

МОДИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОЩНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Данный обзор посвящен вопросу практического использования источников мощных ионных пучков наносекундной длительности. Параметры пучков лежат в диапазоне: энергия частиц – 0,1-1 МэВ, длительность импульса – 10^{-8} - 10^{-7} с, плотность тока – $1-300$ А/см². Рассматриваются результаты исследований модификации металлических материалов, сверхбыстрого осаждения пленок, получения УДП, пучково-эрозионной обработки изделий промышленности. Делается вывод о низких удельных энергозатратах импульсно-пучковых технологий, экологической чистоте при их внедрении в производство.

Введение

В ряде случаев эксплуатационные свойства механизмов и машин определяются характеристиками поверхности деталей. Поверхностный слой детали в условиях эксплуатации подвергается наиболее сильному механическому, тепловому, магнитному, электрическому, световому и другим воздействиям. Разрушение детали в большинстве случаев начинается именно с поверхностного слоя, например: возникновение и развитие усталостной трещины, эрозии, износа, коррозии и т.д. Повышение ресурса работы, надежности, весо-габаритных характеристик можно достигать, помимо всего прочего, улучшая свойства поверхности. В особенности это важно, когда уже исчерпаны возможности материалов. Во многих случаях при этом стоимостные характеристики деталей при улучшенных эксплуатационных характеристиках значительно ниже.

Электрофизические пучковые и плазменные установки позволяют направленно менять структуру поверхностного слоя, наносить покрытия различного назначения. От электрохимических методов осаждения покрытий их отличает экологическая чистота метода.

На международной конференции по металлургическим покрытиям и тонким пленкам (Сан-Диего, США, 1998г.) ведущими экспертами в этой области сообщено, что к настоящему времени мировая промышленность выпускает деталей с улучшенными поверхностными свойствами на 3 триллиона долларов с ежегодным приростом в 3%. Этот высокий темп роста прогнозируется до 2010 года. Наибольшая доля принадлежит покрытиям при использовании различных плазменных установок. Пучковые технологии (ионная имплантация, воздействие импульсных мощных ионных пучков, непрерывных и импульсных электронных пучков) имеют меньшую долю в этом и меньший временной масштаб внедрения, за исключением электронно-лучевых технологий. Хотя ионная имплантация в области полупроводниковой электроники стала привычным технологическим процессом.

Использование импульсных мощных ионных пучков (энергия ионов 0,1-1 МэВ, длительность импульса 10^{-8} - 10^{-6} с, ток ионов 0,5-50 кА) в области модификации поверхностного слоя материалов имеет еще короткий временной интервал, но в последние 5 лет бурно развивается в США и Японии [1].

Источники мощных ионных пучков (МИП) начали разрабатываться с середины 70-х годов в основном для исследований, связанных с реализацией инерционного управляемого термоядерного синтеза [2, 3]. Назначение источников определяло и их параметры. Развитие исследований по созданию ускорителей, разработка диодных систем, новых подходов к генерации пучков, систем транспортировки пучков к мишени были направлены на достижение максимально высокого энерговклада в мишень за минимально короткое время. К началу 80-х годов были достигнуты значительные успехи в создании ускорителей на экстремально высокие параметры.

Первые работы по практическому использованию мощных ионных пучков для имплантации и отжига полупроводников проводились в Корнельском университете США [4] в начале 80-х годов, а первые работы, исследующие возможность использования МИП для модификации свойств металлов и сплавов, были проделаны в НИИ Ядерной Физики ТПУ [5]. Уже на этом этапе исследований стало ясно, что существовавшие на этот момент временн источники МИП требуют изменений, определяемых новой областью применения, и на первый план выходят такие характеристики новых источников, как ресурс работы, стабильность параметров, возможность получения ионных пучков различного элементного состава. Во многом это зависит от метода создания плазмы, необходимой плотности и состава, из которой ускорятся ионы в диоде.

В результате исследований по воздействию мощных ионных пучков на металлы и сплавы определились и основные направления их прикладного использования:

- чисто энергетическое воздействие на материалы и конструкционные изделия;
- короткоимпульсная имплантация в металлы и полупроводники.

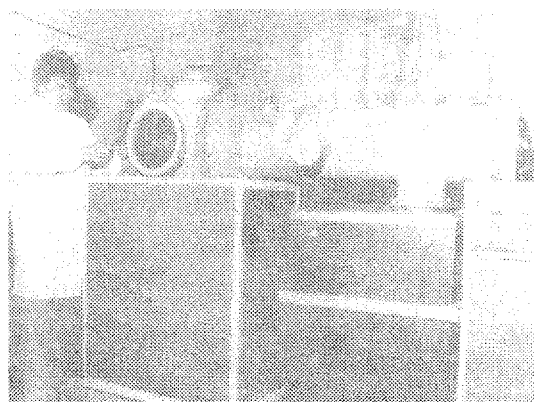
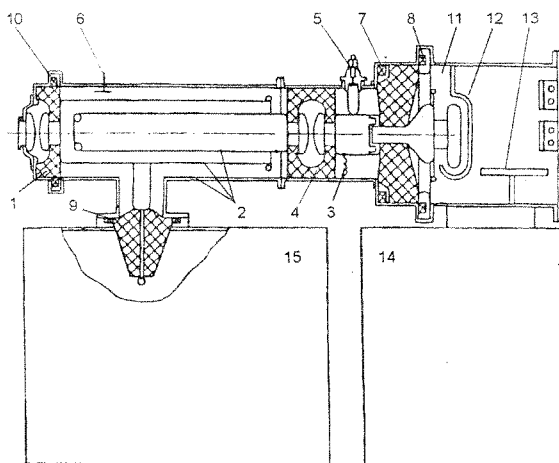


Рис. 1. а - Принципиальная схема ускорителя «ТЕМП»: 1, 4 - разрядники, 2 - электроды ДФЛ, 3 - зарядная индуктивность, 5, 6 - делители напряжения, 7-10 - пояса Роговского, 11 - вакуумная камера, 12 - магнитноизолированный диод, 13 - мишенный узел, 14 - вакуумный пост, 15 - ГИН Аркадьева-Маркса. б - Фото ускорителя «ТЕМП».

В первом случае характер воздействия пучка схож с действием других концентрированных потоков энергии: импульсного лазерного излучения, наносекундных электронных пучков, в особенности, низкоэнергетичных электронных пучков, импульсной плазмы, искрового воздействия. Энергия ионов, также как и сорт ионов, решающего значения в этом случае не имеют. Энергия ионов минимизируется и выбирается вместе с плотностью тока для получения плотности мощности в диапазоне $5 \cdot 10^6 - 10^8$ Вт/см², конкретное значение которой определяется материалом мишени [6, 7].

Во втором случае наряду с энергетическим воздействием происходит имплантация ионов. При воздействии мощным ионным пучком с плотностью потока мощности $\leq 10^6 - 10^7$ Вт/см² происходит одновременное внедрение примесных атомов и нагрев поверхностного слоя обрабатываемых изделий с быстрым его остыванием после прекращения действия импульсов тока [8, 9]. При этом возможность изменения сорта ускоряемых частиц, их энергии, длительности, частоты следования импульсов и величины ионного тока определяют скорость набора дозы, полную дозу и плотность потока мощности на мишень, которой задается температура поверхностного слоя мишени.

Ниже будут рассмотрены несколько областей использования мощных ионных пучков, которые развиваются в НИИ ЯФ совместно с рядом других организаций.

Источники

Ускорители типа «ТЕМП»

К настоящему времени разработано и находится в эксплуатации 3 типа ускорителей «ТЕМП». Все они собраны по одинаковой блок-схеме: генератор импульсных напряжений (ГИН) Аркадьева-Маркса, модифицированная двойная формирующая линия с газовыми разрядниками и деионизированной водой в качестве диэлектрика, магнитноизолированный диод.

Общий вид ускорителя «ТЕМП-1» и «ТЕМП-2» [10] изображен на рис. 1а, фото ускорителя - на рис. 1б. Ускоритель снабжен выносным полуавтоматическим пультом управления, карусельной системой поворота и замены образцов в вакуумной камере. Обработка изделий может выполняться в ручном и автоматическом режиме. Вскрытие камеры, замена сменного блока карусели с образцами, герметизация камеры и откачка до рабочего давления ($\sim 10^{-5}$ Торр) выполняется за 10 минут.

