

УДК 533.9.07, 537.531  
EDN: DJARTUPACS: 52.50.Sw, 52.50.Dg,  
52.25.Os

## Вакуумное ультрафиолетовое излучение непрерывного электронного циклотронного резонансного разряда

Р. Л. Лапин, С. В. Голубев, В. А. Скалыга, И. В. Изотов,  
А. Ф. Боханов, Е. М. Киселёва, С. С. Выбин

*Приводятся результаты экспериментальных исследований интенсивности собственного вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения разряда в водороде, поддерживаемого в открытой магнитной ловушке мощным излучением гиротрона (частотой  $f = 28$  ГГц и мощностью до  $P_{\text{gyr}} = 5$  кВт) в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) в непрерывном режиме. Были определены параметры, соответствующие оптимальным условиям генерации ВУФ-излучения плазмой ЭЦР-разряда. Показано, что мощность излучения в диапазоне  $\lambda = 120\text{--}160$  нм достигает  $W = 0,75$  кВт, что соответствует эффективности в  $\eta = 20\%$ .*

*Ключевые слова:* ЭЦР-разряд, вакуумное ультрафиолетовое излучение, гиротрон, магнитная ловушка.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-1-33-37

### Введение

Разряд, поддерживаемый в открытых магнитных ловушках мощным электромагнитным излучением миллиметрового диапазона длин волн в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР-разряд), давно и весьма успешно используется в качестве сильноточных источников протонов и многозарядных ионов тяжелых элементов [1].

В последнее время предложено использовать такой разряд и в качестве сильноточ-

ных источников пучков отрицательных ионов водорода (H) [2–4]. В таком источнике предлагается использовать две последовательные магнитные ловушки. В первую вводится микроволновое излучение и зажигается ЭЦР-разряд, плазма которого через набор закрытых для микроволнового излучения отверстий (отражающую микроволновое излучение сетку) перетекает во вторую магнитную ловушку, где за счет взаимодействия низкоэнергетических электронов с возбужденными молекулами водорода происходит образование отрицательных ионов водорода [2, 5].

Кроме того, интерес к исследованиям подобного ЭЦР-разряда связан с возможностью создания мощного источника излучения в диапазоне вакуумного ультрафиолета (ВУФ) [6].

Отметим, что исследование характеристик ВУФ-излучения представляется одним из важных методов диагностики происходящих в ЭЦР-разряде кинетических процессов и может быть использовано для верификации моделей ЭЦР-разряда и оптимизации источников отрицательных и положительных ионов и ВУФ-излучения.

Лапин Роман Львович, м.н.с.

E-mail: lapin@ipfran.ru

Голубев Сергей Владимирович, гл.н.с., д.ф.-м.н.

Скалыга Вадим Александрович, гл.н.с., д.ф.-м.н.

Изотов Иван Владимирович, зав. лаб., к.ф.-м.н.

Боханов Алексей Феликсович, зав. лаб.

Киселёва Елена Михайловна, стажёр-исследователь.

Выбин Сергей Сергеевич, стажёр-исследователь.

ФИЦ «ИПФ РАН».

Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

Статья поступила в редакцию 26.10.2022

Принята к публикации 10.11.2022

© Лапин Р. Л., Голубев С. В., Скалыга В. А., Изотов И. В.,  
Боханов А. Ф., Киселёва Е. М., Выбин С. С., 2023

Данная работа посвящена исследованию эффективности генерации и характеристик ВУФ-излучения плазмы непрерывного ЭЦР-разряда, поддерживаемого в открытой магнитной ловушке микроволновым излучением гиротрона с частотой  $f = 28$  ГГц и мощностью до  $P_{gyr} = 5$  кВт.

### Описание экспериментальной установки

Эксперименты по исследованию ВУФ-излучения ЭЦР-разряда проводились на установке GISMO, подробно описанной в [7]. Основной установкой являлась магнитная система, изготовленная из постоянных магнитов и представляющая собой две последовательные магнитные ловушки с различной конфигурацией силовых линий: в первой структура магнитного поля соответствует обычному пробкотрону, во второй реализована структура типа касп. ЭЦР-разряд поддерживался в водородной камере при низких давлениях газа в откачиваемой разрядной камере, представляющей собой цилиндрический резонатор, помещенный в центральной области первой магнитной ловушки. Со стороны ввода СВЧ-излучения в вакуумный объем в торце резонатора (в области, где напряженность магнитного поля близка к максимуму) располагалась квазиоптическая электродинамическая система ввода микроволнового излучения, обеспечивающая его согласование с плазмой, во втором торце резонатора помещалась металлическая сетка с критическими (для используемой длины волны) размерами отверстий. Нагрев и поддержание плазмы происходил за счёт поглощения микроволнового излучения гиротрона с частотой  $f = 28$  ГГц и мощностью до  $P_{gyr} = 5$  кВт в непрерывном режиме в условиях электронного циклотронного резонанса.

