

Исследование газоразрядной стратифицированной плазмы с использованием среды *Rhywe Measure*

© А.В. Козырев, А.В. Ланцов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Приведены результаты исследования водородной стратифицированной плазмы, выполненного на установке «Плазма», адаптированной для использования комплекса оборудования фирмы Rhywe (Германия). Показано, что программная среда Rhywe Measure позволяет упростить обработку экспериментальных данных и повысить точность вычисления параметров плазмы стратифицированного водородного разряда. Представлены результаты экспериментов по регистрации локальных параметров плазмы в зависимости от удельной мощности разряда, позволяющие идентифицировать наблюдаемые страты в рамках кинетической теории стратификации.

Ключевые слова: водородная плазма, стратификация разряда, *Rhywe Measure*, *Cobra 3 Basic-Unit*, автоматизация эксперимента, плазменные параметры, кинетический резонанс функции распределения электронов.

В лаборатории кафедры физики МГТУ им. Н.Э. Баумана более 30 лет успешно эксплуатируется установка «Плазма» (рис. 1). На ней исследуют водородный несамостоятельный дуговой разряд с подогревным катодом [1].

В водородном несамостоятельном разряде основным источником электронов, испускаемых с катода, является термоэлектронная эмиссия, для создания которой катод искусственно разогревают от вспомогательного источника питания (см. рис. 1, а). Электроны, испускаемые накалившимся катодом, способствуют возникновению и горению разряда: разряд легко зажигается, почти все напряжение между электродами приходится на область вблизи катода, остальное пространство, заполненное светящейся плазмой, имеет потенциал анода. Вблизи катода возникает темная область — катодный слой. Этот слой образован заряженными частицами противоположных знаков: через катодный слой в плазму движутся электроны, испускаемые катодом, а из плазмы поступают положительные ионы и электроны. Для исследуемого диапазона давлений водорода в трубке прикатодный слой — бесстолкновительный, т. е. длина свободного пробега электронов λ_e и положительных ионов λ_i больше толщины слоя δ :
$$\lambda_{e,i} \gg \delta.$$

Испускаемые катодом электроны вылетают из катодного слоя с почти одинаковой энергией, близкой к энергии ионизации, ионизируют газ, образуют плазму, которая заполняет объем газоразрядной трубки.

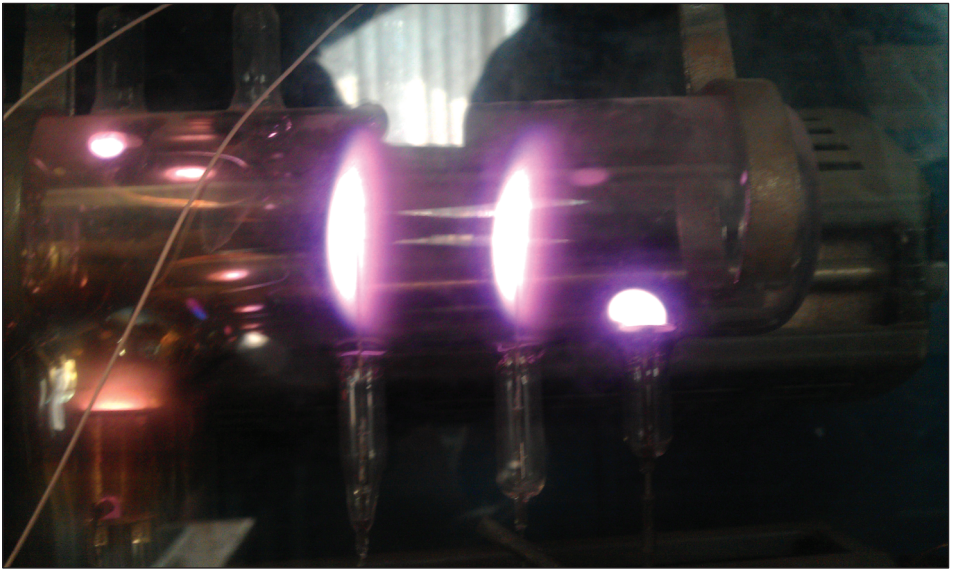
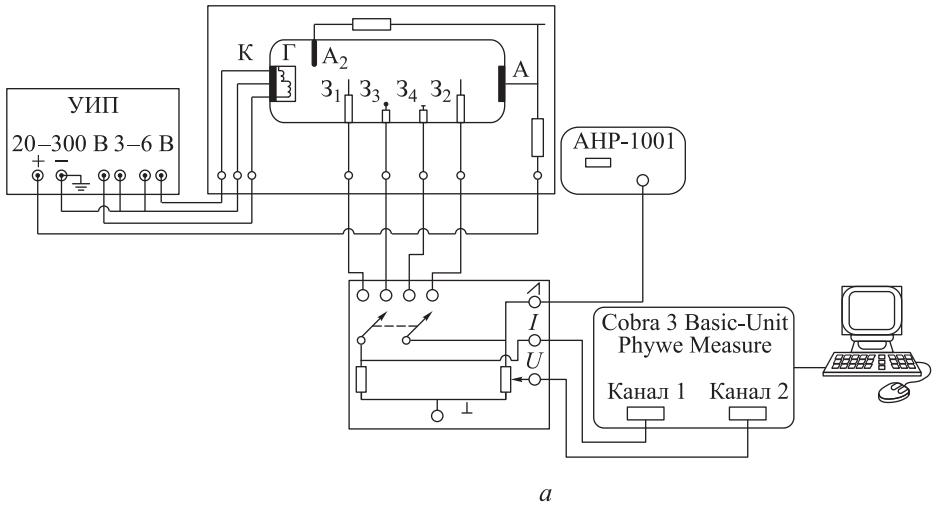


