

INFLUENCIA DE PROCESOS TECNOLÓGICOS DE MICROELECTRÓNICA EN TENSIONES ELÁSTICAS Y EN DEFECTOS DE LA RED CRISTALINA

VALERI GACHEVSKI[@]

Resumen

Las investigaciones de la influencia de las operaciones de los procesos tecnológicos de fabricación de semiconductores en las tensiones elásticas de material y en los defectos puntuales y lineales son muy importantes para el desarrollo de electrónica.

En el presente artículo se realiza el resumen de los resultados científicos publicados en las revistas internacionales sobre las tensiones elásticas y sobre comportamiento de los defectos de la red cristalina durante procedimiento tecnológico de fabricación de las estructuras semiconductoras.

Palabras Clave: Tensiones Elásticas, Deformación, Defectos, Dislocaciones.

Abstract

The research of influence of the procedures of technological processes of semiconductors in the elastic stress of material and in the point and lineal defects is very important for the electronic development which always depends of the application of the materials with news electrofysical characteristics.

In the present article is realized a summery of scientific results published in the international magazines about elastic stress of material and about lattice defects behavior during the technological processes of the manufacture of the semiconductor structures.

[@] Ph. D., Profesor asistente, TC, Universidad Distrital adscrito a la Facultad Tecnológica.
vgachevs@uniandes.edu.co

Key Words: Elastic Stress, Deformation, Defects, Dislocations.

1. INTRODUCCIÓN

Las investigaciones dirigidas al estudio de los procesos tecnológicos de fabricación de materiales nuevos para diferentes ramas de la industria y especialmente para la producción de los dispositivos electrónicos tienen gran importancia porque el desarrollo de la microelectrónica siempre depende de la aplicación de los materiales con nuevas propiedades electrofísicas.

Comenzando con el uso de p-n estructuras, la microelectrónica subió hasta el uso de las estructuras metal-semiconductor y también de nanoestructuras.

Las investigaciones científicas en la microelectrónica anteriormente estaban enfocadas en general al estudio de las propiedades electrofísicas de los materiales y a la creación de los procesos tecnológicos de fabricación de estructuras cristalinas artificiales con propiedades deseadas. Para obtener de un material las propiedades requeridas se utiliza el fenómeno de variación del espectro energético de los portadores de carga en el cristal, mediante el uso de defectos puntuales (átomos de impurezas), introducidos en cantidades determinadas en una región dada de la estructura cristalina.

Las formas utilizadas hoy en día para introducir las impurezas son muy variadas: difusión térmica a altas temperaturas de elementos en la fase sólida, introducción de impurezas durante el proceso de crecimiento epitaxial ya sea a partir de la fase líquida o la fase de vapor e implantación iónica entre otras. En general, el fin de todos estos procesos tecnológicos consiste en el cambio del espectro energético del material a través de formación de regiones con una configuración dada de la estructura y con una distribución de impurezas determinada.

La influencia de un defecto lineal (dislocación) en el espectro energético de portadores de carga es mayor en comparación con un defecto puntual. Se ha establecido que hay relación entre la variación de los parámetros del dispositivo electrónico con la redistribución progresiva de impurezas causada por las tensiones elásticas del material y en particular por las tensiones relacionadas con dislocaciones. La investigación de la influencia de los procesos tecnológicos de fabricación de las estructuras semiconductoras en las tensiones elásticas del material, en los defectos tanto puntuales como lineales y en las propiedades del material tiene gran importancia para el desarrollo de la electrónica. En el presente artículo se

realiza un resumen de los resultados de las investigaciones científicas publicados en las revistas internacionales sobre las tensiones elásticas del material y sobre comportamiento de los defectos de la red cristalina durante el proceso tecnológico de fabricación de las estructuras semiconductoras.

2. TENSIONES ELÁSTICAS EN MATERIAL DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

Los dispositivos de microelectrónica se fabrican con base en estructuras multicapas de diferentes materiales cristalinos. En estas estructuras es imposible evadir las tensiones elásticas que aparecen entre las diferentes capas por la diferencia en los coeficientes de dilatación térmica, en los módulos de elasticidad o en los mismos parámetros de las redes cristalinas de los materiales que forman las capas de la estructura [1, 2]. En condiciones determinadas, éstas tensiones conllevan a la formación de defectos lineales en la red cristalina (dislocaciones), los cuales a su vez influyen en las características electrofísicas del material causando microheterogeneidad de las propiedades físicas y físico-químicas [3]. En el artículo [4] está descrita la correlación de las tensiones elásticas con el tiempo de degradación de los dispositivos semiconductores.

