

на правах рукописи

Хмельницкий Роман Абрамович

Радиационное повреждение и графитизация алмаза при
ионной имплантации

01.04.07 - физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание
ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2008

Работа выполнена в Отделении физики твердого тела Физического института РАН им. П.Н. Лебедева

Научный руководитель доктор физико-математических наук,
профессор Гиппиус Алексей Алексеевич

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук
Мордкович Виктор Наумович (ИПТМ РАН)

доктор технических наук, профессор
Концевой Юлий Абрамович
(ФГУП "Пульсар")

Ведущее учреждение Научно-исследовательский институт
ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
Московского государственного
университета им. М.В. Ломоносова

Защита состоится 19 мая 2008 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 в Физическом институте РАН им. П.Н. Лебедева (Москва, 119991, Ленинский пр. 53, гл. здание)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по вышеуказанному адресу.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор

Шиканов А. С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В течение многих лет не ослабевает интерес к исследованиям радиационной стойкости и графитизации алмаза. Тому есть несколько причин. Во-первых, алмаз в нормальных условиях является метастабильной фазой углерода и при радиационном повреждении может трансформироваться в более стабильную графитоподобную фазу. Исследование графитизации при радиационном повреждении может пролить свет на физику такого перехода. Во-вторых, одной из наиболее перспективных областей применения алмаза являются датчики всех видов ионизирующих излучений и нужно знать механизмы повреждения таких датчиков [1]. В-третьих, до сих пор одним из наиболее эффективных методов модификации свойств алмаза является ионная имплантация [2]. С её помощью научились делать полупроводниковые слои р-типа хорошего качества и даже изготавливать кое-какие приборные структуры. После имплантации необходимо отжечь материал, чтобы устранить, насколько это возможно, радиационные повреждения. Метастабильность алмазной фазы накладывает ограничение на возможную температуру отжига. При температурах выше 1600 °С при низких давлениях начинается неоднородная графитизация поверхности алмаза. По этой причине полностью устранить все радиационные дефекты при отжиге не удастся из-за высокой температуры Дебая алмаза (~ 2000 К [3, 4]). Остаточные дефекты влияют на электрические свойства имплантированного материала.

При больших дозах имплантации возникает угроза графитизации слоёв алмаза с наибольшим радиационным повреждением. Графитизация – это трансформация алмаза, где атомы связаны sp^3 связями, в материал, где, как в графите, атомы связаны sp^2 связями. С одной стороны это явление кладёт некоторый предел применению ионной имплантации в алмазе, а с другой открывает возможности использования заглублённых и поверхностных графитизированных слоев в качестве пассивных и активных элементов алмазной электроники. Материал в таких слоях очень напоминает по свойствам графит – поглощает свет и хорошо проводит ток, хотя вопрос о микроструктуре этого вещества сейчас находится в стадии изучения.

Цель исследования

В настоящей работе ставится цель экспериментально исследовать природу радиационного повреждения алмаза, процессы трансформации дефектов и

формирования графитизированного материала.

Основные задачи

В рамках настоящей работы стоят следующие задачи:

- исследовать радиационное повреждение алмаза при ионной имплантации методами оптического пропускания и измерения вспухания;
- проследить процесс отжига радиационных дефектов и установить закономерности формирования графитизированных слоев;
- исследовать оптические свойства графитизированных слоев;
- описать и изучить явления, возникающие при отжиге алмаза, имплантированного изотопами водорода;
- исследовать явление блистеринга в алмазе.

Объект исследования и экспериментальный подход

Основные экспериментальные данные получены на природных монокристаллических образцах. Использовались полированные пластинки, вырезанные в плоскостях (110) и (100). Типичные линейные размеры пластинок – 3-5 мм, а толщины 100-400 мкм. Через маски с отверстиями имплантировались ионы H^+ , D^+ , He^+ и C^+ с энергиями до 350 кэВ. Ионная имплантация производилась на ускорителе ионов фирмы “High Voltage Engineering Europa B. V.” с магнитным сепаратором ионов при давлении ниже 10^{-3} Па. Имплантация делалась в неканализующих направлениях. Если это особо не оговаривается, имплантация производилась номинально при комнатной температуре. В ряде экспериментов имплантация производилась при температурах, отличных от комнатной, что реализовано путем нагрева или охлаждения держателя образцов.

Для нужд ИК спектроскопии С-Н связей монокристаллические образцы были имплантированы ионами H^+ с энергиями от 350 до 65 кэВ (всего 18 значений энергии) и такими дозами (суммарная доза $2,45 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$), чтобы на глубинах от 0,3 до 1,8 мкм концентрация имплантированного водорода была $1,6 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ ($\pm 10\%$), что составляет немногим менее 1 ат. %.

