

МРНТИ 29.27.51

<https://doi.org/10.26577/10.26577/RCPH.2021.v77.i2.05>

Р.Е. Жумадилов^{1*} , А.У. Утегенов¹ ,
С.А. Оразбаев¹ , Д.Г. Батрышев² 

¹Казахстанско-Британский технический университет, Казахстан, г. Алматы
²Атырауский университет имени Халела Досмухамедова, Казахстан, г. Атырау
*e-mail: rakimzhan@gmail.com

ПОЛУЧЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ В ИМПУЛЬСНО МОДУЛИРОВАННОЙ ПЛАЗМЕ ВЧ РАЗРЯДА

Углеродные наночастицы синтезировались с использованием плазмы ВЧ разряда 13,56 МГц в импульсном режиме для управления размерами наночастиц. Смесь газов Ar/CH₄ вводилась в плазменную среду с емкостной связью, основной частью которой являются параллельно расположенные высокочастотный и заземленный электроды. Эксперименты по синтезу проводились при комнатной температуре и следующих условиях: давление в рабочей камере – 0,99 Торр; концентрация смеси газов Ar (96%) + CH₄ (4%); длительность синтеза – 5 секунд; при мощности разряда – 10 Вт. Частота импульса плазмы ВЧ разряда при модулировании варьировалась от 10 Гц до 10 кГц, также коэффициент заполнения составлял 50% для каждого проведенного эксперимента. Экспериментальные наблюдения показали, что размер наночастиц углерода возрастает с увеличением частоты импульсного сигнала. Также было выявлено, что с помощью частоты модулированного импульсного ВЧ сигнала появляется возможность контролировать размер углеродных наночастиц в диапазоне 40-70 нм. Синтезированные наночастицы собирались непосредственно на медной сетке для ПЭМ анализа, которая помещалась на поверхность нижнего электрода. Анализ ПЭМ изображений показали два вида наночастиц, один из которых представляет собой агломерат наночастиц с аморфной структурой, а другие – нанометрового размера с кристаллическими структурами.

Ключевые слова: углеродные наночастицы, ВЧ разряд, импульсная ВЧ плазма.

R.Ye. Zhumadilov^{1*}, A.U. Utegenov¹, S.A. Orazbayev¹, D.G. Batryshev²

¹Kazakh-British Technical University, Kazakhstan, Almaty
²Atyrau University named after Khalel Dosmukhamedov, Kazakhstan, Atyrau
*e-mail: rakimzhan@gmail.com

Obtaining of carbon nanoparticles in pulsed modulated RF discharge plasma

Carbon nanoparticles were synthesized using a 13.56 MHz RF discharge plasma in pulsed mode to control the size of the nanoparticles. An Ar/CH₄ gas mixture was injected into the chamber to create capacitive coupled plasma medium, the main part of which is an electrode connected to the RF generator and a grounded electrode arranged in parallel. The synthesis experiments were carried out at room temperature and under the following conditions: pressure in the working chamber 0.99 Torr; concentration of Ar(96%) + CH₄(4%) gas mixture; synthesis time 5 seconds; at discharge power 10 W. The frequency of the RF discharge plasma pulse during modulation was varied from 10 Hz to 10 kHz, also the duty-cycle was 50% for each performed experiment. Experimental observations have revealed that the size of carbon nanoparticles increases with the frequency of the pulse signal. It has also been determined that by using a frequency of the modulated pulsed RF signal it is possible to control the size of carbon nanoparticles in the range of 40-70 nm. The synthesized nanoparticles were collected directly on a copper mesh for TEM microscopy, which was placed on the surface of the bottom electrode. TEM image analysis showed two types of nanoparticles, some of which are an agglomerate of nanoparticles with an amorphous structure, while the others are nanometer-sized with crystalline structures.

Key words: carbon nanoparticles, RF discharge, pulsed RF plasma.

