

## Dislocaciones en material de dispositivos electrónicos

Valeriy Gashevski\*

### Resumen

Las tensiones elásticas relacionadas con dislocaciones cambian varias propiedades del material, y su efecto en características de una estructura cristalina es multiforme.

En el presente artículo se realiza un análisis de los resultados de las investigaciones científicas publicados en las revistas internacionales, relacionadas con dislocaciones en las estructuras de capas múltiples y con la redistribución de impureza en el campo de las tensiones elásticas, relacionadas, a su vez, con dislocaciones y con la influencia de estas tensiones en las vibraciones elásticas.

**Palabras clave:** tensiones elásticas, dislocaciones, impureza, vibraciones.

### Abstract

The dislocations elastic stress changes the various properties of material and its effect in the crystalline structure characteristics is polymorph.

The analysis of scientific results published in the international magazines about the dislocations in the multilayer structures, the redistribution of impurity in the elastic stress field of dislocations end about the influence of this stress in the elastic vibrations is realized.

**Key words:** elastic stress, dislocations, impurity, vibrations.

---

\* PhD, profesor asistente, TC, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, adscrito a la Facultad Tecnológica. Correo electrónico: [vgachevski@udistrital.edu.co](mailto:vgachevski@udistrital.edu.co).

## **Introducción**

El objetivo principal del estudio de las dislocaciones en el material de dispositivos electrónicos es el desarrollo de los métodos de estimación y de cálculo de la influencia de las dislocaciones en propiedades electrofísicas, en las características y en los parámetros de dispositivos semiconductores.

El cambio de dichos parámetros y características es superior bajo, de influencia de grupos de dislocaciones por magnitud de las tensiones elásticas del material, que es mayor en comparación con el valor de las tensiones relacionadas con una dislocación aislada. Cuando los grupos de dislocaciones se sitúan cerca de las regiones activas del dispositivo, las cuales se ubican frecuentemente cerca la frontera de conjugación de las capas de diferentes materiales de la estructura semiconductor, las tensiones elásticas contienen las tensiones de imagen causadas por la diferencia en parámetros de las redes cristalinas de las capas conjugadas. La función de las tensiones elásticas de un grupo de dislocaciones es bastante sofisticada, y los resultados de la influencia de dichas tensiones en las propiedades del material es multiforme. En el presente artículo, se encuentra el análisis de los resultados de las investigaciones teóricas y experimentales publicados en las revistas científicas nacionales e internacionales relacionadas con dislocaciones en las estructuras de capas múltiples y con la redistribución de impureza en el campo de las tensiones elásticas relacionadas, a su vez, con dislocaciones y con la influencia de estas tensiones en las vibraciones elásticas.

### **Grupos de dislocaciones cerca de la frontera de conjugación de las capas del material**

La investigación experimental de los grupos de dislocaciones fue realizada por varios autores [1]. En el trabajo de Kumar Krishna y Takegi Mieko [2], se observaron varios tipos de dislocaciones en las capas epitaxiales del material. Se descubrió el cambio de la estructura de las dislocaciones en la dependencia del espesor de la película epitaxial [3] y el aumento de la densidad de los lazos de las dislocaciones con aumento de concentración de los átomos de impureza [4].

El estudio experimental cuantitativo de la influencia de la frontera de conjugación de las capas del material en comportamiento de grupos de dislocaciones es demasiado complejo. En los artículos publicados, no se encuentran los resultados de las medidas comparativas en las estructuras de capas múltiples, pero, algunos autores señalaron que las dislocaciones causadas por la difusión de *Ga* en el soporte de *Ge* cubierto con  $SiO_2$  se ubican en la capa estrecha con bordes ostensibles.

Los tipos de dislocaciones y de grupos de dislocaciones dependen de los tipos de las redes cristalinas de las capas conjugadas. En materiales tipo  $A^{III}B^V$  se forman mallas de dislocaciones en la frontera de conjugación con orientación (I00). Dichas mallas contienen dislocaciones de dos tipos: (a) de  $60^\circ$ - dislocaciones con vector de Burgers dirigido con ángulo de  $45^\circ$  con respecto a la superficie de conjugación y (b) dislocaciones de borde con vector de Burgers paralelo a la frontera de conjugación [5]. Las dislocaciones se encuentran en las direcciones  $[\bar{1}10]$  y  $[110]$ . Las mallas de dislocaciones que aparecen por la diferencia de parámetros de las redes cristalinas de los materiales conjugados se forman por rectángulos para los planos con orientaciones (I00) y (II0), pero, para los planos (III) las células de la malla son sexángulos equiláteros [6].

Hay una gran cantidad de artículos dirigidos al estudio teórico de las series de dislocaciones. Hartley C. S. [7] dedujo las fórmulas para tensiones elásticas en el caso cuando el plano de deslizamiento de las dislocaciones es paralelo a la superficie libre de un medio isótropo semiinfinito. En el artículo de Honda Katsuhiko [8], se publicaron los resultados del cálculo y de las mediciones experimentales de las distancias entre dislocaciones en una serie, teniendo en cuenta las propiedades anisótropas de los módulos de elasticidad. Saada G [9] describe las fórmulas para calcular los campos de distorsión producidos por una distribución periódica de mallas planas de dislocaciones en un medio anisótropo, suponiendo que los módulos de elasticidad no dependen de las coordenadas y son constantes.

