

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен метод исследования явления многократного рассеяния на движение канализованных частиц, развитый на основе точно решенной нестационарной задачи о броуновском движении квантового осциллятора.

2. Точно решена квантовомеханическая задача о прохождении частиц через фильтр, ограничивающий максимальное значение поперечного импульса. С помощью этой задачи вычислена вероятность захвата частиц в резонанс канализованным.

3. Получено доказательство предположения Липшица о возможности наступления статистического равновесия потока канализованных частиц.

4. Построена статистическая (тепловая) теория эффекта канализованности в области больших глубин проникновения.

5. Выполнены экспериментальные исследования, подтверждающие развитие в работе предположений о явлении многократного рассеяния на движение канализованных частиц.

6. Исследована динамика термического отжига радиационных нарушений арсенида галлия, облученного ионами серы.

Материалы диссертации были представлены и докладывались на X-XIV Всесоюзных совещаниях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (1980-1984 гг. - Москва).

По результатам выполненных исследований опубликовано 4 статьи и тезисы, 7 докладов.

В заключении автор приносит глубокую благодарность профессору Чернову И.П., к.ф.-и.н. Кречкову В.В. и Телюшникову Ю.А. за научное руководство работой, Веригину А.А. и Болыко Е.В.

за помощь в проведении эксперимента, а также всем сотрудникам лаборатории № 21 за дружескую поддержку и внимание.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Линдхард И. Влияние кристаллической решетки на движение быстрых заряженных частиц. - УФН, 1969, т.99, вып.2, с.249 - 296.
2. Gemmel D.S. Channeling and Related Effects in the Motion of Charged Particles through Crystals. - Rev.Mod.Phys., v.46, p.129 - 214.
3. Koruelsen E.V., van Gorkum A.A. Enhanced Penetration of Low Energy (25eV - 500eV) Helium Along the $\langle 100 \rangle$ Channel in Tungsten. - Nucl.Instr.Meth., 1980, v.170, p.161 - 170.
4. Uggerhoj E. Channeling in the GeV - Region. - Nucl.Instr.Meth., 1980, v.170, p.105 - 113.
5. Ахизер А.И., Шульга И.Ф. Излучение релятивистских частиц в монокристаллах. - УФН, 1982, т.137, вып.4, с.561 - 604.
6. Базилев В.А., Зеваго Н.К. Генерация интенсивного электромагнитного излучения релятивистскими частицами. - УФН, 1982, т.137, вып.4, с.605 - 662.
7. Tulinov A.F. On a Study of the Directional Phenomena for the Nuclear Physics Aims. - В сб: Труды VII Международной конференции по атомным столкновениям в твердых телах. - МГУ, 1981, с.11 - 23.
8. Cheschenin N.G. et.al. Lifetimes of the Nuclei Formed by Deuterons Bombardment of ^{235}U - Nucl.Instr.Meth., 1980, v.170, p.145 - 149.
9. Водопьянов А.С. и др. Управление траекториями заряженных частиц с помощью изогнутого кристалла. - Письма в ЖЭТФ, 1979, т.30, вып.7, с.474 - 478.
10. Андреев В.А. и др. Фокусировка пучка ИГВ-ных протонов при объемном захвате в режиме каналирования изогнутых кристаллом. - Письма в ЖЭТФ, 1984, т.39, вып.2, с.58 - 61.
11. Каган Е.М., Кононец В.В. Теория эффекта каналирования. -