Измерения мощности ВУФ-излучения проводились с помощью абсолютно калиброванного фотодиода IRD SXUV5, расположенного на оси магнитной ловушки на расстоянии  $L = 1$  м от центра ЭЦР-разряда. Перед фотодиодом помещалась диафрагма диаметром  $l = 1,7$  мм, ограничивающая площадь приёмной системы. Измерения проводились с использованием трёх прозрачных в ВУФ-

диапазоне фильтров:  $MgF_2$  прозрачен от  $\lambda = 110$  нм,  $CaF_2$  – от  $\lambda = 125$  нм, и Fused Silica – от  $\lambda = 170$  нм – по разности сигналов фотодиода с различными фильтрами можно было судить о интенсивности атомарной линии Лайман-альфа ( $Ly_{\alpha}$ ,  $\lambda = 122$  нм) и молекулярной полосы Лаймана (Lyman band,  $\lambda = 160$  нм). Измерения мощности ВУФ-излучения проводились при различных условиях поддержания разряда – варьировалась мощность поддерживаемого разряда микроволнового излучения и давление напускаемого водорода (отметим, что измерения давления проводились в откачанном тракте вакуумной камеры).

Кроме того, для оценки электронной температуры в процессе экспериментов измерялся потенциал разрядной камеры.

### Результаты

Как уже отмечалось, по разности сигналов с фотодиода при использовании окон из  $MgF_2$  и  $CaF_2$  можно измерить интенсивность излучения плазмы с длиной волны в диапазоне от 110 до 125 нм. В этом диапазоне расположена одна из мощных линий атомарного водорода – линия Лайман-альфа, следовательно, по интенсивности излучения плазмы в этом диапазоне можно судить о наличии и эффективности образования в разряде атомарного водорода. Для исследований ВУФ-излучения плазмы в диапазоне молекулярной полосы Лаймана аналогично использовалась разность сигналов с фотодиода с окнами  $CaF_2$  и Fused Silica. На рис. 1–2 представлена зависимость измеренных сигналов фотодиода от мощности СВЧ-излучения гиротрона при использовании окон  $MgF_2$  и  $CaF_2$  соответственно для разных давлений напускаемого нейтрального газа.

Из рис. 1 и 2 видно, что для эффективной генерации ВУФ-излучения существуют оптимальные условия поддержания разряда. Наиболее эффективно генерация как атомарной линии излучения водорода (линии Лайман-альфа), так и молекулярного излучения водорода (полосы Лаймана) происходит при давлениях газа  $p \approx 0,3$  мТорр и мощности поддерживаемого разряда излучения примерно  $P_{gyr} = 3\text{--}4$  кВт.

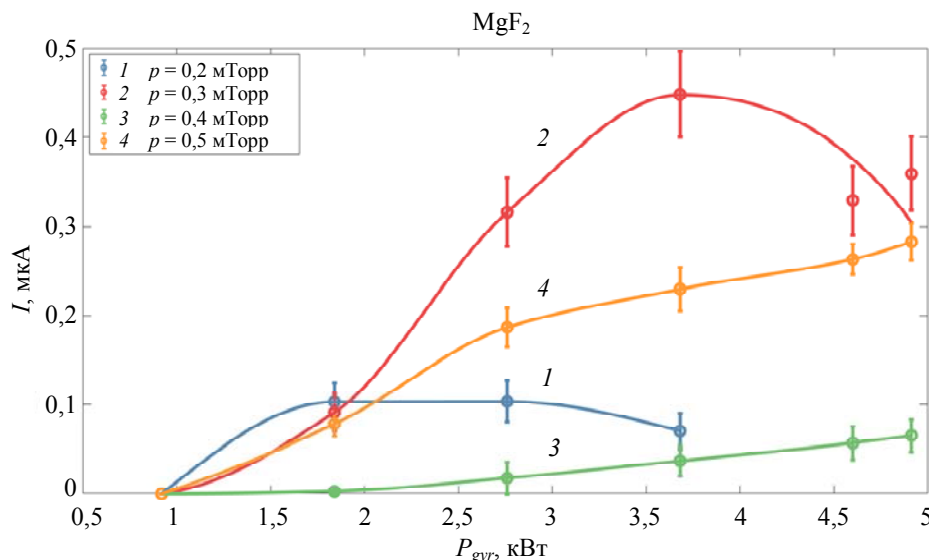


Рис. 1. Зависимость сигнала фотодиода от мощности падающего СВЧ-излучения  $P_{gyr}$  при использовании окна  $\text{MgF}_2$  и разных давлениях напускаемого нейтрального газа  $p$

