

Министерство образования Республики Беларусь

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 537.311.322; 537.226

№ госрегистрации 20111094

Инв. №

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

\_\_\_\_\_ к.т.н. Д.О.Глухов

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**«Исследование воздействия облучения на физико-механические  
свойства кремния и структур на его основе»**

(заключительный)

(ГБ 0511)

Начальник НИС

\_\_\_\_\_ Т.В.Гончарова  
(подпись)

\_\_\_\_\_  
(дата)

Руководитель темы  
к.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_ С.А.Вабищевич  
(подпись)

\_\_\_\_\_  
(дата)

Новополоцк 2013

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы,  
к.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Вабищевич С.А.  
(введение, заключение)

Исполнители темы:

Научный сотрудник

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Вабищевич Н.В.  
(главы 3-4, литература)

Инженер

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Степнов А.К.  
(глава 1, проведение эксперимента)

Оператор ЭВМ

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Юрченко Г.С.  
(глава 2, проведение эксперимента)

Оператор ЭВМ

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Высоцкий А.А.  
(глава 2, обработка  
экспериментальных данных)

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Кулеш В.Ф.

## РЕФЕРАТ

Отчет 80 с., 1 кн., 20 рисунков, 7 таблиц, 72 источника

МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ КРЕМНИЙ, ФОТОРЕЗИСТ,  
ИМПЛАНТАЦИЯ, МИКРОИНДЕНТИРОВАНИЕ, МИКРОТВЕРДОСТЬ,  
ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ, АДГЕЗИЯ, ЭФФЕКТ ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ,  
АМОРФИЗАЦИЯ

Объектом исследований являлся промышленный фоторезист ФП 9120 на основе фенолформальдегидных смол, имплантированный ионами сурьмы ( $Sb^+$ ) с энергией 60 кэВ в интервале флюенсов от  $1 \cdot 10^{15}$  до  $5 \cdot 10^{16}$   $см^{-2}$  и пластины кремния марки КЭФ 4,5(100), КДБ 12(100) и КДБ 10(111) толщиной  $460 \pm 20$  мкм, имплантированные ионами  $B^+$ ,  $P^+$  и  $Yb^+$  с энергией 60 – 1000 кэВ и дозами от  $1 \cdot 10^{12}$  до  $1 \cdot 10^{15}$   $см^{-2}$ .

Целью работы являлось исследование характера влияния имплантации ионов  $Sb^+$  на физико-механические свойства пленок промышленного фоторезиста ФП 9120 на поверхности кремниевых пластин и имплантации ионов бора и фосфора на физико-механические свойства пластин промышленного кремния марки КЭФ 4,5(100), КДБ 12(100) и КДБ 10(111).

Методы исследования: микроиндентирование, метод атомно-силовой микроскопии, метод масс-спектрометрии вторичных ионов.

Установлено, что при ионной имплантации  $Sb^+$  (энергия 60 кэВ) структур фотополимер–кремний процессы радиационного дефектообразования протекают в материале за областью проецированного пробега ионов  $Sb^+$ , что свидетельствует о наличии эффекта дальнего действия; имеет место эффект радиационного упрочнения полимера по всей толщине пленки и происходит формирование упрочненного слоя, нижняя граница которого находится в районе от 1,0 до 1,2 мкм с микротвердостью заглубленного упрочненного слоя в 3-6 раз превышающей микротвердость

неимплантированного полимера; происходит ухудшение адгезионного взаимодействия фотополимерной пленки с кремнием, о чем свидетельствует уменьшение значения микротвердости в  $\sim 20$  раз на глубинах, соответствующих границе полимер-кремний.

При имплантации монокристаллического кремния ионами бора и фосфора с энергией свыше 500 кэВ обнаружен эффект радиационного приповерхностного упрочнения. Установлено, что при низкоэнергетичной имплантации (60 кэВ) этот эффект наблюдается на расстояниях существенно превышающих радиус проецированного пробега ионов фосфора, что обусловлено диффузией собственных междоузельных атомов (и, возможно, вакансий) из области торможения ионов в глубь пластины.

Показано, что изменение микротвердости и трещиностойкости приповерхностных слоев кремния, имплантированного фосфором (энергия 60 кэВ), коррелирует с размерами формирующейся у поверхности пластин монокристалла кремния в ходе ионной имплантации аморфизированной области.