- ЖЭТФ, 1970, т.56, с.226 - 244.
12. Рябов В.А. Многократное рассеяние каналированных частиц. - ЖЭТФ, 1972, т.64, вып.3(9), с.1096 - 1102.
13. Kuzakhov M.A. The Theory of Channeling at Small Depths. - Radiat.Eff., 1975, v.26, p.43 - 48.
14. Рожков В.В. О Кинетическом описании каналированных частиц. - Вопросы Атомной науки и техники, серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение, ЖЭТФ, Харьков, 1976, вып.1(3), с.5 - 7.
15. Гавраленко Г.М., Михалке Д., Седянин В.К. Фоккер-Планковское уравнение для описания термализации пучков энергетических частиц при каналировании. - Препринт ОИЯИ Р17-80-814, Дубна, 1980, 19с.
16. Калменский А.Г., Самарин В.В. Эволюция функции распределения сверхканализированных частиц. - Труды XI Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. - МГУ, 1982, с.146 - 150.
17. Ольховский И.И., Садиков Н.М. Классические кинематические уравнения для ориентационных эффектов с учетом двухчастичной корреляционной функции кристалла. - Труды XI Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. - МГУ, 1981, с.173 - 180.
18. Kuzakhov M.A., Fedell R. Theory of Channeling of Relativistic Particles. - Phys.Stat.Sol.(b), 1979, v.92, p.65 - 71.
19. Молодкин В.Б., Новацкий В.Г. Квантовая теория каналирования в упорядочивающихся сплавах. - Препринт ИМО 79.8, Киев, 1979, 41с.
20. Кухаренко Ю.А. О квантовой теории каналирования. - Тезисы докладов XII Всесоюзного совещания по физике взаимодействия за-

ржаенных частиц с кристаллами. - МГУ, 1982, с.26.

21. Каган Ю.М., Кононец Д.В. Теория эффекта каналирования. Влияние неупругих столкновений. - ЖЭТФ, 1973, т.64, с.1042 - 1064.
22. Рябов В.А. Квантовая теория неупругого рассеяния каналированных частиц. - ЖЭТФ, 1974, т.67, м.150 - 162.
23. Рябов В.А. Теория осевого каналирования электронов. - ЖЭТФ, 1982, т.82, вып.4, с.1176 - 1187.
24. Bonderup E. Calculations on Axial Dechanneling. - Radiat. Eff., 1972, v.12, p.261 - 266.
25. Кумыхов М.А., Ширмер Г. Атомные столкновения в кристаллах. - М.: Атомиздат, 1980, 192с.
26. Matsunami N., Howe L.N. A Diffusion Calculation of Axial Dechanneling in Si and Ge. - Radiat.Eff., 1980, v.51, p.111 - 126.
27. Fearick R.W., Sellshop J.P.F. Some Solutions of the Diffusion Models of Dechanneling. - Phys.Lett., 1982, v.91, №6, p.313 - 315.
28. Golovshenko J.A. A Few Analytical Solutions to the Linear Boltzman Transport Equation with an Application to Channeling. - Phys.Rev. B, 1976, v.13, №11, p.4672 - 4682.
29. Кульга Н.А., Трутень В.И., Фомин С.П. Ориентационные эффекты при взаимодействии частиц высокой энергии с цепочками атомов кристалла. - ЖЭТФ, 1984, т.87, вып.1(7), с.250 - 263.
30. Fedyanin V.K., Gavrilenko G.M. Inelastic Scattering of Channeled Charged Particles by Phonon Excitation. - Nucl.Instr. Meth., 1982, v.194, p.147 - 152.
31. Лашнев В.А. Квантовая теория каналирования. Вклад многократного рассеяния каналированных частиц на электронах в кон-

