

6. Li J. Y., Chen X. L., Qiao Z. Y. Synthesis of GaN nanotubes // J. Mater. Sci. Lett. 2001. Vol. 20, № 21. P. 1987–1988.
7. Sedova A., Khodorov S., Ehre D. Dielectric and Electrical Properties of WS<sub>2</sub> Nanotubes / Epoxy Composites and Their Use for Stress Monitoring of Structures // J. Nanomaterials. 2017. Vol. 2017. P. 1–13.
8. Ксеневиц В. К., Горбачук Н. И., Вьет Х. Электропроводность на переменном токе гибридных пленок из углеродных и неорганических WS<sub>2</sub>-нанотрубок // Журнал Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. № 3. С. 111–119.
9. Ksenevich V. K., Gorbachuk N. I., Viet H. Electrical properties of carbon nanotubes / WS<sub>2</sub> nanotubes (nanoparticles) hybrid films // Nanosystems : Phys., Chem., Mathem. 2016. Vol. 7, № 3. P. 37–43.
10. Wang F., A Kinloch I., Wolverson D. Strain-induced phonon shifts in tungsten disulfide nanoplatelets and nanotubes // 2D Mater. 2016. Vol. 4, № 1. P. 1–15.
11. Dresselhaus M. S., Dresselhaus G., Saito R. A. Raman spectroscopy of carbon nanotubes // Physics Reports. 2005. Vol. 409, Issue 2. P. 47–99.
12. Байтингер Е. М., Векесер Н. А., Ковалев И. Н. Особенности строения многослойных углеродных нанотрубок // Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Математика. Механика. Физика. 2012. № 11, вып. 6. С. 56–59.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕННОМ ФИЛАМЕНТЕ ВЧ РАЗРЯДА НА УСТАНОВКЕ «ГРАНИТ»

**Н. В. Татарников**

*Белорусский государственный университет, г. Минск;  
tatarniku@inbox.ru;  
науч. рук. – М. С. Усаченок, канд. физ.-мат. наук*

Представлены результаты исследования плазмы ВЧ разряда установки «Гранит» резонаторным методом. Показано, что при изменении значения магнитного поля от 0 до 40 мТл плотность электронов увеличивается от 0,7 до  $2,3 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Зарегистрированы радиальные распределения интенсивности интегрального свечения плазмы. Для полученных распределений выполнено обратное преобразование Абеля, и показано, что с увеличением магнитного поля профиль распределения светимости меняется незначительно и может быть аппроксимировано функцией  $(1-(r/r_0)^2)^{1,6}$ .

**Ключевые слова:** плазма; ВЧ разряд; концентрация электронов; магнитное поле; радиальное распределение свечения.

### ВВЕДЕНИЕ

СВЧ-нагрев плазмы на частоте электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) широко используется в современных токамаках и планируется использовать в токамаке ИТЕР. Вместе с тем в последнее время в экспериментах по ЭЦ нагреву плазмы на многих установках накопилась критическая масса наблюдений явлений (ускорение ионов и формирование

хвоста на ионной функции распределения, а также аномальное рассеяние греющего СВЧ излучения назад и др.) [1, 2], требующих теоретического описания и экспериментального моделирования. Такого рода модельные эксперименты выполняются на линейной плазменной установке «Гранит». В работе [3] с помощью оптической и СВЧ диагностик продемонстрировано наличие сильного аномального поглощения СВЧ мощности в плазме при ее плотности, близкой к значению плотности верхнего гибридного резонанса (ВГР) для частоты, равной половине частоты волны накачки. Показано, что область локализации этого эффекта и его зависимости от магнитного поля, плотности плазмы и СВЧ мощности, пороги возбуждения и скорость развития находятся в согласии с теоретическими предсказаниями. Следует отметить, что теоретические вычисления в работе [3] выполнены в предположении неизменных параметров исходной плазмы при изменении внешнего магнитного поля, что может влиять на результаты сравнения. Целью данной работы является определение плотности электронов и распределения интегрального свечения исходной плазмы при различных магнитных полях и формирующей плазму высокочастотной мощности.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты проводились на линейной плазменной установке «Гранит», структурная схема которой представлена на рис. 1. Плазма создавалась в кварцевом баллоне 1, пронизываемом СВЧ волноводом 3 перпендикулярно его узкой стенке и размещенном на оси электромагнита 2, с помощью ВЧ генератор ГВЧ-1, выходы которого подключались к кольцевым электродам 4. Питание электромагнита осуществлялось от стабилизированных источников питания СНП-40.