ГИН Аркадьева-Маркса включает 7 ступеней и собран на основе конденсаторов ИК-100-0.4, заряжаемых от высоковольтного источника ИРИС-6 (либо ИРИС-7) до напряжения 50 кВ, и газонаполненную (до 2 атм) штангу с разрядными промежутками. Запуск ГИНа осуществляется управляемым разрядником первой ступени. Модифицированная ДФЛ с деионизированной водой в качестве диэлектрика включает разрядники со сжатым газом на самопробое; зарядную индуктивность, установленную перед пушкой. Пауза между импульсами регулируется межэлектродными зазорами и давлением разрядников ДФЛ. Формирование пучков осуществляется диодами с магнитной самоизоляцией или с внешней магнитной изоляцией. Ускоритель оснащен автономными системами водоподготовки, маслохозяйства, вакуумной системой.

Два ускорителя «ТЕМП-1» эксплуатируются в НПП «Линэtron» (г.Нижний Новгород) в технологической цепочке упрочнения режущего твердосплавного инструмента.

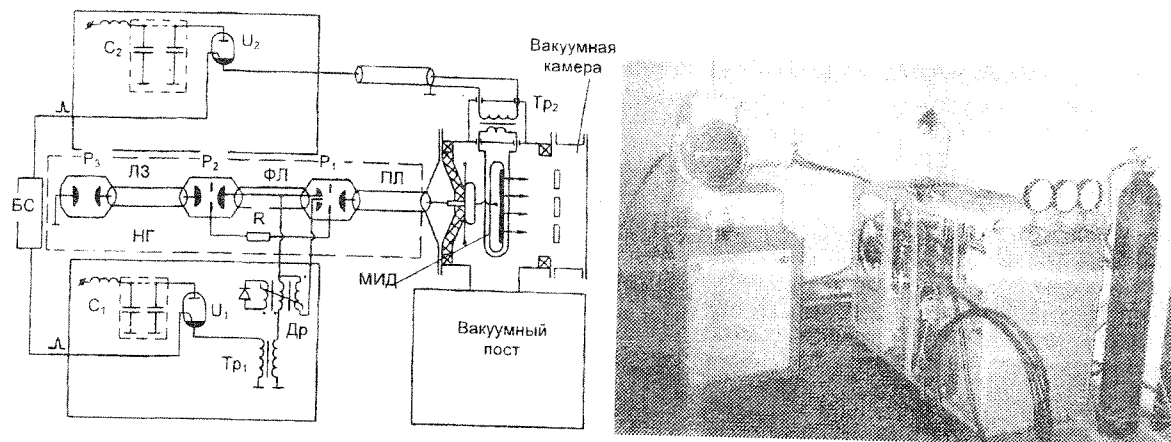


Рис. 2. а - Схема ускорителя МУК и основные узлы: НГ - наносекундный генератор, ФЛ - формирующая линия, ЛЗ - линия задержки, ПЛ - передающая линия, P_1, P_2, P_3 - газовые разрядники, C_1 - емкость первичного накопителя наносекундного генератора, Tr_1 - повышающий импульсный трансформатор, U_1 - игнитрон ИРТ-6, Др - дроссель насыщения, C_2 - первичный накопитель системы формирования магнитного поля, Tr_2 - понижающий импульсный трансформатор, МИД - магнитноизолированный вакуумный диод, БС - блок синхронизации. б - Фото ускорителя «МУК-М».

Ускоритель «ТЕМП-4» разработан и создан по заказу НПП «Линэктрон» и обладает высокопроизводительной вакуумной системой, автоматизированной системой контроля параметров и управления ускорителем. Ускоритель «ТЕМП-4» обеспечивает обработку 1 млн. штук неперетачиваемых твердосплавных пластин в год. Все ускорители типа «ТЕМП» предусматривают возможность установки дополнительных вакуумных объемов для обработки крупногабаритных изделий длиной в несколько метров с поперечным размером до 30 см.

Ускоритель «МУК-М»

При разработке сильноточного импульсного ионного ускорителя для короткоимпульсной имплантации «МУК-М» (рис.2) были заложены следующие требования: возможность изменения сорта ускоряемых частиц, их энергии, длительности, частоты следования импульсов и величины ионного тока, что определяет скорость набора дозы, полную дозу и плотность потока мощности на мишень, которой задается температура поверхностного слоя мишени. Формирование мощного ионного пучка основано на ускорении ионов из предварительно созданной взрывозмиссионной плазмы [11]. В этом случае возможно получение ионов практически всех металлов [11, 12, 13].

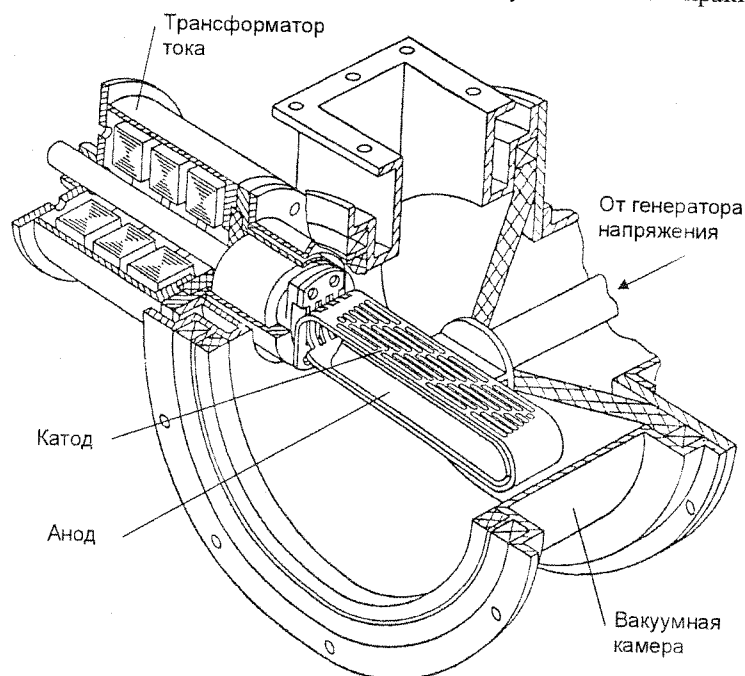


Рис. 3. Магнитноизолированный диод с замкнутым дрейфом ускорителя «МУК».

Ускоритель разработан на базе лабораторной модели технологического ускорителя «МУК» [10]. Тип ионного диода - магнитно-изолированный ионный диод (МИД) полоскового типа с внешним магнитным полем (рис.3).

Наносекундный генератор, состоящий из формирующей линии ФЛ, передающей линии ПЛ, линии задержки ЛЗ и блока разрядников P_1, P_2 и P_3 , позволяет формировать одиночный импульс напряжения или два разнополярных импульса напряжения [14].

Магнитное поле в анод-катодном промежутке магнитноизолированного диода создается за счет

протекания тока по катодному витку от дополнительного источника. Конструкция катодного витка предусматривает замкнутость электронного потока во всем сечении анод-катодного промежутка [15].

На рис.4 приведены осциллограммы импульсов напряжения, полного тока и плотности ионного тока на расстоянии 40 мм от катода для случая генерации ионов алюминия. Получены ионные потоки Al^{n+} , C^{n+} , H^+ с энергией от 30 до 450 кэВ, зарядностью $Z=1-3$, плотностью ионного тока от 4 до 20 А/см² в импульсе. Длительность импульсов тока от 100 до 300 нс. Частота следования импульсов - от одиночных до 10 Гц. Скорость набора дозы - $10^{12}-10^{13}$ ион/см² за импульс. Сечение пучка 180 см² (90×200 мм²). Однородность ионного потока по сечению пучка 30%.

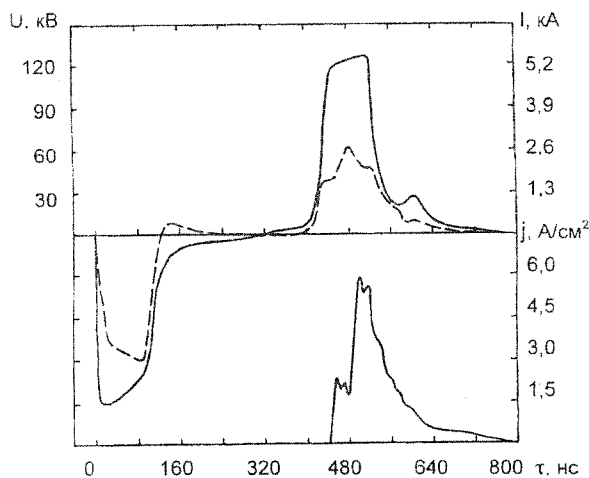


Рис.4. Осциллограммы импульсов напряжения, полного тока и плотности ионного тока для случая генерации ионов с анодной вставкой из алюминия.