- станту скорости деканалирования. - ТМФ, 1979, т.41, №1, с.89-102.
32. Камлев Ю.А. Неравновесная статистическая термодинамика двух диффузионных процессов - диффузного каналирования частиц и диффузионной миграции легких примесей. - ТМФ, 1982, т.51, №2, с.289 - 298.
33. Ellison J.A., Picraux S.T. Planar-Channeling Spatial Density under Statistical Equilibrium. - Phys.Rev. B, 1978, v.13, N3, p.1028 - 1038.
34. Novitzky V.G. General Solution for the Distribution Function in the Continuum Model of Planar Channeling. - Phys.Lett., 1981, v.85A, N1, p.38 - 40.
35. Gaoukar S.G., Wagh A.G. On the Envelopes of Ion Trajectories in Planar Channeling. - Phys.Lett., 1979, v.74A, N1,2, p.94 - 96.
36. Corciovei A., Visinescu A. Semiclassical Approach to Channeling and Dechanneling. - Radiat.Eff., 1981, v.55, p.141 - 148.
37. Barrett J.H. Monte-Carlo Channeling Calculations. - Phys.Rev. B, 1971, v.3, N5, p.1527 - 1547.
38. Jackson D.P., Morgan D.V. Computer Modelling of Planar Dechanneling I: Monatomic Lattices. - Radiat.Eff., 1976, v.28, p.5-13.
39. Morgan D.V., Jackson D.P. Computer Modelling of Planar Dechanneling II: Diatomic Lattices. - Radiat.Eff., 1976, v.29, p.99 - 106.
40. Morgan D.V., Jackson D.P. Computer Modelling of Planar Dechanneling III: Trajectory-Dependent Electron Multiple Scattering. Radiat.Eff., 1976, v.29, p.107 - 111.
41. Barrett J.H. Potential and Stopping-Power Information from

- Planar-Channeling Oscillations. - Phys.Rev. B, 1979, v.20, N9, p.3535 - 3542.
42. Roosendaal H.E. et.al. Half-Wavelength and Stopping Power for Planar-Channeled Protons in Silicon and Diamond Single Crystals. - Nucl.Instr.Meth., 1980, v.170, p.119 - 122.
43. Edge R.D. et al. Channeling in Diamond at High Depth Resolution. - Nucl.Instr.Meth., 1982, v.194, p.133 - 137.
44. Robinson M.T. Deduction of Interaction Potentials from Planar Channeling Experiments. - Phys.Rev. B, 1971, v.4, N5, p.1461-1470.
45. Moak C.D. et al. Interplanar Potentials Derived from Transverse Oscillations of 3.5-MeV/amu He and Li Nuclei in Planar Channels of Silicon. - Phys.Rev. B, 1982, v.25, N7, p.4406 - 4411.
46. Barrett J.H. et al. Hyperchanneling. - Atomic Collisions in Solids. - Ed.by Dat S. et al. Plenum Press, N-Y. and L., 1975, p.645 - 668.
47. Павлов П.В., Скупов В.Д. Прямое наблюдение аномально глубоких дефектов в ионно-имплантированных кремнии. - Тезисы докладов XIV Совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. - МГУ, 1984, с.89.
48. Морозов Н.П., Тетельбаум Т.И. Глубокое проникновение радиационных дефектов из ионно-имплантированного слоя в объем полупроводника. - Ф.Т.П., 1983, т.17, в.5, с.838 - 842.
49. Абрамова Н.Н., Зорин Е.И., Павлов П.В. и др. Исследование структуры и электрических свойств глубоких слоев кремния после ионной бомбардировки. - В сб.5 : Физические основы ионно-лучевого легирования, Горький, 1972, ч.1, с.96 - 99.
50. Зорина Г.В., Павлов П.В., Пашков В.И., Тетельбаум Д.И. Измерение дефектности в объеме кремния при воздействии на поверх-

ность ионов средних энергий. - Труды XV Всесоюзного совещания по физике воздействия заряженных частиц с кристаллами. - МГУ, 1982, с.402 - 406.