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема установки «Плазма» (а) и ее внешний вид (б):

УИП — универсальный источник питания; К — катод; А — анод; А₂ — вспомогательный анод; Г — генератор водорода; З₁–З₄ — зонды

На установке «Плазма» в зависимости от параметров разряда реализуются два режима работы: с однородным столбом и со стратифицированным положительным столбом. При этом в положительном столбе возникают от двух до пяти страт (см. рис. 1, б). Применение установки «Плазма» позволяет эффективно изучать методы диагностики плазмы, в частности классический метод зондов Ленгмюра, реализованный как метод двойного зонда. С помощью этого метода

можно экспериментально определять температуру и концентрацию электронов, а также плавающий потенциал плазмы в точках нахождения зондов. Имеется возможность при проведении экспериментов использовать зонды различной геометрии (плоские или цилиндрические), а также зонды, расположенные в различных точках газоразрядной трубки (на оси и вблизи стенки). В режиме стратифицированного разряда существует возможность при изменении параметров разряда передвигать страты положительного столба так, чтобы головная часть страты пересекала зонды. В диапазоне регулировочных характеристик установки возможна фиксация режимов горения разряда с развитой плазменной турбулентностью.

В настоящее время на установке «Плазма» данные получают ручным поточечным методом. При этом проводятся регистрация вольт-амперной характеристики (ВАХ) зондов (рис. 2, а), последующая ее графическая обработка, а затем расчетным путем находят параметры плазмы, что требует существенных затрат времени. Проведение измерений для режимов с развитой плазменной турбулентностью затруднено, поскольку в радиодиапазоне возникают значительные шумовые колебания параметров плазмы (рис. 2, б).

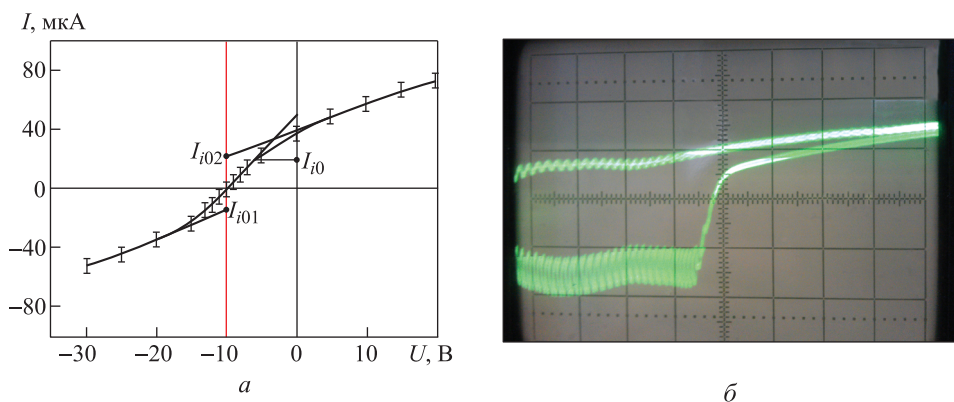


Рис. 2. ВАХ зондов, полученные поточечным методом (а) и осциллографированием (б):
 I_{i0} — экстраполяция токов насыщения зондов

Модернизацию установки «Плазма» связывают с автоматизацией и компьютеризацией экспериментов. Показано, что параметры плазмы можно определять в режиме реального времени путем создания сервисных программных модулей с использованием адаптивных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) [2].