В ряде случаев использовались образцы полированных поликристаллических пленок, выращенных методом СВЧ ПФХО. Имплантация производилась в них как с ростовой стороны, где кристаллиты имеют средние размеры ~ 100 мкм, так и со стороны зародышеобразования, где размеры кристаллитов ~ 1 мкм

Отжиг образцов производился при температурах до 1700 °С в графитовой

печи в вакууме при давлении ниже 10^{-3} Па. Температура отжига контролировалась термопарой и двучастотным пирометром сравнения. Отжиг при более высоких температурах не проводился из-за угрозы объемной спонтанной графитизации образца. Неоднородная поверхностная спонтанная графитизация, возникающая на полированных пластинках определенных кристаллографических ориентаций при температурах выше $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$, также вынуждала использовать только специально отобранные образцы. После отжига поверхность алмазных образцов всегда покрыта тонким однородным слоем графита из-за взаимодействия с адсорбированными атомами и остаточными газами вакуумной установки. Чтобы устранить этот поверхностный графит, мешающий оптическим измерениям, образцы после отжига травились в горячем хромпике (раствор $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ в H_2SO_4) при температуре около $180\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Оптическое поглощение исследовалось в диапазоне $220\div 900$ нм на спектрофотометре “Specord M400” (Carl Zeiss, Jena).

В образцах, предназначенных для исследования С-Н связей, на спектрофотометре “Specord M80” (Carl Zeiss, Jena) измерялось ИК поглощение в диапазоне $2,5\div 50$ мкм. Оптические измерения выполнялись при комнатной температуре.

Для некоторых образцов измерялось отражение света в видимом диапазоне на интерференционном микроскопе МИИ-4, совмещенном со спектрофотометром СФ-16.

На характерных стадиях отжига выполнялись микрофотографии образцов в проходящем и отражённом свете на оптическом микроскопе ПОЛАМ-Р132, оснащённом цифровой фотокамерой COOLPIX-955.

Информация о рельефе поверхности образцов получена путем измерения топографии поверхности методом оптической интерферометрии на оптическом интерференционном микроскопе Zygo NewView 5000.

Измерения спектральной эллипсометрии выполнялись на универсальном автоматическом двухканальном эллипсометре в диапазоне длин волн $370\div 1100$ нм.

Кроме того, привлекалась к использованию атомно-силовая микроскопия.

Научная новизна

Показано, что методы измерения оптического пропускания и вспухания позволяют количественно измерять радиационное повреждение алмаза при ионной имплантации.

Определены оптические и электрические свойства графитизированного материала.

Предложен способ определения толщины заглабленного графитизированного слоя.

Разработана технология изготовления заглабленных проводящих слоев в алмазе.

Впервые подробно исследованы явления при имплантации в алмаз изотопов водорода.

Разработаны рекомендации по изготовлению алмазных датчиков ионизирующих излучений.

Практическая ценность и реализация результатов

Графитизированные слои могут найти применение в качестве активных и пассивных элементов алмазной электроники. В качестве пассивных элементов они могут быть использованы как резисторы, обкладки конденсаторов, токопроводящие дорожки и т. п. Приведен пример запатентованного термодатчика на основе графитизированного слоя. В конструкции активных элементов такие слои можно применить для создания гетероконтактов к полупроводниковому и изолирующему алмазу. Применение графитизированного слоя для создания заглабленного электрического контакта к полупроводниковому алмазу продемонстрировано на примере конструкции диода Шоттки.

Практически важно, что знание оптических параметров графитизированного материала позволяет по простым измерениям оптического пропускания определять толщины графитизированных слоев, а по интерференции легко определяется глубина их залегания.

Уже сейчас тонкие полупрозрачные поверхностные графитизированные слои успешно применяются для изготовления контактов в детекторах УФ излучения и датчиках ионизирующих частиц малых энергий на алмазе.

Знание физики радиационных дефектов в алмазе дает возможность проектировать и эксплуатировать датчики ионизирующих излучений с максимальной эффективностью и ресурсом.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы были доложены на:
- 3-м Международном симпозиуме по алмазным пленкам, С-Петербург, Россия,

16-19 июня 1996 г.

- Международной конференции "Алмазы в технике и электронике", Москва, Россия, 26-28 мая 1998 г.

- 6-й Международной конференции "New Diamond Science and Technology", Претория, ЮАР, 31 августа-4 сентября 1998 г.

- Всероссийской конференции " Алмаз в технике и электронике", Москва, Россия, июнь 2000 г.

- Всероссийской конференции " Алмаз в технике и электронике", Москва, Россия, 12-13 сентября 2001 г.

- 5-й международной конференции "Взаимодействие излучений с твердым телом", Минск, Беларусь, 6-9 октября 2003 г.

- 5-й международной конференции "Ion implantation and other applications of ions and electrons", Казимеж Дольны, Польша, 14-17 июня 2004 г.

- Совещании руководителей проектов по программе фундаментальных исследований РАН "Новые материалы и структуры", Черноголовка, 1-2 декабря 2005 г.

Публикации

В процессе выполнения работы опубликовано 12 статей в отечественных и зарубежных журналах, получен патент на изобретение.

Защищаемые положения

- Метод оптического поглощения позволяет получить информацию о природе и трансформации радиационных дефектов в процессе ионной имплантации и отжига. Он вкупе с измерениями вспухания дает абсолютную и интегральную характеристику степени радиационного повреждения ионно-имплантированного алмаза. Это простые, информативные и неразрушающие методы.

