

Конференции, симпозиумы, семинары, школы

Сессия Научного совета по комплексной проблеме

«Физика плазмы» АН СССР

На очередной расширенной сессии, проходившей в Звенигороде с 11 по 17 апреля 1980 г., обсуждались наиболее важные работы по удержанию и нагреву плазмы в замкнутых и открытых магнитных ловушках, исследования по быстрым процессам, физические проблемы термоядерных реакторов, работы по плазменной электронике и вычислительной физике.

При изучении поведения плазмы в замкнутых магнитных ловушках основными вопросами являются процессы переноса, устойчивость плазмы, влияние примесей на характеристики плазмы, неомические методы нагрева. На крупнейшей в Советском Союзе установке Т-10 (ИАЭ) проведены исследования режимов с коэффициентом запаса устойчивости плазмы $q = 2$ в магнитном поле 1,5 Тл. Оказалось, что при достаточно большом удалении плазменного шнура от стенок вакуумной камеры уменьшается распыление стенок и заметно снижается поток тяжелых примесей в плазму, что позволило получить режимы с малыми значениями q , снизить потери, обусловленные излучением, и соответственно увеличить энергетическое время жизни. Была также измерена диффузия электронов и ионов аргона, импульсно инжектировавшихся на квазистационарной стадии разряда в качестве пробных частиц. Вне зоны плазменного шнура, где развиваются возмущения с модой $m = 1$, полученные коэффициенты хорошо согласуются с расчетными и скорость диффузии для всех сортов ионов примерно равна $2000 \text{ см}^2/\text{с}$. В кольцевой зоне плазменного шнура шириной 1–2 см вблизи поверхности с $m = 1$ наблюдаются резкие градиенты концентрации ионов Ar^{+17} . Эти градиенты могут быть обусловлены конвективными потоками за счет азимутальных колебаний и неоклассической диффузии с учетом изменения во времени концентрации ионов данного сорта. Возможны и другие механизмы, например дрейфовые, удерживающие примеси в такой кольцевой зоне. На установке Т-11 при инжекции в плазму быстрых атомов (мощность 600 кВт) наблюдался значительный нагрев ионов и электронов. В разрядах с током около 60 кА и $q(a) = 2,5$ были получены средние значения отношения давления плазмы к давлению магнитного поля (β_T) до 2,6%, т. е. близкие к предельным, которые дает теория возникновения баллонных мод в токамаках с круглым сечением плазменного шнура.

В ЛФТИ на новой установке «Туман-3», предназначенной для изучения нагрева с помощью комбинированного сжатия плазмы по малому и большому радиусам, проведены исследования начального этапа — омического нагрева плазмы при малых величинах продольного магнитного поля (0,5 Тл). Получен магнитогиродинамически устойчивый режим разряда при токах до 110 кА. На токамаке ФТ-1 впервые осуществлен ВЧ-нагрев плазмы за счет ввода необыкновенной волны в плазму с внутренней стороны тора и показано, что эффективность нагрева в 2,5 раза выше, чем при вводе обыкновенной электромагнитной волны с внешней стороны тора.

Ряд сообщений был посвящен рассмотрению различных схем нагрева плазмы, в том числе быстрыми магнитозвуковыми волнами в области ионной циклотронной частоты на установках Т-10, Т-15 и ИНТОР.

В теоретических работах, выполненных в ИАЭ им. И. В. Курчатова и ИПМ, исследована неустойчивость баллонных мод в токамаке с учетом диссипативных эффектов и обнаружено отсутствие порога для развития этих мод. Исследованы также равновесие и устойчивость тороидальной плазмы с высоким β и показаны, в частности, возможности осуществления режимов с высоким β и создания полоидального дивертора без диверторных обмоток.

В ФИАНе на stellaratorе «Ливень-2» исследовалось влияние материальной диафрагмы на параметры плазмы. Известно, что в этой установке сепаратриса — граничная замкнутая магнитная поверхность — расположена внутри вакуумной камеры и может рассматриваться как магнитная диафрагма. При наличии углеродной диафрагмы потери на излучение падают и их относительная доля от вводимой в плазму мощности уменьшается вдвое (с 60 до 30%) по сравнению с режимом, когда имеется лишь магнитная диафрагма. С помощью инжекции крупинок твердого водорода (диаметром 0,4, длиной 0,6–1,5 мм) в вакуумную камеру установки «Ливень-2» перед включением разряда удалось увеличить плотность плазмы в 3–4 раза.

