



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

14-2001-245

А-28

На правах рукописи  
УДК 538.956/8

Адави М. А

Мохамед Арафат Мохамед Ахмед Адави

**РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ  
ОПТИЧЕСКИХ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ СТЕКОЛ, ДИЭЛЕКТРИКОВ  
И ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

Специальность: 01.04.07 — физика конденсированных сред

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Дубна 2001

# 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность проблемы

Работа выполнена в Объединенном институте ядерных исследований в Лаборатории ядерных реакций в сотрудничестве с Агентством по атомной энергии Египта.

Научный консультант:

доктор физико-математических наук  
ОИЯИ ЛЯР Дидык Александр Юрьевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук  
ОИЯИ ЛНФ Лушиков Владислав Иванович

доктор физико-математических наук,  
профессор,  
зав. отделом радиационной физики.  
Научный центр Института ядерных  
исследований Национальной АН Украины Литовченко Петр Григорьевич

доктор технических наук,  
профессор, начальник  
лаборатории РНЦ «Курчатовский институт» Ухин Николай Андреевич

Ведущая организация:

Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН

Защита состоится в часов

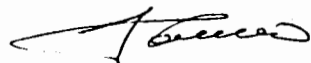
на заседании диссертационного совета

при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций  
Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской  
области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан 2001 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



А.Г.Попеко

С развитием ядерной физики, ускорительной техники и физики твердого тела стало интенсивно развиваться новое направление - радиационная физика твердого тела (РФТТ). Это направление исследований изучает природу возникновения различных физических явлений в твердых телах при их взаимодействии с гамма-квантами, ускоренными заряженными частицами или нейтронами.

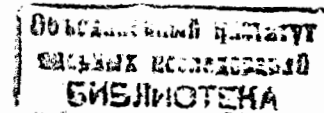
В результате исследований этих процессов можно получать информацию о фундаментальных свойствах веществ, а также о физической природе и моделях взаимодействия частиц с твердым телом.

Радиационная физика твердого тела имеет большой спектр практических приложений в технике полупроводников, металловедении, ядерном приборостроении и т. д. Особо следует отметить проблему создания новых материалов с заданными свойствами при взаимодействии твердого вещества с различными ядерными излучениями (гамма-кванты, нейтроны, легкие и тяжелые ионы высоких и низких энергий). Такие материалы, например, могут находить широкое применение в качестве детекторов излучений. Поэтому для их создания необходимо глубокое понимание происходящих явлений, с тем чтобы, путем облучения, добиться проявления в них требуемых эффектов и свойств.

Воздействие различных излучений на материалы имеет свои особенности. Более того, разные материалы реагируют не одинаково на один и тот же вид излучения. До сих пор нет достаточно общей теоретической модели, которая позволяла бы объяснять и предсказывать результаты радиационного воздействия на твердые тела. На практике для этого используются различные подходы и модели, которые затем уточняются, как правило, дополнительной серией исследований по радиационному воздействию на материалы. Такая методология носит итерационный характер и требует разработки оптимальных алгоритмов ее реализации.

Проведение исследований широкого класса материалов требуют, как известно, длительного времени и больших средств. Поэтому необходима концентрация усилий на изучении материалов, наиболее значимых в практическом и научном плане. К ним относятся, в первую очередь, материалы, используемые в ядерной энергетике, космической технике и микроэлектронике.

Эксперименты показывают, что действие гамма-излучения, нейтронных потоков и ионных пучков на эти материалы существенно различается. По-разному изменяются электрические, оптические и



механические свойства материалов. Кроме того, стекла, полимеры и некоторые материалы весьма "индивидуально" реагируют на воздействие излучений различного типа. Исследование их радиационных свойств является важным научным направлением. Получаемая при этом информация может быть использована для создания эффективных детекторов ионизирующих излучений различного типа на основе новых материалов. В этой связи особый интерес представляют исследования радиационных свойств стекол на основе боросиликатов с примесью  $U_3O_8$  и силикатов с примесью  $K_2O$ , облученных жесткими гамма-квантами и нейтронами.

Большой интерес с точки зрения применения на практике вызывает изучение воздействия тяжелых ионов высоких энергий на монокристаллические диэлектрики (алмаз) и монокристаллические полупроводники (алмаз и кремний), а также хромоникелевые металлические сплавы, в частности, изучение микроструктурных изменений в указанных веществах, возникающих непосредственно в треках частиц, и причин изменения электрических характеристик кристаллов при их облучении. Алмаз и кремний являются, как известно, исключительно важными компонентами современной электроники, а хромоникелевые сплавы широко применяются для многих инженерных конструкций.

Очерченный выше круг вопросов на данный момент не достаточно полно изучен. Имеется насущная необходимость их детальной экспериментальной проработки с последующими обобщением и систематизацией полученных результатов для применения на практике.

Эти обстоятельства определяют актуальность темы настоящей диссертационной работы.

### Цель работы

Получение и анализ детальной эмпирической информации о радиационно-индуцированных изменениях оптических, электрических, механических и структурных свойств стекол, диэлектриков, полупроводников и сплавов под воздействием гамма-квантов, нейтронов и тяжелых ионов в зависимости от характеристик потока бомбардирующих частиц и физико-химических свойств облучаемых веществ.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие основные задачи:

1) исследование поведения физических характеристик полиэтилена, стекол с примесями  $U_3O_8$ ,  $Na_2O$  и  $K_2O$ , поливинилового спирта с добавками  $CoCl_2$ ,  $Ni_2SO_4$ ,  $CuSO_4$  и  $(CH_3COO)_2CuH_2O$ , композита

полимера политетрафторэтилена и окиси свинца  $Pb_2O_3$  и сплава GeS различных пропорций в интенсивных полях нейтронов в диапазоне флюенса  $10^5-10^{11}$  нейтрон/см<sup>2</sup> и гамма излучения в интервале дозы  $10^{-2}-10^6$  Гр.

2) исследование возможности создания дозиметрических детекторов с хорошо выраженными метрическими характеристиками для различных видов излучения на основе боросиликатных стекол с примесью  $U_3O_8$ , композита  $Pb_2O_3$ /полимер, полиэтилена, стекол на основе силикатов щелочных металлов, поливинилового спирта с добавками ацетата меди и др., сплавов германия и серы;

3) исследование процессов образования дефектов и их эволюции в кремнии, алмазе и металлических хромоникелевых сплавах под воздействием тяжелых ионов В, Ne, Ar, Kr и Xe с энергией  $E \sim 1$  МэВ/а.е.м.;

4) развитие физической модели микроструктурных изменений, возникающих непосредственно в треках частиц, в веществах, указанных в п. 3.

Достоверность полученных результатов подтверждается успешным созданием материалов для систем детектирования ядерных излучений с использованием результатов полученных в диссертации, а также согласованностью данных теории и эксперимента.

### Научная новизна

1. Впервые выполнено детальное исследование влияния жесткого электромагнитного излучения и нейтронов на электрические, оптические и механические свойства

а) стекол с примесями  $U_3O_8$ ,  $Na_2O$  и  $K_2O$ ,  
б) поливинилового спирта с добавками  $CoCl_2$ ,  $Ni_2SO_4$ ,  $CuSO_4$  и  $(CH_3COO)_2CuH_2O$ ,

в) полимеров политетрафторэтилена с добавками окиси свинца  $Pb_2O_3$  и полиэтилена

г) сплава германия и серы.

2. Впервые определены оптимальные условия применимости исследованных материалов для разработки детекторов при различных термодинамических условиях и абсолютных значениях потоков регистрируемых ядерных излучений.

3. Впервые было установлено образование треков в полупроводниковом алмазе методом прямого наблюдения – методом туннельной электронной микроскопии.

4. Развита физическая модель микроструктурных изменений в монокристаллических и поликристаллических материалах-диэлектриках и

конструкционных хромоникелевых сплавах, возникающих при облучении тяжелыми ионами.

