

531.91(075.3)
Б94

В.А.Бушуев, Р.Н.Кютт, Ю.П.Хапачев

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ
РЕНТГЕНОДИФРАКТОМЕТРИЧЕСКОГО
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕАЛЬНОЙ
СТРУКТУРЫ МНОГОСЛОЙНЫХ
ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК**

НАЛЬЧИК 1996

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ**

**КАБАРДИНО-БАЛКАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

В.А.Бушуев, Р.Н.Кютт, Ю.П.Хапачев

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ
РЕНТГЕНОДИФРАКТОМЕТРИЧЕСКОГО
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕАЛЬНОЙ
СТРУКТУРЫ МНОГОСЛОЙНЫХ
ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК**

Под редакцией докт. физ.- мат. наук,
проф. Ю.П. Хапачева

*Рекомендовано Госкомитетом РФ по высшему
образованию для использования в учебном процессе*

НАЛЬЧИК 1996

УДК 539.26:539.3:548.7

ББК 22.37:22.346

Приведены основные уравнения анизотропной теории упругости для многослойных гетероструктур. Эти уравнения учитывают пластическую деформацию и несоответствие параметров решеток слоев относительно подложки. Особое внимание уделено учету изменения компонент тензора упругой жесткости в слоях различных составов. Приведено решение одномерной задачи упруго- и пластически деформированного состояния для гетероструктур кубической системы. Рассмотрены частные случаи двухслойной гетероструктуры с переменными компонентами тензора упругой жесткости в отсутствие пластической деформации и с постоянными компонентами тензора упругой жесткости при наличии в гетероструктуре дислокаций.

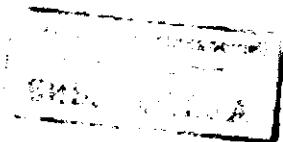
Обсуждаются наиболее перспективные неразрушающие двух- и трехкристальные рентгенодифрактометрические методы измерения компонент тензора деформации и кривизны гетероструктуры. Изложены основные физические принципы современных методов высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии при исследовании структуры монокристаллов с неоднородным распределением деформаций и дефектов в тонких приповерхностных слоях. Возможности двух- и трехкристальной дифрактометрии продемонстрированы на конкретных примерах структурной диагностики эпитаксиальных слоев, ионно-имплантированных кристаллов до и после термического и импульсного лазерного отжига. Приведены данные по определению таких важных параметров структуры как толщина слоя, профиль деформации, рельеф поверхности, тип, размер и концентрация дефектов в зависимости от условий обработки и отжига кристаллов.

Книга предназначена для студентов, аспирантов и научных сотрудников, специализирующихся в области физики твердого тела.

Рецензенты: кафедра физики твердого тела физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова.

Алешко-Ожевский О.П. доктор физико-математических наук. Институт кристаллографии РАН (Москва).

957883



ISBN 5-7558-0179-7

© Кабардино-Балкарский госуниверситет

© В.А.Бушуев, Р.Н.Кютт, Ю.П.Хапачев

ПРЕДИСЛОВИЕ

Резкое улучшение качества традиционных, а также освоение новых полупроводниковых материалов позволили в последние годы перейти к созданию больших, сверхбольших и сверхбыстродействующих интегральных схем, принципиально новых оптоэлектронных и СВЧ-приборов, существенно повысить степень миниатюризации микроэлектронных устройств. Очевидно, что "материалом номер один" по-прежнему остается кремний. Несмотря на это, современное развитие электронной техники отмечено широким вовлечением в современную твердотельную электронику новых полупроводниковых материалов.

Дальнейшие перспективы связываются прежде всего с арсенидом галлия, фосфидом индия, тройными и четверными изопериодическими твердыми растворами на основе групп $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$. Эти материалы технологически более сложны, чем кремний, однако и к их качеству предъявляются достаточно жесткие требования: необходимы бездислокационные монокристаллы больших размеров с равномерным распределением легирующих примесей и собственных точечных дефектов. К эпитаксиальным пленкам этих материалов предъявляются еще и свои, специфические требования.

Контроль качества таких структур с заданными физическими свойствами осуществляется различными способами, однако рентгеновская дифрактометрия является пока одним из наиболее эффективных неразрушающих методов определения параметров реальной структуры.

Создание уникальных высокоразрешающих рентгенодифракционных методов происходит в последние годы настолько быстро, что изложение этих вопросов полностью отсутствует не только в учебной литературе, но даже в специальных научных монографиях.

Данная монография, по мнению авторов, должна частично восполнить этот пробел. В основу содержания книги положены теоретические и экспериментальные результаты, отраженные авторами в серии обзорных статей в отечественных и зарубежных изданиях:

“Успехи физических наук”, “Кристаллография”, “Металлофизика”, “Методы структурного анализа” (серия “Проблемы современной кристаллографии”) и “Crystallography Review”. Кроме того, отдельные разделы читались авторами в соответствующих спецкурсах МГУ, Санкт-Петербургского политехнического университета и Кабардино-Балкарского госуниверситета.

Книга может быть полезна для студентов, аспирантов и научных сотрудников младшего научного возраста, специализирующихся в области физики твердого тела, полупроводникового материаловедения и рентгеновской диагностики кристаллов и тонких пленок.

В.А.Бушуевым написаны параграфы 4.6 - 4.10 главы IV.

Р.Н.Кюттом написаны параграфы 3.3, 3.4 главы III и 4.1 - 4.5 главы IV.

Ю.П.Хапачевым написано введение, глава I, глава II и параграфы 3.1 и 3.2 главы III. Им же осуществлено общее научное редактирование книги.

