

УДК 533.951

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ ПО ПУЧКОВЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ
(ИОННЫМ, ЭЛЕКТРОННЫМ, ПЛАЗМЕННЫМ)***Н. В. Плешивцев*

РНИЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия

Рассмотрены области применения ионных пучков и плазмы. Обсуждены тезисы докладов по источникам быстрых ионов и атомов, ионным и плазменным ускорителям, физике и материаловедению ионной имплантации, ионно-пучковой обработке диэлектриков, модификации материалов высокоэнергетическими ионами, получению алмазоподобных пленок и сверхтонких мишеней. Проведено обобщение представленных результатов.

Первый Международный симпозиум состоялся в феврале—марте 1995 г. в г. Дубна, Россия. Он был организован Лабораторией физики частиц ОИЯИ в кооперации с Национальной программой "Высокотемпературная сверхпроводимость", Советами РАН по ускорителям заряженных частиц и по модификации конструкционных материалов пучками заряженных частиц, а также Объединенным Российско-Германским венчурным предприятием "РОНИК". В его работе приняли участие специалисты из России, Украины, Белоруссии, Румынии, Германии, Египта, Абхазии, Болгарии, США, Казахстана.

Было представлено 166 докладов, в том числе 55 устных и 111 стендовых.

Проблеме создания разнообразных надежно работающих источников ионов, электронов, плазмы и ускорителей заряженных частиц для практических применений посвящено 37 % докладов. Вопросы использования электронных пучков в экологически чистых технологиях, биологии и медицине обсуждались в 32 докладах. Пучковые технологии в высокотемпературной сверхпроводимости рассмотрены в восьми поисковых работах. Физическим, техническим и технологическим основам пучковых технологий посвящены 65 докладов [1, 2].

Пучки ионов практически всех элементов Периодической системы элементов Д. И. Менделеева нашли широкое применение в масс-спектропии всевозможных веществ и элементов, для химического и изотопного анализа и микроанализа поверхностей твердых материалов. Они используются для получения стабильных и радиоактивных изотопов в граммах в электромагнитных сепараторах изотопов. Источники ионов с большим успехом используются в ускорителях заряженных частиц для исследования ядерных реакций, имплантации и ионной обработки полупроводников, металлов, сплавов, лечения раковых заболеваний, биофизических исследований и получения высокопродуктивных и болезнестойких сельскохозяйственных культур, трансурановых химических элементов, "ядерных фильтров".

Пучки и потоки ионов используются в ионных, газоразрядных и электровакуумных приборах, в имплантационной металлургии для модификации свойств поверхностей твердых материалов, в комбинированных технологиях при конденсации атомов, испаряемых или распыляемых, для энергетического стимулирования и ионно-атомного перемешивания наносимых атомов с атомами подложки. Пучки ионов находят применение в ионных и электрореактивных космических двигателях, а также для нагрева плазмы в термоядерных установках до высоких температур (100—200 млн. К).

Плазма применяется для получения вышеназванных пучков ионов, в газоразрядных источниках света, газоразрядных лазерах, термоэмиссионных преобразователях тепловой энергии в электрическую, магнитогидродинамических генераторах, металлургии, электронике, химии, для нанесения покрытий, бурения горных пород.

ИСТОЧНИКИ ПУЧКОВ БЫСТРЫХ ИОНОВ И АТОМОВ

В. Г. Дудников (ИЯФ, г. Новосибирск) в докладе "Источники ионов высокой яркости для микролитографии" представил три типа источников ионов: электродинамический, дуоплазмотрон и поверхностно-плазменный для получения разрешения менее 0,1 мкм и достаточной производительности процесса ионно-проекционной литографии. Первый из них основан на отборе из точечных участков жидких металлов, сплавов и диэлектриков очень сильными электрическими полями ионных пучков с очень высокой плотностью тока эмиссии — до $1 \cdot 10^9$ А/см² при диаметре пятна 3 нм. При токе ионов в пучке 0,1 мА и энергии 25 кэВ плотность тока на мишени достигала 5 А/см². Поперечная энергия ионов составляла 10 эВ.

С помощью дуоплазмотрона получен пучок ионов Н⁻ с плотностью тока 0,4 А/см² с поперечной энергией ионов 0,4 эВ при энергии ионов 22 кэВ.

В третьем поверхностно-плазменном источнике с цезиевым катализатором и пеннинговской ячейкой с геометрической фокусировкой и горячим катодом из гексаборида лантана плотность тока Н⁻ достигала 1 А/см², поперечная температура ионов составляла 0,3 эВ, а нормализованная яркость источника достигала 7 А/(мм·мрад)². При плотности тока эмиссии 0,3 А/см² поперечная температура понижается до 0,05 эВ. Это достигается благодаря резонансной перезарядке быстрых ионов Н⁻ на холодных (Т = 20—30 К) атомах водорода с образованием Н (быстрых) и Н⁻ (холодных).

Сверхзвуковую струю холодных атомов водорода вероятно можно также использовать в источниках отрицательных ионов водорода, разрабатываемых для получения мегаваттных пучков нейтральных атомов водорода для Международного термоядерного экспериментального реактора-токамака (ИТЭР).

Н. Н. Семашко, В. М. Кулыгин, А. А. Панасенков, Н. В. Плешивцев, Н. П. Малахов (ИЯС при РНЦ "Курчатовский институт") в докладе "Многоамперные источники газовых ионов для управляемого термоядерного синтеза и для технологических целей" привели схемы источников ионов без внешнего магнитного поля типа ИБМ и с периферийным магнитным полем остроугольной геометрии типа ИПМ, рассмотрели основные характеристики и параметры пучков ионов водорода, гелия, азота. Источники ионов ИПМ-2, ИПМ-1, АИСТ-20/50, ИВИС-70/80 и другие позволяют получать пучки ионов водорода с энергией 25—60 кэВ током ионов 20—60 А, ионов гелия с током 10—30 А и ионов азота — 5—16 А. Длительность импульса тока изменяется от 1—30 мс до 1,5 с. Поперечное сечение пучков при однородности плотности тока 95 % на расстоянии 1 м от источника изменяется от диаметра 10 см до 12x35 см². Средняя плотность тока ионов Н⁺ находится в пределах 130—250 мА/см².

Эти источники ионов использовались в инжекторах пучков быстрых атомов водорода мощностью 1—3 МВт с углами расходимости 0,6—2,5° для нагрева плазмы до термоядерных температур (150 млн. К) в термоядерных установках "Огра-4", "Токамак-11", "Токамак-15". Кроме того, источники ИБМ-5 и ИПМ-2, генерировавшие пучки ионов азота с током 5—7 А и энергией 15—25 кэВ, применялись для повышения в 2—5 раз износостойкости и коррозионной стойкости ряда конструкционных и инструментальных сталей (ст.3, 65Г, Р6М5, Х12М, Х12М, ШХ15, Р18, Т5К10, Т15К6 и др.); серого чугуна СЧ-20, работавших в качестве исследуемых пар трения, токарных резцов, сверл, фрез, режущих элементов почвообрабатывающих орудий, деревообрабатывающих фрез, для резки капроновых нитей, прокатных валков для получения тонкой фольги (толщиной до 20 мкм) из вольфрамо- и молибденорениевых сплавов.

При затратах энергии до 300—400 Дж/см² и длительности непосредственной ионной обработки 10—100 с без нагрева деталей до 500—600 °С толщина слоя с повышенной твердостью (на 20—40 % и больше) составляет 50—100 мкм, а после дополнительного отжига — до 200—250 мкм. Процесс ионной обработки экологически чистый, при относительно небольших энергиях ионов радиационно безопасный, а имплантер имеет повышенный энергетический КПД. Смешанные пучки, состоящие из ионов азота и водорода, азота и гелия также увеличивают толщину модифицированного слоя.

Г. Е. Ремнев, И. Ф. Изаков, Г. И. Котляревский, В. М. Матвиенко, М. С. Опекун, А. Н. Пушкарев (ИЯФ при Томском политехническом университете) в докладе "Источники ионных пучков большой мощности и их применение для прикладных исследований" представили основные характеристики источников на основе вакуумной дуги с магнитно-изолированным диодом "Темп-2". Ускоряемые ионы: Н⁺, Сⁿ⁺, Al⁺. Энергия ионов 50—300 кэВ. Длительность импульса тока 20—200 нс. Плотность тока ионов 1—250 А/см². Поперечное сечение пучков 20—100 см². Первое направление исследований: влияние плотности энергии на мишени в диапазоне плотности мощности 10⁶—10⁸ Вт/см² на модификацию свойств материалов. Второе направление связано с ионной имплантацией в диапазоне плотности мощности (1—2)·10⁶ Вт/см². Два ускорителя работают в промышленных условиях по модификации свойств металлов и сплавов, а также полупроводников и для нанесения сверхбыстро тонких пленок металлов и композитов. Энергозатраты на обработку металлов и сплавов составляют 2—3,5 кВт·ч/м², а производительность ионной обработки — 1,5—3 м²/ч. Производятся упрочнение и ремонт лопаток авиационных газовых турбин из титановых

сплавов, а также упрочнение резцов. Микротвердость повышается в 3—5 раз. Значения оптимальной плотности энергии изменяются в пределах 300—400 ± 2—3 Дж/см². Они совпадают с приведенными выше данными, но для пучков ионов азота с длительностью импульса 10—20 мс.

В. В. Берсенева, Н. В. Гаврилов, С. П. Микулин (Институт электрофизики РАН, г. Екатеринбург) в докладе "Технологические источники ионов и электронов на основе разрядов с холодным катодом" описали устройство двух источников ионов, работающих в непрерывном и импульсном режимах. Первый из них основан на сильнотоковой дуге в аргоне, азоте, кислороде и других газах при импульсном токе разряда 10—100 А и давлении газа 0,02—0,2 Па. Ускоряющее напряжение в трехэлектродной ионно-оптической системе поднимается до 50 кВ. В импульсах длительностью 0,1—1 мс ток ионов достигает 0,2—2 А, а его среднее значение — до 100 мА. Поперечное сечение пучка равно 150 см². Вторым источником — "обращенный магнетрон" с тлеющим разрядом. Он имеет более простую конструкцию и не требует поджигающего устройства. Особенности этого разряда позволили разработать импульсно-периодический источник ионов с частотой 3—500 Гц и параметрами, близкими с указанными выше. При использовании углеродсодержащих газов авторы получили пучки долгоживущих ионизованных СН-радикалов. Они позволили при энергии ионов 30 кэВ и дозе $2 \cdot 10^{18}$ см⁻² получить максимальное значение микротвердости 15 ГПа при начальном значении 2 ГПа. Один источник, работающий в непрерывном режиме, был установлен вместо одного из трех генераторов плазмы на установке ННВ-6,6-И1. Резцы из стали Р6М5 очищались ионным пучком в течение 15—20 мин, затем наносилось покрытие нитрида титана толщиной 1—4 мкм. При точении этими резцами нержавеющей стали 12Х18Н10Т стойкость их увеличилась на 15—30 %. Длительность цикла обработки сократилась на 30—40 %. Эти пучки использовались для предварительной обработки поверхностей стекол, керамики и металлов перед нанесением покрытий.

Эти источники использовались для получения широких электронных пучков с поперечным сечением 1—50—200 см². В режимах микро- и миллисекундных импульсов ток электронов в пучке достигал 20 А при энергии частиц до 20 кэВ. Различные модификации этих источников использовались в 11 научных и технологических центрах для ионной имплантации в металлы и нанесения покрытий в сопровождении ионной бомбардировки.

Б. К. Кондратьев и В. И. Турчин (ИТЭФ, Москва) представили доклад "Интегрированный ионный источник". В нем используется катод дополнительного подогрева и шестипольное магнитное поле остроугольной геометрии. Ионизация газа происходит в области, свободной от магнитного поля. При использовании водорода полный ток ионов с энергией 50 кэВ составлял 2,6 А, а диаметр пучка был равен 65 мм. Яркость центральной части пучка достигала значения 14 А/(см²·мрад²), а фазовая плотность — 6 А/(см·мрад) для 90 % частиц. Длительность импульса тока пучка составляла 40 мкс при частоте повторения 1 Гц. Увеличив диаметр отверстия эмиссии с 2,8 до 3,8 мм на выходе ускорителя получен ток ионов водорода 6 А, ускоренных напряжением 30 кВ. При напряжении 50 кВ получены пучки ионов ксенона, аргона и гелия с током, равным соответственно 0,85; 1,1 и 1,6 А. Нормализованный эмиттанс пучка Н⁺ с током 0,12 А для 90 % частиц пучка был равен 0,096 см·мрад. Он был обеспечен сравнительно небольшой температурой ионов в плазме 0,4—0,5 эВ. Полюсы катоды в виде тринадцати медных тонкостенных цилиндров, размещенных на металлическом основании, позволили получить значительный ток в тлеющем разряде при давлении газов 0,8—1,2 торр и напряжении 0,8—1,3 кВ. Повышенная плотность ионов в анодной камере между двумя анодами получалась благодаря компрессии потока электронов из катодной камеры при помощи выпуклой металлической сетки, установленной на первом аноде тлеющего разряда.