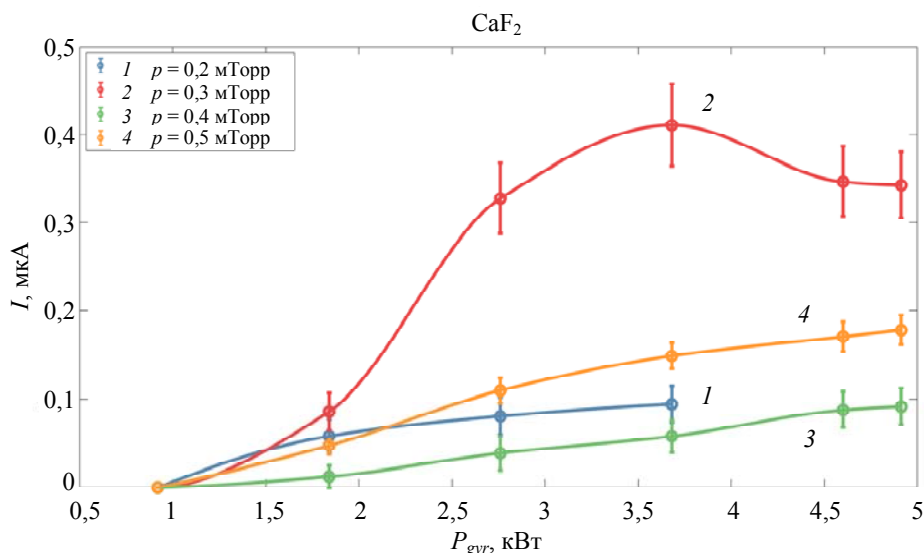


Рис. 2. Зависимость сигнала фотодиода от мощности падающего СВЧ-излучения  $P_{gyr}$  при использовании окна  $\text{CaF}_2$  и разных давлениях напускаемого нейтрального газа  $p$

На рис. 3 приведена зависимость эффективности преобразования микроволнового излучения в ВУФ-излучение от его мощности. КПД переизлучения в плазме непрерывного ЭЦР-разряда в ВУФ-излучение достигает  $\eta = 20\%$ . Оценки полной мощности ВУФ-излучения плазмы сделаны в естественном предположении о изотропности собственного излучения плазмы.

На рис. 4 представлена зависимость потенциала разрядной камеры от мощности поддерживающего разряд излучения и соответствующая измеренному потенциалу температура электронов в плазме [8] при различных потоках напускаемого газа.

Измерения температуры электронов в разряде позволяют объяснить динамику свечения плазмы: действительно, из рис. 1, 2 и 4 видно, что при оптимальных условиях ( $p \approx 0,3$  атм и  $P_{gyr} = 3-4$  кВт) температура электронов достигала величины  $T_e \approx 50$  эВ, оптимальной для возбуждения нейтрального газа. Отметим, что при низких давлениях напускаемого газа частота столкновений электронов с нейтралами невелика и, соответственно, невелика и степень его ионизации; затем по мере роста давления напускаемого газа существенно увеличивается плотность плазмы (увеличивается степень ионизации газа), температура

электронов при этом падает ( $T_e \approx 10$  эВ) – таким образом, оба этих фактора приводят к

существенному уменьшению интенсивности свечения плазмы.

