

## II Международная конференция по электронным и ионным пучкам большой мощности

Вторая конференция проходила в октябре 1977 г. в Итаке (США). В ней участвовали 206 делегатов из США, СССР, Франции, Израиля, Японии, Великобритании, Нидерландов и ФРГ. Было представлено 74 доклада по следующим направлениям исследований.

**Исследования по УТС с инерциальным удержанием плазмы при нагреве мишеней пучками электронов и ионов.** В отличие от первой конференции, на которой рассматривалось несколько работ по расчету конкретных типов мишеней, на второй обсуждалось четыре доклада об экспериментальных исследованиях и один — о расчете мишеней.

В докладе Р. Бангертера и Д. Микера (Ливерморская лаборатория им. Лоуренса, США) впервые указывалось на необходимость учета влияния магнитного поля внутри мишени на процессы в ней и, в частности, на отношение энергии, выделившейся в реакции, к вложенной. Магнитное поле, создаваемое, например, током, идущим по диаметру мишени, может улучшить термоизоляцию, а при большом сжатии (и большой напряженности магнитного поля) приведет к захвату  $\alpha$ -частиц, более сильному нагреву мишени и увеличению энергетического выхода. Об экспериментах с подобными мишенями рассказывалось в докладе Дж. Чанга и др. (Сандиевские лаборатории, США). Магнитное поле в мишени создавалось предимпульсом, взрывавшем нить из дейтерированного полиэтилена диаметром 25 мкм, которая была натянута по диаметру 3-мм мишени с толщиной стенки 0,3 мм. Был зарегистрирован выход нейтронов  $(0,5-2,5) \cdot 10^7$  в импульсе при облучении пучком током 250 кА при энергии 1 МэВ и длительности 100 нс. В контрольных опытах с преднамеренно испорченными мишенями (например, несимметрия) нейтроны зарегистрированы не были, что авторы считают доказательством их термоядерного происхождения.

Два других доклада, представленные этой же лабораторией, посвящены расчетам и экспериментам по динамике мишеней и нагреву оболочки. Исследовались устойчивость сжатия мишеней и увеличение вклада энергии электронного пучка в тонкие фольги, экспериментально обнаруженное в ИАЭ им. Курчатова. В расчетах увеличение вклада энергии было обусловлено многократным прохождением электронов через фольгу туда и обратно из-за отражения от виртуального катода за анодом. Экспериментальные результаты по удельному вкладу энергии на установке «Гидра» ниже расчетных из-за сравнительно слабой фокусировки, а на «Прото-1», где достигнута удельная мощность до  $16 \cdot 10^{12}$  Вт/г, кажется, подтверждают расчеты. В докладе П. Джиллада и др. (Израиль) повышены удельного вклада энергии в тонкую мишень связывают с проникновением магнитного поля пучка в вещество мишени, превращающем траекторию электронов в спираль, и увеличением длины траектории в поверхностных слоях мишени.

**Фокусировка электронных пучков.** Экспериментальными исследованиями доказана плодотворность использования небольших конических катодов и малых расстояний между анодом и катодом (несколько миллиметров). Явно выделенный центр в геометрии диода обеспечивает хорошее центрирование пятна фокусировки и лучшее сжатие пучка. Закорачивание диода

плазмой предотвращается уменьшением амплитуды предимпульса до значения, меньшего 3—4% амплитуды основного импульса (СССР, Франция). В докладах отмечалось влияние (ФИАН, установка ЭРТ) состояния поверхностных слоев анода на процессы образования плазмы в диоде, режим его работы и фокусировку пучка. Многократное воздействие на анодную пластину электронного пучка пониженной мощности обезгаживает поверхностные слои анода и удлиняет время работы диода до закорачивания. Достигнута плотность тока до  $10^7$  А/см<sup>2</sup> и удельная мощность  $5 \cdot 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> в пятне фокусировки диаметром 1 мм (ИАЭ им. Курчатова, установка «Кальмар»). О влиянии плазмы, которая образуется из газов и паров, абсорбированных материалом анода, сообщалось в докладе Ж. Кабе и др. (Франция). Исследователями зарегистрирована скорость стягивания электронного пучка в режиме фокусировки до  $5 \cdot 10^8$  см/с.