Особенности взаимодействия МИП с металлическими материалами

Вопросы теоретического моделирования воздействия мощных ионных пучков рассматриваются в ряде работ [16, 17, 18]. Первичное поглощение энергии происходит в тонком поверхностном слое, определяемом глубиной поглощения энергии, в дальнейшем - рассчитываются нагрев и отвод тепла вглубь мишени за счет теплопроводности, формирование пароплазменного факела, воли напряжения и рассматриваются эффекты, в основе которых лежат эти процессы.

Одна из особенностей взаимодействия МИП с металлами связана с энергетическим разбросом частиц в пучке, который прежде всего связан с тем, что длительности переднего и заднего фронтов сравнимы с длительностью импульса. Расчеты с помощью табличных данных по пробегам ионов [19] (рис.5) показали выравнивание распределения ионов по глубине [20, 21] при учете энергетического разброса в пучке.

При расчете поглощенной энергии учет реальных фронтов ускоряющего импульса напряжения, а также учет зарядности и различной массы ионов меняют картину распределения поглощенной энергии, рис.6. Кривая 3 иллюстрирует распределение поглощенной энергии для состава пучка ускорителя «ТЕМП» - H^+ (~30%) C^{n+} (~70%).

Отличие в распределении поглощенной энергии пучка с реальной формой импульса и составом от моноэнергетичного пучка, требует, с одной стороны, учета формы импульса и состава МИП, а с другой стороны, имеется возможность активного влияния на это распределение.

Импульсный характер воздействия МИП определяет принципиальные отличия процессов, происходящих в поверхностном слое металла от непрерывной ионной имплантации. [1, 6, 7, 21, 22,

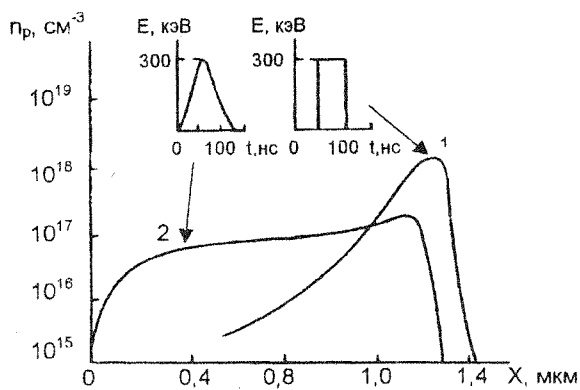


Рис.5. Распределение имплантированных протонов для моноэнергетичного ионного пучка (1) и пучка с реальными фронтами ускоряющего импульса напряжения (2). Число частиц в обоих импульсах одинаково.

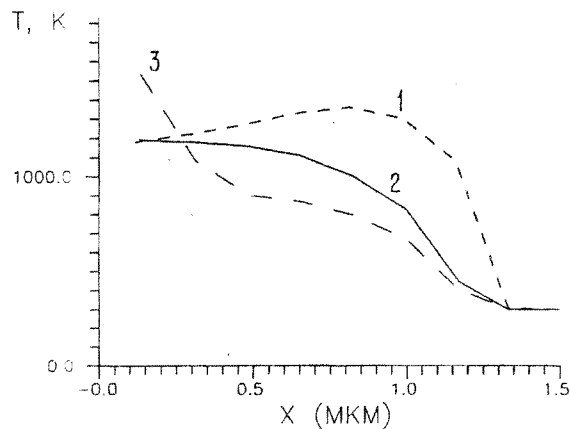


Рис. 6. Распределение температуры без учета теплопроводности в мишени из Fe после воздействия моноэнергетичного пучка протонов (1), пучка протонов с реальными фронтами (2), МИП с составом, регистрируемым спектрометром Томсона (3), $eU_0=300$ кэВ, $J_i=30$ А/см².

23, 24, 25]. За время действия импульса энергия, переносимая пучком, поглощается в тонком поверхностном слое, определяемом пробегом ионов и теплопроводностью металла. Как правило, для МИП наносекундной длительности это глубины в металлах ~ 1 мкм. Плотностью тока в пучке можно регулировать температуру поверхностного слоя вплоть до расплавления поверхностного слоя с образованием пароплазменного слоя. Исследования характера воздействия МИП при плотности мощности более 10^7 Вт/см² показали, что взаимодействие ионных пучков с металлами сопровождается рядом процессов:

- нагрев, плавление, испарение материала поверхности;
- образование пароплазменного факела;
- возбуждение волн сжатия в мишени за счет импульса отдачи;
- перемешивание компонент, протекание химических реакций;
- быстрое остывание нагретого поверхностного слоя вглубь мишени со скоростями $\sim 10^9$ - 10^{10} К/с.

В зависимости от плотности мощности пучка и от теплофизических характеристик металла доминируют те или иные процессы. Под их действием в поверхностном слое мишени происходят структурные, физико-химические превращения, изменяется топология поверхности, о чем свидетельствуют результаты экспериментов, полученные с использованием различных методов анализа. В совокупности эти процессы приводят к модификации поверхностного слоя, улучшению эксплуатационных характеристик ряда изделий: электроэрозионной стойкости, уменьшению коэффициента трения, износостойкости, коррозионной стойкости и др..

Упрочнение металлов и сплавов при плотности мощности пучка от 10^6 до 10^7 Вт/см² происходит, в основном, без изменения топологии поверхности, как представляется в настоящее время, за счет закалочных эффектов при быстром остывании мишени за счет теплоотвода вглубь и за счет ионной имплантации при большом количестве импульсов 10^3 - 10^4 . Нагрев поверхностного слоя на глубину пробега ионов происходит со скоростями $\sim 10^{11}$ К/с. Остывание вглубь мишени происходит, в основном, за счет теплопроводности со скоростями $\sim 10^7$ - 10^{11} К/с. Темп остывания мишени определяется материалом мишени и величиной поглощенной энергии. Изменяя плотность мощности в импульсном ионном пучке, при его взаимодействии с металлами можно варьировать температуру поверхностного слоя, доводя ее вплоть до температуры плавления. Числом импульсов и током ионов можно варьировать внедренную дозу, как при имплантации непрерывными пучками временем облучения. При этом, прямого аналога такому воздействию нет.

Обработка металлов по первому режиму (с оплавлением поверхности) формирует достаточно сложный и неоднозначный топологический рисунок поверхности. Он связан с образованием отверстий, микрократеров волнообразной структуры на поверхности мишени (рис. 7).

Необходимо отметить, что такое поведение мишени наблюдается и при воздействии других концентрированных потоков энергии: мощных электронных пучков [26], импульсных лазеров [27, 28], импульсной плазмы [29, 30]. Существует две точки зрения на причины образования кратеров. Первая причина для МИП связывается с филаментацией пучка, вторая – с реакцией материала мишени при учете различного рода включений других фаз на поверхности.

На рис. 7 приведены фотографии поверхности мишени из Ni₃Fe, облученной МИП различной плотности тока. При $j_i = 100$ А/см² появляются фактически слившиеся кратеры, которые образуют волнообразную структуру поверхности. Такая же структура поверхности, типа апельсиновой корки, наблюдается и на полупроводниках (кремнии) при воздействии импульсного лазерного излучения.

На фотографиях рис. 7 явно просматривается тенденция к увеличению размеров кратеров с увеличением j_i (рис. 8). Следует отметить, что число кратеров увеличивается в более слабой зависимости при увеличении j_i более, чем в 3 раза (с 40 до 130 А/см²). Размеры кратеров и площадь, занятая ими, увеличиваются в несколько раз, т.е. область, занятая кратерами, для данного материала в основном, растет за счет размеров кратеров.