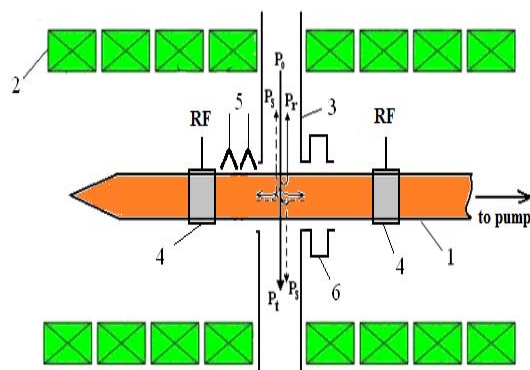


Рис. 1. Схема экспериментальной установки «Гранит»:

- 1 – кварцевый баллон; 2 – катушки магнита; 3 – 10-см волновод; 4 – кольцевые электроды; 5 – петлевая антенна; 6 – 10-см резонатор

Определение плотности электронов осуществлялось с помощью 10-см резонатора (6 на рис. 1, рис. 2) по сдвигу его резонансной частоты с помощью измерителя КСВН-Р2/53. Резонатор закреплялся на расстоянии 15 см от оси волновода (3), подводящего СВЧ мощность к плазменному объему.



Рис. 2. Фотография плазменного филамента ВЧ разряда

В экспериментах используется закрытый цилиндрический резонатор 10-см диапазона длин волн, возбуждаемый на волне типа  $E_{010}$ . Так как вектор электрического поля  $\vec{E}$ , возбуждаемых в резонаторе колебаний параллелен постоянному магнитному полю, то это позволяет применить простую формулу [4] для вычисления концентрации электронов:

$$\left( \frac{\Delta\omega_r}{\omega_r} \right) = \frac{1}{2} c_v \frac{\bar{n}}{n_c} \frac{V}{V_\diamond}, \quad (1)$$

где  $V_r$  – объем резонатора,  $V$  – объем плазмы в резонаторе,  $\bar{n}$  – средняя по объему плазмы в резонаторе концентрация электронов,  $c_v$  – коэффициент формы, определяемый распределениями поля и концентрации плазмы по объему.

Поскольку диаметр баллона много меньше диаметра резонатора, то плазма оказывается помещенной в область почти однородного электрического поля. В этом случае коэффициент  $c_v$  практически не зависит от формы радиального распределения концентрации электронов. После выполнения специальной калибровки резонатора с помощью рубинового и фторопластового стержней была определена следующая простая связь между средней концентрацией и сдвигом частоты:

$$\bar{n} \approx 3,8 \times 10^8 \Delta f r, \quad (2)$$

где  $\Delta f_r$  – сдвиг частоты (единица измерения – МГц),  $\bar{n}$  – средняя концентрация электронов (единица измерения –  $\text{см}^{-3}$ ).

Измерение сдвига частоты можно произвести с относительной ошибкой, не превышающей несколько процентов. Основной при определении  $\bar{n}$  будет методическая ошибка, которая, согласно литературным данным, составляет порядка 20 %.

Регистрация радиального распределения интенсивности интегрального свечения плазмы осуществлялась с помощью ПЗС линейки, данные с которой поступают на компьютер (рис. 3). Для этого в центре широкой стенки волновода была пропилена узкая щель длиной 30 мм, через которую изображение с оси плазменного филамента ВЧ разряда фокусировалось с помощью объектива с фокусным расстоянием 110 мм на ПЗС-линейку.

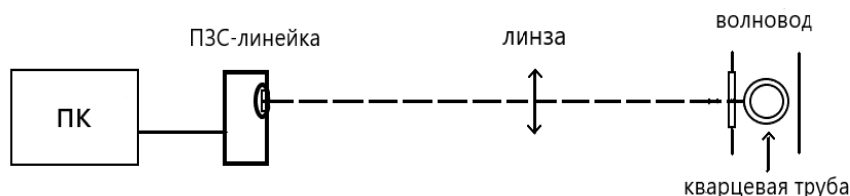


Рис. 3. Блок-схема эксперимента для регистрации радиального распределения интенсивности свечения электронов

После регистрации полученные распределения свечения плазмы нормировались на максимум соответствующего распределения. Далее выполнялось обратное преобразование Абеля, откуда получали реальное радиальное распределение светимости плазменного филамента ВЧ разряда.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Зарегистрированные зависимости концентрации электронов от амплитуды ВЧ колебаний при различных значениях внешнего магнитного поля представлены на рис. 4. При увеличении амплитуды ВЧ поля плотность электронов линейно возрастает (рис. 4). Как видно из рис. 5, увеличение магнитного поля от 0 до 40 мТл при фиксированном значении ВЧ поля (300 В) ведет к линейному росту плотности электронов в плазменном филаменте от  $0,7$  до  $2,3 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

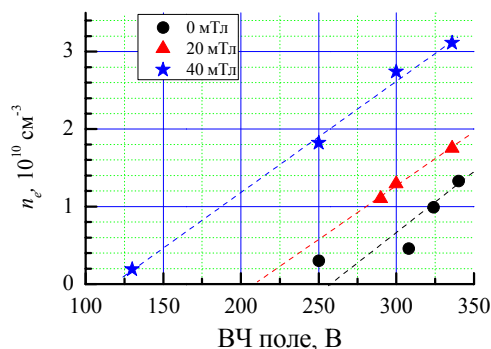


Рис. 4. Зависимости плотности электронов от амплитуды ВЧ поля при различных значениях внешнего магнитного поля

