

## IV Всесоюзная школа по физике плазмы

С 29 июля по 7 августа 1974 г. в Новосибирске проходила IV Всесоюзная школа по физике плазмы. В работе школы, ставшей традиционной и проводимой раз в два года, приняли участие около 200 советских и иностранных ученых. Тематика школы в 1974 г. — мощные пучки релятивистских электронов и их применение в исследованиях по управляемому термоядерному синтезу, а также системы для удержания и нагрева плотной плазмы. Одна из задач школы, как сказал во вступительном слове председатель Оргкомитета Г. И. Будкер, — анализ современного состояния исследований по этим направлениям. В качестве лекторов выступили ведущие ученые из СССР, США и Италии. Были также проведены семинары для более подробного и неформального обсуждения некоторых проблем: плотная плазма, коллективное ускорение ионов при прохождении пучков релятивистских электронов через газ, техника получения электронных пучков сверхвысокой мощности, взаимодействие мощных электронных пучков с плазмой. Дискуссии, возникавшие на лекциях, семинарах и в кулуарах, способствовали более полному обмену идеями и информацией и установлению тесного контакта между учеными разных стран и лабораторий.

Доклад М. С. Рабиновича (ФИАН) содержал обзор состояния термоядерных исследований в мире. Современный этап характеризуется переходом к сооружению больших установок (запуск планируется в Европе в 1977 г., в США — к началу 1980-х гг.), на которых наряду с научными проблемами будут решаться и технологические вопросы создания термоядерного реактора.

Проблемы получения мощных пучков релятивистских электронов для осуществления импульсной термоядерной реакции нашли отражение в докладе М. В. Вабыкина (ИАЭ им. И. В. Курчатова). По расчетам для этой цели требуется пучок длительностью  $\sim 1$  нсек с энергией  $10^7$  Дж (мощностью  $\sim 10^{16}$  Вт). Применение тяжелой оболочки вокруг D — T-смеси должно привести к снижению требований к пучку ( $10$  нсек,  $3 \cdot 10^6$  Дж;  $3 \cdot 10^{14}$  Вт). Для получения таких пучков целесообразно перейти к дисковым и коническим формирующим линиям с коммутацией их по периферии и помещением холоднэмиссионной пушки в центре. Чтобы обеспечить необходимую высокую скорость нарастания мощности ( $> 3 \cdot 10^{22}$  Вт/сек) потребуется уменьшить индуктивность коммутатора до 2—3 нГн, т. е. применить 100—200 разрядников, работающих параллельно. При транспортировке импульса к пушке может быть использована магнитная изоляция. Эксперименты по многоканальным коммутаторам будут продолжены в ИАЭ на новой установке «Ангара-1» (2,5 МэВ, 400 кА).

Аналогичные вопросы затрагивались в докладе А. Колба (Лаборатория фирмы «Максвелл», США). Пучки с высокой скоростью нарастания мощности могут использоваться также для возбуждения мощных газовых лазеров ультрафиолетового диапазона. Основные проблемы при создании установок, по мнению А. Колба, — разработка компактного накопителя, коммутация импульса (разрядники) и получение собственно пучка с использованием диода с холодной эмиссией. Разработано несколько типов многоканальных разрядников в воде, масле или со сжатым газом на напряжении до 5 МэВ при коммутации мощности до  $10^{12}$  Вт. Амплитуда импульса поджига составляет, как правило, 20—25% от величины коммутируемого напряжения. Уменьшение индуктивности разрядника — первейшая

задача, хотя и сам диод также вносит 20—30% от общей индуктивности. Волновое сопротивление диода хорошо описывается законом Чайлда — Ленгмюра при учете перемещения границы плазмы в диоде, т. е. изменения непроводящего зазора в нем. В новых высокоточных ускорителях электронов на средние энергии (1—2 МэВ) фирмы «Максвелл» длительность нарастания импульса напряжения составляет 5—10 нсек.