En la investigación teórica, frecuentemente aplican los métodos numéricos usando computadoras [10, 12]. Varios artículos describen los resultados de la simulación numérica del movimiento y de la distribución de las dislocaciones [13-16].

A pesar de que existe un flujo bastante amplio de artículos relacionados con la interacción de las dislocaciones aisladas, y de grupos de dislocaciones con la frontera de conjugación de los materiales con distintos módulos de elasticidad, hay pocos trabajos con análisis de dicha interacción de las series de dislocaciones. En el artículo de Kuang y Mura [17] se calculó la distribución de las dislocaciones en un grupo plano cerca de la frontera de conjugación. Esta frontera se representa con un salto de los módulos de elasticidad. Pero, los autores no tuvieron en cuenta que a veces el grupo de dislocaciones puede cruzar la frontera de conjugación y que las tensiones elásticas pueden tener, en esta frontera, discontinuidad de primera especie. Dicho caso fue analizado en el trabajo de Gachevski, Soloviev y Shermergor [18].

### **Influencia de las dislocaciones en la distribución de impureza en material de dispositivos semiconductores**

La causa de la distribución heterogénea de impureza en las capas de dispositivo electrónico es la interacción de los defectos puntuales con las dislocaciones a través de tensiones elásticas [19]. La influencia de dichas tensiones en el proceso de difusión fue investigada teóricamente en el artículo “Diffusionally modified dislocation-particle elastic interactions” [20]. El efecto de la redistribución de impureza en materiales semiconductores causado por las tensiones elásticas producidas durante los tratamientos térmicos y mecánicos del material está descrito en los artículos “Redistribution of chromium upon post-implant annealing of selenium-implanted GaAs” [21] y “Back surface getting of Au in GaAs” [23]. La redistribución de impureza en el campo de las tensiones elásticas de las dislocaciones y de las series de dislocaciones es una de las causas del cambio de propiedades electrofísicas de los materiales.

Aristov, Bondarenko, Dryomova, Kazmiruk y Yakimov [24], observaron experimentalmente el contraste del microscopio electrónico producido por la redistribución de los defectos puntuales alrededor de las dislocaciones ubicadas cerca de la frontera de conjugación de *p-n* juntura *InGaAsP-InP*. En los trabajos experimentales de Booyens y Basson [25], y Petroff y Kimerling [29], se encuentran datos sobre captura de impureza eléctricamente activa por dislocaciones. En el artículo “Getting of Cr in GaAs by back surface mechanical damage” [30], se describe el aumento de concentración de los átomos de *Cr* en *GaAs* cubierto con una capa de protección. Una de las causas de semejante distribución es la redistribución de impureza en el campo de tensiones elásticas producidas por una serie de dislocaciones situada cerca de la frontera de conjugación [31]. Augustus y Stirland [32], observaron la decoración de dislocaciones con los átomos de impureza en las regiones con diámetro de 0,5-1,0  $\mu\text{m}$  en las muestras de *GaAs*. En el trabajo “Back surface getting of Au in GaAs” [33] está descrita la aglomeración atómica de *Au* cerca de dislocación con un diámetro de  $\sim 10$  nm. Recientemente, lograron desarrollar unos métodos para formar nanoalambres en material dieléctrico, decorando la dislocación con átomos de metal. El desarrollo de la tecnología de introducción controlada de nanoalambres en material de nanoestructuras es el problema del día de hoy.

La interacción de los defectos puntuales con una dislocación aislada es considerable únicamente en una región con tamaño de diez parámetros de la red cristalina cerca de la dislocación. En su artículo, V. Gachevski y Soloviev [31], mostraron que las tensiones elásticas producidas por una serie de dislocaciones pueden causar redistribución de impureza en las regiones con un tamaño significativamente mayor, que a veces es comparable con el tamaño de la estructura semiconductor.

Hasegava y Suga [34], mostraron teórica y experimentalmente la influencia de distribución de impureza cerca de la frontera de conjugación de una película con su soporte en las propiedades electrofísicas del material semiconductor. En el artículo “Combined application of the electrical activity of crystal defect in silicon” [35] afirman que la actividad eléctrica de las dislocaciones depende

de sus orientaciones, del modo de su distribución en el material y del grado de la decoración con los átomos de impureza.

Esaki y Tsu [36], describieron un cambio significativo de las propiedades de semiconductor en el caso de la distribución periódica de impureza con el periodo de  $1,0 - 10 \text{ nm}$ . En el artículo de Gachevski y Soloviev [31] están descritas las distribuciones de impureza en el campo de las tensiones elásticas producidas por una serie de dislocaciones. Estas distribuciones también tienen carácter periódico. El cambio de concentración hasta de 10% en las regiones de  $\sim 10 \text{ nm}$  descrito en este trabajo puede causar un cambio significativo de las propiedades electrofísicas del material cerca de la frontera de conjugación de la película con soporte.

La redistribución de impureza es una de las causas de formación de las regiones activas eléctricamente [37]. Su presencia cerca de los elementos activos de la estructura semiconductor resulta de la degradación del dispositivo electrónico. En los trabajos teóricos de Gachevski y Soloviev [31, 38], usando los programas de cálculo publicados en los artículos de Gachevski [39, 40], se investigó la redistribución de impureza en el campo de las tensiones elásticas producidas por una serie de dislocaciones situada cerca de la frontera de conjugación de las capas del material. Los resultados de dicha investigación mostraron que aparecen regiones amplias con variación significativa de la concentración de impureza.

