

Особенности формирования плазмы импульсно-периодического резонансного СВЧ-разряда в инертных газах (Ar, He) при пониженном давлении

В. В. Андреев, И. Василеска, В. И. Каряка, М. А. Корнеева

Проведено экспериментальное изучение динамики формирования плазмы инертных газов (Ar, He) импульсно-периодического резонансного СВЧ-разряда в диапазоне давлений 1×10^{-3} –10 Торр и подводимой мощности от 100 до 600 Вт. Проведены измерения временных зависимостей падающей и отраженной мощности, а также интегральной интенсивности оптического излучения в фазе пробоя и формирования стационарного состояния. Определены зависимости характерных времен формирования плазмы от рабочих параметров разряда: давления плазмообразующего газа, вкладываемой мощности и скважности импульсов нагрева.

Ключевые слова: резонансный СВЧ-разряд, скважность, оптическое излучение, время пробоя, время плазмообразования.

Ссылка: Андреев В. В., Василеска И., Каряка В. И., Корнеева М. А. // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 11.
Reference: V. V. Andreev, I. Vasileska, V. I. Karjaka, and M. A. Korneeva, Prikl. Fiz., No. 5, 11 (2018).

Введение

В отличие от хорошо изученных режимов формирования плазмы микроволновых резонансных разрядов при низких давлениях (1×10^{-3} – 1×10^{-5} Торр), широко применяемых в вакуумно-плазменных технологиях [1, 2], особенности разрядов такого типа в пониженном диапазоне рабочих давлений (1×10^{-3} –10 Торр) изучены не так подробно.

Как было показано ранее [3, 4], в таком разряде существуют режимы, обеспечивающие эффективное преобразование введенной в газоразрядную плазму энергии электромагнитной волны СВЧ-диапазона в энергию оптического излучения. Для создания газоразрядных источников оптического излучения [5] актуальными задачами является как поиск эффективных плазмообразующих газовых смесей, так и выявление процессов, опре-

деляющих спектральные, временные и энергетические характеристики излучения.

Целью данной работы является рассмотрение особенностей пробоя и времени формирования плазмы микроволнового резонансного разряда в магнитном поле пробочной конфигурации в аргоне и гелии в указанной области рабочих давлений.

Экспериментальная установка и средства диагностики

Цилиндрический резонатор (TE₁₁₁, 2,45 ГГц) с соосной кварцевой колбой ($R = 5,5$ см, $l = 4$ см) располагался в магнитном поле симметричной пробочной ловушки, создаваемой постоянными магнитами (из SmCo₆) с системой магнитного замыкания. Индукция магнитного поля в минимуме ловушки составляла 875 Гс. Резонатор, ненагруженная добротность которого составляла 600 для рабочей частоты, запитывался от магнетронного генератора посредством дифракционной связи с волноводным СВЧ-трактом. Импульсный режим магнетронного генератора обеспечивался модулятором с частичным разрядом накопительной емкости и позволял варьировать длительность и частоту повторения импульсов СВЧ.

СВЧ-тракт был снабжен ответвителем и циркулятором с детекторными головками с квадратичными детекторами для мониторинга подводимой и отраженной мощности. Поле в резонаторе регистрировалось детекторной головкой с согла-

Андреев Виктор Викторович¹, доцент, к.ф.-м.н.
Ивона Василеска², аспирант.

Каряка Владимир Иванович¹, доцент, к.ф.-м.н.
Корнеева Мария Анатольевна¹, ассистент.

¹ Институт физических исследований и технологий РУДН.

Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.
E-mail: korneevama@mail.ru; vvandreev@mail.ru

² Факультет математики и физики Люблянского университета.
Словения, 1000, Любляна, Конгресни трг., 12.

E-mail: ivonavasileska@yahoo.com

Статья поступила в редакцию 7 мая 2018 г.

