

DOI: 10.34220/2311-8873-2022-3-13



УДК 533.951: 533.9.07

05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

АКУСТИЧЕСКАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

✉¹**Фадеев Сергей Алексеевич**
к.ф.-м.н., научный сотрудник
лаборатории механики сплошной
среды Института механики и машиностроения ФИЦ
Казанский научный центр РАН
email: fadeev@imm.knc.ru

Шайдуллин Линар Радикович
к.ф.-м.н., научный сотрудник
лаборатории механики сплошной
среды Института механики и машиностроения ФИЦ Казанский
научный центр РАН

Кадырметов Анвар Минирович
д.т.н., профессор кафедры машиностроительных технологий ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

Аннотация. В целях технологического применения в процессах подготовки и нанесения плазменных покрытий проведены исследования взаимовлияния акустического воздействия на низкотемпературную плазму, приведена методика эксперимента и результаты исследования в трубе на резонансной частоте возбуждения. Обнаружена нелинейность звуковых колебаний и их усиление при повышении давления, что может быть использовано для интенсификации процессов нанесения плазменных покрытий.

Ключевые слова: ЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ, ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД, ПЛАЗМА, ЭКСПЕРИМЕНТ, ТРУБА.

ACOUSTIC INTENSIFICATION OF PROCESSES IN THE PLASMA OF THE GLOW DISCHARGE FOR TECHNOLOGICAL PROCESSES

✉¹**Sergey A. Fadeev**
cand. of Physics and Mathematics, Researcher of the Laboratory of Continuum Mechanics, Institute of Mechanics and Engineering, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences
email: fadeev@imm.knc.ru

Linar R. Shaydullin
cand. of Physics and Mathematics, Researcher of the Laboratory of Continuum Mechanics, Institute of Mechanics and Engineering, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences

Anvar M. Kadyrmetov
D. of Tech. Sc., Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov

Abstract. In order to technological use in the preparation and application of plasma coatings, the mutual influence of acoustic impact on low-temperature plasma was conducted, the experimental methodology and the results of the study in the pipe at the resonant excitation frequency are given. The nonlinearity of sound oscillations was found and their amplification by increasing the pressure, which can be used to intensify the processes of plasma coatings.

Keywords: SOUND OSCILLATIONS, GLOW DISCHARGE, PLASMA, EXPERIMENT, TUBE.

¹Автор для ведения переписки

1 Введение

Актуальность исследования взаимодействия звуковых волн и низкотемпературной плазмы обусловлена широким применением газовых разрядов в различных областях науки и техники. Равновесная газоразрядная плазма применяется для нанесения покрытий, получения и сфероидизации порошков из металлов и других тугоплавких материалов, резки, наплавки, в качестве реагента и (или) энергоносителя при различных химических взаимодействиях и во многих других приложениях [1-6]. Неравновесная плазма, обладая высокой химической активностью, обусловленной большим отрывом электронной и газовой температур [7], применяется в плазмохимических реакторах [8], в процессах поверхностной модификации материалов, напыления и осаждения покрытий [9, 10, 11], в плазменных актуаторах [12, 13], в микроэлектронике [14, 15], в качестве активной среды космических электрореактивных двигателей [16, 17].

Широкое разнообразие неравновесных физико-химических процессов в газоразрядной плазме возможно при изменении внешних условий: давление, структура электромагнитного поля, состав рабочего газа, конфигурация газоразрядной камеры, временная зависимость внешних условий. В связи с этим управление параметрами плазмы является важной задачей современной физики газового разряда. Интенсификация процессов в газоразрядной плазме при нанесении плазменных покрытий может быть осуществлена различными способами динамического воздействия на газовые разряды, к числу которых относят перспективный метод акустического воздействия [18-21]. Не менее важной проблемой является исследование обратного влияния плазмы на звуковые волны.

В работах [22-24] представлены исследования механизмов усиления звуковых колебаний в средах с объемным тепловыделением и отрицательной вязкостью характерных для низкотемпературной плазмы. Увеличение интенсивности звуковых колебаний в разряде связано с взаимодействием между тяжелыми нейтральными частицами и электронным газом и переход энергии возбужденных молекул в энергию звуковых колебаний обсуждается в [25-30]. В работах [31, 32] приведены результаты экспериментального исследования усиления звуковой волны в колебательно-неравновесном молекулярном газе (N_2). Теория акустической неустойчивости и поведение фазовой скорости звуковых колебаний в плазме рассматривается в [33-35].

Важным направлением исследований является плазменная аэродинамика. Обнаружено, что при движении тел, на поверхности которых создается плазменная оболочка, наблюдается снижение аэродинамического сопротивления и рост подъемной силы, разрушение ударной волны перед движущимися телами, или ее усиление – это зависит от типа разряда [36-39].

В данной работе представлены результаты и методика изучения звуковых колебаний в неравновесной плазме тлеющего разряда, ограниченного жесткими диэлектрическими стенками.