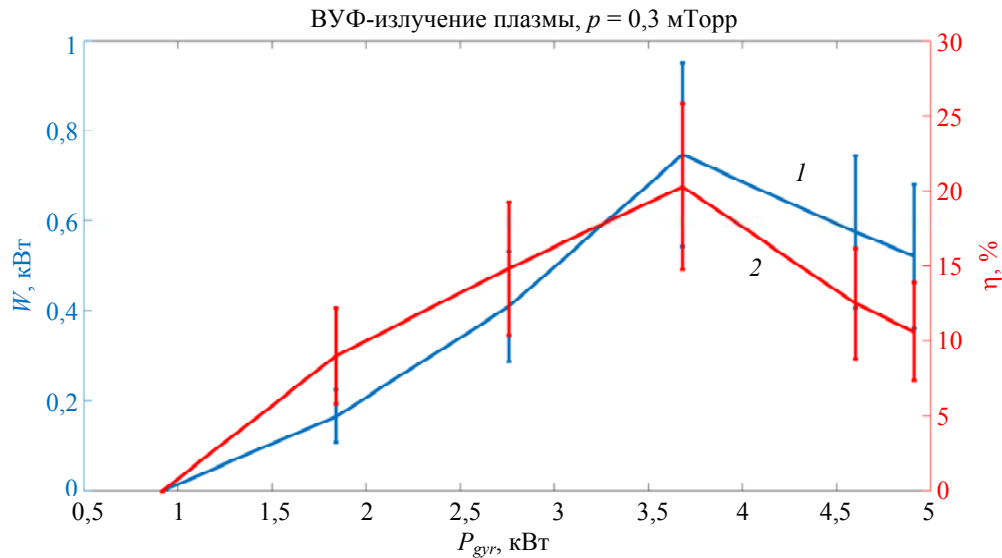


Рис. 3. Зависимость мощности  $W$  и эффективности переизлучения  $\eta$  ВУФ-излучения плазмы от мощности падающего СВЧ-излучения  $P_{gyr}$

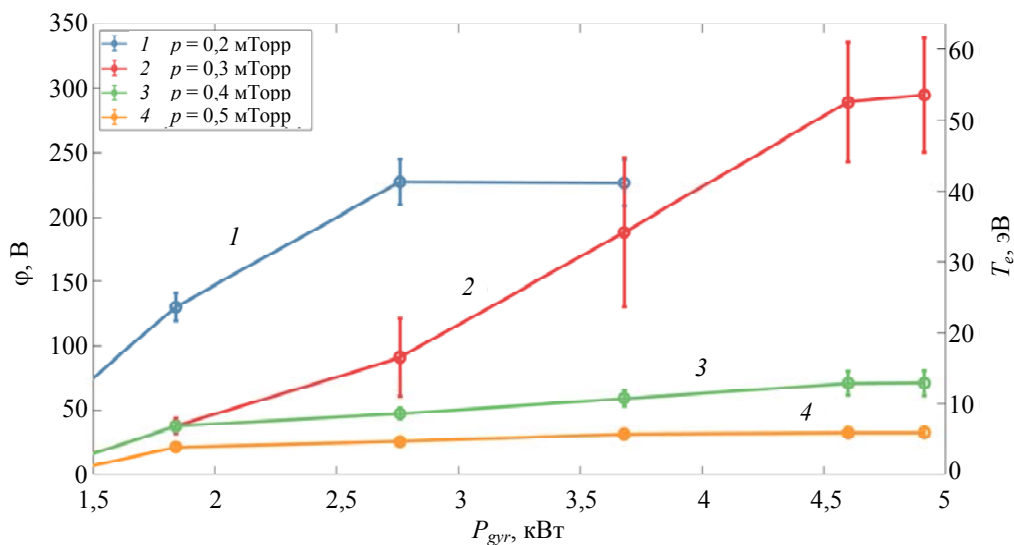


Рис. 4. Зависимость потенциала плазменной камеры  $\phi$  и электронной температуры  $T_e$  от мощности падающего СВЧ-излучения  $P_{gyr}$  при разных давлениях напускаемого нейтрального газа  $p$

### Заключение

Проведено экспериментальное исследование ВУФ-излучения плазмы непрерывного ЭЦР-разряда, поддерживаемого микроволновым излучением частотой  $f = 28$  ГГц и мощностью до  $P_{gyr} = 5$  кВт. Показана возможность оптимизации условий разряда по давлению нейтрального газа и мощности падающего СВЧ-излучения для получения максимальной мощности ВУФ-излучения в диапазонах, со-

ответствующих атомному (линия Лайман-альфа) и молекулярному (полоса Лаймана) излучению водорода. Максимальная суммарная мощность ВУФ-излучения непрерывного горящего ЭЦР-разряда составила  $W = 0,75$  кВт, что соответствует достигнутой эффективности в  $\eta = 20\%$ . Это согласуется с полученными ранее результатами исследований ВУФ-излучения плазмы импульсного ЭЦР-разряда, в которых эффективность преобразования достигала  $\eta = 22\%$  [6].