Generalmente se realiza el siguiente esquema de influencia de las tensiones elásticas en características de dispositivos: las tensiones causan formación de defectos y estos defectos cambian los parámetros de los dispositivos electrónicos.

El efecto de la influencia de las dislocaciones sobre las características de los materiales semiconductores (movilidad de portadores de carga, tiempo de vida de los portadores de carga minoritarios, resistividad, etc.), ya fue establecido experimentalmente. También se ha establecido la correlación existente entre la densidad de las dislocaciones con la calidad y efectividad de los dispositivos. Casi todas las conclusiones de los artículos experimentales muestran, que la calidad del dispositivo electrónico disminuye con el aumento de la densidad de las dislocaciones en el material.

En el resumen [5] de los artículos científicos están mencionados los trabajos teóricos y experimentales en los cuales se describen las tensiones causadas por la diferencia entre los parámetros de la red cristalina y la formación de las dislocaciones. Los autores señalaron que el aporte de las tensiones mencionadas disminuye con el aumento del número de capas del material.

Las tensiones elásticas en la región de las ventanas de emisores causan la migración de las dislocaciones en la región periférica del emisor. Por eso las características de los dispositivos bipolares se empeoran [6]. La suma de las tensiones bajo las ventanas de los emisores con tensiones producidas por la difusión de los átomos de fósforo causa la formación de dislocaciones que se observan con el método de roentgenotopografía [7]. En este caso se observó la disminución del coeficiente de amplificación de los transistores. En el caso de disminución de la densidad de las dislocaciones en las fronteras de las ventanas de los emisores, observaron el aumento del coeficiente de amplificación [8]. Una capa delgada situada entre las capas de los materiales de la estructura del dispositivo con el módulo de elasticidad intermedio en comparación con los módulos de los materiales de las capas mencionadas causa disminución tanto de las tensiones elásticas como de la densidad de las dislocaciones bajo las fronteras de las ventanas de los emisores. Como resultado disminuye la fuga de corriente [9].

Se realiza el estudio intenso de la influencia de las tensiones elásticas del material de las estructuras metal–dieléctrico–semiconductor en varias características: (a) en la magnitud y en la distribución de carga en la frontera del semiconductor, (b) en la densidad de los estados superficiales, (c) en la redistribución de impureza y (d) en el cambio del espectro energético. En algunos trabajos se publicaron los resultados discrepantes sobre dicha influencia. Los autores del artículo [10] denotaron un desplazamiento significativo de las características corriente-capacitancia bajo la influencia de las tensiones elásticas. Pero otros autores dicen, que dicho desplazamiento causado por el cambio del espectro energético es muy pequeño para la magnitud de las tensiones hasta de $\sim 10^{10}$ dina/cm². Ellos no observaron ningún cambio en los procesos de generación superficial y recombinación de los portadores de carga para valores de tensiones elásticas hasta de $\sim 10^9$ dina/cm². Los autores de los artículos [11, 12] descubrieron la relación de la magnitud y de la distribución de carga eléctrica con el nivel y con la distribución de las tensiones elásticas en las estructuras metal-oxido-semiconductor.

El cálculo teórico de tensiones elásticas en las estructuras sólidas se realiza en algunos casos particulares con el empleo de los métodos de la teoría de elasticidad. La ecuación para el cálculo de la distribución de las tensiones elásticas térmicas en un material ancho se publicó en el libro [13]. El cálculo de las tensiones elásticas con el empleo de los resultados experimentales (valores del radio de curvatura de una placa) se puede realizar con las fórmulas publicadas por primera vez en el artículo [14].

Analizando los resultados de los cálculos semiempíricos de la distribución de las tensiones elásticas en las estructuras semiconductoras se pueden encontrar saltos finitos de las tensiones elásticas en las fronteras de conjugación de las capas de la estructura. Las funciones de las tensiones elásticas son funciones lineales a trozos con saltos finitos en las fronteras de conjugación. En los artículos se pueden encontrar los resultados de las investigaciones experimentales de la influencia de los defectos causados por los saltos de las tensiones elásticas en las fronteras de conjugación de las capas de la estructura en la fuga de corriente y en las características de ruido de los transistores.