В. И. Волосов, В. А. Поляков, И. Н. Чуркин (ИЯФ, г. Новосибирск) в докладе "Источник быстрых тяжелых атомов" описали оригинальный источник, создающий азимутально однородный веерный поток атомов с энергетическим спектром, полуширина которого 10—15 % от максимальной энергии атомов 10 кэВ. На установке "Источник ионов и атомов с поперечными полями" (электрическим и магнитным) в стабильном квази-стационарном и стационарном режимах получен разряд с тяжелыми ионами, поступающими с катода, с разрядным током до 500 А. Проведены первые эксперименты по двухстадийной имплантации. Вначале в поверхность внедрялись быстрые тяжелые атомы с энергией 5—10 кэВ. Затем проводили облучение пучком электронов с энергией 1,5—3 МэВ и плотностью тока до 200 мкА/см², которое вызывало радиационно-стимулированную диффузию имплантированного вещества.

А. В. Визирь, А. Г. Николаев, Е. М. Окс, П. М. Шанин, Г. Ю. Юшков (Институт сильноточной электроники, СО РАН, г. Томск) разработали источник ионов ТИТАН для получения широкоапертурных пучков ионов газов и металлов. Ионы металлов генерируются с помощью вакуумной дуги в парах металлов, образуемых катодными пятнами. Ионы газов получают сжатым дуговым разрядом низкого давления. Получены пучки ионов газов и металлов с током около 1 А с энергией 10—100 кэВ в режиме импульсов длительностью 0,4 мс с частотой следования 50 Гц. В непрерывном режиме при вытягивающем напряжении 10 кВ ионный ток достигает сотен миллиампер. Импульсные источники используются для модификации свойств материалов и ионного стимулирования осаждения тонких пленок. Стационарные источники применяются для исследований нанесения тонких пленок.

М. А. Батазова, В. Г. Дудников, Г. И. Кузнецов, Е. А. Соколовский (ИЯФ, г. Новосибирск) создали источник с поверхностной ионизацией ленточного пучка простого в изготовлении и с высоким удельным первеансом ($5 \cdot 10^{-9}$ А/В^{3/2}·см для ионов цезия). Рабочее вещество (пары металла или соли) через щелевые сопла направляется на эмиттер в виде полуцилиндрической поверхности. Пучок ионов формируется трехэлектродной системой с "нулевым потенциалом" на последнем и отрицательным потенциалом — на среднем электроде. При площади эмиссии 5х40 мм² извлечен пучок положительных ионов цезия с током до 40 мА при напряжении 16 кВ с длительностью импульса 0,4 мс. Источник можно использовать для диагностики плазмы, генерации тяжелых отрицательных ионов в распылительных источниках, для обработки и модификации поверхностей твердых материалов.

В. Г. Дудников усовершенствовал поверхностно-плазменный источник с цезиевым катализатором для получения отрицательных ионов. Он позволяет получать интенсивные пучки изотопов водорода с температурой меньше 1 эВ и эмиссионной плотностью тока до 1 А/см в непрерывном режиме при использовании цилиндрического эмиттера и эмиссионной щели, параллельной магнитному полю. Этот источник можно использовать в тандемных ускорителях для высокоэнергетической имплантации, а также в ионно-проеctionной литографии с высоким разрешением.

УСКОРИТЕЛИ ИОНОВ И ПЛАЗМЫ

Б. И. Иванов и В. П. Прищепов (Харьковский институт физики и технологии) разработали ускорители многозарядных ионов на токи ионов алюминия со средним зарядом $Z = 8$, работающие в режиме импульсов длительностью 50 нс при напряжении 300—400 кВ. В плоском диоде площадью 16 см² получен ток до 30 А со средней плотностью тока 1,5 А/см². В сферическом секторном диоде ток многозарядных ионов достигал 40 А при плотности тока 5 А/см². В цилиндрическом диоде со сходящимся к оси пучком ток указанных ионов достигал 200 А. Ре-

кордно большие токи многозарядных ионов алюминия получены методом полевой эмиссии с анодами, изготовленными из алюминиевых острых лезвий, катод выполнен из проводящих проволочек, параллельных аноду-эмиттеру. Использовалась магнитная изоляция поперечным магнитным полем с напряженностью до 3 кЭ. Предлагается использовать пучки многозарядных ионов для изготовления ядерных фильтров.

В. И. Хвесюк и П. А. Цыганков (Бауманский государственный технический университет, Москва) использовали высоковольтный импульсный газовый разряд с напряжением до 60 кВ и разрядным током до 1 А при длительности импульса до 1 мс примерно прямоугольной формы для осуществления трехмерной имплантации ионов.

А. А. Глазков и А. Н. Диденко (МИФИ) обращают внимание на большие перспективы в микроэлектронике и материаловедении имплантации высокоэнергетичными ионными пучками с энергией несколько МэВ. Наиболее пригодными для этих целей являются высокочастотные ускорители, имеющие относительно небольшие размеры, простую конструкцию, надежно работающие, простые в обслуживании, легко адаптируемые для различных энергий и типов ионов. Однако необходимо реализовать непрерывный режим работы и получить достаточно высокую интенсивность ускоренного пучка ионов ~ 100 мкА/см². Работающий в МИФИ ускоритель работает на частоте несколько десятков мегагерц, ускоряет ионы до энергии 1,5 МэВ при плотности тока ионов 27 мкА/см². Коэффициент захвата ионов в процесс ускорения составляет около 10 %.

А. К. Геворков, Л. В. Аринин, А. А. Авидзба, В. В. Кобец, Д. Ю. Калашников, И. А. Карпюк, А. Ф. Попов, Г. Г. Подлесный, А. О. Сидорин (Сухумский физико-технический институт) предложили ВЧ-резонансный ускоритель с перенастройкой частоты, обеспечивающий в одной и той же ускоряющей структуре ускорение ионов различной массы и регулирование их выходной энергии. Дано описание конструкции ускорителя, рассчитанного на ускорение в структуре с фазопеременной фокусировкой однозарядных ионов с массой 10—70 а. е. м. до энергии 600 кэВ и током 5 мА. Коэффициент захвата тока инжекции составил 30 % за счет использования группирователя и подстройки частоты. Ускоритель предназначен для ионной имплантации. В этом ускорителе получены пучки протонов с током 40 мА и дейтронов — 50 мА. Авторы создали малогабаритный ВЧ-ускоритель ионов для прикладных целей на основе полицилиндрических четвертьволновых коаксиальных резонаторов, ускоряющие зазоры которых включены последовательно. Положительные и отрицательные ионы протия и дейтерия, одно- и двухзарядные положительные ионы гелия ускорены от 80 кэВ до 0,5—1,5 МэВ с током ионов до 100 мА. Мощность пучка была 1 МВт/имп., а при частоте 150 МГц она возросла до 2,5 МВт/имп.

А. С. Артемов, В. М. Дьяченко и А. Д. Коваленко (ОИЯИ, Дубна) представили потенциальные возможности нового сверхпроводящего ускорителя Нуклотрона в качестве генератора быстрых нейтронов на основе ядерно-ядерных взаимодействий при энергиях ионов от 5 МэВ до 6 ГэВ. Используя внутренние мишени и вращающийся пучок интенсивностью около $5 \cdot 10^9$ дейтронов за оборот, проведены физические эксперименты с пучком в диапазоне энергий от 100 МэВ до 2,3 ГэВ на нуклон. В соответствии с программой исследований электроядерного метода получения энергии и переработки радиоактивных отходов, одобренной в ОИЯИ, рассмотрены некоторые аспекты генерации потоков быстрых нейтронов, используя циркулирующие пучки, а также тонких внутренних мишеней. Эти же проблемы обсуждались в докладе Г. Кисилева (ИТЭФ, Москва), но при использовании ускорителя и электроядерной установки другого типа.

С. Н. Андрианов (С.-Петербургский Госуниверситет) и И. П. Юдин (ОИЯИ) предложили проект ядерного микроскопа — установки для проведения микроанализа объектов различной природы с помощью протонных и ядерных пучков микронных размеров на основе электростатического ускорителя Ван-де-Граафа ОИЯИ с энергией протонов 1—6 МэВ. Показана принципиальная возможность получения пучков субмикронных размеров. Необходимо ввести компенсацию аббераций секступольными и октупольными линзами. Получены допуски на юстировочные параметры системы, обеспечивающие отклонение размеров пучка в заданных пределах.

И. П. Юдин (ОИЯИ, Дубна) в докладе “Моделирование полей и транспортировка частиц в магнитных системах ускорителей” привел результаты расчета по дву- и трехмерным методикам магнитных полей как обычных, так и сверхпроводящих дипольных, квадрупольных и тороидальных магнитов. Рассмотрел решение обратной задачи магнитостатики. Описал программную реализацию разработанного нового подхода к проблеме моделирования транспортировки пучков заряженных частиц в нелинейных полях различных магнитных систем в рамках оптики высоких порядков. Показал разработанные схемы согласования фазовых объемов пучков частиц.

И. П. Юдин и В. В. Андреев (ОИЯИ, Дубна) описали матричный формализм переноса для симуляции движения заряженных частиц в нелинейных электростатических полях с осесимметричным (ускоряющим и тормозящим) потенциалом до третьего порядка аббераций. Нелинейные уравнения траектории движения, их решения и реализация в системе Фортран представлены.

В. Н. Литуновский, А. А. Дроздов, В. М. Кожевин, В. Е. Кузнецов, Б. В. Люблин, И. Б. Овчинников, В. А. Титов (НИИЭФА, С.-Петербург) в докладе “Использование плазменного ускорителя высокой мощности и большой длительности импульса для исследования кандидатных материалов, противостоящих моделируемым разрушающим нагрузкам в ИТЭР”, действующим на компоненты дивертора и первой стенки. Показано, что этим методом можно получить надежные результаты для выбора кандидатных материалов для ИТЭР.

Таблица 1

Основные параметры электронно-ионных пушек

Параметры	Установки		
	ВИКА	СПРУТ	САПФИР
Плотность теплового потока, МДж/м ²	120 (30*)		2
Диаметр пучка, м	0,03 (0,05*)	0,1	0,35
Длительность импульса, мс	0,09—1,2	0,1—1,0	0,2
Энергия ионов, кэВ	0,1	0,1	0,7
Температура поверхности, °С	T _{пл} —1000	T _{пл}	T _{пл}

* “Чисто” плазменная пушка.

С. В. Бажал и В. А. Романов (ГНЦ ФЭИ, г. Обнинск) в работе “Кондиционирование вакуумных промежутков ускоряющей трубки электростатического ускорителя дуговым разрядом с искусственно накаливаемым катодом” показали, что принудительное воздушное охлаждение позволяет поддерживать разрядный ток в трубке на уровне 2—3 А в течение нескольких часов без перегрева клеевых соединений. Обработка разрядом в водороде заметным образом повышает напряжение возникновения микроарядов.

ФИЗИКА И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Различным вопросам ионной имплантации, ионного и динамического перемешивания атомов, фазово-структурным состояниям, природе упрочнения металлов

и сплавов, эффектам дальнего действия, имплантационно-плазменной технологии и другим посвящено 53 доклада, представляющих научную и практическую ценность. Остановимся на некоторых из них.

А. Д. Коротаев, А. Н. Тюменцев, О. В. Панин, Ю. П. Пинжин, С. П. Бугаев, П. М. Шанин, Г. Ю. Юшков (СФТИ при Томском госуниверситете, Институт сильноточной электроники СО РАН) в тезисах доклада "Фазово-структурные состояния и природа упрочнения поверхности металлов и сплавов при высокодозной ионной имплантации" описали результаты полной структурной аттестации ионно-модифицированного слоя металлических мишеней после имплантации ионов углерода, азота, кремния, молибдена, свинца и многоэлементной имплантации сочетанием газовых и металлических ионов с энергией 30—100 кэВ, при плотности тока в импульсе до $0,2 \text{ мА/см}^2$, частоте следования импульсов и дозы до $5 \cdot 10^{17} \text{ ион/см}^2$. Температура мишени в процессе имплантации изменялась в пределах 100—500 °С. При дозах меньше $2 \cdot 10^{16} \text{ ион/см}^2$ обнаружены качественно подобные фазово-структурные превращения в поверхностном слое мишени с формированием высокодисперсных (менее 10 нм) вторичных фаз (нитридов, карбидов, силицидов) кластеров точечных дефектов и дислокационной субструктуры при плотности дислокаций до $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. При температуре поверхностного слоя 100—150 °С обнаруживается его интенсивное диффузионное насыщение и миксинг адсорбированными на поверхности элементами (углерод, азот, кислород) газовой среды рабочего вакуума ($5 \cdot 10^{-5}$ — 10^{-4} торр) имплантера и образованием вторичных фаз типа оксидов, оксикарбидов, оксинитридов. При дозах $\geq 2 \cdot 10^{17} \text{ ион/см}^2$ в зависимости от типа ионов происходит либо аморфизация поверхностного слоя, либо формирование на поверхности сплошных слоев карбидов, нитридов и оксинитридов.

Авторы показали, что определяющими в упрочнении поверхностного слоя факторами являются твердорастворное упрочнение примесями внедрения и дисперсное упрочнение частицами вторичных фаз. Теоретические значения предела текучести в этом слое достигают (2,5—3) ГПа. Использование импульсных дуговых источников ионных пучков значительно расширяет возможности ионной модификации материалов.

