

ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ 2.7. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ

Программа 2.7.1. Физика высокотемпературной термоядерной плазмы (координатор акад. Э. П. Кругляков)

Учеными Института ядерной физики им. Г. И. Будкера на установке ГДЛ (газодинамическая ловушка) проведена модернизация системы инъекции атомарных пучков, в результате чего существенно выросли мощность инъекции и длительность работы инжекторов. Регистрирующая система и диагностический пучок были также модернизированы, что позволило измерять диамагнитное снижение поля в плазме с разрешением около 100 мкс в течение рабочего выстрела. Измеренная величина снижения поля соответствует β плазмы 60 % (β — отношение давления плазмы к давлению магнитного поля) в устойчивом режиме удержания. Столь высокое относительное давление плазмы впервые достигнуто в аксиально-симметричной магнитной ловушке. Для подавления поперечного переноса, связанного с возбуждением в плазме МГД-неустойчивостей, в эксперименте на установке ГДЛ был приме-

нен метод вихревого удержания (рис. 40). Нелинейное насыщение неустойчивых мод осуществлялось за счет неоднородного вращения плазмы на периферии, которое поддерживалось за счет подачи напряжения на систему торцевых электродов и радиальные лимитеры в центральной части. Показано, что для работы нейтронного источника на основе ГДЛ с требуемым потоком нейтронов необходимая величина β -плазмы 40—60 %, которая может быть получена в режимах без значительных поперечных потерь. Вследствие этого результаты данной работы имеют большое значение для физического обоснования проекта мощного источника термоядерных нейтронов D—T-реакции на основе газодинамической ловушки. Такой источник может быть использован для материаловедческих исследований по программе управляемого термоядерного синтеза, а также для управления подкритическими реакторами деления, обладающими высокой степенью внутренней безопасности.

В этом же Институте в ходе проведенной модернизации установки ГДЛ введена в строй система из восьми инжекторов баллистически сфокусированных пучков быстрых атомов водорода с полной мощностью нагрева плазмы более 5 МВт при энергии частиц 22—25 кэВ и длительности импульса 5 мс (рис. 41). Увеличение длительности импульса с 1 до 5 мс позволило изучать удержание плазмы в квазистационарных условиях, когда длительность импульса превышает характерное время продольных потерь плазмы, а также время торможения быстрых инжектированных ионов на электронах.

Учеными этого же Института проведена серия экспериментов, направленных на изучение поперечного переноса в многопробочной магнитной ловушке ГОЛ-3 (рис. 42). В принципиально новом режиме работы нагрев дейтериевой плазмы осуществлялся при помощи релятивистского электронного пучка, поперечное сечение которого было уменьшено в 10 раз по сравнению со стандартным режимом рабо-

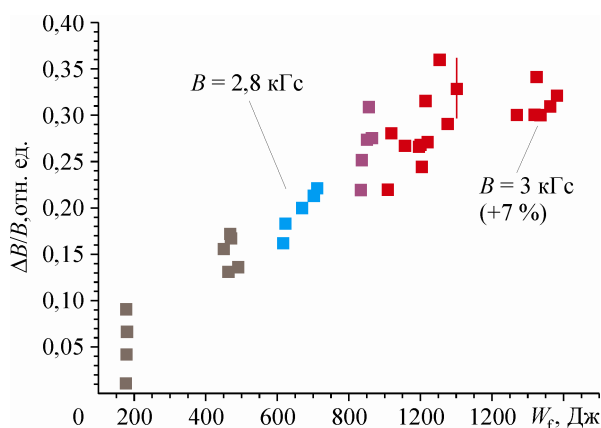


Рис. 40. Зависимость относительного изменения магнитного поля за счет диамагнетизма плазмы $\Delta B/B$ в центре плазменного столба от полной энергии популяции горячих ионов W_t . Измерения проведены при помощи пучково-спектроскопической диагностики, основанной на динамическом эффекте Штарка, для двух значений магнитного поля в центральной плоскости ловушки $B=2,8$ кГс и $B=3$ кГс. Максимальное значение $\Delta B/B = 0,37$ соответствует относительному давлению $\beta = 60$ %, среднее значение $\Delta B/B$ при $W_t > 1000$ Дж соответствует $\beta = 52$ %.