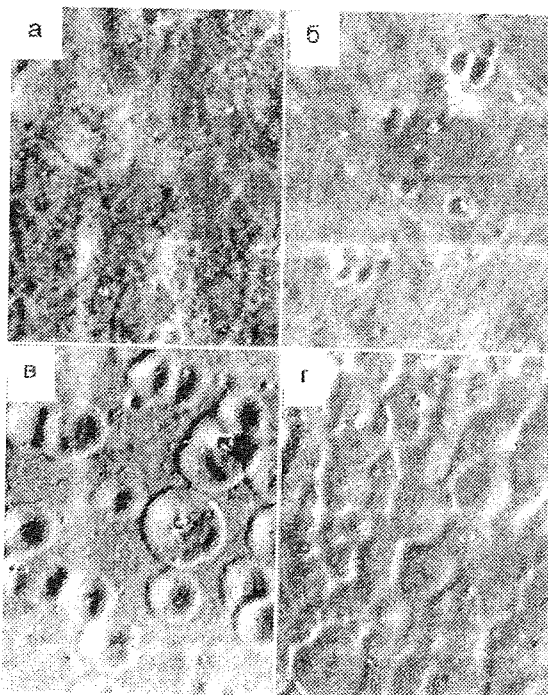


Рис. 7. Фото поверхности мишени из Ni₃Fe после облучения МИП: а – $j_i = 15$ - 25 А/см², б – 40 А/см², в – 60 А/см², г – 100 А/см²

Исследовалось также кратерообразование на образцах химически чистой меди и отожженной меди, алюминия, титана с различным видом обработки, степенью шероховатости. Обнаружено, что микрократеры на разных материалах образуются преимущественно вдоль поверхностных дефектов обработки. Отжиг меди, в частности, приводил к интенсивному кратерообразованию на поверхности образцов. По всей видимости, это связано с формированием макродефектов в поверхностном слое при отжиге, например, газовых пузырьков. При уменьшении шероховатости поверхности образцов из титана и меди до 0,1 мкм достигались условия, когда при тех же режимах облучения микрократеры не образовывались. Эти факты дают основание утверждать, что за образование микрократеров ответственна в основном не филаментация

пучка, а реакция поверхностного слоя (расплава, пароплазменного облака над поверхностью) на воздействие МИП, поскольку число кратеров определяется степенью и видом механической обработки поверхности, и в слабой степени, но зависит, как было показано, от плотности тока. Плотность же тока МИП определяет образование расплава на поверхности, скорость уноса материала и, соответственно, размеры микрократеров. Необходимо отметить также еще одно обстоятельство, которое, на наш взгляд, играет решающую роль в формировании рельефа поверхности, - это то, что в поверхностном слое конструкционных материалов содержится значительное количество инородных включений, а также пузырьков газа, (необходимо отметить, что первое сообщение о влиянии микровключений на образование микрократеров было высказано в работе [26]). После воздействия МИП наблюдается плавление поверхностного слоя с быстрым расширением газового пузыря. Поскольку процесс по времени будет протекать со скоростью порядка скорости звука в расплавленном металле ($\sim 10^5$ см/с), то расплавленный слой толщиной ~ 1 мкм поверхность расширяющегося пузыря пройдет за время ~ 1 нс. Этот процесс происходит на фоне более медленного процесса нагрева и в дальнейшем на заднем фронте импульса, а также после окончания действия импульса на фоне остывания - со скоростями, большими $\sim 10^7$ - 10^9 К/с. Поэтому процесс расширения пузырька будет иметь характер микровзрыва в расплавленном слое.

На поверхности расплава при этом вначале формируется возмущение, которое распространяется радиально. Причем, как видно из фотографии, форма волны имеет крутой передний фронт и пологий задний, т.е. она нелинейна. Причем, это более выражено на металлах с высоким коэффициентом температуропроводности. Например, на образцах из алюминия наблюдается даже выброс металла в сторону распространения волны. Это, по всей видимости, происходит уже при остывании, когда вязкость нижних слоев возрастает, а верхние обгоняют их, разрываясь на капли. Процесс остывания фиксирует или вмораживает данное возмущение, имеющее форму кратера различной формы, рис. 7.

Поскольку, как отмечалось выше, глубина поглощения энергии МИП определяется глубиной первичного поглощения энергии ионов и темпом теплоотвода, то в локальных областях, где теплоотвод затруднен газовыми полостями, микротрещинами, диэлектрическими и другими включениями, будет наблюдаться более интенсивное локальное оплавление. На рис. 7б видны области микрооплавления вокруг источников, образованных за счет выхода газа. Теплоотвод затруднен и с выступов. Они будут оплаиваться и испаряться в первую очередь, приводя к эффекту полировки. Этот эффект хорошо выражен на некоторых металлах, в частности, на титане, и важен в практическом применении. Это также указывает на решающее влияние в образовании микрократеров предварительной механической обработки поверхности, а также разновидности металла. Таким образом, образование микрократеров и, соответственно, рельеф поверхности можно контролировать плотностью тока в импульсе и длительностью воздействия, либо не доводя до расплава, либо сокращая время его существования, а также подготовкой поверхности мишени.

Прямое упрочнение изделий с использованием мощных ионных пучков

Упрочнение изделий (повышение срока службы) при воздействии МИП основано на структурных изменениях поверхностного слоя. Они характеризуются формированием

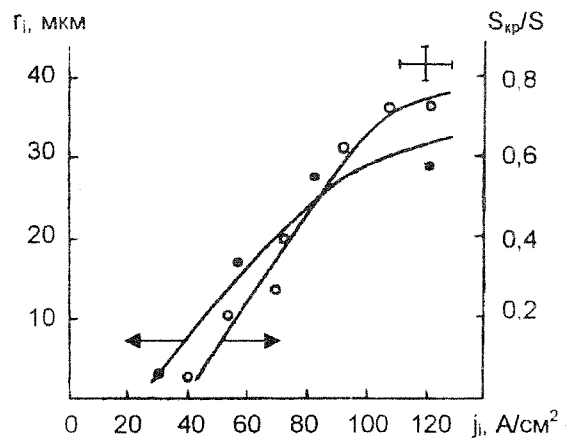


Рис. 8. Зависимость размера кратеров r_{kr} и площади S_{kr}/S , занятой ими, от плотности тока МИП - $j_{и}$, S - общая площадь облучаемой мишени.

перекристаллизационного слоя глубиной $\sim 1-10$ мкм. Перекристаллизация препятствует развитию существующих микротрещин, движению дислокаций, влияет на микротвердость. За счет растворенного и адсорбированного углерода и перемешивания компонент поверхностного слоя образуются карбиды [6, 31]. Образование заметной доли карбидов ведет к увеличению микротвердости. В зависимости от теплофизических свойств металла и параметров пучка наблюдается образование своеобразного микрорельефа. Для некоторых металлов (например, титана и ряда сплавов на его основе) наблюдается эффект полировки [21]. В совокупности эти процессы приводят к модификации поверхностного слоя, улучшению эксплуатационных свойств некоторых изделий: электроэрозионной стойкости, уменьшению коэффициента трения, износостойкости, коррозионной стойкости (при испытаниях на солевую коррозию) [32, 33, 34].

Одно из первых направлений по применению МИП [6, 21] было связано с упрочнением режущего инструмента. Исследования проводились на изделиях из инструментальной стали Р6М5 и твердых сплавов [34, 35]. Исследования поверхностного слоя инструментальной стали методом ВИС показали увеличение содержания карбидов железа в поверхностном слое, изменение работы выхода. Изменение дефектной структуры наблюдалось вплоть до 40-50 мкм от поверхности, при этом микротвердость также увеличивалась на этих глубинах. Причем, это увеличение выражено гораздо больше, если предварительно до облучения наносилась пленка бора. В поверхностном слое образуется нанокристаллическая структура. Характер износа режущей кромки при точении также изменяется от выкрашивания и резких кромок к плавному профилю износа. Структурные и химические изменения поверхностного слоя приводят к увеличению стойкости сверел, метчиков в несколько раз. Это увеличение подтверждено для отдельных размеров инструмента рядом актов заводских испытаний.

Проведены исследования по упрочнению изделий порошковой металлургии - твердосплавных режущих пластин на основе карбида вольфрама и карбида титана [36]. На рис.9 для подтверждения этому приведены кривые времени резания сплава ВТ-3 в заводских условиях (ВС МПО, г.Верхняя Салда, испытания проведены Наумовым Е.М.) специальными пластинами из твердого сплава ВК-7. При обработке МИП с дополнительной термообработкой время резания (при износе по задней поверхности до 0,6 мм) более, чем в 3 раза (t_3/t_1) превышало исходное значение.