В докладе П. Миллера и др. (Сандиевские лаборатории), посвященном распространению и сложению пучков в плазменных каналах, излагались трудности, встретившиеся при фокусировке пучков в диодах с большим отношением радиуса кольцевого катода  $R$  к зазору анод — катод ( $R/d \geq 1$ ). В них достигается фокусировка в пятно радиусом около  $0,1 R$ , причем пучок может быть азимутально несимметричным, а его центр перемещается по аноду от импульса к импульсу и даже во время одного импульса. Велики также потери (до 50%), обусловленные ионным током с анода.

**Получение, транспортировка и фокусировка ионных пучков.** Получение мощных ионных пучков током в десятки и сотни килоампер — новое направление исследований. Начало работ относится к 1973 г., когда в Корнеллском университете (США) был получен пучок протонов током 0,5 кА при энергии 100 кэВ в импульсе длительностью 50 нс. Вскоре ток был увеличен до 6 кА при энергии протонов 300 кэВ, эффективность перевода энергии, подводимой к ионной пушке, в энергию выведенного ионного пучка повышена до 42% (в настоящее время она близка к 100%). Интерес к ионным пучкам связан с некоторыми преимуществами, которые они обеспечивают в экспериментах по УТС с инерциальным удержанием: снижается требуемая мощность пучка, отсутствует тормозное излучение и прогрев мишени, легко компенсируется пространственный заряд ионного пучка, группировкой ионного пучка укорачивается импульс.

На конференции были представлены экспериментальные работы по генерации ионных пучков. По методу уменьшения электронного тока в диоде, который в обычном двухпоточковом диоде Ленгмюра превышает ток протонов в 43 раза, работы можно разделить на три группы: 1) использование магнитной изоляции внешним полем; 2) применение рефлексного триода, т. е. обеспечение осцилляции электронов, многократно проходящих через анод с большой прозрачностью; 3) использование «самоизоляции» (т. е. ограничение тока) электронного потока в случае его сильной фокусировки.

В докладе Р. Судана и др. широко освещались проблемы, решаемые в лаборатории плазменных исследований Корнеллского университета, которая является ведущей в понимании физики явлений и методике



эксперимента. В частности, в лаборатории разработаны методы создания плазмы, имитирующей ионы. На ускорителе «Нептун-С» проведены первые опыты по геометрической фокусировке ионного пучка в цилиндрической геометрии. Магнитная изоляция осуществлялась аксиальным полем, пучок ионов с анода проходил через прорези в катоде и фокусировался в приосевой области. Ток протонов энергией 300 кэВ достигал 100 кА, максимальная плотность тока в фокусе — 300 А/см<sup>2</sup>, что соответствует 10-кратному сжатию. Дальнейшему сжатию препятствует отклонение ионов в магнитном поле при ускорении в анодно-катодном промежутке. Для компенсации этого эффекта планируется применить магнитное поле обратного направления внутри катода. Аналогичные эксперименты, но со сферической фокусировкой будут проведены на мощных ускорителях Сандиевских лабораторий («Прото-1» и «Прото-2»). На установке «Гермес» получен ток протонов 20 кА при энергии 4 МэВ (полный ток диода 120 кА) и  $7 \cdot 10^{16}$  нейтронов в импульсе. Начаты работы (доклад С. Хамфриса) по созданию сильноточного ионного ускорителя энергией до 100 МэВ.