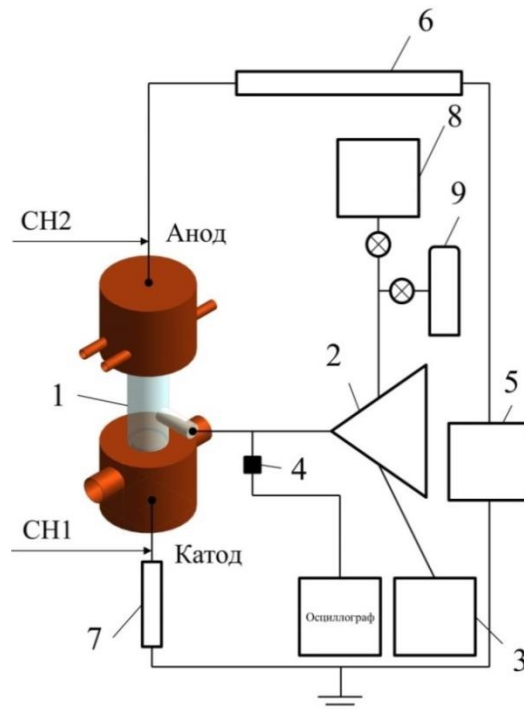
2 Экспериментальная установка

Экспериментальная установка является связью электрической, вакуумной и акустической систем. Общая принципиальная схема установки представлена на рисунке 1.

Тремя основными модулями, составляющими акустическую систему экспериментальной установки, являются источник звука, приемник и резонатор.

Система генерации звуковых колебаний состоит из модуля усилителя звука, генератора сигналов ГЗ-18 и 3-х дюймового динамика DL30TZF-02. Генератор сигналов ГЗ-18 предназначен для создания синусоидальных электрических колебаний звуковой частоты для регулировки и испытания радиоаппаратуры в лабораторных и заводских условиях.

Система регистрации параметров получаемого акустического сигнала включает в себя электретный микрофон марки НМ00603А и компьютер с программным обеспечением для анализа звуковых сигналов. Микрофон устанавливается в Т-образном патрубке. Во избежание срыва разряда на систему приема, микрофон соединяется с компьютером через разделительный конденсатор.



1 – трубка из термостойкого боросиликатного стекла; 2 – динамик;
 3 – генератор синусоидальных сигналов; 4 – микрофон; 5 – источник питания;
 6, 7 – балластное сопротивление; 8 – вакуумный насос, 9 – аргоновый баллон

Рисунок 1 – Принципиальная схема и внешний вид экспериментальной установки

тельный трансформатор с усиленной изоляцией и автономным источником питания.

Исследуемые акустические колебания создаются в резонаторах, представляющих собой газоразрядную трубку из термостойкого боросиликатного стекла марки «Simax» с двумя плоско-параллельными электродами из меди на противоположных концах. Резонатор с длиной $L = 32$ см и внутренними диаметрами $d = 2,6$ см. Толщина стенки трубки составляла $\delta_t = 0,2$ см. Динамик DL30TZF-02 установлен в вакуумную камеру, объемом $588,2$ см³, которая присоединена к газоразрядной трубке через патрубок на боковой стенке (рис. 2).



Рисунок 2 – Соединение вакуумной камеры динамика и газоразрядной трубки

Тлеющий разряд зажигается и поддерживается источником питания постоянного тока Spellman STR30*6 (0-30 кВ) (5). Положительное напряжение подается на анод через балластный резистор (6), помещенный последовательно. Катод заземлен через шунт. В исследованиях источник работает в режиме контроля по току. Общее балластное сопротивление в электрической цепи составляет 40 кОм (6, 7). Токи и напряжения на разрядном промежутке регистрируются с помощью осциллографа Rigol DSC2072A. Для измерения напряжения используется высоковольтный щуп АСА-6039 через канал осциллографа CH2. В качестве токового шунта использовалась часть балластного сопротивления на 700 Ом (7) со стандартным щупом RP3300A присоединенным к осциллографу через канал CH1. Нагруженный электрод – анод, имеет замкнутый контур водяного охлаждения с дистиллированной водой в качестве носителя. Дистиллят приводится в движение водяным насосом с автономной системой электропитания. Более подробное описание экспериментальной установки и методика измерения электрических характеристик разряда представлены в работе [40].

3 Методика проведения эксперимента

Сопротивление газоразрядного промежутка зависит от величины тока, его вольт-амперная характеристика не линейна и представляет особый интерес при исследовании газового разряда. Результаты исследования влияния звуковых колебаний на вольт-амперную характеристику тлеющего разряда приведены в [40].

Исследование звуковых колебаний в плазме тлеющего разряда проводятся следующим образом. После зажигания разряда и напуска аргона до нижнего предела рабочего диапазона давления 10 Торр на динамик DL30TZF-02, через усилитель звука, подается синусоидальный сигнал с генератора ГЗ-18. Мощность выходного сигнала с усилителя составляет 25 Вт. Варированием частоты сигнала через генератор и анализом его параметров, регистрирующихся на компьютере с помощью микрофона, определяется резонанс газоразрядной трубки. В случае изменения давления и тока, происходила подстройка резонансного режима колебаний в газоразрядной плазме. Данные акустических сигналов записываются в каждый момент измерения напряжения тлеющего разряда при фиксированных значениях тока и давления.

Предварительно микрофон был калиброван относительно акустического давления на катоде. Калибровка микрофона проводится следующим образом, на конце трубки, в сечении, где находится катод во время проведения экспериментальных исследований, герметично устанавливается измеритель уровня звука АТТ-9000. Результаты экспериментов по исследованию влияния нелинейных акустических колебаний показали, что наиболее близкой к резонансной частоте газоразрядного столба лежит вторая резонансная частота трубки в отсутствии разряда. В связи с этим калибровка микрофона осуществлялась на второй резонансной частоте. Данные зависимости уровня звукового давления P_{dB} от амплитуды напряжения сигнала с микрофона U_a , полученного с помощью электронного осциллографа, представлены на рисунке 3. Таким образом, полученный сигнал дает значение амплитуды колебаний давления на катоде.

