

УДК 533.9

## УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЩЕЛОЧНОЙ ПЛАЗМЫ

Н. С. Бучельникова

Описана установка для исследования свойств сильно ионизованной низкотемпературной плазмы. В качестве объекта исследования используется щелочная (калиевая или цезиевая) плазма. Установка позволяет работать в диапазоне плотностей  $10^8$ — $5 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup> при высокой степени ионизации.

В последние годы появился ряд работ, посвященных получению и исследованию плазм щелочных металлов [1, 2]. Плазму щелочного металла можно получить при термической ионизации цезия или калия на поверхности вольфрама, нагретого до температуры порядка 2000° К. При этом образуется сильно ионизованная спокойная плазма, в которой отсутствуют внешние электрические поля и токи. Температуры ионов и электронов в такой плазме одинаковы и равны температуре вольфрамовой пластины. Плазма имеет определенную геометрию, представляя собой цилиндр, ограниченный с торцов нагретыми пластинами. Плотность плазмы максимальна на оси и спадает по радиусу, становясь равной нулю на расстоянии от оси, равном радиусу пластины.

Такая плазма представляет собой удобный объект для исследования. Ниже описан вариант установки, позволяющий работать с щелочной плазмой в широком диапазоне плотностей при сохранении достаточно высокой степени ионизации. Схема установки представлена на рис. 1.

Вакуумная система рассчитана на получение вакуума  $\sim 10^{-8}$ — $10^{-9}$  мм рт. ст. Откачка вакуумной камеры производится модернизированным паровым насосом Н-5С, в котором для улучшения фракционирования масла плоское днище заменено ребристым. В системе использована двухступенчатая ловушка, охлаждаемая жидким азотом. Для устранения похищенной миграции масла в вакуумный объем в ловушке используется «холодный барьер». Все уплотнения в системе выполнены на металлических прокладках, вводы — на металлокерамических изоляторах. Предусмотрена возможность прогрева системы до 400—500° С.

После однодневного прогрева в камере было получено остаточное давление  $\sim 5 \cdot 10^{-8}$  мм рт. ст. При включенных нагревателях без предварительного прогрева установки остаточное давление  $5 \cdot 10^{-7}$ — $1 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст.

Щелочной металл вводится в систему в запаянной стеклянной ампуле азбивается под вакуумом при помощи бойка. Направленный пучок атомов формируется при помощи головки, заполненной тонкими трубочками диаметром 1 мм и длиной 3 см. Сечение головки имеет форму эллипса. В этом область напыления на вольфрамовой пластине представляет собой круг. Диаметр круга при помощи разных головок может быть сделан больше или равным диаметру пластины.

Вольфрамовые пластины нагреваются электронной бомбардировкой. Диаметр пластины, равный 5 см, может ограничиваться присовой



диафрагмой, что обеспечивает возможность изменения диаметра плазменного цилиндра в ходе эксперимента.

Рабочая температура лежит в пределах 1800—2400° С. Однородность температурного поля поверхности пластины, измеренная оптическим пирометром, при этом лучше 5—10%. При необходимости более однородного распределения температуры можно ставить вторую пластину, нагреваемую излучением первой. Однородность температурного поля при этом лучше 1%.

Магнитное поле создается четырьмя катушками, питаемыми от машины постоянного тока. Поле может изменяться до 1600 э.

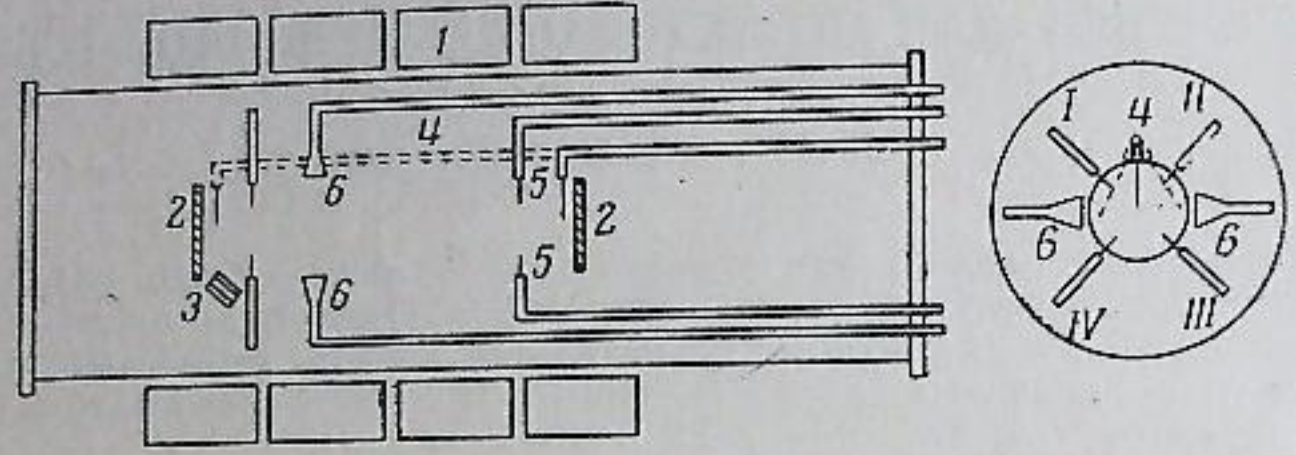


Рис. 1. Схема установки:

1 — катушки магнитного поля; 2 — вольфрамовые пластины; 3 — напылитель; 4 — подвижной зонд; 5 — высокочастотные зонды; 6 — рупорные антенны; I—IV — одиночные зонды

Пластины помещают в область наиболее однородного поля. При расстоянии между пластинами 36 см неоднородность поля по оси не превышает 3%. При расстоянии 18 см однородность поля лучше 1%. Однородность поля по азимуту лучше 0,1%. Стабильность поля ~0,1%.

Для измерения плотности плазмы используется двойной зонд. Зонд может перемещаться вдоль оси системы и по радиусу. Для продольного перемещения зонда используется пара гайка — винт, работающая в вакууме. Вращение гайки обеспечивается через сильфонное уплотнение. Поворот винта на определенный угол, соответствующий поперечному перемещению зонда, производится через такое же сильфонное уплотнение.

В системе (рис. 1) имеется четыре одиночных зонда, расположенных по окружности под углом 90° друг к другу. Зонды могут быть использованы для измерения распределения плотности плазмы по окружности плазменного цилиндра, а также для измерения длины волны азимутальных волн.

Предусмотрено зондирование плазмы миллиметровыми волнами. Ввод высокочастотной мощности в вакуум осуществляется через впаиваемую в волновод вставку с впаем ковар — стекло. Искажения, вносимые стеклом компенсируются при помощи тефлоновых шайб. Коэффициент стоячей волны системы волноводов с вакуумным переходом не хуже 1,2.

Измерение плотности плазмы производится в этом случае по обычной схеме интерферометра [3].

Для высокочастотных измерений предусмотрено два коаксиальных ввода, выполненных на металлокерамических изоляторах. Волновое сопротивление коаксиалов 20 ом. Коэффициент стоячей волны коаксиала с переходником на 50 ом в диапазоне частот 50—7500 мГц не хуже 1,5—2.

Высокочастотные зонды могут помещаться в разные точки на оси при помощи съемных коаксиальных переходников.

При измерении плотности двойным зондом вольт-амперные характеристики осциллографируются. Схема зондовых измерений представлена на рис. 2. Так как зонды не должны иметь потенциала относительно заземленных вольфрамовых пластин и стенок камеры, корпус генератора и осциллографа отрывается от «земли». Для генерации пилообразных колебаний использован НГПК-3М.

Для проверки правильности работы двойного зонда данные зондовых измерений сравнивались с микроволновыми измерениями, проведенными при помощи 8 мм-интерферометра. В диапазоне плотностей  $3 \cdot 10^{10} - 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  при магнитных полях до 1600 э расхождение не превышало 10—20%.