В научно-исследовательской лаборатории Военно-Морского флота (США) проведен эксперимент по получению рекордного тока протонов 300 кА на ускорителе «Геймбл II». Ток сфокусированного пучка электронов составлял также 300 кА. Получено более  $10^{17}$  дейтронов в импульсе, и 50% из них сфокусировано в пятно площадью 2 см<sup>2</sup>. Плотность тока дейтронов достигала 70 кА/см<sup>2</sup>. Работа, выполненная в лаборатории фирмы «Максвелл» (США), посвящена получению мощного ионного пучка в системе с ловушкой в магнитном поле пробочной геометрии, заполненной электронами, которые колеблются между диодом ускорителя и виртуальным катодом в конце ловушки. Получено  $10^{11}$  нейтронов в одном импульсе при взаимодействии пучка дейтронов с мишенью из дейтерированного полиэтилена. По оценке, ток дейтронного пучка достигал 300 кА.

Получению ионных пучков микросекундной длительности были посвящены два доклада. Х. Флейшманн (Корнеллский университет) сообщил о получении тока протонов 15 кА при энергии 1 МэВ и длительности 2 мкс. В докладе Д. Прони и др. (Ливерморская лаборатория) описан опыт получения в простой геометрии рефлексного триода со сверхтонким анодом плотности тока протонов до 200 А/см<sup>2</sup>.

Три доклада касались разработки уже известных предложений об использовании пучков многозарядных тяжелых ионов от ускорителей и накопителей на высокие энергии для УТС с инерциальным удержанием.

**Взаимодействие пучков с плазмой.** Четыре доклада представляли направление, связанное с нагревом плазмы плотностью  $10^{11}$ – $10^{14}$  см<sup>-3</sup> сильноточными электронными пучками. Механизмы нагрева основаны на возбуждении колебаний и развитии неустойчивостей. Более эффективно плазма нагревается «холодным» пучком электронов (т. е. при малой поперечной скорости электронов в пучке) на начальных 20–30 см его пути в плазме. Эти выводы согласуются с результатами, ранее полученными в ИЯФ СО АН СССР. В докладе В. Бейли и др. (фирма «Физикс интернейшнл», США) в общих чертах рассмотрен проект термоядерного реактора с ловушками многопробочной конфигурации и нагревом плазмы мощным электронным пучком. Длина установки 150–300 м, энергия в пучке 40 МДж. Основные идеи проекта основываются на предложении, выдвинутом в ИЯФ СО АН СССР.

**Электронные и ионные слои для создания замкнутых ловушек.** Несколькими группами исследователей были

представлены доклады по изучению электронных и ионных слоев для создания ловушек типа «Астропа» (Корнеллский университет и лаборатория Военно-Морского флота, Нагойский университет в Японии и др.). Получены протонные пучки группами, руководимыми Р. Суданом, Х. Флейшманном и Х. Капетанакосом. Р. Судан начал эксперимент по инжекции и захвату пучка в магнитное поле. Х. Капетанакос планирует получить в 1978 г.  $5 \cdot 10^{16}$  протонов в импульсе после реконструкции ускорителя «Геймбл II». К тому времени должна быть готова установка с магнитным полем пробочной геометрии.

**Транспортировка энергии вакуумными линиями передач и пучками в плазме.** Обсуждались три возможности, по реализации которых интенсивно ведутся теоретические и экспериментальные исследования. Распространению пучка по плазменному каналу с азимутальным магнитным полем от тока внешнего источника был посвящен доклад П. Миллера и др. (Сандиевские лаборатории). Плазменный канал с током образовывался при пропускании тока по тонкой проволочке, натянутой в камере с атмосферным воздухом. Пучок транспортировался с высокой эффективностью (70%) на расстояние 1 м. Предполагается с помощью таких каналов сводить несколько пучков на мишень (сведение двух пучков продемонстрировано экспериментально на ускорителе «Гидра»). Эксперименты по транспортировке в плазменном канале с током были повторены в лаборатории Военно-Морского флота на ускорителе «Геймбл I». В докладе Ливерморской лаборатории рассматривалось распространение пучков в газе и выбор оптимального давления. Транспортировке энергии по вакуумным линиям с магнитной изоляцией было посвящено четыре доклада (ИАЭ им. Курчатова, ФИАН, СССР; Сандиевские лаборатории, «Физикс интернейшнл»). Установлено, что минимальный ток самоизоляции коаксиальной линии находится между значениями, предсказываемыми кинетической теорией и моделью потока Бриллюэна. Эксперименты по магнитной самоизоляции полосковых вакуумных линий, проведенные в США, не дали пока обнадеживающих и ясных результатов, какие были ранее получены с коаксиальными линиями.