### **Influencia de las dislocaciones en vibraciones elásticas de un material.**

Las características de emisión de la luz en un material dependen de los parámetros de interacción excitón-fonón; *fonón* es la presentación cuántica de una onda mecánica, o bien de una vibración elástica del material. Por lo tanto, las tensiones elásticas relacionadas con dislocaciones influyen en dichas vibraciones y también en el proceso de emisión de la luz. Casi todas las conclusiones de los artículos experimentales dicen que la calidad del dispositivo electrónico se disminuye con el aumento de la densidad de las dislocaciones en el material [41, 42]. La opinión general sostiene que para

fabricar un diodo láser se requiere que los materiales que conforman las diferentes capas, y el mismo sustrato, no deban tener una gran densidad de las dislocaciones ya que, de lo contrario, el dispositivo alcanzaría a emitir la luz sólo durante segundos, e inclusive fracciones de segundo. Sin embargo, los diodos emisores de la luz azul fabricados con *GaN* han funcionado durante un tiempo relativamente largo, a pesar de tener una gran densidad de dislocaciones hasta de  $\sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  [43, 44]. Este ejemplo muestra que el papel de las dislocaciones en el proceso de emisión de la luz todavía no es claro.

Una dislocación aislada influye en la frecuencia de vibraciones elásticas causando los desplazamientos de las posiciones de equilibrio de los átomos del material [45]. Las tensiones elásticas causadas por una serie de dislocaciones [46] son significativamente mayores en comparación con las tensiones producidas por una dislocación aislada. Fueron realizadas las investigaciones teóricas sobre las series de dislocaciones ubicadas cerca de una frontera de conjugación de dos materiales [14, 15, 47, 51] y sobre los desplazamientos producidos por grupos de dislocaciones [52, 53].

Las series y los grupos de dislocaciones causan desplazamientos mayores en comparación con el caso de una dislocación aislada, porque, en cada punto del espacio, se suman las tensiones elásticas producidas por todas las dislocaciones según el principio de superposición [14, 47, 48, 50, 51]. Es lógico suponer que la influencia de grupos de dislocaciones en el espectro de fonones también es mayor y, como consecuencia, dichos grupos influyen también significativamente en la interacción excitón-fonon y en el proceso de emisión de la luz.

Las características del material cerca de una dislocación son distintas de las características en el caso de la red cristalina no deformada. Cuando las dislocaciones ocupan el volumen de una región del material se puede hablar sobre una superred formada por dislocaciones. Una serie de dislocaciones paralelas se puede imaginar como modelo unidimensional de dicha superred cuando esta serie se ubica en una capa angosta del material.

Con base en los resultados publicados en los artículos de Gachevski [48-51, 56], y en el de Baquero, Rodríguez y Gachevski [53], se pueden deducir las fórmulas de desplazamientos y de las

tensiones elásticas producidas por grupos de dislocaciones, deducir las ecuaciones de oscilaciones de los átomos de un cristal, y también se puede realizar el análisis de dichas ecuaciones para diferentes tipos de distribución de las dislocaciones en el volumen del cristal y para diferentes materiales semiconductores con el fin de establecer los espectros de las vibraciones en dichos materiales.

La investigación experimental y teórica de las dislocaciones y de su influencia en las características de los materiales se ha venido realizando durante muchos años. Todavía no se ha agotado el interés de los investigadores en dicho tema [57]. Algunas observaciones experimentales y el cálculo teórico del campo de los desplazamientos de una dislocación aislada que se ubica en la frontera de conjugación de dos materiales están descritos en el artículo de Belk, Pashley y Jouce [58]. En este cálculo, los autores usaron las fórmulas de los desplazamientos de una dislocación aislada, pero en uno de los dibujos aparece una serie de dislocaciones que se ubica exactamente en la frontera de conjugación de las capas. Es un error, porque los autores no tuvieron en cuenta las fuerzas de imagen. Gachevski, Soloviev y Shermergor [15] mostraron que en el caso de una serie de dislocaciones las fuerzas de interacción de las dislocaciones con sus imágenes desplazan dicha serie en el material que tiene menores valores de los módulos de elasticidad. En el artículo “Elasticity theory of straight dislocations in a multilayer” [59] está descrito el cálculo de desplazamientos de los átomos en el campo de tensiones elásticas de una dislocación aislada en una estructura de capas múltiples a través de desarrollo automático y la solución posterior del sistema de las ecuaciones. El método desarrollado por el autor de dicho artículo es aplicable sólo con el uso de computadoras de alta eficiencia, porque el número de las ecuaciones es bastante grande. Propiedades de hamiltoniano de un cristal con el defecto lineal e impureza se dan en los trabajos de Rebane y Steeds [60], y Rebane [61].