- Графитизированный материал является аморфной формой углерода, где атомы связаны sp^2 связями. В спектральном диапазоне 370÷1100 нм по данным эллипсометрических измерений графитизированный материал имеет показатель преломления от 2,26 до 2,38 и коэффициент экстинкции от 0,8 до 0,98. Графитизированный материал имеет плотность $2,1 \pm 0,1$ г/см³. При комнатной температуре его удельное сопротивление составляет $5 \cdot 10^{-3}$ Ом·см с отрицательным температурным коэффициентом - $2,3 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹.

- Имплантация изотопов водорода приводит к уникальным явлениям островковой графитизации, разрастания графитизированных областей и

блистеринга. Разрастание графитизированных областей происходит при высоких температурах отжига (больше 1500 °С) и наблюдается во всех случаях имплантации изотопов водорода. При имплантации H^+ графитизированный слой всегда островковый, и не существует пороговой дозы графитизации. Чем ниже доза имплантации, тем выше температура начала графитизации и тем меньше размеры островков. Случай имплантации D^+ по своим проявлениям занимает промежуточное положение между имплантацией He^+ и H^+ .

- Явление блистеринга демонстрирует случай диффузии имплантированного водорода в алмазе. В пузыри собирается только часть имплантированного водорода. Большая часть деформации алмазной пленки над пузырем носит упругий характер. Давление газообразного водорода в пузырях при комнатной температуре составляет несколько десятков атмосфер, а натяжения в пленках – сотни Мпа.

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, пяти глав и библиографии:

Глава 1. Радиационное повреждение алмаза при ионной имплантации и последующем отжиге.

Глава 2. Радиационное повреждение алмаза при ионной имплантации и графитизация.

Глава 3. Свойства и применение графитизированных слоев в алмазе.

Глава 4. Особенности графитизации при имплантации изотопов водорода.

Глава 5. Заключение.

Диссертация содержит 97 страниц и 43 рисунка. Библиография состоит из 80 ссылок.

Содержание

Во введении содержится общая характеристика проблемы, описываются свойства алмаза и особенности его радиационного повреждения, определены цели и задачи работы.

Первая глава содержит описание радиационного повреждения алмаза при ионной имплантации, моделирование ионной имплантации методом Монте-Карло, описание экспериментов и литературный обзор работ по радиационному повреждению алмаза.

При ионной имплантации в твердое тело ион тормозится в материале до тех пор, пока не потеряет свою кинетическую энергию. Потеря энергии иона

происходит за счет упругих и неупругих взаимодействий. При неупругих процессах ион расходует энергию на возбуждение электронной подсистемы твердого тела, не образуя дефектов. В упругих процессах происходят столкновения налетающего иона с атомами кристаллической решетки. Если переданной при этом энергии окажется достаточно для разрыва межатомных связей, то атом выбивается со своего места и образуются основные радиационные дефекты: вакансии и сам выбитый атом, то есть междоузлие.

Для типичных условий ионной имплантации выполнено моделирование пролета ионов методом Монте-Карло, в результате которого получены распределения вакансий и имплантированной примеси (рис. 1). Это моделирование учитывает неупругие потери энергии ионов на взаимодействие с электронной подсистемой твердого тела, упругие потери при соударении с атомами вещества, собственно приводящие к возникновению радиационных дефектов [5]. Оно не учитывает кристаллическую природу бомбардируемого вещества, не учитывает взаимодействие дефектов между собой и их диффузию, то есть дает "замороженную" картину пространственного распределения первичных точечных дефектов. Кроме того, оно не учитывает явлений т. н. баллистического отжига, когда при больших дозах имплантации в условиях высокой концентрации дефектов выбивание уже выбитого атома не приводит к образованию нового дефекта и даже может вернуть атом в замещающее положение [6]. Тем не менее, такое моделирование даёт во многих отношениях хорошее совпадение с опытом [7].

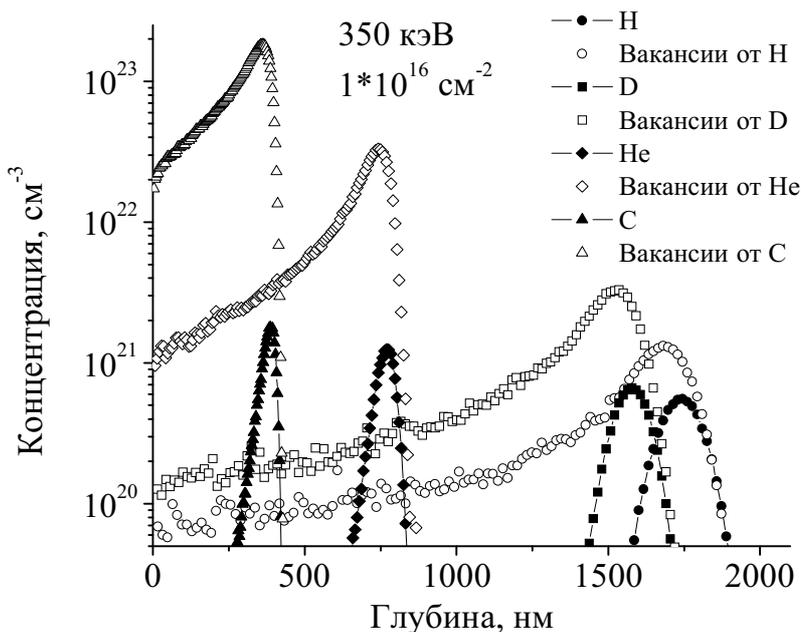


Рис. 1. Распределения концентраций имплантированных атомов H, D, He, C и радиационных дефектов при ионной имплантации с энергией 350 кэВ и дозой $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, полученные моделированием методом Монте-Карло.