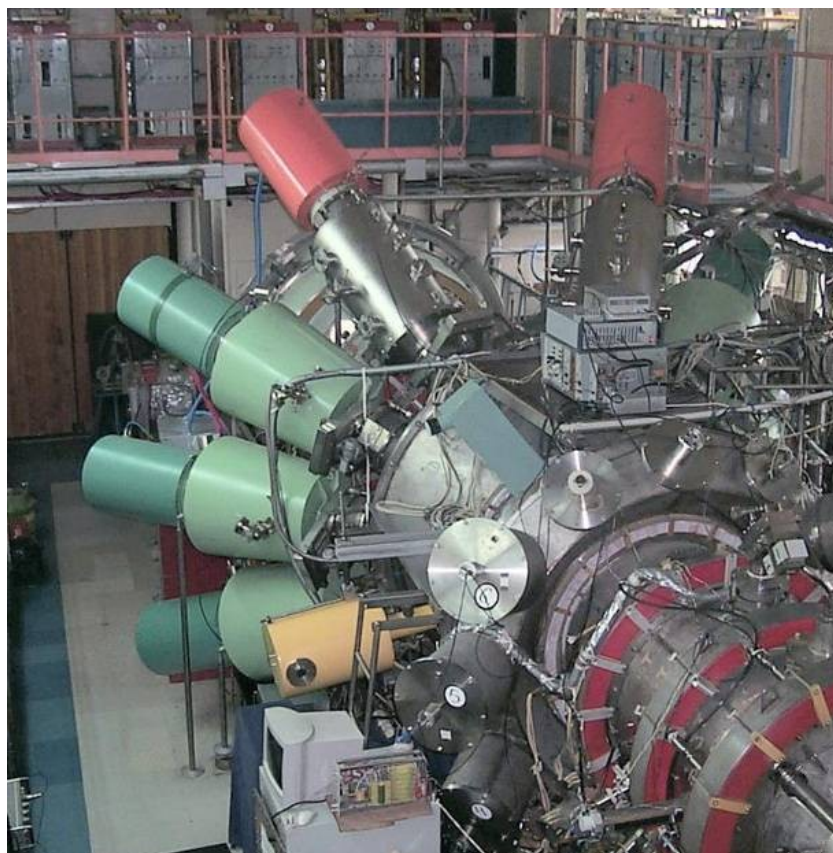


Рис. 41. Система инъекции пучков быстрых атомов на установке ГДЛ.



Рис. 42. Многопробочная магнитная ловушка ГОЛ-3.

ты. Впервые удалось провести сравнительный анализ режимов с инъекцией пучка в предварительно ионизированную низкотемпературную плазму, в газообразный дейтерий и в ва-

куум. Показано, что, несмотря на уменьшившееся поперечное сечение области нагрева плазмы, эффективность коллективной релаксации пучка в плазме достигает величины $\sim 50\%$