Ряд результатов рентгенодифракционных исследований, изложенных в книге, получен авторами совместно с Т.С.Аргуновой, В.В.Лидером и А.П.Петраковым, за что мы выражаем им свою признательность. Кроме того, мы благодарны всем своим соавторам, совместные работы с которыми использованы в данной книге. Мы признательны А.А.Дышекову, В.Л.Инденбому, В.М.Каганеру и А.А.Ломову за полезное обсуждение ряда вопросов, аспиранту Д.А.Тарасову за компьютерный набор рукописи и аспиранту Б.Н.Хапачеву за создание компьютерного макета.

И наконец, мы благодарны ректору Кабардино-Балкарского госуниверситета Б.С.Карамурзову за проявленный неформальный интерес и оказанную финансовую поддержку.

В.А.Бушуев,
Р.Н.Кютт,
Ю.П.Хапачев

14 ноября 1995 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферов Ж.И. // Вестник АН СССР. 1976. №7. С. 28.
2. Алферов Ж.И. // ФТП. 1977. Т.11. №11. С. 2072.
3. Валиев К.А. Микроэлектроника и пути развития. М.:Наука, 1986. 142 с.
4. Мильвидский М.Г. Полупроводниковые материалы в современной электронике. М.: Наука, 1986. 144 с.
5. Мильвидский М.Г., Освенский В.Б. // Кристаллография. 1977. Т.22. Вып.2. С.431.
6. Бродай И., Мерей Дж. Физические основы микрогехнологии: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 494 с.
7. Суэмацу Я., Араи С. // ТИИЭР. 1987. Т.75. №11. С. 38.
8. Форрест С.Р. // ТИИЭР. 1987. Т.75. №11. С. 55.
9. Тхорик Ю.А., Хазан Л.С. Пластическая деформация и дислокации несоответствия в гетерозитаксиальных системах. Киев.: Наукова думка, 1983. 304 с.
10. Petroff P.M., Logan R.A., Savage A. // Phys. Rev. Lett. 1980. V.44. N 4. P.287.
11. Чернов А.А. Процессы кристаллизации // Современная кристаллография. М.: Наука, 1980. Т.3. С.7.
12. Kavanagh K.L., Sarano M.A., Hobbs L.W. // J. Appl. Phys. 1988. V.64. N 10. P. 4843.
13. Устинов В.М., Захаров Б.Г. Макронапряжения в эпитаксиальных структурах на основе соединений $A^{III}B^V$ // Обзоры по электронной технике. Сер. 6. Материалы. 1977. Вып. 4 (492). 34 с.
14. Технология тонких пленок : Справочник / Под ред. Майссела Л., Глэнга Р.: Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1977. Т.1. - 664 с. Т.И. - 768 с.
15. Ishida K., Matsui J., Kamejima T., Sakuma I. // phys. stat. sol. (a). 1975. V.31. N 1. P.255.
16. Cohen B.G., Focht M.W. // Solid state Electronics. 1970. V. 13. N 1. P. 105.
17. Арсентьев И.И., Берт Н.А., Конников С.Г., Уманский В.Е. // ФТП. 1980. Т.14. Вып. 1. С.96.
18. Олсен Г.Х., Эттенберг М. Особенности получения гетерозитаксиальных структур $A^{III}B^V$ // Рост кристаллов. М.:Мир, 1981. Вып. 2. С. 9.
19. Segmuller A. Characterization of Epitaxial Films by X-Ray Diffraction // Advances in X-Ray Analysis. New-York and London: Plenum Press, 1986. V.29. P.352.
20. Ortner B. Simultaneous Determination of the Lattice Constant and Elastic Strain in Cubic Singl Crystal // Advances in X-Ray Analysis. New-York and London: Plenum Press, 1986. V. 29. P. 387.
21. Osbourn G.C. // J. Appl. Phys. 1982. V.53. N 10. P.1586.
22. Osbourn G.C. // Phys. Rev. B. 1983. V.B27. N 12. P.5126.
23. Matthews J.W., Blakeslee A.E. // J. of Cryst. Growth. 1974. V.27. N 1. P.118.
24. Osbourn G.C. // J. Vac. Sci. Technol. 1982. V.21. N 2. P.469.
25. Bean J.C., Feldman L.C., Flory A.T. et al. // J. Vac. Sci. Technol. 1984. V.A2. P.436.
26. Capasso F.C., Tsang W.T., William G. // IFFE Trans. On Electron Devices. 1983. V.30. N.4. P.381.
27. Роузэл Дж.М. // В мире науки. 1986. №12. С.87.
28. Хапачев Ю.П., Чуховский Ф.Н. // Кристаллография. 1989. Т.34. Вып.3. С.776.
29. Бессолов В.Н., Именков А.П., Конников С.Г. и др. // ФТП. 1983. Т.13. Вып.12. С.2173.
30. Уманский В.Е., Конников С.Г., Гарбузов Д.З. и др. // ФТП. 1982. Т.16. Вып. 8. С.1496.
31. Конников С.Г. et al. // Cryst. Research and Technol. 1981. V.16. N 2. P.169.
32. Берт Н.А., Гореленок А.Т., Конников С.Г. и др. // ЖТФ. 1981. Т.51. Вып.8. С.1018.
33. Конников С.Г., Уманский В.Е. // Cryst. Res. Technol. 1985. V.20. N 10. P. 1381.
34. Хапачев Ю.П., Чуховский Ф.Н. // Металлофизика. 1987. Т.9. №4. С.64.
35. Елюхин В.А., Кочарян В.Р., Нортной В.Л., Рыбкин Б.С. // Письма в ЖТФ. 1980. Т.6. Вып.4. С.244.
36. Ахмедов Д., Бежан Н.П., Берт Н.А. // Письма в ЖТФ. 1980. Т.6. Вып. 12. С.705.
37. Брагинская Б.Г., Елюхин В.А., Кучинский В.И. и др. // ЖТФ. 1983. Т.53. №9. С.1843.