Varios artículos están relacionados con los métodos de las medidas de las tensiones elásticas en las películas delgadas. Frecuentemente se usan métodos con base en las mediciones de las deformaciones en la película y en la base. Estos métodos pueden dar solo los valores promedio sobre un área mayor que el área de las regiones activas de un dispositivo electrónico. Las mediciones más exactas en las regiones pequeñas ($\sim 10^{-3} - 10^{-4}$ cm) se realizan con el uso del microscopio de interferencia. Los mejores métodos son el método de RX-tensometría ($\sim 10^{-5}$ cm.) y el método de electronografía ($\sim 10^{-6}$ cm.) [15]. Los resultados más exactos en la investigación de las tensiones elásticas se pueden obtener sólo con el cálculo teórico [16], pero lastimosamente en este caso es bastante difícil deducir las fórmulas de dicho cálculo que serían aplicables en casos generales.

3. LOS DEFECTOS LINEALES EN LAS ESTRUCTURAS SEMICONDUCTORAS

Entre los trabajos científicos se encuentran muchos artículos relacionados con el estudio de las dislocaciones [17, 18] y con la investigación de la formación de dichas dislocaciones en el transcurso de las operaciones tecnológicas [19, 20, 21].

En el artículo [22] describen unos de los mecanismos de formación de las dislocaciones cerca de la frontera de conjugación de las capas de materiales sólidos. Las tensiones elásticas en el material de las capas conjugadas dependen de la diferencia en varios parámetros: (a) en los parámetro de la red cristalina, (b) en los parámetros de la expansión térmica, (c) en las espesores de las capas etc. Hay varios modos de formación de dislocaciones. El mecanismo de dicha formación depende de la magnitud y la orientación de las fuerzas elásticas y de la orientación del vector de Burgers de la dislocación. En un caso la dislocación puede cruzar la frontera de conjugación de los materiales, pero en el otro caso la dislocación puede inclinarse quedándose en la misma capa. En el último caso cerca de la

frontera de conjugación de las capas de la estructura se ubica una parte de la dislocación o también toda la dislocación completa. Este tipo de inclinación de dislocación se realiza sólo cuando la frontera de conjugación de las capas y el plano de deslizamiento de dislocación son paralelos. Las tensiones causadas por la diferencia en los parámetros de la red cristalina se relajan a través de la componente de borde de la dislocación. El mecanismo mencionado de la inclinación de la dislocación fue observado experimentalmente por los autores del artículo [23]. Dicho mecanismo causa la formación de series de dislocaciones cerca de la frontera de conjugación de las capas del material de las estructuras semiconductoras. En este caso las líneas de las dislocaciones son paralelas a la frontera de conjugación de las capas del material.

Una dislocación puede formarse en la frontera de crecimiento de la capa del material cristalino y después deslizarse por dentro de la capa. La dislocación se ubica cerca de la frontera de conjugación de las capas del material. Dicho deslizamiento se detiene cuando la dislocación alcanza la posición de equilibrio estable. Esta posibilidad es causada por las tensiones elásticas producidas por la diferencia en los parámetros de la red cristalina de las capas y por las tensiones elásticas térmicas y además por las tensiones de imagen producidas por la diferencia en los módulos de elasticidad de los materiales de las capas conjugadas. Los diferentes valores de dichas tensiones son probables aún si las estructuras semiconductoras pudieran ser semejantes. Dichos valores dependen de los modos de fabricación de las estructuras y de los métodos de tratamiento de las estructuras en el transcurso del proceso tecnológico. Por ejemplo, los autores del artículo [24] observaron la relajación de las tensiones causadas por la diferencia en los parámetros de las redes cristalinas de las capas a través de formación de las dislocaciones tanto en la película como en el soporte de la película durante el proceso de recocido para eliminar las tensiones.