На основе исследований был разработан технологический процесс упрочнения твердосплавного инструмента на базе ускорителя «ТЕМП», который впервые внедрен на НПП «Линэtron», г. Нижний Новгород коллективом сотрудников под руководством Кутузова В.Л. (Куликов Ю.Ю., Овсянников М.Ю. и др.). Основное назначение ускорителя - упрочнение чашечных и тангенциальных резцов из сплава Т14К8, которые используются для черновой обработки колесных вагонных пар.

Одно из важных применений МИП, развиваемых в последние годы совместно с МАИ и ВИАМ (В.А. Шулов, Н.А. Ночевная), - это упрочнение лопаток компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) [21, 37, 38, 39]. Исследовались образцы из сплавов ВТ9, ВТ8М, ВТ33, ВТ18У, ВТ25У. Облучение проводилось на ускорителе «ТЕМП», $j_i = 20-180$ А/см² при ускоряющем напряжении до 300 кВ. При низких плотностях ионного тока $j_i < 60$ А/см² идет удаление углеводородов с поверхности, оплавление острых кромок, выступов. С увеличением плотности тока происходит изменение химического состава поверхностного слоя, топологии поверхности, структурные изменения. На глубинах до 10-40 мкм после облучения происходит образование дефектов, перекристаллизация структуры.

После диффузионного отжига происходит отжиг дефектов, образование пластической структуры, «идеализация» кристаллической решетки, проявляющаяся в резком уменьшении межплоскостного расстояния и полуширины рентгеновских линий. На поверхности образцов «залечиваются» макродефекты, снижается шероховатость. В то же время при повышенных плотностях тока $j_i > 60$ А/см² МИП происходит образование микрократеров. Оно связано с дефектами в поверхностном слое. Их размер и плотность снижаются при тонкой механической полировке образцов. Общая шероховатость снижается с увеличением плотности тока и числа импульсов.

По результатам работ разработан опытно-промышленный технологический

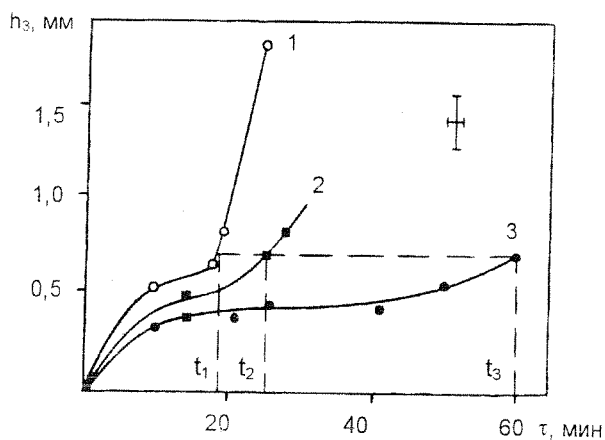


Рис.9. Зависимость величины износа твердосплавных пластинок ВК-7 по задней кромке h_z от времени резания по сплаву ВТ-3: 1 - исходная пластина, 2 - пластина, упрочненная только воздействием МИП, 3 - обработка МИП с дополнительной термообработкой.

процесс обработки лопаток ГТД из сплавов ВТ9 и ВТ8М (В.А. Шулов и др.) [40] Способ защищен патентом России [41].

Пучково-эрозионная обработка изделий

При воздействии МИП на мишени изменяются энергетические характеристики поверхности, удаляются легкоплавкие примеси, углеводородные загрязнения, при повышении плотности тока идет интенсивное удаление поверхностного слоя [6, 42]. За один импульс тока могут быть удалены слои толщиной $\sim 0,1-1$ мкм. Эффективность такой обработки высока. Пучково-эрозионную обработку можно использовать для очистки поверхности изделий перед нанесением покрытий различного назначения. Полные энергозатраты составляют $0,1-1$ кВт·ч/м² при использовании ускорителя «ТЕМП» (см. ниже). Адгезия износостойкого покрытия, в частности, нитрида титана возрастает после предварительной обработки изделий МИП [20, 43]. Пучково-эрозионная обработка была использована для очистки лопаток ГТД, отработавших регламентный режим на двигателе [21, 44, 45]. В процессе работы лопаток на их поверхности образуется нагар, происходит формирование оксидов титана (ВТ18У и ВТ9), железа и хрома (ЭП866Ш, ЭП718ИД). Облучение МИП с $j_i > 100$ А/см² приводит не только к удалению окисленных слоев и нагара, но и к изменению физико-химического состояния. Служебные характеристики лопаток из сплавов ВТ9, ВТ18У удается повысить, по крайней мере, до уровня исходных серийных лопаток.

Таким образом, показана возможность эффективного использования МИП для очистки поверхности изделий как в качестве промежуточной технологической обработки поверхности деталей перед нанесением покрытий (это может быть использовано в одном технологическом цикле), так и в качестве ремонтной операции по финишной очистке лопаток от нагара, оксидов.

Короткоимпульсная имплантация в металлы и полупроводники

Исследования по короткоимпульсной имплантации углерода в металлы проводились на ускорителе "МУК-М" и ионном ускорителе на базе генератора ЭСГ-2.5 (НИИ ЯФ), который переводился в режим сопоставимых параметров по пучку [46]. Сравнительный анализ дефектной структуры приповерхностного слоя образцов стали. Непрерывная имплантация способствует формированию многослойной дислокационной структуры, трансформирующейся по мере нарастания плотности дислокаций от хаоса к сеткам. После однократного воздействия МИП в приповерхностном слое толщиной $0,2-0,3$ мкм формируется слоистая дислокационная структура. Степень дефектности структуры стали при обработке МИП за один импульс выше по сравнению со случаем непрерывной имплантации, даже когда доза внедренных атомов во втором случае составляет $2 \cdot 10^{16}$ см⁻². Увеличение числа импульсов обработки МИП до $N=2000$ (полная доза $2 \cdot 10^{16}$ см⁻²) приводит практически к полному возврату дислокационной структуры приповерхностного слоя к исходному состоянию до облучения.

Для определения возможности применения мощных ионных пучков для радиационного легирования полупроводников GaAs, Hg_{1-x}Cd_xTe, Si и был выполнен ряд работ [47, 48, 49]. Облучение полупроводниковых структур проводилось на ускорителе «МУК-М» потоками ионов Cⁿ⁺ и Alⁿ⁺ при следующих условиях: ток пучка - 5 А/см², длительность импульса - 10^{-7} с, энергия ускоренных ионов - $100-350$ кэВ, доза ионов в импульсе - $2 \cdot 10^{12}$ ион/см². Профиль концентрации имплантируемых атомов алюминия и углерода в облученных полупроводниковых структурах, определенный методом ВИМС и методом мгновенной гамма-спектрометрии по ядерной реакции $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ [48], в основном, определяется прямой имплантацией ионов.

Облучение кристаллов КРТ мощными ионными пучками Al позволяет формировать n^+-n и $n-p$ структуры глубиной $0,5-1$ мкм при дозах облучения $1 \cdot 10^{12}-1 \cdot 10^{13}$ см⁻², фактически после воздействия одним импульсом МИП [49].

В настоящее время технологические требования к ионной имплантации возрастают, и уже существуют, например, задачи получения приповерхностных узколегированных бором областей кремния толщиной менее 100 А с концентрацией на уровне $10^{18}-10^{20}$ атом/см³ и высокими градиентами концентраций имплантируемого элемента на границах этой области. Традиционная ионная имплантация с использованием ионных источников непрерывного действия в данном случае не позволяет достичь требуемых параметров узколегированной области из-за термодиффузионного расширения концентрационного профиля. Было проведено исследование возможности создания узколегированной бором приповерхностной области кремния (толщиной менее 100 А) имплантацией методом ядерной отдачи при облучении кремния с тонкой (~ 200 А) пленкой бора мощным ионным пучком (Опекунов М.С. и др.).

При этом преимущества сильноточных ионных ускорителей: высокая скорость набора дозы, возможность проведения отжига дефектов при имплантации - сохраняются и в этом случае.

Осаждение тонких пленок из абляционной плазмы, генерируемой мощным ионным пучком

Метод осаждения импульсным мощным ионным пучком аналогичен более известному импульсному лазерному осаждению, но ему характерен более высокий общий энерговыход в мишень, приводящий к ускоренным скоростям осаждения и большим площадям покрытия.