El espectro de fonones depende del campo de los desplazamientos de las posiciones de equilibrio de los átomos de la red cristalina causado por las tensiones elásticas. Unos de los primeros resultados del estudio teórico de dicha influencia se encuentra en el texto “The dynamics of a crystal lattice with

defects” [62]. Los trabajos recientes dedicados a las vibraciones de un cristal deformado muestran que las propiedades de un átomo aislado de impureza se puede estudiar aplicando la aproximación de la función de Green [63]. Estimando la influencia de presión en la frecuencia de fonones [64] y estudiando teóricamente el sistema electrón-fonon casi uno dimensional acoplado por el potencial de deformación [65]. Los trabajos de Ostanin, Salamatov y Trubitsin [64], y Komirenko, Kim, Stroschio y Kochelap [65] se pueden tomar como los primeros pasos de la investigación previa de la influencia de la deformación de la red cristalina en los detalles de la interacción excitón-fonon y en el proceso de emisión de la luz.

Los científicos empezaron a estudiar la influencia de una dislocación aislada en la dinámica de la red cristalina hace unos años. En el artículo “The dynamics of a crystal lattice with defects” [62] los autores aplicaron los métodos matemáticos a la investigación teórica de las vibraciones elásticas de un material deformado y calcularon los espectros de vibraciones elásticas de la red cristalina deformada por varios defectos: por un átomo de impureza, por una dislocación aislada y por un defecto plano. En el caso de una dislocación aislada, encontraron las frecuencias de las vibraciones elásticas localizadas en la región cercana de dislocación. Posteriormente, estos resultados fueron precisados. La teoría de las vibraciones de un material con una dislocación aislada usando la aproximación de continuo fue publicada en el artículo de Iosilevski [66]. Los resultados del artículo de Maradudin [45] fueron obtenidos teniendo en cuenta la anisotropía del material. En el trabajo de Tewary [67] el autor realizó el cálculo a través de los desplazamientos de las posiciones de equilibrio de cada uno de los átomos situados en los cilindros cercanos al eje de la dislocación. En otros artículos, usaron los métodos de la mecánica cuántica para el estudio de las vibraciones cerca de una dislocación aislada en los casos de una dislocación de tornillo [68, 69] y de una dislocación de borde [70, 71]. La diferencia entre las aproximaciones de los artículos de Dubrovskii y Kovalev [68], y Dubrovskii [71] está en los órdenes de los módulos de elasticidad usados en los cálculos. En estos artículos están descritas las fórmulas para las frecuencias de las vibraciones elásticas atrapadas en la región de la red cristalina deformada.

Los resultados de la investigación teórica de las vibraciones elásticas cerca de una dislocación aislada, teniendo en cuenta la interacción de dicha dislocación con los átomos de impureza distribuidos aleatoriamente en el volumen de un cristal, fueron publicados en el artículo “Oscillatory spectrum of dislocations interacting with impurities” [72]. Realizando el análisis teórico detallado, los autores demostraron que el espectro de vibraciones, en este caso, tiene carácter aleatorio y depende de los detalles de la distribución de los átomos de impureza. Los autores realizaron el cálculo bajo la suposición de que la distribución de impureza cerca de una dislocación es aleatoria pero homogénea. Esta suposición es incorrecta. En el libro de Hirth y Lothe [46] está escrito que la distribución de impureza cerca de una dislocación es heterogénea y existen las regiones de enriquecimiento y de empobrecimiento de la concentración de impureza.

La influencia de dislocaciones en otras características del material también fue estudiada. En el texto de Natsik y Smirnov [73] están descritos los detalles de la influencia de las dislocaciones en la capacidad calorífica de un cristal en la zona de temperaturas bajas. Los autores muestran que el cambio de la densidad espectral de un cristal es causado por los tres factores básicos:

- (1) Por la presencia en el espectro vibratorio de modos específicos que se llaman fonones de dislocaciones.
- (2) Por la presencia del campo estático de las tensiones elásticas de dislocaciones.
- (3) Por la presencia de modos de vibraciones localizados en la región cercana de las dislocaciones.

La interacción de los portadores de carga con las dislocaciones también sirvió como objeto del estudio. La dispersión de los electrones de conductividad por una dislocación de tornillo aislada fue descrita en los artículos de Stehle y Seeger [74, 75] basándose en la ecuación deducida en el texto de, Nabarro [76]. Dubrovskii [77] desarrolló la ecuación efectiva ondulatoria para electrones en un cristal que contiene las dislocaciones de tornillo paralelas entre sí. Pero, con base en dicha dislocación, el autor logró analizar teóricamente el espectro energético de los electrones [78] y la dispersión de los

electrones [79] en un cristal que tiene solamente una dislocación de tornillo aislada por causa de la complejidad de las ecuaciones diferenciales. Los resultados obtenidos en los artículos de Dubrovskii [77, 79] son aplicables sólo para las regiones que están bastante lejos de la dislocación, donde el cambio del campo de desplazamientos con el cambio de coordenadas es tan suficientemente lento que permite, en este caso, reemplazar las derivadas espaciales de las funciones de desplazamiento por sus valores medios.

La evolución del problema de la influencia de dislocaciones en las vibraciones elásticas se relaciona, en general, con la evolución del problema de la influencia de una dislocación aislada en dichas vibraciones. Todos los autores han usado el mismo método desarrollando la ecuación de onda, para lo cual han tenido en cuenta los desplazamientos de las posiciones de equilibrio de los átomos de la red cristalina, la interacción de los átomos entre sí y, también, la interacción de los átomos con el campo elástico de dislocación. La diferencia en los resultados aparece por el uso de diferentes aproximaciones para calcular los desplazamientos, por varias aproximaciones de las características de cristal y por diferentes órdenes de los módulos de elasticidad usados en los cálculos. En los primeros trabajos, los autores usaron aproximaciones más simples porque cada aproximación más exacta lleva a ecuaciones más sofisticadas con más dificultades en sus soluciones. Por esta misma causa, también se demoró la investigación de la influencia de grupos de dislocaciones en vibraciones elásticas.