51. Gotz G. et al. Investigation of Lattice Deformation in Deep Layers of Ion-Implanted Silicon Crystals. - Труды VII Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами. - МГУ, 1976, с.205 - 213.
52. Аешин А.И., Стась В.Ф. Глубокое проникновение дефектов в германия, облученном ионами гелия. - Тезисы докладов международной конференции по ионной имплантации в полупроводниках и других материалах, Вильнюс, 1983, с.55 - 56.
53. Квасов Н.Т., Пилипенко В.А., Полонин А.К. и др. Исследование напряженного состояния кристаллической решетки кремния после ионной имплантации и импульсного отжига. - Тезисы докладов Международной конференции по ионной имплантации в полупроводниках и других материалах, Вильнюс, 1983, с.72 - 73.
54. Титов В.В. Роль механических напряжений при легировании материалов с помощью ионных пучков. - Тезисы докладов Международной конференции по ионной имплантации в полупроводниках и других материалах, Вильнюс, 1983, с.138 - 139.
55. Зорина Г.В.; Попов Ю.С., Тетельбаум Д.И. и др. Эффект дальнего действия при ионном облучении кремния. - Тезисы докладов Международной конференции по ионной имплантации в полупроводниках и других материалах, Вильнюс, 1983, с.193 - 194.
56. Вайткус Ю.Ю., Гедрас Т.К., Гравинкас В.В. и др. Излучение аномального проникновения дефектов при ионной имплантации методом импульсной фотопроводимости. - Тезисы докладов Международной конференции по ионной имплантации в полупроводниках и других материалах, Вильнюс, 1983, с.240 - 241.
57. Риссел Х., Руте И. Ионная имплантация. - М.: Наука, 1983, 360с.

58. Кумахов М.А., Ташлыков И.С. Анализ поверхности твердых тел с применением пучков ускоренных ионов. - Поверхность. Физика, химия, механика, 1983, №2, с.5 - 20.
59. Swanson M.L. The Study of Lattice Defects by Channeling. - Rep.Proc.Phys., 1982, v.45, p.47 - 93.
60. Gruska B., Gotz G. Dechanneling by Dislocations in Ion-Implanted Si. - Radiat.Eff., 1982, v.59, p.157 - 167.
61. Picraux S.T., et al. Dechanneling by Dislocations in Ion-Implanted Al. - Phys.Rev. B., 1978, v.18, N5, p.2078 - 2096.
62. Бейтман Г., Ордейя А. Высшие трансцендентные функции. - М.: Наука, т.II, 1974, 295с.
63. Bontemps A., Fontenile J. Computer Simulation of Axial Channeling in Monatomic and Diatomic Crystals. - Phys.Rev., 1978, v.183, N11, p.6302 - 6315.
64. Силингов Г.М., Водянов И.Г., Корнеев В.М. К теории эффекта теней. - ЖЭТФ, 1972, т.63, вып.3(9), с.770 - 775.
65. Baier V.N., Katkov V.M., Strakhovenko V.M. Radiation Intensity of Ultrarelativistic Particles at Axial Channeling and its Orientation Dependence - Preprint IJaF 83-29, Novosibirsk, 1983, 20p.
66. Doyle P.A., Turner P.S. Relativistic Hartree-Fock X-Ray and Electron Scattering Factor. - Acta Cryst., 1968, v.A24, p.390 - 397.
67. Andersen J.U. et al. Axial Channeling Radiation from MeV Electrons. - Nucl.Instr.Meth., 1982, v.194, p.209 - 224.
68. Кляцкин В.И. Статистическое описание динамических систем с флуктуирующими параметрами. - М.: Наука, 1975, 240с.
69. Коцеев В.П. Квантовомеханический расчет плотности потока при каналировании положительного заряженных частиц. - Труды X Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц

с кристаллами. - МГУ, 1961, с.216 - 219.