Воздействие мощного ионного пучка наносекундной длительности с плотностью мощности $P \geq 10^7 - 10^8 \text{ Вт/см}^2$ на твердотельную мишень сопровождается образованием высокоплотной абляционной плазмы (концентрация плазмы $10^{19} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$, температура плазмы 0.2–2 эВ, скорость разлета $\sim 10^6 \text{ см/с}$) [50, 51], которая может быть использована для высокоскоростного осаждения тонких пленок. Пороговая плотность мощности $P_{\text{пор}}$, при которой происходит взрыв поверхностного слоя на глубину пробега ионов, определяется теплофизическими характеристиками мишени, скоростью поглощения энергии. Использование абляционной плазмы для осаждения тонких пленок имеет ряд особенностей: высокая скорость осаждения пленки $\sim 0,1 - 1 \text{ см/с}$; конгруэнтное осаждение многокомпонентных пленок; узкая угловая направленность движения плазмы; возможность получения пленок на большой площади $\geq 20 - 100 \text{ см}^2$, однородных по толщине. Эти особенности уже использованы при получении высококачественных пленок ZnS:Mn для электролюминесцентных устройств [52], керамических пленок [53, 54, 55] (BN , SiC , $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, ZrO_2), нанокристаллических пленок металлов [56, 57] (W , Ti , Mo , Nb , Au , Al , Cu , Zn), алмазоподобных углеродных пленок [58, 59, 60].

На рис.10 представлена геометрическая схема расположения мишени, подложки и ионного пучка, представлен фотоснимок процесса осаждения тонких пленок. Пленка может осаждаться в результате однократного или многократного воздействия на мишень.

Для определения углового разлета абляционной плазмы в пространстве дрейфа была проведена серия экспериментов с использованием энерго-дисперсионный рентгено-флуоресцентного анализа [61, 62]. В качестве материала мишеней использовались высокочистые вольфрам, золото, ниобий, сульфид цинка, каждый с чистотой выше 99,99%, и свинец квалификации 99%. Общими чертами угловых распределений частиц при распылении мощным ионным пучком является преимущественный вылет частиц по нормали к поверхности мишени и независимость угловых распределений от угла падения ионов на мишень. Распыляемый поток частиц характеризуется узконаправленным пиковым распределением, описываемым функцией $\exp(-n|\theta|)$ с $3 < n < 4,3$ (угол θ относительно нормали к мишени). В отличие от изотропного распыления все эти случаи характеризуются преимущественным вылетом частиц в направлении нормали к поверхности мишени. Угловое распределение (рис.11) существенно отличается от косинусоидального, характерного для обычного распыления за счет упругих столкновений или для обычного термического испарения [63, 64].

Проведенные структурно-фазовые исследования с использованием дифракционной электронной микроскопии на просвет показывают, что МИП может быть использован для осаждения пленок тугоплавких металлов (W , Ta , Mo , Nb) с нанокристаллической структурой [56]. Размеры кристаллитов в пленках в зависимости от напыляемого металла и числа импульсов напыления колеблются в диапазоне от единиц до десятков нанометров. Например, пленка вольфрама представляет собой квазиморфный материал с размером областей кристалличности 1,5...2 нм. По мере перехода к более легкоплавким материалам степень аморфности пленок снижается и

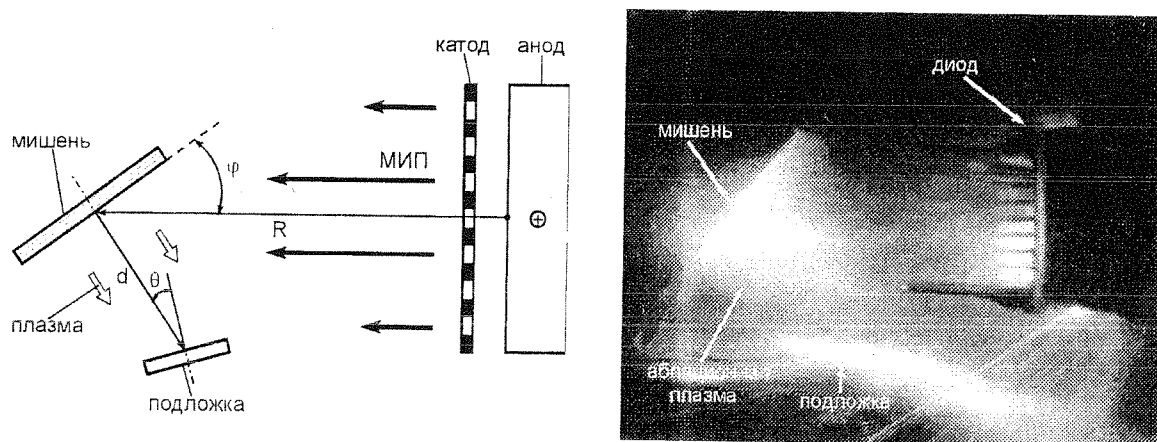


Рис. 10. Геометрическая схема и фотоснимок процесса осаждения тонких пленок.

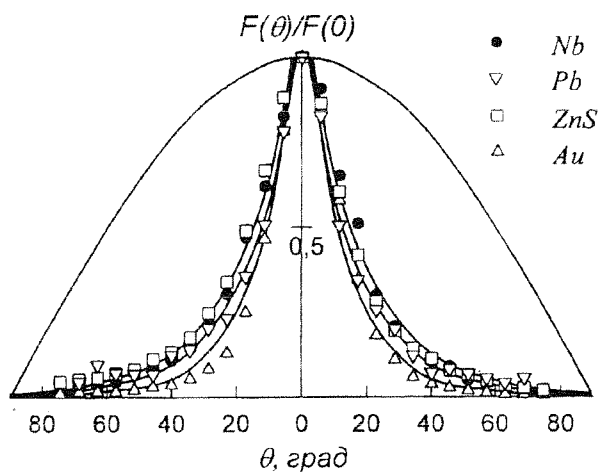


Рис. 4. Угловое распределение потока абляционной плазмы, генерируемой мощным ионным пучком на различных мишенях: Nb $\sim \exp(-3,1|\theta|)$, Pb $\sim \exp(-3,4|\theta|)$, ZnS $\sim \exp(-3,0|\theta|)$, Au $\sim \exp(-4,3|\theta|)$

увеличиваются размеры кристаллитов. Для меди и алюминия осажденные пленки представляют собой поликристаллический агрегат с размером кристаллитов уже ~ 100 нм.

Удельные плотности тонких металлических пленок (медь, ниобий, молибден, тантал и вольфрам), получаемых осаждением мощным ионным пучком, были измерены, используя комбинацию методов рентгено-флуоресцентного анализа (РФА) и интерферометрии (Рыжков В.А.). Сверхвысокая скорость осаждения с помощью МИП позволяет получать пленки с удельными плотностями близкими к плотностям объемных материалов, ≈ 95 –100% для металлических пленок [65]. Сверхвысокая импульсная скорость осаждения приводит к уменьшению содержания газообразующих примесей в пленке, даже если осаждение выполняется

если осаждение выполняется в относительно невысоких вакуумных условиях с парциальными давлениями C, N и O $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. Эксперименты, проведенные с использованием методик активационного анализа (Рыжков В.А.) на заряженных частицах и Оже-электронной спектроскопии показали отсутствие обнаруживаемых газообразных примесей ($C_i \leq 0,1$ ат. %) в золотой пленке, осажденной на «Темп-2» при распылении мишени высокой чистоты (выше 99,99%) [62, 66].

Алмазоподобный углерод осаждался с использованием ускорителя «Темп-2» на подложки из Si, MgO и стекла [59, 60]. За один импульс осаждалась пленка с толщиной приблизительно 5 нм. Анализ углеродных пленок с использованием дифракционной электронной микроскопии показал, что пленки, осажденные на аморфные стеклянные подложки при комнатной температуре, состоят в основном из аморфного углерода (до 98%) с незначительной долей кристаллического графита. Осаждение углерода на кристаллические подложки благоприятствует образованию нанокристаллического алмаза в пленке. Алмазные кристаллы имеют размеры 25 – 125 нм с объемной долей в пленке до 10%. Плотность углеродных пленок, измеренная с использованием дейтронного активационного анализа составляла 2,5–2,9 гсм³.

