

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И УСКОРИТЕЛЕЙ В ЦЕЛЯХ РАЗВИТИЯ РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

ТОМАС ДОЛАН, СТЕПКО ФАЗИНИЧ, К.У. РОЗЕНГАРД И УРСУЛА ШНАЙДЕР

Фундаментальные и прикладные исследования по новейшим направлениям ядерной науки и техники принесли многим странам реальные социальные, экономические и экологические выгоды в таких областях, как промышленность, медицина и энергетика. Например, научные исследования открыли путь для применения более действенных промышленных процессов удаления отходов, производства высококачественных сортов керамики, металлов и покрытий, а также для совершенствования здравоохранения и лечения болезней.

Проводя различные мероприятия, МАГАТЭ поддерживает и координирует научные и технические исследования, соответствующие потребностям устойчивого развития в государствах-членах. Программы Агентства охватывают применение ядерных приборов, исследования по физике плазмы и ядерному синтезу, а также использование исследовательских реакторов и ускорителей. В данной статье конкретно говорится о применениях плазмы и пучков ускоряемых частиц с уделением особого внимания деятельности, способствующей передаче технологии, специальных знаний и опыта.

ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Большинство людей привыкли считать, что фундаментальные состояния материи ограничиваются твердой, жидкой или газообразной формами. Однако физики часто работают еще с од-

ним состоянием материи, известным как плазма, ионизированный газ. Плазменные процессы — например, неоновое свечение или, в гигантском масштабе, солнечная энергия — составляют часть повседневной жизни. Сегодня плазменные технологии широко и с пользой практически применяются в медицине и в промышленности. В число применений входят:

- очистка поверхностей; покрытие поверхностей; и испытание материалов;
- плазменно-химический синтез для изготовления алмазных и сапфировых окон;
- обработка и модификация кремниевых микросхем на атомарном уровне;
- энергетически эффективные источники света;
- сохранение пищевых продуктов (антидиффузионные барьеры в пластиковой упаковке для задержки окислительных процессов);
- биосовместимые материалы и имплантаты;
- медицинские применения (хирургические и зубоорудные инструменты, имплантаты, сердечные клапаны);
- уничтожение опасных отходов.

Эти и другие промышленные применения имеют рыночный потенциал в десятки миллиардов долларов. Многие плазменные технологии, используемые в термоядерных исследованиях, находят применение в других областях. Нагрев плазмы микроволнами высокой энергии, например, в настоящее время широко используется в промышленности. Методы плазменной

диагностики применяются в промышленности, а небольшие плазменные аппараты используются как источники нейтронов и рентгеновских лучей.

Проекты технического сотрудничества. В Китае МАГАТЭ поддержало проект технического сотрудничества для содействия стране в разработке плазменного реактора, предназначенного для обработки токсичных жидких отходов целлюлозно-бумажного комбината. В настоящее время строится пилотная установка для проверки концепции в более крупном масштабе. В случае успеха эта технология могла бы быть передана тысячам целлюлозных предприятий в Китае и повсеместно.

В Аргентине в рамках другого проекта разрабатывается источник интенсивного пульсирования нейтронов для различных полевых применений, например разведки минералов и обнаружения взрывчатых веществ.

Проекты координированных исследований. МАГАТЭ выступило организатором проекта координированных исследований по применению физики плазмы и технологий синтеза для инженерных, промышленных и природоохранных целей. Во многих участвующих странах

Г-н Долан — руководитель Секции физики Отдела физических и химических наук Департамента ядерных наук и применений МАГАТЭ; г-да Фазинич и Розенгард и г-жа Шнайдер — сотрудники Секции.



отмечены существенные достижения, например:

■ **Аргентина.** Изучена поверхностная модификация сталей, титановых и других сплавов. В целях повышения поверхностной твердости стали проведены другие исследования с использованием дифракции рентгеновских лучей синхротрона.

■ **Бразилия.** Изучена микроструктура твердых углеродистых покрытий, таких как карбид бора, для улучшения их механических свойств, включая износостойкость.