38. Кейсн Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. М.: Мир, 1983. Т.1. –299 с., Т.П. – 364 с.
39. Besser P.J. et al. // Mat. Res. Bul. 1971. V.6. P.1111.
40. Besser P.J. et al. // Magnetism and Magnetic Materials. 1971. AIP Conf. Proc. 5. American Institute of Physics. N.-Y. 1972. Part 1. P.125.
41. Klokholm E. et al. // Magnetism and Magnetic Materials. 1971. AIP Conf. Proc. 5. American Institute of Physics. N.-Y. 1972. Part 1. P.125.
42. Speriosu V.S., Wilts C.H. // J. Appl. Phys. 1983. V.54. N 6. P.3325.
43. Хачатурян А.Г. Теория фазовых превращений и структура твердых растворов. М.: Наука, 1974. 384 с.
44. Balluffi R. W., Blakely J.M. // Thin Solid Films. 1975. V.25. N 2. P.363.
45. Любов Б.Я. // Физика и химия обработки материалов. 1976. №2. С.77.
46. Келдыш Л.В. // ФТТ. 1962. Т.4. Вып.8. С.2265.
47. Кастальский А.А. // Письма в ЖЭТФ. 1969. Т.10. №7. С.328.
48. Кастальский А.А., Хусайнов А.Х. // ФТП. 1970. Т.4. Вып.8. С.1198.
49. Волков В.А., Пинскер Т.Н. // ФТТ. 1971. Т.13. Вып.5. С.1360.
50. Esaki L., Tai R. // IBM J. Research and Development. 1970. V.14. N 1. P.61.
51. Алферов Ж.И., Жилев Ю.В., Шмарцев Ю.В. // ФТП. 1971. Т.5. Вып.1. С.196.
52. Blakeslee A.E., Aliotta C.F. // IBM J. Research and Development. 1970. V.14. N 1. P.61.
53. Есаки Л. // УФН. 1975. Т.116. Вып.4. С.569.
54. Стафеев В.И. // ФТП. 1971. Т.5. Вып.3. С.408.
55. Витецкий В.Л., Кухтарев Н.В., Семенов А.К. // ФТП. 1972. Т.6. Вып. 6. С.1007.
56. Таггер Б.А., Демиховский В.А. // УФН. 1968. Т.96. Вып.1. С.61.
57. Шук А.Я. // ФТП. 1974. Т.8. Вып.10. С.1841.
58. Сурис Р.С. // Электронная промышленность. 1977. Вып.6(60). С.52.
59. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 240с.
60. Esaki L. // J. Quant. Electron. 1986. V.QE-22. N 9. P.1611.
61. Capasso F., Mohammed K., Cho A. // J. Quant. Electron. 1986. V.QE-22. N 9. P.1611.
62. Виноградов А.В., Зельдович Б.Я. // Оттика и спектроскопия. 1977. Т.42. Вып.4. С.709.
63. Vinogradov A.V., Zeldovich B. Ya. // Appl. Optics. 1977. V.16. N 1. P.89.
64. Abeles B., Tiedje T. // Phys. Rev. Lett. 1983. V.51. N 21. P. 2003.
65. Ogino T., Mizushima Y. // Japan J. Appl. Phys. 1983. V.22. N 11. P.1674.
66. Kakalios J., Fritzsche M., Ibarakin N. et al. // J. Non-Cryst. Solids. 1984. V.66. N 2. P.339.
67. Deckman H.W., Dunsmuir J., Abeles B. // Appl. Phys. Lett. 1985. V.46. N 2. P.171.
68. Schuller I.K. // Phys. Rev. Lett. 1980. V.44. N 24. P.1597.
69. Meyer K.E. et al // J. Appl. Phys. 1981. V.52. N 11. P.6608.
70. Khan M.R., Chun C.S.L., Felcher G.P. et al // Phys. Rev. B. 1983. V.B27. N 12. P.7186.
71. Clemens B.M., Gay J.G. // Phys. Rev. B. 1987. V.B35. N 17. P.9337.
72. Onoda M., Sato M. // Solid State Communication. 1988. V.67. N 8. P.799.
73. Ariosa D. et al // Phys. Rev. B. 1988. V.B37. N 5. P.2415.
74. Ariosa D. et al // Phys. Rev. B. 1988. V.B37. N 5. P.2421.
75. Locquet J.-P., Neerincq D., Stockman L. et al. // Phys. Rev. B. 1988. V.B38. N 5. P.3572.
76. Blakeslee A.E. // J. Electrochem. Soc. 1971. V.118. P.1459.
77. Woodall J.M. // J. of Cryst. Growth. 1972. V.12. N 1. P.32.
78. Segmuller A., Blakeslee A.E. // J. Appl. Cryst. 1973. V.6. N 1. P.9.
79. Палатник Л.С., Козьма А.А., Михайлоф И.Ф., Маслов В.Н. // Кристаллография. 1978. Т.23. Вып.3. С.570.
80. Segmuller A., Krishna P., Esaki L. // J. Appl. Cryst. 1977. V.10. N 1. P.1.
81. Petroff P.M., Gossard A.C., Savage A., Wiegmann W. // J. of Cryst. Growth. 1979. V.46. N 2. P.172.
82. Palatnik L.S. // Thin Solid Films. 1980. V.66. N 1. P.3.
83. Gourley P.L., Biefeld R.M. // J. Vac. Sci. Technol. 1982. V.21. N 2. P.473.
84. Quillec M., Goldstein L., Le Roux G. et al. // J. Appl. Phys. 1984. V.55. N 8. P.2204.
85. Subanna S., Krochmer H., Merz J. // J. Appl. Phys. 1986. V.59. N 2. P.488.
86. Kato H., Iguchi N., Kamigaki K. et al. // J. Appl. Phys. 1987. V.62. N 2. P.2057.