А. Д. Коротаев, Ю. П. Пинжин, А. Ф. Сафаров, А. Н. Тюменцев (СФТИ, г. Томск), С. П. Бугаев, Д. П. Борисов, Н. Н. Коваль, П. М. Шанин (ИСЭ СО РАН, г. Томск) в тезисах доклада "Микроструктура и свойства покрытий нитрида титана и их модификация в процессе ионно-плазменной обработки" представили результаты исследований влияния низкоэнергетической газоразрядной плазмы на микроструктуру и свойства композиции стальная подложка — ионно-плазменное покрытие TiN. Авторы показали возможность существенного упрочнения поверхностного слоя подложки путем ионного азотирования в плазме. Впервые обнаружено, что вблизи подложки субструктура состоит из зерен с размерами кристаллов 5—10 нм. По мере роста покрытий она трансформируется в субмикрорекристаллическую с размерами зерен около 200 нм. Внутри последних наблюдается высокоэнергетическая дефектная структура с высокой (до $0,5 \text{ рад/(м} \cdot \text{мкм)}$) кривизной кристаллической решетки.

В третьей работе вышеуказанных авторов с участием А. В. Визирь (ИСЭ) "Градиентные структуры после ионно-лучевой модификации поверхностных слоев металлов и сплавов" показана возможность снижения на поверхности сопряжения подложка — покрытие градиентов механических свойств, повышения адгезии и служебных свойств покрытий.

А. Д. Коротаев, А. Н. Тюменцев, Ю. И. Почивалов, С. В. Овчинников, Г. Е. Ремнев, И. Ф. Исаков (СФТИ при Томском госуниверситете, НИИЯФ при ТПИ) в работе "Иерархия фазово-структурных состояний металлов и сплавов

при воздействии мощных ионных пучков¹ установили, что при плотности мощности потока ионов меньше $5 \cdot 10^7$ Вт/см² наиболее характерной особенностью морфологии поверхности является образование кратеров. Размеры их изменяются в пределах 0,5—20 мкм, плотность их достигает $1 \cdot 10^5$ см⁻². Внутри и в окрестности кратеров обнаружены ротационные дефекты типа дисклинаций и микродвойников, микротрещины и аморфизация поверхностного слоя. Плотность дислокаций в окрестности кратеров достигает 10^{11} см⁻². Изменение элементного и фазового состояний поверхностного слоя связано с осаждением пароплазменного облака и адсорбцией элементов газовой среды рабочего вакуума ускорителя. Предложены физические модели образования кратеров и механизмов формирования дислокационно-дисклинационных субструктур при воздействии мощных импульсных пучков на металлы и сплавы.

Эффекты дальнего действия при ионной имплантации рассмотрены в нескольких работах. Наиболее обстоятельно в обзоре Ю. П. Шаркеева (Институт физики прочности и материаловедения СО РАН), А. Н. Диденко (МГИФИ), Э. В. Козлова (Томская государственная архитектурно-строительная академия). Эффект дальнего действия, который наблюдается по изменению микроструктуры, может простираться на глубины в десятки микрон. При энергии ионов 20—200 кэВ обычно толщина слоя, в котором просходят изменения структуры и фазового состояния, составляет два-три проективных пробега ионов в облучаемой мишени, не превышающих долей микрона. Рассмотрено проявление эффекта дальнего действия в металлах, сплавах и полупроводниках. Установлено, что характер дислокационной структуры и ее количественные характеристики зависят от исходного состояния мишени, сорта и энергии ионов, дозы, внедренных в мишень ионов. Полученные результаты коррелируют с данными исследований макроскопических характеристик (износостойкость, микротвердость). Проведен анализ возможных механизмов, приводящих к проявлению эффекта дальнего действия.

М. И. Гусева, Г. В. Гордеева, М. В. Атаманов, В. Е. Неумоин (РНИЦ "Курчатовский институт", Москва), Б. Н. Чой (Корейский исследовательский институт атомной энергии), Дж. Б. Хан (Университет Сунг Кюн Кван, Суwon, Корея) в докладе "Поверхностная модификация различных промышленных сталей имплантационно-плазменной технологией" исследовали влияние предварительного плазменного азотирования на толщину, твердость и износ слоев после последующей ионной имплантации промышленных сталей. Толщина модифицированного слоя с повышенной твердостью широко распространенных и мартенситных сталей примерно равна 20 мкм и около 1 мм — для сталей, не содержащих хром. Сопротивление износу исследованных сталей после ионной имплантации увеличивается в 10—30 раз. Рентгеновский дифракционный анализ указывает на присутствие в имплантированных слоях различных нитридов. М. И. Гусева отметила, что она наблюдала эффект дальнего действия в нержавеющей стали, молибдене при плотности тока ионов бора, титана, гадолиния, самария, диспрозия 30 мкА/см² при энергиях 30—40 кэВ начиная с 1962 г.*

Во втором докладе вышеназванных авторов "Повышение твердости сплава карбид вольфрама-кобальт имплантацией ионов" показано, что после имплантации молекулярных ионов азота с энергией 120 кэВ дозой $5 \cdot 10^{17}$ см⁻² микротвердость повышается в 4 раза. Когда в процессе ионной имплантации образец нагревался до 500 °С наблюдалась радиационно-стимулированная диффузия атомов азота. Профиль атомов азота имел столообразное распределение азота в слое

* Диссертация на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук "Исследование в электромагнитном изотопном сепараторе распыляющего действия высокоэнергетических ионов и их внедрение в металлы", ИАЭ, Москва.

толщиной примерно 1900 Å и протяженный "хвост". Концентрация азота совпадает с концентрацией атомов кобальта и составляет в среднем 16 ат. %. Образование комплексов $\text{Co}-\text{N}_4$ вносит вклад в упрочнение твердого сплава.

А. Дж. Перри и Дж. Р. Треглио (ISM Technologies Inc., Сан Диего, США) в докладе "Имплантационная зона повреждений (эффект большого дальнего действия) в пленках нитрида титана, имплантированных ионами металлов" показали, что срок службы режущих инструментов с науглероженным карбидом можно увеличить в 2—3 раза имплантацией ионов металла. Авторы установили два различных режима истирания, которые связаны с зоной имплантации и имплантационной зоной повреждений. Рентгеновские измерения показали, что после имплантации нет изменений в остаточных напряжениях, но имеются изменения в распределении напряжений, которые приводят к образованию сетки дислокаций в зоне повреждений.

А. Е. Лигачев (Институт электрофизики РАН, Уральское отделение) в работе "Эффект повышения твердости поверхности при ионной имплантации" использовал ионы углерода, азота, бора, титана, алюминия, магния, рения и свинца для имплантации меди, железа, нескольких типов стальных сплавов, твердого вольфрамового сплава в виде пар трения. Было установлено, что после имплантации образуется дислокационная структура, состоящая из небольших дислокаций, связанных с вакансиями. Общее число дислокаций уменьшается с глубиной до 20 мкм, на которой они еще наблюдаются. В то же время модифицированный слой с повышенным сопротивлением истиранию распространяется до глубин 150—200 мкм.

Г. Г. Бондаренко, К. А. Костин (МГИЭМ), А. П. Комиссаров (ИМЭТ) в докладе "Механические свойства и фазовая стабильность аустенитных сталей после протонной бомбардировки" исследовали нержавеющие стали типа 12Cr—20Mn—2W и типа 316 отожженных и холоднопрокатанных в диапазоне уровней деформаций 20—75 %, и флюенсов $3,25 \cdot 10^{15}$ — $9,75 \cdot 10^{16}$ $\text{H}^+/\text{см}^2$ и температур 100—550 °С пучками полиэнергетических протонов с энергией 80—1000 кэВ. Установлен эффект насыщения облучаемым водородом на изменение механических свойств нержавеющих сталей. Водородная хрупкость возрастает с уменьшением уровня деформации и температуры облучения. Обнаружена фазовая стабильность стали типа 316 при механической обработке и облучении. В другой стали протонная бомбардировка приводит к выделению γ -фазы при 550 °С, полному растворению первоначальной σ -фазы, возникшей в образцах с 20%-ным уровнем деформации и частичному растворению этой фазы в образцах с 75%-ным уровнем деформации при 550 °С и флюенсе не меньше чем $1,95 \cdot 10^{16}$ $\text{H}^+/\text{см}^2$. Эта фаза присутствовала в хрупком изломе необлученных образцов. Повышение температуры при облучении приводит к увеличению обратной эмиссии водорода из образцов и частичному отжигу дефектов, вследствие чего исследованные механические характеристики становятся близкими к начальным значениям.

А. М. Панеш и А. Д. Лозовский (Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л. Я. Карпова, Москва) в работе "Обнаружение и удаление водорода из монокристаллов кремния ионными пучками" показали, что предварительное облучение при температуре 300 К монокристаллов кремния (100) и (111) ионами тяжелых инертных газов (аргона, криптона и ксенона) с флюенсами, превышающими пороговое значение, с последующим отжигом, позволяет не только надежно идентифицировать водород (0,1 ат. %), но и проводить очистку от водорода приповерхностной области монокристалла. Авторы впервые обнаружили явление одновременной десорбции молекул водорода и атомов инертного газа при температуре 100 К. Десорбция начинается при флюенсах, отвечающих порогу аморфизации кремния. Построена модель этого

явления, объясняющая наблюдаемые эффекты возникновением и миграцией в аморфизированном кремнии комплексов, состоящих из тяжелого инертного газа, вакансий и водорода. Факт появления десорбированных газов из облученного кремния свидетельствует об его аморфизации.

Г. Г. Бондаренко (МГИЭМ, Москва) в докладе "Самовосстанавливающиеся радиационно стойкие металлические сплавы" на примере уменьшения коэффициента ионного распыления ионами гелия с энергией 1—5 кэВ "потеющего" сплава алюминий — (1—3) % лития по сравнению с чистым алюминием показал возможность повышения радиационной стойкости материалов, используемых в электронике, вакуумной металлургии, термоядерных установках. Рассмотрено поведение перспективных сплавов: алюминий—литий, алюминий—литий—магний, алюминий—литий—бериллий при облучении ионами водорода, гелия, аргона, кислорода.

В. М. Анищик и В. В. Понарядов (Белорусский государственный университет, Республика Беларусь) в работе "Акустическая микроскопия сталей, имплантированных ионами бора" использовали методы линзовой акустической микроскопии с возможностью послойного контроля по глубине с шагом 0,1 мкм и фотографической регистрацией акустического изображения, а также рентгеноструктурный анализ в кобальтовом и медном излучении для изучения структурно-фазовых изменений на глубинах, распространяющихся далеко за пределами зоны торможения имплантированных ионов. Эксперименты выполнялись на образцах сталей P18, X12M, 9XC и 60C2A, имплантированных ионами бора с энергией 100 кэВ в интервале до 10^{15} — 10^{17} ион/см². Напряженно-деформированные (темные области) участки начинают обнаруживаться при дозах, превышающих 10^{16} см⁻². Наиболее значительный эффект практически для всех исследованных сталей соответствует дозе 10^{17} см⁻² и наблюдался на глубинах порядка 25 мкм, что существенно превышает проецированный пробег ионов в мишенях.

В. А. Шулов (МАИ, Москва), А. Н. Диденко (РАН, Отдел физических и технических проблем энергетики), Г. Е. Ремнев (ИЯФ, Томск), Н. А. Ночовная (Всероссийский институт авиационных материалов) в работе "Обработка титановых сплавов ионными пучками большой мощности" на примерах сплавов BT18Y, BT8M и BT25Y показали возможность повышения следующих свойств: напряжения усталости (на 20—180 %), сопротивления против тепловой газовой коррозии (в 1,5—2 раза), сопротивления тепловой соляной коррозии (в 6—8 раз) при воздействии пучков высокой мощности. Пучки состоят на 70 % из C⁺ и протонов с энергией 100—600 кэВ, плотность тока в импульсе 40—200 А/см², длительность импульса 50—100 нс, плотность потока энергии 0,01—10 Дж/см², поперечное сечение пучка 60—200 см². Эти пучки вызывают процессы испарения, сублимации и образования плазмы на глубине поверхностного слоя 1—2 мкм, плавление (2—5 мкм), образование дефектов при распространении ударных волн (100 мкм), рекристаллизацию с обезвоживанием зерен с оптимальными размерами (1х40 мкм), идеализированные структуры и кристаллические решетки. В результате твердость поверхностного слоя с экстремально небольшой шероховатостью ($R_a \sim 0,06$ мкм) можно получить. Этот слой состоит из тонких конгломератов карбидов или оксикарбидов (0,2—0,5 мкм). Он не имеет ни микротрещин, ни царапин. Эти мощные пучки можно использовать для восстановления и удаления отработавших защитных покрытий на поверхности лопаток компрессоров авиационных турбин. В настоящее время эта технология детально и интенсивно разрабатывается в России.

Н. А. Амирханова, Р. Х. Нуриева, О. А. Дмитриева (ОИЯФ) в работе "Влияние ионной имплантации на коррозионное поведение жаропрочных сплавов" показали, что при оптимальных условиях обработки многокомпонентных никель-

хромовых сплавов ионными пучками: доза ионов азота $2 \cdot 10^{17}$ ион/см², энергия ионов 30—40 кэВ, их коррозионная стойкость в условиях интенсивного развития коррозии в момент эксплуатации газотурбинных установок повышается в 100 раз. Исследовались сплавы ЖСЗУ, ЖС6К, ЖС32, которые являются твердыми, коррозионно-стойкими и обладают высокой усталостной прочностью в различных агрессивных средах. Исследование закономерностей и механизма газовой коррозии проведено в смеси агрессивных солей: $MgCO_3$, Na_2SO_3 , $NaCl$, а также в синтетической золе газотурбинного топлива. Установлено, что процесс коррозии протекает по электрохимическому механизму.