■ **Германия.** Покрытие полимеров аморфной гидрированной углеродистой пленкой уменьшило проницаемость на 80—95%. Это сравнимо с результатами использования в этих же целях других барьерных покрытий, таких как оксиды алюминия и кремния.

■ **Греция.** Разработан источник тлеющего разряда от скопления атомов металлов для создания нано-структурных материалов, таких как полупроводниковые газовые датчики.

■ **Египет.** Прибор (известный как устройство для тихого

диэлектрически барьерного разряда) испытан в качестве озонного газогенератора для обработки сточных вод, очистки угля от серы и удаления водяных паров из природного газа в сырой нефти.

■ **Индия.** Проходит полевые испытания прототип плазменной горелки для пиролиза медицинских отходов. Измерен выход газов, и разработаны методы для предотвращения загрязнения среды.

■ **Китай.** Изучение пыльного загрязнения плазмы усилит контроль качества при обработке материалов. Дополнительно изучается плазменное устройство для возможного использования в качестве источника рентгеновских лучей и пучка ионов.

■ **Российская Федерация.** продемонстрирована осуществимость инжектирования таблетированных частиц в термоядерную плазму для измерения ее параметров.

■ **Румыния.** Разработан проект плазменного реактора для обработки материалов.

■ **Япония.** Разработаны специальные приборы для измере-

ния функций распределения энергии в поверхностно-волновых и индуктивно связанных видах плазмы. Изучены полученные концентрации углеводорода и фторированных молекул с целью выяснения оптимальных параметров обработки полупроводников.

Такие применения физики плазмы потенциально важны для защиты материалов методами поверхностной обработки, разработки чистых производственных технологий, выпуска новых материалов будущих технологий и восстановления окружающей среды.

ПРИМЕНЕНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ

Тысячи ускорителей используются во всем мире для разнообразных применений (см. вставку на стр. 44). Агентство разрабатывает базу данных по ускорителям низких энергий и их применению. В их число входят:

Нейтронные генераторы. Сильноточные пучки дейтронов с энергиями 0,1—3 МэВ инжектируются в насыщенные тритием титановые мишени, где в результате термоядерных реакций производятся нейтроны. Такие «нейтронные генераторы» используются для анализа мате-

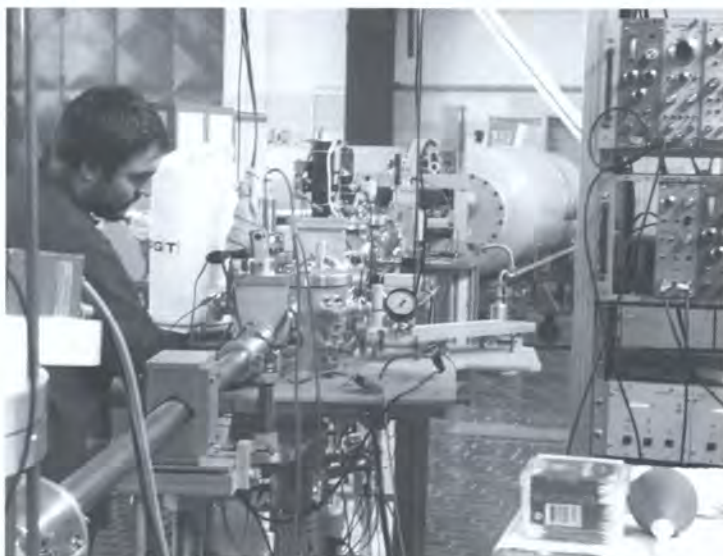
Фото: Вверху слева — плазменный реактор для удаления и переработки отходов целлюлозы в Ченду, Китай. Вверху справа — система, разработанная Западным университетом Кентукки, США, для идентификации скрытых под землей объектов. Она испытывается на детекцию мин.

риалов путем поглощения и рассеяния нейтронов. Они применяются в физических экспериментах; при детекции взрывчатых веществ и наркотиков; в гуманитарных программах по разминированию; балковых анализах угля, цемента, стекла, металлов и сельскохозяйственной продукции; каротаже нефтяных скважин; разведке полезных ископаемых; неразрушающем анализе с помощью нейтронной радиографии; и в лекарственной терапии.