87. *Olego D.J., Petruzzello J.* // *Appl. Phys. Lett.* 1987. V.51. N 2. P.127.
88. *Ortner B., Bauer G.* // *J. of Cryst. Growth.* 1988. V.92. N 1. P.69.
89. *Shahzad K., Olego D.J., Cammack D.A.* // *Appl. Phys. Lett.* 1988. V.52. N 17. P.1416.
90. *Ourmazd A., Bean J.C.* // *Phys. Rev. Lett.* 1985. V.55. N 7. P.765.
91. *Wood D.M., Wei S.-H., Zunger A.* // *Phys. Rev. Lett.* 1987. V.58. N 11. P.1123.
92. *Елюхин В.А., Сорокина Л.П.* // Доклады АН СССР. 1986. Т.287. №6. С.1384.
93. *Беляков В.А.* Дифракционная оптика периодических сред сложной структуры. М.: Наука, 1988. 256 с.
94. *Kharachev Yu.P.* // *phys. stat. sol. (b).* 1983. V.120. N 1. P.155.
95. *Эттин И.Р.* // *ЖЭТФ.* 1979. Т.1. С.214.
96. *Belyaev Yu.N., Kolpakov A.V.* // *phys. stat. sol. (a).* 1983. V.76. N 2. P.641.
97. *Vardanyan D.M., Manoukyan H.M., Petrosyan H.M.* // *Leta. Cryst. (A).* 1985. V.41. N P.218.
98. *Колпаков А.В., Прудников И.Р.* // Вестник Моск. университета. Сер. 3. Физика, астрономия. 1991. Т.32. №4. С.3.
99. *Хапачев Ю.П., Чуховский Ф.Н.* // *Металлофизика.* 1991. Т.13. №7. С.65.
100. *Дышечков А.А., Тарасов Д.А., Хапачев Ю.П.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т.21. Вып.13. С.6.
101. *Indenbom V.L., Kaganer V.M.* // *phys. stat. sol. (a).* 1990. V.118. N 1. P.71.
102. *Дышечков А.А., Хапачев Ю.П.* // *Металлофизика.* 1986. Т.8. №6. С.15.
103. *Чуховский Ф.Н., Хапачев Ю.П.* // *ДАН СССР.* 1987. Т.292. №2. С.354.
104. *Chu S.N.G., Macrander A.T., Strege K.E., Johnston W.D.* // *J. Appl. Phys.* 1985. V.57. N 2. P.249.
105. *Инденбом В.Л., Сильвестрова И.М., Сиротин Ю.И.* // *Кристаллография.* 1956. Т.1. Вып.4. С.798.
106. *Галушко М.А., Кузнецов Г.Ф., Хапачев Ю.П.* // *Кристаллография.* 1985. Т.30. Вып.4. С.798.
107. *Хапачев Ю.П., Чуховский Ф.П.* // *ФТТ.* 1989. Т.31. Вып.9. С.76.
108. *Хапачев Ю.П., Чуховский Ф.П.* Развитие рентгенодифрактометрического метода определения деформаций, напряжений и несоответствия в гетероструктурах. В сб. Методы структурного анализа // Проблемы современной кристаллографии. М.: Наука, 1989. С.188.
109. *Chukhovskii F.N., Kharachev Yu.P.* // *Cryst. Rev.* 1993. V.3. N 3. P.257.
110. *Indenbom V.L., Kaganer V.M.* // *phys. stat. sol. (a).* 1990. V.122. N 1. P.97.
111. *Сиротин Ю.И., Шискольская М.И.* Основы кристаллографии. М.: Наука, 1979. 639 с.
112. *Кривоглаз М.А.* Дифракция рентгеновских лучей и нейтронов в идеальных кристаллах. Киев.: Наукова думка, 1983. 408 с.
113. *Афанасьев А.М., Александров П.А., Имамов Р.М.* Рентгеновская структурная диагностика в исследовании приповерхностных слоев монокристаллов. М.: Наука, 1986. 95 с.
114. *Афанасьев А.М., Александров П.А., Имамов Р.М.* Рентгенодифракционная диагностика субмикронных слоев. М.: Наука, 1989. 152 с.
115. *Eshelby J.D.* The Continuum Theory of Lattice Defects. In: *Solid State Physics.* Ed. F.Seitz and D.Turnbull. N.-Y.: Academic Press, 1956. V.3. P.79.
116. *Steeds J.W.* Introduction to Anisotropic Elasticity Theory of Dislocation. Oxford: Clarendon Press, 1973. 274 p.
117. *Waterman P.C.* // *Phys. Rev.* 1959. V. 113. N 5. P. 1240.
118. *Инденбом В.Л., Альшиц В.И., Чернов В.М.* Дислокации в анизотропной теории упругости // Дефекты в кристаллах и их моделирование на ЭВМ. Л.: Наука, 1980. С.23.
119. *Itoh N., Okamoto K.* // *J. Appl. Phys.* 1988. V.63. N 5. P.1486.
120. *Funter E.J.* // *Appl. Phys. Lett.* 1985. V.47. N 8. P.803.