Для определения абсолютных величин амплитуды давления используется выражение определяющее уровень звукового давления

$$P_{dB} = 20 \lg \frac{P_a}{P_{SPL}}, \quad (1)$$

где P_a – абсолютное значение амплитуды давления в единицах измерения паскаль, $P_{SPL}=20$ мкПа – опорное давление, соответствующее порогу слышимости синусоидальной звуковой волны частотой 1 кГц. Выражение для абсолютного значения амплитуды давления имеет следующий вид

$$P_a = P_{SPL} 10^{\frac{P_{dB}}{20}}. \quad (2)$$

Зависимости $P_{дв}(U_a)$ и $P_a(U_a)$ представлены на рисунках 3 и 4, соответственно. Между абсолютными значениями амплитуды давления и данными сигнала осциллографа наблюдается линейная зависимость.

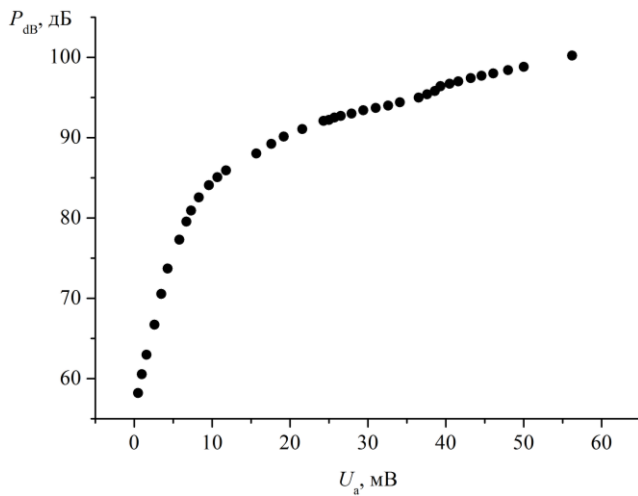


Рисунок – 3. Зависимость уровня звукового давления $P_{дв}$ от амплитуды колебаний напряжения сигнала создаваемого микрофоном U_a .

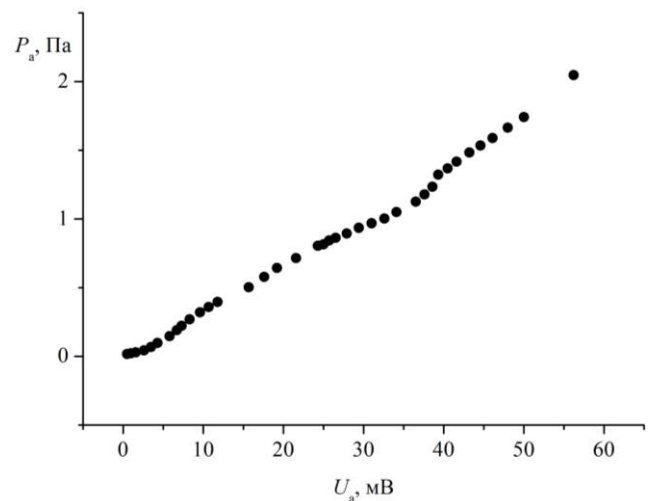
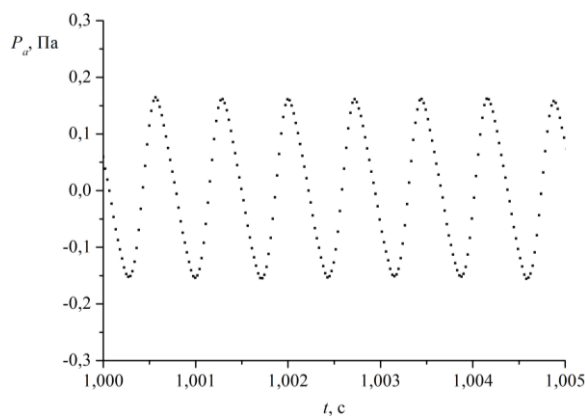


Рисунок 4 – Зависимость амплитуды колебаний давления P_a от амплитуды колебаний напряжения сигнала создаваемого микрофоном U_a .

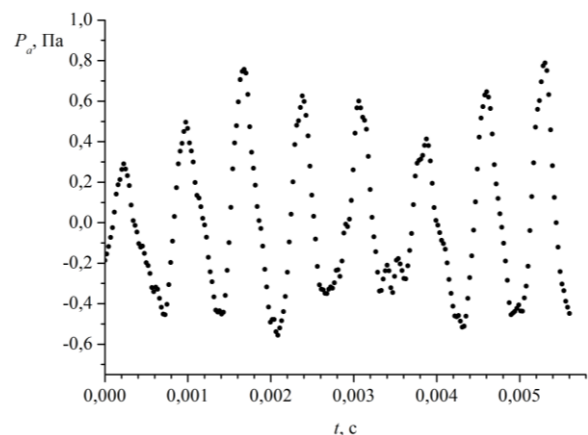
4 Результаты исследования и их обсуждение

В работе [40] показано, что наличие резонансных звуковых колебаний в вакуумной трубке приводит к повышению электрического сопротивления разрядного промежутка и увеличению энерговклада. Это вызвано интенсификацией тепло- и массообменных процессов в волновом поле, что качественно согласуется с другими экспериментальными результатами [41, 42].