Участие Агентства включает осуществление проекта координированных исследований по балковому водородному анализу с использованием нейтронов. Выпущен также технический документ по эксплуатации и обслуживанию нейтронного генератора. В рамках другого проекта координированных исследований — по применению ядерных методов для обнаружения противопехотных мин — разрабатываются ядерные приборы для обнаружения и распознавания скрытых в земле объектов. Одна из систем миноискателя будет испытываться в полевых условиях.

Ионная имплантация. Методы обработки с помощью ионных пучков могут использоваться с высокой точностью результатов как для синтеза, так и модификации материалов, включая металлы, полупроводники, керамику и диэлектрики. Установки ионной имплантации применяются в изготовлении усовершенствованных полупроводниковых микросхем для компьютеров и систем связи.

В промышленности по производству полупроводников эксплуатируется около 7 тыс. ускорителей для ионных имплантаций. Этот метод требует специальных ускорителей, способных имплантировать ионы большинства элементов периодической таблицы и равномерно сканировать пучок по всему образцу.



Эта технология применяется также для нанесения тонких пленочных покрытий с целью повышения износостойкости, снижения трения и предотвращения коррозии специализированных приборов, применяемых в промышленности и медицине. Например, сплавы титана, алюминия и ванадия имеют отличную биосовместимость, прочность и коррозионную стойкость, но им недостает твердости и износостойкости. Имплантация ионов азота улучшает показатели износостойкости этих сплавов в 1 тыс. раз, давая возможность гораздо более длительного их использования в качестве искусственных тазобедренных суставов.

Анализ с использованием ионных пучков. Наиболее распространенными методами анализа с использованием ионных пучков (АИП) являются: PIXE (корпускулярно индуцированное рентгеновское излучение), RBS (спектрометрия резерфордского обратного рассеяния), ERDA (ядерный анализ с использованием детекции эластичной отдачи) и NRA (анализ ядерных реакций). Применение методов АИП позволяет обнаружить присутствие всех элементов. NRA и ERDA наиболее подходят для легких элементов, особенно водо-

рода; RBS и PIXE применимы для обнаружения более тяжелых элементов.

Обычно для этой цели используются небольшие электростатические ускорители с напряжением на зажимах порядка 2—3 МВ. Имеется около 200 таких установок в мире, включая те, которые эксплуатируются в примерно 20 развивающихся странах. При применении тонкой настройки ионных пучков большинство методов АИП могут использоваться для получения изображения концентрации элементов. Слаботочные методы могут применяться в датчиках с источником контролируемого излучения для получения зрительного изображения морфологии, кристаллической структуры и плотности материалов или для изучения свойств электронных устройств.

Самое широкое применение эти методы получили при разработке материалов, в изучении загрязнения среды, биомедицинских исследованиях, геологии и археометрии. Методы RBS, ERDA и NRA благодаря получаемой с их помощью информации служат ценным дополнением к

Фото: Ускоритель для ионно-пучкового анализа в Институте им. Йозефа Штефана в Словении.

ПРИМЕНЕНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ

УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ

■ **Ускорители электронов низких и средних энергий.** *Применение:* Больницы, радиационная обработка, радиотерапия. Применяются для лечения рака; улучшения свойств материалов, стерилизации медицинского оборудования; сохранения пищевых продуктов; борьбы с загрязнениями. Около 7 тыс. установок в мире (6 тыс. в больницах, 1 тыс. для улучшения свойств материалов, стерилизации и предотвращения загрязнений).

■ **Синхротронные источники излучений.** *Применение:* Исследования. Используются в материаловедении и науках о жизни. В мире менее 50 установок.

УСКОРИТЕЛИ ИОНОВ

■ **Нейтронные генераторы.** *Применение:* Нейтронно-активационный анализ. Используются при каротаже скважин; контроле и анализе промышленных процессов; детекции взрывчатых веществ и наркотиков.

