

тально предложенные механизмы ускорения не проверялись. В связи с появлением сильноточных электронных ускорителей интерес к этим опытам возобновился. Несколько американских групп обнаружили, что при пропускании электронного пучка через дрейфовую камеру, заполненную газом при низком давлении, появляется значительное число ионов данного газа, вырванных от нескольких до нескольких десятков миллионов электронвольт в зависимости от сорта газа. Число ускоренных ионов достигало 10^{14} в одном импульсе. Как показал настоящий симпозиум, процесс такого ускорения во многом еще не поддается контролю и данные, получаемые различными группами, противоречивы. Можно отметить только, что длины ускорения малы (единицы сантиметров), а следовательно, напряженности ускоряющих полей велики.

Было высказано несколько гипотез, в принципе объясняющих процесс ускорения. В ближайшее время как у нас, так и за рубежом предполагается провести кардинальные опыты по их проверке. Это позволит, по-видимому, управлять процессом ускорения и откроет возможность создания эффективных ускорителей на энергии до 100 Мэв с интенсивностью до 10^{15} ионов в импульсе.

Получение и формирование сильноточных электронных пучков. Большое значение для развития коллективных методов ускорения имеет прогресс в создании сильноточных электронных ускорителей. Важным фактом является ввод в действие установок, дающих возможность генерировать электронные пучки с током в десятки килоампер, и начало экспериментов на этих установках. На симпозиуме сообщалось об ускорителе «Импульс» с током 30 кА (ФИАН СССР), «Тонус» с током 50 кА Томского политехнического института и ускорителе с током 50 кА Научно-исследовательского института электрофизической аппаратуры (НИИЭФА). Первые опыты, проведенные на этих ускорителях, дают основание надеяться, что они послужат хорошей базой для экспериментов по коллективному методу ускорения. Было рассказано также о новых ускорителях, используемых для образования электронных колец. Такие ускорители создаются в Дубне и НИИЭФА.

О последних достижениях в строительстве сильноточных ускорителей в США, в частности о нескольких

установках, вступивших в строй в прошедшем году, рассказал А. Колб. Наиболее крупные из них — «Блек Джек» и «Аврора». Они способны генерировать электронные пучки с током $1-1,2$ млн. a при энергии $10-12 \text{ Мэв}$. «Аврора» служит источником γ -излучения чрезвычайно высокой плотности.

Кроме указанных основных направлений, на симпозиуме были обсуждены некоторые новые идеи создания ускорителей, работающих на коллективном принципе. Все эти идеи находятся в начальной стадии проработки, и поэтому о них только коротко упомянем.

А. А. Коломенский провел расчеты по системе «Гиротрон». Общая идея этой системы заключается в том, чтобы, используя электромагнитное поле специального типа, придать электронному пучку замкнутую конфигурацию и заставить его обращаться как целое. В такой пучок могут захватываться ионы. За счет обращения пучка как целого и проскальзывания вдоль него ионов их энергия возрастает. Расчеты показывают, что до малых γ такое ускорение возможно.

В докладе М. С. Рабиновича были обсуждены некоторые забытые возможности ускорения — ускорение в электронных потоках и ударное ускорение. В связи с бурным развитием сильноточных электронных ускорителей такое напоминание кажется не лишним, так как работы в этом направлении представляются перспективными. Интересно также использование для ускорения уединенных нелинейных волн — солитонов. Исследования в этом направлении позволят получить ускоряющие поля до $10\,000 \text{ Мэв}$.

Н. Ростокер (США) рассмотрел возможность построения ускорителя тяжелых ионов типа «Хипак» с использованием релятивистских пучков, что существенно облегчит задачу получения требуемых плотностей электронов в торе.

Были обсуждены высказанные ранее предложения по автоускорению электронов и возможность использования сканирования пучка.

Таким образом, симпозиум показал, что коллективные методы ускорения чрезвычайно перспективны и уже в ближайшие годы возможно создание высокоэффективных ускорителей.

В. П. САРАНЦЕВ

Вторая международная конференция по ионным источникам

Вторая международная конференция по ионным источникам проходила в Вене с 11 по 15 сентября 1972 г. В работе конференции приняли участие около 250 ученых из 25 стран. Наиболее крупными были делегации Франции, ФРГ, США, Австрии, Англии. От Советского Союза (вместе с ОИЯИ) было 10 человек. На 11 сессиях конференции заслушано свыше 100 докладов, в том числе восемь обзорных. Советскими учеными представлено пять докладов.

