

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО ГОРЯЧЕЙ КОМПОНЕНТЫ МИКРОВОЛНОВОГО РАЗРЯДА С ЛОКАЛЬНЫМИ ЗОНАМИ ЭЦР

В.В.Андреев, А.М.Умнов

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

vandreev@mx.pfu.edu.ru

Представленные в работе экспериментальные и численные результаты свидетельствуют, что вариация градиента магнитного поля в зоне ЭЦР позволяет эффективно управлять температурой горячей электронной компоненты плазмы микроволнового разряда.

1. Введение

Повышенный интерес к микроволновым ЭЦР-разрядам связан с возможностями создания плазмы с достаточно высокой плотностью при низком давлении рабочего газа и эффективного контроля за ее электронной температурой в широком диапазоне вплоть до сотен кило-электронвольт, что актуально для широкого спектра прикладных задач [1,2,3].

В большинстве работ исследовался ЭЦР-разряд малого объема, что накладывает ограничения на время жизни частиц. Это, в свою очередь, налагает ограничения на осуществление в плазме процессов с малым эффективным сечением.

Данная работа посвящена изучению характерных особенностей высокочастотного ЭЦР-разряда в цилиндрическом резонаторе на моде TE_{118} , линейные размеры которого много больше длины волны поддерживающего микроволнового поля.

2. Экспериментальная установка и результаты

Эксперименты проводились на установке, представляющей собой осесимметричную систему, в которой вакуумный высокочастотный TE_{118} резонатор симметрично помещен в магнитное поле пробочной конфигурации (рис.1).

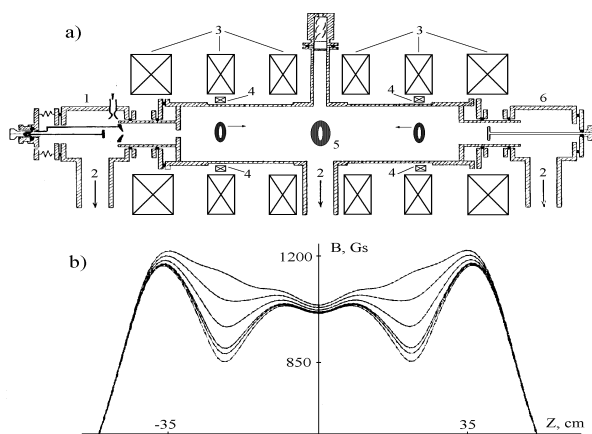


Рис.1 а- экспериментальная установка, б- продольный профиль магнитного поля

Основные параметры эксперимента:

рабочая частота СВЧ генератора..... 2.45 ГГц
длительность импульса СВЧ600 мкс

мощность генератора300 Вт
давление фонового газа (Ar)..... $(0.8:1)10^{-5}$ Торр
длина ловушки80 см
пробочное отношение1.2
импульсная инжекция.....внешний плазменно-пучковый разряд
режим работы периодический (частота следования - 40 Гц)

Измерение КСВ высокочастотного тракта позволило определить пространственное положение зон поглощения СВЧ-мощности при выполнении условий ЭЦР, а также определить эффективность поглощения энергии падающей волны плазмой.

Для определения пространственного положения зон поглощения резонатор возбуждался от маломощного генератора и осуществлялась внешняя приосевая инжекция плазмы. В качестве инжектора использовался плазменно-пучковый разряд (катод - LaB_6). Подача импульсного напряжения на вытягивающую систему электродов позволяла осуществлять импульсную приосевую инжекцию плазмы в резонатор. При изменении профиля магнитного поля, за счет вариации тока в соленоидах условие ЭЦР выполнялось в равноотстоящих от центральной плоскости установки пучностях электрического поля стоячей электромагнитной волны. Проведенные измерения показали наличие четырех эффективных режимов поглощения, зависящих от профиля магнитного поля и от пространственного положения ЭЦР-плоскостей в пределах резонатора. Сопоставление проведенных ранее измерений пространственного распределения магнитного поля в пределах резонатора с полученными экспериментальными результатами позволило достаточно точно определить положение зон поглощения СВЧ-энергии, которые совпали с положением максимумов электрического поля стоячей волны TE_{118} (по четыре максимума справа и слева от центральной плоскости резонатора).

При запитке резонатора от мощного магнетрона было установлено существование трех эффективных режимов ЭЦР- разряда. Эти режимы соответствовали выполнению условий ЭЦР в трех первых максимумах электрического поля СВЧ-волны (отсчет от торцевых стенок резонатора) по мере смещения зоны ЭЦР за счет изменения профиля магнитного поля к центру

установки. Они соответственно были названы режимами 1, 2, 3 соответственно. Было установлено, что поглощение СВЧ-мощности возрастает по мере смещения ЭЦР-плоскости в область с большим градиентом магнитного поля (т.е. от режима 3 к режиму 1). В этих режимах разряд характеризуется наличием интенсивного рентгеновского излучения.