Интересные эксперименты по фокусировке высоко-точных пучков электронов были описаны в докладе И. Витковицкого (Военно-морская лаборатория, США). В этих экспериментах полый цилиндрический пучок впускали в дрейфовую камеру с боковой стенкой из изолятора и с центральным проводником в виде проволочки между анодом и вторым торцом камеры для замыкания обратного тока. Пучок фокусировался на проволочку, и далее (если проволочка тонкая) он сразу не разрушался, а следовал вдоль проволочки, даже если она была изогнута. При покрытии проволочки дейтерированным полиэтиленом получен выход  $10^9$  —  $10^{11}$  нейтр/пучк. Ток пучка в этих экспериментах составлял  $\sim 300$  кА, энергия электронов 200—400 кэВ, длительность пучка 50 нсек.

Доклад Г. А. Месяца (Институт оптики атмосферы СО АН СССР) был посвящен начальной стадии формирования плазменного катода и тока в диоде с холодной эмиссией. Определяющими здесь, по мнению автора, являются взрывная эмиссия и распространение катодного «факела» (плазмы с катода).

Результаты работ по созданию импульсных высоко-точных ускорителей электронов в Институте ядерной физики СО АН СССР доложены В. М. Логуновым. Зарядка формирующих линий осуществляется в них с помощью импульсного трансформатора Тесла; далее применяется обычная схема с разрядниками в линии и диодом с холодной эмиссией. В настоящее время работают ускорители с одинарной формирующей линией на 250 кэВ, 250 кА, 40 нсек и 800 кэВ, 110 кА. Сооружается ускоритель с двойной формирующей линией на воде на 1 МэВ, 230 кА, 60 нсек и проектируется ускоритель на 1 МэВ, 300—400 кА. Все ускорители используются или предназначены для экспериментов по взаимодействию пучков с плазмой в различных конфигурациях (в том числе многопучковых). Интересны эксперименты на моделях по повышению электропрочности воды при помощи повышения давления (в три раза при 120 атм) и экранирования микроострий на поверхности электродов при продавливании раствора электролита через поверхность электродов в приэлектродную область. В случае экранирования обоих электродов электропрочность зазора увеличивалась в 2—2,5 раза. Следует, однако, отметить технические трудности реализации последнего способа при значительных площадях электродов в действующих ускорителях.

Основное направление исследований Сандиевской лаборатории (США) — работы по использованию мощных пучков электронов для нагрева и сжатия плотной плазмы, образующейся из крупинки D — T-смеси. В докладе Дж. Ионаса «Ядерный синтез в микрочастицах D — T-смеси» приведены результаты исследований по фокусировке пучка в диоде. Расчет дает плотность тока до  $10^7$  А/см<sup>2</sup> при токе 300 кА и зазоре между анодом и катодом 2,5 мм (2,5 МэВ); на установке «Гидра» (1 МВ) получена плотность около  $0,5 \cdot 10^7$  А/см<sup>2</sup>. Проведено голографическое исследование плазмы, образующейся

при попадании пучка от кольцевого катода на полусферический анод в диоде. Показано, что плазма распределена равномерно и симметрично вокруг анода, что соответствует симметричному обжатию плазмы в такой геометрии. Планируется эксперимент по облучению частицы D — T-смеси в виде шарика с двух противоположных направлений (два катода) для получения равномерного сжатия. Для этого эксперимента специально сооружается крупный ускоритель EBFA на 3 Мэв,  $10^{12}$  вт с длительностью импульса  $\sim 20$  нсек. Он включает в себя шесть формирующих линий в виде дисков диаметром 27 м, коммутируемых специально разработанными многоискровыми разрядниками с перенапряжением, и два диода, размещаемых в центре системы. Весной 1975 г. на ускорителе EBFA планируется получить пучок.

На семинаре, посвященном технике получения электронных пучков сверхвысокой мощности, речь шла о деталях и узлах ускорителей. В ряде выступлений приведены данные по распределению тока в каналах многоискровых разрядников и некоторые их временные характеристики. Было сообщено об экспериментах с фольговыми размыкателями при работе с индуктивными накопителями, о разработке в НИИЭФА сверхточного ускорителя электронов с длинным импульсом на основе индуктивного накопителя и др.