121. *Fanter E.J.* Measurement of Elastic Lattice Distortion in PbTe/PbSnTe – Strained-layer Superlattices by Asymmetric High Angl X-Ray Interferences // *Advances in X-Ray Analysis*. New-York and London: Plenum Press, 1986. V.29. P.367.
122. *Barriels W.J., Nijman W.* // *J. of Cryst. Growth*. 1-78. V.44. N 2. P.518.
123. *Matsui J., Onabe K., Kamejima T., Hayashi I.J.* // *J. of the Electrochem. Soc.* 1979. V.126. N 4. P.664.
124. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 620 с.
125. *Колпаков А.В., Бушуев В.А., Кузьмин Р.Н.* // УФН. 1978. Т.126. Вып.3. С.479.
126. *Инденбом В.Л., Чуховский Ф.Н.* // УФН. 1972. Т.107. Вып.2. С.229.
127. *Takagi S.* // *J. Phys. Soc. Japan*. 1969. V.26. P.1239.
128. *Kharachev Yu.P., Dyshekov A.A., Kiselev D.S.* // *phys. stat. sol. (b)*. 1984. V.126. N 1. P.37.
129. *Wang X.R., Chi X.Y., Zheng H. et al.* // *J. Vac. Sci. Technol.* 1988. V.16. N 1. P.34.
130. *Харачев Ю.П., Дышеков А.А., Киселев Д.С.* Рентгенодифрактометрический анализ упруго-напряженного состояния гетероструктур соединений $A^{III}B^V$ // Субструктурное упрочнение металлов и дифракционные методы исследования. Киев.: Наукова думка, 1985. С.221.
131. *Кузнецов Г.Ф., Хазанов Ю.П.* // *Кристаллография*. 1990. Т.35. Вып.5. С.1267.
132. *Харачев Ю.П., Чуховский Ф.Н.* // ФТГ. 1984. Т.26. Вып.5. С.1319.
133. *Chukhovskii F.N., Kharachev Yu.P.* // *phys. stat. sol. (a)*. 1985. V.88. N 1. P.69.
134. *Лидер В.В., Чуховский Ф.Н., Харачев Ю.П., Барашев М.Н.* // ФТГ. 1989. Т.31. Вып.4. С.74.
135. *Нинскер Э.Г.* Рентгеновская кристаллооптика. М.: Наука, 1982. 390 с.
136. *Носков А.Г., Стенин С.И., Труханов Е.М.* // ПТЭ. 1982. №2. С.181.
137. *Носков А.Г., Труханов Е.М.* // ПТЭ. 1985. №5. С.173.
138. *Лидер В.В.* Способ определения радиуса кривизны монокристаллических пластин. А.С. №920480. 1986. Бюл. №27.
139. *Гуляев Ю.В., Кузнецов Г.Ф., Харачев Ю.П.* // ДАН СССР. 1983. Т.268. №2. С.351.
140. *Берт Н.А., Конников С.Г., Уманский В.Е.* // ФТП. 1980. Т.14. Вып.10. С.1899.
141. *Bert N.A., Zhungarev M.Z., Konnikov S.G. et al.* // *Krystall und Technick*. 1980. V.15. N 7. P.787.
142. *Лидер В.В., Рожанский В.Н.* // ФТГ. 1967. Т.9. Вып.12. С.3539.
143. *Лидер В.В., Рожанский В.Н.* // Известия АН СССР. Сер. Физика. 1970. Т.34. Вып.7. С.1447.
144. *Чжан Ш.* Многоволновая дифракция рентгеновских лучей в кристаллах. М.: Мир, 1987. 334 с.
145. *Андреева М.А., Борисова С.Ф., Степанов С.А.* // *Поверхность*. 1985. №4. С.5.
146. *Marra W.C., Eisenberger P., Cho A.Y.* // *J. Appl. Phys.* 1979. V.50. N 11. P.6927.
147. *Харачев Ю.П., Андреева М.А.* Способ дифракционного анализа структуры кристаллов. А.С. №938113. 1982. Бюл. №23.
148. *Brennan S., Eisenberger P.* // *Nuclear Instrum. and Methods in Phys. Research*. 1984. V.222. N 1. P.164.
149. *Ковальчук М.В., Кон В.Г., Лобанович Э.Ф.* // ФТГ. 1985. Т.27. Вып.11. С.3379.
150. *Андреева М.А., Rocette K., Kharachev Yu.P.* // *phys. stat. sol. (a)*. 1985. V.88. N 2. P.455.
151. *Андреева М.А., Борисова С.Ф., Харачев Ю.П.* // *Металлофизика*. 1986. Т.8. №5. С.44.
152. *Андреева М.А.* // *Поверхность*. 1986. №10. С.15.
153. *Андреева М.А.* // *Поверхность*. 1988. №12. С.17.
154. *Андреева М.А., Дышеков А.А., Харачев Ю.П.* // *Металлофизика и новейшие технологии*. 1994. Т.16. №4. С.22.
155. *Bruhl H., Piech V.* // *J. Appl. Crystallogr.* 1988. V.21. P.240.
156. *Afanasev A.M., Aleksandrov P.A., Imatov R.M. et al.* // *Acta. Cryst. (A)*. 1984. V.40. N 4. P.352.