Рассмотрим колебания давления на катоде при различных значениях стационарного давления. Колебания давления вблизи катода при стационарных значениях давлений $p = 34,6$ Торр и $p = 72,4$ Торр представлены на рисунках 5, а и 5, б, соответственно. Спектры колебаний давления, показанные на рисунке 6, содержат высшие гармоники с частотами кратными основной частоте газоразрядной трубки. В данных условиях регистрируются нелинейные колебания среды. На рисунке 5 наблюдается асимметричность переднего и заднего фронтов



а



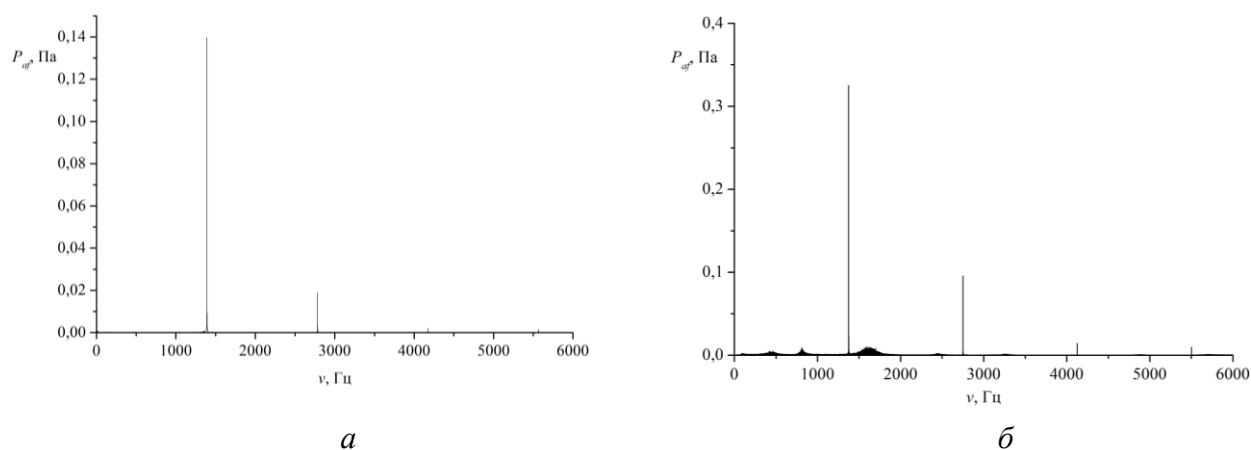
б

а – $p = 34,6$ Торр; б – $p = 72,4$ Торр

Рисунок 5 – Колебания давления вблизи катода при $I = 36,6$ мА

волны давления для обоих случаев. В случае $p = 72,4$ Торр заметно искажение звукового сигнала обусловленного, по всей видимости, генерацией шумов в прикатодной области. С повышением давления уменьшается длина прикатодной области, при этом катодное падение потенциала остается неизменным [5], возрастает плотность энергии вблизи катода, что ведет к его эрозии и появлению шума. Стоит отметить, что данные процессы развиваются на фоне общего увеличения мощности вкладываемой в разряд. Для давлений 34,6 и 72,6 Торр мощность тлеющего разряда составляет 75 и 88,8 Вт [40, 43]. Появления шумов можно заметить на графике спектра колебаний давления (рис. 6, б).

Динамизация режимов горения тлеющего разряда акустическим воздействием может быть использована для повышения эффективности очистки поверхностей с целью плазменного напыления покрытий и других технологических приложений [11].



$a - p=34,6$ Торр; $b - p = 72,4$ Торр

Рисунок 6 – Спектр колебаний давления при $I=36,6$ мА,

Заключение

В данной работе исследованы звуковые колебания в неравновесной плазме тлеющего разряда, ограниченного жесткими, диэлектрическими стенками при различных значениях стационарного давления. Представлена методика изучения звуковых колебаний в плазме тлеющего разряда. Показано, что в данных условиях регистрируются нелинейные звуковые колебания среды. Появление искажения звуковых колебаний при повышении давления обусловлено процессами в прикатодной области. С увеличением давления, при фиксированном токе, повышается мощность, вкладываемая в разряд, в прикатодной области возрастает плотность энергии, что ведет к эрозии катода и появлению шума. Динамизация режимов горения тлеющего разряда воздействием звуковых колебаний, может быть использована для повышения эффективности очистки поверхности под нанесение покрытий плазменным напылением.

Список литературы

- 1 Соснин, Н. А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. / Н. А. Соснин, С. А. Ермаков, П. А. Тополянский – СПб. : Изд-во Политехнического ун-та, 2013. – 406 с.
- 2 Messler Jr., R. W. Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy 1st Edition / R. W. Messler Jr. – Germany: Wiley-VCH, 1999. – 662 p.
- 3 Разина, Г. Н. Переработка углеродсодержащих веществ в низкотемпературной плазме : учеб. пособие / Г. Н. Разина ; Г. Н. Разина ; под ред. Н. Г. Дигурова. – М. : Рос. хим.-технол. ун-т им. Д. И. Менделеева, 2005. – 87 с.