Новые результаты по исследованию сильноточных ионных пучков были приведены в докладе Р. Судана (Корнельский университет, США). В трехэлектродной пушке (анод в середине) был получен ток протонов 2,5 ка при длительности 50 нсек и энергии 300 кэв. На более крупном ускорителе (5 Мэв) предполагается получить ток 50 ка. Такие пучки могут использоваться для нагрева плазмы, инъекции в установку «Астрон» для создания E-слоя (об этом сообщил Х. Флейшман), образования плотных ионных колец при исследовании ударных волн в твердом теле и т. д.

Обсуждались самые различные аспекты, связанные с проблемой взаимодействия пучков с плазмой: прохождение пучка через плазму, возникающие неустойчивости, механизмы эффективной передачи энергии от пучка к плазме, ускорение ионов в системе плазма—пучок—магнитное поле, взаимодействие пучка с плазмой при

наличии ВЧ-поля и др. Следует отметить, что экспериментальные исследования в этой области, очень сложные и требующие разработки специальной аппаратуры и методик измерения, уже дали значительный экспериментальный материал, который в большинстве случаев не получил еще четкого теоретического объяснения.

Сверх программы школы по инициативе А. А. Коломенского (ФИАН) был проведен семинар по ускорению ионов при прохождении сильноточных электронных пучков через газ. Дискуссии на нем выявили тенденцию к усложнению моделей ускорения (две стадии ускорения, учет влияния движения ионов и т. д.), так как ни одна из предложенных ранее моделей не удовлетворяла всем экспериментальным данным.

Были доложены основные результаты работ новосибирских физиков в области плазмы. Эти работы ведутся по разным, как правило, нетрадиционным направлениям: эксперименты по удержанию плазмы в многопролочной конфигурации, доушка с вращающейся плазмой, интенсивные пучки атомарного водорода, теоретические работы.

Обзоры теоретических представлений по взаимодействию пучков с плазмой были представлены ведущими специалистами (А. А. Рухадзе, Н. Ростокер, Л. И. Рудаков) и в значительной степени опирались на оригинальные работы авторов. Наряду с углублением аналитических исследований все большее значение имеет численное моделирование с применением мощных ЭВМ; плодотворность такого подхода была продемонстрирована при изучении сильной ленгмюровской турбулентности.

В целом работа школы показала, что мощные электронные и ионные пучки все шире применяются в исследованиях по физике плазмы и в других областях науки, а также для решения прикладных задач. Получение таких пучков, изучение особенностей их распространения в различных средах уже сейчас составляют самостоятельный и интересный раздел науки. Проведенная школа вновь подтвердила целесообразность такого всестороннего обсуждения одной или двух наиболее актуальных проблем из многих, стоящих перед физикой плазмы.

ПАПАДИЧЕВ В. А.

## Научно-технические связи

### Ознакомительная поездка советских специалистов в Швецию

3—14 сентября 1974 г. группа советских специалистов во главе с акад. А. П. Александровым посетила Швецию. Цель поездки — ознакомление с работами в области атомной науки и техники и промышленными предприятиями, производящими реакторное оборудование. Делегация посетила Государственное управление гидроэнергетики; эксплуатируемые и находящиеся в стадии пуска и строительства АЭС в Оскарсхамне и Рингхалсе; завод по производству тяжелого реакторного оборудования (корпусов реакторов, парогенераторов и т. д.) фирмы «Удкком»; конструкторско-технологический центр фирмы «АСЕА-атом», где наши специалисты ознакомились с новым заводом по производству твэлов и кассет для кипящих водо-водяных реакторов и теплофизическими стендами; горячие лаборатории, испытательный реактор R-2 и стенды Исследования

тельского центра в Студсвике «АБ Атомэнерги»; известную фирму «Сандвик» и ее заводы по производству труб для оболочек твэлов, парогенераторов и контуров реакторов, а также металлофизические лаборатории.

По просьбе делегации сверх программы была организована встреча с группой специалистов для обсуждения программ работ по безопасности АЭС, выполняемых на бывшей АЭС в Марвикене.

12 сентября А. П. Александров в Королевской академии инженерных наук перед ведущими специалистами атомной науки и техники и руководителями фирм сделал доклад «О рациональном топливном цикле в атомной энергетике», вызвавший большой интерес и сопровождавшийся многочисленными вопросами. Здесь же, в более узком кругу, состоялась итоговая