157. Якимов С.М., Чаплинов В.А., Афанасьев А.М. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т.39. Вып.1. С.3.
158. Афанасьев А.М., Фаяченко С.С. // ДАН СССР. 1986. Т.287. №6. С.1395.
159. Гончарский А.В., Степанов А.А. // ДАН СССР. 1987. Т.292. №1. С.60.
160. Петрашень П.В., Чуховский Ф.Н. // ДАН СССР. 1989. Т.309. №1. С.105.
161. Iida A., Kohra K. // *phys.stat.sol.(a)*. 1979. V.51. P.533.
162. Кривоглаз М.А. Теория рассеяния рентгеновских лучей и тепловых нейтронов реальными кристаллами. М.: Наука, 1967.
163. Dederichs P.H. // *J.Phys.F: Metal Phys.* 1973. V.3. P.471.
164. Trinkaus H. // *Z. Naturforsch.* 1973. V.28a. P.980.
165. Кютт Р.Н., Аргунова Т.С. // ФТТ. 1989. Т.31. Вып.1. С.40.
166. Кютт Р.Н. // ФТТ. 1989. Т.31. Вып.8. С.270.
167. Argunova T.S., Kyutt R.N., Ruvimov S.S., Scheglov M.P. // *Inst. Phys. Conf. Ser.* N117. Sec.9. P.669.
168. Кютт Р.Н., Сорокин Л.М., Аргунова Т.С., Рувимов С.С. // ФТТ. 1994. Т.36. С.2700.
169. Fewster P.F. // *Appl. Surf. Sci.* 1991. V.50. P.9.
170. Fewster P.F. // *J. Appl. Cryst.* 1991. V.24. P.178.
171. Tanner B.K., Bowen D.K. // *J. of Cryst. Growth.* 1993. P.1.
172. Fewster P.F., Andrew N.L. // *J. Appl. Phys.* 1993. V.74. P.3121.
173. Fewster P.F. // *J. Appl. Cryst.* 1992. V.25. P.714.
174. Holy V., Kubena J., Abramof E., Lischka K., Pesek A., Koppenstainer E. // *J. Appl. Phys.*, 1993, V.74. P.1736.
175. Koppenstainer E., Hamberger P., Bauer G., Pesek D., Kibbel H., Presting H., Kasper E. // *Appl. Phys. Lett.* 1993. V.62. P.1783.
176. Honstra J., Bartels M.J. // *J. of Cryst. Growth.* 1978. V.44. P.513.
177. Pietsch U., Borchard W. // *J. Appl. Cryst.* 1987. V.20. P.8.
178. Аргунова Т.С., Кусов А.А., Петрашень П.В., Шульпина И.Л. // ЖЭТФ. 1987. Т.57. С.1114.
179. Ayers J.E., Ghandi S.K., Schowalter L.J. // *J. of Cryst. Growth.* 1991. V.113. P.430.
180. Аргунова Т.С., Кютт Р.Н., Матвеев Б.А., Рувимов С.С., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н. // ФТТ. 1990. Т.32. Вып.11. С.3355.
181. Ивернова В.И., Ревкевич Г.П. Теория рассеяния рентгеновских лучей. М.: МГУ, 1979. 277с.
182. Рябошапка К.П. Возможности рентгеноструктурного анализа дислокационных структур деформированных кристаллов. Завод. лабор. 1981. Вып.5. С.26.
183. Kidd P., Fewster P.F. // *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* V.317. P.291.
184. Kidd P., Fewster P.F., Andrew N.L. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1995. V.28. N4a. A133.
185. Бушцев В.А., Хапачев Ю.П., Лидер В.В. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. N23. С. 74.
186. Кон В.Г., Прилепский М.В., Суходрева И.М. // *Поверхность.* 1984. N 11. С. 122.
187. Колтаков А.В. Дифракция рентгеновских лучей в кристаллах с одномерным изменением периода решетки. М.: Изд. Моск. ун-та, 1988. 127 с.
188. Бушцев В.А., Петраков А.П. // *Кристаллография.* 1995. Т. 40. N 6. С. 11.
189. Смирнов И.Н. // ДАН СССР. 1975. Т. 221. N 2. С. 332.
190. Смирнов И.Н. // ДАН СССР. 1975. Т. 225. N 3. С. 621.
191. Speriou V.S. // *J. Appl. Phys.* 1981. V. 52. N 10. P. 6094.

192. *Afanasev A.M., Kovalchuk M.V., Kovcev E.K., Kohn V.G.* // Phys. Stat. Sol. A. 1977. V. 42. N 1. P. 415.
193. *Бушцев В.А., Петраков А.П.* // ФТТ. 1993. V. 35. N 2. С. 355.
194. *Kyutt R.N., Petrashen P.V., Sorokin L.M.* // Phys. St. Sol. A. 1980. V. 60. N2. P. 381.
195. *Батурин В.Е., Ковальчук М.В., Ковьев Э.К., Палапис В.Е.* // Кристаллография. 1977. Т. 22. N 1. С. 144.
196. *Комаров Ф.Ф., Новиков А.П., Соловьев В.С., Ширяев С.Ю.* Дефекты структуры в ионно-имплантированном кремнии. Минск: Изд-во БГУ, 1990. 319 с.
197. *Мейер Дж., Эрикссон Л., Дэвис Дж.* Ионное легирование полупроводников. М.: Мир, 1973. 296 с.
198. *Буренков А.Ф., Комаров Ф.Ф., Кумахов М.А., Темкин М.М.* Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей. Минск. Изд-во БГУ. 1980, 352 с.
199. *Hofker W.K., Oesthoek D.P., Koeman N.J., de Grefte H.A.* // Rad. Eff. 1975. V. 24. N3-4. P. 223.
200. *Kohn V.G., Kovalchuk M.V., Imatov R.M., Lobanovich E. F.* // Phys. Stat. Sol. A. 1981. V. 64. N 2. P. 435.
201. *Runyan W.R.* Silicon Semiconductor Technology. New York. McGraw-Hill. 1965. P. 344.
202. *Dederichs P.H.* // Phys. Rev. B. 1970. V. 1. N 4. P. 1306.
203. *Zaumseil P., Winter U., Cembali F. et al* // Phys. Stat. Sol. A. 1987. V. 100. N 1. P. 95.
204. *Zaumseil P., Winter U.* // Phys. Stat. Sol. A. 1990. V. 120. N 1. P. 67.
205. *Бушцев В.А., Петраков А.П.* // Поверхность. 1992. N 9. С. 64.
206. *Holy V., Kubena J.* // Czech. J. Phys. B. 1982. V. 32. N 7. P. 750.
207. *Афанасьев А.М., Ковальчук М.В., Лобанович Э.Ф. и др.* // Кристаллография. 1981. Т. 26. N 1. С. 28.
208. *Zaumseil P.* // Phys. Stat. Sol. A. 1985. V. 91. N 1. P. K31.
209. *Казимиров А.Ю., Ковальчук М.В., Ком В.Г.* // Металлофизика. 1987. Т. 9. N 4. С. 54.
210. *Завьялова А.А., Имамов Р.М., Ковальчук М.В. и др.* // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. N 11. С. 653.
211. *Zaumseil P., Winter U., Galler R.* // Cryst. Res. Technol. 1984. V. 19. N 5. P. 633.
212. *Nemiroff M., Serpiosus V.S.* // J. Appl. Phys. 1985. V. 58. N 10. P. 3735.
213. *Larson B.C., Barhorst J.F.* // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. N 6. P. 3181.
214. *Servidori M., Zani A., Garulli G.* // Phys. Stat. Sol. A. 1982. V. 70. N 2. P. 691.
215. *Cembali F., Servidori M., Zani A.* // Solid St. Electron. 1985. V. 28. N 9. P. 933.
216. *Servidori M., Cembali F., Negrini P.* // Appl. Phys. A. 1986. V. 39. N 3. P. 191.
217. *Бушцев В.А., Петраков А.П.* // Кристаллография. 1995. Т. 40. N 6. С. 18.
218. *Iida A.* // Phys. Stat. Sol. A. 1979. V. 54. N 2. P. 701.
219. *Петраков А.П., Бушцев В.А.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. N 19. С. 92.
220. *Cembali F., Servidori M., Gabilli E., Lotti R.* // Phys. Status Solidi. A. 1985. V. 87. N1. P. 225.
221. *Young R.T., White C.W. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 32. N 3. P. 139.
222. *Дюренечский А.В., Качурин Г.А., Нидаев Е.В., Смирнов Л.С.* Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. М.: Наука, 1982. 208 с.
223. *Кляк С.Г.* // Изв. АН УССР. Сер. физ. 1982. Т. 16. N 6. С. 1090.
224. *Хайбуллин И.Б., Смирнов Л.С.* // ФТП. 1985. Т. 19. N 4. С. 569.