Авторами выполнена адаптация установки «Плазма» к среде Phywe Measure с использованием комплекса оборудования фирмы Phywe (Германия) и блоков АЦП Cobra 3 Basic-Unit. Программное обеспечение Phywe Measure позволяет проводить простую и надеж-

ную запись, анализ и обработку данных. Данные могут поступать с одного или с нескольких каналов. При выполнении эксперимента измерительное оборудование присоединяют непосредственно к компьютеру и управление потоком данных происходит в программе Phywe Measure. В этой программе имеются такие возможности обработки данных, как аппроксимация ВАХ стандартными функциями и функцией, введенной вручную; аппроксимация одновременно трех участков ВАХ; нахождение коэффициента наклона на выбранном участке ВАХ; сглаживание данных, позволяющее избавиться от влияния на ВАХ шума.

Система Cobra 3 состоит из множества компонентов, которые позволяют выполнять измерения в процессе физических экспериментов, обладает быстрым интерфейсом при измерении и возможностью управления ходом эксперимента с компьютера, допускает применение дополнительных измерительных модулей и датчиков.

Все перечисленные особенности дают возможность оперативно получать ВАХ электростатических зондов при различных параметрах разряда (рис. 3).

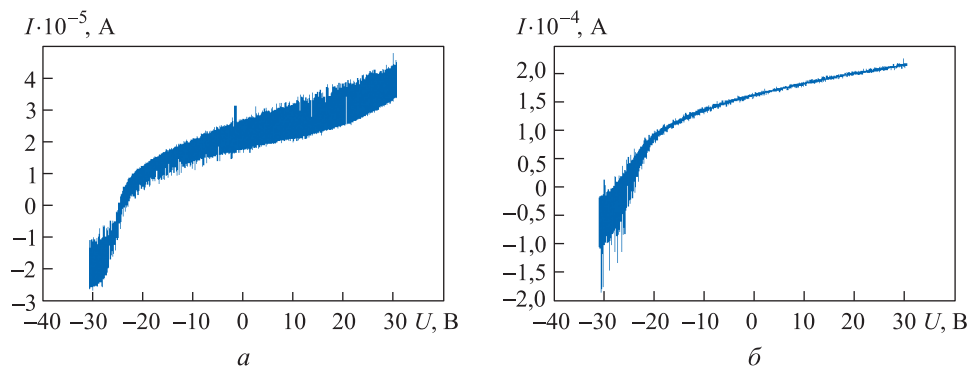


Рис. 3. ВАХ зондов при удельной мощности разряда $P_u = 7,75 \cdot 10 \text{ Вт/м}^3$ (а) и $3,62 \cdot 10 \text{ Вт/м}^3$ (б)

Используя стандартные средства обработки данных среды Phywe Measure, можно определить токи насыщения на зондах и углы наклона участков ВАХ разряда, с помощью которых находят локальные параметры плазмы: температуру электронов (рис. 4), их концентрацию, радиус Дебая, плазменную частоту, длину свободного пробега электронов.

С помощью математических пакетов для обработки оцифрованного сигнала, по известным формулам вычисляют локальные параметры плазмы. Применение АЦП и программ для обработки оцифрованного сигнала повышает точность и надежность опытных данных, упрощает процедуру их получения.

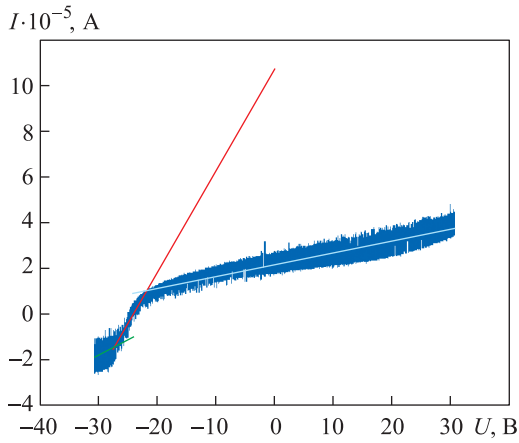


Рис. 4. ВАХ зондов, полученные с использованием функций аппроксимации и экстраполяции участка ВАХ линейной функцией ($P_u = 8,92 \cdot 10 \text{ Вт/м}^3$)

На рис. 5–8 приведены экспериментальные зависимости локальных параметров плазмы от удельной мощности разряда. Их анализ показывает, что на локальные параметры плазмы влияет стратификация разряда. При изменении удельной мощности разряда страты сдвигаются относительно неподвижных зондов, которые регистрируют увеличение температуры электронов перед головной частью страты и ее уменьшение в хвостовой части.