En el proceso de formación de defectos se combinan dos mecanismos: (a) el mecanismo de crecimiento de las dislocaciones a través del soporte de la película y (b) el mecanismo de deslizamiento de dislocaciones. El predominio de uno de dichos mecanismos depende de la temperatura, del tiempo de crecimiento y de las tensiones elásticas de las capas del material. Cuando la diferencia en los parámetros de las redes cristalinas de las capas conjugadas es pequeña predomina el mecanismo de la inclinación de las dislocaciones y el mecanismo de la formación superficial de las dislocaciones. Cuando la diferencia en los parámetros de las redes cristalinas es significativa, las dislocaciones se forman ocasionalmente en las regiones locales de heterogeneidad del material o en las regiones con tensiones mecánicas fuertes.

La diferencia en los parámetros de las redes cristalinas de los materiales de las capas conjugadas es una diferencia inevitable. Pero dicha diferencia es la causa principal de formación de las dislocaciones cerca de la superficie de conjugación de la capas del material. Los principios básicos de la teoría de dichas dislocaciones fueron descubiertos por Van der Merve [25]. Dicha teoría fue comprobada experimentalmente [26].

El valor de la diferencia en los parámetros de las redes cristalinas de dos capas conjugadas se puede describir con la fórmula siguiente:

$$f = \frac{a - a_0}{a + a_0}$$

donde a y a_0 son los parámetros de las redes cristalinas de las capas conjugadas.

En la fase inicial del estudio de las dislocaciones de incorrespondencia fueron modeladas por las bandas con ruptura de correspondencia en la ubicación de los átomos en ambos lados de la frontera de conjugación. Dichas bandas están distribuidas en el material periódicamente. Se supuso que dichas bandas eran causadas por la relajación elástica de las tensiones de incorrespondencia. Pero el estudio posterior mostró que dichas tensiones no siempre pueden relajarse completamente a través de la formación de dislocaciones del tipo mencionado [14, 27]. Entonces las llamaron dislocaciones de todos los tipos situadas en la región de la frontera de conjugación de las capas del material con una posición de equilibrio estable como dislocaciones de incorrespondencia porque a través de todas estas dislocaciones se relaja una parte de las tensiones de incorrespondencia.

En el artículo [28] se publicaron las fórmulas para el cálculo del espesor crítico de la película cuando se forman dislocaciones de incorrespondencia. Dichas dislocaciones interactúan entre sí formando una red de dislocaciones. En el caso cuando la incorrespondencia de los parámetros de la red cristalina es pequeña las dislocaciones se ubican en una región estrecha (unos micrómetros) cerca de la frontera de conjugación de las capas. Las dislocaciones de incorrespondencia fueron investigadas por varios autores [29, 30, 31, 32, 33, 34].

En una serie de trabajos experimentales estudiaron las propiedades eléctricas de las dislocaciones y su influencia en las propiedades electrofísicas del material [35, 36, 37]. La opinión general fue la de que las dislocaciones empeoran las características de los dispositivos semiconductores.

Sin embargo, observaron unos ejemplos de influencia positiva de dislocaciones. En el artículo [38] los autores concluyeron que en el caso de los dispositivos bipolares en

presencia de dislocaciones cerca de las regiones activas, la fuga de la corriente se disminuyó. Desafortunadamente en los artículos no publicaron los datos cuantitativos sobre la relación de la densidad de dislocaciones con fuga de corriente. Tampoco hay datos cuantitativos sobre la influencia de la distribución heterogénea y de la orientación de las dislocaciones en la fuga de corriente.

En el trabajo [2] señalaron la aparición de los centros de captura de portadores de carga introducidos por dislocaciones. En las muestras de GaAs la concentración de electrones en presencia de las dislocaciones disminuye en 100 veces y su movilidad disminuye en 1000 veces [39]. En las regiones cercanas a los defectos de la red cristalina puede aumentar tanto la recombinación como la generación de cargas [40]. Las dislocaciones móviles también puede transferir la carga eléctrica [41].

El nivel y carácter de la influencia de las dislocaciones en los parámetros de los dispositivos semiconductores dependen de la orientación y también de la posición de las dislocaciones con respecto a las regiones activas. Los resultados de la investigación de las leyes y de las causas del desplazamiento de las dislocaciones pueden ser aplicados para el desarrollo de los métodos tecnológicos de prevención del desplazamiento de las dislocaciones en las regiones cercanas a las zonas activas del dispositivo. Dichos resultados se publicaron en los trabajos [42,43,44,45, 46, 47, 48, 49].