А. Н. Пучкарева, О. Б. Ладыженский, Г. П. Ерохин (Институт физики прочности и материаловедения, Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск) в работе "Многоэлементная ионная имплантация с использованием композиционных катодов на основе боридов, карбидов и силицидов титана" утверждают, что, используя композиционные катоды в вакуумно-дуговых ионных источниках, можно получать многоэлементные ионные пучки практически любого состава, изменяя величину порогового тока.

А. Н. Пучкарева, Н. В. Гирсова, Ю. П. Шаркеев (Институту физики прочности и материаловедения СО РАН) в работе "Исследование взаимодействия газов с материалом мишени в процессе импульсной ионной имплантации" установили, что повышение частоты следования импульсов до 40—50 Гц приводит к повышению температуры мишени и уменьшению толщины адсорбированного слоя, при этом поток десорбированных атомов и молекул превышает встречный адсорбционный поток. При высококонцентрированном легировании стали Р6М5, α -железа и молибдена в режиме имплантации и осаждения, когда в каждом цикле толщина осажденного слоя меньше, чем проективный пробег иона, элементный состав слабо зависит от толщины осажденного слоя и дозы облучения в каждом цикле, а определяется в основном интегральной дозой облучения. Установлено, что в диапазоне температур мишеней 50—400 °С состав поверхностных слоев не изменяется, за исключением кислорода, содержание которого снижается на 20—25 % при температуре выше 250 °С. Рассмотрено влияние материала мишени на характер концентрационных профилей углерода при ионной имплантации в одноэлементном (ионы титана) и многоэлементном (ионы титана, углерода и кремния) режимах и образование полимерных углеродных пленок.

М. С. Опекунов, Г. Е. Ремнев, А. Г. Пузыревич (ИЯФ ТПИ) и Ю. Ф. Иванов (Томская Гражданская инженерная академия) в работе "Исследование влияния ионных пучков большой мощности в режиме коротких импульсов имплантации на изменение структуры сталей" показали, что уровень дефектов при импульсной обработке значительно выше, чем при непрерывной имплантации. При большом числе импульсов, когда общая доза ионов углерода достигала $2 \cdot 10^{16}$ ионов/см², авторы наблюдали практически полный возврат к первоначальной дислокационной структуре поверхностного слоя. Исследовались стали с содержанием углерода 4 %. Для облучения использовались пучки ионов с энергией 120 кэВ, плотностью тока 2,5—5 А/см², длительностью импульса 100 нс и частотой повторения 1 Гц. Для сравнения с непрерывным режимом применялся пучок ионов азота с энергией 300 кэВ с той же дозой облучения.

О. М. Бакунин, Н. В. Гаврилов, С. М. Задворкин, В. Н. Мизгулин, Ф. Г. Нешов, И. Ш. Трахтенберг (Институт электрофизики, РАН, г. Екатеринбург) в докладе "Влияние способов ионной имплантации на физические и механические свойства металлов и сплавов" исследовали механизмы модификации указанных свойств, особенно прочность, твердость, сопротивление истиранию. Ионы аргона, азота, кислорода и ионизованные радикалы C_nH_m имплантировались в титан, ванадий, хром, марганец, железо, кобальт, никель, медь, цирконий, гафний, сталь 45,

12X18H10T, P6M5, 5XB2C и другие материалы. Плотность тока в импульсе изменялась в пределах 1—15 мА/см², длительность импульса была 1 мс, частота следования импульсов 3—50 Гц, энергия ионов 30 кэВ, дозы облучения 10¹⁶—10¹⁹ ионов/см². Зависимость вышеназванных свойств изучалась для параметров облучения: доза, температура образца, тип ионов, средняя плотность тока ионов. Изучались глубинные профили внедренных ионов. Рентгеновские измерения показали, что улучшение свойств объясняется влиянием различных механизмов повышения твердости, кроме того, степень влияния зависит от условий ионной имплантации. Авторы предложили технические приемы для выбора оптимальных условий облучения, основанные на регистрации характеристик материала во время имплантации.

А. П. Комиссаров (Институт металлургии им. А. А. Байкова, РАН) в работе "Низкоэнергетичные ионные пучки в технологии функциональных поверхностных слоев и покрытий" рассмотрел следующие вопросы: прямая имплантация низкоэнергетических ионов химически активных элементов в металлические мишени вызывает образование тонких преципитатов химических соединений вторичной фазы, а также управляемую модификацию рельефа поверхности. Представлены примеры повышения твердости и пассивации поверхности, сглаживания рельефа прецизионных деталей из титана, нержавеющей стали и других сплавов и комплексной обработки миниатюрных режущих инструментов; нанесение равновесных и метастабильных фаз тонкопленочных покрытий, включая химические сложные покрытия при их одновременной ионной бомбардировке (так называемое динамическое перемешивание атомами отдачи). Используя этот метод, были получены пленки, содержащие оксиды некоторых металлов, нитриды различных композиций и металлические пленки с высокой адгезией на различных подложках при ионно-пучковой модификации поверхности раздела; прямое ионно-пучковое нанесение твердых водородоуглеродных пленок на различные подложки. Рассмотрены температура образования алмазоподобных покрытий, их структура, прочность адгезии, эффект упрочнения поверхности и другие свойства.

С. А. Коренев и В. В. Сиколенко (ОИЯИ, Дубна) в работе "Ионно-пучковое перемешивание металлических материалов" разработали программу получения нерастворимых компаундов: титан/алюминий, алюминий/бериллий, углерод/алюминий/бериллий. Параметры ионного диода: энергия ионов 150—300 кэВ, длительность импульса 300 нс, плотность тока ионов: титана — 5—10 А/см², алюминия — 8—10 А/см², углерода — 30—120 А/см². Ионное перемешивание позволило увеличить допустимый нагрев бериллиевой фольги, служащей для пропускания сильноточного электронного пучка из вакуума в атмосферу и повысить в несколько раз ее срок службы.

А. Д. Погребняк (Сумской институт модификации поверхности) в работе "Ионное перемешивание с использованием импульсных и непрерывных ионных пучков" дал краткий обзор последних опубликованных экспериментальных результатов. Автор рассмотрел общие закономерности процесса перемешивания, возникающего при квазинепрерывных условиях обработки пучками с большой плотностью тока (единицы — два десятка мА/см²) в многослойных системах. Представлен общий спектр металлических систем, которые растворимы при равновесных условиях (создают твердые растворы), частично растворимых и нерастворимых. Проведено сравнение эффективности перемешивания в результате обработки непрерывными (квазинепрерывными) ионными пучками и микро- и наносекундной длительности ионными пучками большой мощности. Представлены системы металлов, которые будут использованы для ионного перемешивания непрерывными и импульсными пучками.

А. Д. Погребняк и О. Н. Николаев (Отдел ионно-плазменного нанесения Сумского института модификации поверхности) в сообщении "Модификация шерсти ионно-плазменными пучками в промышленности" показали, что, используя ионно-плазменный поток, можно изменить физические, химические и механические свойства шерсти; способность ее к окрашиванию, смачиваемости и повышению фактора резины. Это ведет к дальнейшему уменьшению длительности обработки шерсти, ее мойки до 100 раз, экономии электроэнергии и улучшению экологии, так как нет необходимости в дополнительной обработке химическими реагентами. Этот краткий анализ является бизнес-планом для последующего промышленного применения нового метода.

А. Д. Погребняк и А. Г. Гелимсон (Сумской институт по модификации поверхности) в докладе "Основные принципы общей теории ионной имплантации" предложили новые концепции теории. Авторы используют следующие понятия. Локальная внутренняя поверхностная плотность $E_{\Pi}(M) = dE/dS$ энергии E ионной имплантации в регулярной точке M на поверхности S . Локальная объемная плотность $E_o(M, h) = dE/dV$ энергии E имплантации на глубине h под регулярной точкой M на поверхности S . Локальная внутренняя поверхностная плотность $E_{\Pi}(M, h) = \int_{+\infty}^{+\infty} E_o(M, \eta) d\eta$. Локальная относительная плотность $e(M, h) = E_o(M, h)/E_{\Pi}(M) = dE/dV/dE/dS$ энергии E имплантации. Усредненная локальная

объемная плотность энергии $E_{oH}(M, h) = \frac{1}{H} \int_{h-H/2}^{h+H/2} E_o(M, \eta) d\eta$ энергии им-

плантации. Локальное объемное сопротивление вещества. Локальное объемное разрушение вещества. Предложенная теория позволяет рассчитать следующие основные эмпирические закономерности ионной имплантации. Эффект дальнего действия отсутствует, так как усредненная локальная объемная плотность имплантационной энергии уменьшается квазиэкспоненциально с глубиной, имеется положительная критическая энергия постоянного смещения иона в кристаллической решетке, предельная глубина эффекта может быть рассчитана для фронтального соударения имплантируемого иона вдоль регулярного ряда ионов в кристаллической решетке, и невозможно, что бесконечно малый эффект может дать существенный макрорезультат. Имеющиеся несколько фокальных максимумов распределения плотности имплантированных ионов в облучаемом веществе и различные формы этих максимумов вызывают суперпозицию индивидуальных максимумов для ионов, имеющих различные атомные номера (массы), заряды и начальные энергии, также как удаление уже имплантированных ионов новыми ионами. Количественное различие этих фиксированных максимумов ограничено недостаточной чувствительностью используемой измерительной аппаратуры. Возможность появления постоянных напряжений растяжения или сжатия на поверхности облучаемого вещества и смещение первого максимума на определенной глубине вызывают значительное уменьшение сопротивления поверхности по сравнению с этой субстанцией, если имплантированная энергия больше определенной критической величины.

Общая теория ионной имплантации позволила открыть следующие фундаментальные явления: существование критической величины локальной внешней поверхностной плотности имплантационной энергии, которая превышает неравновесное сопротивление поверхностного слоя вещества; резкое уменьшение удельного сопротивления поверхностного слоя глубиной 40—100 нм, когда имплантационная энергия больше ее критического значения; существование размытой узкой границы между поверхностным разрушенным слоем и нижележащим напряженным слоем достаточно облученного вещества; отсутствие дисперсии или совпадения и равное смещение первого (основного) максимума плот-

ности распределения по глубине поверхностного слоя вещества для ионов, имеющих различные атомные номера и массы, заряды и начальную энергию.

Однако в ответ на утверждение авторов новой теории имплантации, что так называемый эффект дальнодействия не может быть больше нескольких пробегов ионов, а не тысячи пробегов, следует заметить, во-первых, что этот эффект наблюдался многими авторами экспериментально в различных его проявлениях, во-вторых, разработано несколько теорий и механизмов, объясняющих эффект дальнодействия:

М. И. Гусева (1962 г.) установила, что толщина модифицированного слоя некоторых сталей при облучении различными ионами с энергией 30—40 кэВ составляет 10—100 мкм;

Е. Е. Гарднер, Г. Н. Швуттке, Г. М. Де Ангелис (1967 г.) наблюдали сильные радиационные повреждения в виде аморфного слоя в монокристалле кремния на глубине до 80 мкм при пробеге и разбросе пробегов ионов бора и азота соответственно $1,77 + 0,142$ и $1,61 + 0,164$ мкм;

Г. И. Успенская, Н. Н. Абрамова, Д. И. Тетельбаум, П. В. Павлов (1971 г.) установили, что глубина поврежденного ионами аргона с энергией 50 кэВ кремния составляет 50—70 мкм;

А. Н. Диденко, А. Е. Лигачев, Э. В. Козлов, Ю. П. Шаркеев и др. (1987 г.) исследовали развитые дислокационные структуры в отожженной меди и α -железе при облучении их ионами азота, углерода, железа и вольфрама с энергией от 40 до 1200 кэВ при плотности тока ионов $0,005$ — 15 мА/см² в диапазоне доз $1 \cdot 10^{17}$ — $1 \cdot 10^{18}$ ионов/см². При облучении ионами азота с энергией 40 кэВ меди на глубине 20 мкм от поверхности плотность дислокаций была $(5-6) \cdot 10^9$ см⁻², а на 20 мкм она приближалась к исходной. Средний проективный пробег ионов в этом случае равен 0,0365 мкм. При энергии ионов азота 1,2 МэВ глубина продиффундированного слоя азота превышала 50 мкм. В железе развитые дислокационные структуры наблюдались на глубине более 100 мкм при проецированном пробеге ионов не более 100 нм;

Н. В. Плешивцев, Г. М. Волков, В. М. Зуев и др. (1988 г.) наблюдали повышение микротвердости на 21 % стали ШХ15 на глубине до 50 мкм с выходом на уровень необлученной на глубине до 120 мкм при облучении импульсными (20-мс) пучками ионов азота с энергией 15 кэВ. При облучении смешанным пучком, состоящим из ионов азота и водорода, повышенная микротвердость регистрировалась на глубине до 100 мкм. Подобные результаты получены на сталях Х12М и У8, а также для смешанного пучка ионов азота и гелия;

С. Н. Бородин, Ю. Е. Крейндель и В. В. Овчинников (1988 г.) при облучении ионами азота с энергией 16 кэВ, плотностью тока 50 мкА/см², дозой $5 \cdot 10^{17}$ см⁻² железоалюминиевого сплава обнаружили биметаллический слой из алюминия и железа толщиной по 100 мкм. При этом происходил фазовый переход из пара в ферромагнитное состояние.

Для объяснения эффекта дальнодействия: повышенной глубины проникновения ионов, превышающей 6—9 глубин проникновения при обычной диффузии; образования дислокационных структур и фазовых переходов на глубинах, в тысячи раз превышающих пробег ионов, предложено несколько механизмов и теорий.