Установлено, что быстрый термический отжиг при температуре 1000°C длительностью до 60 секунд приводит к разупрочнению приповерхностной области монокристалла кремния на глубине до 1 мкм и увеличению трещиностойкости и эффективной энергии разрушения (росту  $K_{1C}$  и  $\gamma$ ) при малых нагрузках. Эффект обусловлен генерацией вакансий в процессе термообработки.

Методика обработки результатов измерений оптимизирована с учетом особенностей идентификации полупроводниковых материалов и структур.

Проведено внедрение результатов НИР в учебный процесс. При проведении лекционных занятий используется разработка «Способ определения дефектности монокристаллического кремния».

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР ФОТОПОЛИМЕР-КРЕМНИЙ И МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ (АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ) .....	9
1.1 Влияние ионной имплантации на прочностные характеристики структур полимер-кремний .....	10
1.2 Влияние ионной имплантации на физико-механические свойства монокристаллического кремния .....	13
2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	17
2.1 Особенности определения прочностных свойств материала методом микроиндентирования .....	17
2.2 Подготовка образцов и методика эксперимента .....	24
3 ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР ПОЛИМЕР-КРЕМНИЙ .....	27
3.1 Модификация прочностных свойств фоторезиста ФП 9120 имплантацией ионами сурьмы .....	27
3.2. Механизм влияния имплантации на прочностные свойства структур фоторезист-кремний .....	39
4 МИКРОПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ БОРА, ФОСФОРА И ИТТЕРБИЯ .....	42

4.1	Влияние энергии имплантации на микротвердость приповерхностных слоев кремния .....	42
4.2	Модификация прочностных свойств кремния имплантацией ионами В <sup>+</sup> и Р <sup>+</sup> с энергией до 1000 кэВ .....	44
4.3	Влияние низкоэнергетичной имплантации ионами В <sup>+</sup> , Р <sup>+</sup> и Yb <sup>+</sup> на прочностные свойства приповерхностных слоев кремния .....	51
4.4	Анализ механизмов влияния низкоэнергетичной и среднеэнергетичной ионной имплантации на физико-механические свойства кремния .....	58
4.5	Влияние быстрого термического отжига на физико-механические свойства приповерхностных слоев кремния .....	61
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	70
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	73

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике/ Под ред. А.Л.Асеева. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004 – 368 с.
2. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники /В.В.Пасынков, В.С.Сорокин. – СПб.: Лань, 2003. – 367 с.
3. Мильвидский, М.Г. Полупроводниковые материалы в современной электронике / М.Г.Мильвидский. – М: Наука, 1986. – 144 с.
4. Пелевин, О.В. Новое в методах получения полупроводниковых материалов /О.В. Пелевин, Б.Г. Гирич // Металлургия цветных металлов: Сб. ст. // Итоги науки и техники ВИНТИ АН СССР: сб ст./ – М.: Изд. ВИНТИ, 1988. – Т.19. – С. 49-107.
5. Обухов, В.И. Влияние технологических факторов на изменение упругих свойств кремния в производстве интегральных датчиков/ В.И.Обухов// Датчики и системы. – 2001. – № 2. – С.15-17.
6. Мужиченко, О. Термомеханические напряжения в сборочных микроузлах /О.Мужиченко, Н. Плис // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. – 2000. – № 6. – С.63-64.
7. Технология СБИС/ Под. Ред. С.Зи. В 2-х кн. Кн.1 – М.: Мир, 1986. – С.292-353.
8. Семенович, Г.М. Исследование структуры граничных слоев полиметилметакрилата методом нарушенного полного отражения/ Г.М. Семенович [и др.] // Высокомолекулярные соединения. Сер.Ф. – 1978. – Т.20, № 9. – С.2000-2005.
9. Топильский, Г.В. О взаимодействии метилметакрилата с силикатами минералов/ Г.В. Топильский [и др.]// Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура. – 1975. – № 12. – С.78-81.
10. Xiaolin, Lu. Characterization of the interfacial interaction between polyacrylamide and silicon substrate by Fourier transform infrared