- 4 Жуков, М. Ф. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны) / М. Ф. Жуков – М. : Наука, 1973. – 232 с.
- 5 Райзер, Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер – М. : Наука, 1987. – 592 с.
- 6 Ерёмин, С. А. Сфероидизация железного порошка в СВЧ- и гибридном плазмотронах. / С. А. Ерёмин, В. Н. Аникин, Д. В. Кузнецов, И. А. Леонтьев, Ю. Д. Степанов, В. З. Дубинин, А. М. Колесникова, Ю. М. Яшнов // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2019. – (3). – С. 4-12.
- 7 Bogaerts, A. Gas discharge plasmas and their applications / A. Bogaerts, E. Neyts, R. Gijbels, J. van der Mullen // Spectrochimica Acta Part B. – 2002. – V. 57. – p. 609-658.
- 8 Вурзель, В. Ф. Применение низкотемпературной плазмы в химической промышленности / В. Ф. Вурзель // в кн. Очерки физики и химии низкотемпературной плазмы / Под ред. Л. С. Полака. – М. : Наука, 1971. – С. 411-433.
- 9 Roth, J.R. Industrial Plasma Engineering, vol. 2. / J.R. Roth. – U.K. : IOP Publ. Ltd, 2001. – 645 p.
- 10 Begrambekov, L. B. Irradiation with hydrogen atoms and ions as an accelerated hydrogenation test of zirconium alloys and protective coatings / L. B. Begrambekov, A. E. Evsin, A. V. Grunin, A. I. Gumarov, A. S. Kaplevsky, N. F. Kashapov, A. G. Luchkin, I. R. Vakhitov, I. V. Yanilkin, L. R. Tagirov // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – V. 44 (31). – p. 17154-17162.
- 11 44. Kadyrmetov, A. M. Efficiency of surface cleaning by a glow discharge for plasma spraying coating A. M. Kadyrmetov, N. F. Kashapov, S. N. Sharifullin, A. I. Saifutdinov, S. A. Fadeev // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 134 (1). 012010.
- 12 Roth, J. R. Aerodynamic flow acceleration using paraelectric and peristaltic electrohydrodynamic effects of a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma / J. R. Roth // Physics of Plasmas. – 2003. – V. 10 (5). – p. 2117-2126.
- 13 Kopiev, V. F. Instability wave control in turbulent jet by plasma actuators / V. F. Kopiev, Y. S. Akishev, I. V. Belyaev, N. K. Berezhetskaya, V. A. Bityurin, G. A. Faranosov, M. E. Grushin, A. I. Klimov, V. A. Kopiev, I. A. Kossyi, I. A. Moralev, N. N. Ostrikov, M. I. Taktakishvili, N. I. Trushkin, M. Y. Zaytsev // J. Phys. D. Appl. Phys. – 2014. – V. 47 (50). – p. 505201.
- 14 Lieberman, M. A. Principles of plasma Discharges and Materials Processing / M. A. Lieberman, A. J. Lichtenburg – N. Y. : Wiley, 2005, – 757 p.
- 15 Chen, F. F. Radiofrequency plasma sources for semiconductor processing, Chap. 6 in “Advanced Plasma Technology” / Ed. by R. d’Agostino, P. Favia, Y. Kawai, H. Ikegami, N. Sato, F. Arefi-Khonsari. – Germany : Wiley-VCH, 2008. – p. 99-115.
- 16 Sheehan, J. P. Temperature gradients due to adiabatic plasma expansion in a magnetic nozzle / J. P. Sheehan, B. W. Longmier, E. A. Bering, C. S. Olsen, J. P. Squire, M. G. Ballenger, M. D. Carter, L. D. Cassady, F. R. Chang Diaz, T. W. Glover, A. V. Ilin // Plasma Sources Sci. Technol. – 2014. – V. 23 (4). – 045014.
- 17 Olsen, C. S. Investigation of plasma detachment from a magnetic nozzle in the plume of the VX-200 magnetoplasma thruster / C. S. Olsen, M. G. Ballenger, M. D. Carter, F. R. Chang Diaz, M. Giambusso, T. W. Glover, A. V. Ilin, J. P. Squire, B. W. Longmier, E. A. Bering, P. A. Cloutier // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2015. – V. 43 (1). – p. 252-268.
- 18 Ильющенко, А. Ф. Влияние акустических колебаний на характеристики процесса плазменного напыления / А. Ф. Ильющенко, Г. П. Лизунков, В. Д. Шиманович // IX Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы : Тез. докл. – Фрунзе : Илим, 1983. – С. 292-293.
- 19 Толтаева, А. К. Исследование аэродинамики турбулентного газового факела богатой смеси при наложении звукового воздействия : Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Алма-Ата, 1987. – 22 с.
- 20 Ажаронков, В. В. Влияние внешнего акустического поля на температуру плазмы

дугового разряда / В. В. Ажаронок, Н. Ф. Алешин, В. А. Губкевич, П. П. Лизунков и др. // Инженерно-физический журнал. – 1986. – №3. – С. 481-486.

21 Лизунков, Г. П. Интенсификация плазменного напыления при воздействии акустических и электрических колебаний на гетерогенную струю / Г. П. Лизунков, В. Д. Шиманович, И. С. Буров, А. Ф. Ильющенко // Инженерно-физический журнал. – 1984. – № 5. – С. 812-816.

22 Цендин, Л. Д. Влияние разогрева электронов на акустическую неустойчивость плазмы в электрическом поле / Л. Д. Цендин // ЖТФ. – 1965. – V. 35 (11). – С. 1972-1977.

23 Ingard, U. Acoustic Wave Generation and Amplification in a Plasma / U. Ingard // Phys. Rev. – 1966. – V. 145 (1). – p. 41-45.

24 Осипов, А. И. Кинетические и газодинамические процессы в неравновесной молекулярной физике / А. И. Осипов, А. В. Уваров // УФН. – 1992. – Т. 162 (11). – С. 1-42.