В. П. Жуков и А. А. Болдин (1986 г.) объясняют эффект генерацией упругих волн при эволюции пиков смещения. Ю. В. Мартыненко и П. Г. Московкин (1991 г.) получили формулы, описывающие названные выше эффекты дальнодействия интенсивных пучков ионов.

А. Л. Суворов (ГУЦ РФ ИТЭФ, Москва) в докладе "Автоэмиссионная микроскопия и микрозондовые анализы радиационных эффектов в кристаллических твердых телах" перечислили основные методические достижения группы автоэмиссионной микроскопии и масспектроскопии Лаборатории нейтронной физики.

Приведены данные, касающиеся изучения: образования и поведения единичных точечных дефектов при облучении металлов и сплавов нейтронами и ионами и в процессе послерадиационного отжига; взаимодействия точечных дефектов с примесями и с другими несовершенствами кристаллической структуры материалов; развития каскадов атомных смещений и эволюции образующихся дефектных областей; распространения цепочек фокусированных замещающих атомных столкновений; распыления поверхностных атомов; радиационно-стимулированных структурно-фазовых превращений; радиационного бескаскадного перемешивания в системах тонкая пленка—массивная подложка; устойчивости и деградации тонких пленок на поверхности металлов при низкоэнергетическом ионном облучении. Намечены и обсуждены наиболее перспективные направления применения рассмотренных методик в радиационной физике твердого тела, реакторном материаловедении и радиационных технологиях.

И. Н. Беляев, А. П. Кастченко, В. Н. Лазарев, А. В. Рубцов, Г. С. Строковски (Центр прикладной физики и технологии), И. Н. Мешков (ОИЯИ) в докладе "Исследование влияния на свойства конструкционных материалов обработки плазмой и пучком" показали, что адгезия между покрытием и подложкой может значительно возрасти после высокоэнергетической ионной обработки нанесенного покрытия. В экспериментах использовался ионный имплантер с широким (до 10 см диаметром) импульсным пучком (ускоряющее напряжение 50 кВ, ток пучка в импульсе 2 А) и устройство для плазменного суперпозиционного покрытия магнетронным распылением (ток источника 5 А). Исследованы зависимость микротвердости от дозы и температуры после одного импульса, а также длительности обработки. Спроектирован и сконструирован прибор для исследования сопротивления истирания во время ионной обработки образцов.

С. И. Жукова и В. М. Анищек (Белгосуниверситет, г. Минск) в докладе "Влияние ионной имплантации на механические свойства стареющих сплавов" установили, что в определенных условиях облучения ионная обработка разрушает результаты предшествующей термической обработки. Исследовано изменение микротвердости сплавов Д16, АК4 и АМг при имплантации ионов бора с энергией 30 кэВ и сурьмы с энергией 100 кэВ с плотностью тока ионов не выше 4 мкА/см² в диапазоне доз 10¹⁶—10¹⁷ ион/см². Снижение микротвердости составляет 50—80 %. В сплавах АМц облучение приводит к возрастанию микротвердости, причем с увеличением дозы имплантации эффект возрастает. При имплантации ионов бора микротвердость возрастает до 20 %, а для ионов сурьмы — до 40 %. Сплав АМц относится к неупрочняемым термообработкой (т. е. содержащим вторые фазы, но в количествах, не вызывающих сильного эффекта старения), видимо с этим связано различие во влиянии ионной обработки на механические свойства. Авторы показали, что имплантация приводит к разрушению в приповерхностных слоях S- и Q-фаз. Методом резерфордского обратного рассеяния ионов гелия изучен элементный состав и распределение сурьмы в этих образцах. Оказалось, что основная и легирующая примесь меди диффундирует в глубь образца. Содержание сурьмы в максимуме распределения достаточно для образования преципитатов AlSb, способствующих упрочнению сплава.

А. Д. Погребняк, В. В. Стайко, В. И. Лаврентьев, А. Д. Михалев (Сумской Институт модификации поверхности), С. М. Дуванов (ОИЯИ, Дубна), В. П. Ротштейн (Институт сильноточной электроники, РАН, г. Томск), Р. Оечснер (R. Oechsner, AIS, Fraunhofer-Institute für Integrierte Schaltungen, Berech Baulementetechnologie, Erlangen, Germany) в докладе "Высокодозная имплантация в монокристаллы меди и импульсный отжиг с использованием импульсного пучка электронов" исследовали различными методами профили имплантированных ионов после имплантации и последующего импульсного отжига. Рассчитана

диффузия титана в медь в результате перемешивания жидкой фазы в имплантированных слоях. Выполнен фазовый анализ по всей глубине медного модифицированного слоя, а также проведены механические испытания. Использовались монокристаллы меди с плоскостями среза (100) и (111), которые облучались в имплантере типа "Радуга" ионами с энергией 40 кэВ дозами от $5 \cdot 10^{16}$ до $8 \cdot 10^{17}$ см⁻². Часть образцов, имплантированных дозой 10^{17} см⁻², после этого облучалась пучком низкоэнергетичных электронов с энергией 10—20 кэВ, при длительности импульса 800 нс в режимах с оплавлением поверхности и без оплавления.

ИОННО-ПУЧКОВАЯ ОБРАБОТКА ДИЭЛЕКТРИКОВ

А. В. Кабышев (НИИ высоких напряжений Томского политехнического университета) представил доклад "Физико-химическое состояние, свойства и электроперенос неорганических диэлектриков после ионно-пучковой обработки". Цель работы состояла в выборе оптимального режима модификации, обеспечивающего максимальное увеличение электропроводности термостойких диэлектриков, выяснение причин трансформации свойств и исследование механизма электропереноса поверхности после ионно-пучковой и термической обработки. Основные направления исследований: осаждение ионов из низкоэнергетического ($E \leq 1$ кэВ) потока; разовое воздействие на мишень мощных импульсных пучков с энергетическим порядком 1 Дж/см² за время до 1 мкс; получение в мишенях на глубине пробега иона дозы 10^{16} — 10^{17} см⁻² при энергии ионов 10—1000 кэВ; динамическое перемешивание имплантируемого элемента с атомами матрицы. Каждый из режимов позволяет снизить поверхностное сопротивление на 2—10 порядков. Оптимальные параметры модификации: имплантация ионов легких элементов (лития, углерода, бора) с энергией 50—150 кэВ при плотности тока 1—10 мА/см² флюенсом 10^{15} — 10^{17} см⁻². Температура после имплантационного отжига 1000—1500 К. С целью значительного изменения химического и фазового состава матрицы указанный режим дополняется разовой или периодической конденсацией модифицирующих элементов. Обработка диэлектриков в таком режиме позволяет сформировать на поверхности покрытие, сопротивлением которого можно управлять в пределах 10^9 — 10^{16} Ом при температурном коэффициенте 10^{-3} — 10^{-4} град⁻¹ до 1300 К. Электроперенос носителей заряда осуществляется прыжковым и активационным транспортом. Результаты работы использованы для разработки технологии создания резисторов с помощью ионно-термической модификации керамической матрицы.

О. А. Плаксин, В. А. Степанов, Г. А. Корсанов, В. М. Чернов (ФЭИ, г. Обнинск) в тезисах доклада "Электрическая проводимость диэлектрических материалов под действием облучения протонами" изложили результаты исследования механизма радиационно-индуцированной проводимости и понижение электрических свойств диэлектриков на примере изучения проводимости монокристаллов Al_2O_3 под действием пучков протонов с энергией 7—9 МэВ с дозами до $5 \cdot 10^3$ Гн/с. Начальная проводимость 10^{-14} Ом⁻¹·см⁻¹ возрастала, не превышая 10^{-12} Ом⁻¹·см⁻¹. Исследовались также изменения проводимости (процесс релаксации, деградация свойств) полимерного композиционного материала, состоящего из алюминиевой пудры, с начальной проводимостью 10^{-11} Ом⁻¹·см⁻¹. После достижения пороговых значений флюенса протонов 10^{13} — 10^{14} см⁻² в электрическом поле до 10^2 В/м, приложенном поперек направления пучка, наблюдался резкий рост проводимости на два-три порядка величины. Обсуждаются возможные механизмы наблюдаемых эффектов.

С. А. Корсанов, В. А. Романов, И. О. Константинов, Е. А. Ершов (ФЭИ, г. Обнинск) в работе "Улучшение механических характеристик отверждением

эпоксидных смол пучковой технологией” показали возможность повышения напряжения растяжения на 4—6 % и напряжения сжатия на 40—60 % этих смол. Химическое отверждение при высоких температурах не позволяет получить полную полимеризацию свободных эпоксидных групп, поэтому не получают материалы с наибольшей долговечностью и эластичностью. Авторы показали, что дополнительное облучение отверждаемых смол пучками протонов с энергией 9 МэВ или электронов с энергией 6 МэВ повышает долговечность и упругость эпоксидного материала в широком диапазоне поглощенных доз (0,05—1) Мрад. Вблизи максимума дозовой зависимости (0,1—0,2) Мрад названные параметры в зависимости от начального состояния смолы могут быть повышены на несколько десятков процентов.

Ю. М. Анненков, Н. Н. Апаров, Т. С. Франгулиан, В. Ф. Пичугин (Томский политехнический университет) в работе “Пучковые технологии в производстве керамики” показали: температура шлакообразования $Al_2O_3-ZrO_2$ -керамики можно понизить до примерно (250—300) °С; керамика содержит около 70 % тетрагональной фазы ZrO_2 с размерами зерен 0,3 мкм; ионно-пучковая обработка образцов приводит к увеличению прочности на разрыв и напряжения на изгиб на примерно 25 %; разработанная технологическая схема позволяет получить керамику соответственно со значениями названных параметров, равными 15 МПа·м^{1/2} и 1,1 ГПа. Для этого необходимо использовать ультрадисперсные порошки; ультразвуковое уплотнение во время прессования; радиационное шлакование и модификацию керамики при помощи нагрева мощным электронным пучком; поверхностную модификацию керамики ионно-пучковой бомбардировкой.

А. В. Кабышев, Ф. В. Конусов, В. В. Лопатин, А. Н. Шиян (НИИ высоких напряжений Томского ПУ) в работе “Локализованные состояния дефектов и оптические свойства поверхности керамических материалов после ионно-термической модификации” показали возможность модификации керамических диэлектриков при флюенсах ионов 10^{15} — 10^{17} см⁻² с формированием проводящего слоя с регулируемым в пределах 10^9 — 10^{15} Ом·м удельным поверхностным сопротивлением. Переход керамики из диэлектрического состояния в полупроводящее обусловлен образованием новых, в том числе проводящих фаз, трансформацией структуры и структурной иерархии в результате радиационных повреждений; радиационным дефектообразованием и изменением механизма электропереноса. Авторы исследовали локализованные в запрещенной зоне нитрида бора состояния, создаваемые радиационными дефектами, и влияние электронных переходов с их участием на изменение диэлектрических и оптических свойств модифицированной поверхности. При флюенсе меньше 10^{15} см⁻² плотность локализованных состояний экспоненциально увеличивается с глубиной, а ширина запрещенной зоны уменьшается. С повышением флюенса накопление локализованных состояний и изменение в их структуре максимально в области 1,5—2,5 эВ, а после термообработки они объединяются в подзону донорного типа, состояния которой определяют оптические и диэлектрические свойства. Транспорт носителей заряда осуществляется по прыжковому механизму с переменной длиной прыжка в пределах подзоны или по локализованным вблизи уровня Ферми состояниям.

В. Ф. Пичугин, Т. С. Франгулиан, В. А. Тишкина, Ю. Ю. Крычков, А. И. Рябчиков (Политехнический университет, Томск) в работе “Образование проводящих слоев в изолирующих веществах ионной бомбардировкой” получили следующие результаты. Установлен эффект перехода изолятор — проводник поверхностных слоев монокристаллов MgO , SiO_2 , нескольких оксидных керамики после облучения их ионами газов (аргона, азота, кислорода), ионами металлов (алюминия, железа, свинца) и ионов неметаллов (кремния, углерода). Поверх-

ностная проводимость всех исследованных материалов увеличивается после облучения и достигает значений (10^{-2} — 10^{-5}) $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$. Определено влияние атомной массы имплантированного элемента на электрическую проводимость. Образование проводящего состояния в исследованных материалах имеет фундаментальный характер, так как не зависит от природы имплантированных ионов и вызывается изменением стехиометрического состава ионным облучением поверхности. Оно имеет место при образовании локализованных состояний системы и переходе диэлектрик — металл Андерсоновского типа. Нарушение стехиометрического состава происходит при мощном возбуждении электронной системы кристалла.

В отличие от вышеприведенных результатов, ионно-пучковая модификация поверхностной проводимости боросиликатных стекол определяется в большей степени эффектом внедрения, нежели деградацией вследствие радиационных повреждений. Заметный рост проводимости стекол имеет место только после имплантации ионов определенного сорта.

Авторы установили, что ионное облучение MgO приводит к значительному увеличению плотности дислокаций, микротвердости и сопротивления к образованию трещин. Глубина модифицированных слоев значительно больше, чем проективный пробег имплантированных в кристалл ионов.