При обсуждении природы радиационного повреждения в алмазе по литературным данным основное внимание уделено таким информативным экспериментальным методикам, как комбинационное рассеяние, измерения электропроводности и просвечивающая электронная микроскопия. В частности, отмечено, что графитизированный материал, образующийся при имплантации в алмаз с дозами выше критической и последующем высокотемпературном отжиге, оказался аморфным.

Во второй главе приведены экспериментальные результаты исследования радиационного повреждения алмаза при ионной имплантации и графитизации методами оптического пропускания и вспухания.

Простые и неразрушающие методы исследования оптического пропускания и вспухания применены для исследования радиационного повреждения алмаза при ионной имплантации. В частности, этими методами была подтверждена сильная зависимость степени и природы радиационного повреждения от температуры имплантации и важности явлений радиационно-стимулированного отжига (рис. 2).

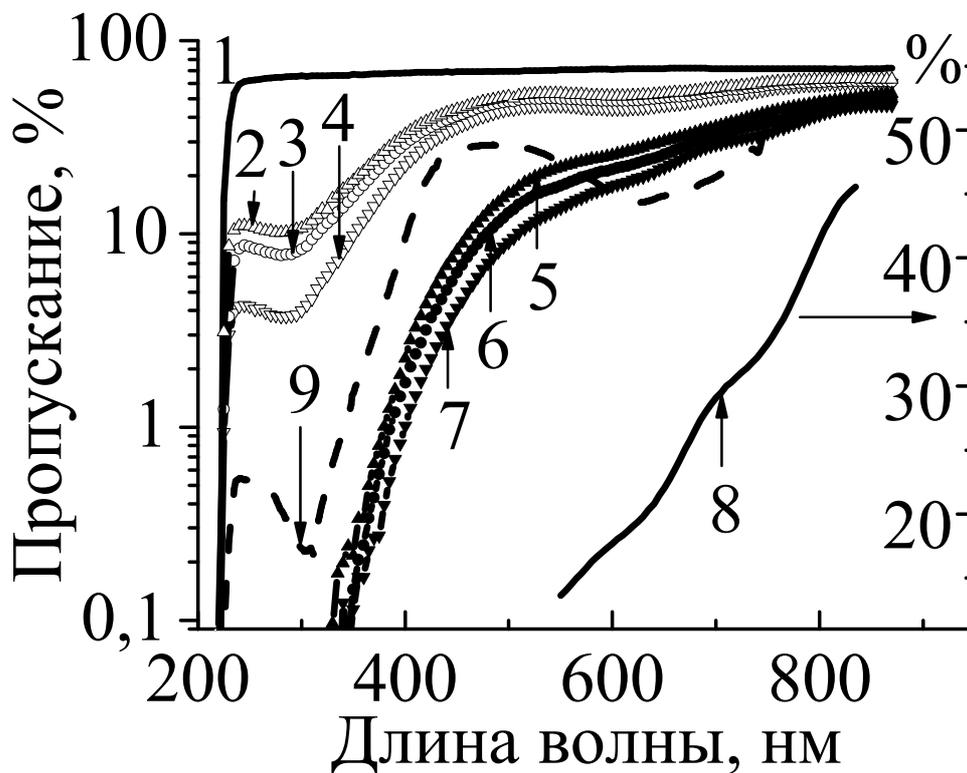


Рис. 2. Спектры оптического пропускания алмазов, имплантированных ионами He^+ с энергией 350 кэВ. (1) – неимплантированный алмаз; (2), (3), (4) – доза имплантации $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$; (5), (6), (7) доза имплантации $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. (2) и (5) – температура имплантации 373 К; (3) и (6) – температура имплантации 273 К; (4) и (7) – температура имплантации 77 К. (8) – участок спектра (7) в подробном масштабе.. (9) – снятый при комнатной температуре спектр пропускания алмаза, облученного электронами с энергией 2 МэВ и дозой $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$.

Основной компонентой оптического поглощения ионно-имплантированных слоев в алмазе является поглощение нейтральными вакансиями. Но имеется еще одна бесструктурная составляющая неясной природы (предположительно, поглощение на sp^2 связях). Когда радиационное повреждение превышает критическое, наблюдается также интерференция, говорящая о зарождении графитизированного слоя. Из спектров на рис. 2. видно, что общий уровень радиационного повреждения (определяемый по оптическому поглощению) тем меньше, чем выше температура имплантации.