Los primeros resultados de la investigación de la influencia de los grupos de dislocaciones en las vibraciones elásticas fueron publicados en los artículos de Gachevski [54, 56]. En el artículo “Local vibrations in a crystal with a lineal screw dislocation” [68] el autor anunció el cambio de las frecuencias de las vibraciones cerca de una dislocación aislada hasta 1%. Gachevski [56], demostró que la variación de las frecuencias de las vibraciones en presencia de las dislocaciones distribuidas en el volumen de un continuo elástico alcanza un 9%. Esta comparación muestra la importancia de la investigación de la influencia de los grupos de dislocaciones en las vibraciones elásticas.

Teniendo en cuenta el problema mencionado, se puede hablar de una investigación del movimiento de una partícula (en este caso fonon) en un campo potencial de una forma bastante compleja (el campo de las tensiones elásticas de un grupo de dislocaciones). Se puede encontrar analogía con un problema de mecánica cuántica sobre una partícula atrapada en un pozo o en un alambre cuántico, porque las tensiones elásticas mayores de un valor crítico no permiten a las fonones penetrar las regiones cercanas de las líneas de dislocaciones.

La investigación de la influencia de grupos de dislocaciones en las vibraciones elásticas requiere la aplicación de los mismos métodos que fueron usados en los trabajos científicos relacionados con la influencia de una dislocación aislada. La esencia de dichos métodos está en el desarrollo y en la solución de la ecuación de onda basándose en los métodos de las ecuaciones diferenciales de las derivadas parciales [80], en los métodos de mecánica cuántica [81] y en los métodos de la física teórica de estado sólido [82, 84]. Para el cálculo de los desplazamientos de los átomos o para el cálculo de las tensiones elásticas deben ser aplicados los métodos de la teoría de elasticidad [85, 86] y los métodos de la teoría de dislocaciones [46]. Durante el análisis de las vibraciones elásticas no estacionarias en las regiones muy cercanas a los ejes de dislocaciones deben ser usados los métodos asintóticos [87], porque en estas regiones el cambio de las derivadas de los desplazamientos con el cambio de coordenadas es significativo y no es correcto reemplazar dichas derivadas por sus valores medios locales.

## **Conclusiones**

1. El nivel de influencia de las dislocaciones en las características y en los parámetros de los dispositivos semiconductores depende de la posición y también de la orientación de las dislocaciones con respecto a las regiones activas del dispositivo. Las dislocaciones cercanas a las regiones activas influyen más que las dislocaciones lejanas de dichas regiones.

2. La distribución de las dislocaciones en el material, generalmente, tiene carácter heterogéneo. Existen posiciones de equilibrio donde se encuentran grupos de dislocaciones. Las coordenadas de dichas posiciones dependen de las tensiones mecánicas de la estructura y también de la orientación de vectores de Burgers de las dislocaciones.

3. Las tensiones elásticas causadas por las dislocaciones influyen en la distribución de la impureza. La redistribución de la impureza en material semiconductor cambia sus propiedades electrofísicas.

4. Las tensiones de imagen causadas por la diferencia en los módulos de elasticidad y en los parámetros de las redes cristalinas de los materiales conjugados actúan en las dislocaciones y en los átomos de impureza situados cerca de la frontera de conjugación de las capas de la estructura semiconductor. A su turno, la influencia de las tensiones elásticas de una serie de dislocaciones paralela a la frontera de conjugación es mayor en comparación con la influencia de una dislocación aislada.

5. Los resultados del cálculo teórico tanto de la distribución de las dislocaciones como de la distribución de impureza, teniendo en cuenta las tensiones de imagen, pueden ser aplicados para el estudio de la influencia de las dislocaciones en las propiedades electrofísicas del material.

6. Las tensiones elásticas relacionadas con dislocaciones y con grupos de dislocaciones cambian los espectros de vibraciones elásticas del material. Aparecen los modos de oscilaciones estables localizadas cerca de las líneas de dislocaciones. El espectro continuo de vibraciones en un material no deformado se convierte en presencia de dislocaciones en el espectro discreto.

7. El siguiente paso importante en el estudio de vibraciones es la investigación de oscilaciones de un átomo de impureza en el campo de tensiones elásticas de una dislocación de borde.

