

# **1. Актуальность работы**

## **1.1. Газовый разряд**

Первая работа по физике плазмы была выполнена Ленгмюром, Тонксом и их сотрудниками в 1920-х гг. Это исследование было вызвано необходимостью разработать вакуумные электронные лампы, которые могли бы пропускать большие токи, а для этого их нужно было наполнять ионизованным газом. Именно в этой работе было открыто явление экранирования; В настоящее время мы сталкиваемся с газовым разрядом в ртутных выпрямителях, водородных тиратронах, игнитронах, разрядниках, сварочных дугах, неоновых лампах и лампах дневного света, в грозовых разрядах.

## **1.2. Изучение космического окружения Земли.**

Непрерывный поток заряженных частиц, называемый солнечным ветром, сталкивается с земной магнитосферой, которая деформируется под его действием и защищает нас от этого потока частиц.

Ионосфера, простирающаяся по высоте от 50 км до 10 земных радиусов, заполнена слабоионизированной плазмой, плотность которой изменяется с высотой.

## **1.3. Современная астрофизика**

Звезды и из атмосферы настолько горячи, что находятся в плазменном состоянии. Солнечное излучение обусловлено термоядерными реакциями, протекающими при высокой температуре. Солнечная корона представляет собой разреженную плазму. Межзвездная среда содержит ионизированный водород. Хотя звезды в галактиках не являются заряженными, они ведут себя подобно частицам в плазме. Поэтому для предсказания хода эволюции галактик применялась кинетическая теория плазмы. Радиоастрономия открыла многочисленные источники излучения, которые создаются плазмой.

## **1.4. МГД-преобразование энергии**

Для генерации электричества можно использовать МГД преобразование энергии плотной плазменной струи, движущейся поперек внешнего магнитного поля. Под действием силы Лоренца ионы движутся в одну сторону, а электроны в другую, что создаёт разность потенциалов, между двумя электродами. При этом с электродов можно снимать электрический ток, минуя неэффективный тепловой цикл.

Такой же принцип применяется в разработках ионных двигателей.

## 1.5. Газовые лазеры

Наиболее широко распространенным методом накачки газового лазера, т.е. перевода его в инвертированное состояние, которое может привести к усилению излучения, является применение газоразряда.

## 2. Зонд с СВЧ-резонатором

### 2.1. Основы метода локальных измерений концентрации плазмы с использованием зонда с СВЧ-резонатором

Идея, положенная в основу простого и удобного метода локальных измерений плотности плазмы, заключается в измерении собственной частоты миниатюрного резонатора, помещенного в плазму. Зонд представляет собой резонансную систему, собственная частота которой зависит от диэлектрической проницаемости среды  $\epsilon$ . По величине резонансной частоты однозначно восстанавливается значение плотности плазмы.

Для локальных измерений плотности плазмы используется простейший и наименьший по размерам резонатор, который является четверть-волновым отрезком двухпроводной линии, замкнутый на одном и разомкнутый на другом конце (четвертьволновый резонатор). Возбуждение и прием сигнала осуществляется при помощи двух передающих линий, оканчивающихся петлями магнитной связи.

Необходимым условием работы диагностики является требование, чтобы собственная частота резонатора с плазмой была значительно больше плазменной частоты. В этом случае ( $\omega_{res} \gg \omega_{pe}$ ,  $\omega_{res}$  – резонатор,  $\omega_{pe}$  – плазменная частота) моды плазменных колебаний, которые могут возбуждаться в теплой плазме подавляются затуханием Ландау и поэтому не влияют на результаты измерений.

Малостью размеров зонда обеспечивается слабость возмущения, вносимого им в плазму.

В отличие от диагностических методов, связанных с использованием объемных резонаторов, позволяющих получить лишь интегральное значение плотности плазмы, предлагаемый метод позволяет (из-за малости размеров зонда по сравнению с характерными масштабами плазменного столба) определять локальное значение плотности внутри плазменного объема.

В сравнении с традиционно используемыми в плазменных экспериментах ленгмюровскими зондами, **результаты измерений с помощью резонансного СВЧ-зонда определяются только плотностью плазмы и не зависят от электронной температуры**

**плазмы.**

Таким образом, диагностика плотности плазмы с помощью резонансного СВЧ-зонда позволяет измерять локальное, слабо возмущенное значение плотности плазмы. Нелинейные свойства СВЧ-резонатора, в том числе и гистерезисные явления, проявляются при больших амплитудах колебаний СВЧ-поля. В этом случае плазма вытесняется полем из всей области между проводами резонатора и резонансная кривая в районе своего максимума перестает зависеть от плазменной концентрации, практически полностью повторяя вакуумную.

### **3. Экспериментальная установка КРОТ**

Следует отметить, что при постановке космических исследований приходится иметь дело с трудными и дорогостоящими экспериментами. Это делает оправданным изучение космических эффектов в модельных экспериментах, проводимых на лабораторных установках, тем более что основные процессы, как в космической плазме, так и в лабораторной, при правильном выборе условий эксперимента подчиняются одним и тем же закономерностям. Кроме того, в лаборатории можно использовать весь арсенал современной диагностики плазмы и многократно воспроизводить исследуемое явление, целенаправленно варьировать условия его протекания. Возможность моделирования космических электромагнитных явлений основывается на законах подобия. Они указывают, как должны соотноситься между собой основные безразмерные физические величины в космическом объекте и его лабораторном аналоге.

Объем, в котором проходит исследование плазменных процессов в нашем случае представляет из себя вакуумную камеру, изготовленную из немагнитной нержавеющей стали диаметром 3 метра и длиной 10 метров. Предельный объем достигаемый в объеме камере,  $P_{\text{ост}} \approx 5 \cdot 10^{-6}$  торр. Откачка в камере осуществляется с помощью вакуумных насосов с производительностью 150 л/с. Для откачки инертных газов используется пароструйные насосы с производительностью  $2.5 \cdot 10^3$  л/сек.

#### **3.1. Генерация плазмы**

В установке присутствует соленоид, который генерирует поле пробочной конфигурации, то есть создает магнитную ловушку для удержания плазмы.

В качестве источника плазмы используется высокочастотный автогенератор, нагруженный на индуктор, выполненный в виде двух витков разного диаметра, разнесенных в пространстве. Под действием ВЧ-поля происходит газовый разряд, инициирующий иони-

зирующую лавину. В результате образующаяся плазма экранирует индуктор и генерация прекращается.

## **3.2. Эксперимент**

### **3.2.1 Распад**

На слайде приведён график зависимости плотности плазмы от времени. Исходя из результатов измерения, можно сделать заключение, что распад плазмы имеет два характерных времени. Это связано с тем, что характерное время спада концентрации обратно пропорционально электронной температуре плазмы. Температура в ходе эксперимента меняется неравномерно. При больших температурах остывание идёт быстрее, но через некоторое время оно заметно замедляется. Это связано с тем, что температура электронов приближается к температуре нейтрального газа. В результате получается некое подобие изотермы.

### **3.2.2 Радиальное распределение**

На практике считается, что при отклонении концентраций плазмы около 20 % плазму можно считать равномерно распределенной по радиальной оси. Но всё же концентрация непостоянна из-за ...