### Практическая ценность

Значительная часть научно-исследовательских результатов, полученных в диссертационной работе, может быть применима в практических целях в области атомной науки и техники (дозиметрия), микроэлектроники и при создании крупных ядерных установок и космической техники.

### Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты по исследованию воздействия жесткого электромагнитного излучения и нейтронов на основные микро- и макроскопические свойства полиэтилена и возможность применения такого материала для разработки гамма-детекторов в дозовом диапазоне  $0,01-10^6$  Гр и для детектирования быстрых нейтронов в диапазоне  $10^8-10^{11}$  нейтрон/см<sup>2</sup>.
2. Результаты исследования воздействия гамма-излучения и нейтронов на оптические свойства алкалсиликатного стекла с примесью  $K_2O$  и боросиликатные стекла с примесью  $U_3O_8$ . Возможность использования алкалсиликатного стекла в детектировании доз гамма-излучения в интервале  $0,1-1,1$  кГр. В случае боросиликатных стекол возможность использования результатов радиотермолюминесценции (РТЛ) для детектирования доз гамма-излучения в интервале  $0,1-10^4$  Гр. Возможность использования образцов, не содержащих урана, для детектирования быстрых нейтронов в интервале  $10^5-10^9$  нейтрон/см<sup>2</sup> и результатов радиофотолуминесценции (РФЛ) для детектирования гамма-доз в интервале  $0,1-2 \times 10^4$  Гр, а также для детектирования быстрых нейтронов в интервале  $10^7-6 \times 10^{10}$  н/см<sup>2</sup>.
3. Результаты исследования воздействия гамма-излучения и нейтронов на механические и оптические свойства поливинилового спирта с различными концентрациями  $CoCl_2$ ,  $NiSO_4$ ,  $CuSO_4$  и  $(CH_3COO)_2CuH_2O$ . Возможность использования образцов, содержащих  $CoCl_2$ ,  $NiSO_4$  и  $CuSO_4$ , для детектирования доз гамма-излучения в интервале  $10^{-1}-10^4$  Гр и образцов, содержащих ацетат меди, для детектирования быстрых нейтронов в интервале  $10^6-10^9$  н/см<sup>2</sup>.

4. Результаты изучения изменения физических свойств аморфного сплава GeS и композита  $Pb_2O_3$ /политетрафторэтилен при облучении их гамма-лучами и нейтронами и возможность использования этих результатов для детектирования гамма-доз в интервале  $10^2-10^4$  Гр и быстрых нейтронов в интервале  $10^5-10^{10}$  н/см<sup>2</sup> с помощью GeS и гамма-доз с помощью композита  $Pb_2O_3$ /полимер в интервале  $10^2-10^3$  Гр.

5. Результаты по изучению процесса дефектообразования в природном и синтетическом (допированном бором) алмазе, облученном тяжелыми ионами с энергией  $E \sim 1$  МэВ/нуклон.

6. Результаты изучения процесса образования дефектов и их эволюции в полупроводниковом монокристалле кремния, легированного бором и фосфором, вследствие их облучения тяжелыми высокоэнергетическими ионами с энергией  $E \sim 1$  МэВ/нуклон.

7. Результаты изучения изменения структуры поверхности и элементного состава хромоникелевой стали при облучении высокоэнергетическими тяжелыми ионами.

### Апробация работы

Основные результаты настоящей работы докладывались и обсуждались на следующих национальных и международных конференциях:

- Первая Британско-Египетская конференция по радиационной физике (Каир, Египет, 1985);
- Первая Британско-Египетская конференция по биофизике (Каир, Египет, 1987);
- Четвертая конференция по физике атомного ядра (Каир, Египет, 1988).
- Международная конференция по физике твердого тела (Св. Екатерина, Египет, 1988);
- Международная конференция по физике конденсированных сред SAMS-4 (Каир, Египет, 1994);
- Третья конференция по радиационной физике (Шебин эль Ком, Египет, 1994);
- Первый Международный симпозиум по пучковой технологии ВТ-95 (Дубна, Россия, 1995);
- Первое Египетско-Российское рабочее совещание по циклотронам и их применениям (Каир, Египет, 1996).
- Конференция по имплантации и другим применениям ионов и электронов ION-2000 (Казимирская Долина, Польша, 2000).

## Публикации

Основные результаты опубликованы в виде 31 научной статьи в египетских и международных журналах. Полный список трудов содержится в конце автореферата.

## Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Полный объем составляет 149 страниц машинописного текста, включая 43 рисунка и таблицы.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении представлен обзор основных направлений радиационной физики твердого тела, представляющих практический интерес не только в области ядерных технологий, но и в других областях (микроразработка, космическое материаловедение). Сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

В первой главе содержится краткое описание механизмов взаимодействия различных видов излучений с веществом и процессов, которые происходят в результате воздействия излучения на материалы различного типа. В частности, рассмотрены три типа взаимодействия гамма-квантов с твердыми телами: эффект Комптона, фотоэффект и образование пар. Кроме того, обсуждены основные аспекты воздействия нейтронных потоков на материалы. В этом случае наряду с ядерными реакциями имеет место и рассеяние нейтронов на атомах вещества, приводящее к образованию точечных радиационных дефектов. Рассмотрены процессы, происходящие при бомбардировке материалов высокоэнергетическими тяжелыми ионами. Подробно изложены процессы образования каскадов смещений и потерь энергии ионов по упругому и неупругому каналам. В конце этой главы дан краткий обзор процесса неупругого распыления материалов с поверхности образца под действием высокоэнергетических тяжелых ионов. Этот весьма важный процесс приводит к изменению микроскопической структуры поверхности материала.

Во второй главе приведено описание главных установок, которые были использованы при облучении материалов и исследовании их свойств до и после облучения. Представлены основные характеристики кобальтовой установки "Gammacell-200" с активностью  $^{60}\text{Co}$ -источника в

6400 Кюри с энергией  $E=1,25$  МэВ. Мощность дозы в месте расположения образца составляла  $3,63 \times 10^3$  Гр/ч при точности измерения  $\pm 5\%$ .

Нами были исследованы силикатные и боросиликатные стекла с рядом добавок. Эти стекла были сварены из чистых химических компонентов в платиновом тигле высокотемпературной печи с карбидокремниевыми нагревательными элементами при температурах 1100 - 1450°C.

Описаны используемые в данной работе источники нейтронов, такие как  $^{252}\text{Cf}$ , Am-Be и Pu-Be с энергией  $E=2,35$ , 2 и 4 МэВ соответственно, которые обеспечивают нейтронные потоки порядка  $1,17 \times 10^7$ ,  $1,1 \times 10^7$  и  $5,5 \times 10^6$  см<sup>-2</sup> в месте нахождения образца. В этой же главе рассмотрены отдельные аспекты использования высокоэнергетических тяжелых ионов для облучения различных материалов. Как известно, скорость дефектообразования в материалах при использовании тяжелых ионов в  $10^3$ - $10^6$  раз превышает аналогичную величину для нейтронного облучения. Источниками таких ионов являлся уникальный ускорительный комплекс циклотронов Лаборатории ядерных реакций ИЦ-100 и У-400, дающий возможность использовать пучки тяжелых ионов с энергией от 1 МэВ/а.е.м. (ИЦ-100) до более высоких (У-400). Измерение различных физических параметров производилось до и после процесса облучения материалов. Облучение образцов нейтронами и гамма-квантами производилось на воздухе. В случае тяжелых ионов облучение производилось в вакууме. Определялись:

- Оптическая плотность образцов с помощью методов спектрофотометрии в ультрафиолетовом и видимом диапазоне посредством спектрофотометра "Lambda-3 Perkin Elmer";
- Зависимость сигнала радиотермолюминесценции от дозы облучения с помощью установки "Harshaw-2000";
- Зависимость сигнала радиофотолуминесценции от дозы облучения с помощью установки "Shimadzu type model RF-540";
- Удельное электрическое сопротивление в режиме постоянного тока с помощью электрометра "Keithely 616" (измерение удельного электрического сопротивления проводилось в условиях различных доз и различных температур);
- Микротвердость исследуемых материалов с помощью микротвердомера типа "Shimadzu" с алмазным индентором. Численное значение микротвердости исследуемых образцов измерялось в зависимости от дозы облучения.
- Измерение постоянной периодов кристаллической решетки производилось методом рентгеновской дифракции. Это было выполнено в режиме двухкристального спектрометра при параллельном

расположении кристалла-монокристалла и исследуемого кристалла. Использовалась линия меди CuK $\alpha$ 1.

