio no implantado.

El esquema de la guía se muestra en la figura 6, sus dimensiones son pequeñas /40/.

### ANÁLISIS DE LOS SÓLIDOS IMPLANTADOS

El estudio de los efectos de la implantación se realiza mediante las más variadas técnicas de análisis: microscopía electrónica de transmisión y de barrido, espectroscopía óptica y Mossbauer, medición de portadores de carga, difracción de rayos-X, análisis químico y electroquímico, captación de emisión de electrones y de rayos-X, dispersión de Rutherford, etcétera. /41/, Mediante la dispersión inversa de Rutherford (backscattering) de partículas ligeras ( $H^+$  y  $He^+$ ) de altas energías (del orden de los MeV) es posible establecer las posiciones y concentraciones de impurezas y defectos /42/.



Recientemente se ha reportado un sencillo método de rayos-X /43,44/ con ayuda del cual se ha estudiado el carácter de la propagación en profundidad de las deformaciones provocadas en muestras de hierro por la implantación de iones de boro, carbono y boro más carbono (50 keV), y se ha evaluado el coeficiente de difusión de impurezas y defectos bajo la acción de la radiación y determinando las tensiones mecánicas que acompañan a la deformación /45,46/.

## CONCLUSIONES

---

La implantación de iones ha resultado un método conveniente de dopamiento e investigación de los sólidos, que ofrece nuevas perspectivas particularmente en microelectrónica, metalurgia iónica y energética nuclear. Estas ramas son de importancia para el desarrollo industrial.

Las investigaciones y aplicaciones de la implantación de iones llevadas paralelamente pueden emplearse aún más en nuestro país atendiendo a las experiencias teóricas y prácticas acumuladas a nivel mundial. Ello se justifica económicamente por las ventajas y versatilidad de la implantación de iones y por el progreso científico-técnico que representa.

## BIBLIOGRAFÍA

---

1. Brinkmann, J.A.  
On the nature of radiation damage in metals. J.Appl. Phys. Vol.25, No.8, 1954, 961-970.
2. Gibson, J.B.; A.N. Goland; M. Milgram; G.H. Vineyard  
Dynamics of radiation damage. Phys.Rev.Vol.120, No.4, 1960, 1229-1253.
3. Thompson, M.W.  
Defects and radiation damage in metals. Cambridge, University Press, 1969.  
Se cita en su traducción al ruso: Defekty i radiatsionnye povrezhdeniya v metallaj. Mir, Moscú, 1971, 368pp.
4. Wolf, G.K.  
Chemical effects of ion bombardment. Topics in current chemistry. Tom.85, 1979, 88pp.
5. Proceedings of the 1st. International Conference on Ion Beam Modification of Materials (IBMM). Central Research Institute for Physics. Budapest, 1979.  
Materiales recogidos parcialmente en: Novosti Fiziki Tverdogo Tela (NFTT), No.10. Ionnyaya implantatsiya v poluprovodniki i drugie materialy. Moscú, 1980. 332pp.
6. Proceedings of the 2nd. International Conference on IBMM. Nucl. Inst. and Meth. No. 182/183, 1981.
7. Grant, W.A.; J.S. Williams.  
The modification of surface layers by ion implantation. Sci. Progress.Vol.63, No.249, 1976, 27-64.

8. Dearnaley, G.  
Ion implantation with heavy ions. Trends in Physics. 1978, 429-437.
9. American Vacuum Society Symposium on Ion Implantation.  
- New prospects for material modification. J. Vac. Sci. and Technol. Vol. 15, No. 5, 1978.
10. Materialy VI Vsesoyuznogo Soveshchaniya "Vzaimodeistviye atomnyj chas tity s tverdym telom". Tom. I y II. AC URSS, Minsk, 1981.
11. Materialy II Vsesoyuznogo Soveshchaniya "Radiatsionnye defekty v metallaj". AC URSS, Alma-Ata, Nauka, 1981.
12. Dearnaley, G.; J.H. Freeman; R.S. Nelson; J. Stephen  
Ion Implantation. North-Holland Publishing Co. Amsterdam, 1973, 802pp.
13. Mayer, J.W.; L. Eriksson; J.A. Davis  
Ion implantation in Semiconductors. Academic Press. New York-London, 1970.  
Se cita en su traducción al ruso: Ionnoye legirovaniye poluprovodnikov. Mir, Moscú, 1973, 297 pp.
14. Chr. Lehmann. Interaction of radiation with solids and elementary defect production. North-Holland Publishing Co. Amsterdam-New-York-Oxford, 1977.  
Se cita en su traducción al ruso: Vzaimodeistviye izlucheniya s tverdym telom i obrazovaniye elementarny j defektov. Atomizdat, Moscú, 1979. 296 pp.
15. International Conference on Atomic Collisions in Solids. Moscow State University. Univ. Publishing House, 1977.
16. Praniavichius, L.; Yu. Dudonis  
Modifikatsiya svoistv tverdij tel ionnymi puchkami. Mokslas, Vilnius, 1980, 242 pp.
17. Editores: Picrauz, S.T.; E.P. EearNisse, F.L. Vook  
Applications of ion beams to metals. Plenum Press. New York-London, 1974.
18. Townsend, P.D.; J.C. Kelly; N.E.W. Hartley  
Ion implantation, Sputtering and their Applications. Academic Press. London, 1976, 148-180.
19. Belyi, I.M.; G.A. Gumanskii; V.S. Soloviev  
Ustanovka dlya issledovaniya dinamiki strukturnyj izmenenii v poverjnostny j sloyaj tverdij tel pri ionnoi bombardirovke. Vestnik BGU. Fiz-Mat-Mej. No. 1, 1971, 45-48.
20. Freeman, J.H.  
The use of isotope separators for ion implantation. Proceed. of Roy. Soc. London, A311, 1969. 123-130.
21. Morehead, F.F.; B.L. Crowder  
Ion Implantation. Scientific American. Vol. 228, No. 4, 1973. 64-71.
22. Ver ref./4/, 23-30.
23. Titov, V.V.  
Ion implantation - problems and perspectives. Phys. Stat. Solidi (a), Vol. 48, 1978, 13-22.
24. Ver ref./16/. p. 95.
25. Palmer, D.  
Uspeji ionnoi implantatsii. NFFT, No. 10, 1980, 7-64.
26. Dearnaley, G.; D.C. Northrop  
Semiconductor counters for nuclear radiations. 2nd. ed. E. &