© Андреев В. В., Василеска И., Каряка В. И., Корнеева М. А., 2018

сованной петлевой антенной ($U \propto E^2 \propto H^2 \propto P_0$). Измерения параметров импульса огибающей СВЧ-колебаний производились с помощью осциллографа. Измерение средней мощности генератора $P_{\text{ср}} = P_{\text{имп}} \tau f$, где τ – длительность импульса, f – частота повторения, производилось измерителем мощности МЗ-54 в широком диапазоне изменения частоты импульсов, но при фиксированной длительности импульса 2 мс.

Вакуумная система установки обеспечивала фоновое давление в кварцевой колбе не хуже 1×10^{-5} Торр. Плавное изменение давления плазмообразующего газа в рабочем объеме осуществлялось с помощью пьезоэлектрического натекаателя СНА-2. Диапазон давлений в рабочих режимах установки составлял 5×10^{-3} –10 Торр.

Для определения характерных времен формирования разряда регистрировались сигналы в канале подводимой и отраженной СВЧ-мощности и проводились измерения интегральной интенсивности оптического излучения разряда. Основными видами излучения, вносящими вклад в радиационные потери плазмы разряда в указанном диапазоне давлений, являются линейчатое и рекомбинационное. Интегральная интенсивность излучения пропорциональна произведению электронной и ионной плотности и обратно пропорциональна квадратному корню температуры электронов. Таким образом, характерные временные и абсолютные значения радиационной кинетики являются эффективными индикаторами эволюции процессов ионизации. Регистрация поведения интенсивности интегрального (по длине волны) света во времени осуществлялась высокоскоростным фотодетектором SD3421/5421 (диапазон 500–1100 нм, постоянная времени 15 нс). Используемый детектор обладает линейной зависимостью выходного напряжения от интенсивности излучения в области спектральной чувствительности. Данный детектор пристыковывался к вакуумно-плотному окну с увиолевым стеклом и регистрировал излучение в направлении, перпендикулярном боковой поверхности резонатора. Область обзора детектора охватывала практически весь объем кварцевой колбы. Сигнал с детектора подавался на цифровой осциллограф. Освещенность регистрировалась при помощи аттестованного люксметра ТКА-ПКМ С051 (380–760 нм, диапазон от 10 до 200000 лк, погрешность $\pm 8,0$ %). Фотометрическая головка в процессе измерений устанавливалась аналогично фотодетектору.

Экспериментальные результаты

Проведенные ранее исследования [4] показали наличие режима с высокой светоотдачей, пе-

реход в который происходит скачкообразно при режиме генерации плазмы со сверхкритической плотностью. Для аргона и для гелия изменение режима генерации происходит при характерных значениях давления, а именно, $\sim 5 \times 10^{-3}$ Торр для аргона и $\sim 1 \times 10^{-2}$ Торр для гелия. Для понимания процессов, протекающих в плазме изучаемого разряда, было проведено изучение характерных изменений времени пробоя и формирования плазмы в рабочем диапазоне давлений. Измерения проводились для 8 значений скважности (от 2 до 16) при фиксированной длительности импульса 2 мс.

На рис. 1 представлены результаты обработанных сигналов детекторов в удобном для анализа виде, т. е. в форме временной зависимости поглощенной СВЧ-мощности и интегральной интенсивности излучения. Анализ кинетики интенсивности излучения и сигналов СВЧ-тракта показал, что процесс формирования плазмы разряда может быть представлен в виде двух этапов: собственно пробой (рис. 1, этап I) и плазмообразование (рис. 1, этап II). Такое типичное поведение наблюдается и при низких давлениях [2]. Видно, что пробой характеризуется скачкообразным изменением уровня поглощенной мощности, связанного с изменением напряженности электрического поля внутри разрядной камеры. В фазе пробоя ионизация производится в значительной части электронами, которые приобретают энергию в результате резонансного взаимодействия. В оптимальных условиях приобретаемая энергия должна соответствовать энергии, при которой сечение ионизации плазмообразующего газа достигает своего максимального значения, а время удержания таких частиц должно превышать время ионизации. Пробег электрона при температуре, характерной для электронов разряда $T_e = 5$ –10 эВ [3, 4], без учета влияния магнитного поля при давлении $\sim 10^{-2}$ Торр составляет ~ 1 см, что соответствует масштабу линейных размеров рабочего объема. При резонансном взаимодействии на частоте 2,45 ГГц наиболее эффективное значение энергии электронов для аргона будет достигнуто при напряженности поля в резонаторе ~ 1 В/см [6], что существенно меньше, чем рабочие значения с характерным масштабом в сотни В/см.