- Сопротивление растекания было измерено с помощью двухконтактного зонда с иглами из карбида вольфрама (диаметр острия 1 мкм, нагрузка на иглу при измерении 0,2 г). Профиль сопротивления растекания состоит из ста однократных измерений, каждое из которых осуществляется опусканием двух игл, расположенных параллельно краю косого шлифа, через одинаковые расстояния вдоль его поверхности.

Таблица 1. Состав алкалсиликатных стекол

Стекло №.	Концентрация в молярных %			
	Si <sub>2</sub> O	Li <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
1	66,8	31,2	2	-
2	66,9	16,5	16,6	-
3	66,8	31,2	-	2
4	66,9	16,5	-	16,6

Технология изготовления образцов кратко изложена в этой главе. Образцы стекол на основе силикатов щелочных металлов Li<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O и Li<sub>2</sub>O-Na<sub>2</sub>O были изготовлены из очищенного датского песка (SiO<sub>2</sub>) и высококачественных химических компонентов (Li<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O и Na<sub>2</sub>O) (таблица 1) методом двухэтапного плавления. Плавление производилось в платиновом тигле в течение четырех часов при температуре 1200 ± 30 °С. Затем сплав выливался в платиновую чашу. После охлаждения образец перемалывали в порошок, и производился второй этап плавления в течение четырех часов при температуре 1400 ± 30 °С. Повторное плавление производилось, чтобы обеспечить однородное распределение компонентов в стекле. Далее производился отжиг образцов в течение одного часа при температуре 400 °С.

Аналогично изготавливались образцы боросиликатных стекол с добавками урана. При этом использовался метод двухэтапного плавления с последующим отжигом. Образцы изготавливались из высококачественных химически чистых компонентов: борной кислоты, очищенного датского песка (SiO<sub>2</sub>) и карбоната лития, содержащих примеси U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> в концентрациях 0,1, 0,2, 0,3 и 0,4 (мол.%) (таблица 2). Процесс плавления образцов производился на воздухе.

Образцы композита Pb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/полимер были изготовлены из химически чистого порошка Pb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и порошка полимера тетрафторэтилена согласно пропорции 1: 0,85 по массе. Эти компоненты перемалывали в мелкий порошок размером 80-200 мкм. Порошок тщательно размешивали, чтобы

достигнуть однородного распределения компонентов. Образцы были спрессованы в виде таблеток. Дальше они были отожжены в течение 4 ч при температуре 120 °С для удаления остаточных напряжений, возникающих в результате механической обработки.

Таблица 2. Состав боросиликатных стекол.

Стекло №.	Концентрация в молярных %			
	H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub>	Si <sub>2</sub> O	LiCO <sub>3</sub>	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
U <sub>0</sub>	67,67	9,42	5,79	-
U <sub>1</sub>	67,67	9,42	5,79	0,1
U <sub>2</sub>	67,67	9,42	5,79	0,2
U <sub>3</sub>	67,67	9,42	5,79	0,3
U <sub>4</sub>	67,67	9,42	5,79	0,4

Образцы сплава германия и серы были изготовлены из высокочистых компонентов в пропорциях 1:1, 1:2, и 1:3 (германия к сере) по массе. Их плавил при температуре 900 °С. Это достигалось методом постепенного повышения температуры до 900 °С в течение 89 часов. Сплав выдерживали при этой температуре в течение одного часа. Плавление производилось в кварцевых ампулах при вакууме ≤ 10<sup>-5</sup> Торр с последующим резким охлаждением до ~ 0 °С, чтобы обеспечить их аморфную структуру. Далее образцы измельчались до образования мелких зерен, а затем отжигались в течение 15 минут при 400 °С с целью удаления остаточных напряжений.

Образцы полиэтилена и поливинилового спирта были изготовлены в виде тонких пластинок толщиной 300 и 200 мкм соответственно. В образцы поливинилового полимера был добавлен один из следующих компонентов: CoCl<sub>2</sub>, Ni<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CuSO<sub>4</sub> от 5 до 40% по массе и (CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>Cu·H<sub>2</sub>O от 5 до 15% по массе.

Образцы алмаза имели размеры 1×2×0,3 мм.

Были использованы образцы кремния размером 10×10×0,3 мм. В них были имплантированы ионы бора (*p*-тип, имеющий сопротивление 4,5 Ом) и фосфора (*n*-тип, имеющий сопротивление 10 Ом).

Образцы хромоникелевой стали диаметром 3 мм и толщиной 200 мкм имели состав 17,188% Cr, 0,507% Mn, 72,817% Fe, 9,637% Ni и 0,403% Ti.

Третья глава содержит результаты экспериментов по исследованию свойств облученных образцов и их обсуждение.



Это, прежде всего, результаты изучения свойств образцов полиэтилена, облученных гамма-квантами в диапазоне доз от 0,01 до  $10^6$  Гр и нейтронами при потоках от  $10^8$  до  $10^{11}$  см<sup>-2</sup>.

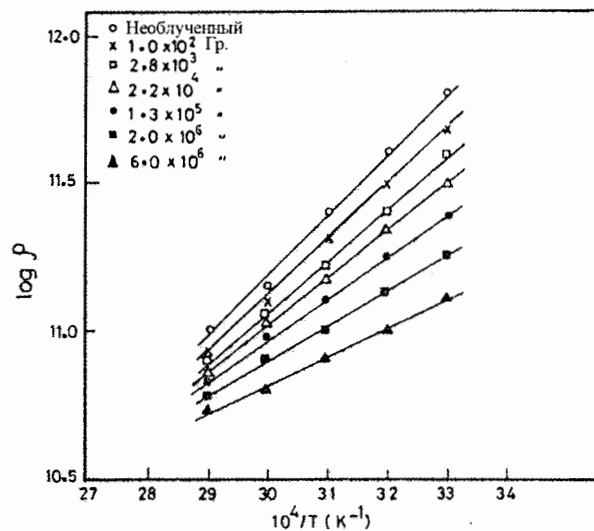


Рис. 1: Зависимость логарифма удельного сопротивления  $\rho$  (Ом·см) образцов полиэтилена от обратной температуры, измеренная в режиме постоянного тока.

Для определения степени изменения электрических свойств облученного материала были проведены измерения удельного электрического сопротивления в режиме постоянного тока в зависимости от дозы облучения и температуры. Результаты экспериментов представлены на рис. 1, где показана зависимость электрического удельного сопротивления  $\rho$  от обратной температуры при различных дозах гамма-облучения. Было установлено, что энергия активации уменьшается с возрастанием дозы облучения и носители заряда, переходят в квазисвободное состояние. Далее электроны захватываются ловушками, соответствующими слабосвязанным состояниям в материале.

Энергия активации проявляет такое же поведение и при нейтронном облучении. Она также уменьшается с ростом нейтронного потока. Эффекты, производимые быстрыми нейтронами в исследуемых материалах, заключаются в генерации разрывов макроцепей полиэтилена и образовании свободных радикалов, которые увеличивают число носителей заряда, что, в свою очередь, приводит к увеличению электрической проводимости материала. Снижение энергии активации может быть обусловлено нарушением структуры кристаллической решетки образца.