Цель конференции — обсуждение последних достижений в области физики и технологии ионных источников и их все возрастающее и многостороннее применение. Если раньше эти вопросы обычно обсуждались на конференциях, симпозиумах или совещаниях, посвященных тем установкам, на которых применяются ионные источники (ускорителям, масс-сепараторам, термоядерным установкам и др.), то начиная с 1969 г. по ионным источникам организуются специальные конференции.

Круг тем, обсуждавшихся на Венской конференции, довольно широк. Основные из них: интенсивные ионные и нейтральные пучки низкой энергии; источники многозарядных ионов; ионные источники для ускорителей на высокие энергии; источники отрицательных и поляризованных ионов; масс-сепараторные источники и источники с низкой интенсивностью и малым энергетическим разбросом ионов.

Для накопления и нагрева плазмы в магнитных ловушках требуются пучки быстрых атомов водорода (дейтерия) с эквивалентным током выше $10 a$ и мощностью больше 100 кВт . В этом случае в отличие от обычных плазменных источников с ограниченной плотностью сфокусированного ионного тока необходимо создать большую (десятки кв. см) поверхность плазмы с высокой и равномерной плотностью ионов, разработать многоапертурную ускоряющую систему, способную вытягивать и фокусировать мощные потоки ионов. Этой проблеме на конференции было уделено большое

внимание. Много докладов было представлено учеными США. Значительный прогресс достигнут в Беркли, где разработан источник без внешнего магнитного поля с большой эмиссионной поверхностью катода, расположенного на периферии разряда. В. Купер сообщил, что из разрядной камеры диаметром 13 см при токе разряда 1000 а с помощью многоцелевого экстрактора извлекается ток ионов дейтерия около 15 а при энергии 20 кэв. После перезарядки пучка на газе, выходящем из разрядной камеры, на расстоянии 3,3 м на мишень 10 × 20 см проходит эквивалентный ток 8,6 а, 85% энергии которого заключено в нейтралах.

В последние годы резко возрос интерес к источникам многозарядных ионов. Это вызвано развитием работ по ядерной физике тяжелых ионов и синтезу далеких трансурановых элементов в таких странах, как СССР, США, Франция, Англия, а также расширением работ по внедрению ионов в подложки, развитием исследований нарушений в структуре кристаллов, использованием ускоренных тяжелых ионов для биологических исследований. Об особом интересе к источникам многозарядных ионов свидетельствует то, что в Гатлинберге (США) в октябре 1971 г. была проведена Первая международная конференция по ионным источникам и ускоряющим системам многозарядных ионов.

Более 15 лет на ускорителях эксплуатируются дуговые источники многозарядных ионов как с холодными катодами, так и с подогревным катодом. Источник с подогревным катодом, разработанный в ИАЭ им. И. В. Курчатова под руководством Л. А. Арцимовича, в течение почти 15 лет эксплуатируется на циклотронах в Дубне. За это время с помощью этого источника под руководством Г. Н. Флёрва получены и ускорены интенсивные пучки многозарядных ионов, образованных как из газообразных, так и из твердых веществ вплоть до ксенона (на стенде получены многозарядные ионы до рения). Токи многозарядных ионов от этого источника во много раз превышают токи источников с холодными катодами. Поэтому источники с подогревными катодами начинают использоваться в США, Франции, Японии, Швеции. По исследованию и разработке такого источника было сделано два советских доклада (А. С. Пасюк, Б. Н. Маков), вызвавшие большой интерес.

В настоящее время в США, ФРГ, Франции весьма активно проводятся теоретические и экспериментальные исследования, а также техническое усовершенствование источников многозарядных ионов с холодными катодами и дуоплазматрона. Возникли новые идеи по созданию источников многозарядных ионов. Некоторые из них основываются на использовании магнитных ловушек, применяемых для термоядерных установок. Кроме этого, развивается методика получения многозарядных ионов с помощью лазера. Однако развитие всех новых направлений пока далеко от практического применения этих источников. Некоторый прогресс в развитии источников с магнитными ловушками был отмечен в докладе К. Джако (Гренобль, Франция). При использовании электронно-циклотронного резонанса для нагрева электронов авторам удалось наблюдать в пучке полностью ободранные атомы азота. А. Перез (Лимейл, Франция) сообщил о наблюдении ионов 13-зарядного алюминия и 24-зарядного железа, полученных с помощью лазера. Отметим, что в ОИЯИ в электронно-лучевом источнике получены полностью ободранные атомы углерода, азота и кислорода [1]. С помощью лазера в СССР (МИФИ) получены многозарядные ионы до 25-зарядного кобальта [2]. Источники, позволяющие получить полностью ободранные атомы,

представляют большой интерес для использования их как на синхротронах с целью ускорения тяжелых ионов, так и для решения других задач.