- F.N. Spon Limited. London, 1966, 147-149.
27. Guseva, M.I.; Yu.V. Martynenko  
Radiatsionnyi blistering. Uspeje fizicheskij nauk. Vol. 135,  
No. 4, 1981, 671-691.
  28. Piekoszewski, J.; M. Gryzinski; J. Langner; Z. Werner.  
Pulse ion-implantation. New single step dopant technique. Phys.  
Stat.Solidi (a), Vol. 67, No. 2, 1981, K163-K166.
  29. Ryder, J.D.  
Electronic Fundamentals and Applications. Ed. R.Habana, 1966,  
p.3.
  30. Shockley, W.  
Forming semiconductive devices by ionic bombardment. US Patent  
No. 278564, 1954.
  31. Ver ref./16/, p.110.
  32. Ver ref./13/, 268-269.
  33. Ver ref./25/, 38-43
  34. Belyi, I.M.; F.F. Komarov; V.S. Tvshkov; V.M. Yankovskii  
Obrazovaniye jimicheskij soedinenii pri ionnoi bombardirovke  
tonkij plenok perejodnyj metallov. Fizika i jimia obrabotki  
materialov. No. 3, 1978, 110-116.
  35. Dearnaley, G.; N.E.W. Hartley  
Ion implantation into metals and carbides. Thin Solid Films.  
Vol. 54, 1978, 215-232.
  36. Vladimirov, V.P.; V.M. Gusev; V.S. Tsyplenkov  
Vliyanie bombardirovki ionami gelia, nikelia i jroma na micro-  
tverdost i korrozionnoye rastreskivaniye nerzhaveyuschij  
stalei. Atomnaye energia. Tom. 47, No. 1, 1979, 50.51.
  37. Fonseca Duarte, A.  
Strukturnie izmeneniya v zheleze, kobalte i nikele, implantirovanny j ionami bora i ugleroda. Tesis de Candidato a Doctor en Ciencias Físico-matemáticas. Minsk, 1982, 126 pp.
  38. Gumanskii, G.A.; A. Fonseca Duarte; V.M. Anishchik; V.V. Uglov  
Estructura superficial del Fe, Co y Ni implantados con iones de carbono. Rev. Ciencias Químicas, Vol. 13, No. 2, 1982, 269-278.
  39. Hines, R.L.; R. Arndt  
Radiation effects of bombardment of quartz and vitreous silica by 7,5 keV to 59 keV positive ions. Phys. Rev. Vol. 119, No. 2, 1960, 623-633.
  40. Barashenkov, V.S.  
Novye professii tyazhelyj ionov. Atomizdat, Moscú, 1977, 32-38.
  41. Ver ref./4/, 31-46.
  42. Ver ref./16/, 104-109
  43. Gumanskii, G.A.; V.M. Anishchik, V.V. Uglov; A. Fonseca Duarte  
Rentgenograficheskii metod issledovaniya prinoverjnostnyj sloev. IX Vsesoyuznaya konf. "Nerazrushayuschie fizicheskie metody i sredstva kontrolya". Radiats, metody. AC URSS, Minsk, 1981, 211-212.
  44. Fonseca Duarte, A.  
Investigación mediante difracción de rayos-X de las capas superficiales de metales. Rev. Construcción de maquinaria. No. 3, 1983.

45. Fonseca Duarte, A.; V.M. Anishchik; V.V. Uglov  
Variaciones estructurales en el Fe implantado con iones de B y  
C. Rev. Ciencias Químicas. (en prensa).
46. Ver ref. /37/. 91-96.