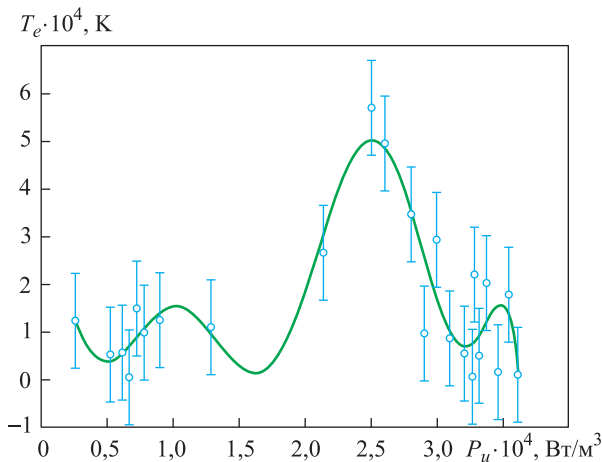


Рис. 5. Зависимость температуры электронов T_e от удельной мощности разряда P_u

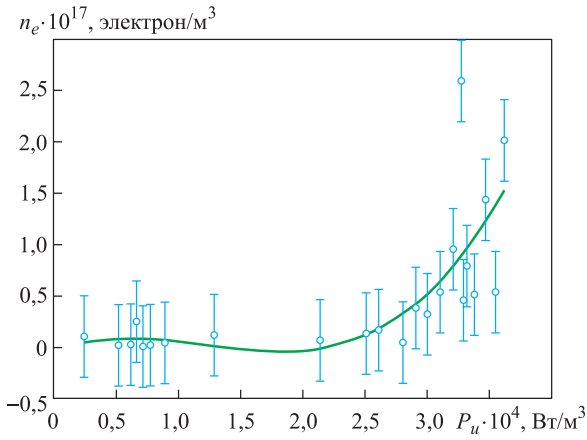


Рис. 6. Зависимость концентрации электронов n_e от удельной мощности разряда P_u

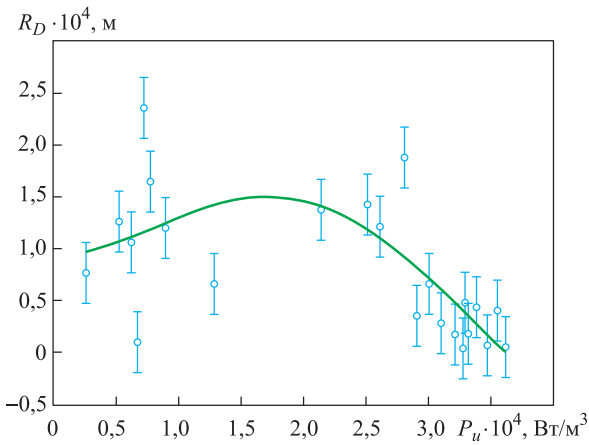


Рис. 7. Зависимость радиуса Дебая R_D от удельной мощности разряда P_u

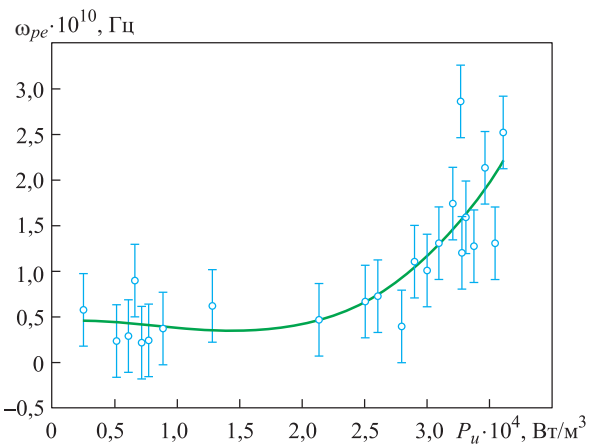


Рис. 8. Зависимость плазменной частоты ω_{pe} от удельной мощности разряда P_u

Интенсивная светимость головной части страты (см. рис. 1, б) обусловлена высвечиванием спектральной линии H_α атомов водорода, возбужденных разрядным электронным потоком [3, 4]. Уменьшение в потоке числа электронов с энергией, превышающей энергию возбуждения термов спектральной линии H_α , приводит к появлению послесвечения страты в виде диффузного «хвоста» [5]. В последующем электроны, потерявшие энергию при столкновении с атомами водорода, компенсируют ее, ускоряясь в электрическом поле разряда. При превышении электронами энергии возбуждения термов спектральной линии H_α визуализируется следующая страта. В зависимости от удельной мощности разряда наблюдаемые в эксперименте страты можно отнести к типу S или P [6, 7].

Наблюдаемая на установке «Плазма» стратификация водородного разряда низкого давления (около 5...10 Торр) связана с кинетическим резонансом функции распределения электронов (ФРЭ) в пространственно периодических полях, приводящим к бунчировке электронов [8, 9]. Описанная картина движения электронов в страте возникает в силу баланса энергии электронов, определяемого неупругими ударами, что эквивалентно условию