В обзорном докладе Т. Слайтера (Брукхейвен, США) обсуждались характеристики ионных источников для линейных ускорителей, служащих инжекторами протонных синхротронов. Особенность всех зарубежных ионных источников — применение в них ободренных катодов со сроком службы выше 3000 ч в условиях большой длительности импульсов тока (до 500 мксек) при частоте повторения 10—120 гц. Как правило, применяются дуоплазматроны с экспандером, хотя не исключается возможность использования источников других типов. Так, разработанный К. Тернером пенниговский источник для Брукхейвенского космотрона при токе 80 ма значительно превышает по яркости дуоплазматрон. Срок службы этого источника до 3000 ч, максимальный ток достигает 500 ма. Д. Мюллер (Лос-Аламос, США) доложил об исследовании дуоплазматрона с оптикой Пирса. При этом ускорительная колонна на 750 кэв играет роль как делителя напряжения, так и фокусирующего устройства. К. Куртис (NAL, США) сообщил об исследовании в Батевии форинжектора с пирсовой колонной на 750 кэв при токе протонов до 250 ма.

Сейчас с помощью нового линейного ускорителя «Линак» на 200 Мэв в Брукхейвене при наибольшем токе 80 ма с эммитансом 1л·см·мрад достигается интенсивность $2 \cdot 10^3$ частиц/имп. «Линак» работает с частотой 10 гц.

Можно отметить, что эксплуатационные характеристики ионных источников типа дуоплазматрона, разработанные в Научно-исследовательском институте электрофизической аппаратуры и применяющиеся на линейных ускорителях-инжекторах в Советском Союзе, выше, чем за рубежом. Так, в Институте теоретической и экспериментальной физики такой источник обеспечивает ток на входе в инжектор около 1 а.

В докладах рассматривались источники поляризованных ионов водорода, дейтерия и лития для тандемов и циклических ускорителей, основанные на известных принципах метода атомного пучка и метода Лэмба. В настоящее время в Лос-Аламосе для источника по методу Лэмба разработан способ высокочастотной банчировки пучка, извлекаемого из дуоплазматрона. При этом на выходе источника можно получить отрицательные поляризованные ионы водорода в импульсах длительностью 60 нсек с частотой следования 3 Мгц. Фирма «Дженерал ионикс корпорейшн» (США) осваивает промышленное изготовление источников отрицательных поляризованных ионов, основанных на методе Лэмба. Импульсные ионизаторы атомного пучка исследуются в Сакле (Франция) с целью разработки источника для установки «Сатурн». Лучшим признан вариант с осциллирующим электронным пучком. Разряд и ионизация атомного пучка возбуждаются импульсами сильного магнитного поля. Экстракция поляризованных ионов осуществляется перпендикулярно к направлению атомного пучка; их импульсы длительностью 500 мксек следуют через 2 сек. Эффективность ионизации $1,2 \cdot 10^{-3}$ при атомном пучке 10^{15} атомов/сек позволяет получить ток поляризованных дейтонов 200 на. Сейчас стоит цель — разработать вариант ионизатора с током до 10 ма.

Были представлены доклады и об обычном способе получения отрицательных ионов методом перезарядки. Д. Ошер (Ливермор, США) сообщил, что при перезарядке 200 ма положительных ионов на парах цезия получен ток 50 ма отрицательных ионов дейтерия.

В Мюнхене (ФРГ) из обычного перезарядного источника при пропускании ионов гелия через пары кальция, служащие для перезарядки, получено 600 на отрицательных ионов кальция при определенном подборе напряжений на электродах. Процесс их образования пока не вполне ясен. Представляют также интерес конструкции источников, позволяющих в зависимости от режима работы получать как положительные, так и отрицательные ионы. Сюда относятся модернизированные дуоплазматроны с раздельной подачей тяжелого газа в анодную область, легкого — в катодную. Этим ослабляется взаимодействие тяжелых ионов с горячим катодом. Путем прямого вытягивания из анодной плазмы получают пучки отрицательных ионов фтора, хлора и др. Ионов кислорода получено до 50 $\mu\text{ка}$ (Орсе, Франция).