Зависимость удельного сопротивления  $\rho$  от дозы облучения  $D$  приведена на рис. 2. Видно, что связь между величинами  $\rho$  и  $\ln D$  можно аппроксимировать линейной функцией во всем исследованном диапазоне доз от  $10^2$  до  $10^6$  Гр. На рис. 3 представлена зависимость удельного сопротивления образца от потока нейтронов.

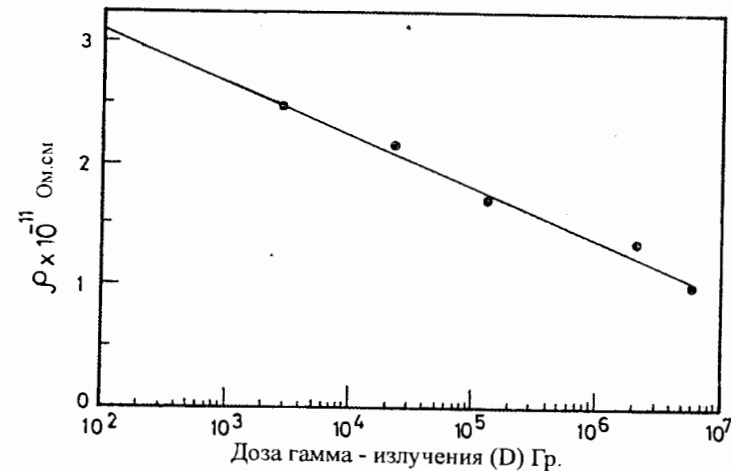


Рис. 2: Зависимость удельного сопротивления от дозы гамма-излучения в режиме постоянного тока для образцов полиэтилена.

Следующим шагом исследования было изучение оптических свойств материалов. Результаты измерения оптического пропускания стекол на основе силикатов щелочных металлов  $\text{Li}_2\text{O-K}_2\text{O}$  и  $\text{Li}_2\text{O-Na}_2\text{O}$  подтвердили выдвинутое нами ранее предположение о том, что эти стекла могут быть использованы для измерения доз в следствия увеличения оптической плотности с дозой гамма-излучения в диапазоне доз от 0,1 до 1,1 кГр. Найдена аналитическая зависимость между оптической плотностью и дозой облучения. Для стекол, содержащих 16,6%  $\text{K}_2\text{O}$ , дозовая зависимость оптической плотности при длинах волн 440 и 620 нм оказалась линейной во всем исследованном диапазоне. Этот материал может быть использован для определения дозы облучения в данном интервале. Такие дозы гамма-излучения применяются в технологии стерилизации пищи. Они используются для увеличения срока хранения овощей и фруктов, а также в радиотерапии, для стерилизации насекомых, для иницирования прививочной полимеризации определенных мономеров и полимеров.

Были также детально изучены боросиликатные стекла, которые исследовались до и после облучения гамма-квантами при дозах от 0,1 до  $10^4$  Гр и нейтронными пучками плотностью от  $10^5$  до  $10^9$  см<sup>-2</sup> методом

урана в стекле ведет к взаимодействию между нейтронами и атомами урана. Нейтроны поглощаются, атомами бора, что в свою очередь ограничивает их действие. Образцы, не содержащие урана, имеют возрастающую линейную зависимость с ростом нейтронного флюенса. Была рассмотрена возможность использования таких стекол при измерении доз, в особенности возможность многократного использования соответствующих дозиметров в диапазоне доз от  $10^{-1}$  до  $10^4$  Гр для гамма-облучения, а в случае быстрых нейтронов в диапазоне доз от  $10^5$  до порядка  $10^9$  см<sup>-2</sup>. В случае измерения спектра радиофотолюминесценции результаты показывают, что образцы, содержащие 0,3% примеси урана, имеют линейную зависимость между дозой облучения и сигналом РФЛ в дозовом диапазоне  $0,1-2 \times 10^4$  Гр.

Образцы, не содержащие урана, имели линейную зависимость между флюенсом нейтронов и сигналом РФЛ в интервале  $10^7 - 6 \times 10^{10}$  н/см<sup>2</sup>.

Приведены результаты измерения оптических характеристик образцов поливинилового спирта, содержащих различные концентрации примеси солей ряда металлов ( $\text{CoCl}_2$ ,  $\text{Ni}_2\text{SO}_4$  и  $\text{CuSO}_4$ )  $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu} \cdot \text{H}_2\text{O}$ , по массе, облученных гамма-квантами дозой от 0,01 до  $10^4$  Гр. Изучалось изменение положения пиков в спектрах оптического поглощения с ростом дозы облучения. Такое явление было также исследовано и для случая изменения концентрации или сорта примеси. Определены аналитические зависимости измеренных величин от дозы излучения. Образцы, содержащие 15-20%  $\text{Ni}^{2+}$  или  $\text{Co}^{2+}$ , дают линейную зависимость между дозой гамма-облучения и оптической плотностью при длине волны 864 нм в дозовом диапазоне  $10^{-1}-10^3$  Гр. Эти образцы могут быть использованы для разработки детекторов гамма-излучений в дозовом диапазоне  $10^{-1}-10^3$  Гр.

Измерение механических свойств ПВС производилось с помощью техники измерения микротвердости. Была измерена зависимость величины микротвердости по Виккерсу ( $H_V$ ) от дозы облучения в диапазоне от 0,01 до  $10^4$  Гр. Изучалось также изменение числа носителей заряда, захваченных дефектами, в зависимости от дозы, т. е. изучалась электропроводность образцов. Результаты иллюстрируют линейную связь между величиной микротвердости и дозой гамма-облучения в диапазоне  $10^{-1}-10^4$  Гр. Эти образцы могут быть использованы для детектирования гамма-излучения в указанном диапазоне.

Добавки ацетата меди  $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  в поливиниловый спирт при концентрациях 5, 10, и 15% после облучения гамма-квантами с дозой до 41,7 кГр не оказали никакого влияния на оптические свойства образцов. Было найдено, что нейтронные потоки от  $10^6$  до  $10^9$  см<sup>-2</sup> приводят к уменьшению оптического пропускания. Найдена аналитическая зависимость, определяющая связь между оптической плотностью и дозой

нейтронного облучения:  $\Phi = A \exp(BO)$ , где  $\Phi$  - флюенс нейтронов,  $O$  - оптическая плотность,  $A$  и  $B$  - константы. Средняя квадратичная погрешность рассчитанных величин по этой формуле по сравнению с экспериментально измеренными величинами не превышает 5%.

Представлены результаты изучения композиционного материала (политетрафторэтилен +  $\text{Pb}_2\text{O}_3$ ), показавшего себя хорошим детектором гамма-излучения. Поскольку использование данного композита представлялось перспективным, производились измерения сигнала РТЛ образцов в зависимости от дозы в диапазоне от 0,01 до  $10^4$  Гр. Результаты дают линейную зависимость сигнала РТЛ от дозы гамма-облучения в интервале  $10^{-2}-10^3$  Гр. Эти образцы могут быть использованы для определения гамма-доз в указанном интервале.

Другим соединением, также рассматриваемым как перспективное для измерения не только гамма-квантов, но и нейтронов, являлся изготовленный нами сплав германия и серы (1:3) по массе. Эти образцы были исследованы методом измерения спектров РТЛ и показали линейную зависимость сигнала РТЛ от дозы облучения во всем дозовом диапазоне от 0,01 до  $20 \times 10^3$  Гр для гамма-квантов (рис.6) и от  $10^5$  до  $10^{10}$  см<sup>-2</sup> для нейтронов (рис.7). Они могут быть использованы для определения дозы гамма-излучения и нейтронов в указанных выше интервалах.

