

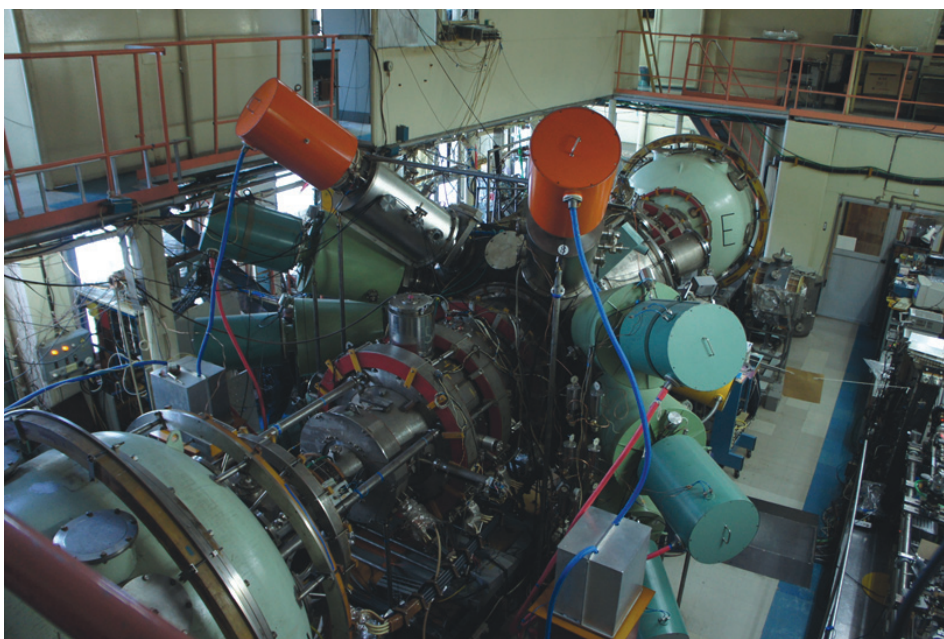
**ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ П.12.  
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ, ВКЛЮЧАЯ ФИЗИКУ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО  
СИНТЕЗА, ФИЗИКУ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ, ФИЗИКУ  
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ И ОСНОВЫ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ  
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ**

**Программа П.12.1. Актуальные проблемы физики высокотемпературной термоядерной плазмы (координаторы акад. Э. П. Кругляков, докт. физ.-мат. наук А. А. Иванов)**

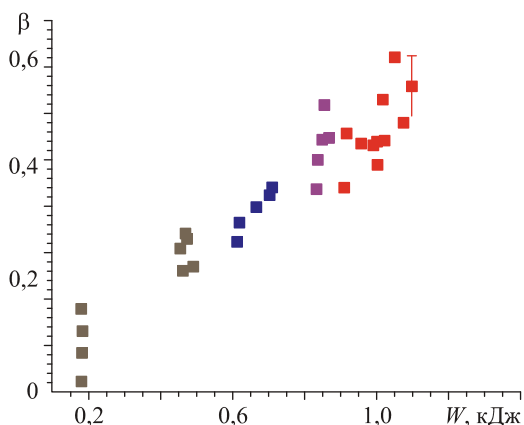
На установке Газодинамическая ловушка (ГДЛ) в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера (рис. 39) достигнута рекордная для осесимметричных магнитных ловушек открытого типа величина давления плазмы по отношению к давлению магнитного поля  $\beta = 0,6$ . Давление плазмы в этих экспериментах (см. рис. 40) определялось в основном давлением быстрых инжектированных ионов с энергиями около 10 кэВ, плотность которых в максимуме достигала величины  $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Полученный результат является принципиально важным для создания мощного нейтронного источника и гибридного реактора на основе газодинамической ловушки, а также для разработки термоядерных реакторов на базе осе-

симметричных открытых магнитных ловушек, имеющих простейшую с инженерной точки зрения конфигурацию магнитного поля.

Там же впервые в мире предложен и успешно реализован в экспериментах на установке ГДЛ метод вихревого удержания плазмы в осесимметричных магнитных ловушках. Осесимметричные открытые ловушки требуют специальных мер стабилизации желобковой неустойчивости, которая может приводить к быстрому радиальному распаду плазмы. Разработанный принципиально новый метод вихревого удержания не стабилизирует плазму, а ограничивает уровень насыщения неустойчивости и возникающие конвективные потери (рис. 41). Специальным образом в плазме формируется



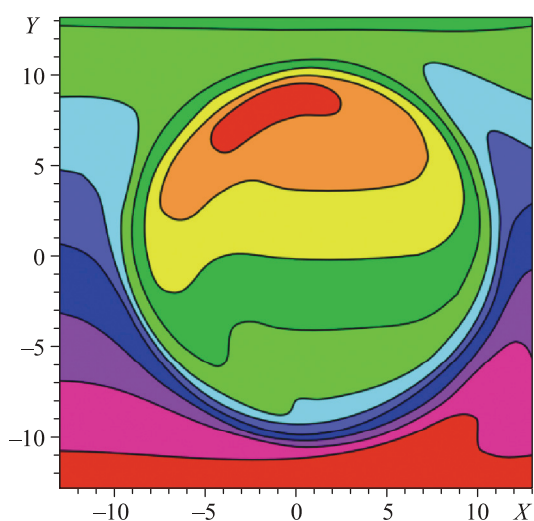
**Рис. 39.** Установка ГДЛ — модель мощного нейтронного источника плазменного типа на основе осесимметричной магнитной ловушки.