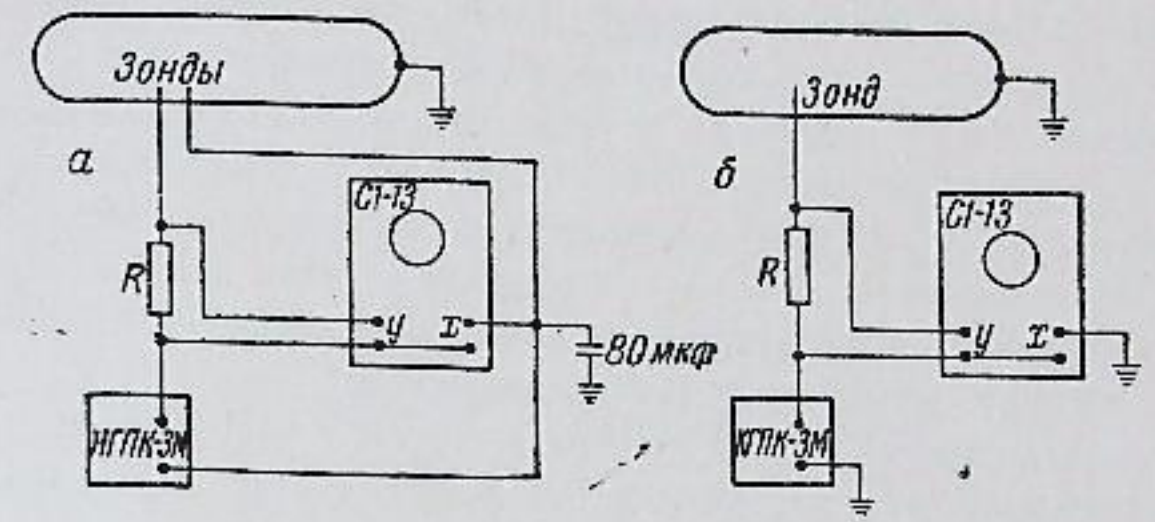


Рис. 2. Схема зондовых измерений:  
а — двойной зонд; б — одиночный зонд

Степень ионизации практически определяется остаточным давлением. При работе без предварительного прогрева установки остаточное давление для  $n \sim 10^8 - 10^9 \text{ см}^{-3}$  составляло  $\sim 5 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$ , т. е. степень ионизации ~1%. Для  $n \sim 10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-3}$  степень ионизации превышает 20—40%. При достаточно длительном прогреве остаточное давление может быть понижено на один — два порядка.

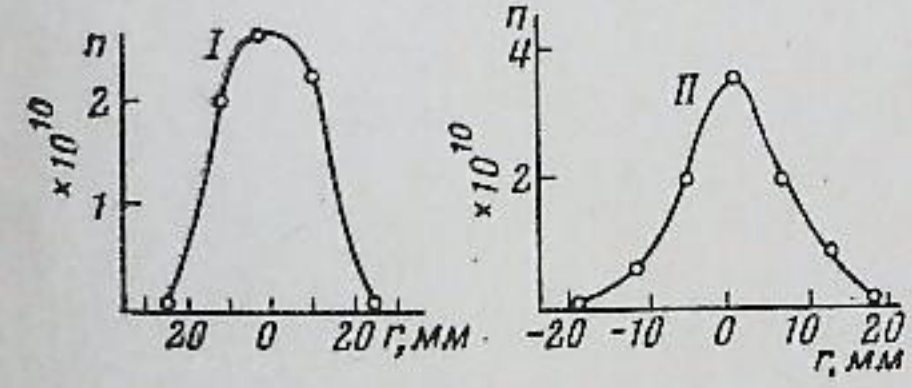


Рис. 3. Распределение плотности плазмы по радиусу  $H = 1600 \text{ э}$ :  
I —  $\Phi \sim 2R$ ; II —  $\Phi < 2R$

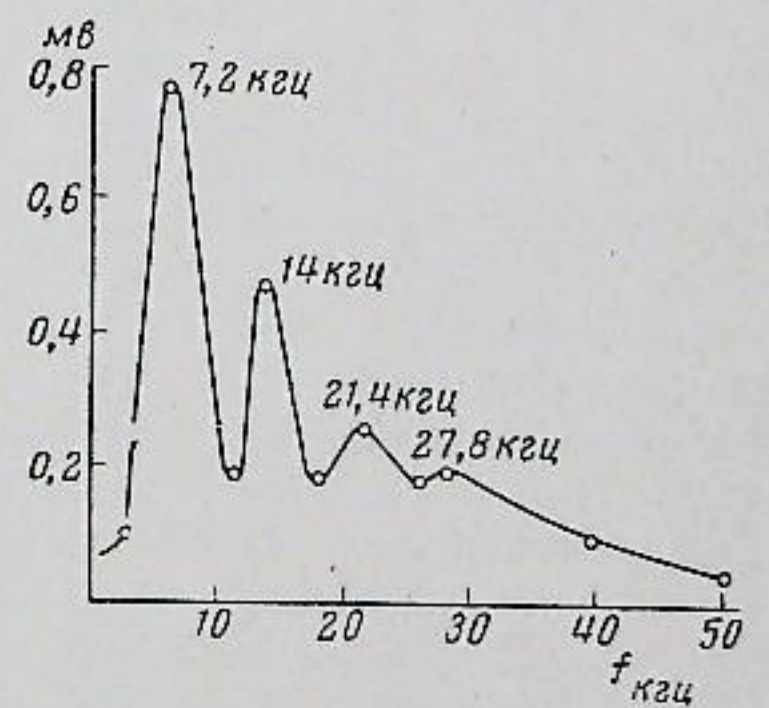


Рис. 4. Спектр колебаний:  
 $n = 2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ ;  $H = 1000 \text{ э}$

Поскольку сечение электрон-ионных столкновений много больше сечения столкновений электронов с атомами, уже при степени ионизации 1%  $v_{ei} \gg v_{eo}$  ( $v$  — частота столкновений) и плазму можно считать сильно ионизованной.