Процесс отжига ионно-имплантированных слоев выявляет следующие

закономерности. Когда радиационное повреждение ниже критического, при температурах отжига вплоть до 800 °С полностью отжигаются вакансии, при температурах 500÷1000 °С отжигаются дефекты с sp^2 связями. Далее вплоть до самых высоких температур отжигаются дефекты, дающие в оптическом поглощении хвост Урбаха. Когда радиационное повреждение выше критического, в спектрах пропускания наблюдается интерференция, свидетельствующая об образовании графитизированного слоя. В этом случае в процессе отжига наблюдаются две тенденции: отжиг радиационных дефектов и формирование графитизированного слоя.

В третьей главе основной результат – экспериментальное определение комплексного показателя преломления графитизированного материала в широком спектральном интервале. Приведены результаты исследования других свойств этого материала, а также перспективные направления его практического применения.

Для изучения свойств графитизированного материала, образующегося при имплантации с дозами выше критической и последующем высокотемпературном отжиге, применен метод спектральной эллипсометрии. Он позволил с высокой точностью определить комплексный показатель преломления **n-ik** графитизированного материала (рис. 3). Вид спектров подтверждает, что в основе микроструктуры графитизированного материала лежат sp^2 связи.

Знание коэффициента экстинкции **k**, а, следовательно, коэффициента поглощения позволяет по измерениям оптического поглощения определять толщину графитизированного слоя. Вместе с данными вдувания над ним это позволяет рассчитать плотность материала в нем. Она оказалась равной $2,1 \pm 0,1$ г/см³, что типично для всех графитоподобных материалов.

По электрическим свойствам графитизированный материал сильно напоминает графит. При комнатной температуре его удельное сопротивление составляет $5 \cdot 10^{-3}$ Ом·см. Температурный коэффициент сопротивления, так же как у графита, отрицательный и составляет в широком диапазоне температур $2,3 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹.

Приведены опытные данные о механических, химических свойствах графитизированного материала, результаты рентгеноструктурного анализа и исследований комбинационного рассеяния. Они подтверждают аморфную природу графитизированного материала.

В качестве примеров практического использования графитизированных

слоев приведена информация о конструкции и характеристиках таких приборов на основе алмаза, как термодатчик и диод Шоттки.

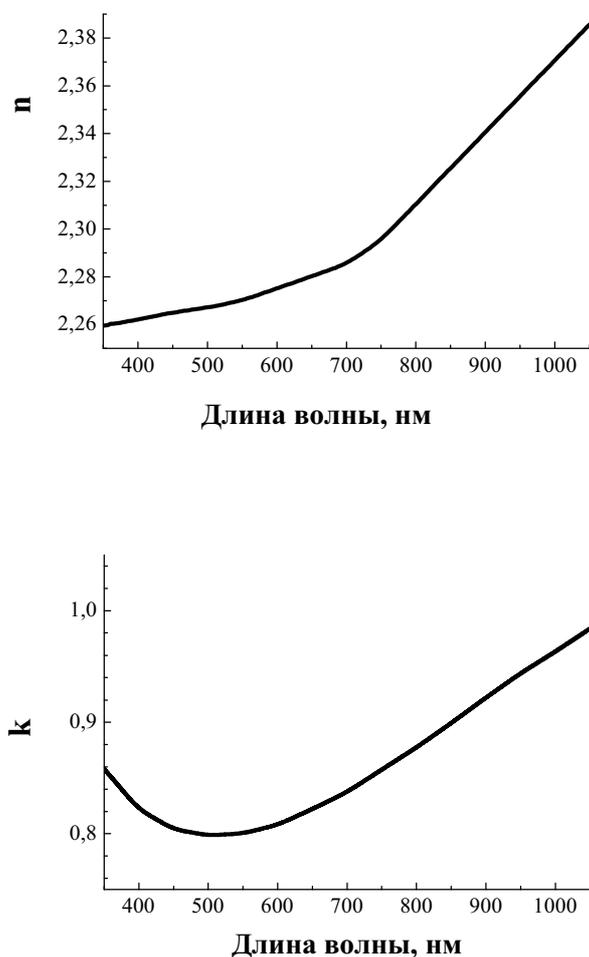


Рис. 3. Спектральные зависимости показателя преломления n и коэффициента экстинкции k графитизированного материала

Четвертая глава посвящена исследованию уникальных особенностей имплантации изотопов водорода, а именно разрастанию графитизации в процессе отжига, островковой графитизации и блистерингу. Подробно исследована физика наполненных водородом пузырей в алмазе.

В целом результаты отжига образцов, имплантированных He^+ и D^+ вблизи критической дозы графитизации, похожи. Но имеются, на первый взгляд, небольшие различия. Во-первых, в случае имплантации D^+ графитизация развивается в более широком интервале температур отжига. Во-вторых, когда радиационное повреждение ненамного превышает критическое, при

температурах отжига около 1550 °С образуется графитизированный слой, состоящий из отдельных овальных островков размерами порядка десятков мкм в плане. В третьих, при температурах отжига выше 1500 °С графитизированный слой (вне зависимости от того, островковый он или сплошной) начинает разрастаться во все стороны, захватывая окружающий алмазный материал и становясь неровным (рис. 4). На рис. 4 хорошо видны также области спонтанной графитизации поверхности алмаза. Они имеют вид “бабочек”. При температурах отжига около 1700 °С графитизированный слой прорастает до поверхности образца.