25 Александров, Н. Л. Механизм усиления звука в слабоионизованном газе / Н. Л. Александров, А. Н. Кончаков, А. П. Напартович, А. Н. Старостин // ЖЭТФ. – 1989. – Т. 95 (5). – С. 1614-1620.

26 Завершинский, И. П. О механизме усиления звука в слабоионизованном газе / И. П. Завершинский, Е. Я. Коган, Н. Е. Молевич // ЖЭТФ. – 1991. – Т.100 (2). – С. 422-427.

27 Bauer, H. J. Sound amplification from controlled excitation reaction / H. J. Bauer, H. E. Bass // Phys.Fluid. – 1973. – V.16 (7). – p. 988-996.

28 Коган, Е. Я. Распространение звука в колебательно возбужденном газе / Е. Я. Коган, В. Н. Мальнев // ЖТФ. – 1977. – Т. 47 (3). – С. 653-656.

29 Осипов, А. И. Распространение нелинейных гидродинамических возмущений в колебательно-неравновесном газе / А. И. Осипов, А. В. Уваров // Хим. физ. – 1987. – Т. 6 (3). – С. 385-389.

30. Елецкий, А.В. Нелинейное усиление звуковой волны в неравновесном молекулярном газе / А.В. Елецкий, Е.В. Степанов // Химическая физика. – 1989. – Т. 8. – с. 1247–1250.

31 Галечян, Г. А. Экспериментальное исследование усиления звука в плазме колебательно-неравновесного молекулярного газа / Г. А. Галечян, А. Р. Мкртчян // Письма в ЖТФ. – 2001. – Т. 27 (14). – С. 68-73.

32 Галечян, Г. А. Усиление акустических волн в плазме молекулярного газового разряда / Г. А. Галечян, А. Р. Мкртчян // Акустический журнал. – 2002. – Т. 48 (3). – С. 314-318.

33 Торосян, О. С. Теория акустической неустойчивости и поведение фазовой скорости звуковых волн в слабоионизованной плазме / О. С. Торосян, А. Р. Мкртчян // Физика плазмы. 2003. Т. 29. (4). – С. 376-384.

34 Schulz, M. Acoustic kink instability in an argon discharge / M. Schulz, U. Ingard // Physics of Fluids. – 1967. – V. 10 (5). – pp. 1031-1036.

35 Kaw, P. Acoustic Instability in Weakly Ionized Gases / P. Kaw // Phys. Rev. – 1969. – V. 188. – pp. 506-508.

36 Климов, А. И. Распространение ударных волн в нестационарном тлеющем разряде / А. И. Климов, А. Н. Коблов, Г. И. Мишин, Ю. Л. Серов, И. П. Явор // Письма в ЖТФ. – 1989. – Т. 15 (20). – С. 31-36.

37 Быстров, С. А. Распространение плоской ударной волны в слабоионизованной плазме / С. А. Быстров, В. И. Иванов, Ф. В. Шугаев // Физ. Плазмы. – 1989. – Т. 15 (5). – С. 558-562.

38 Гридин, А. Ю. Распространение ударных волн в плазме тлеющего разряда / А. Ю. Гридин, А. И. Климов, Н. Е. Молевич // ЖТФ. – 1993. – Т. 63 (3). – С. 157-162.

39 Гридин, А. Ю. Структура ударной волны в неравновесной плазме (выделение энергии, запасенной в разрядной плазме за ударной волной) / А. Ю. Гридин, А. И. Климов // Хим. Физика. – 1993. – Т. 12 (3). – С. 363-365.

40 Фадеев, С. А. Влияние резонансных акустических колебаний на вольт-амперную характеристику тлеющего разряда / С. А. Фадеев, Н. Ф. Кашапов, А. И. Сайфутдинов // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. – 2020. – Т. 76 (1). – С. 132-137.

41 Галечан, Г. А. Акустические волны в плазме / Г. А. Галечан // УФН. – 1995. – Т. 165 (12). – С. 1357-1379.

42 Кашапов, Н. Ф. Исследование влияния акустических колебаний на характеристики тлеющего разряда / Н. Ф. Кашапов, С. А. Фадеев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57 (3/2). – С. 110-113.

43 Кашапов, Н. Ф. Экспериментальное исследование влияния акустических колебаний на вольт-амперную характеристику тлеющего разряда в аргоне / Н. Ф. Кашапов, С. А. Фадеев // Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2020 : (Казань, 9-13 ноября 2020 г.). Сборник тезисов. – Казань : Издательство Казанского университета, 2020. – С. 48-49.

References

1 Sosnin, N. A. Plasma technology. A guide for engineers. / N. A. Sosnin, S. A. Ermakov, P. A. Topolyansky – SPb.: Publishing house of the Polytechnic University, 2013 . – 406 p. [in Russian].

2 Messler Jr., R. W. Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy 1st Edition / R. W. Messler Jr. – Germany: Wiley-VCH, 1999. – 662 p.

3 Razin, G. N. Processing of carbonaceous substances in low-temperature plasma: textbook. allowance / G. N. Razin ; G. N. Razin ; ed. N. G. Digurov. – M. : Ros. chem.-technol. un-t them. DI. Mendeleev, 2005. – 87 p. [in Russian].

4 Zhukov, M. F. Electric arc gas heaters (plasmotrons) / M. F. Zhukov – Moscow : Nauka, 1973. – 232 p. [in Russian].

5 Raizer, Yu. P. Gas discharge physics / Yu. P. Raizer – Germany : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1991. – 449 p.