В ИЯФ СО АН СССР ведутся теоретические и экспериментальные работы по перспективным открытым магнитным системам — амбиполярным магнитным ловушкам. Сооружается крупная установка «Амбал», где плазма будет создаваться инжекцией быстрых атомов. В ИАЭ предложена оригинальная амбиполярная ловушка, в которой присоевая область не заполнена плазмой, а амбиполярные пробки имеют конфигурацию типа ловушки Андрелеити — Фюрта. В такой системе отсутствуют нежелательные эффекты неоклассического переноса в плазме. Рассмотрены и другие открытые системы: магнитоэлектростатическая ловушка с вращающейся плазмой, ловушка со встречными полями и инжекцией плазмы. На установке «Юпитер-1 (ХФТИ) типа антипробкотрона с электростатическим запираанием щелей и осевых отверстий показано, что основным каналом потерь является поперечная диффузия, скорость которой, по-видимому, соответствует классической. В ИАЭ вступила в строй тороидальная магнитоэлектростатическая ловушка «Атолл». Основная цель экспериментов — исследование устойчивости переходного слоя плазмы и процессов переноса в нем.

В последнее время получены важные результаты при изучении систем типа плазменного фокуса. На установке МГ (ИАЭ) в режиме скользящей по аноду («убегающей») плазменной оболочки образуются потоки высокоэнергетических дейтронов. Процесс их образования, как показал анализ, аналогичен процессу рождения потоков быстрых дейтронов и нейтронов, наблюдавшихся в классических линейных Z-пинчах, и обусловлен, по-видимому, эффектом диссипации магнитного поля в области пересоединения магнитных силовых линий в разрывах токовой оболочки.

На установке «Утро» (НИИЭФА) при радиальном сжатии плазмы Θ -пинча быстронарастающим магнитным полем (10^7 Тл/с) получен плазменный шнур плотностью около $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и температурой 0,5 кэВ. Зарегистрированы также электроны и ионы со средней энергией

20 и 1,5 кэВ соответственно, которые, возможно, уско-ряются во флюктуирующих электрических полях.

С помощью электродинамического ускорителя МК-200 (ИАЭ) получены оторванные от стенок плазмопровода потоки плазмы, при встречном взаимодействии которых в однородном магнитном поле образуется полностью термализованный ступок плазмы плотностью 10^{15} см⁻³ с температурой ионов 2—3 кэВ.

В рамках международного сотрудничества под эгидой МАГАТЭ советскими учеными ведутся работы по проектированию токамака-реактора ИНТОР. В ряде сообщений рассмотрены режимы зажигания термоядерной реакции и «подкритический» режим вблизи области зажигания, начальная стадия разряда и гашение реакции, поведение плазмы в дивертормном слое.

В отдельных сообщениях анализировались различные варианты термоядерных реакторов типа токамака, например, с турбулентным плазменным бланкетом без дивертора или с выталкиванием плазменного шнура из рабочей камеры за счет баллонной неустойчивости, реактор торсионного типа. Рассматривались другие физические проблемы термоядерных реакторов.

В сообщениях по плазменной электронике основное внимание было уделено проблемам генерации сильноточных релятивистских электронных и ионных пучков, воз-

буждению электромагнитных волн сильноточными пучками и взаимодействием сильноточных электронных и ионных пучков с плазмой. Получены существенные результаты в области релятивистской сверхвысокочастотной электроники: созданы экспериментальные образцы генераторов в сантиметровом и миллиметровом диапазоне длин волн с большой эффективностью преобразования энергии электронного источника в энергию электромагнитного излучения (до 30%).

Отмечалось все усиливающееся внимание к вычислительному эксперименту в физике плазмы как современному эффективному методу исследования нелинейных явлений и решению сложных задач в области управляемого термоядерного синтеза. Наряду с методами математического моделирования на разных этапах вычислительного эксперимента широко используются аналитические методы, методы осреднения, автоматические и инвариантно-групповые методы. Такое соединение мощных современных математических методов с численными экспериментами позволяет не только моделировать процессы на отдельных установках и прогнозировать режимы работы создаваемых новых установок, но и устанавливать новые физические понятия в нелинейном мире явлений.