С. М. Дуванов (Франкóвская лаборатория нейтронной физики, ОИЯИ; Институт прикладной физики Украинской АН, г. Сумы), А. В. Кабышев (Институт высоких напряжений, г. Томск), А. П. Кобзев (Франкóвская ЛНФ, ОИЯИ, Дубна) представили доклад “Эволюция глубинных профилей элементов в поликристаллических керамиках VN и Al_2O_3 , модифицированных пучками ионов углерода и титана”. Профили распределения исследовались комбинацией нескольких методов: Резерфордского обратного рассеяния ионов $^4\text{He}^+$, резонансного упругого обратного рассеяния $^4\text{He}^+$ и $^1\text{H}^+$ и ЭРД ионов $^1\text{H}^+$.

Имплантация ионов углерода и титана значительно изменяла структуру и свойства поверхности. Например, имплантация углерода (параметры пучка: 100 кэВ, импульсная плотность тока ионов 1—50 $\text{мА}/\text{см}^2$, длительность импульса 250 мкс, частота следования 5—50 Гц, $\text{C}^+ = 35\%$, C^{++} , $\text{C}^{+++} = 65\%$) вызывает уменьшение поверхностного сопротивления от 10^{16} до 10^{17} Ом на 2—10 порядков величины в зависимости от изменения дозы от 10^{13} до 10^{18} см^{-2} . Наибольшее изменение поверхностного сопротивления происходит при дозе 10^{17} см^{-2} , при дальнейшем увеличении дозы эффект уменьшается. Термическая обработка имплантированной поверхности способствует дальнейшему уменьшению поверхностного сопротивления и его температурной стабильности. Авторы обсуждают особенности использованных методов для измерения элементов распределения по глубине и его эволюции в зависимости от изменения дозы имплантации и после последующей термической обработки.

А. В. Рогачев, В. А. Струк, Е. В. Овчинников (г. Гродно) представили работу “Применение облученных полимеров в узлах трения. Экспериментальные и теоретические аспекты”. Цель работы — теоретическое и экспериментальное исследование процесса трения пары: металл — предварительно облученный полимер ПЭВД (10204-003), контртело — сталь 45. Модифицирование полимеров проводили рентгеновским излучением. Время облучения 0—5 ч. Структурные исследования полимерных образцов показали, что происходит увеличение координационного числа с продолжительностью облучения. Наблюдается изменение оптической плотности полосы поглощения 1304 см^{-1} . Полученное экспериментально уравнение для определения интенсивности изнашивания облученного полиэтилена удовлетворительно совпадает с выражением, полученным исходя из релаксационно-диффузионной теории трения. Получено выражение для зависимости силы трения от дозы облучения. Экспериментальные исследования подтверждают его справедливость, однако для пары трения: медь — полиэтилен наблюдается

увеличение силы трения. Этот результат авторы объясняют контактным окислением полимера и увеличением адгезионного взаимодействия. Получена формула для расчёта силы трения для этой комбинации пары трения.

ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ (10—335 МэВ) ИОННАЯ МОДИФИКАЦИЯ

А. Ю. Дидык (ОИЯИ, ФЛНИ, Дубна) "Фундаментальные исследования конденсированного вещества быстрыми тяжелыми ионами". При высоких удельных ионизационных потерях энергии, превышающих 10 МэВ/а.е.м., они могут дать определяющий вклад в образование дефектов и изменение процесса аккумуляции радиационных дефектов. Поэтому определение роли неупругих потерь энергии тяжелых ионов является важной и актуальной научной проблемой. Для ее решения уже выполнено большое число работ. В данной работе исследовалось влияние облучения ионами ксенона на эволюцию поверхности нержавеющей стали Cr18Ni10Ti в интервале температур 400—650 °С. Флюенс изменялся в пределах $1 \cdot 10^{15}$ — $2 \cdot 10^{16}$ ион/см². Обнаружен новый эффект образования игольчатой структуры одинаковой формы. Высота этих игл увеличивается с ростом флюенса ионов. Элементный состав игольчатых структур сильно отличается от начального состава нержавеющей стали. Обсуждается феноменологическая модель этого явления. Автор ввел энергетический критерий возникновения этого эффекта. Цель данной работы — изучение структурных изменений пиролитического графита, меди, никеля, железа и нержавеющей стали, а также полупроводниковых и диэлектрических монокристаллических поверхностей с различной теплопроводностью под воздействием тяжелых ионов. Альтернативные процессы трансформации поверхности под действием ионов небольших энергий и процесса распыления материала описан в работах других авторов (и в ряде монографий и обзоров).

А. Ю. Дидык (ОИЯИ, ФЛНИ, Дубна) "Прикладные применения тяжелых ионов, ускоренных циклотронами, для исследования радиационных дефектов и модификации свойств конструкционных материалов". Современные исследования радиационных повреждений в твердых телах ориентированы на формулирование общих правил и сценариев ответа среды на пертурбацию, введенную частицами. Радиационные повреждения в полупроводниках (Si, GaAs, Ge, SiC), монокристаллах диэлектриков (алмаз, NB, Al₂O₃, ZnO), металлах и сплавах, бомбардируемых ионами высоких энергий, являются результатом упругих и неупругих столкновений падающих ионов с атомами мишени. Первый механизм взаимодействия приводит к образованию точечных дефектов, тогда как второй механизм, доминирующий при облучении высокоэнергетическими ионами, вызывает электронное возбуждение атомов облучаемого материала. Преобладающий механизм электронного торможения энергетичных ионов в полупроводниках и диэлектриках является физическим базисом высокоэнергетической ионной имплантации, влияющим наиболее существенно на самоотжиг радиационных повреждений, повышает эффект термической стабильности, миграцию примесей вдоль треков ионов, образование локальных областей повышенного давления, а также создание особых квазиодномерной трековой структуры. Цель сообщения — представить отдельные направления исследований в радиационной физике конденсированного вещества и полученные в Флёрвской лаборатории ядерных исследований результаты: новый метод поперечного сечения для исследований радиационных эффектов, создаваемых тяжелыми ионами; радиационно-отожженные упрочненные ванадий и сплавы на основе ванадия; мессбауэровские исследования стали, облученной быстрыми тяжелыми ионами; радиационные эффекты в монокристаллах полупроводников и диэлектриков; радиационная стабильность полупроводниковых приборов; облучение полимерных материалов в ускорителях тяжелых ионов; получение мембран с ядерными треками из поливинилиденфторида

с использованием ионов легче аргона; влияние низкотемпературного облучения на параметры травления полимерных материалов, облученных легкими ионами; влияние облучения высокоэнергетичными тяжелыми ионами на пьезоэлектрические, упругие и диэлектрические свойства монокристаллов ZnO.

В. Ф. Реутов, В. К. Семина (ОИЯИ, ФЛЯИ, Дубна), Л. Г. Турубарова (ФТИ АН Республики Казахстан, г. Алма-Ата). "Влияние гелия на фазово-структурные изменения в углеродистой стали при послеоблучательной фазе рекристаллизации". Демонстрируется новый радиационный эффект, связанный с термически необратимым структурным изменением в течение послеоблучательной фазы преобразования, в облученной α -частицами при области образца стали У7 (0,7 % углерода). Образцы отжигались в вакууме при 850 °С в течение 2 ч, чтобы образовать ферритно-перлитную структуру с ферритными сетками на перлитных границах зерен. Затем образцы облучались в циклотроне α -частицами с энергией от 29 до 50 МэВ дозой $1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и протонами с энергией 10 МэВ дозой до $2,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при температурах не выше 100 °С. Результаты металлографических и рентгеновских дифракционных исследований как облученных, отожженных и науглероженных после полного обезуглероживания образцов позволили установить два важных факта. Во-первых, в облученной высокоэнергетичными протонами и α -частицами стали У7 образуются радиационные дефекты и допинг с водородных уровней любые инвариантные структурные изменения в процессе послеоблучательного отжига в диапазоне 400—1100 °С. Во-вторых, вследствие послеоблучательного отжига выше температуры α -гамма фазового перехода в образцах стали У7 наблюдаются термически необратимые структурные изменения (возможны также фазовые изменения): образуется тонкозернистая ферритно-перлитная структура с существенно превосходящей долей ферритной фазы. Авторы предполагают, что главной причиной наблюдаемого эффекта являются скорее термически стабильные комплексы атомов гелия и вакансий в форме гелиевых пузырьков, чем радиационные дефекты.

В. С. Вариченко, В. А. Мартинович, А. Р. Филлип, А. М. Зайцев, В. Р. Фахрнер (Белорусский Госуниверситет, Минск; Хагенский университет, г. Хаген, Германия). "Модификация монокристаллов алмаза высокоэнергетичными ионами". Дефекты, производимые в алмазе под действием облучения ионами высоких энергий, исследовались методами электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и катодолюминесценции (КЛ). Исследовались образцы натуральных алмазов типа Ia и IIa, имплантированные ионами никеля с энергией 335 МэВ дозами $5 \cdot 10^{12}$ и $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Измерения разрешения по глубине выполнялись последовательным ионным распылением тонкого слоя облученной поверхности. Ионное облучение приводило к появлению на ЭПР спектре характерных синглетных линий g-величиной 2,0027 подобных тем, которые появляются после ионного облучения алмаза с энергией 1 МэВ/н и набора анизотропных линий, возникающих от точечных дефектов в решетке алмаза. Форма одиночных линий зависит от дозы облучения: при низких дозах — асимметричного Дисоновского типа, а при дозе $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ — становятся почти симметричными. Этот эффект объясняется образованием скрытых треков в течение ионного облучения и их разрушением, потому что они перекрываются при больших дозах. Средний диаметр никелевого трека оценивается равным 0,9 нм. Рассмотрены также процессы образования внутренних и азотных связанных КЛ центров в азотсодержащих алмазах. Обсуждается роль механизмов поглощения ионизационного дефекта в создании 638 нм КЛ центра в ионно-имплантированном алмазе.

Проективный пробег 335 МэВ ионов никеля в алмазе, измеренный экспериментально, равен 28 мкм (ТРИМ 90 симуляция дает значение 27,7 мкм).

Появление некоторых центров КЛ в значительных концентрациях далеко за глубиной проективного пробега, также как глубина распределения асимметрич-

ных параметрических центров обсуждаются в терминах образования треков иона, создаваемых высокоэнергетическими ионами, и каналирования части ионов через треки.

В. А. Скуратов, В. А. Алтынов, С. М. Абу Алазм (ФЛЯИ, ОИЯИ) "Люминесцентные исследования сапфира во время облучения тяжелыми ионами с энергией 1 МэВ/а.е.м". Высокоэнергетическая ионная имплантация является наиболее перспективным методом радиационно-стимулированной модификации материалов. Работающие технологические применения этого процесса тесно связаны с процессами образования радиационных повреждений в кристаллах, которые имеют важные практические применения. Одним из широко используемых методов изучения структуры твердых тел после облучения и различных стадий после облучательной обработки является люминесцентная спектроскопия. Люминесцентное возбуждение энергетическими тяжелыми частицами позволяет изучать структуру кристаллов точно во время образования и эволюции радиационных повреждений. В данном сообщении обсуждаются экспериментальные результаты исследования спектров распада сапфира в течение облучения ионами В (13,6 МэВ), Ne (26,7 МэВ), Ag (46,3 МэВ) и Кг (210 МэВ).

Эксперименты были выполнены при использовании ускорителей ИС-100 и У-400 ускорительного комплекса ФЛЯИ, ОИЯИ. Спектры исследованы в диапазоне длин волн 250—525 нм при 80—300 К в зависимости от флюенса ионов. Спектры сапфира во время облучения тяжелыми ионами состояли из двух широких полос из F-центров и имели ряд свойств, характерных также для низкоэнергетической ионной имплантации. В то же время дозовая зависимость интенсивности люминесценции очень отличается не только от случая возбуждения низкоэнергетическими ионами, но также для всех типов высокоэнергетических ионов и температур. Авторы показали, что дозовая зависимость интенсивности люминесценции имеет две стадии, которые могут быть связаны с периодами облучения до и после перекрытия треков. Интерпретация этих результатов, характеризующих особенности эволюции дефекта структуры во время облучения тяжелыми ионами, основана на учете высокого уровня возбуждения электрона, влияющего на процесс диффузии в пределах трека иона.

М. А. Адави (Ядерный Исследовательский центр, АЕА, Каир, Египет), А. Ю. Дидык. "Образование игольчатых структур на металлах под облучением быстрыми тяжелыми ионами при высоких температурах". Тяжелые ионы средних и промежуточных энергий широко используются в исследованиях радиационных эффектов в конструкционных материалах, которые будут применяться в новых перспективных ядерных и будущих термоядерных реакторах. Необходимо отметить, что при высоких удельных ионизационных потерях энергии, превышающих 10 МэВ/а.е.м., они будут давать определяющий вклад в образование дефектов и изменять процесс аккумуляции радиационных дефектов.

Образцы облучались ионами Хе (124 МэВ) при плотности флюенсов $(1,5-3) \cdot 10^{11}$ ион/см²/с при 400—650 °С с интервалом 50 °С. После облучения образцы сканировались на электронном микроскопе JSM-840 с рентгеновским устройством для микроэлементного анализа. Электронно-микроскопические исследования образцов стали Cr18Ni10Ti показали, что во всем исследованном интервале температур формирование микроострийных структур возникает от 400 до 650 °С. Элементы острийных структур сильно изменяются. Содержание железа увеличивается более чем на 10 %, концентрация хрома и никеля уменьшается примерно на 7 % для хрома и на 4 % — для никеля. Концентрация титана также уменьшается.