**Рис. 40.** Зависимость относительного давления плазмы от энергии, запасенной в популяции инжектированных быстрых ионов.

такое радиальное распределение электростатического потенциала, при котором центральная часть плазмы окружена быстро вращающимся слоем. Этот слой делит возможные конвективные ячейки так, что плазма из центра не попадает вовне, а токи поддержания потенциала приводят к образованию узкого радиального распределения (пинчеванию) быстрых ионов. Подавление поперечных потерь и пинчевание позволили реализовать в установке ГДЛ режимы с рекордными параметрами.

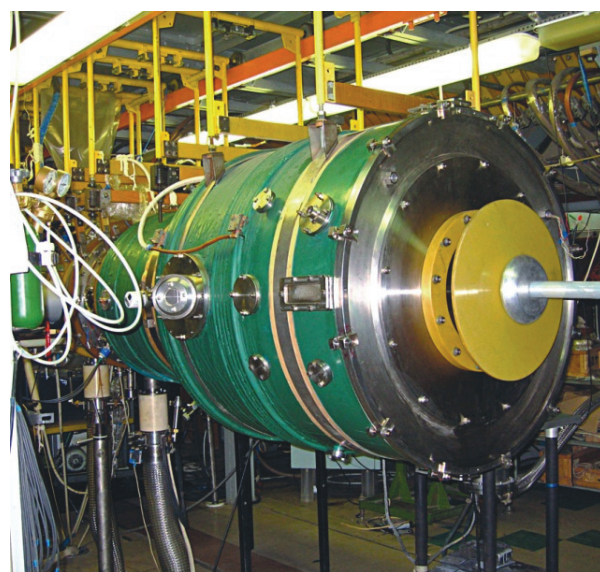
На многопробочной ловушке ГОЛ-3 в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера про-



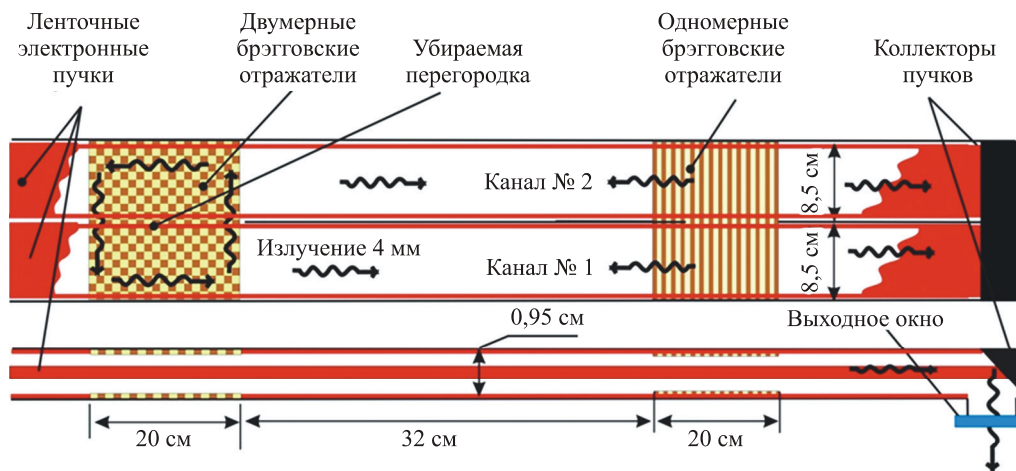
**Рис. 41.** Линии потока плазмы в нелинейной стадии развития моды  $m = 1$  желобковой неустойчивости при создании радиального скачка потенциала порядка электронной температуры. Вращение слоя плазмы на периферии приводит к образованию области вихревого удержания.

ведены эксперименты по инъекции в плазму с плотностью  $10^{19}$ — $10^{20}$  м<sup>-3</sup> электронного пучка с мощностью до 10 МВт, энергией 100 кэВ и длительностью до 300 мкс. Для этого в ИЯФ СО РАН был разработан специальный инжектор с многоапертурным плазменным катодом (рис. 42). При инъекции пучка в ловушку наблюдался эффективный коллективный нагрев плазмы, сопровождаемый интенсивной генерацией микроволнового излучения вблизи двойной плазменной частоты ( $\sim 100$  ГГц). При увеличении длительности пучка достигнуто практически стационарное состояние системы пучок—плазма со средней энергией пары электрон—ион около 100 эВ. Проведенные эксперименты показали перспективность применения электронных пучков для нагрева плазмы и управления потенциалами в открытой стационарной ловушке нового поколения.