Измерения показали, что изменение скважности в указанном диапазоне при фиксированном значении давления не оказывало существенного влияния на время пробоя (рис. 2) в пределах ошибки измерений, и поэтому итоговые результаты представлены без разделения по скважности. Смена режима генерации разряда при увеличении давления сопровождается существенным уменьшением времени пробоя (рис. 2). Увеличение давления свыше $p > 2,5 \times 10^{-2}$ Торр для Ag и $p > 3,5 \times 10^{-2}$ Торр для He не приводит к изменению вре-

мени пробоя вплоть до порогового значения 10 Торр, при котором газ в рабочем объеме не пробивается в рабочем диапазоне мощностей. В области малых мощностей длительность пробоя

увеличивается: для аргона влияние величины мощности становится существенным при величине поглощенной мощности <300 Вт. В области больших мощностей время пробоя практически неизменно.

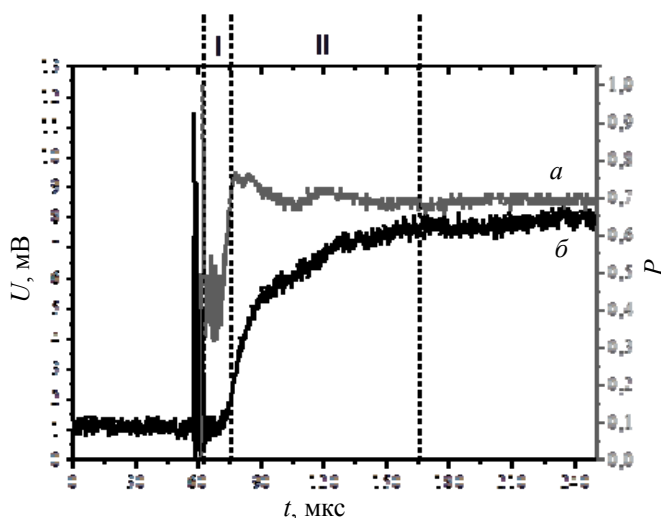


Рис. 1. Характерные области формирования плазмы разряда: пробой (I) и плазмообразование (II); а – доля поглощенной мощности; б – сигнал фотодетектора.

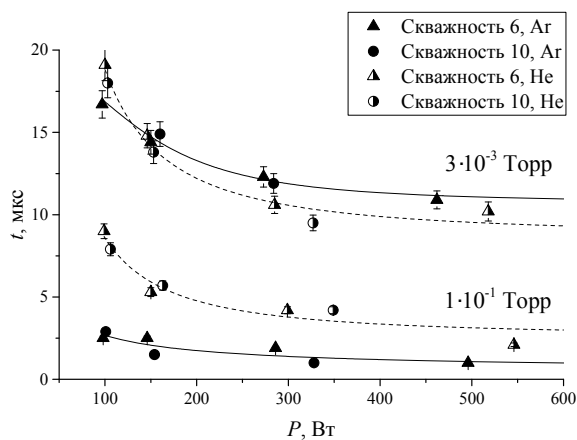


Рис. 2. Зависимость времени пробоя от падающей мощности.

Приведенные зависимости (рис. 2) свидетельствуют также, что при давлениях $\sim 10^{-1}$ Торр время пробоя в гелии практически в два раза превышает время пробоя в аргоне, а в области низких давлений $\sim 10^{-3}$ Торр времена равны. Очевидно, это связано с тем, что в условиях высоких давлений для пробоя гелия электронам требуется большее время для достижения энергии, необходимой для ионизации. Кроме того, сечение ионизации аргона при оптимальной энергии ионизации (100 эВ) на порядок превышает сечения ионизации гелия при оптимальной энергии (120 эВ).