- spectroscopy/ Lu Xiaolin, Mi Yongli // *Macromolecules*. – 2005. – V.38, № 3. – С.839-843.
11. Физические процессы в облученных полупроводниках/ Под ред. Л.С.Смирнова. – Новосибирск: Наука, 1977. – 256 с.
  12. Шугуров, А.Р. Особенности определения механических характеристик тонких пленок методом наноиндентирования/ А.Р.Шугуров, А.В. Панин, К.В. Оскомов // *Физика твердого тела*. – 2008. – Т.50, № 6. – С.1007-1012.
  13. Штанский, Д.В. Особенности структуры и физико-механических свойств наноструктурных тонких пленок/ Д.В. Штанский [и др.] // *Физика твердого тела*. – 2003. – Т.45, № 6. – С.1122-1129.
  14. Головин, Ю.И. Влияние типа и концентрации легирующей примеси на динамику бета-индуцированного изменения микротвердости кремния/ Ю.И. Головин, А.А. Дмитриевский, Н.Ю. Сучкова// *Физика твердого тела*. – 2008. – Т.50. – № 1. – С.26-28.
  15. Головин, Ю.И. Определение комплекса механических свойств материалов в нанобъемах методами наноиндентирования/ Ю.И. Головин [и др.]// *Конденсированные среды и межфазные границы*. – 2001. – Т.3. – № 2. – С.122-135.
  16. Головин, Ю.И. Кинетические особенности деформации твердых тел в нано- и микрообъемах/ Ю.И. Головин [и др.] // *Физика твердого тела*. – 2005. – Т.47, Вып. 6. – С. 961-962.
  17. Герасимов, А.Б. Влияние мелких примесей на температурную зависимость микротвердости и фотомеханического эффекта в полупроводниках/ А.Б. Герасимов, Г.Д. Чирадзе // *Физика и техника полупроводников*. – 2002. – Т.36, Вып. 10. – С.1191-1193.
  18. Березина, Г.М. Изменение микротвердости кремния при низкотемпературном отжиге/ Г.М. Березина, Ф.П. Коршунов, Л.И.Мурин// *Неорганические материалы*. – 1990. – Т.26. – № 4. – С.683-686.



19. Влияние внешних факторов на релаксацию микротвердости в монокристаллах кремния/ В.А. Макара [и др.]// Металлофизика и новейшие технологии. – 2003. – Т.25. – № 7. – С.1079-1086.
20. Вабищевич, С.А. Подавление радиационного упрочнения кремния, легированного германием/ С.А. Вабищевич, Н.В. Вабищевич, Д.И. Бринкевич//Физика и химия обработки материалов. – 2006.– № 4.–С.12-14.
21. Поут, Дж.М. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Дж.М. Поут; под ред. Дж.М. Поута [и др.]. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.
22. Литвинов, Ю.М. Методология определения механических свойств полупроводниковых материалов с помощью метода непрерывного вдавливания индентора / Ю.М. Литвинов, М.Ю. Литвинов // Изв. вузов. Материалы электронной техники. – 2004. – № 4. – С. 11 – 16.
23. Бульчев, С.И. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора/ С.И. Бульчев, В.П. Алехин. М.:Машиностроение, 1990. – 224 с.
24. Вальковская, М.И. Пластичность и хрупкость полупроводниковых материалов при испытаниях на микротвердость/ М.И. Вальковская, Б.М. Пушкаш, Э.Е. Марончук// Кишинев, Штиинца, 1984. – 107 с.
25. Глазов, В.М. Микротвердость металлов и полупроводников/ В.М. Глазов, В.Н.Видорович // М.: Металлургия, 1969. – 248 с.
26. Тетельбаум, Д.И. О применимости метода микротвердости для исследования эффекта дальнего действия в твердых телах/ Д.И. Тетельбаум, А.Ю.Азов // Вестник Нижегородского ун-та. Сер. Физика твердого тела. – 2001.– №2. – С.120-130.
27. Колесников, Ю.В. Механика контактного разрушения/ Ю.В. Колесников, Е.М.Морозов // М.: Наука, – 1989. – 220 с.