225. Емельянов В.И., Кашкаров П.К. // Поверхность. 1990. N 2. С. 77.
226. Батище С.А., Данилович Н.И., и др. // Поверхность. 1988. N 1. С. 115.
227. Демчук А.В., Лабунов В.А. // Поверхность. 1991. N 2. С. 103.
228. Александров Л.Н., Нидаев Е.В., Васильев А.Л. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. N9. С. 838.
229. Кияк С.Г., Савицкий Г.В., Мойса М.И., Буцяк И.Ф. // ДАН УССР. 1984. N6A. С.60.
230. Демчук А.В., Казюцич Н.М., Лабунов В.А. // Поверхность. 1990. N 12. С. 97.
231. Larson V.C., White C.W., Appleton B.R. // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 32. N12. P. 801.
232. Пляцко Г.В., Кияк С.Г., Мойса М.И. и др. // ДАН УССР. 1979. N 1A. С. 61.
233. Рупегов V.I., Petrakov A.P., Tikhonov N.A. // Phys. Stat. Sol. (a). 1990. V. 122. N 2. P. 449.
234. Захаров Б.Г., Ковальчук М.В., Ковальчук Ю.В. и др. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. N 22. С. 1402.
235. Лабунов В.А., Кондрашкина Е.А., Полонин А.К., Прохоренко И.Л. // Поверхность. 1989. N 4. С. 90.
236. Буцыев В.А., Петраков А.П. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. N 8. С. 77.
237. Белоцкая А.А., Звoryгин И.Ф., Тихонов Л.В., Харькова Г.В. // Металлофизика. 1989. Т. 11. N 3. С. 92.
238. Александров О.В., Кютт Р.Н., Прохоров В.И., Сорокин Л.М. // ФТТ. 1989. Т. 31. N 10. С. 182.
239. Zaumseil P., Winter U. // Phys. Stat. Sol. (a). 1982. V. 70. N 2. P. 497.
240. Кютт Р.Н. // Кристаллография. 1988. Т. 33. N 4. С. 827.
241. Вавилов В.С., Кекелдзе Н.П., Смирнов Л.С. Действие излучений на полупроводники. М.: Наука, 1988. 191 с.
242. Винецкий В.Л., Манойло М.Л., Матвийчук А.С. и др. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. N 22. С. 2017.
243. Никифоров Ю.П., Янушкевич В.А. // ФТП. 1980. Т. 14. N 3. С. 534.
244. Демчук А.В., Пристрем А.М., Данилович Н.И., Лабунов В.А. // Поверхность. 1987. N 12. С. 89.
245. Foti G., Rimini E., Bertolotti M., Vitali G. // Phys. Lett. 1978. V. 65A. N 5-6. P. 430.
246. Кютт Р.Н. // Письма в ЖТФ. 1975. Т. 1. N 18. С. 839.
247. Holy V., Kubena J. // Czech. J. Phys. B. 1979. V. 29. N. 10. P. 1161.
248. Кютт Р.Н. // ЖТФ. 1987. Т. 57. N 1. С. 178.
249. Качурин Г.А., Нидаев Е.В., Даниюшкина Н.В. // ФТП. 1980. Т. 14. N 4. С. 656.
250. Пристрем А.М., Демчук А.В., Данилович Н.И. // ЖТФ. 1986. Т. 56. N 6. С. 1220.
251. Пидлипович В.А., Ивлев Г.Д., Жидков В.В., Малевич В.А. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. N 10. С. 594.
252. McCaldin J.O. // J. Vac. Sci. Technol. 1974. V. 11. N 6. P. 990.
253. Ни С.М. // J. Vac. Sci. Technol. 1977. V. 14. N 1. P. 17.
254. Кривоглаз М.А., Рябошапка К.П. // ФММ. 1963. Т. 15. Т 1. С. 18.
255. Fukuhara A., Takano Y. // Acta Cryst. A. 1977. V. 33. N 1. P. 137.
256. Шитов Н.В., Ложов А.А., Буцыев В.А. и др. // ФТТ. 1991. Т. 33. N 12. С. 3529.
257. Лидер В.В., Хапачев Ю.П., Дышеков А.А. // Известия ВУЗов, сер. Физика. 1993. №6. С.52.