Стадия плазмообразования (рис. 1, этап II) в простейшем случае связана с развитием лавины ионизации, когда $v_i - v_d > 0$, где v_i – частота ионизации, а v_d – частота диффузионных потерь. В начальной стадии плазмообразования процессы ионизации преобладают над рекомбинационными процессами. На этом временном участке наблюдается возрастание интенсивности излучения при незначительном изменении поглощенной мощности, например, в пределах 10 %. Стадия плазмообразования завершается установлением стационарных значений поглощенной мощности и интегральной интенсивности излучения. На рис. 3 представлена зависимость времени плазмообразования от падающей мощности.

Обработка сигнала фотодетектора показала, что осциллограммы могут быть аппроксимированы выражением: $U(t) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + U_0$, где $U(t)$ – сигнал фотодетектора, t – время, τ – постоянная

времени сигнала, U_0, A – коэффициенты. Принимая во внимание, что решение уравнения кинетики ионизации газа в условиях СВЧ-разряда также имеет экспоненциальную зависимость, τ можно рассматривать как постоянную времени лавинообразного процесса. Видно (см. рис. 1 и 3), что длительность времени плазмообразования существенно больше времени пробоя, поэтому именно оно дает основной вклад в общее время формирования разряда. Постоянная времени плазмообразования чувствительна к величине подводимой мощности в области до 300 Вт (рис. 3). Дальнейшее увеличение мощности, как и изменение скважности в диапазоне от 6 до 16, не приводит к существенному ее изменению. Экспериментально установлено, что при мощностях свыше 300 Вт время установления стационарного состояния в аргоне при давлениях $\sim 10^{-3}$ Торр составляет порядка 100 мкс, увеличение давления (до $\sim 10^{-1}$ Торр) приводит к увеличению постоянной времени до 200–300 мкс. В гелии же наблюдается обратная тенденция: при низких давлениях время установления стационарной фазы выше (~ 450 мкс), а при высоких значениях давления варьируется в диапазоне от 200 до 300 мкс.

Следует также отметить, что зажигание разряда в гелии при низком уровне мощностей происходит крайне неустойчиво. Данное различие во времени формирования разряда может быть объяснено остаточными явлениями в рабочем объеме, это так называемый «эффект памяти» [7]. В условиях импульсного разряда в распадающейся плазме инертных газов присутствуют атомы в основ-

ном состоянии, заряженные частицы и метастабильные атомы, произведенные в предыдущем разряде. В [8, 9] показано, что метастабильные атомы играют существенную роль в процессе формирования плазмы импульсно-периодического разряда. Этот проявляется особо отчетливо, когда плотность метастабильных атомов сравнивается с плотностью электронов в разряде или превышает ее. В этом случае метастабильные атомы из-за большого времени жизни накапливаются в межимпульсном промежутке времени и играют значительную роль в образовании заряженных частиц в начальной стадии последующего разрядного импульса. Так, в типичных условиях проводимых экспериментов времена жизни метастабильных уровней Ar [7] существенно превышают длительность паузы между СВЧ-импульсами, что, как видно из приведенных результатов, облегчает процесс формирования разряда при следующем импульсе, в отличие от ситуации с He.

Измерения, проведенные люксометром (рис. 4) в рабочем диапазоне давлений, показали рост освещенности при увеличении подводимой к разряду мощности. Максимум освещенности соответствует давлению ~ 1 Торр. Режим с высокой интенсивностью излучения сопровождается созданием плазмы с закритической плотностью.