Диагностика электронно-горячей компоненты плазмы осуществлялась по тормозному излучению с помощью сцинтилляционного детектора (NaI(Tl), 25x25), снабженного коллимационной системой. Регистрация рентгеновского излучения осуществлялась в радиальном по отношению к магнитному полю направлении с помощью рентгеновского спектрометра, размещенного в центральной плоскости установки. Коллимация регистрируемого излучения позволила определить спектр тормозного излучения только с рабочего газа (Ar) в различных режимах. Нами были исследованы свойства спектров этого излучения в диапазоне 2 - 0.4 А⁰. Диагностика осуществлялась как в спектрометрическом, так и в радиометрическом режимах. Температура горячей электронной компоненты плазмы определялась путем обработки спектров излучения получаемых с помощью анализатора импульсов АИ - 1024, по наклону линейного участка зависимости логарифма интенсивности излучения от энергии квантов излучения. Калибровка рентгеновского спектрометра в спектрометрическом и радиометрическом режимах осуществлялась по комплекту образцовых источников гамма излучения (ОСГИ-10). В условиях эксперимента регистрация излучения осуществлялась с газа, когда оно обусловлено в большей части взаимодействием электронов с нейтральными атомами. В этом случае число регистрируемых в определенном энергетическом интервале фотонов, в предположении максвелловского распределения электронов может быть определено согласно [4].

$$\eta(E) = 1.69 \cdot 10^{-15} Z^2 NnT^{-1/2} E^{-1} \exp(-E/2T) \times$$

$$K_0(E/2T) \text{ фотон./с} \cdot \text{см}^3 \text{кэВ},$$

где N- и n- плотности нейтральных атомов с атомным номером Z и горячей электронной компоненты соответственно, см⁻³; T_e - температура горячей электронной компоненты, кэВ; K₀(ξ) - функция Бесселя, которая в нашем случае принимает значение - 0.1. Эта формула применима при условии $2\pi Ze^2/hv \ll 1$, где h - постоянная Планка и v - скорость электронов, что выполнимо в случае проводимых экспериментов.

При вычислении плотности горячей электронной компоненты по числу регистрируемых детектором квантов необходимо учесть величину телесного угла коллиматора блока детектирования. Тогда число фотонов, регистрируемых детектором из объема плазмы V под телесным углом ω, составляет

$$\eta = \eta_{\text{det}} \cdot 4\pi / \omega \cdot t \cdot k \cdot V,$$

где k- коэффициент, характеризующий эффективность регистрации рентгеновского детектора в

заданном диапазоне энергии; t - эффективное время регистрации излучения. В условиях проводимых экспериментов t=0.11 с (длительность СВЧ импульсов - 600 мкс, частота повторения - 40 Гц, время экспозиции - 40.96 с), κ - 0.92, ω - 7 · 10⁻³ср, V - 621 см³. При расчетах считается, что рентгеновское излучение, испускаемое плазмой, является изотропным. Факт изотропности рентгеновского излучения при ЭЦР неоднократно отмечался в большинстве экспериментов. В работе [5] указывается на анизотропию рентгеновского излучения в случае высоких СВЧ-мощностей, где температура и интенсивность рентгеновского излучения в продольном по отношению к силовым линиям магнитного поля направлении выше, чем в поперечном направлении. Снижение СВЧ мощности приводит к изотропизации регистрируемого излучения. Необходимо также отметить, что в указанной работе регистрация производилась из зоны ЭЦР-нагрева. В обсуждаемых же экспериментах регистрация излучения производилась из центра магнитной ловушки, в то время как зоны ЭЦР были локализованы вне поля зрения рентгеновского датчика.

Типичная гистограмма интенсивности рентгеновского излучения от энергии и ее логарифм ln I(W) от энергии W приведены на рис. 2.

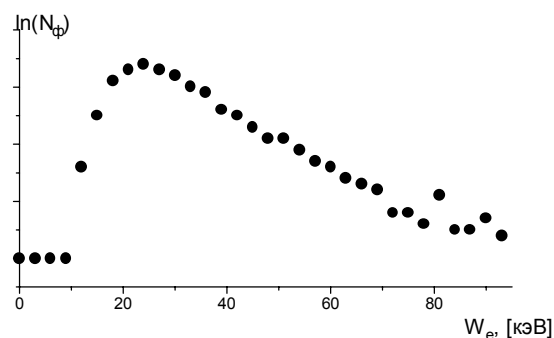
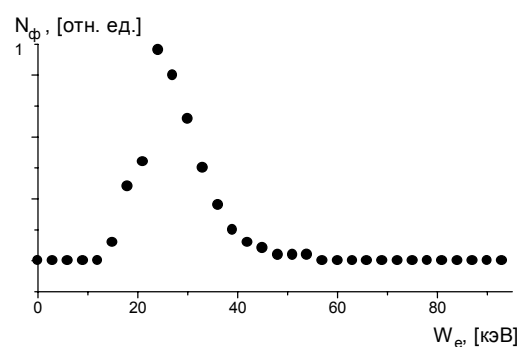