28. Новые принципы, техника и результаты исследования динамических характеристик твердых тел в микрообъемах./ Ю.И. Головин [и др.]// Журнал технической физики. – 2000. –Т.70. – № 5. – С.82-91.
29. Комаров, Ф.Ф. Ионная имплантация/ Ф.Ф.Комаров, А.П.Новиков, А.Ф.Буренков// Мн.:Універсітэцкае. – 1994. – 303 с.
30. Оджаев, В.Б. Ионная имплантация полимеров/ В.Б. Оджаев [и др.] – Мн.: БГУ. – 1998. – 197 с.
31. Березина, Г.М. К вопросу измерения микротвердости в кремнии./ Г.М. Березина// Доклады АН БССР. – 1979. – Т.33. – № 5. – С.431-433.
32. Концевой, Ю.А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур/ Ю.А. Концевой, Ю.М. Литвинов, Э.А.Фаттахов // М.: Радио и связь, – 1982. – 240 с.
33. О распределении величины микротвердости по глубине образца/ А.Б. Герасимов [и др.]// Физика твердого тела. – 1999. – Т.41, № 7. – С.1225-1227.
34. Физическая природа изменения микротвердости по глубине образца/ А.Б. Герасимов [и др.]// Физика и химия обработки материалов. – 2004. – №3. – С.71-74.
35. Просолович, В.С. Основы современных технологических процессов: курс лекций / В.С. Просолович, Ю.Н. Янковский, Д.И. Бринкевич. – Минск: БГУ, 2011. – 135 с.
36. Диденко, А.Н. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов / А.Н. Диденко, А.Е. Лигачев, И.Б. Куракин. – М.: Энергоиздат, 1987. – 184 с.
37. Вабищевич, С.А. Особенности дефектообразования в кремнии, имплантированном ионами с удельной энергией  $\sim 1$  МэВ/нуклон /С.А. Вабищевич [и др.]// Неорганические материалы. – 2010. – Т. 46, № 12. – С. 1413 – 1417.
38. Вабищевич, С.А. Приповерхностное упрочнение пластин кремния, имплантированных высокоэнергетичными ионами бора / С.А. Вабищевич

- [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования –2010.– №1.– С. 78 – 81.
39. Вабищевич, С.А. Дефектообразование в приповерхностном слое кремния, имплантированного высокоэнергетическими ионами: Исследование методом микроиндентирования/ С.А. Вабищевич [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук – 2010. – № 3. – С. 86 – 90.
  40. Спектры ЭПР алмазоподобных и облученных ионами полимерных углеродных плёнок / В.В. Сухоруков [и др.] // Поверхность. 1991. – №5. – С.92-96.
  41. Перепенко, И.И. Введение в физику полимеров.– М.: Химия, 1978. – 312 с.
  42. Chemical processes and surface hardening in ion-implanted polyester films/ N.Nishimiya [et al.]// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – V. 59-60, Part 2, 1 – 1991. – P.1276-1280.
  43. Боярская, Ю.С. Деформирование кристаллов при испытаниях на микротвердость/ Ю.С.Боярская – Кишинев: Штиинца, 1972. – 235 с.
  44. Зарождение разрушения в поверхностных слоях монокристаллов Ge и Si / В.Е.Корсуков [и др.] // Физика твердого тела. – 1996. – Т.38, № 1. – С.113-121.
  45. Калоша, В.К. Математическая обработка результатов эксперимента./ В.К. Калоша, С.И. Лобко, Т.С. Чикова// Мн.: Высшая школа, 1982. – 103 с.
  46. Пальчик, Э.М. Введение в теорию вероятностей и математическую статистику/ Э.М.Пальчик // Новополоцк: Изд-во ПГУ. – 2000. – 100 с.
  47. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб.-метод. комплекс для студентов технических специальностей/ Сост. и общ. ред. И.Б. Сороговца.// Новополоцк: ПГУ, – 2008. – 230 с.
  48. Микротвердость монокристаллов полупроводниковых материалов/ Д.И.Бринкевич [и др.]// Материалы и структуры современной электроники: сб. научных тр. V Межд. научн. конф.; Минск, 10-11

октября 2012./Белорус. гос. ун-т., редкол.: В.Б.Оджаев (отв. ред.) [и др.]– Минск, 2012. – С.21-24.

49. Бринкевич, Д.И. Микромеханические свойства эпитаксиальных слоев GaP, легированных редкоземельным элементом диспрозием/ Д.И. Бринкевич, Н.В.Вабищевич, В.С. Просолович // Неорганические материалы. – 2012. – Т.48, № 8. – С.878-883.
50. Influence of background impurities on the formation of stacking faults in silicon wafers/ D.I.Brinkevich [et al.]// Russian Microelectronics – 2006. – V.35, №2. – P.94-97.
51. Микроиндентирование структур фотополимер-кремний/ Н.В. Вабищевич [и др.] // Вестник Полоцкого университета. Серия С. Фундаментальные науки. – 2011. – № 4. – С.77-83.
52. Сизова, Н.Л. Микротвердость и вязкость разрушения плоскости (001) минокристаллов тетробората лития / Н.Л.Сизова, В.А.Ломонов, Ю.В.Гиларевский // Кристаллография. – 1997. – Т.42, №2. – С.331-333.
53. Ориентированное состояние полимеров/ Власов С.В., Кулизнев В.Н. - М.: Знание, 1987 – 48 с.
54. Кинг, Р.В. Полимеры/ Влияние облучения на материалы и элементы электронных схем/ Р.В. Кинг, Н.Дж. Бродвей, Р.А. Майер. – М.: Атомиздат, 1967. – С.49-114. (Effect of radiation on materials and components. Ed. J.F.Kircher, R.E.Bowman – Reinhold Publishing Co, 1964).
55. Модификация приповерхностных слоев полиэтилентерефталата и полиимида имплантацией ионов никеля/ Д.И. Бринкевич [и др.]// «Взаимодействие излучений с твердым телом». Материалы 8 межд. конф. Минск. 23-25.09.2009. – Мн., Изд. Центр БГУ, 2009. – С.148-150.
56. Физико-механические свойства приповерхностных слоев полиэтилентерефталата и полиимида, модифицированных имплантацией ионов никеля/ С.А. Вабищевич [и др.]// Вестник Полоцкого университета. Серия С. Фундаментальные науки. – 2010. – № 9. – С.74-82.