В совместных работах ИЯФ СО РАН, ИПФ РАН и НГУ впервые реализован двухканальный планарный мазер на свободных электронах с двумя ленточными релятивистскими электронными пучками и резонатором, состоящим из двумерного и одномерного брегговских рефлекторов (рис. 43). Благодаря двумерной распределенной обратной связи при большом поперечном сечении системы (два канала с сечением  $85 \times 9,5$  мм при длине волны 4 мм) на частоте 75 ГГц получена синхрон-



**Рис. 42.** Камера магнитной компрессии многопробочной ловушки ГОЛ-3 с установленным внутри генератором электронного пучка мощностью до 10 МВт.



**Рис. 43.** Схема двухканального планарного мазера на свободных электронах с ленточными релятивистскими пучками и комбинированным резонатором с двумерным брэгговским рефлексором.

ная хорошо воспроизводимая узкополосная генерация с шириной спектра, близкой к естественной ширине, при выходной мощности

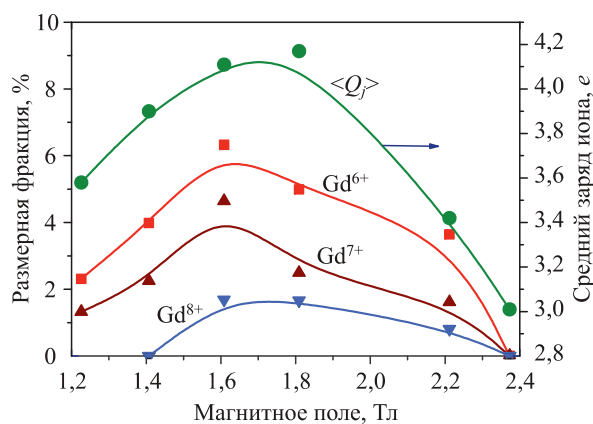
около 50 МВт в импульсах с длительностью от 100 до 200 нс.

**Программа П.12.2. Физика низкотемпературной газоразрядной плазмы (координатор докт. физ.-мат. наук Ю. Д. Королев)**

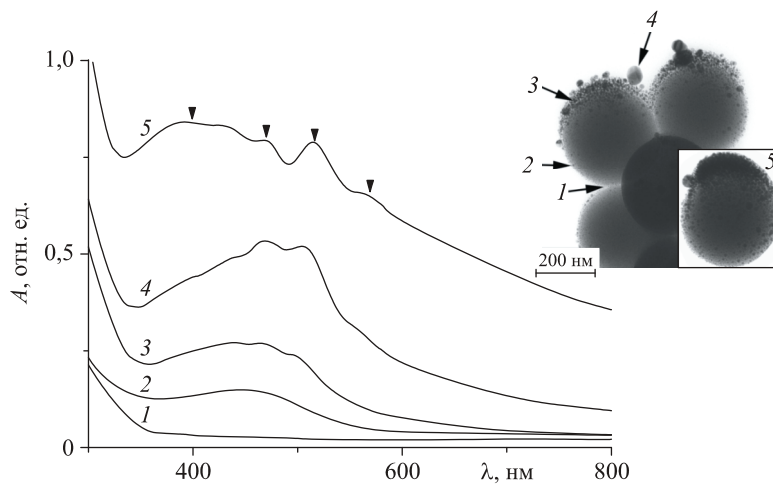
В Институте сильноточной электроники СО РАН совместно с Институтом прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород) разработан метод получения высокозарядных ионов металлов в плазме вакуумного дугового разряда, нагреваемой микроволновым излучением на частоте верхнего гибридного резонанса. Для плазмы вакуумного дугового разряда, удерживаемой в открытых магнитных ловушках типа «пробкотрон» и «антипробкотрон» и нагреваемой излучением мощного импульсного гиротрона с частотой 75 ГГц, показано, что эффективная генерация многозарядных ионов металлов в плазме такого разряда может быть осуществлена не только на частоте электронноциклотронного резонанса для основной гармоники излучения гиротрона, но и на частоте верхнего гибридного резонанса при меньших магнитных полях. В таких условиях осуществлена генерация пучков ионов гадолиния с зарядовым распределением вплоть до  $8^+$  (рис. 44).

В совместной работе Института физического материаловедения СО РАН и факультета наук о материалах Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

ва впервые получены наноструктурированные подложки на основе композитных частиц  $\text{SiO}_2\text{—Ag}$  с эффектом плазмонного резонанса (рис. 45). Варьирование режимов осаждения кластеров серебра при распылении ионным пучком позволяет получить композитные на-



**Рис. 44.** Зависимость доли многозарядных ионов в извлеченном ионном пучке гадолиния и средний заряд ионного пучка от магнитного поля при нагреве плазмы излучением 75 ГГц в ловушке «пробкотрон». Ток дуги 150 А.



**Рис. 45.** Спектры поглощения, демонстрирующие полосы поверхностного плазмонного резонанса (на вставке: ПЭМ-изображения типичных образцов композитных частиц  $\text{SiO}_2\text{—Ag}$ , полученных распылением ионным пучком).

ноструктуры с различными морфологическими особенностями и оптическими свойствами. Подложки подобного типа в перспективе могут служить элементами так называемых lab-

on-chip, которые позволят проводить исследование живых клеток в интактном состоянии при диагностике заболеваний в медицине либо при проведении экспертизы в криминалистике.