А. Ю. Дидык, В. А. Кузьмин (ОИЯИ, ФЛНИ, Дубна). "Влияние эволюции раковин на скоротечные точечные дефекты во время облучения тяжелыми ионами". В предыдущей работе по теории эволюции скорости образования раковин был

принят во внимание скоротечный точечный дефект, возникающий во время облучения тяжелыми ионами. Частные дифференциальные уравнения для вакансий и междоузлий и обычные дифференциальные уравнения как для вакансий, так и для междоузельных петель решены численно. Найдены значения параметров систем, при которых радиационные повреждения минимальны.

А. Ю. Дидык, В. А. Кузмин "Оценка уровней напряжений в вафле, возникающих при высокоэнергетичной имплантации тяжелыми ионами". Внутренние напряжения, возникающие при ионной имплантации, приводят к нарушению состояния решетки, которое изменяет энергию миграции точечных дефектов, и в конечном счете существенно изменяет диффузию точечных дефектов. Одной из причин возникновения внутренних напряжений является неоднородность восхождения острых дислокаций в потоке точечных дефектов. Скорость восхождения дислокаций пропорциональна предпочтительной абсорбции одного типа дефектов (вакансий или междоузлий), а направление восхождения определяется начальной ориентацией дислокаций. Предполагая, что производимые деформации подобны тем, которые происходят в неомогенно нагреваемых упругих веществах, оценены уровни напряжений, возникающих в вафле при высокоэнергетической имплантации тяжелыми ионами. Уровень напряжений, как установлено авторами, достаточен, чтобы изменить процессы диффузии и распределение дефектов.

А. Ю. Дидык, В. А. Кузмин "Влияние окружающей температуры на переход точечного дефекта во время имплантации тяжелого иона". Теория скорости реакции существенно изменена, чтобы описать эволюцию радиационных повреждений. В работах других авторов подобная теория рассмотрена, но в них исследовалась область достаточно высоких окружающих температур. В данной работе авторы изучали влияние окружающей температуры на аккумуляцию повреждений.

Дифференциальные уравнения для вакансий и междоузлий решены численно. Найдены значения параметров системы, которые ведут к быстрому достижению стационарного состояния. В этом случае уровень повреждений наименьший.

Н. М. Касыутчис, В. С. Вариченко, А. М. Зайцев, А. Ю. Дидык, В. А. Скуратов, В. Р. Фахрнер, Д. Финк (Белорусский госуниверситет, Минск, Белоруссия; ОИЯИ, Дубна; Хагеновский университет, Хаген, Германия; Хан-Мейтнер институт, Берлин, Германия). "Разрешение по глубине изменения сопротивления кремния, облученного ионами Кг 210 МэВ и Хе 340 МэВ". Образцы кремния p -типа (10 Ом·см) и n -типа (0,5 Ом·см) с концентрацией кислорода около $1 \cdot 10^{18}$ см⁻³ имплантировались указанными ионами дозами $6 \cdot 10^{12}$ — $1 \cdot 10^{14}$ см⁻² исследовались методом разрешения по глубине изменения сопротивления (ИС). Отжиг образцов выполнялся в диапазоне температур от 200 до 1000 °С.

Зарегистрировано несколько различных изменений профилей ИС в зависимости от температуры кремниевых образцов двух типов. Изменение сопротивления в кремнии n -типа восстанавливается до начального уровня насквозь всего облученного слоя при температурах выше 600 °С, но для p -типа — только внутри слоя, где доминирует электронное торможение быстрых ионов. Особенности изменения сопротивления внутри слоя, где преобладает ядерное торможение, позволили авторам предположить, что во время отжига образуется слой n -типа.

С. Н. Жакубенжа, В. С. Вариченко, А. М. Зайцев, А. А. Мельников, А. Ю. Дидык, В. А. Скуратов, В. Р. Фахрнер (Белорусский госуниверситет, Минск; ОИЯИ, Дубна; Хагеновский университет, Хаген, Германия). Методы разрешения по глубине изменения сопротивления и времени жизни микроволновой фотопроводимости были применены для исследования дефектов структуры в кремнии n -типа, имплантированного ионами В с энергией 13,6 и 92 МэВ и А с энергией 135 МэВ и

последующего отжига при температурах от 100 до 1000 °С. Установлены пространственные области образования радиационных повреждений, вызванных различными дефектами в течение имплантации ионов высоких энергий. Наблюдались некоторые характерные особенности отжига радиационных дефектов различного типа. Обсуждалась также роль ядерных реакций в образовании дефектов.

ПОЛУЧЕНИЕ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПЛЕНОК И СВЕРХТОНКИХ МИШЕНЕЙ

И. М. Ройфе, Е. Г. Янкин, Д. В. Василевская (ИЭФА, С.-Петербург). Алмазоподобные пленки, нанесенные источником интенсивных ионов углерода". Представлены результаты исследования аномального тлеющего разряда с жидким анодом и игольчатым поджигом и палочным кожухом при давлении остаточных паров 0,1 мм рт. ст. Анализируются экспериментальные данные по генерации пучков ионов углерода и их применений при энергии ионов, близкой к разрядному напряжению. Представлены результаты исследований алмазоподобных пленок, нанесенных на металлические мишени.

Д. Н. Новиков, В. В. Глебов, Ю. А. Коваленко (Всероссийский электротехнический институт им. Ленина, Государственный научный центр РФ, Москва). "Нанесение алмазоподобных пленок разрядом в полой катод, стимулированным электронным пучком". Режим работы плазмохимического реактора (ПХР) на основе тлеющего разряда с холодным полым катодом, в котором создается эффективная плазма, определяется параметрами управляющего электронного пучка. Рассчитан и сконструирован ионно-защитный зазор. Он позволил стабилизировать работу ПХР в средах, содержащих углеродную компоненту (O_6H_{12} , C_2H_5OH), нейтральные газы (Ar , He , N_2) и окислители (O_2 , CO_2) в течение длительного периода времени, регулировать параметры плазмы в разряде $n_e = 10^8 - 10^{12} \text{ см}^{-3}$, температуру электронов $T_e = 2 - 10 \text{ эВ}$, энергию ионов от 15 до 1000 эВ. Представлены результаты исследований физических и химических характеристик алмазоподобных материалов на различных веществах: кремнии, кварцевом стекле, углеграфитовых материалах, металлах и пластиках. Измеренные значения удельного сопротивления от 10^2 до $10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и электрического напряжения до $10^6 - 10^8 \text{ В/см}$ указывают на широкие возможности ПХР, обобщенные в данной работе.

Т. М. Ивкова, В. Х. Лихтенштейн, Е. Д. Ольшанский (РНИЦ "Курчатовский институт", Москва). Приготовление и применение сверхпрочных ультратонких алмазоподобных углеродных мишеных фольг для лабораторных и космических экспериментов". Ультратонкие (минимальная толщина 20 А) сверхпрочные аморфные алмазоподобные углеродные фольги площадью $20 \times 20 \text{ мм}^2$ были изготовлены и использованы в качестве мишеней в качестве анализатора энергии ионов на термоядерной установке TFTR (Принстон, США) и в масс-спектрографе пролетного времени для космического аппарата MARC-94. Алмазоподобные фольги были приготовлены методом плазменного распыления чистого графита в высоковакуумном разряде при низкой температуре (В. М. Голянов, А. П. Демидов, Патент США 3840451 (1974)) на стеклянную подложку, покрытую пленкой мыла в качестве освобождающего фольгу агента. Описаны этапы изготовления и монтажа поддерживающих сеток и свободно устанавливаемых фольг, особое внимание уделяется характеристикам и точности определения толщины названных фольг. Исследованные синтетические алмазы позволили авторам изготовить первые ультратонкие фольговые монтируемые мишени с размерами ячейки сетки $0,25 \times 0,25 \text{ мм}^2$ для космических экспериментов, противостоящих высоким напряжениям растяжения, ускорению 20 в течение 2000 циклов/с. Предварительные эксперименты показали средний срок службы этих фольг, бомбардируемых ионами аргона, в несколько раз больший, чем фольги, полученные при помощи угольной дуги, которые обнаружили высокую устойчивость в качестве обдироч-

ной мишени в тандемных ускорителях тяжелых ионов. Обсуждаются некоторые особые свойства алмазоподобных углеродных мишеней, в частности, высокообогащенных изотопов C¹².

Выводы

В решении проблемы УТС в РНЦ "Курчатовский институт" под руководством Н. Н. Семашко, В. М. Кулыгина и А. А. Панасенкова разработаны теория, техника и технология; созданы, исследованы и применены многоамперные источники пучков изотопов ионов и атомов водорода.

Максимальные параметры пучков ионов водорода: ток 60 А, энергия 60 кэВ, длительность импульса 1 с. Пучки атомов водорода с энергией 25 кэВ, мощностью 320 кВт позволили нагреть в "Токамаке-11" плазму плотностью $1,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ до температуры ионов 400 эВ (от 160 эВ, достигнутых нагревом током разряда). При суммарной мощности двух пучков атомов водорода 1,2 МВт электронная и ионная компоненты плазмы с плотностью частиц $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ были нагреты до 750 эВ. В токамаке с круглым поперечным сечением получено рекордное, близкое к теоретическому, среднее по сечению шнура плазмы отношение давления плазмы к давлению тороидального магнитного поля $\langle \beta_T \rangle = 3,1 \%$.

В относительно редкой плазме на установке "Огра-4" пучки атомов водорода с энергией 20 кэВ, мощностью 400 кВт увеличили температуру ионной компоненты до 15 кэВ (170 млн. К). Начаты опыты по нагреву плазмы в Т-15 пучками атомов с энергией 60 кэВ, суммарной мощностью до 9 МВт, которые получают с помощью шести одновременно работающих источников ИВИС-70/80. Основные характеристики источников с постоянными периферийными магнитными полями представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры источников и пучков ионов для УТС и технологических целей, разработанных в РНЦ "Курчатовский институт"

Название	Ион	E, кэВ	I, А	j_{cp} , мА/см ²	τ_w , мс	П, см ^{-2*}
ИПМ-2	H ⁺	25	25	200	5—150	7x15
	He ⁺	25	12	100	5—150	7x15
	N ⁺	25	7	54	5—150	7x15
	Ar ⁺	25	4	32	5—150	7x15
ИМП-1	H ⁺	30	60	250	5—150	10x20
	He ⁺	30	30	125	5—150	10x20
	N ⁺	30	16	67	5—150	10x20
	Ar ⁺	30	9	40	5—150	10x20
АИСТ-20/50	H ⁺	50	20	200	5—150	Ø10
	He ⁺	50	10	100	5—150	Ø10
	N ⁺	50	5	54	5—150	Ø10
	Ar ⁺	50	3	32	5—150	Ø10
ИВИС-70/80	H ⁺	60	60	150	100—1500	12x35
	He ⁺	60	30	75	100—1500	12x35
	N ⁺	60	16	41	100—1500	12x35
	Ar ⁺	60	9	24	100—1500	12x35

* Поперечное сечение пучка на расстоянии 1 м от источника с неоднородностью 95 % от максимального значения плотности тока.

Пучки ионов азота с энергией 15—25 кэВ успешно использовались для модификации поверхностей режущих элементов токарных резцов, сверл, метчиков, разверток, фрез, элементов пахотных плугов, ножей для резки капрона и древес-

ностружечных плит, прокатных валков для проката тонких фольг из вольфрам- и молибден-рениевых высокопрочных сплавов.

Для решения проблемы создания сверхбольших интегральных схем с субмикронными размерами элементов В. Г. Дудниковым из Будкеровского ИЯФ СО РАН предложена оригинальная и простая идея уменьшения поперечной энергии ионов пучка H^- путем охлаждения до 20—30 К водорода, подаваемого в область перезарядки быстрых H^- с образованием "холодных" (0,05 эВ) H^- .

В ряде институтов созданы источники амперных пучков ионов газов и металлов, предназначенных для модификации поверхностных свойств металлов и сплавов, параметры которых приведены в табл. 3.

Таблица 3

Основные характеристики источников ионов для прикладных исследований и применений в промышленности

Автор, институт; технология	Ион	E , кэВ	I , А	$j_{ср}$, мА/см ²	Длительность импульса, мс	Размеры пучка
Дудников В. Г., ИЯФ СО РАН; электродинамический, дуоплазмотрон, поверхностно-плазменный	Me^+ Диэлектр. H^- H^-	25 22	10^{-4}	$5 \cdot 10^3$ 400 1000		$\varnothing 3 \cdot 10^{-7}$ см
Ремнев Г. Е., ИЯФТПИ, "Темп-2"	H^+ , C^{+n}	50—300	—	1000— ($2,5 \cdot 10^5$)	$(20-200) \cdot 10^{-6}$	20×100 см ²
Берсенов В. В. и др. ИЯФ РАН; разряд с холодным катодом, обращенный магнетрон	Ar^+ N^+ O^+ CH^+	50 30	0,2—2	0,6 $2 \cdot 10^{18}$	0,1—1	150 см ²
Кондратьев Б. К., Турчин В. И., ИТЭФ; интегрированный с полными катодами	H^+ He^+ Ar^+ Xe^+	30—50 50 50 50	2,6—6 1,6 1,1 0,85	180	$40 \cdot 10^{-3}$	$\varnothing 6,5$ см
Волосов В. И. и др., ИЯФ СО РАН; быстрые тяжелые ионы и атомы	Me^+ Me^0	9—11 5—10				
Визирь А. В. и др., ИСЭ СО РАН; "Титан"	Me^+ Ti^+	10—100	0,1—1		0,4	
Батазова М. А. и др., ИЯФ СО РАН; с поверхностной ионизацией	Me^+ Cs^+	16	0,040		0,4	0,5x4 0,5x4
Хвесьюк В. И., Цыганков П. А., Баумановский ГТУ; импульсный газовый разряд	Ti^+	60	1		1	
Коротаев А. Д. и др., СФТИТГУ, ИСЭ СО РАН; высокодозный ионный имлантер	C^+ , N^+ , Si^+ , Mo^+ , Pb^+ , $Ti^+ + Me^+$	30—100		$5 \cdot 10^{17}$ см ²	0,2	

Окончание табл. 3

Автор, институт; технология	Ион	E, кэВ	I, А	j_{cp} , мА/см ²	Длительность импульса, мс	Размеры пучка
Корнев С. А., Сиколенко В. В., ОИЯИ; ионный диод	Ti ⁺	150—300	30—120	5—10	300 нс	
	Al ⁺	150—300		8—10	300 нс	
	C ⁺	150—300			300 нс	
Опекунов М. С. и др., ИЯФТПИ	C ⁺	120		2,5—(5·10 ³)	100 нс	
Бакунин О. М. и др., ИЭФРАН; имплантер	Ar ⁺ , N ⁺ , O ⁺ , C _n H _m ⁺	30	10 ¹⁹ А/см ²	1—15	1	

Некоторые характеристики ускорителей ионов даны в табл. 4.