La investigación teórica de la interacción de una dislocación aislada con la frontera de conjugación de dos medios isótropos con distintos módulos de elasticidad comenzó con el trabajo [50]. El autor encontró una posición de equilibrio de la dislocación situada en un medio suave cerca de la frontera de conjugación. Investigando la interacción de una dislocación aislada con la frontera de conjugación de la película se estableció la influencia del espesor de la película en las coordenadas de la posición de equilibrio de la dislocación.

En el trabajo [51] denotaron que para un lazo de dislocación situado cerca de la frontera de conjugación de las capas de material, el estado de su equilibrio no es estable porque la suma de las fuerzas de Peach-Koehler que actúan en diferentes partes de dicho lazo no es igual a cero.

La interacción de una dislocación aislada situada en un material cubierto con una capa finita fue estudiada en el artículo [52]. El autor del artículo indicó, que en los casos semejantes al caso mencionado anteriormente la dislocación experimenta una fuerza de expulsión de dislocaciones de la capa cuando la capa es mas dura que el material. Pero, cuando la capa es más suave que el material, actúa la fuerza de atracción entre la capa y la dislocación.

4. CONCLUSIONES

1. En el material de las estructuras semiconductoras inevitablemente existen tensiones mecánicas. Las causas principales de dichas tensiones son la diferencia en los coeficientes de la dilatación térmica y la diferencia en los parámetros de la red cristalina de los materiales de las capas conjugadas.
2. Las tensiones mecánicas de los materiales de capas múltiples se describen con las funciones continuas por trozos. Dichas funciones sufren saltos en las fronteras de conjugación de las capas.
3. En todas las estructuras de las capas múltiples de la microelectrónica se presentan dislocaciones, causadas por:
 - presencia de las dislocaciones en el material de base
 - formación de dislocaciones en el transcurso de las operaciones tecnológicas
 - relajamiento particular de las tensiones térmicas
4. Las tensiones mecánicas del material recambian con el cambio de las condiciones externas y producen el desplazamiento de las dislocaciones.

Las dislocaciones influyen significativamente en las propiedades electrofísicas del material. Esta influencia fue observada experimentalmente.

Referencias Bibliográficas

[1] Abermann P., Martinz H.P. Internal stress and structure of evaporated chromium and MgF_2 films and their dependence on substrate temperature. - Thin Solid Films, 1984, v. 115, N 3, p. 185-194.

[2] Draper Bruce L. Stress in sputtered $TaSi_x$ films on polycrystalline silicon. - Appl. Phys. Lett., 1984, v. 44, N°9, p. 863-865.

- [3] Ishida T., Maeda K., Takeuchi S., A study of deformation-produced deep levels in n-GaAs using deep level transient capacitance spectroscopy. - Appl. Phys., 1980, v. 21, N°3, p. 257-261.
- [4] Kataoka Toshihiko, Colombo Luigi, Li J.C.M. Dislocation charge in Ca^{2+} - doped KCl. Effect of impurity concentration and temperature. – Phil. Mag., 1984, v. A49, N 3, p. 409-423.
- [5] Lendvay E., Lattice matched heterolayers. - Lecy. Notes Struct. Proc. Int. School, Matrafüred, Sept. 13-17, 1982, p. 163-179.
- [6] Koji T., Tseng W., Mayer J. Sidewall penetration of dislocations on ion implanted bipolar transistors. – Appl. Phys. Letters, 1978, v. 32, p. 749.
- [7] Schwuttke G.H. Silicon material problems in semiconductor device technology. – Microelectronics and Reliability, 1970, v. 9, N 5, p. 397.
- [8] Koji T., Tseng W., Mayer I., Saganuma T. Effects of CVD oxide on phosphorus diffused emitters in silicon. - IEEE Transact. On El. Dev., v. ED-26, N 9, p. 1310, 1979.
- [9] Isomae S. Dislocation generation at Si_3H_4 film edges on silicon substrates and viscoelastic behavior on SiO_2 films. – J. Electrochemist. Soc., 1979, v. 126, N 6, p. 1014.
- [10] Pavlov E.A. and oth., La influencia en las propiedades eléctricas de las estructuras MOS de los campos locales de las tensiones elásticas en la frontera de conjugación Si- SiO_2 . – Radiotécnica y Electrónica, 1969, V, 14, N. 7, p. 1348.
- [11] Hazel R., Hearn E.W. Mechanical stress and electrical properties of MNOS devices as a function of the nitride de deposition temperature. – J. Electrochemist. Soc., 1978, v. 125, N 11, p. 1848.
- [12] Serebrinsky J.H. Stress concentration in silicon-insulator interfaces. – Solid-State Electronics, 1970, v. 13, N 11, p. 1435.