## Referencias bibliográficas

- [1] Arata H, Sato J, Suzuki J. Dislocation network introduced by diffusion of phosphorus in silicon. Phys. Abstr. 1966; 69 (823). pp. 21051-21056.
- [2] Kumar K, Takegi M. X-ray topographic study of defects on GaAs epi-layers grown by liquid phase epitaxial method. Jap. J. Appl. Phys. 1977; 16 (6). pp. 957-964.
- [3] Ahearn JS, Leard C. Transmission electron microscopy observations of misfit dislocations in GaAs epitaxial films. J. Mater. Sci. 1977; 12 (4). pp. 699-707.
- [4] Kotani T, Ueda O, Akita K, Nishitani Y, Kusunoki T, Rauzan O. Direct observation of defects in Si-doped and Ga-doped  $\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$  epitaxial layers by transmission electron microscopy. J. Crystal Growth 1977; 38 (1). pp. 85-92.
- [5] Bartels WJ, Nijman WJ. Asymmetry of misfit dislocations in the heteroepitaxial layers on (001) GaAs substrates. J. Crystal Growth 1971; 37 (3). pp. 204-214.
- [6] Holt DB. Misfit dislocations in semiconductors. J. Phys. Chem. Sol. 1966; 27 (6/7), pp. 1053-1067.
- [7] Hartley CS. The stress fields of uniformly spaced infinite edge dislocation arrays in a semi-infinite isotropic solid. Scr. Met. 1969; 3. p. 607.
- [8] Honda Katsuhiko. Configurations, formation and Burgers vectors of coupled dislocations straddling a polygon wall in white tin single crystals. Jap. J. Appl. Phys. 1978; 17 (1), pp. 33-41.
- [9] Saada G. Elastic field of planar periodic dislocation networks in anisotropic materials. Phil. Mag. 1976; 16. pp. 755-759.
- [10] Marcinkowski MJ. Computer techniques employed in dislocation analyses. Adv. Mater. Res. 1971; 15. pp. 443-492.
- [11] Rosenfield AR., Hahn G.T. Linear arrays of misfit dislocations piling-up against an obstacle. Acta Met. 1968; 16. pp. 755-759.
- [12] Turunen MJ. Simulation of dislocation movements by a computer technique. Phil. Mag. 1974; 30, (5), pp. 1033-1041.

- [13] Yokobori AT, Yokobori T, Kamei A. Generalization of computer simulation of dislocation emission under constant rate of stress application. *J. Appl. Phys.* 1975 septiembre; 46 (9). pp. 3720-3724.
- [14] Zaitsev SI., Nadgornii EM. The movement of double-ended dislocations arrays through discrete obstacles. *Phys. Stat. Sol. (a)* 1975; 27 (49), pp. 49-59.
- [15] Gachevski V, Soloviev VA, Shermergor TD. Distribución de las dislocaciones cerca de la frontera de conjugación de las capas de estructuras semiconductoras. *Fundamentos físicos de microelectrónica*; 1979. pp. 29-36.
- [16] Gachevski V, Soloviev VA. Migración de las redes de dislocaciones en los materiales estratiformes. *Técnica electrónica, I. Electrónica de Súper Alta Frecuencia (SHF)*. 1981; 4. pp. 15-16.
- [17] Kuang JG, Mura T. Dislocation pile-up in two-phase materials. *J. Appl., Phys.* 1968 enero; 39 (1), pp. 109-120.
- [18] Gachevski V, Soloviev VA, Shermergor TD. Distribución de dislocaciones en el campo de las tensiones elásticas a trozas. *Fundamentos físicos de microelectrónica*; 1979. pp. 37-45.
- [19] Chernov VM, Ivanov VV. The influence of elastic anisotropy on interaction of dislocations with point defects in BCC metals. *Crystal Res. And Technol* 1984; 19 (6), pp. 747-756.
- [20] Srolovitz DJ, Luton MJ, Petkovic-Luton R, Barnett DM, Nix WD. Diffusionally modified dislocation-particle elastic interactions. *Acta Met.* 1984; 32 (7), pp. 1079-1088.
- [21] Evans A, Deline VR, Evans Charles, Sigmon TW, Lidow Alexander. Redistribution of chromium upon post-implant annealing of selenium-implanted GaAs. *IEEE Trans. Electron. Devices* 1979; 26 (11). p. 1853.
- [22] Magee TJ, Peng J, Hong JD, Deline VR, Evans CA. Alloying of Au layers and redistribution of Cr in GaAs. *Appl. Phys. Lett.* 1979; 35 (8), pp. 615-617.
- [23] Magee TJ, Peng J, Hong JD, Katz W, Evans CA. Back surface getting of Au in GaAs. *Phys. Stat. Sol.* 1979; A55 (1), pp. 161-168.

- [24] Aristov VV, Bondarenko IE, Dryomova NN, Kazmiruk VV, Yakimov EB. The EBIC contrast of dislocation slip planes in silicon. *Phys. Stat. Solidi* 1984; A84 (1), pp. K43-K45.
- [25] Booyens H, Basson JH. Piezoelectrically induced charge distributions around dislocations in CdTe and HgCdTe. *Phys. Stat. Sol.* 1984; A85 (1), pp. 243-248.
- [26] Fuentes-Samaniego R, Hirth JP. Excess solute atmospheres carried by a potential well characteristic of a moving dislocation core. *Phys. Stat. Sol.* 1984; B125 (1), pp. 147-154.
- [27] Kataoka Toshihiko, Colombo Luigi, Li JCM. Direct measurements of dislocation charges in Ca<sup>2+</sup>-doped KCl by using large electric fields. *Phil. Mag.* 1984; A49 (3), pp. 395-407.
- [28] Kataoka Toshihiko, Colombo Luigi, Li JCM. Dislocation charges in Ca<sup>2+</sup>-doped KCl. Effects of impurity concentration and temperature. *Phil. Mag.* 1984; A49 (3), pp. 409-423.
- [29] Petroff PM, Kimerling LC. Dislocations climb model in compound semiconductors with zinc blend structure. *Appl. Phys. Lett.* 1976; 29, (8), pp. 461-463.
- [30] Magee TJ, Peng J, Hong JD, Evans CA, Deline VR. Getting of Cr in GaAs by back surface mechanical damage. *Phys. Stat. Sol.* 1979; A55 (1). pp. 169-172.
- [31] Gachevski V, Soloviev VA. Distribución de impureza en el campo de tensiones elásticas de la red de dislocaciones en la región de heterounión con la frontera ostensible. *Técnica electrónica, I. Electrónica de Súper Alta Frecuencia (SHF)*; 1984 (6). pp. 32-33.
- [32] Augustus PD, Stirland DJ. Microscopy of semi-insulating gallium arsenide, - I. *Micrisc. (Gr. Brit.)*. 1960; 118 (1). pp. 111-116
- [33] Magee TJ, Peng J, Hong JD, Evans CA, Deline VR, Malkon RM. Back surface getting of Au in GaAs. *Phys. Sstat. Sol.* 1979; A55 (1). pp. 161 - 168.
- [34] Hasegava F, Suga M. Effects of doping profile on the conversion efficiency of a Gunn diode. *IEEE Tran. On Electron. Dev.* 1972; 19 (1). pp. 26-37.
- [35] Heydenich J, Blumtrutt H, Gleichmann R, Johansen H. Combined application of the electrical activity of crystal defect in silicon. *Scann Electron Micrisc.* 1981; 1 (1). pp. 351-365.