70. Фейнман Р., Хибс А. Квантовая механика и интегралы по траекториям. - М.: Мир, 1968, 382с.
71. Коцеев В.П. Функция распространения канализованных частиц. - Труды XI Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. - МГУ, 1982, с.138 - 140.
72. Коцеев В.П. Функция распространения канализованных положительно заряженных частиц. - Изв.вузов, Физика, 1982, №3, с.93 - 97.
73. Малкин И.А., Менько В.И. Динамические симметрии и когерентные состояния квантовых систем. - М.: Наука, 1979, 320с.
74. Черемшанцев С.Е. Об усреднении решения уравнения Шредингера с потенциалом, зависящим от времени случайным образом. - ДАН, 1982, т.266, №3, с.597 - 601.
75. Jayannavar A.M., Kumar K. Nondiffusive Quantum Transport in a Dynamically Disordered Medium. - Phys.Rev.Lett., 1982, v.48, №8, p.553 - 556.
76. Глаубер Р. Когерентность и детектирование квантов. - В кн.: Когерентные состояния в квантовой теории. - ИФФ, вып.1, М.: Мир, 1972, с.26 - 70.
77. Швингер Ю. Броуновское движение квантового осциллятора. - М.: ИЛ, 1962, 168с.
78. Коцеев В.П. Статистическое усреднение функции Грина канализованных частиц. - Изв.вузов, Физика, 1983, №4, с.42 - 45.
79. Базилев В.А., Головизин В.В. Квантовая теория рассеяния электронов и позитронов в кристалле при канализовании. - ЕЖТФ, 1982, т.82, вып.4, с.1204 - 1220.
80. Тулунов А.В. К квантовой теории прохождения и излучения релятивистских электронов малых энергий в каналах кристалла. -

- ЭЖТФ, 1984, т.36, вып.4, с.1365 - 1375.
81. Inusimi K. Miscellaneous in Elementary Quantum Mechanics. - Progr.Theor.Phys., 1953, v.9, N4, p.381 - 402.
82. Чандрасекар С. Стохастические проблемы в физике и астрономии. - М.: ИЛ, 1947, 168с.
83. Abel F. et al. Backscattering Study and Theoretical Investigation of Planar Channeling Processes. I. Experimental Results.- Phys.Rev.B., 1975, v.12, N11, p.4617 - 4627.
84. Бор Н. Прохождение атомных частиц через вещество. - М.: ИЛ, 1950, 149с.
85. Коцвев В.П. Процесс наступления статистического квазиравновесия потока канализованных частиц. - Тезисы докладов XIV Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. - МГУ, 1984, с.5.
86. Климонтович Ю.Л. Статистическая физика. - М.: Наука, 1988, 608с.
87. Kudo H. et al. Determination of Defect Distribution in Single Crystals by Channeling of Fast Charged Particles. - Journ. Phys.Soc.Jap., 1974, v.36, N1, p.214 - 220.
88. Walker R.S. et al. A Semiempirical Method of Applying the Dechanneling Correction in the Extraction of Disorder Distribution. - Radiat.Eff., 1977, v.34, p.157 - 161.
89. Zak J.S. et al. Measurement of Average Electron Densities in Si and Ge Using MeV γ -Rays Produced by Channeled High-Energy Particles. - Nucl.Phys., 1982, v.A389, p.533 - 556.
90. Derry T.E. et al. Ion Channeling and Dechanneling in Natural Diamonds. - Nucl.Instr.Meth., 1980, v.170, p.135 - 140.
91. Fujimoto F. et al. Effects of Thermal Vibrations and Impurity Atoms on Channeling Phenomena. - Radiat.Eff., 1972, v.13,

p.43 - 50.

92. Andersen J.U., Pedersen M.J. An Experimental Study of Dechanneling. - Труды V Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. - МГУ, 1974, с.167 - 177.
93. Sun C.R. et al. Angular Distribution of Channeled Pions and Protons up to 250 GeV/c. - Nucl.Phys. B, 1982, v.203, p.40 - 57.
94. Bogh E. Defect Studies in Crystals by Means of Channeling. - Canad.Journ.Phys., 1968, v.46, p.653 - 662.
95. Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей/ А.Ф.Буренков и др. - Минск: БГУ, 1980.
96. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. - М.: Физико-Математическая Литература, 1958, 335с.
97. Коцеев В.П., Боярко Е.Ю., Верягин А.А., Крючков Ю.Ю., Чернов И.П. О функции декапализации заряженных частиц в кристаллах. - Тезисы докладов XIV Всесоюзного Совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. - МГУ, 1984, с.6.