- [13] Timoshenko S. and J.N. Goodier. – Theory of Elasticity. McGraw-Hill, New York, 1951.
- [14] Matthews J.W., Mader S., Light T. – J. Appl. Phys., 1970, v. 41, N 9, p. 3800-3804.
- [15] Svetlihnyi A.M. Investigación de la influencia de las dislocaciones de incoherencia en las características de las juntas p-n. – Los procesos activables de la tecnología de microelectrónica, Taganrog, 1976, N2, p. 170.
- [16] Gachevski V.A., Soloviev V.A., Shermergor T.D., Distribución de impureza cerca los sistemas de dislocaciones situadas en la región de la frontera. Interacción de los defectos de la red cristalina y propiedades de metales. / Tula, TPI, 1982, p. 12-15.
- [17] Hu S.M., Klepner S.P., Schwenker R.O., Seto D.K. Dislocation propagation and emitter edge defects in silicon wafers. – J. Appl. Phys., 1976, v. 47, N 9, p. 4098-4106.
- [18] Mittennean A., Ghané J.P., André J.P. Defect characterization at the growth interface in GaAs epitaxy by metallographic and chloride depositions. – J. Electron. Matter. 1980, v. 9, N 2, p. 213-229.
- [19] Levine E., Washburn J., Thomas G. Diffusion-Induced Defects in Silicon. – J. Appl. Phys., 1967, v. 38, N 88, p. 81-95.
- [20] Tan T.Y., Tice W.K. Oxygen precipitation and the generation of dislocations in silicon. – Phil. Mag., 1976, N 4, p. 615-631.
- [21] Tungbluth E.D., Wang P. Process introduced structural defects and junction characteristics in NPN silicon epitaxial planar transistors. – J. Appl. Phys., 1965, v. 36, N 6, p. 1967-1973.
- [22] Marcinkowski M.J. The mechanism of cell wall formation. – Phys. Stat. Sol., 1984, v. A83, N 1, p. 59-68.

- [23] Nishizawa J., Oyama Y., Tadano H., Inokuchi K., Okuno Y. Observations of defects in LPE GaAs revealed by new chemical etchant. – J. Crystal Growth, 1979, v. 47, N 3, p. 434-436.
- [24] Glass H.L. Annealing-induced relief of compressive misfit strain in liquid phase epitaxial yttriumiron garnet films. – J. Crystal. Growth, 1977, v. 40, N 2, p. 205-213.
- [25] J. H. Van der Merwe, Proc. Phys. Soc., 1950, v. 63^a, p.616.
- [26] Tamura Masao, Sugita Yoshimitsu. Distribution and character of misfit dislocations in homoepitaxial silicon crystals. – Jap. J. Appl. Phys., 1970, v. 9, N 4, p. 368-375.
- [27] Matthews J.W. Defects associated with the accommodation of misfit between crystals. – J. Vac. Sci. and Technol., 1975, v. 12, N 1, p. 126-133.
- [28] Basson T.H., Ball C.A., On the density of misfit dislocations in double- and triple-layer heterojunction devices. – Phys. Stat. Sol.(a), 1978, v. 46, N 2, p. 707-715.
- [29] Ahearn J.s., Jr., Laird C., Ball C.A.B. The misfit dislocation structure of an InGaAs/GaAs heterojunction with low misfit. – Thin Sol. Films, 1977, v. 42, N 1, p. 117-125.
- [30] Ball C.A.B., Laird C. Energy of dislocation near an epitaxial interface. – Thin Solid Films, 1977, v. 41, N 1, p. 9-13.
- [31] Scholar Richard B. Calculation of misfit dislocations and dangling bond densities in abrupt $Hg_{1-x}Cd_xTe$ heterojunctions. – Proc. Soc. Photo-opt. Instrument Eng., 1983, v. 409: Techn. Issues Infrared Detect. And Arrays Conf., Arlington, Va, Apr. 5-6, 1983, p. 32-34.
- [32] Shinohara K., Hirth J. The behavior of misfit dislocations during interdiffusion. – Thin Sol. Film, 1973, v. 16, p. 345-357.
- [33] Shinohara K., Hirth J. Forces Acting on Misfit Dislocations during Interdiffusion. – Phil. Mag., 1973, v. 27, p. 883-895.