6 Eremin, S. A. Spheroidization of iron powder in microwave and hybrid plasmotrons. / S. A. Eremin, V. N. Anikin, D. V. Kuznetsov, I. A. Leontiev, Yu. D. Stepanov, V. Z. Dubinin, A. M. Kolesnikova, Yu. M. Yashnov // Izvestiya vuzov. Powder metallurgy and functional coatings. – 2019. – (3). – p. 4-12. [in Russian].

7 Bogaerts, A. Gas discharge plasmas and their applications / A. Bogaerts, E. Neyts, R. Gijbels, J. van der Mullen // Spectrochimica Acta Part B. – 2002. – V. 57. – p. 609-658.

8 Wurzel, V. F. Application of low-temperature plasma in the chemical industry / V. F. Wurzel // in the book. Essays on the Physics and Chemistry of Low-Temperature Plasma, Ed. L. S. Polak. – M. : Nauka, 1971. – p. 411-433.

9 Roth, J. R. Industrial Plasma Engineering, vol. 2. / J. R. Roth. – U. K. : IOP Publ. Ltd, 2001. – 645 p.

10 Begrambekov, L. B. Irradiation with hydrogen atoms and ions as an accelerated hydrogenation test of zirconium alloys and protective coatings / L. B. Begrambekov, A. E. Evsin, A. V. Grunin, A. I. Gumarov, A. S. Kaplevsky, N. F. Kashapov, A. G. Luchkin, I. R. Vakhitov, I. V. Yanilkin, L. R. Tagirov // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – V. 44 (31). – p. 17154-17162.

11 Kadyrmetov, A. M. Efficiency of surface cleaning by a glow discharge for plasma spraying coating A. M. Kadyrmetov, N. F. Kashapov, S. N. Sharifullin, A. I. Saifutdinov, S. A. Fadeev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 134 (1). 012010.

12 Roth, J. R. Aerodynamic flow acceleration using piezoelectric and peristaltic electrohydrodynamic effects of a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma / J. R. Roth // Physics of Plasmas. – 2003. – V. 10 (5). – p. 2117-2126.

13 Kopiev, V. F. Instability wave control in turbulent jet by plasma actuators / V. F. Kopiev,

Y. S. Akishev, I. V. Belyaev, N. K. Berezhetskaya, V. A. Bityurin, G. A. Faranosov, M. E. Grushin, A. I. Klimov, V. A. Kopiev, I. A. Kossyi, I. A. Moralev, N. N. Ostrikov, M. I. Taktakishvili, N. I. Trushkin, M. Y. Zaytsev // *J. Phys. D. Appl. Phys.* – 2014. – V. 47 (50). – p. 505201.

14 Lieberman, M. A. Principles of plasma Discharges and Materials Processing / M. A. Lieberman, A. J. Lichtenburg – N. Y. : Wiley, 2005, – 757 p.

15 Chen, F. F. Radiofrequency plasma sources for semiconductor processing, Chap. 6 in “Advanced Plasma Technology” / Ed. by R. d’Agostino, P. Favia, Y. Kawai, H. Ikegami, N. Sato, F. Arefi-Khonsari. – Germany : Wiley-VCH, 2008. – p. 99-115.

16 Sheehan, J. P. Temperature gradients due to adiabatic plasma expansion in a magnetic nozzle / J. P. Sheehan, B. W. Longmier, E. A. Bering, C. S. Olsen, J. P. Squire, M. G. Ballenger, M. D. Carter, L. D. Cassady, F. R. Chang Diaz, T. W. Glover, A. V. Ilin // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2014. – V. 23 (4). – 045014.

17 Olsen, C. S. Investigation of plasma detachment from a magnetic nozzle in the plume of the VX-200 magnetoplasma thruster / C. S. Olsen, M. G. Ballenger, M. D. Carter, F. R. Chang Diaz, M. Giambusso, T. W. Glover, A. V. Ilin, J. P. Squire, B. W. Longmier, E. A. Bering, P. A. Cloutier // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2015. – V. 43 (1). – p. 252-268.

18 Iille, A. F. The effect of acoustic oscillations on the characteristics of the process of plasma spraying / A. F. Ilshentko, P. Lizunkov, V. D. Shimanovich // IX All-Union. conf. In low-temperature plasma generators: Tez. Dokl. – Frunze: Ilim, 1983. – P. 292-293.

19 Toltaeva, A. K. Study of aerodynamics of a turbulent gas torch of a rich mixture when imposing sound impact: author. dish. ... Cand. Fiz.-floor science – Alma-Ata, 1987. – 22 p.

20 Azharonok, V. V. Effect of an external acoustic field on the plasma temperature of the arc discharge / V. V. Azharonok, N. F. Aleshin, V. A. Gubkevich, P. P. Lizunkov et al. // *Engineering and magazine* . – 1986. – № 3. – P. 481-486.

21 Lizunkov, P. Intensification of plasma spraying when exposed to acoustic and electrical oscillations on a heterogeneous jet / G. P. Lizunkov, V. D. Shimanovich, I. S. Burov, A. F. Ilizhenko // *Engineering and Physical Journal*. – 1984. – № 5. – P. 812-816.

22 Tsendin, L. D. Influence of electron heating on acoustic instability of plasma in an electric field / L. D. Tsendin // *Technical Physics*. – 1965. – V. 35 (11). – With. 1972-1977. [in Russian].