Малоинтенсивные источники тяжелых ионов в последние годы все чаще используются в ядерно-спектроскопических исследованиях и в полупроводниковой технике. Обзорный доклад Т. Сидениуса (Дания) содержал общие рекомендации по применению таких источников, условно разделенных на пять групп. Из группы источников с поверхностной ионизацией был приведен источник, разработанный В. И. Райко (Дубна, СССР). Эффективность этого источника для цезия около 100%, для неодима 80%. Доклад В. И. Райко о работах по развитию указанного источника был заслушан с большим вниманием. М. Боше (Гренобль, Франция) сообщил, что модернизированный источник с круглым сечением

пучка используется для ионного легирования в ускорителе на 150 кэВ . Этот прибор работает при температуре до 3000° С без внешнего магнитного поля и позволяет получать высокое обогащение изотопов тугоплавких элементов (вольфрама, гафния, ниобия и др.).

Как уже указывалось, на конференции обсуждались не только вопросы технологии и применения ионных источников и движения ионных пучков. Так, весьма интересными были обзорные доклады Дж. Хастеда (Лондонский университет, Англия) об ионно-молекулярных реакциях; Р. Лапостолле (СNET, Франция) о возможных ухудшениях качества пучков от пространственного заряда; К. Вейсмана (Марбург, ФРГ) о плазме в ионном источнике; Дж. Долику (Гренобль, Франция) о нейтрализации пространственного заряда ионных пучков.

Предполагается, что труды конференции будут изданы в конце 1972 — начале 1973 года.

Очередную международную конференцию по ионным источникам намечено провести в 1975 г. в Дармштадте (ФРГ).

А. С. ПАСЮК

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Д. Донец и др. Препринт ОИЯИ Р7-4412, Дубна, 1968; Препринт ОИЯИ Р7-4469, Дубна 1969 г.
2. Ю. А. Быковский и др. ЖЭТФ, 60, 1306 (1971).

Международная конференция по активационному анализу

2—6 октября 1972 г. в Сакле (Франция) состоялась Международная конференция по активационному анализу и Международный коллоквиум Национального центра научных исследований Франции (CNRS) по определению микроколичеств элементов в высококистых органических и неорганических веществах и биологических объектах, организованные CNRS и Комиссариатом по атомной энергии Франции. Темы докладов конференции и коллоквиума были в значительной степени близки, но на конференции больше внимания уделялось методологии активационного анализа, а на коллоквиуме — приложениям активационных методов и полученным результатам. Работы, близкие по используемой технике, рассматривались на конференции и коллоквиуме в разные часы или дни, что позволяло участникам встречи посещать интересующие их заседания обеих секций. В регламенте коллоквиума больше времени отводилось на вопросы и дискуссии. В работе конференции приняли участие около 350 специалистов из 30 стран, представлено 86 докладов. На коллоквиум было представлено 64 доклада.

Все доклады можно сгруппировать по следующим направлениям: общие вопросы активационного анализа; методы обработки информации; активация тепловыми нейтронами и радиохимия; активация заряженными частицами и γ -квантами; регистрация мгновенных продуктов, сопровождающих ядерные реакции и ионизацию атомов; активация быстрыми нейтронами; использование изотопных источников нейтронов. С точки зрения применения активационных методов следует выделить микроанализ поверхностей; анализ высококистых металлов и полупроводниковых материалов; ис-

пользование активационных методов в биологии, науках о земле и окружающей среде.

В сообщении, сделанном на пленарном заседании в день открытия конференции и посвященном вкладу ядерных методов в анализ, В. Мейнке (США) призвал больше внимания уделять достоверности активационного анализа при определении следов элементов ниже уровня 1 часть/млн , подчеркнув при этом важность оценки возможностей метода на конкретных образцах. Докладчик отметил возросшую роль анализа, когда по его результатам принимаются важные решения, и высказал убеждение, что основная задача активационного анализа на ближайшие 10 лет — расширение достоверного следового анализа до уровня 1 часть/млрд .

Значительное место в программе встречи отводилось определению микроколичеств примесей с использованием прежде всего нейтронной активации и радиохимического выделения. Этой теме посвящено более трети всех докладов конференции и более половины докладов коллоквиума. В ряде работ (Ж. Хост, Бельгия; М. Вержейке и Ж. Верпланке, Нидерланды; Ж. Блури и др., Франция) предложены схемы определения большого числа примесей в одном образце с разделением элементов на несколько больших групп и применением Ge(Li)-детекторов. Используются наиболее эффективные методы разделения: ионный обмен, экстракция, экстракционная хроматография. В некоторых работах операции радиохимического разделения автоматизированы. В последние годы с вводом в эксплуатацию реакторов на обогащенном горючем оказалось возможным существенно повысить чувствительность анализа особо