- [34] Ueda Osamu, Komiya Satoshi, Yamazaki Susumi, Kishi Yutaka, Umebu Itsuo, Kotani Tsuyoshi. Transmission electron microscopic observation of misfit dislocations in InP/InGaAsP double-heterostructures. – Jap. J. Appl. Phys., 1984, pt1, v. 23, N 7, p. 836-841.
- [35] Ayensu A., Achbee K.H.G. The creep of quartz single crystals, with special reference to the mechanism by which water accommodates dislocation glide. – Phil. Mag., 1977, v. 36, N 3, p. 713-723.
- [36] Booyens H., Vermaak J.S., Proto G.R. Dislocations and the piezoelectric effect in III-V crystals. - J. Appl. Phys., v. 48, N^o7, p. 3008-3013, 1977.
- [37] Cavalini A., Gondi P., Castaldini A. Dislocation energy levels in Ge. – Phys. Stat. Sol., 1977, v. A43, N 2, p. K205-K208.
- [38] Tan T.Y., Gardner E.E., Tice W.K. Intrinsic getting by oxide precipitate induced dislocations in Chochralski Si. – Appl. Phys. Lett., 1977, v. 30, N 4, p. 175-176.
- [39] Gwinner D., Labusch R. Electrical effects on dislocations in gallium arsenide. - J. Phys., v. 40, Collog. N 6, p. 75-79, 1979.
- [40] Heydenreich J., Blumtrutt H., Gleichmann R., Johansen H. – Phil. Mag., 1953, V. 44, p. 92.
- [41] Collins Nigel. Dislocations and charge flow in the silver halides. – Radiat. Eff., 1983, v. 75, N 1-4: 4 Europhys. Top. Conf. Lattice Defects Ionic Crystal, Dublin, 29 aug. – 3. Sept., 1982, p. 217-226.
- [42] Suzuki K., Ichihara N., Takeuchi S., Nakagawa K., Maeda K., Iwanaga H. In situ TEM observation of dislocation motion in II-VI compounds. – Phil. Mag., 1984, v. A49, N 3, p. 451-461.

- [43] De Lange O.L., Young C.J. Interaction between dislocation arrays. – Phys. Stat. Solidi, 1984, v. A84, N 2, p. 517-526.
- [44] Fuentes-Samaniego R., Gasca-Neri R., Hirth J.P. Solute drag on moving edge dislocations. – Phil. Mag., 1984, v. A49, N 1, p. 31-43.
- [45] Gomez A.N., Hirsch P.B. On the mobility of dislocations in germanium and silicon. – Phil. Mag., 1977, v. 36, N 1, p. 169-179.
- [46] Hu S.M. Dislocation pinning effect of oxygen atoms in silicon. – Appl. Phys. Lett., 1977, v. 31, N 2, p. 53-55.
- [47] Suzuki Takayoshi, Nakamura Kazuo. Dislocation mobility in LiF at low temperatures. – Crystal Res. And Technol., 1984, v. 19, N 6, p. 845-852.
- [48] Tóth A., Keszthelyi T., Kálmán P., Sárközi J. Diffusion model for charge transport by moving dislocations in simple ionic crystals. – Phys. Status Solidi, 1984, v. B122, N 2, p. 501-508.
- [49] Yokobori A.T., Jr., Yokobori T. and Kamei A. Computer simulation of dislocation emission from a stressed source. – Phil. Mag., 1974, v. 30, N 2, p. 367-378.
- [50] Head A.K. The interaction of dislocations and boundaries. – Phil. Mag., 1953, v. 44, p. 92.
- [51] Salamon N.J., Dundurs J.A. A circular glide dislocation loop in a two-phase material. – J. Phys. C: Solid State Phys., 1977, v. 10, N 4, p. 497-507.
- [52] Johnson W. C. Interaction of Dislocation with a misfitting precipitates. – J. Appl. Phys., 1982, v. 53, N 12, p. 33-34.