Следует отметить, что при  $n \sim 10^8 - 10^9 \text{ см}^{-3}$  длина свободного пробега превышает расстояние между вольфрамовыми пластинами (36 см), т. е. плазма является бесстолкновительной. При  $n \sim 10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-3}$  длина свободного пробега много меньше этого расстояния.

Характерное распределение плотности заряженных частиц по радиусу для случаев, когда диаметр области напыления  $\Phi$  меньше или порядка диаметра пластины  $2R$ , показано на рис. 3.



На описанной установке была обнаружена «универсальная» неустойчивость неоднородной по плотности бесстолкновительной плазмы, находящейся в магнитном поле [4]. Неустойчивость проявляется в возбуждении колебаний с частотами, лежащими в диапазоне 5—30 кГц. Измерения спектра при этом производились при помощи коаксиального и подвижного зонда. Спектр анализировался селективным микровольтметром В6-2 с чувствительностью 1 мкв. Характерный спектр колебаний показан на рис. 4.

Определение длины азимутальной волны проводилось по сдвигу фазы сигналов с зондов I—IV (рис. 1) и подвижного зонда, когда он находится под углом 45° к двум неподвижным. Сигналы с двух зондов подаются на микровольтметры В6-2, используемые в качестве усилителей, а затем на двухлучевой осциллограф. Было обнаружено, что длины волны гармоник, наблюдающихся в спектре, равны длине окружности, половине и трети ее для первой — третьей гармоник соответственно.

Выражаю благодарность В. Г. Филоненко и В. Н. Зайцеву за конструирование установки, Э. М. Смокотину за наладку схем измерений и участие в экспериментах, В. В. Панину и Г. А. Новосельцеву за наладку вакуумной и механической части установки.

Институт ядерной физики  
Сибирского отделения АН СССР

Поступила в редакцию  
28 I 1964

#### ЛИТЕРАТУРА

1. N. Rynn, N. D'Angelo, Rev. Sci. Instr., 31, 1326, 1960.
2. R. Knechtli, J. Wada, Phys. Rev., Lett., 6, 215, 1961.
3. М. Д. Райзер, И. С. Шпигель, Успехи физ. наук, 64, 641, 1958.
4. Н. С. Бучельникова, Ж. эксперим. и теор. физ., 46, 1147, 1964.

УДК 533.9 : 546.293 + 546.36

### СВОЙСТВА АРГОНО-ЦЕЗИЕВОЙ ПЛАЗМЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В. А. Абрамов, Ю. А. Тарасов

В настоящей работе рассматривается вопрос о создании неравновесной ионизации в канале МГД-генератора. Для этого аргоноцезиевая плазма помещается в постоянное (или переменное) электрическое поле. Произведены оценки электрического поля, необходимого для нагрева электронов до 3000—4000° К.

При рассмотрении энергетических потерь электронов приняты во внимание как потери, обусловленные упругими столкновениями электронов с нейтральными атомами и ионами, так и потери на излучение. Определены значения оптимальной проводимости плазмы для различных концентраций цезия, давлений аргона в области температур электронов 3000—4000° К.

Вопросы, связанные с магнитогидродинамическим преобразованием тепловой энергии плазменного потока в электрическую энергию, в последнее время широко обсуждаются в литературе. Одним из важнейших вопросов является исследование возможностей увеличения к.п.д. МГД-генератора, что тесно связано с возможностью увеличения проводимости плазменного потока. Одной из таких возможностей является создание проводимости, большей, чем равновесная, при помощи электрического поля или какого-нибудь другого источника энергии. В качестве рабочего тела можно использовать, например, аргон с небольшой добавкой наиболее легко ионизирующегося элемента — цезия. Наложение электрического поля ведет к ускорению заряженной компоненты газа, и при не слишком сильных электрических полях, когда скорость дрейфа много меньше тепловой скорости, наличие столкновений приводит к повышению температуры заряженной компоненты по сравнению с температурой нейтральной компоненты. При прохождении газового потока через область электрического поля происходит быстрый нагрев электронов, однако при этом нейтральная компонента греется сравнительно медленно вследствие конечной скорости передачи энергии от электронов к аргону. С повышением температуры электронов растет также и степень ионизации, и проводимость начинает определяться кулоновскими столкновениями. При температуре 3000—3500° К сечение столкновения электронов с атомами аргона сильно уменьшается вследствие эффекта Рамзауэра, имеющего квантово-механическую природу. Ясно, что это положительно сказывается на увеличении проводимости плазменного потока.

В настоящей работе производятся оценки величины электрического поля, необходимого для нагрева электронов в аргоноцезиевой плазме до температуры 3000—4000° К, причем учитываются как упругие, так и неупругие потери.

Для определения величины требуемого поля и проводимости плазмы надо знать значения концентрации и потерь энергии электронов. Для решения такой задачи, вообще говоря, надо для каждого состояния атома записать уравнение