$$\lambda_T \gg \frac{\varepsilon_1}{e_0 E_0}, \text{ или } \frac{E_0}{N} \gg \left(\frac{2m}{M}\right)^{1/2} \frac{Q\varepsilon_1}{e_0},$$

где $\lambda_T(\omega) = (NQ(\omega))^{-1} \left(\frac{2m}{M}\right)^{-1/2}$ — длина энергетической релаксации электронов по отношению к упругим столкновениям с атомами; ω — кинетическая энергия электронов; N — концентрация атомов; Q — транспортное сечение упругих ударов; m — масса электрона; M — масса атома [10, 11]; ε_1 — порог возбуждения электрона; e_0 — заряд электрона; E_0 — среднее продольное электрическое поле.

В рассматриваемых условиях ФРЭ формируется профилем потенциала страты и потому является существенно нелокальной [12, 13].

При некоторых значениях длины пространственного периода поля в результате пространственной релаксации ФРЭ стягивается к узким максимумам, перемещающимся в плоскости полной энергии электронов ε и координаты z вдоль оси газоразрядной трубки по резонансным траекториям, где $\varepsilon \approx \text{const}$, т. е. имеет место эффект бунчировки [14]. При отличии длины пространственного периода поля от некоторого резонансного значения максимумы ФРЭ расплываются, что приводит к исчезновению резонансной структуры [15]. Наблюдаемые на рис. 5 максимумы температуры электронов связаны с выполнением условий возникновения резонанса ФРЭ в головной

части страт в пространственно периодическом поле разряда. На рис. 9 для сравнения приведена ФРЭ, рассчитанная в работе [3] для Р-страт (выделенный объем соответствуют левой страте на рис. 1, б).

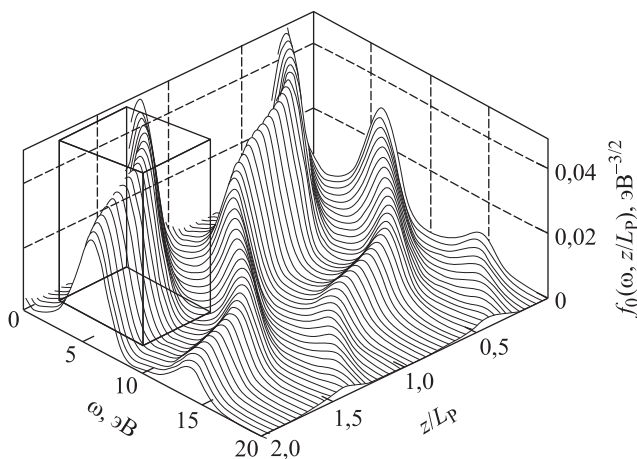


Рис. 9. ФРЭ в Р-стратах:

ω — кинетическая энергия электронов; z/L_p — удельная координата (z — координата, L_p — длина Р-страты)