Заключение

В настоящем обзоре представлены результаты исследований, информация о существующем практическом использовании мощных ионных пучков наносекундной длительности. Положительные результаты в следующих направлениях: модификация поверхностного слоя изделий из металлических материалов; очистка, активация поверхности перед осаждением покрытий различного назначения; сверхбыстрое осаждение тонких пленок; короткоимпульсная имплантация – позволяют сделать прогноз о серьезных перспективах практического использования источников мощных ионных пучков. Технологические процессы на их основе характеризуются низкими удельными энергозатратами, высокой производительностью, экологической чистотой. Это как раз те требования, которые закладываются в разработку новых технологий. Вместе с этим, требуется развитие исследований в данном направлении. Представляется важным формирование научно обоснованной картины взаимодействия импульсных концентрированных потоков энергий с поверхностным слоем металлических материалов, изучения существенно нелинейных процессов, протекающих в зоне взаимодействия, которая включает на последовательных этапах все состояния конденсированной среды: твердое тело, жидкость, газ, плазму, находящихся в условиях высокой радиационной нагрузки.

В заключение автор выражает благодарность всем соавторам цитируемых работ, используемых для написания данного обзора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Davis H.A., Remnev G.E., Stinnett R.W., Yatsui K. // MRS Bulletin. 1996. XXI. N8. p.58-62.
2. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н. // Мощные ионные пучки. - М.: Энергоатомиздат, - 1984. - 152 с.
3. Миллер Р. // Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. - М.: Мир, - 1984. - 432 с.
4. Neri J.M., Hammer D.A., Ginet G., Sudan R.N. // Appl.Phys. Lett. -1980. - 37(1). - P.101-103.
5. Диденко А.Н., Кузнецов Б.И., Ремнев Г.Е. и др. // Всесоюзная Конференция по применению электронно-ионной технологии в народном хозяйстве: Тезисы докладов. - Тбилиси. - 1981. - С.110-111.

6. Погребняк А.Д., Ремнев Г.Е., Чистяков С.А., Лигачев А.Е. // Известия Вузов. Физика. - 1987. - В.1. - С.52-65.
7. Remnev G.E., Shulov V.A. // Laser and Particle Beams. - 1993 - V.11 - №4. - P.707-731.
8. Ремнев Г.Е., Иванов Ю.Ф., Опекунов М.С., Пузыревич А.Г. // Дефектообразование в стали при однократном и периодическом воздействии мощных импульсных ионных пучков / Письма в ЖТФ, том 21, вып.24, 1995г., с.60 - 65.
9. Опекунов М.С., Ремнев Г.Е. // IV Всероссийской конференции по модификации свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц: Тезисы докладов. - Томск. - 1996. - С.43-46.
10. Isakov I.F., Kolodii V.N., Opeounov M.S., Matvienko V.M., Pechenkin S.A., Remnev G.E. and Usov Yu.P. // Sources of High Power Ion Beams for Technological Applications / Vacuum, 1991, v.42, N1/2, p.159-162.
11. Логачев Е.И., Ремнев Г.Е., Усов Ю.П. // Ускорение ионов из взрывозмиссионной плазмы. / Письма в ЖТФ. 1980, т.6, в.22, с.1404-1406.
12. Исаков И.Ф., Логачев Е.И., Лопатин В.С. и др. // Генерация пучков тяжелых ионов в магнитоизолированном диоде из взрывозмиссионной плазмы / В сб.: Тезисы докладов V Всесоюзного симпозиума по сильноточной электронике, Изд. ИСЭ СО АН СССР, Томск, 1984, ч.2, с.156-158.
13. Логачев Е.И., Лопатин В.С., Печенкин С.А., Ремнев Г.Е. // Исследование расходимости пучка и однородности эмиссии тяжелых ионов при прямом ускорении. / ЖТФ, 1984, т.54, в.10, с.2027-2029.
14. Исаков И.Ф., Логачев Е.И., Опекунов М.С., Печенкин С.А., Ремнев Г.Е., Усов Ю.П. // Мощный наносекундный генератор серии импульсов / ПТЭ, N3, 1987, с.101-103.
15. Ремнев Г.Е., Исаков И.Ф., Опекунов М.С., Матвиенко В.М. // Источники мощных ионных пучков для практического применения. / Известия ВУЗов, ФИЗИКА. №4, 1998, стр.92-111.
16. Бойко В.И., Евстигнеев В.В. // Введение в физику взаимодействия сильноточных пучков заряженных частиц с веществом. М.: Энергоатомиздат, 1988, 136 с.
17. Яловец А.П. // Динамические и электрофизические явления при взаимодействии интенсивных потоков заряженных частиц с веществом. Диссертация д.ф.-м.н., Томск, 1994.
18. Блейхер Г.А., Кривоногов В.П., Пашенко О.В. // Диссипация энергии мощных импульсных пучков заряженных частиц в твердом теле. Тепловые процессы. Известия ВУЗов. Физика, 1997, №2, с.67-89.
19. Буренков А.Ф., Комаров Ф.Ф., Кумахов М.А., Темкин М.М. // Пространственные распределения энергии, выделенной в каскаде атомных столкновений в твердых телах. / - М.: Энергоатомиздат, 1985, - 285с.
20. Ремнев Г.Е., Погребняк А.Д. // Применение мощных ионных пучков для технологических целей. / Новости науки и техники. Серия: Новые материалы, технология их производства и обработки. - Москва, ВИНТИ, 1990, в.2. -30с.
21. Remnev G.E., Shulov V.A. // Application of High Power Ion Beams for Technology. / Laser and Particle Beams. 1993, v.11, N4, p.707-731.
22. Диденко А.Н., Лигачев А.Е., Куракин И.В. // Воздействие пучков заряженных частиц на поверхности металлов и сплавов. - М.: Энергоатомиздат. - 1987. - 187с.
23. Yatsui K. // Laser and Particle Beams. - 1989. - Vol.7. - Part 4. - P.733-741.
24. Stinnett R.W., McIntyre D.C., Buchkeit, et.al. // Proc. BEAMS'94. - 1994. - P.215-221.
25. Davis G.P., Rej D.J., Ruiz C.L., et.al. // Proc. BEAMS'94/ - 1994. - P.226-231.
26. Бакшт Р.Б., Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. и др. // Воздействие мощного кратковременного электронного потока на металл. / Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков. Под ред. Г.А.Месяца. Новосибирск, Наука, 1976, с.141-153.
27. Анисимов С.И., Имас П.А., Романов Г.С. и др. // Действие излучения большой мощности на металлы. -М.: Наука. 1970. -272с.
28. Батанов В.А., Бункин Ф.В., Прохоров А.М., Федоров В.Б. // Испарение металлических мишеней мощным оптическим излучением. / ЖТФ, 1972, т.63, в.2(8), с.586-608.
29. Девятко Ю.Н., Калинин Б.А., Месяц Г.А. и др. // Образование упорядоченных структур на поверхности металла, облученного плазменными сгустками. / ДАН СССР, 1989, 309, №6, с.1371-1373.
30. Калинин Б.А., Якушкин В.Л., Польский В.И. // Модификация металлических материалов при обработке потоками высокотемпературной импульсной плазмы. / Известия ВУЗов. Физика, 1994, №5, с.109-126.
31. Pogrebnyak A.D., Remnev G.E., Kurakin I.B., Ligachev A.E. // Structural, Physical and Chemical Changes Induced in Metals and Alloys Exposed to High Power Ion Beams. / Nucl. Instrum. And Meth., 1989, B.36, V.3, p.286-305.
32. Remnev G.E., Shulov V.A. // Practical applications of high power ion beams. / Proc. 9-th Int. Conf. High Power Particle Beams, BEAMS'92. USA, Washington, 1992, p.365-372.
33. Ремнев Г.Е., Погребняк А.Д., Исаков И.Ф. и др. //Повышение эксплуатационных характеристик сплавов под действием мощных ионных пучков. / Физика и химия обработки материалов. 1987, в.6, с.4-11.
34. Kutusov V.L., Ovsjanikov M.Yu., Pogrebnyak A.D., Remnev G.E. // Mechanical and Frictional Properties of Tool Steel Exposed to HPIB Irradiation / Phys. Stat. Sol. (a), 1989, p.361-364.
35. Кутузов В.Л., Овсянников М.Ю., Ремнев Г.Е. и др. // Механические и фрикционные свойства инструментальных сталей, подвергнутых воздействию мощных ионных пучков. / Тезисы докладов I Всесоюзной конференции «Модификация свойств конструкционных сталей пучками заряженных частиц, Томск, ч.III, с.167-169.
36. Исаков И.Ф., Кутузов В.Л., Ремнев Г.Е. и др. // Упрочнение твердосплавных режущих пластин при воздействии мощных ионных пучков. / Тезисы докладов III Всесоюзной конференции «Модификация свойств конструкционных сталей пучками заряженных частиц. Томск, 1994, ч.I, с.87-88.
37. Ремнев Г.Е., Погребняк А.Д., Шулов В.А. и др. // Физика-химия процессов, протекающих в поверхностных слоях сплава BT18U при воздействии мощного ионного пучка. / Поверхность, 1990, №12, с.214-222.
38. Шулов В.А., Ремнев Г.Е., Ночевная Н.А., Кошечев В.А., Полякова И.Г., Исаков И.Ф. // Физико-химические процессы, протекающие в поверхностных слоях титановых сплавов при ионно-лучевой обработке с использованием мощных импульсных пучков. / Поверхность, 1993, №5, с.127-140.
39. Шулов В.А., Ночевная Н.А., Ремнев Г.Е. и др. // Обработка титанового сплава BT8M мощными ионными пучками наносекундной длительности. / Ж.Физика и химия обработки материалов, 1997, №4, с.5-12.