■ **Установки ионной имплантации.** *Применение:* Обработка материалов пучком ионов. Используются при изготовлении компьютерных микросхем; для повышения коррозионной и износостойкости; в имплантации искусственных суставов человека. В мире около 7 тыс. таких ускорителей.

■ **Ускорители ионов низкой и средней энергии.** *Применение:* Ионно-пучковый анализ и ускорительная масс-спектрометрия. Используются для детекции следов элементов; производства радионуклидов для медицинской диагностики и терапии; лечения раковых заболеваний ионными пучками. В мире несколько сот таких ускорителей.

■ **Источники нейтронов скалывания.** *Применение:* Исследования. Используются для разработки материалов высоких технологий; трансмутации ядерных отходов. В мире примерно десять таких ускорителей.

традиционным приемам поверхностного анализа, а уникальные свойства делают их незаменимыми для решения определенных проблем. Они позволяют анализировать широкий спектр образцов в таких областях, как материаловедение, искусство, археология и биология.

МАГАТЭ поддерживает ряд проектов по их использованию в государствах-членах.

■ **Словения.** По проекту технического сотрудничества сооружена современная установка АИП для исследований и обучения в Институте им. Йозефа Штефана в Любляне. Институт планирует оснастить ускоритель пятью пучковыми каналами для применения методов АИП, выполнения программы обеспечения качества этих методов и затем для оказания аналитических услуг исследовательским учреждениям и промышленным предприятиям.

Два пучковых канала уже находятся в действии, и строится канал ядерного микроронда для анализа различных образцов с использованием протонных пучков микрометрового и субмикрометрового размера. Эти системы позволят облегчить измерение пространственного распределения следов элементов, напри-

мер в материалах для электронных и микрoeлектронных устройств. Еще один канал готовится для использования методов RBS и ERDA с целью проведения измерений при изучении тонких слоев, твердых покрытий и других материалов.

■ **Израиль.** Агентство оказало помощь Израилу в усовершенствовании имеющихся ускорителей для различных применений. Диапазон использования ускорителя Ван-де-Граафа на 3 МэВ в Вейцмановском институте был расширен путем приспособления двух из его трех каналов для ионно-пучкового анализа, применяемого при контроле воздуха, воды и опасных материалов. Один канал готовится для применения методов PIXE, PIGE (корпускулярно индуцированное гамма-излучение) и RBS.

■ **Иран.** Агентство оказало помощь Ирану в усовершенствовании аналитических возможностей лаборатории с ускорителем Ван-де-Граафа в Центре ядерных исследований Организации по атомной энергии в Тегеране путем ее оснащения ядерным микророндом.

Агентство также оказало поддержку проектам координированных исследований, связанным с использованием АИП, во мно-

гих других странах, включая Бразилию, Грецию, Ливан, Мексику, Португалию, Румынию, Таиланд, Хорватию и Чили.

Лаборатории МАГАТЭ в Зайберсдорфе, Австрия, используют специально приспособленный канал ускорителя Ван-де-Граафа в Институте им. Рудьера Босковица (Загреб, Хорватия) для анализа проб окружающей среды и в рамках проекта дополнительно помогают в разработке там канала для ионного микроронда. Агентство также поддерживает проект координированных исследований по анализу полупроводниковых материалов с помощью АИП и готовит публикацию технического документа по методам PIXE и RBS.

Ускорительная масс-спектрометрия (УМС). Это наиболее чувствительный метод треисерных анализов с чувствительностью обнаружения в некоторых случаях несколько частиц на триллион. Ускорители для УМС схожи с ускорителями для АИП, но требуется более тонкая технология источника ионов и на выходе высокой энергии.

В мире имеется около 50 лабораторий, использующих собственные системы УМС. Метод имеет две привлекательные особенности — возможность анали-

за образцов с очень малыми объемами и использование стабильных нуклидов вместо радиоактивных.