В четвертой главе представлены результаты облучения тяжелыми ионами алмазов (природного и синтетического), высоко- и низкоомных образцов монокристаллического кремния, имплантированного ионами бора и фосфора. Для изучения структуры поверхности образцов алмаза, облученных ионами аргона, криптона и ксенона с энергией  $E \sim 1$  МэВ/а.е.м использовались сканирующая электронная микроскопия, туннельная микроскопия и метод обратного резерфордского рассеяния.

Образцы природного алмаза были облучены ионами ксенона с энергией 124 МэВ и потоком  $5 \times 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> и аргона с энергией 25 МэВ и потоком  $8 \times 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>. После облучения ионами ксенона было обнаружено образование кратеров. В случае облучения ионами аргона кратеры не наблюдались (рис.8), но происходила полная аморфизация поверхностного слоя. Образцы синтетического алмаза с добавкой 0,05% бора в приповерхностный слой для создания проводящего слоя были облучены ионами криптона с энергией 210 МэВ и потоком  $10^{12}$  ион/см<sup>2</sup>. Обнаружены треки и выступы (кратеры) на поверхности. Плотность этих треков совпадала с плотностью потока ионов криптона. Это позволило предполагать, что треки обусловлены индивидуальными ионами. Разные структуры, возникающие в результате облучения различными ионами, могут быть объяснены степенью нагрева материала образца в зависимости от количества тепла, передаваемого бомбардирующим ионом.



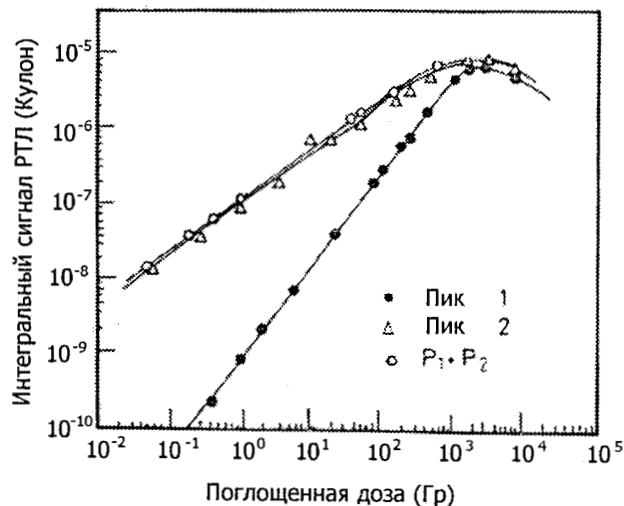


Рис.6: Зависимость сигнала РТЛ от доз гамма-излучений для сплава германия и селена.

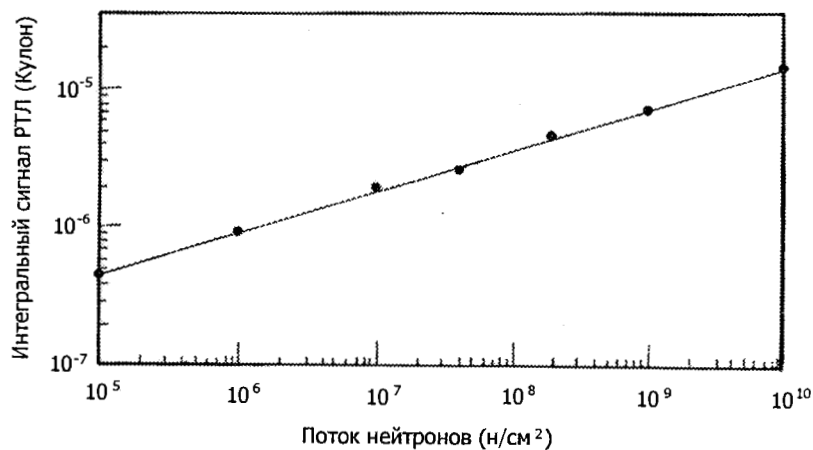


Рис 7: Зависимость сигнала РТЛ от нейтронного флюенса для сплава германия и селена.

Температура внутри трека может быть определена как  $T_t = (dE/dx)_{\text{неуп}} / \pi R^2 C \rho$ ; где  $(dE/dx)_{\text{неуп}}$  - неупругая потеря энергии

(определяется с помощью компьютерной программы TRIM),  $R$ - радиус трека,  $C$  - теплоемкость и  $\rho$  - плотность материала мишени. Численные значения неупругих потерь энергии, пробега и радиуса трека ионов ксенона, криптона и аргона представлены в таблице 3. Если температура внутри трека выше температуры кипения материала мишени, то процесс испарения с поверхности образца может иметь место. Здесь полезно ввести понятие плотности критической мощности ( $W_{\text{кр}}$ ). Это плотность мощности, выше которой материал начинает испаряться с поверхности образца.  $W_{\text{кр}} = \chi L \chi \rho / r^2$ , где  $\chi$  - коэффициент теплопроводности,  $L$  - удельная теплота испарения,  $\chi$  - глубина и  $r$  - радиус испаренного слоя,  $\rho$  - плотность материала мишени. Плотность мощности, вносимой бомбардирующими ионами, обозначена как  $W_{\text{ион}}$ .

Таблица 3. Численные значения неупругих потерь энергии, пробега и радиусы треки ионов  $^{129}\text{Xe}$ ,  $^{84}\text{Kr}$  и  $^{40}\text{Ar}$  в алмазе и хромоникелевой стали

Ион	Энергия МэВ	Алмаз			Хромоникелевая сталь		
		$(dE/dx)_{\text{inel}}$ МэВ/мкм	$R_p$ , мкм	$R_c$ , Å	$(dE/dx)_{\text{inel}}$ , МэВ/мкм	$R_p$ , мкм	$R_c$ , Å
Xe	124	25	6,34	50	33,6	5,38	50
Kr	210	19	13,9	47,6			
Ar	25	9	3,78	42			

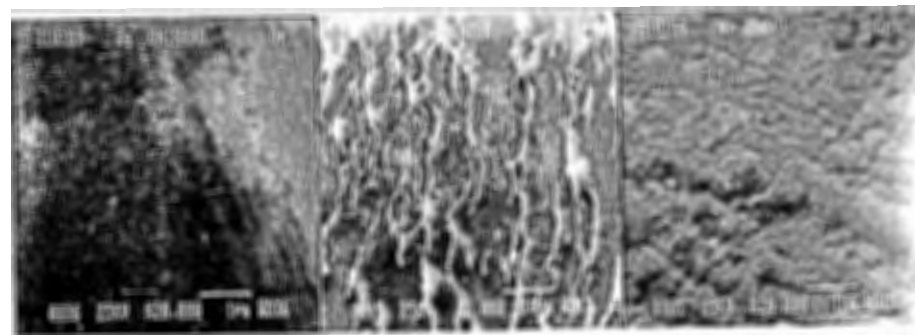


Рис 8: Поверхность алмаза до облучения (а), после облучения ионами ксенона потоком  $\Phi t = 5 \times 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> (б) и ионами аргона потоком  $\Phi t = 8 \times 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> (в).