57. Грасси, Н. Деструкция и стабилизация полимеров/ Н. Грасси, Дж. Скотт. – М.: Мир, 1988. – 246 с. (Grassie N., Scott G. Polymer degradation and stabilization – Cambridge University Press, 1985).
58. AFM, ESR and optic study of Sb<sup>+</sup> ions implanted photoresist/ I. Azarko [et al.]// Przegląd elektrotechniczny. – 2010. – № 7. – С.270-271.
59. Влияние ионного облучения на микродефектную структуру кристаллов кремния/ Е.С. Демидов [и др.]// Неорганические материалы. – 2000. – Т.36, № 5. – С.522-525.
60. О едином подходе к интерпретации эффекта дальнего действия при облучении твердых тел заряженными частицами и фотонами светового диапазона/ Д.И. Тетельбаум [и др.]// Поверхность. – 2000. – № 5. – С.87-89.
61. Соколов, В.И. Некоторые характеристики пористого кремния (отражение, рассеяние, показатель преломления, микротвердость)/ В.И. Соколов, А.И. Шелых // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34, № 5. – С. 34 – 39.
62. Реутов, В.Ф. О вкладе нанокластеров в радиационное упрочнение металлов/ В.Ф.Реутов // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 96, № 6. – С. 92 – 99.
63. Влияние нейтронного облучения на микротвердость арсенида галлия / З.В. Джибути [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30, № 17. – С. 45 – 47.
64. Морозов, Н.П. Дефектообразование в кремнии при ионной бомбардировке за пределами области пробега ионов / Н.П. Морозов, В.Д. Скупов, Д.И. Тетельбаум // Физика и техника полупроводников. – 1985. – Т. 19, № 3. – С. 464 – 468.
65. Головин, Ю.И. Недислокационная пластичность и ее роль в массопереносе и формировании отпечатка при динамическом индентировании / Ю.И. Головин, А.А. Дмитриевский, Н.Ю. Сучкова//Физика твердого тела.–2006. – Т.48, №2.–С.262– 265.

66. Эффект дальнего действия при ионном облучении «бескислородного» кремния / Е.И. Зорин [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 1987. – Т.21, № 5. – С.904–910.
67. Морозов, Н.П. Глубокое проникновение радиационных дефектов из ионно-имплантированного слоя в объем полупроводника / Н.П.Морозов, Д.И. Тетельбаум // Физика и техника полупроводников. – 1983. – Т. 17, № 5. – С. 838 – 842.
68. Вабищевич, С.А. Микротвердость пластин кремния, прошедшего геттерирующую термообработку/ С.А. Вабищевич, Н.В. Вабищевич, Д.И. Бринкевич // Перспективные материалы. – 2005. – № 2. – С. 20 – 22.
69. Кукушкин, С.А. Эволюция морфологии микропоры в хрупком твердом теле под действием внешней механической нагрузки / С.А. Кукушкин, С.В. Кузьмичев // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50, № 8. – С. 1390 – 1394.
70. R.J. Falster, M.J. Binns, H.W. Korb US patent 6686620, primary class 438/473, publication 3.02.2004.
71. Voronkov, V.V. Effect of vacancies on nucleation of oxide precipitates in silicon / V.V. Voronkov, R. Falster // Materials science in semiconductor processing. – 2003. – V. 5. – P. 387 – 390.
72. Головин, Ю.И. Структура комплексов, ответственных за радиационно-стимулированное разупрочнение монокристаллов кремния / Ю.И. Головин, А.И. Тюрин // Физика твердого тела. – 2000. – Т. 42, № 10. – С. 1818 – 1820.