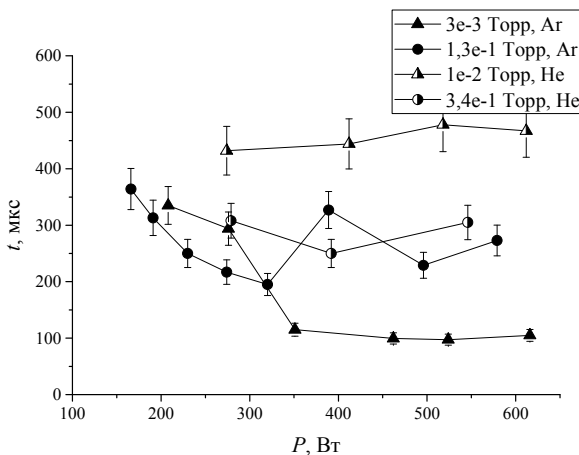


Рис. 3. Зависимость времени плазмообразования от подводимой мощности.

Заключение

Полученные зависимости времени пробоя от давления показывают, что при превышении давления в $\sim 5 \times 10^{-3}$ для аргона ($\sim 1 \times 10^{-2}$ для гелия) пробой рабочего газа существенно облегчается, и время пробоя уменьшается на порядок. Уменьшение времени пробоя сопровождается увеличением светоотдачи плазмообразующего газа. При этом происходит скачкообразное увеличение поглощаемой мощности до 90–95 %. Увеличение вклады-

При этом происходит скачкообразное увеличение поглощаемой мощности до 90–95 %. Исходя из значений концентрации, полученных при зондовых измерениях [3], характерная глубина проникновения волны составляет ~ 3 см, что сравнимо с линейными размерами рабочего объема колбы. Данный факт объясняет причину стабильного поддержания разряда при высоких давлениях и малой вкладываемой мощности (100 Вт).

Следует учесть, что при давлениях свыше 10 Торр (и, особенно, при малых скважностях) наблюдается переход разряда в мультипакторную форму [10, 11], которая возможна только при наличии нескомпенсированного заряда на поверхности диэлектрика, в нашем случае, колбы. В течение импульса разряда электроны плазмы, бомбардирующие диэлектрические стенки, формируют поверхностный отрицательный заряд, который совместно с магнитным полем пробкотрона в межимпульсный интервал замедляет потери электронов из разрядного объема, что также способствует облегчению последующего пробоя. Наличие поверхностных зарядов объясняет особенности времени формирования плазмы разряда на стадии II при малых значениях подводимой мощности и скважностях импульсного процесса.

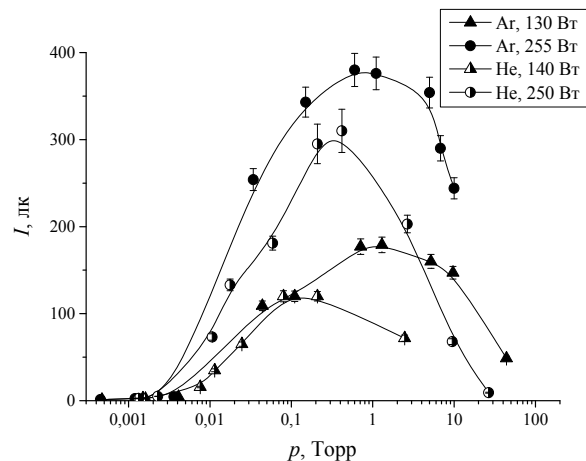


Рис. 4. Зависимость освещенности от давления плазмообразующего газа.

ваемой в разряд мощности в широком диапазоне изменений скважности также приводит к уменьшению характерных времен формирования разряда.

При мощностях свыше 300 Вт значения характерных времен при фиксированном значении давления практически неизменны. Увеличение светоотдачи плазмообразующего газа наблюдается при скачкообразном увеличении поглощаемой мощности вплоть до 90–95 % и возрастании плотности генерируемой плазмы, что приводит к уменьшению времени формирования плазмы.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства образования и науки РФ
(соглашение № 3.2223.2017/4.6) и при частичной
поддержке гранта РФФИ № 16-02-00640.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gulyaev K. S., Kasheev A. V., Kovalev A. S., Suetin N. V., Vasilieva A. N. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1994. Vol. 27. P. 2349.
2. Daniel Cortázar O., Ana Megía-Macias, Alvaro Vizcaino-de-Julián // IEEE Transactions on Plasma Science. 2012. Vol. 40. No. 12. P. 3409.
3. Андреев В. В., Волдинер И. А., Корнеева М. А. // Прикладная физика. 2016. № 2. С. 51.