Рис.2

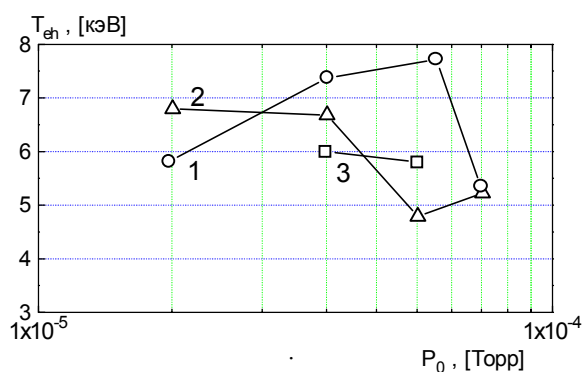


Рис. 3. Зависимость температуры от давления. 1, 2, 3 – режимы, соответственно

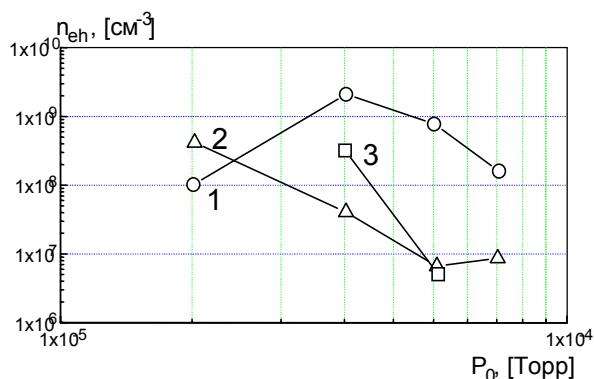


Рис. 4. Зависимость плотности от давления. 1, 2, 3 – режимы, соответственно

Анализ полученных спектров и измерения в радиометрическом режиме показали, что наиболее интенсивным является режим 1, при котором условие ЭЦР осуществляется в областях близких к торцам резонатора максимумов электрического поля. Так, для фиксированного значения давления $5 \cdot 10^{-5}$ Торр отношение интенсивностей тормозного излучения для указанных режимов составило: $I_1/I_2 = 10$; $I_1/I_3 = 20$. Одновременное измерение КСВ микроволнового тракта, характеризующее эффективность поглощения энергии СВЧ плазмой, показало, что по мере перехода от одного режима к другому (1 – 2 – 3) уровень отраженной мощности изменяется от 18% в режиме 1 до 50% в режиме 3. Следует также отметить, что указанные режимы соответствуют различным градиентам магнитного поля в пределах резонансной зоны: 1-й – 22 Гс/см, 2-й – 19 Гс/см, 3-й – 6 Гс/см.

На рис 3 приведены зависимости температуры горячей электронной компоненты T_e от давления рабочего газа для указанных режимов.

Из этих графиков видно, что наиболее "горячим" является первый режим. Плотность горячей электронной компоненты плазмы также определялась из обработки спектров рентгеновского излучения. Результаты представлены на рис. 4. Из приведенной зависимости следует, что наибольшее значение плотности достигается в первом режиме.

Кроме того, была изучена зависимость интенсивности тормозного излучения от длительности СВЧ импульса [6]. Измерения показали, что при длительностях меньших 200 мкс, плазма характеризуется отсутствием тормозного излучения при данном уровне СВЧ мощности, что согласуется с результатами работы [4].

Численное моделирование проведенное по методу частиц в ячейке дало качественное подтверждение полученным экспериментальным результатам. Так средняя энергия горячей электронной компоненты при градиенте магнитного поля - 30 Гс/см в зоне ЭЦР составила - 15 кэВ. Тогда, как в случае более низких значений градиентов (ед. Гс/см), средняя энергия не превышала 3-4 кэВ.

3. Выводы

Анализ экспериментальных и численных результатов показал, что вариация профиля магнитного поля в зоне ЭЦР позволяет эффективно управлять температурой горячей компоненты.

Работа выполнена при поддержке гранта ИИТАС №94.0097.

Литература

1. M.A. Lieberman, A.J. Lichtenberg Principles of plasma discharges and material processing // John Wiley & Sons, Inc., 1994.
2. R. Geller Electron Cyclotron resonance ion sources and ECR plasmas // Institute of Physics Publishing, 1996.
3. M. Bacal, C. Gaudin, A. Bourdier et. al. A compact radiological x-ray source // Nature. 1996., vol. 384, p.421.
4. H. Ikegami et. al. Generation of energetic electrons by electron cyclotron heating in a magnetic mirror field // Nuclear Fusion. 1973, vol. 13, p. 351.
5. J.L. Shohet Free-free bremsstrahlung from a plasma with anisotropic electron velocity distribution // The Physics of Fluids. 1968, vol. 11(5), p.1065.
6. V.V. Andreev, A.M. Umnov Gyroc-D-0 Relativistic plasma and electron bunches in plasma synchrotron of GYRAC // Plasma Sources Sci. Technol. 1999, vol. 8, p. 479.