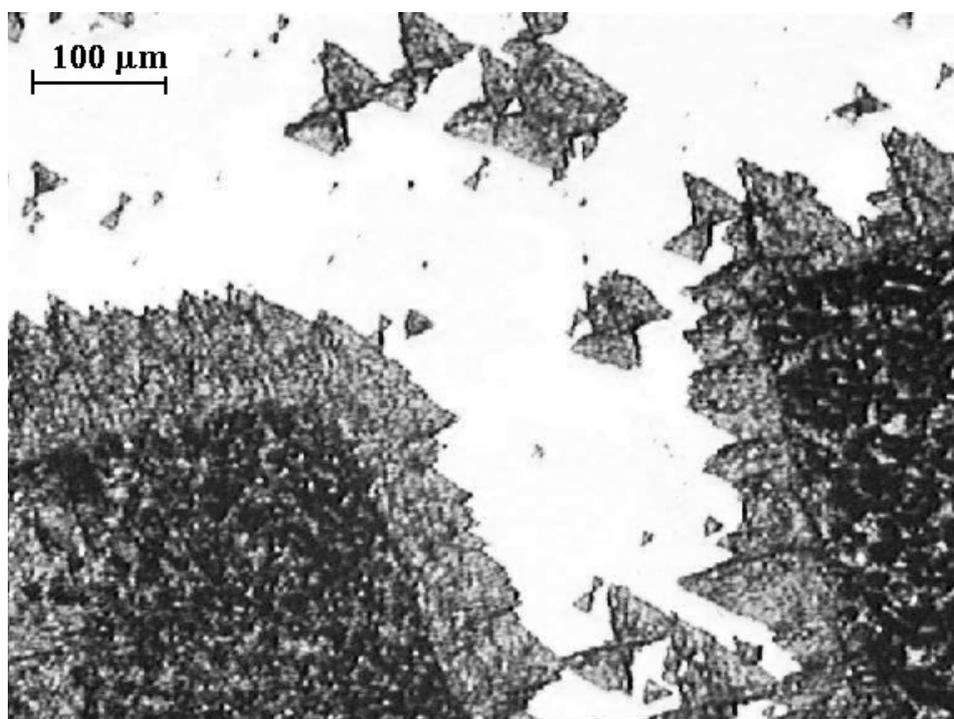


Рис. 4. Снятая в отражённом свете фотография части имплантированного ионами D^+ образца с двумя графитизированными участками после отжига при 1660°С

Но наиболее удивительные явления наблюдаются при имплантации H^+ и последующем отжиге. Во всем исследованном нами широком интервале доз имплантации в результате отжига формируется островковый графитизированный слой (рис. 5). Причем, чем меньше доза имплантации, тем выше температура отжига, при которой начинается графитизация и тем меньше размеры графитизированных островков. Для доз меньше $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ графитизированные островки теряют овальную форму и приобретают огранку, соответствующую кристаллографической плоскости образца. Таким образом, в

случае имплантации водорода вообще невозможно ввести понятия критической дозы графитизации или критического радиационного повреждения.

При имплантации водорода и последующем отжиге также наблюдается явление разрастания графитизации.