23 Ingard, U. Acoustic Wave Generation and Amplification in a Plasma / U. Ingard // *Phys. Rev.* – 1966. – V. 145 (1). – p. 41-45.

24 Osipov, A. I. Kinetic and gasdynamic processes in nonequilibrium molecular physics / A. I. Osipov, A. V. Uvarov // *Phys.* – 1992. – T. 162 (11). – p. 1-42. [in Russian].

25 Alexandrov, N. L. Sound amplification mechanism in a weakly ionized gas / N. L. Alexandrov, A. H. Konchakov, A. P. Napartovich, A. N. Starostin // *ZhETF*. – 1989. – T. 95 (5). – p. 1614-1620. [in Russian].

26 Zavershinsky, I. P. On the mechanism of sound amplification in a weakly ionized gas / I. P. Zavershinsky, E. Ya. Kogan, N. E. Molevich // *ZhETF*. – 1991. – T.100 (2). – p. 422-427. [in Russian].

27 Bauer, H. J. Sound amplification from controlled excitation reaction / H. J. Bauer, H. E. Bass // *Phys.Fluid.* – 1973. – V.16 (7). – p. 988-996.

28 Kogan, E. Ya. Propagation of sound in a vibrationally excited gas / E. Ya. Kogan, V. N. Malnev // *ZhTF*. – 1977. – T. 47 (3). – p. 653–656. [in Russian].

29 Osipov, A. I. Propagation of nonlinear hydrodynamic disturbances in vibrationally nonequilibrium gas / A. I. Osipov, A. V. Uvarov // *Chem. physical* – 1987. – T. 6 (3). – p. 385-389. [in Russian].

30 Yeletsky, A. V. Nonlinear amplification of a sound wave in a nonequilibrium molecular gas / A. V. Yeletsky, E. V. Stepanov // *Chemical Physics*. – 1989. – T. 8. – p. 1247-1250. [in Russian].

31 Galechyan, G. A. Experimental study of sound amplification in the plasma of a

vibrationally nonequilibrium molecular gas / G. A. Galechyan, A. R. Mkrtychyan // Technical Physics Letters. – 2001. – Т. 27 (14). – p. 68-73. [in Russian].

32 Galechyan, G. A. Amplification of acoustic waves in the plasma of a molecular gas discharge / G. A. Galechyan, A. R. Mkrtychyan // Acoustic Journal. – 2002. – Т. 48 (3). – p. 314-318. [in Russian].

33 Torosyan, O. S. Theory of acoustic instability and behavior of the phase velocity of sound waves in a weakly ionized plasma / O. S. Torosyan, A. R. Mkrtychyan // Plasma Phys. 2003. Т. 29. (4). – p. 376-384. [in Russian].

34 Schulz, M. Acoustic kink instability in an argon discharge / M. Schulz, U. Ingard // Physics of Fluids. – 1967. – V. 10 (5). – p. 1031-1036.

35 Kaw, P. Acoustic Instability in Weakly Ionized Gases / P. Kaw // Phys. Rev. – 1969. – V. 188. – p. 506-508.

36 Klimov, A. I. Propagation of shock waves in an unsteady glow discharge / A. I. Klimov, A. N. Koblov, G. I. Mishin, Yu. L. Serov, I. P. Yavor // Technical Physics Letters. – 1989. – Т. 15 (20). – p. 31-36. [in Russian].

37 Bystrov, S. A. Propagation of a plane shock wave in a weakly ionized plasma / S. A. Bystrov, V. I. Ivanov, F. V. Shugaev // Phys. Plasma. – 1989. – Т. 15 (5). – p. 558-562. [in Russian].

38 Gridin, A. Yu. Propagation of shock waves in the glow discharge plasma / A. Yu. Gridin, A. I. Klimov, N. E. Molevich // Technical Physics. – 1993. – Т. 63 (3). – p. 157-162. [in Russian].

39 Gridin, A. Yu. Structure of a shock wave in a nonequilibrium plasma (release of energy stored in the discharge plasma behind the shock wave) / A. Yu. Gridin, A. I. Klimov // Chem. Physics. – 1993. – Т. 12 (3). – p. 363-365. [in Russian].

40 Fadeev S. A. Influence of resonant acoustic vibrations on the volt-ampere characteristic of a glow discharge / S.A. Fadeev, N. F. Kashapov, A. I. Sayfutdinov // Bulletin of KSTU named A. N. Tupolev. – 2020. – Т. 76 (1). – p. 132-137. [in Russian].

41 Galechan, G. A. Acoustic waves in plasma / G. A. Galechan // Phys. – 1995. – Т. 165 (12). – p. 1357-1379. [in Russian].

42 Kashapov, N. F. Study of the influence of acoustic vibrations on the characteristics of the glow discharge / N. F. Kashapov, S. A. Fadeev // Izv. vuzov. fizika. – 2014. – Т. 57 (3/2). – p. 110-113. [in Russian].

43 Kashapov, N. F. Experimental study of the influence of acoustic vibrations on the current-voltage characteristic of a glow discharge in argon / N. F. Kashapov, S. A. Fadeev // All-Russian (with international participation) conference "Physics of low-temperature plasma" FNTP-2020 : (Kazan, November 9-13, 2020). Collection of abstracts. – Kazan : Kazan University Publishing House, 2020. – p. 48-49. [in Russian].

© Фадеев С. А., Шайдуллин Л. Р., Кадырметов А. М., 2021