258. Дышеков А.А., Хапачев Ю.П., Шидов Э.Х. // II Межреспубл. сем.
"Современные методы и аппаратура рентгеновских дифрактометрических исследо-
ваний материалов в особых условиях". Тез. докл. Киев, 1991 г. С.93
259. Дышеков А.А., Хапачев Ю.П., Тарасов Д.А. // Поверхность. 1996. №3-4.
260. Дышеков А.А., Хапачев Ю.П., Тарасов Д.А. // ФТТ. 1996. Т.38. Вып.5.

Оглавление

Предисловие.....	5
Введение	7
ГЛАВА I. ФИЗИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОСЛОЙНЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ	10
1.1. Влияние деформаций и напряжений на физические характеристики полупроводниковых гетероструктур	11
1.2. Основные физические характеристики эпитаксиальных сверхрешеток.....	16
ГЛАВА II. ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ МНОГОСЛОЙНЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР.....	23
2.1. Основные источники искажений внутренней структуры и формы кристалла	23
2.2. Уравнения теории упругости для кристалла, искаженного действием внешних сил, дислокационных и температурных источников внутренних напряжений.....	27
2.3. Уравнения теории упругости для кристалла, искаженного распределением точечных дефектов.....	31
2.4. Полная система уравнений теории упругости для гетероструктур. Тензор НПП.....	35
2.5. Вид тензора упругой жесткости для гетероструктур с ориентациями пленок (001), (110), (111) кубической и (0001), $(2\bar{1}\bar{1}0)$ гексагональной сингоний.....	39
2.6. Основные уравнения для решения задачи упруго- и пластически деформированного состояния гетероструктур кубической и гексагональной сингоний с учетом изменения по глубине тензора упругой жесткости	43
2.7. Решение задачи упруго- и пластически деформированного состояния	46
2.7.1. Многослойная гетероструктура произвольного типа.....	46
2.7.2. Упругодеформированная гетероструктура с переменными компонентами тензора упругой жесткости	51
2.7.3. Упруго- и пластически деформированная гетероструктура с постоянными компонентами тензора упругой жесткости	56
ГЛАВА III. РЕНТГЕНОДИФРАКЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	61
3.1. Метод двухкристалльной рентгеновской дифрактометрии	61
3.1.1. Метод кривых качания	62
3.1.2. Рентгенодифрактометрическое измерение кривизны	68
3.2. Специфические рентгенодифракционные методы измерения деформаций	72
3.2.1. Метод широкорасходящегося пучка (ШРП).....	72
3.2.2. Измерение деформаций в ультратонких поверхностных слоях.....	74
3.3. Основные принципы трехкристалльной дифференциальной дифрактометрии	76
3.4. Использование трехкристалльной дифрактометрии для исследования гетероструктур. Общие положения	85

ГЛАВА IV. РЕНТГЕНОДИФРАКЦИОННЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ПРОФИЛЕЙ ДЕФОРМАЦИИ И АМОРФИЗАЦИИ ПО ГЛУБИНЕ КРИСТАЛЛА

90

- 4.1. Симметричная брэгговская дифракция в релаксированных эпитаксиальных системах с дислокациями несоответствия..... 90
- 4.2. Дифракция от некогерентных эпитаксиальных систем в симметричной геометрии Лауэ 97
- 4.3. Использование асимметричных брэгговских отражений для изучения релаксированных гетероструктур 102
- 4.4. Особенности дифракции в сильнорасогласованных эпитаксиальных системах..... 109
- 4.4.1. Измерение остаточных и термоупругих напряжений 111
- 4.4.2. Анализ уширений в Брэгг- и Лауэ-геометриях 113
- 4.5. Идентификация дефектов в эпитаксиальных слоях. Послойный анализ совершенства гетероструктур 116
- 4.6. Исследование поверхностной неоднородности деформации в эпитаксиальной структуре $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}/(111)\text{GaAs}$ 122
- 4.7. Профили деформации и аморфизации приповерхностных слоев монокристаллов кремния в зависимости от дозы имплантации ионов бора 126
- 4.7.1. Методика эксперимента 126
- 4.7.2. Экспериментальные результаты 127
- 4.7.3. Обсуждение результатов 129
- 4.8. Влияние изохронного отжига на структуру кристаллов кремния, облученных ионами бора 136
- 4.8.1. Методика и результаты исследования 136
- 4.8.2. Обсуждение результатов 141
- 4.9. Трехкристалльная рентгеновская дифрактометрия структуры приповерхностных слоев монокристаллов кремния, подвергнутых миллисекундному лазерному облучению..... 144
- 4.9.1. Методы исследования 146
- 4.9.2. Результаты исследования лазерного отжига 147
- 4.9.3. Обсуждение результатов 149
- 4.9.4. Точечные дефекты, образующиеся при импульсном лазерном воздействии 153
- 4.10. Влияние импульсного лазерного отжига на структуру поверхности ионно-имплантированного кремния..... 157
- 4.10.1. Методика эксперимента 159
- 4.10.2. Экспериментальные результаты 160
- 4.10.3. Обсуждение результатов 163

Заключение.....170

Литература.....171

Учебное издание

Бушуев Владимир Алексеевич

Кютт Регинальд Николаевич

Хапачев Юрий Пшиканович

Физические принципы рентгенодифрактометрического определения параметров реальной структуры многослойных эпитаксиальных пленок

Учебное пособие

Редактор Л.М.Культербаева

Технический редактор Б.Н.Хапачев

Корректор Д.А.Тарасов

Регистрационный номер ЛР020260 от 30.10.91

В печать 14.12.95. Печать офсетная.

Формат 60x84 1/16 10.46 усл.п.л. 10.8 уч.изд.л.

Тираж 300 экз. Заказ № 79

Цена договорная

Кабардино-Балкарский государственный университет

360004, г.Нальчик, ул.Чернышевского, 173

Оригинал-макет издания подготовлен в НИЛ

“Неразрушающих методов РД анализа структуры кристаллов”

Кабардино-Балкарского государственного университета