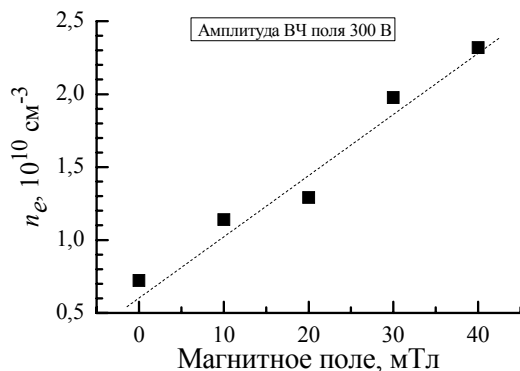


Рис. 5. Зависимость плотности электронов от амплитуды магнитного поля при постоянной амплитуде ВЧ поля

Зарегистрированные при различных значениях магнитного поля и постоянном ВЧ поле радиальные распределения интегрального свечения плазменного филамента представлены на рис. 6. Видно, что с увеличением магнитного поля до 40 мТл интенсивность свечения плазмы на оси разряда возрастает примерно в 2 раза, что близко изменению  $n_e$ .

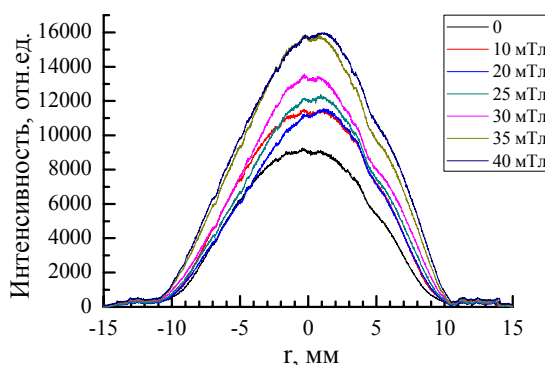


Рис. 6. Зарегистрированные радиальные распределения интенсивности свечения плазмы

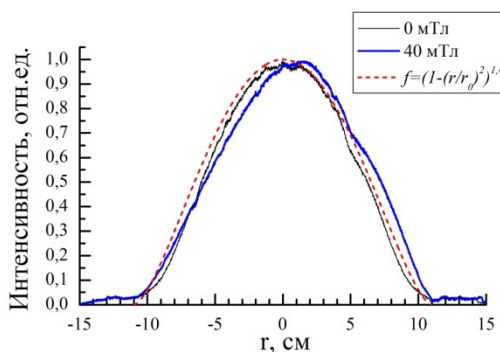


Рис. 7. Нормированные на максимум радиальные распределения интенсивности свечения плазмы

Радиальные распределения светимости плазмы после нормировки и обратного преобразования Абеля для некоторых значений магнитных полей представлены на рис. 7. Видно, что магнитное поле практически не влияет на профиль распределения светимости плазмы, и он может

быть аппроксимирован функцией  $(1-(r/r_0)^2)^{1,6}$ , и его ширина на полувысоте при изменении магнитного поля от 0 до 40 мТл несущественно колеблется относительно постоянного значения около 12 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены измерения средней по объему плотности электронов в плазменном филаменте ВЧ разряда на установке «Гранит». Показано, что увеличение магнитного поля от 0 до 40 мТл приводит к увеличению плотности электронов от 0,7 до  $2,3 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Зарегистрированы радиальные распределения интенсивности интегрального свечения плазмы. Для полученных распределений выполнено обратное преобразование Абеля, и показано, что с увеличением магнитного поля профиль распределения светимости меняется незначительно и может быть аппроксимирован функцией  $(1-(r/r_0)^2)^{1,6}$ , и его ширина на полувысоте несущественно колеблется относительно постоянного значения около 12 мм. Полученные результаты будут применены в дальнейших экспериментах по исследованию взаимодействия СВЧ излучения с плазмой на установке «Гранит».

## Библиографические ссылки

1. *Rapisarda D.* The role of a fast ion component on the heating of the plasma bulk // Phys. Control. Fusion. 2007. Vol. 49, № 3. P. 309–324.
2. *Nielsen S. K.* Experimental characterization of anomalous strong scattering of mm-waves in TEXTOR plasmas with rotating islands // Plasma Phys. Control. Fusion. 2013. Vol. 55, № 11. P. 115003.
3. *Altukhov A.* Observation of the X-mode anomalous absorption in the plasma filament associated with the two up-per-hybrid-plasmon decay // EPJ Web of Conferences. 2017. Vol. 157. P. 03050.
4. *Голант В. Е.* Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. М. : Наука, 1968.

## ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОСТИ МЕТОДОМ $\gamma$ - $\gamma$ -СОВПАДЕНИЙ

**Н. В. Юшкевич**

*Белорусский государственный университет, Минск;  
yushkevich.nv@mail.ru;*

*науч. рук. – М. Д. Дежурко, канд. физ.-мат. наук, доц.*

Данная работа посвящена усовершенствованию методики выполнения лабораторной работы из практикума по ядерной физике.

Представлена проверка необходимости учета некоторых факторов, которые могут повлечь отклонение полученного значения активности от паспортного.

**Ключевые слова:** метод совпадений; метод измерения активности; схема совпадений.