Таким образом в ходе экспериментальных исследований водородной стратифицированной плазмы низкого давления были получены зависимости параметров плазмы от удельной мощности разряда, анализ которых показывает существенное влияние стратификации разряда на локальные параметры плазмы. На основе этих результатов проведена идентификация типов наблюдаемых страт с использованием кинетической теории стратификации. Это позволяет определять параметры разряда, при которых страты скачкообразно переходят из одного типа в другой.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Козырев А.В., Ланцов А.В. Адаптация установки «Plasma» в среде Phywe Measure. Тез. XIII Конф. стран Содружества Современный физический практикум. Новосибирск, 23–25 сентября 2014 г. Москва, Издат. дом Моск. физ. о-ва, 2014 с. 151, 152.
- [2] *Laboratory Experiments Physics. Phywe.* Phywe Systeme GmbH & Co. KG, Gottingen, 2012, 320 p.
- [3] Голубовский Ю.Б., Некучаев В.О., Скобло А.Ю. Прогресс в исследовании страт в инертных газах. *Журнал технической физики*, 2014, т. 84, вып. 12, с. 50–62.
- [4] Golubovskii Yu.B., Kozakov R.V., Wilke C., Behnke J., Nekuchaev V.O. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2004, vol. 13, no. 1, p. 135–142.
- [5] Golubovskii Yu.B., Scoblo A.Yu., Wilke C., Kozakov R.V., Nekuchaev V.O. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2009, vol. 18, p. 045022.

- [6] Golubovskii Yu.B., Kolobov V.I., Nekuchaev V.O. *Phys. Plasmas*, 2013, vol. 20, p. 101602.
- [7] Голубовский Ю.Б., Скобло А.Ю. О структуре функции распределения электронов в R-стратах. *Письма в Журнал технической физики*, 2007, т. 33, вып. 16, с. 78–85.
- [8] Голубовский Ю.Б., Некучаев В.О., Скобло А.Ю. Исследование структуры функции распределения электронов по энергии в R-стратах. *Материалы Всерос. (с между. участием) конф. ФНТП-2007*. Петрозаводск, 24–28 июня 2007 г. Петрозаводск, ПетрГУ, т. 2, с. 132–135.
- [9] Golubovskii Yu.B., Skoblo A.Yu., Wilke C., Kozakov R.V. Electron Distribution Function in R-striations in an Inert Gas Discharge. *Proc. of 28th ICPiG*. July 15–20, 2007. Prague, Czech Republic, p. 1938–1941.
- [10] Tsendin L.D. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2009, vol. 18, p. 014020.
- [11] Цендин Л.Д. Нелокальная кинетика электронов в газоразрядной плазме. *Успехи физических наук*, 2010, т. 180, вып. 2, с. 139–164.
- [12] Кудрявцев А.А., Смирнов А.С., Цендин Л.Д. *Физика тлеющего разряда*. СПб.: Лань, 2010. 512 с.
- [13] Сухинин Г.И., Федосеев А.В. Самосогласованная кинетическая модель эффекта стратификации разрядов низкого давления в инертных газах. *Теплофизика высоких температур*, 2006, т. 44, № 2, с. 165–173.
- [14] Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. 3-е изд. Долгопрудный, Интеллект, 2009, 734 с.
- [15] Belikov, A.E. Novopashin, S.A. Sakhapov, S.Z. Two Types of Three-Dimensional Stratified Gas Discharge. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Aug. 2011, vol. 39, no. 11, p. 2548–2549.

Статья поступила в редакцию 16.02.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Козырев А.В., Ланцов А.В. Исследование газоразрядной стратифицированной плазмы с использованием среды Phywe Measure, *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 03

URL: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mlgp/1381.html>

Козырев Александр Валентинович родился в 1949 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1972 г., МГУ им. М.В. Ломоносова в 1976 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных трудов в области физики и техники неравновесной плазмы. e-mail: kozyryl@gmail.ru

Ланцов Александр Витальевич родился в 1991 г., студент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, бакалавр техники и технологий. e-mail: sasha121291@gmail.com.

Study of gas-discharge stratified plasma using the Phywe Measure environment

© A.V. Kozyrev, A.V. Lantsov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article describes the results of the stratified hydrogen plasma study, conducted on the "Plasma" installation, adapted for the use of complex of equipment from the Phywe company. Processing the experimental data was carried out in a Phywe Measure software environment, which allows simplifying processing and increasing the accuracy of the calculation of stratified hydrogen discharge plasma parameters. The presented experimental results concerning the registration of local plasma parameters, depending on the specific discharge power, allow the identification of striations observed in the framework of the kinetic theory of stratification.