- [36] Esaki L, Tsu R. Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors. *J. IBM Res. Develop.* 1970; 14. pp. 61-75.
- [37] Ikuta Kenji, Ohara Takahito. Lifetime evaluation of denuded zone quality and intrinsic gettering effect on heavy metals. *Jap. J. Appl. Phys.* 1984; 23 (8). pp. 984-990.
- [38] Gachevski V, Soloviev VA. Distribución de la impureza en la región de los sistemas de dislocaciones cerca de la frontera de las capas de material. *Memorias de la V Conferencia Interacción de los defectos de la red cristalina y propiedades de los materiales*, Tula; 1982. pp. 12-15
- [39] Gachevski V. Programa del cálculo de la distribución de impureza en la región de la heterounión ostensible. *Técnica electrónica, I. Electrónica de Súper Alta Frecuencia (SHF)*. 1983; 7. pp. 67-68.
- [40] Gachevski V. Programa del cálculo de la distribución de impureza y de trazo de las líneas de concentración constante cerca de la frontera de conjugación de las capas del material. *Técnica Electrónica, I. Electrónica de Súper Alta Frecuencia (SHF)*. 1983; 8. p p. 67-68.
- [41] Koji T, Tseng W, Mayer J. Sidewall penetration of dislocations on ion implanted bipolar transistors. *Appl. Phys. Letters* 1978; 32. p. 749.
- [42] Koji T, Tseng W, Mayer I, Saganuma T. Effects of CVD oxide on phosphorus diffused emitters in silicon. *IEEE Transact. On El. Dev.* 1979; 26 (9), p. 1310.
- [43] Lester SD, Ponce FA, Crawford MG, Steigerwald DA. High dislocation densities in high efficiency GaN-based light-emitting diodes, *Appl. Phys. Lett.* 1995; 66 (10). pp. 1249-1251.
- [44] Ponce FA, Bour DP. Nitride-based semiconductors for blue and green light-emitting devices. *Nature*. 1997; 386. pp. 351-359.
- [45] Maradudin AA, *Fundamental Aspects of Dislocation Theory*, Nat. Bur. Stand.(US), Spec. Publ. 1970; 317. pp. 205-217.
- [46] Hirth JP, Lothe J. *Theory of dislocations*. Second edition. Krieger Publishing Company. Malabar, Florida; 1999 (19). pp. 731-734.

- [47] Gachevski V, Soloviev VA. Distribución de las dislocaciones cerca de la frontera de conjugación de las capas de las estructuras semiconductoras. Memorias de la VIII Conferencia de la URSS sobre Microelectrónica, 1978.
- [48] Gachevski V. Tensiones elásticas producidas por la serie de dislocaciones en las estructuras multicapas. XVII Congreso Nacional de Física, Medellín; 1997.
- [49] Gachevski V. Dislocaciones, series de dislocaciones, tensiones elásticas y redistribución de impureza en las estructuras multicapas. XVII Congreso Nacional de Física, Medellín; 1997.
- [50] Gachevski V. La serie de dislocaciones en estructura de tres capas. Revista Colombiana de Física 1996; 2. pp. 281-284.
- [51] Gachevski V. La serie de dislocaciones en estructura de tres capas. Resúmenes de la II Escuela de Física de la Materia Condensada, Bogotá: JU-P01; 1996.
- [52] Soloviev VA, Rusakova PA, Gachevski V. Desplazamientos elásticos cerca de las acumulaciones planas de las dislocaciones. Contraste electronomicroscópico de los defectos tipo de acumulación. Informes de la Academia de Ciencias de la URSS. Física 1978; 239 (6). pp. 1327-1330.
- [53] Aya Baquero H, Rodríguez J, Gachevski V. Desplazamientos en el campo de las tensiones elásticas producidas por una serie de dislocaciones. XVIII Congreso Nacional de Física. Bogotá; 1999.
- [54] Gachevski V. Phonons in superlattice formed by screw dislocations. XV Symposium on Solid State Physics, SLAFES-XV. Cartagena; 1999.
- [55] Rodríguez J, Aya Baquero H, Gachevski V. Dislocations and lattice vibrations. XV Symposium on Solid State Physics, SLAFES-XV. Cartagena; 1999.
- [56] Gachevski V. Vibrations in Elastic Continuum with Uniform Distribution of Dislocations. Phys. Stat. Sol. (b) 2000; 220 (1), pp. 765-768.
- [57] François Leonard, Rashomo C- Dessai. Spinoidal decomposition and dislocation lines in thin films and bulk materials- Phys. Rev. B 1998; 58 (13), pp. 8277-8288.