Таблица 4. Величины плотности критической мощности алмаза и хромоникелевой стали и плотность мощности, вносимой бомбардирующими ионами Ar, Kr и Xe

Ион	Энергия, МэВ	Алмаз		Хромоникелевая сталь	
		$W_{cr}$	$W_{ion}$	$W_{cr}$	$W_{ion}$
$^{40}\text{Ar}$	25	$(0,23-1,25) \times 10^{13}$	$1,92 \times 10^{13}$	-	-
$^{84}\text{Kr}$	210	$(0,23-1,25) \times 10^{13}$	$8,88 \times 10^{13}$	-	-
$^{129}\text{Xe}$	124	$(0,23-1,25) \times 10^{13}$	$6,61 \times 10^{13}$	$6,69 \times 10^{10}$	$9,2 \times 10^{13}$

Температура плавления алмаза  $T_m = 4300$  К, а рассчитанная температура внутри треков ксенона, криптона и аргона -  $T_{Xe} = 7557$  К,  $T_{Kr} = 6343$  К и  $T_{Ar} = 3856$  К. Температура внутри треков ксенона и криптона выше температуры плавления алмаза, а плотность мощности, вносимая этими ионами, в несколько раз выше плотности критической мощности алмаза, что не выполняется для аргона (трековая температура меньше температуры плавления, а плотность мощности сравнима с плотностью критической мощности алмаза). Этим можно объяснить разницу в полученных результатах. Процесс испарения может происходить, если  $W_{ion} > W_{cr}$  и  $T_t > T_m$  и часть испаренного материала конденсируется на неоднородностях поверхности образца, образуя кратеры. Измерения показывают, что облученная часть поверхности имеет сниженную электропроводность. Это может быть связано с образованием треков. Для объяснения механизма образования треков могут быть использованы модели термического пика и кулоновского взрыва. Механизм термического пика наиболее эффективен в веществах, обладающих низкой теплопроводностью, что обуславливает время жизни перегретой области (трека тяжелого иона), достаточное для прохождения процессов рекристаллизации, и др. Механизм кулоновского взрыва оказывается более эффективным для случая сверхтвердых полупроводников. Этот механизм образования треков может описывать кристаллы, обладающие возрастающей электропроводностью, позволяющей нейтрализовать заряженные ионы. Алмаз, являющийся хорошим изолятором, может держать заряженные ионы в кристалле в течение длительного промежутка времени. Этот промежуток достаточно большой и позволяет ионизированным атомам (образованным в процессе электронного торможения) покинуть свои места в решетке. Можно предполагать, что неоднородность распределения треков в синтетическом алмазе обусловлена неоднородностью электропроводности, т. е. неоднородным распределением бора в алмазе. Это может быть результатом морфологической неустойчивости выращивания и неоднородного введения бора в алмаз. Для получения однородной

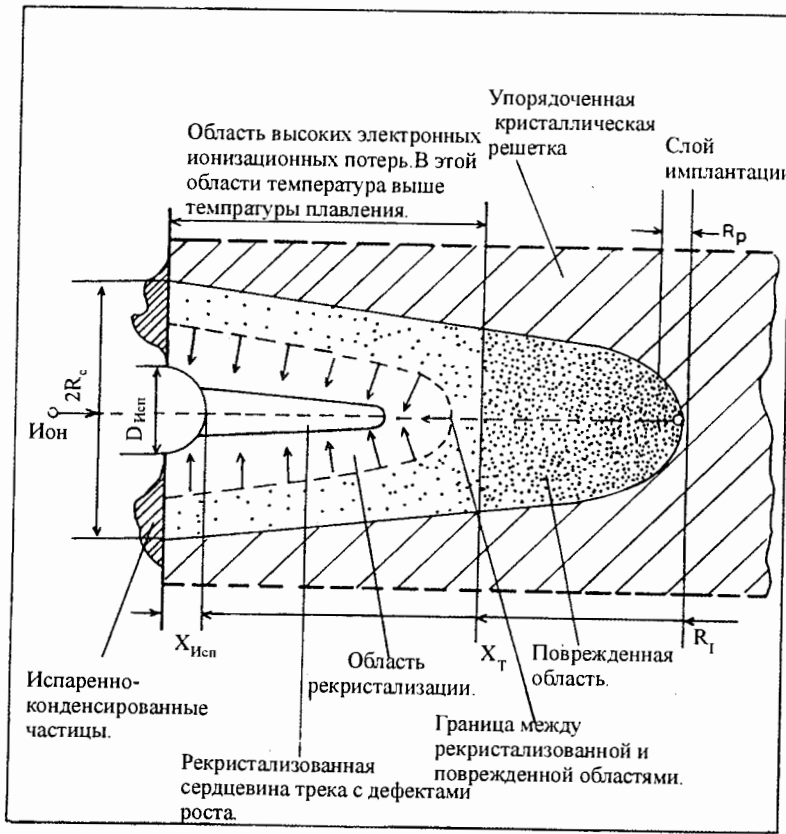


Рис 9: Схема трека в твердом теле после его облучения тяжелыми ионами с энергией, превышающей 1 МэВ/а.е.м.

Если величина  $W_{ion}$  выше  $W_{cr}$ , то материал начинает интенсивно испаряться.  $W_{ion} = \Delta E / (\pi r^2 t_{fl})$ , где  $\Delta E$  - энергия, внесенная тяжелым ионом на элемент объема цилиндра  $V$  с высотой  $X$  и радиусом  $r$  (глубина и радиус испаренного слоя были измерены посредством туннельной микроскопии), а  $t_{fl}$  - время пролета иона на глубину  $X$ . Тогда  $t_{fl} = X / (2E/M)^{0,5}$ , где  $M$  - масса тяжелого иона, а  $E$  - его энергия. Величины плотности критической мощности алмаза и хромоникелевой стали и плотности мощности, вносимой бомбардирующими ионами криптона, аргона и ксенона, представлены в таблице 4. Расчеты дают:

$$W_{Xe} = 6,6 \times 10^{13} \text{ Вт/см}^2, \quad W_{Kr} = 8,8 \times 10^{13} \text{ Вт/см}^2,$$

$$W_{Ar} = 1,92 \times 10^{13} \text{ Вт/см}^2, \quad W_{cr} = 1,25 \times 10^{13} \text{ Вт/см}^2.$$

структуризации поверхности алмаза (с высокими ионизационными характеристиками) надо облучать образцы алмаза изолятора (нелегированного бором) однородным пучком тяжелых ионов.

На основе экспериментальных данных, полученных в данной работе, была развита модель структуры трека, представленная на рис.9. Образование кратеров в рамках развитой модели структуры трека было объяснено процессами испарения алмаза вследствие нагрева в области трека до температуры, превышающей температуру испарения, с последующей конденсацией части испаренного материала на поверхности образца. Эта модель оказывается применимой и для хромоникелевой стали.

Далее в этой главе представлены результаты исследования образцов монокристаллического кремния *n*-типа марки КЭФ-4,5 (кремния, легированного фосфором) и *p*-типа марки КДП-10 (кремния, легированного бором), имплантированных ионами бора, неона, аргона и криптона на циклотронах ИЦ-100 и У-400 при температуре 70 °С. Исследования облученных образцов производились методами рентгеновской дифрактометрии, измерения сопротивления растекания и слоевого сопротивления при потоках в диапазоне  $8 \times 10^{13} - 8 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ .

Приведены результаты по изменению слоевого электросопротивления и сопротивления растекания, в том числе и при послерадиационном отжиге в кремнии, облученном различными тяжелыми ионами. На основе этих результатов сделаны оценки ширины ионно-легированного слоя и его термостабильности. Показано, что ионной имплантацией примеси бора в монокристалле кремния на больших глубинах удается создать проводящие слои, которые остаются термостабильными во время послерадиационного процесса рекристаллизации деструктированного слоя. Обсуждаются результаты по изменению периода решетки кремния в зависимости от флюенсов тяжелых ионов [ $3 \times 10^{14} - 10^{15} \text{ ион/см}^2$ ] по глубине ионно-имплантированного слоя. Было найдено, что период кристаллической решетки увеличивается с увеличением флюенса бомбардирующих ионов до определенного предела (так называемый пороговый флюенс), при котором кривая зависимости этих величин выходит на насыщение. Сделаны оценки концентрации вакансий и проведено сравнение с расчетными значениями. Показано, что рекристаллизация слоя, деструктированного высокоэнергетическим ионным облучением, имеет те же стадии отжига, что и слои кремния.