Keywords: hydrogen plasma, discharge stratification Phywe Measure, Cobra 3 Basic-Unit, experiment automation, plasma parameters, kinetic resonance of electron distribution function.

REFERENCES

- [1] Kozyrev A.V., Lantsov A.V. Adaptatsiya ustanovki "Plasma" v srede Phywe Measure [Adaptation of the installation "Plasma" in the Phywe Measure Medium]. In: *Tezisy XIII konferentsii stran sodruzhestva "Sovremennyy fizicheskiy praktikum"* [Abstracts of XIII Conference of the Commonwealth Countries "Modern Physical Workshop"]. Novosibirsk, 2014, pp. 151–152.
- [2] *Laboratory Experiments Physics. Phywe*. Phywe Systeme GmbH & Co. KG. Gottingen, 2012, 320 p.
- [3] Golubovskii Yu. B., Nekuchaev V.O., Skoblo A.Yu. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*, 2014, vol. 84, no. 12. pp. 50–62.
- [4] Golubovskii Yu.B., Kozakov R.V., Wilke C., Behnke J., Nekuchaev V.O. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2004, vol. 13, no. 1, pp. 135–142.
- [5] Golubovskiy Yu.B., Scoblo A.Yu., Wilke C., Kozakov R. V., Nekuchaev V.O. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2009, vol. 18, pp. 045022.
- [6] Golubovskii Yu.B., Kolobov V.I., Nekuchaev V.O. *Physics of Plasmas*, 2013, vol. 20, pp. 101602.
- [7] Golubovskii Yu.B., Scoblo A.Yu. *Pisma v ZhTEF — JETP Letters*, 2007, vol. 33, no. 16, pp. 78–85.
- [8] Golubovskii Yu.B., Nekuchaev V.O., Scoblo A.Yu., Issledovanie struktury funktsii raspredeleniya elektronov po energii v R-stratakh [Investigation of the Structure of Electron Energy Distribution Function in the R-Striations]. *Trudy Vserossiyskoy konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem) "Fizika nizkotemperaturnoy plazmy – 2007" (24–28 iyunya 2007 g., Petrozavodsk, Rossiya* [Proceedings of the All-Russia Conference (with International Participation) "Low-Temperature Plasma Physics–2007" (June 24–28, 2007, Petrozavodsk, Russia)]. 2007, vol. 2, pp. 132–135.
- [9] Golubovskii Yu.B., Skoblo A.Yu., Wilke C., Kozakov R.V. *Electron distribution function in R-striations in an inert gas discharge*. Proc. of 28th ICPIG (July 15–20, 2007, Prague, Czech Republic), pp. 1938–1941.
- [10] Tsendin L.D. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2009, vol. 18, p. 014020.

- [11] Tsendin L.D. *Uspeski fizicheskikh nauk – Advances of Physical Sciences*, 2010, vol. 180, no.2, pp. 139–164.
- [12] Kudryavtsev A.A., Smirnov A.S., Tsendin L. D. *Fizika tleushego razryada [Glow Discharge Physics]*. St. Petersburg, Lan Publ., 2010, 512 p.
- [13] Sukhinin G.I., Fedoseev A.V. *Teplofizika vysokikh temperatur – Thermophysics of high temperatures*, 2006, vol. 44, no. 2, pp.165–173.
- [14] Rayzer Yu.P. *Fizika gazovogo razryada [Gas Discharge Physics]*. Dolgoprudnyy, Intellect Publ., 2009, 734 p.
- [15] Belikov, A. E. Novopashin, S. A. Sakhapov, S. Z. Two Types of Three-Dimensional Stratified Gas Discharge. *IEEE Trans. Plasma Sci.* Aug. 2011, vol. 39, no. 11, pp. 2548–2549.

Kozyrev A.V. (b. 1949) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1972, from the Lomonosov Moscow State University in 1976. Candidate of Engineering Sciences (Ph. D.), associate professor at the Department of Physics at the Bauman Moscow State Technical University. The author of more than 70 scientific papers in the field of physics and technology of non-equilibrium plasma.
e-mail: kozykryl@gmail.ru

Lantsov A.V. (b. 1991), B. Sc., student at the Department of Physics at Bauman Moscow State Technical University. e-mail: sasha121291@gmail.com.