- [58] Belk JG, Pashley DW, Jouce BA. Dislocation displacement field at the surface of InAs thin films grown on GaAs (110). *Phys. Rev. B* 1998; 58 (24), pp. 16194-16201.
- [59] Bonnet R., Elasticity theory of straight dislocations in a multilayer. *Phys. Rev. B* 1998; 53 (16), pp. 10978-10982.
- [60] Rebane YT, Steeds JW. Topological Interaction of Coulombic Impurity Centers with Dislocations in Semiconductors. *Phys. Rev. Letters* 1995; 75 (20), pp. 3716-3719.
- [61] Rebane YT. Gauge properties of k-p Hamiltonians for crystals with linear topological defects. - *Phys. Rev. B* 1995; 52 (3), pp. 1590-1595.
- [62] Lifshutz IM, Kosevich AM. The dynamics of a crystal lattice with defects, *Rept. Progr. Phys.* 1966; 29.(1). pp. 217-254.
- [63] John J. Sinai. Real-space Green's-function approach applied to the phonon spectra of isolated impurities. *Phys. Rev. B* 1996; 54 (11). pp. 7937-7944.
- [64] Ostanin SA, Salamatov EI, Trubitsin VYu. Pressure effect on the transverse  $\Gamma$ -point optical phonon in hep Zr. *Phys. Rev. B* 1998; 58 (24), pp. R15962-R15964.
- [65] Komirenko SM, Kim KW, Stroschio MA, Kochelap VA. Renormalization of acoustic phonon spectra and rudiments of the Peierls transition in free-standing quantum wires. *Phys. Rev. B* 1998; 58 (24), pp. 16360-16368.
- [66] Iosilevski YaA. The Dynamics of the simple lattice with lineal defects. *Phys. of Solid State* 1968; 10 (8), pp. 2531-2534.
- [67] Tewary VK. Lattice dynamics of a solid with screw dislocations. *J. Phys., C: Solid State Phys.* 1974; 7 (2), pp. 261-278.
- [68] Dubrovskii IM, Kovalev AS. Local vibrations in a crystal with a lineal screw dislocation. *Low Temperature Physics* 1976; 2 (11), pp. 1483-1489.
- [69] Kosevich AM. Long-wave quasiparticle states localized at screw dislocation. *Low Temperature Physics* 1978; 4 (2), pp. 903-914.

- [70] Lifshitz IM, Pushkarov KhI. Excitations localized at the crystals with dislocations. Letters of J. of Experimental and Theoretical Physics 1970; 11. pp. 456-459.
- [71] Dubrovskii IM. A new variation method in the problem on the spectrum of elementary excitations in an edge-dislocation crystal. Low Temperature Physics 1997; 23 (12), pp. 1300-1304.
- [72] Natsik VD, Smirnov SN. Oscillatory spectrum of dislocations interacting with impurities. Low Temperature Physics 1988; 14 (1), pp. 172-179.
- [73] Natsik VD, Smirnov SN. On dislocation contribution to low temperature heat capacity of crystal. Low Temperature Physics 1992; 18 (2), pp. 185-194.
- [74] Stehle H, Seeger A. Zs. Phys. 1956; 146. p. 217.
- [75] Seeger A, Stehle H. Zs. Phys. 1956; v. 146, p. 242.
- [76] SC, Nabarro FRN. Proc. Roy. Soc. 1953; A220. p. 542.
- [77] Dubrovskii IM. Effective wave equation for electrons in a crystal containing parallel screw dislocations. Ukrainian J. of Physics 1974; 19 (7), pp. 1107-1113.
- [78] Dubrovskii IM. Energy spectrum of electrons in a crystal containing a screw dislocation. Ukrainian J. of Physics; 20 (9). pp. 1535-1541.
- [79] Dubrovskii IM. Conduction electrons scattering by screw dislocation. Ukrainian J. of Phys.; 20 (9). pp. 1529-1534.
- [80] Sommerfeld A. Partial differential equations in physics. New York y Londres: Academic Press; , 1964.
- [81] Robinett RW. Quantum mechanics. New York, Oxford: Oxford University Press; 1997.
- [82] Kittel Ch. Theory of solid state. USA; 1996.
- [83] Peter YYu, Cordona Manuel. Fundamental of semiconductors. Berlin: Springer; 1996.
- [84] Kossevich A. The crystal lattice. Wiley-VCH; 1999.
- [85] Sommerfeld A. Mechanics of deformable bodies. New York and London: Academic Press; 1964.
- [86] Mura T. The continual theory of dislocations. Adv. Mat. Res. 1968; 3. p. 95.

[87] Bogoliubov NN, Mitropol'ski Ju.A. Los métodos asintóticos en la teoría de las oscilaciones no lineales. Nauka M.; 1974.