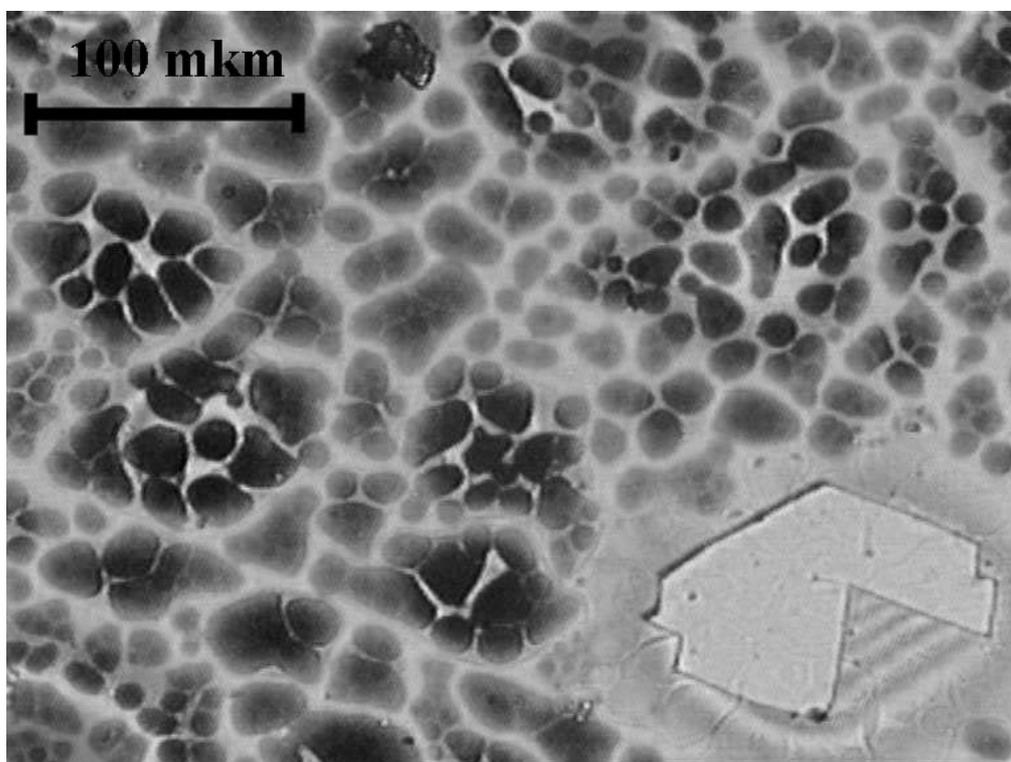


Рис. 5. Снятая в проходящем свете фотография части образца имплантированного H^+ после отжига при $1460\text{ }^{\circ}C$

Когда доза имплантации превышает некую пороговую величину (в нашем случае это $6 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-2}$), на фоне островкового графитизированного слоя при температуре отжига $1400\text{ }^{\circ}C$ появляются пузыри средних размеров в плане $\sim 100\text{ мкм}$, легко идентифицируемые по полосам интерференции, хорошо видимым даже в белом свете. Это явление блистеринга, хорошо известное в ионно-имплантированном Si, но совершенно не изученное в алмазе. Пузыри, наполненные водородом, образуются на той же глубине, где находится графитизированный слой. С ростом температуры отжига пузыри лопаются из-за роста давления газа в них (в правом нижнем углу на рис. 5).

Выдвинута гипотеза о формировании при имплантации изотопов водорода комплексов, состоящих из водорода и радиационных дефектов. Эти комплексы не проявляются в ИК поглощении, то есть не содержат C-H связей. При

высокотемпературном отжиге комплексы распадаются, образуя дефекты типа оборванной связи, стимулирующие графитизацию, и свободный водород, часть которого, диффундируя по имплантированному слою, собирается в пузырьки.

Водород находится в пузырьках под давлением. Из-за этого прикрывающая их сверху тонкая алмазная пленка выгибается, а в некоторых случаях даже трескается или откалывается. Рельеф поверхностей пузырей исследован с помощью оптической интерферометрии. Форма алмазной пленки над пузырьком отвечает решению задачи изгиба упругих оболочек при однородной нагрузке.



Рис. 6. Модель пузыря в плоскости оси симметрии

Оказалось, что при формировании пузырей в алмазе наблюдается явление пластической деформации, возможной в алмазе только при высоких температурах. Однако удалось показать, что роль ее невелика. Это позволило путем решения задачи упругого изгиба пленки определить давление газа в пузырьках и механические напряжения в прикрывающих их пленках. По расчетам получается, что давление газообразного водорода в пузырьках при комнатной температуре составляет несколько десятков атмосфер, а натяжения в пленках – сотни МПа. Подсчет количества вещества в пузырьках показывает, что в них сосредоточено не более половины имплантированного водорода. Остальной

водород остается в растворенном виде, возможно, в основном, в графитизированном материале.

В поликристаллических пленках качественно наблюдаются все явления, характерные для монокристаллов, даже несмотря на наличие межзеренных границ. Только когда пузыри при блистеринге попадали на границу между кристаллитами, газ из пузыря уходил по этой границе.

В пятой главе приведены основные выводы работы, поставлены фундаментальные вопросы радиационной физики алмаза, указаны направления дальнейших исследований.

Обсуждается бурно дискутируемый вопрос о существовании и роли зародышей sp^2 фазы в ионно-имплантированном алмазе. Показано, что усилия нужно направить на изучение процессов формирования дислокаций, вакансионных и междоузельных комплексов в процессе имплантации и отжига.

Основные выводы и результаты

На основе простых, информативных и неразрушающих методов измерения оптического пропускания и вспухания ионно-имплантированных слоев в алмазе изучены процессы трансформации радиационных дефектов при отжиге. Определены температурные интервалы отжига вакансий и дефектов с sp^2 связями.

Графитизированный материал является аморфной формой углерода, где атомы связаны sp^2 связями. В спектральном диапазоне 370÷1100 нм по данным эллипсометрических измерений графитизированный материал имеет показатель преломления от 2,26 до 2,38 и коэффициент экстинкции от 0,8 до 0,98. Плотность графитизированного материала $2,1 \pm 0,1$ г/см³. Его удельное сопротивление составляет $5 \cdot 10^{-3}$ Ом·см с отрицательным температурным коэффициентом $- 2,3 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹.

Радиационное повреждение алмаза при имплантации изотопов водорода имеет особенности из-за химической активности водорода в алмазе. Это проявляется в уникальных явлениях островковой графитизации, разрастания графитизации и блистеринга.

Разрастание графитизации происходит при высоких температурах отжига (больше 1500 °С) и наблюдается во всех случаях имплантации изотопов водорода.

При имплантации H^+ графитизированный слой всегда островковый и не

существует пороговой дозы графитизации. Чем ниже доза имплантации, тем выше температура начала графитизации и тем меньше размеры островков.