40. Шулов В.А., Ремнев Г.Е., Ночевная Н.А. и др. // Ионно-лучевая технология ремонта лопаток компрессора ГТД с использованием мощных ионных пучков наносекундной длительности. / Авиационная промышленность, 1993, №2, с.14-22.
41. Исаков И.Ф., Ремнев Г.Е., Стрыгин А.Е., Шулов В.А. // Патент СССР №1792569. Способ ионно-лучевой обработки сплавов. / Приоритет: 18.01.91.
42. Chistjakov S.A., Pogrebnjak A.D., Remnev G.E. // Dynamical Processes and Changes in Metal Structure Induced by High Power Ion Beam. / Nucl. Instrum. And Meth., 1989, B.42, p.342-345.
43. Исаков И.Ф., Калмыков Ф.Г., Нестеренко В.М., Ремнев Г.Е. // А.С. №1468017. Способ нанесения покрытий на изделия из металлов. / Приоритет от 14.08.86.
44. Шулов В.А., Ночевная Н.А., Ремнев Г.Е. и др. // Применение обработки мощными ионными пучками для ремонта и очистки изделий. / Письма в ЖТФ, 1991, т.17, в.17, с.38-42.
45. Зубарев Г.И., Исаков И.Ф., Ночевная Н.А., Ремнев Г.Е. // Патент РФ №2009269. Способ восстановления эксплуатационных свойств деталей машин. / Приоритет: 10.02.92, БИ, 1994, №5.
46. Ремнев Г.Е., Иванов Ю.Ф., Опекунов М.С., Пузыревич А.Г. // Дефектообразование в стали при однократном и периодическом воздействии мощных импульсных ионных пучков / Письма в ЖТФ, том 21, вып.24, 1995г., с.60 - 65.
47. Бобровникова И.А., Брудный В.Н., Вилисова М.Д., Ивонин И.В., Опекунов М.С., Пороховниченко Л.П., Черников Е.В. // Влияние мощных импульсных ионных пучков (Sn⁺, Aln⁺) на свойства эпитаксиальных слоев арсенида галлия / Тезисы докладов IV Всероссийской конференции по модификации свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц, Томск, 1996, с.228-229.
48. В.П. Григорьев, Т.В. Коваль, М.С. Опекунов, В.А. Рыжков и др. // Исследование профилей распределения Al в КРТ при короткоимпульсной имплантации / Тезисы докладов IV Всероссийской конференции по модификации свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц, Изд. АудитИнформ, Томск, 1996, с.155-157.
49. Войцеховский А.В., Ремнев Г.Е., Опекунов М.С., Коротаев А.Г., Коханенко А.П., Рыжков В.А., Грушин И.И., Тарбоков В.А. // Имплантация в КРТ импульсными пучками ионов высокой мощности. / Тезисы докладов IV Всероссийской конференции по модификации свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц, Томск, 1996, с.223-225.
50. Баранов С.В., Грибанов К.Г., Пак В.С., Ремнев Г.Е. // Физика плазмы, 1989, т.15, в.8, с.1016.
51. Zakoutaev A.N., Remnev G.E., Ivanov Yu.F., Artyev M.S., Matvienko V.M., and Potyomkin A.V. // «High-rate deposition of thin films by high-intensity pulsed ion beam evaporation». / В сб. "Film Synthesis and Growth Using Energetic Beam", edited by H.A. Atwater, J.T. Dickinson, D.H. Lowndes, and A. Polman (Mater. Res. Soc. Proc. 388, Pittsburgh, PA, 1995) p. 388.
52. Shimotori Y., Yokoyama M., Isobe H., Harada S., Masugata K., Yatsui K. // J. Appl. Phys., 1988, V. 63, N3, p. 968.
53. Masugata K., Sonogawa T., Ohashi M. et al. Beams '90: Proceedings of the 8th International Conference on High Power Particle Beams, edited by B.N. Breizman and B.A. Kynazev (World Scientific, Teanack, NJ, 1991), Vol. 2, p. 1243.
54. Isakov I.F., Remnev G.E., Zakoutaev A.N. // Beams '92: Proceedings of the 9th International Conference on High-Power Particle Beams, edited by D. Mosher and G. Cooperstein (NTIS, Springfield, VA, 1992), p. 1966.
55. Ремнев Г.Е., Хасанов О.Л., Иванов Ю.Ф., Матвиенко В.М., Закутаев А.Н., Струц В.К., Бикбаева З.Г. // Тезисы докладов Международной конференции «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах» / Томск, Изд. ТПУ, 1998, с. 99.
56. Ремнев Г.Е., Закутаев А.Н., Иванов Ю.Ф., Матвиенко В.М., Потемкин А.В. // Письма в ЖТФ, 1996, т. 22, в. 8, с. 68.
57. Meli C.A., Grabowski K.S., Himshelwood D.D., Stephanakis S.J., Rej D.J., and Wagenaar W.J. // J. Vac. Sci. Technol., 1995, A13, p. 1182.
58. Johnston G.P., Tiwari P., Rej D.J., Davis H.A. et al // J. Appl. Phys., 1994, Vol. 76, p. 5949.
59. Rej D.J., Remnev G.E., Davis H.A., Isakov I.F. // Proceedings of 3rd International Conference on the Applications of Diamond Films and Related Materials, edited by A. Feldman, Y. Tzeng, W. Yarbrough, M. Yoshikawa, M. Murakawa (National Inst. of Standards and Tech., Gaithersburg MD, 1995) p. 723.
60. Remnev G.E., Rej D.J., Zakoutaev A.N., Davis H.A., Ivanov Yu.F., Johnston G.P., Matvienko V.M., Olson J.C., Potyomkin A.V. // Труды IV Всероссийской конференции по модификации свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц, Томск, Изд-во «Аудит Информ», 1996, с. 531.
61. Zakoutaev A.N., Remnev G.E., Isakov I.F. // «High-rate deposition of thin films by high-power ion beam target evaporation». / Beams '94: Proceedings of the 10th International Conference on High-Power Particle Beams, edited by R. White and W. Rix (NTIS, VA, 1995), pp. 840 - 843.
62. Remnev G.E., Zakoutaev A.N., Grushin I.I., Matvienko V.M., Potyomkin A.V., Ryzhkov V.A., Ivanov Yu.F., Chernikov E.V. // «The deposition of thin metal films at the high-intensity pulsed-ion-beam influence on the metals». Beams '96: Proceedings of 11th International Conference on High Power Particle Beams, Prague, 1996, Vol. II, pp. 873 - 877.
63. Плешивцев Н.В. // Катодное распыление. М.: Атомиздат. 1968, 348 с.
64. Бернш Р. // Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Вып. 1. / М.: Мир, 1984. 336 с.
65. Remnev G.E., Isakov I.F., Opekuinov M.S., Matvienko V.M., Ryzhkov V.A., Struts V.K., Grushin I.I., Zakoutaev A.N., Potyomkin A.V., Tarbokov V.A., and Pushkaryov A.N. // Submitted to (USA, 1998).
66. Rej D.J., Davis H.A., Olson J.C., Remnev G.E., Zakoutaev A.N., Ryzhkov V.A., Struts V.K., Isakov I.F., Shulov V.A., Nochevnaya N.A., Stinnett R.W., Neau E.L., Yatsui K., Jiang W. // J. Vac. Sci. Technol., 1997, A15 (3), p. 1089.