Работа выполнена при поддержке  
Российского научного фонда,  
проект #21-12-00297.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Skalyga V., Izotov I., Golubev S., Sidorov A., Razin S., Vodopyanov A., Tarvainen O., Koivisto H., Kalvas T. / Rev. Sci. Instrum. 2016. Vol. 87. P. 02A716.
2. Lapin R. L., Izotov I. V., Skalyga V. A., Razin S. V., Shaposhnikov R. A., Tarvainen O. / J. Instrum. 2018. Vol. 13. P. C12007.

3. Dougar-Jabon V. D., Chacon Velasco A. J., Vivas F. A. / Rev. Sci. Instrum. 1998. Vol. 69. P. 950.
4. Dougar-Jabon V. D. / Phys. Scr. 2001. Vol. 63. № 4. P. 322.
5. Leung K. N., Ehlers K. W., Bacal M. / Rev. Sci. Instrum. 1983. Vol. 54. P. 56.
6. Lapin R. L., Skalyga V. A., Golubev S. V., Izotov I. V., Razin S. V., Tarvainen O. / J. Appl. Phys. 2022. Vol. 131. P. 093301.
7. Skalyga V. A., Bokhanov A. F., Golubev S. V., Izotov I. V., Kazakov M. Yu., Kiseleva E. M., Lapin R. L., Razin S. V., Shaposhnikov R. A., Vybin S. S. / Rev. Sci. Instrum. 2019. Vol. 90. P. 123308.
8. Голант В. Е., Жилинский А. П., Сахаров И. Е. Основы физики плазмы. – М.: Атомиздат, 1977.

PACS: 52.50.Sw, 52.50.Dg, 52.25.Os

## Vacuum ultraviolet radiation of continuous ECR discharge plasma

R. L. Lapin, S. V. Golubev, V. A. Skalyga, I. V. Izotov, A. F. Bokhanov,  
E. M. Kiseleva and S. S. Vybin

Federal Research Center IAP RAS  
46 Ul'yanov st., Nizhny Novgorod, 603950, Russia  
E-mail: lapin@ipfran.ru

Received 26.10.2022; accepted 10.11.2022

**Experimental studies of intrinsic vacuum ultraviolet (VUV) emission intensity of continuous hydrogen discharge sustained by high-power gyrotron radiation ( $f = 28 \text{ GHz} / P_{\text{gyr}} = 5 \text{ kW}$ ) in an open magnetic trap under electron cyclotron resonance (ECR) conditions are presented. The optimal system parameters for VUV radiation generation of ECR discharge plasma were determined. It was shown that the emission power in the range  $\lambda = 120\text{--}160 \text{ nm}$  could reach  $W = 0.75 \text{ kW}$ , which corresponds to an efficiency of  $\eta = 20 \%$ .**

**Keywords:** ECR discharge, vacuum ultraviolet radiation, gyrotron, magnetic trap.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-1-33-37

## REFERENCES

1. Skalyga V., Izotov I., Golubev S., Sidorov A., Razin S., Vodopyanov A., Tarvainen O., Koivisto H. and Kalvas T., Rev. Sci. Instrum. **87**, 02A716 (2016).
2. Lapin R. L., Izotov I. V., Skalyga V. A., Razin S. V., Shaposhnikov R. A. and Tarvainen O., J. Instrum. **13**, C12007 (2018).
3. Dougar-Jabon V. D., Chacon Velasco A. J. and Vivas F. A., Rev. Sci. Instrum. **69**, 950 (1998).
4. Dougar-Jabon V. D., Phys. Scr. **63** (4), 322 (2001).
5. Leung K. N., Ehlers K. W. and Bacal M., Rev. Sci. Instrum. **54**, 56 (1983).
6. Lapin R. L., Skalyga V. A., Golubev S. V., Izotov I. V., Razin S. V. and Tarvainen O., J. Appl. Phys. **131**, 093301 (2022).
7. Skalyga V. A., Bokhanov A. F., Golubev S. V., Izotov I. V., Kazakov M. Yu., Kiseleva E. M., Lapin R. L., Razin S. V., Shaposhnikov R. A. and Vybin S. S., Rev. Sci. Instrum. **90**, 123308 (2019).
8. Golant V. E., Zhilinsky A. P. and Sakharov I. E., Fundamentals of plasma physics, New York, John Wiley & Sons, 1980; Moscow, Atomizdat, 1977.