Случай имплантации D^+ занимает промежуточное положение между имплантацией He^+ и H^+ - блистеринг не наблюдается, а островковая графитизация возникает в узком диапазоне доз.

Явление блистеринга демонстрирует случай диффузии имплантированного водорода в алмазе. В пузыри собирается только часть имплантированного водорода. Большая часть деформации алмазной пленки над пузырем носит упругий характер. Однако наблюдается редкое в алмазе явление пластической деформации. Давление газообразного водорода в пузырях при комнатной температуре составляет несколько десятков атмосфер, а натяжения в пленках – сотни МПа.

Опубликованные работы

В диссертацию вошли материалы, опубликованные в работах:

1. R.A. Khmelnsky, V.A. Dravin, A.A. Gippius. *Optical studies of graphitized layers in ion-implanted diamond*. J. Chem. Vap. Depos., 1996, v. 5, p. 86-90.
2. Т.И. Галкина, А.И. Шарков, А.Ю. Клоков, М.М. Бонч-Осмоловский, Р.А. Хмельницкий, В.А. Дравин, А.А. Гиппиус. *Заглубленный имплантированный слой в алмазе как источник баллистических фононов при гелиевых температурах*. Письма в ЖЭТФ, т. 64, в. 4, с. 270-272, 1996.
3. A.A. Gippius, R.A. Khmelnsky, V.A. Dravin, S.D. Tkachenko. *Formation and characterization of graphitized layers in ion-implanted diamond*. Diamond and Related Materials, 1999, v. 8, pp. 1631-1634.
4. A.A. Gippius, R.A. Khmelnsky, V.A. Dravin, A.V. Khomich. *Defect-induced graphitisation in diamond implanted with light ions*. Physica B, 308-310 (2001), pp. 573-576.
5. Клоков А.Ю., Шарков А.М., Галкина Т.И., Хмельницкий Р.А., Дравин В.А., Гиппиус А.А. *Болометрический приемник, встроенный в объем алмаза*. Письма в Журнал Технической Физики, 2001, 27(14), 21-24.
6. A.I. Sharkov, T.I. Galkina, A.Yu. Klokov, R.A. Khmelnskii, V.A. Dravin, A.A. Gippius. *Fast-speed bolometric detector based on graphitized layer buried into a diamond bulk*. Vacuum, 2002, vol. 68, pp. 263-267.
7. A.A. Gippius, R.A. Khmelnsky, V.A. Dravin, A.V. Khomich. *Diamond-graphite transformation induced by light ions implantation*. Diamond and Related Material, 2003, 12 (10-11), pp. 538-541.

8. Т.И. Галкина, А.Ю. Клоков, А.И. Шарков, А.А. Гиппиус, Р.А. Хмельницкий, В.А. Дравин. «Алмазный детектор», заявка на изобретение № 2001130160/28(032348) от 09.11.2001, положительное решение от 13.01.2003.
9. R.A. Khmel'nitskiy, E.V. Zavedeev, A.V. Khomich, A.V. Gooskov, A.A. Gippius. *Blistering in diamond implanted with hydrogen ions*. *Vacuum*, 78 (2005), 273-279.
10. A.V. Khomich, R.A. Khmel'nitskiy, V.V. Kononenko, E.V. Zavedeev, S.M. Pimenov, V.G. Ralchenko, V.I. Konov. *Comparison of laser and thermal annealing of diamonds implanted with deuterium*. *Vacuum*, 78 (2005), 577-582.
11. A.V. Khomich, V.I. Kovalev, E.V. Zavedeev, R.A. Khmel'nitskiy, A.A. Gippius. *Spectroscopic ellipsometry study of buried graphitized layers in the ion-implanted diamond*. *Vacuum*, 78 (2005), 583-587.
12. А.В. Хомич, Р.А. Хмельницкий, В.А. Дравин, А.А. Гиппиус, Е.В. Заведеев, И.И. Власов. *Радиационное повреждение в алмазах имплантированных гелием*. *Физика твердого тела*, 49, 9 (2007) 1585-1589.

Список литературы

1. R. J. Tapper. *Diamond detectors in particle physics*. *Rep. Prog. Phys.* 63 (2000) 1273–1316
2. Prins, J.F. *Ion implantation of diamond for electronic applications*. *Semicond. Sci. and Technol.* vol.18, no.3 (2003) p.S27-33
3. Д.Ф. Федосеев, Н.В. Новиков, А.С. Вишнеvский, И.Г. Теремецкая. *Алмаз. Справочник*. Наукова думка. 1981.
4. *Properties of Diamond* /Ed. by J.E.Field – London: Acad. press, 1979
5. J.F. Ziegler, J.P. Biersack, U. Littmark. *The Stopping and Range of Ions in Solids*. Pergamon. N.Y. 1985
6. Prins J.F.J. *Ballistic self-annealing during ion implantation*. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 34 (2001) 3003–30
7. R.A. Khmel'nitskiy, V.A. Dravin, A.A. Gippius. *Optical Studies of Graphitized Layers in Ion-Implanted Diamond*. *J. Chem. Vapor Depos.* 5 (1996) 121.