В конце главы представлены результаты исследования структуры поверхности нержавеющей стали, которая была облучена тяжелыми высокоэнергетическими ионами ксенона с энергией 124 МэВ при высоких плотностях потоков от  $10^{15}$  до  $2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$  при повышенных температурах в

диапазоне от 400 °С до 650 °С для того, чтобы смоделировать процессы, происходящие в реакторах. Было обнаружено, что на поверхности хромоникелевой стали образуются микроигльчатые структуры правильной формы, высота которых увеличивается по мере возрастания ионного потока. Методом рентгеновского микроанализа было показано, что образовавшаяся структура имеет повышенное содержание железа (83,237%) и уменьшенное содержание хрома (10,711%), магния (0,492%), никеля (5,341%) и титана (0,218%).

На основе полученных экспериментальных данных развита феноменологическая модель, объясняющая обнаруженный эффект образования игльчатых структур с элементным составом, отличающимся от исходного состава нержавеющей стали. Обсуждены существующие механизмы образования конических структур и модель неупругого распыления поверхности.

В заключении диссертации приведены основные результаты работы и выводы.

### Основные результаты, полученные в диссертации

1. Исследование полиэтилена в качестве дозиметра гамма-излучения в интервале  $10^2 - 10^6$  Гр и детектора быстрых нейтронов в диапазоне  $10^8 - 10^{11} \text{ н/см}^2$  может быть использовано в разных областях радиотерапии, для измерения аварийных доз, а также при измерениях больших доз в радиационных технологиях. Метод определения дозы излучения состоит в измерении изменения электропроводности полиэтилена. Метод эффективен и является неразрушающим, то есть образцы могут быть использованы многократно.

2. Показано, что стекла с примесью  $\text{K}_2\text{O}$  (аналогично  $\text{Na}_2\text{O}$ ) могут применяться в дозиметрии путем использования изменения оптической плотности стекла в зависимости от дозы излучения. Чувствительность стекла к гамма-излучению увеличивается с ростом содержания  $\text{K}_2\text{O}$ . Изменение плотности легко фиксируется и хорошо воспроизводится. Метод дозиметрии на основе стекол при относительно небольших затратах позволяет определять интегральные дозы. Образцы, содержащие 16,6 молярных %  $\text{K}_2\text{O}$ , могут быть применены для определения доз гамма-излучения в интервале 0,1-1,1 кГр.

3. Обнаружено, что при использовании боросиликатных стекол в качестве термолюминесцентных дозиметров добавка  $\text{U}_3\text{O}_8$  в количестве 0,4 % существенно повышает чувствительность к гамма-излучению. Эти образцы могут быть использованы для измерения доз гамма-излучения в интервале

$10^{-1}$ - $10^4$  Гр. При детектировании быстрых нейтронов наибольшую чувствительность показали стекла, не содержащие  $U_3O_8$ . Такие образцы могут быть использованы для детектирования быстрых нейтронов в диапазоне  $10^5$ - $10^9$  н/см<sup>2</sup>.

4. Установлено, что литиевые боросиликаты, как содержащие, так и не содержащие добавки урана, могут быть использованы в качестве фотоллюминесцентных дозиметров. Для дозиметрии как гамма-квантов в диапазоне  $10^{-1}$ - $2 \times 10^4$  Гр, так и быстрых нейтронов (образцы, не содержащие урана) в интервале  $10^7$ - $6 \times 10^{10}$  н/см<sup>2</sup> может быть использовано возбуждение излучением с длиной волны 250 нм.

5. Установлено, что поливиниловый спирт, содержащий 15-20 % Со или Ni, обладает преимуществами при измерении доз гамма-излучения в диапазоне от 0,1 до  $10^4$  Гр. При хранении облученных образцов при комнатной температуре уменьшение их оптической плотности составляет не более 15-25 % за 18 суток.

6. Исследования микротвердости облученного ПВС показали, что эта физическая характеристика представляет наибольший интерес с точки зрения гамма-дозиметрии и радиационной безопасности. Эти образцы могут быть использованы для разработки детекторов гамма-излучения в интервале  $10^{-1}$ - $10^4$  Гр. Техника измерения микротвердости недорога, не связана с применением токсических материалов и основана на прямых измерениях.

7. Показано, что изменение оптической плотности ПВС, содержащего ацетат меди в различных концентрациях, может быть использовано для детектирования быстрых нейтронов в интервале  $10^5$ - $10^9$  н/см<sup>2</sup>. Такой дозиметр обнаруживает слабое изменение отклика после 45 суток хранения при 20 °С, что является его преимуществом.

8. Исследован композиционный материал на основе полимера с примесью  $Pb_2O_3$ . Показано, что этот композит удобен для измерения доз гамма-излучения в диапазоне от  $10^{-1}$  до  $10^3$  Гр. Падение светосилы после 15 суток хранения облученного детектора при комнатной температуре не превышает 4-5%. Эта дозиметрическая система представляется весьма перспективной.

9. Показана высокая эффективность и чувствительность термоллюминесцентных детекторов на основе аморфного сплава GeS для измерения доз гамма- и нейтронного излучения. Важным достоинством

является отсутствие низкотемпературных пиков. Пределы детектирования для гамма-излучения - от 0,01 Гр до 20 кГр, а для быстрых нейтронов - от  $10^5$  до  $10^{11}$  см<sup>-2</sup>.

10. Исследования морфологии поверхности облученного ионами алмаза позволили установить образование треков (и кратеров) в местах соударения тяжелых ионов, что может служить основанием для создания микроструктур на основе тонких пленок синтетического алмаза, которые имеют большие перспективы в нанoeлектронике, где требуется высокая механическая и термическая стойкость.

На основе результатов экспериментальных исследований облученного тяжелыми ионами алмаза развита физическая модель взаимодействия этих ионов со структурой алмаза. Эта модель применима для хромоникелевой стали.

11. Установлены критерии образования кратеров при бомбардировке поверхности природного алмаза, легированного бором: внутри трековая температура превышает температуру плавления, и плотность внесенной мощности превышает пороговое значение плотности мощности испарения. В этом случае возможен процесс испарения с последующей конденсацией на поверхности.

12. Установлены величины критической плотности мощности материала алмаза и плотности мощности, вносимой бомбардирующими ионами ксенона, аргона и криптона для различных условий облучения монокристаллов алмаза ионами. Для ионов аргона с энергией 25 МэВ плотность мощности равна  $1,92 \times 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>, для ксенона с энергией 124 МэВ плотность мощности равна  $6,6 \times 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>, для криптона с энергией 210 МэВ плотность мощности равна  $8,8 \times 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>, критическая плотность мощности алмаза составляет  $1,25 \times 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. Фактическая плотность мощности, вносимая ионами аргона, сравнима с критической. В этом случае поверхность алмаза приобретает аморфную структуру.

13. Показано, что имплантация электрически активной примеси бора с энергией 1 МэВ/а.е.м. в кремний приводит к формированию проводящих слоев на глубине проективного пробега тяжелых ионов бора. Эти слои сохраняют свои свойства при термообработках. На этом принципе могут быть получены многослойные структуры, которые устойчивы в условиях высоких температур. Эти результаты могут быть использованы в технологии микроэлектроники.

14. Результаты исследования поверхности образцов хромоникелевой стали, проведенного с помощью сканирующего и туннельного микроскопов, показали, что на поверхности образцов появляются игольчатые структуры в результате облучения тяжелыми ионами ксенона с энергией  $E \sim 1$  МэВ/нуклон потоком  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> при температуре 400 °С, что необходимо учитывать при длительном режиме работы реактора. Элементный состав этих структур (определен методом микроструктурного рентгеновского анализа) отличается от состава необлученной поверхности. Содержание железа в этих структурах увеличивается больше чем на 10%, содержание титана уменьшается, никеля уменьшается на 4%, а концентрация хрома уменьшается на 7%.

#### Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Nassar A.M. and Adawi M.A. The Role of Al<sup>3+</sup> Ions in Alumino Glasses as Revealed by Molar Volume, Refractive Index and Microhardness. // J. Non-Crystalline Solids 50 (1982) 155.
2. Nassar A.M., Morsi M.M. and Adawi M.A. Al-Induced Enhancement Colouration by Gamma Irradiation in Some Borate Glasses. // Atomkernenergie 42 (1983) 117.
3. El-Konsul S., Morsi M.M. and Adawi M.A. Interaction of Gamma Irradiation with Uranium in Borate Glasses. // Egypt J. Phys. 14 (1983) 209.
4. Morsi M.M., El-Konsul S. and Adawi M.A. Optical Absorption and Oxidation States of Uranium in Alkali Aluminoborate Glasses. // Communications of the American Ceramic Society, March (1983) 41.
5. Morsi M.M., El-Konsul S. and Adawi M.A. Effect of Neutron and Gamma Irradiation on Some Properties of Borate Glasses. // J. Non-Crystalline Solids 58 (1983) 187.
6. Morsi M.M., El-Konsul S. and Adawi M.A. Track Characteristics and Detection in Borate Glasses Doped with Fissionable Material. // Nuclear Instruments and Methods Vol. 217 No.3 (1983) 495.
7. Nassar A.M., Adawi M.A., Hashad A.M. and Said G. Effect of Radiation on Some Alkalisilicate Glasses. // Proceedings of the 1st Egyptian-British Radiation Protection Symposium. Cairo, Egypt, November (1985) 149.
8. Nassar A.M., Adawi M.A., Hashad A.M. and Said G. Effect of Gamma Irradiation on the Absorption Spectra of Mixed Alkali-Silicate for Both U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> Free and Doped Glasses. // Arab J. Nucl. Sci. and Applications Vol. 20 No.2 (1987) 111.
9. Youssef S.K., Adawi M.A., Hashad A.M. and Fadel M.A. Effect of Neutron Irradiation on Some Properties of Mixed Alkalisilicate Glasses. //

- Proceedings of the 1st Egyptian-British Conference on Biophysics, Giza, Egypt, October (1987) 179.
10. Adawi M.A., Youssef S.K., Hashad A.M. and Fadel M.A. Effect of Radiation on The Optical Properties of Alkali Borosilicate Glasses for Application. // Egyptian Journal of Solids Vol.10 No.1 (1988) 107.
  11. Hashad A.M., Youssef S.K., Adawi M.A. and Salama A.A. Radiation Effect on the Electrical Conductivity of Sand, Quartz and CaSO<sub>4</sub>. // Proceedings of the 1st Egyptian-British Conference on Biophysics, Giza, Egypt, October (1987) 331.
  12. Youssef S.K., Adawi M.A., Hashad A.M. and Badawy Z.M. Radiation Induced Effects on the Optical Properties of Doped Borosilicate Glasses and Their Utilization. // Proceedings of the 1st Egyptian-British Conference on Biophysics, Giza, Egypt, October (1987) 227.
  13. Adawi M.A., Youssef S.K., Hashad A.M. and Badawy Z.M. High Level Dosimetry by Radiophotoluminescence (RTL) of Uranium Doped Borosilicate Glass. // Proceedings of the 1st Egyptian-British Conference on Biophysics, Giza, Egypt, October (1987) 217.
  14. Youssef S.K., Heneish B. and Adawi M.A. Induced Effect of Thermal Annealing on Thermoluminescence of Natural Sand and Its Application in Gamma Ray Dosimetry. // Proceedings of the 1st Egyptian-British Conference on Biophysics, Giza, Egypt, October (1987) 275.
  15. Heneish B., Youssef S.K., Hashad A.M. and Adawi M.A. Parameters Affecting the Overall Calibration Accuracy in Thermoluminescence. // Proceedings of the 1st Egyptian-British Conference on Biophysics, Giza, Egypt, October (1987) 237.
  16. Youssef S.K., Heneish B. and Adawi M.A. Thermoluminescence of Quartz and Its Use in Dosimetry. // Proceedings of the 1st Egyptian-British Conference on Biophysics, Giza, Egypt, October (1987) 265.
  17. Youssef S.K., Adawi M.A. and Badawy Z.M. Preparation and Dosimetric Properties of GeS as a Radiothermoluminescence Detector. // Proceedings of the 4th Conference on Nuclear Science and Application, Cairo, Egypt, March (1988) 623.
  18. Youssef S.K., Hashad A.M., Osiris W.G. and Adawi M.A. Induced Effect of Gamma Rays and Fast Neutrons on the DC Electric Resistivity of Polyethylene. // Polymer Degradation and Stability, 24 (1989) 7.
  19. Adawi M.A., Youssef S.K. and Heneish B. Effect of Gamma Irradiation on Semiconductor Silicon Diodes. // Proceedings of the 1st Conference on Biophysics, Giza, Egypt, October (1987) 323.
  20. Youssef S.K., Adawi M.A., Heneish B. and Hashad A.M. Thermoluminescence of Pb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Polymer for Dosimetry. // Egyptian Journal of Solids Vol.10 No.1 (1988) 98.

21. Youssef S.K., Adawi M.A., Hashad A.M. and Heneish B. Induced Effects of Ultra-Violet and Visible-Light on  $\text{CaSO}_4$  Utilized for Gamma Dosimetry. // Egyptian Journal of Solids Vol.9 No.1 (1987) 58.
22. Youssef S.K., Adawi M.A., Hashad A.M. and Badawy Z.M. Radiothermoluminescenc of Borosilicate Glasses Doped with  $\text{U}_3\text{O}_8$  for Dosimetric Utilization. // Egyptian Journal of Solids Vol.9 No.1 (1987) 26.
23. Maged A.F., Morsi M.A., Hashad A.M., Abdel-Rehim F. and Adawi M.A. Effect of Gamma Irradiation on Optical Absorption Edge in Lithium-Potassium Silicate Glasses. // Egyptian Journal of Solids Vol.12 (1989) 109.
24. Hashad A.M., Adawi M.A., Badawy Z.M. and Osiris W.G. Radiation Effect on the Optical Transmission of Polyvinyl Alcohol Containing Different Concentrations of  $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ . // Arab Journal of Applied Physics and Education Vol.1 (1990) 405.
25. Adawi M.A. and Didyk A.Yu. Damage Formation in Silicon Irradiated by Heavy Ions With Energy More Than 1 MeV/amu. // Rapid Communications JINR-Dubna E-14-49 (1994) 334.
26. Adawi M.A. Induced Effect of Gamma Rays and Fast Neutrons on the DC Electric Resistivity of Polyethylene For High Level Dosimetry. // 1st International Symposium on Beam Technologies (BT95), Dubna, Russia, 28 February - 4 March (1995).
27. Adawi M.A. Effect of Gamma Irradiation on the Optical Properties of Polyvinyl Alcohol (PVA) Doped With Different Impurities. // 1st International Symposium on Beam Technologies (BT95), Dubna, Russia, 28 February - 4 March (1995).
28. Youssef S.K., Azzam A., Badawy Z.M. and Adawi M.A. Gamma Irradiation Effect on Microhardness of Polyvinyl Alcohol Doped With  $\text{CoCl}_2$ ,  $\text{CuSO}_4$  and  $\text{Ni}_2\text{SO}_4$ . // Arab. Journal of Nuclear Science and Applications Vol.28 No.1 (1995) 105.
29. Adawi M.A. and Didyk A.Yu. Formation of Needle Structure on the Surface of Metals Irradaited With Fast Heavy Ions at High Temperatures. // J.of Advanced Materials 2 (2) (1995) 126.
30. Didyk A.Yu. and Adawi M.A. Track Formation in Single Crystals Irradiated With Heavy Ions. // Proceedings of the 1st Russian-Egyptian Workshop on Cyclotrons and Their Applications, Cairo, Egypt, March (1996).
31. Adawi M.A., Didyk A.Yu., Varichenko V.S. and Zaitsev A.M. Radiation Damage in Dielectric Semiconductor Single Crystals. // Radiation Physics and Chemistry, Vol. 53, No. 5 (1998) 577.

Рукопись поступила в издательский отдел  
12 ноября 2001 года.