Таблица 4

Параметры ускорителей ионов для технологических целей

Автор, институт; технология	Ион	E, МэВ	I, мА	j_i , мА/см ²	Сечение пучка, см ²	Коэффициент захвата, %
Иванов Б. И., Прищепов В. П., ХИФИТ; многозарядных ионов: плоский диод, сферический диод, цилиндрический	Al ⁺⁸	0,3—0,4	30·10 ³		16	
	Al ⁺⁸	0,3—0,4		1,5		
	Al ⁺⁸	0,3—0,4		5,0		
	Al ⁺⁸	0,3—0,4		200·10 ³		
Глазков А. А., Диденко А. Н.; ВЧ-ускоритель	H ⁺	1,5		0,027		10
Геворков А. К. и др., СФТИ; ВЧ. с перенастройкой частоты, малогабаритный	10—70 а.е.м.	0,6	5			30
	H ⁺	0,6	40			
	D ⁺	0,6	50			
	H ⁺ , H ⁻ , He ⁺ , He ⁺²	0,08—1,5	100			
Артемов А. С. и др., ЛВЭОИЯИ; нуклотрон сверхпроводящий	D ⁺	100—2300	(5·10 ⁹ D ⁺)/оборот			

РЕЗУЛЬТАТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПУЧКОВ ИОНОВ НА МАТЕРИАЛЫ

Изменение рельефа, испарение, полировка поверхности

При плотности мощности меньше 50 МВт/см² на поверхности металлов и сплавов образуются кратеры размером 0,5—20 мкм, плотность которых достигает 1·10⁵ см⁻². Внутри и в окрестностях кратеров обнаружены дисклинации и микровойники, микротрещины и аморфизация поверхностного слоя.

Мощные пучки ионов C⁺ и H⁺ с энергией 100—600 кэВ, плотностью тока 40—200 А/см², длительностью импульса 50—100 нс, плотностью потока энергии 0,01—10 Дж/см² вызывают процессы испарения, сублимации и образования плазмы на глубине поверхностного слоя титанового сплава 1—2 мкм; плавление на глубине 2—5 мкм; образование дефектов при распространении ударных волн до глубины 100 мкм; рекристаллизацию с образованием зерен с оптимальными размерами (1х40 мкм); "идеализированные" структуры и кристаллические решетки. Можно получить твердый поверхностный слой с небольшой шероховатостью

поверхности ($R_a \approx 0,06$ мкм). Такие мощные пучки ионов используют для восстановления и удаления отработавших ресурс защитных покрытий на поверхности лопаток компрессоров авиационных турбин.

При высоких удельных ионизационных потерях энергии, превышающих 10 МэВ/а.е.м., на поверхности нержавеющей стали образуется игольчатая структура одинаковой формы. Высота микроострийных структур увеличивается с ростом флюенса ионов. Их элементный состав сильно отличается от начального состава нержавеющей стали.

Фазово-структурные изменения

В поверхностном слое металлов и сплавов формируются высокодисперсные (менее 10 нм) вторичные фазы (нитриды, карбиды, силициды), кластеры точечных дефектов и дислокационные субструктуры при плотности дислокаций до $5 \cdot 10^{10}$ см⁻². Насыщение и миксинг адсорбированными на поверхности элементами (углерод, азот, кислород) газовой среды рабочего вакуума и образование вторичных фаз типа оксидов, оксикарбидов, оксинитридов, аморфизация или формирование сплошных слоев карбидов, нитридов и оксинитридов происходят при дозах облучения свыше $2 \cdot 10^{17}$ ион/см².

Определяющими в упрочнении поверхностного слоя факторами являются твердорастворное упрочнение примесями внедрения и дисперсное упрочнение частицами вторичных фаз. Предел текучести достигает 3 ГПа. Образование преципитатов способствует упрочнению сплава АМц.

При больших удельных ионизационных потерях энергии ионов в полупроводниках и диэлектриках происходит самоотжиг радиационных повреждений, повышается термическая стабильность и миграция примесей вдоль треков ионов, происходит образование квазиодномерной трековой структуры.

Облучение стали У7 α -частицами с энергией 29 и 50 МэВ при температуре не выше 100 °С и отжиге ее при 400—1100 °С приводит к образованию мелкозернистой ферритно-перлитной структуры, термически необратимой.

Эффект дальнего действия

При энергии ионов 20—200 кэВ эффект дальнего действия наблюдается по изменению микроструктуры и может простираться в металлах, сплавах и полупроводниках на глубины в десятки микрон.

Толщина слоя с повышенной твердостью (до четырех раз) в широко распространенных и мартенситных сталях равна ~ 20 мкм и ~ 1 мм — для сталей, не содержащих хром. Сопротивление износу увеличивается в 10—30 раз.

Имплантиция ионов металла в слой нитрида титана в два-три раза повышает срок службы режущих инструментов.

Модифицированный слой с повышенным сопротивлением истиранию в сталях распространяется до глубин 150—200 мкм.

Когда ионы бора с энергией 100 кэВ имплантировались в быстрорежущие и хромистые стали, напряженно-деформированные участки наблюдаются при помощи акустической микроскопии на глубинах порядка 25 мкм, существенно превышающих проецированный пробег ионов.

Измеренный проецированный пробег ионов никеля с энергией 335 МэВ в алмазе равен 28 мкм. Некоторые центры катодолюминесценции в значительных концентрациях наблюдаются далеко за глубиной проецированного пробега.

Изменение физических, прочностных и эксплуатационных свойств конструкционных и инструментальных сталей

Облучение пучками полиэнергетических (80—1000 кэВ) протонов двух типов нержавеющей сталей (отожженных и холоднокатаных) увеличивает их водородную хрупкость, тогда как сталь типа 312 сохраняет фазовую стабильность.

Коэффициент распыления ионами гелия "потеющего" сплава алюминий — литий по сравнению с чистым алюминием уменьшается, а радиационная стойкость подобных сплавов повышается.

Предварительное облучение монокристаллов кремния при 300 К ионами тяжелых инертных газов позволяет надежно идентифицировать водород (0,1 ат. %) и производить очистку от водорода приповерхностного слоя.

Смешанные пучки ионов C^+ и H^+ с энергией 100—600 кэВ повышают рабочие характеристики титановых сплавов: напряжение усталости на 20—180 %, сопротивление тепловой соляной коррозии — на 600—800 %.

При определенных условиях ионная обработка разрушает результаты предшествующей термической обработки стареющих сплавов Д16, АК4 и АМг. Микротвердость уменьшается на 50—80 %. С другой стороны, микротвердость неупрочняемого термообработкой сплава АМц можно увеличить на 20—40 % облучением ионами бора или сурьмы.

Ионно-термическая обработка керамических материалов приводит их в полупроводящее состояние с удельным поверхностным сопротивлением 10^9 — 10^{15} Ом·м.

Имплантация ионов углерода и титана в поликристаллические керамики из нитрида бора и окиси алюминия уменьшает поверхностное сопротивление на 2—10 порядков величины при изменении дозы облучения от 10^{13} до 10^{18} см⁻².

При высокоэнергетической имплантации тяжелых ионов возникают напряжения, приводящие к нарушению состояния кристаллической решетки, изменяется миграция и диффузия точечных дефектов. В кремниевых образцах *л*- и *р*-типов происходит изменение сопротивления по глубине. При температуре отжига выше 600 °С изменение сопротивления в кремнии *л*-типа восстанавливается до начального уровня.

Методы разрешения по глубине изменения сопротивления и времени жизни микроволновой фотопроводимости позволили установить области образования радиационных повреждений и отжиг радиационных дефектов различного типа.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ

- Управляемая модификация рельефа поверхности, сглаживание рельефа прецизионных деталей из титана, нержавеющей стали и других сплавов, комплексная обработка миниатюрных режущих инструментов.

- Образование тонких преципитатов химических соединений вторичной фазы с кислородом, водородом и азотом. Повышение твердости и пассивация поверхности.

- Нанесение равновесных и метастабильных фаз тонкопленочных покрытий, включая сложные покрытия при их одновременной ионной бомбардировке. Ионно-пучковое нанесение твердых водородно-углеродных пленок на различные подложки.

- Получение нерастворимых компаундов: титан/алюминий; алюминий/бериллий; углерод/алюминий/бериллий. Срок службы бериллиевой фольги для пропускания электронного пучка из вакуума в атмосферу увеличен в несколько раз.

- Изменены физические, химические и механические свойства шерсти, способность ее к окрашиванию, смачиваемость и повышение фактора "резины". Длительность мойки шерсти после ионно-плазменной обработки уменьшилась до 100 раз, отпала необходимость обработки ее химическими реагентами.

- Разработана технология создания резисторов с помощью ионно-термической модификации керамической матрицы с изменением поверхностного сопротивления на 2—10 порядков величины.

- Долговечность и упругость эпоксидного материала в широком диапазоне поглощенных доз повышены на несколько десятков процентов облучением отверждаемых смол пучками протонов или электронов.

- Получены мембраны с ядерными треками с использованием ионов легче аргона высокоэнергетическими пучками.
- Изменены пьезоэлектрические, упругие и диэлектрические свойства монокристаллов окиси цинка высокоэнергетическими тяжелыми ионами.
- Методом люминесцентной спектроскопии изучена структура кристаллов точно в момент образования и эволюции радиационных повреждений. Определены дозы ионов перекрытия треков.
- Алмазоподобные пленки получены при помощи источника интенсивных пучков ионов углерода; разряда в полом катоде. Получены сверхпрочные ультратонкие алмазоподобные пленки для космических и лабораторных экспериментов.

З а к л ю ч е н и е

Показаны большие достижения в области разработки источников и ускорителей ионов газов, металлов, многозарядных ионов, потоков быстрых атомов для разнообразных научных и технологических применений в термоядерных исследованиях, микроэлектронике, машиностроении, исследования электроядерного метода получения энергии и переработки радиоактивных отходов, "кандидатных" материалов для международного экспериментального термоядерного реактора, получения быстрых термоядерных нейтронов.

Определенные успехи имеются в изучении оптимальных параметров и условий модификации и упрочнения металлов, сталей, сплавов, полимеров, изменении электрических свойств диэлектриков в очень широком диапазоне электропроводности по поверхности.

Расширены знания по эффекту дальнего действия при высоких энергиях ионов (335 МэВ), полученные в процессе имплантации по катодной люминесценции возбуждаемых атомов.

Показана практическая возможность повышения при помощи ионного облучения и послеимплантационного отжига напряженности усталости авиационных титановых жаропрочных сплавов на 20—180 %, сопротивления тепловой соляной коррозии в 6—8 раз, сопротивления тепловой газовой коррозии в 2—100 раз.

Представлены интересные доклады по разработке нового метода получения алмазоподобных пленок на всевозможных подложках, в том числе на пластике, обладающих высокой электрической прочностью (до 10^8 В/см), широким диапазоном изменения удельного электросопротивления (12 порядков величины) и метода приготовления и применения ультратонких (20 Å) сверхпрочных алмазоподобных углеродных мишеных фольг.

Большие успехи достигнуты в разработке электронных ускорителей и в крупномасштабном опытно-промышленном их применении.

Л и т е р а т у р а

1. Sources and accelerators of charged particle beams and plasma for application//1-st International Symposium BEAM TECHNOLOGIES (BT'95). — Dubna, Russia, February 28 — March 3, 1995. Laboratory of Particle Physics of JINR in cooperation with National Program "High Temperature Superconductivity", Counsel of Accelerators of Charge Particles RAS, Counsel of Modification of Construction Materials by Charge Particle Beams of RAS, Joint—Russian—Germany venture "RONIK" Ltd. JINR, 1995. P. 40.
2. Beams in technologies//Ibid. P. 2—44.

**INTERNATIONAL SEMINAR ON BEAM
TECHNOLOGIES (ION, ELECTRON, PLASMA)**

N. V. Pleshivtsev

RRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

The areas of applications for ion beams and plasma have been considered. Abstracts dealing with the development and study of fast ion and atomic beam sources (9 in number), ion and plasma accelerators (10), physics and material study in implantation metallurgy (27), ion beam treatment of dielectrics (8), high energy (10–335 MeV) ion modification of materials (11), production of diamond-like films and superthin targets (3) have been considered. Generalization of the produced results has been done.