УМС является одним из самых быстрых методов углеродного анализа (30 мин. против нескольких недель при методах традиционного датирования) и требует лишь пробы в несколько миллиграммов вместо нескольких граммов при обычных методах. УМС используется также с космогоническими нуклидами — бериллием-10, алюминием-26 и йодом-129 — и будет находить все более широкое применение в исследованиях по океанографии, палеоклиматологии и геогидрологии (ресурсы подземных вод).

Углерод-14 может использоваться в качестве изотопной метки в биологической системе с чувствительностью в 1 млн. раз выше по сравнению с традиционными методами сцинтилляционного счета. Примеси железа, исчисляемые одной частицей на миллиард частиц кремния при изготовлении микросхем, могут создать проблемы, и УМС используется для диагностики содержания примесей.

■ **Израиль.** МАГАТЭ оказало помощь Ракахскому институту физики при Еврейском университете в Иерусалиме по разработке процедур определения содержания стронция-90 в пробах окружающей среды методом УМС с использованием ускорителя в Вейцмановском научном институте. Агентство предоставило специалистов, возможности для профессиональной подготовки и некоторое оборудование для совершенствования существующих установок.

Технико-экономическое обоснование проекта показало, что использование метода УМС позволит увеличить предел обнаружения стронция-90 в два раза по сравнению с бета-счетом. Усовершенствование процедуры подготовки проб способно еще

более усилить чувствительность метода УМС. Результатом проекта стало улучшение характеристик установки в отношении обнаружения следов элементов в пробах окружающей среды.

■ **Производство радиоизотопов.** Методы производства радиоизотопов с использованием ускорителей служат равноценной альтернативой применению в этих целях реакторов деления. Обычно для производства этих изотопов в качестве ускорителей используются циклотроны, дающие пучки протонов от 15 до 60 МэВ. Полученные на ускорителе короткоживущие радиоизотопы широко применяются в ядерной медицине благодаря снижению дозы облучения больного. Для позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ) используются такие изотопы как фтор-18 и натрий-22 (в медицинской диагностике и исследованиях), галлий-67 в солях лимонной кислоты, генераторы рублидия-81 / криптона-81m (для просвечивания легких), а также различные изотопы йода, особенно йод-123. Радиофармацевтические препараты на основе этих короткоживущих изотопов обеспечивают максимум диагностической информации при минимальных радиоактивных отходах. Агентство поддерживает ряд исследований и проектов технического сотрудничества в этой области.

■ **Израиль.** Циклотрон для производства радиоизотопов был установлен в радиохимических лабораториях Медицинской организации "Хадасса". Агентство помогает в создании установок по производству радиофармацевтических препаратов, меченных фтором-18, которые применяются при диагностике кардиологических, онкологических, неврологических и психических заболеваний.

■ **Аргентина.** Агентство помогает Аргентине в разработке циклотронного производства ра-

диофармацевтических препаратов с йодом-123 высокой чистоты для национальных служб ядерной медицины.

■ **Иран.** В Иране осуществляются проекты технического сотрудничества по налаживанию циклотронного производства короткоживущих радиоизотопов титана-201, галлия-67, криптона-81 и йода-111. Следующая линия препаратов на базе фтора-18 и йода-123 будет использоваться для позитронных томографов.

■ **Терапия рака.** В мире установлено около 6 тыс. линейных ускорителей электронов для лечения рака, для этой цели также применяются и несколько ускорителей протонов (см. статью на стр. 33). В качестве одного из своих мероприятий Агентство недавно провело совещание Консультативной группы по протонной терапии.

■ **Источники нейтронов скалывания.** Когда пучки протонов из мощных ускорителей попадают на мишени тяжелых металлов, таких как свинец, многие нейтроны испускаются (путем "скалывания"). Качество экспериментов по рассеянию нейтронов ограничено мощностью нейтронного потока.

Мощные нейтронные потоки необходимы для ряда применений, таких как:

■ **Рассеяние нейтронов для анализа материалов.** Поскольку нейтроны могут глубоко проникать в материал, нейтронное рассеяние широко используется для определения внутренней структуры керамики, сплавов металлов, магнитных материалов, сверхпроводников и биологических образцов.