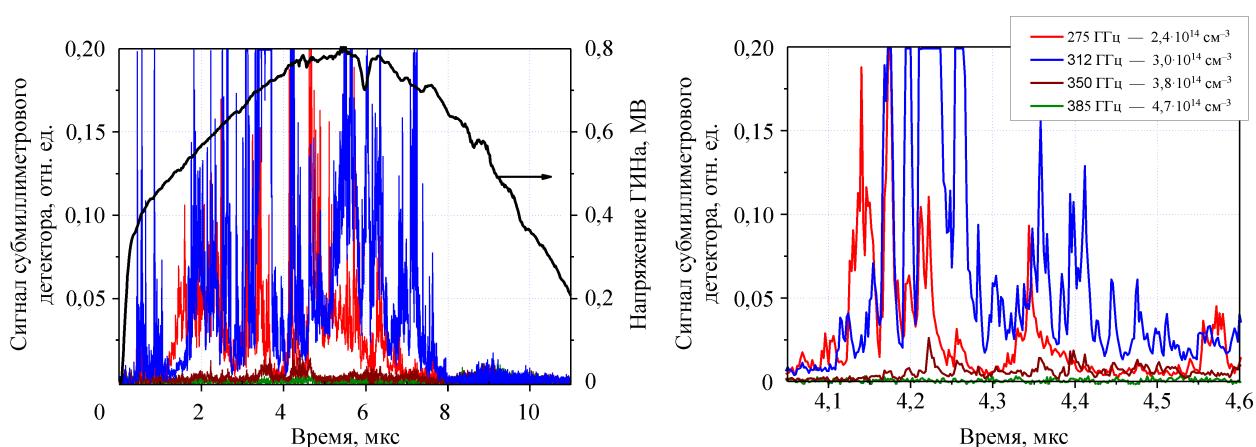


Рис. 43. Сигналы излучения плазмы плотностью $\sim 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ вблизи двойной плазменной частоты.

Слева — интенсивности излучения в различных спектральных диапазонах и напряжение на ускорителе; справа — участок осциллограммы.

при сохранении энергетического времени жизни плазмы.

В этом же Институте впервые измерен спектр субтерагерцевого излучения из плазмы вблизи двойной плазменной частоты (0,25—0,4 ТГц). Для этой цели была создана многоканальная спектральная диагностика на основе многослойных сеточных спектрально-селективных элементов и детекторов Шоттки. Зарегистрированное излучение является маркером нелинейной ленгмюровской турбулентности и возникает при слиянии двух ленгмюровских плазмонов с образованием фотона. Показано, что максимум спектра действительно соответствует двойной плазменной частоте, а длительность излучения соответствует длительности фазы пучкового нагрева плазмы. Обнаружена

нерегулярная высокочастотная структура сигнала с характерным временем в 2—10 нс. Полученные результаты представлены на рис. 43.

Учеными Института ядерной физики им. Г. И. Будкера разработаны стационарные источники отрицательных ионов водорода с током пучка более 15 мА (энергия ионов 30 кэВ) и положительных ионов водорода с максимальным током пучка до 70 мА (энергия 50 кэВ). Стационарный источник отрицательных ионов (рис. 44) по совокупности параметров (эмиттанс, газовая эффективность и др.) не имеет аналогов в мире. В сильноточном источнике положительных ионов (рис. 45) пучок формируется с помощью однодырочной ионно-оптической системы и имеет плотность тока $\sim 200 \text{ мА/см}^2$. Достигнута угловая расходи-



Рис. 44. Стационарный источник отрицательных ионов водорода.

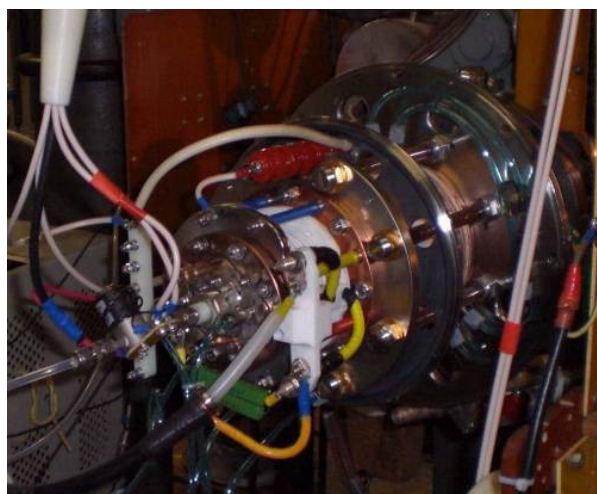


Рис. 45. Стационарный источник положительных ионов водорода.

мость пучка 9 мрад. Опробованная геометрия электродов ионно-оптической системы была оптимизирована с помощью численного моделирования. Достигнутые малая расходимость пучка и высокая плотность тока позволяют рассчитывать при увеличении числа отверстий в ионно-оптической системе на получение стационарного пучка с током в десятки ампер и

угловой расходимостью на уровне лучших мировых образцов. Такой источник может использоваться в крупных плазменных установках реакторного и субреакторного масштабов для нагрева и диагностики плазмы. В однодырочном варианте ионный источник также имеет ряд важных применений.