4. Andreev V. V., Vasileska I., Korneeva M. A. // Plasma Physics Reports. 2016. No. 7. P. 699.
5. Zissis G., Kitsinelis S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. P. 173001.
6. Guest G. Cyclotron Heating of Plasmas – Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2009.
7. Pejovic M. M., Ristic G. S., Karamarkovic J. P. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002. Vol. 35. P. R91.
8. Moss R. S., Eden J. G., Kushner M. J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2004. Vol. 37. P. 2502.
9. Байсова Б. Т., Струнин В. И., Струнина Н. Н., Худайбергенов Г. Ж. // Журнал технической физики. 2003. Т. 73. Вып. 8. С. 30.
10. Лобаев М. А., Иванов О. А., Исаев В. А., Вихарев А. Л. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. № 23. С. 9.
11. Сахаров А. С., Иванов В. А., Конышев М. Е. // Прикладная физика. 2012. № 6. С. 99.

PACS: 52.50.- Sw

Features of plasma formation of a pulse-periodic resonant microwave discharge in inert gases (Ar, He) under reduced pressure

V. V. Andreev¹, I. Vasileska², V. I. Karjaka¹, and M. A. Korneeva¹

¹RUDN University
6 Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russia

²University of Ljubljana
12 Kongresni trg., Ljubljana, 1000, Slovenia

Received May 7, 2018

Consideration is given to an experimental study of the dynamics of the plasma formation of inert gases (Ar, He) of a pulse-periodic resonant microwave discharge in the pressure range 1×10^{-3} –10 Torr and the supplied HF-power up to 600 W. It was shown that the integral intensity of optical radiation increases with the increase of the HF-power absorbed in the discharge. The time dependences of incident and reflected power, as well as the integral intensity of optical radiation in the phase of breakdown and plasma build up time of a stationary state were measured. The dependences of the typical times of the plasma formation from the operating parameters of the discharge (pressure of plasma gas, input HF-power and the duty cycle of heating) have been obtained.

Keywords: resonant microwave discharge, duty cycle, optical radiation, breakdown time, plasma build up time.

REFERENCES

1. K. S. Gulyaev, A. V. Kasheev, A. S. Kovalev, N. V. Suetin, and A. N. Vasilieva, J. Phys. D: Appl. Phys. **27**, 2349 (1994).
2. O. Daniel Cortázar, Ana Megía-Macias, and Alvaro Vizcaino-de-Julián, IEEE Transactions on Plasma Science **40** (12), 3409 (2012).
3. V. V. Andreev, V. I. Voldiner, and M. A. Korneeva, Prikl. Fiz., No. 2, 51 (2016).
4. V. V. Andreev, I. Vasileska, and M. A. Korneeva, Plasma Phys. Rep., No. 7, 699 (2016).
5. G. Zissis and S. Kitsinelis, J. Phys. D: Appl. Phys. **42**, 173001 (2009).
6. G. Guest, *Cyclotron Heating of Plasmas* (WILEY-VCH Verlag, Weinheim, 2009).
7. M. M. Pejovic, G. S. Ristic, and J. P. Karamarkovic, J. Phys. D: Appl. Phys. **35**, R91 (2002).
8. R. S. Moss, J. G. Eden, and M. J. Kushner, J. Phys. D: Appl. Phys. **37**, 2502 (2004).
9. B. T. Baysova, V. I. Strunin, N. N. Strunina, and G. J. Chydaibergenov, Technical Physics **73** (8), 30 (2003).
10. M. A. Lobaev, O. A. Ivanov, V. A. Isaev, and A. L. Vicharev, Technical Physics Letters **35** (23), 9 (2009).
11. A. S. Sakharov, V. A. Ivanov, and M. E. Konyzhev, Prikl. Fiz., No. 6, 99 (2012).