**Коллективное ускорение ионов сильноточными электронными пучками.** Работы по этой тематике ведутся в ФИАНе, Корнеллском, Калифорнийском и Мэрилендском университетах, Сандиевских лабораториях, лаборатории Военно-Морского флота, Лос-Аламосской лаборатории (США) и др. Новое направление открывают работы по прохождению электронного пучка в вакуумных каналах с диэлектрическими стенками (ФИАН, СССР; фирма «Спир-корпорация», лаборатория Военно-Морского флота). Пучок распространяется за счет концентрации ионов около оси канала вследствие ускорения их потенциалом электронного пучка из плазмы, образующейся за счет распыления головной части электронного пучка. Обнаружены ускоренные в направлении распространения электронного пучка ионы (до  $10^{13}$  при 4 МэВ). К этим работам тесно примыкают исследования по ускорению ионов в вакууме за диэлектрическим анодом, впервые обнаруженные экспериментально Дж. Люсом. Опыты повторены еще в двух лабораториях, причем получены ионы высокой энергии. По два доклада посвящено ускорителям с электронными кольцами и автоускорению.

**Технология ускорителей и получение пучков.** В докладе Т. Мартина и др. (Сандиевские лаборатории) сообщалось о состоянии наладочных работ на ускорителе «Прото-2» (энергия 1,5 МэВ, ток 4,5 МА и длитель-



ность импульса 20—80 нс.) Здесь же разрабатывается ускоритель для проведения демонстрационного эксперимента по нагреву мишеней пучком мощностью  $(30-40) \times 10^{12}$  Вт. Сейчас принята модульная структура ускорителя, аналогичная компоновке советской установки «Ангара-5», но с 36 модулями. В докладе К. Престевича и др. (Сандиевские лаборатории) рассматривалась разработка ускорителя, работающего с частотой повторения импульсов 100 Гц (энергия 350 кэВ, ток 30 кА, длительность импульса 30 нс). Он испытан при средней мощности 15 кВт и частоте повторения импульсов 100 Гц. Доклад И. Витковидского и др. (лаборатория Военно-Морского флота) был посвящен разработке индуктивных накопителей для сильноточных ускорителей.

**Применение мощных пучков для генерации СВЧ-излучения, возбуждения лазеров и др.** Сильноточные электронные пучки широко используются для генерации СВЧ-излучения с мощностями, недоступными пока другим методам. На конференцию было представлено пять докладов по этой тематике. Уровень мощности генерации возрос сейчас до гига watt в сантиметровом диапазоне. Характерным является переход

в новую перспективную область милли- и субмиллиметровых волн. Для генерации в этом диапазоне применяются когерентное рассеяние (отражение) СВЧ-волн на неоднородностях сильноточного пучка релятивистских электронов. В лаборатории Военно-Морского флота получено излучение мощностью 5 МВт на частоте 50 Гц. Еще более коротковолновое излучение получают с использованием вынужденного комбинационного рассеяния СВЧ-излучения на пучке в магнитном поле (1 МВт на длине волны 400 мкм).