КУЗНЕЦОВ Э. И.

Международный симпозиум по магнитному экранированию и скивдам

Построение микроскопической теории сверхпроводимости в конце 50-х годов и обнаружение эффектов Джозефсона в сверхпроводниках в начале 60-х годов привело к созданию сверхчувствительных приборов, на базе которых развилась сверхпроводниковая электроника. Сложность явлений, представляющих собой физическую основу этой техники, носит название «слабая сверхпроводимость» в отличие, в частности, от «жесткой» сверхпроводимости, лежащей в основе столь же быстро развивающейся техники сильноточных сверхпроводящих магнитных систем. Уникальные свойства контактов на основе слабой сверхпроводимости («джозефсоновских») позволили создать сверхчувствительные измерители напряжения (до 10^{-15} В), мощности СВЧ-излучения (до 10^{-16} Вт) и, наконец, магнитного поля (до 10^{-15} Тл) *.

Прибор, измеряющий магнитное поле с такой высокой чувствительностью, получил название скивд — сверхпроводящий квантовый интерферрометрический датчик. Он был изобретен в конце 60-х годов и в настоящее время интенсивно используется в самых различных, но очень тонких измерениях. На его основе практически сформировалась новая область исследований — магнитография, или сверхчувствительная магнитометрия больших объектов. Широко ведутся измерения и анализ магнитных полей сердца, мышц и даже мозга человека; обсуждаются возможности магнитографического контроля качества твэлов ядерных реакторов, изучения процессов в химических реакторах, постановки тончайших фундаментальных физических экспериментов. По нашим оценкам, возможно применение скивдов в сейсмометрии, так как им доступны магнитные поля, индуцируемые в подземной полости, если она окружена магнитной рудой, подвергающейся статической или динамической деформации (что благодаря магнитострикции приводит к изменению намагниченности руды).

Несмотря на малые сигналы, изучаемые магнитографией, их информативность очень велика. Появляется возможность без малейшего воздействия на объект, по изме-

нению его магнитных свойств следить за самыми тонкими деталями физических, химических, биологических, геофизических явлений, часто недоступными никаким другим методами.

Симпозиум по магнитному экранированию и скивдам, о котором идет речь, был организован Низкотемпературной лабораторией Хельсинского университета технологии и проходил 12—14 мая в Отаниеме (близ Хельсинки). Участвовали 72 специалиста. Симпозиум был посвящен узкой, но самой важной для сверхчувствительной магнитометрии проблеме — созданию и использованию различных методов защиты скивдов и исследуемых объектов от внешних (прежде всего магнитных) возмущений.

До последнего времени основным типом скивда, используемым на практике, был высокочастотный — скивд с одним джозефсоновским переходом, получаемым при контакте острого ниобиевого винта с окисленной ниобиевой поверхностью. Энергетическая чувствительность скивда на единицу полосы частот выражается в постоянных Планка (h) и в этом скивде достигает $\sim 100 h$. Сейчас совершенно очевидно проявляется тенденция к изготовлению и внедрению в практику скивдов на постоянном токе. Это объясняется большими успехами, достигнутыми в изготовлении скивдов методом вакуумного напыления и фотолитографии. Энергетическая чувствительность таких скивдов, созданных в США М. Кетченом и Р. Воссом и в Нидерландах Г. Даальмансом, уже приближается к квантовомеханическому пределу (h).

В развитии электроники для скивдов наиболее заметно применение охлаждаемых жидким гелием предусилителей на GaAs-полевых транзисторах. Уровень шумов таких предусилителей меньше уровня собственных шумов скивда.

Для работы сверхчувствительных скивдов-магнитометров требуется температура ниже 9 К (желательно 4 К), что обычно обеспечивается жидким гелием, которым наполняются специальные немагнитные (и даже немагнитно-сцинтилляционные) дьюары. Однако перспектива широкого развития сверхчувствительной магнитографии требует создания приборов, обладающих достаточной автономностью без необхо-

* Поле Земли равно $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ Тл.