■ **Облучение для испытаний материалов.** Потоки нейтронов высокой энергии требуются для испытания срока службы материалов в активных зонах реакторов деления и в стенках термоядерных реакторов.

■ **Трансмутация радиоактивных отходов.** Источники нейтронов



скалывания могут использоваться для выжигания избытка актинов из отработавшего топлива реакторов деления или для переработки оружейного плутония.

Медицинская терапия. Высокая энергия нейтронного источника позволяет сократить необходимое время облучения больного при лечении методом захвата нейтрона бора. Поскольку мощные источники нейтронов скалывания дороги, их нейтронные пучки часто используются совместно многими пользователями из нескольких стран, и международное сотрудничество здесь особенно важно.

Ускорители электронов и синхронные источники излучений. Обработка пучком электронов является многоцелевым экономичным методом улучшения физических, химических или биологических характеристик многих материалов. Типичная энергия пучка колеблется от 0,3 до 10 МэВ при типичной мощности пучка от 1 до 100 кВт. Электроны ионизируют атомы, нарушая химические связи и вызывая химические реакции, смещение атомов или стерилизацию.

Диапазон применения этих методов включает, например, образование межмолекулярных

полимеров; вулканизация резины; деполимеризация целлюлозы; консервирование пищевых продуктов; обработка покрытий; модификация текстильных тканей; привитая сополимеризация пленок, волокон и бумаги; полупроводниковые модификации; и стерилизация предметов медицинского снабжения.

Специально спроектированные системы с использованием электронных пучков применяются для удаления загрязнителей из отходящих газов. Большинство электростанций работает на ископаемом топливе, от сжигания которого образуются дымовые газы, содержащие окислы азота и серы, вызывающие эмфиземы и кислотные дожди. В Польше проходят испытания по использованию электронных пучков для удаления этих загрязнителей из дымовых газов. В результате осуществления проекта в Иране будет построена национальная установка с ускорителем электронов для внедрения процессов обработки с применением электронных пучков и развития технологий промышленного производства полимерных материалов.

Ускорители электронов используются также для анализа материалов. Электронные пучки из таких установок, как микротроны или линейные ускорители с энергиями свыше 25 МэВ, могут применяться для производства гамма-лучей высокой энергии с целью активации фотонов в различных образцах, которые

связей в изоляции проводов и кабелей; сшивание полимеров в пластиковых пленках, пенопласте и трубках; дезинфекция отстоя сточных вод и жидких отходов; модификация балковых

затем могут подвергаться анализу на концентрацию элементов.

Синхротронные ускорители электронов высоких энергий (в несколько ГэВ) могут использоваться в качестве источников яркого светового излучения синхротрона, которое применяется для анализа структуры многих материалов, как органических, так и неорганических. Агентство сотрудничает с Международным центром теоретической физики в Триесте, Италия, с целью предоставления возможностей для обучения специалистов из развивающихся стран применению синхротронного излучения в различных областях.

УСТОЙЧИВЫЙ ПРОГРЕСС

Используя разнообразные механизмы, МАГАТЭ оказывает помощь государствам-членам в применении плазменных технологий и использовании ускорителей в разных областях. Эти технологии дают практические выгоды в промышленности, научных исследованиях, мониторинге окружающей среды, образовании и здравоохранении, что способствует осуществлению национальных планов и стратегий устойчивого развития.

В дополнение к помощи государствам-членам в разработке их собственных установок для применения плазменных технологий и использования ускорителей Агентство может способствовать развитию международного сотрудничества в эксплуатации крупных установок, строительство которых для многих стран было бы слишком дорогостоящим, таких как синхротронные источники излучений или установки для использования нейтронов скалывания. В следующем десятилетии ожидается расширение применения плазменных и ускорительных технологий и потребуется более тесное сотрудничество, чтобы еще больше стран могли пользоваться благами всего спектра их использования. □

Фото: Ускоритель с выходом пучка электронов в Университете Майями/Мемориальном медицинском центре им. Джексона предназначен для дезинфекции отходов инфекционных больниц.