Конференция показала быстрое развитие многих направлений исследований с мощными пучками. Особенно впечатляет получение ионных пучков гигантских мощностей ( $> 10^{11}$  Вт), что открывает новые возможности в исследованиях по УТС с инерциальным удержанием, созданию мощных источников нейтронов и т. д. К следующей конференции, которую предполагается провести в 1979 г. в СССР, следует ожидать еще большего расширения тематики исследований и увеличения числа лабораторий и стран, ведущих работы с сильноточными пучками.

ПАПАДИЧЕВ В. А.

## VI Международный симпозиум МАГАТЭ по неупругому рассеянию нейтронов

Симпозиум, посвященный исследованиям в области физики конденсированного состояния вещества, состоялся в октябре 1977 г. в Вене. В нем участвовали более 250 специалистов, было заслушано 79 докладов.

В докладах, посвященных источникам медленных нейтронов (С. Виндзор, Д. Стирлинг, Великобритания) отмечалось, что следующий этап их развития связан с созданием мощных импульсных установок на базе сильноточных протонных ускорителей высоких энергий (~1 ГэВ). Источники такого типа несомненно будут иметь существенные преимущества перед высокопоточными стационарными реакторами, особенно в исследованиях с эпитепловыми нейтронами. В настоящее время несколько таких ускорителей строится и проектируется.

В последние годы значительное внимание уделяется развитию работ с ультрахолодными нейтронами (УХН). На симпозиуме обсуждалось получение, хранение и первые экспериментальные результаты. В докладе В. И. Луцкова (ОИЯИ, Дубна) был дан обзор работ, выполненных в СССР, по созданию конверторов УХН и сохранению их в различных условиях. Эффективными генераторами оказались низкотемпературные водяные конверторы без контейнера. Основной причиной «гибели» УХН при хранении, по-видимому, является их взаимодействие с атомами водорода, содержащимися на внутренних поверхностях даже в условиях высокого разрежения. Одним из возможных способов увеличения жизни УХН является их изоляция магнитным полем от поверхностей стенок.

Дальнейшее повышение эффективности использования нейтронов на пучках стационарных реакторов связано с созданием более сложных экспериментальных установок.

В докладе Г. Шторника (ФРГ) описывался прибор, который в отличие от стандартных трехосных спектрометров включает 30 анализирующих кристаллов и наз-

ван 30-осным. Управление такими спектрометрами осуществляется только с использованием ЭВМ.

Создание высокопоточных исследовательских реакторов типа HFR в Гренобле (Франция) позволяет использовать вместо сложных позиционных и двумерных детекторов фотографирование нейтронов на пленку, засвечиваемую сцинтиллятором (Д. Хохлвейн, ФРГ).

Молекулярная спектроскопия на симпозиуме была представлена наибольшим числом докладов. Последние успехи в создании нейтронных спектрометров с высоким энергетическим разрешением ( $10^{-8}$ — $10^{-7}$  эВ) дали возможность нейтронным методам не только конкурировать с классическими оптическими методами, но и превзойти их по точности и чувствительности. Наибольшее внимания в молекулярных системах заслуживают низкоэнергетические переходы, связанные с вращательными движениями различных молекулярных групп (К. Ларссон, Швеция; Д. Катаока, ФРГ), вращательная диффузия, туннелирование (С. Клоуж, Франция). Такая информация позволяет более корректно судить о вращательных потенциалах (А. Хюллер, ФРГ), правилах отбора при энергетических переходах, процессах перехода от квантомеханического поведения системы при низкой температуре к движению классическому при высокой температуре (М. Прагер, ФРГ).

В формировании межатомного взаимодействия в металлах и сплавах существенную роль играют электроны проводимости. Впервые было экспериментально показано, что в случае алюминия существенное влияние на формирование особенностей дисперсионных соотношений для фононов оказывает так называемое трехчастичное взаимодействие между ионами через электроны проводимости (А. Ю. Румянцев, СССР). В случае сплавов на основе меди с примесью кремния, галлия, германия общий характер дисперсионных соотношений определяется числом валентных электронов на атом сплава (Л. Ромта, Венгрия).