Р.Е. Жумадилов^{1*}, А.У. Өтегенов¹, С.А. Оразбаев¹, Д.Г. Батрышев²¹Қазақстан-Британ техникалық университеті, Қазақстан, Алматы қ.²Халел Досмұхамедов атындағы Атырау университеті, Қазақстан, Атырау қ.

*e-mail: rakimzhan@gmail.com

Көміртегі нанобөлшектерін импульсті модуляцияланған ЖЖ плазмада алу

Көміртегі нанобөлшектері жоғары жиілікті (ЖЖ) плазмада импульсті режимді қолдану арқылы, яғни нанобөлшектердің өлшемдерін басқару арқылы синтезделді. Ag/CH₄ газдарының қоспасы сыйымдылықты байланысы бар плазмалық ортаға енгізілді, оның негізгі бөлігі параллель орналасқан жоғары жиілікті және жерге қосылған электродтар. Синтез бойынша эксперименттер бөлме температурасында және келесі жағдайларда жүргізілді: жұмыс камерасындағы қысым 0,99 Торр; газ қоспасының концентрациясы Ag (96 %) + CH₄ (4 %); синтез ұзақтығы 5 секунд; разряд қуаты 10 Вт. Модуляция кезінде ЖЖ разряд плазмасының импульс жиілігі 10 Гц-тен 10 кГц-ке дейін өзгерді, сонымен қатар әр эксперимент үшін толтыру коэффициенті 50 % болды. Эксперименттік бақылаулар импульстік сигнал жиілігінің жоғарылауы көміртегі нанобөлшектерінің мөлшері артатындығын көрсетті. Сондай-ақ, модуляцияланған импульсті ЖЖ сигналының жиілігімен 40–70 нм диапазонындағы көміртекті нанобөлшектердің мөлшерін басқару мүмкіндігі пайда болатындығы анықталды. Синтезделген нанобөлшектер төменгі электродтың бетіне орналастырылған тікелей мыс торға жиналды. ТЭМ кескіндерін талдау нанобөлшектердің екі түрін көрсетті, олардың бірі аморфты құрылымы бар нанобөлшектердің агломераты, ал басқалары кристалды құрылымы бар нанометр өлшемді нанобөлшектер.

Түйін сөздер: көміртегі нанобөлшектері, ЖЖ разряд, импульсті ЖЖ плазма.

Введение

Среди всех углеродных наноматериалов, углеродные наночастицы (УНЧ) оказались наиболее исследуемыми материалами. Так как УНЧ вызывают значительный интерес в последние годы благодаря их хорошей люминесценции, высокой химической стабильности, проводимости и широкополосному оптическому поглощению [1-3]. В настоящее время приложение УНЧ очень обширно, например, в основном применяются в химическом анализе [4], оптоэлектронных устройствах [5,6], разработке катализаторов [7–9], а также при разработке супергидрофобных поверхностей [10,11] и др. Свойства углеродных наночастиц в значительной степени зависят от диаметра, их концентрации, формы, распределения по размеру.

Плазма является эффективным инструментом для синтеза углеродных наноматериалов, включая алмазы, наночастицы, фуллерены, нанотрубки, нанопленки и графены. В последние годы импульсные плазменные разряды представляют значительный интерес для обработки материалов из-за их больших преимуществ. Данный метод широко используется для решения различных технологических задач, в том числе для плазменного травления микроструктур, для напыления тонких функциональных покрытий, для производства нано- и микрочастиц и т.д. Синтез нано- и микрочастиц можно осуществить при различных типах низкотемпературной плазмы и

при различных составах газов, в таких как, силан [12-14], углеводороды [15-20], фтороуглероды [21,22] и т.д. Также методом импульсного разряда есть возможность контролировать процесс формирования наночастиц в плазме, регулируя частоту модулированного сигнала и коэффициент заполнения в дополнение к другим параметрам, таким как давление и мощность разряда. Это важно для фундаментального понимания процесса роста наночастиц при различных параметрах импульсного разряда.

Влияние модулированного сигнала на формирование наночастиц ранее рассматривались в нескольких исследованиях [23,24]. Verdeyen и др. показали, что количество пылеобразования в плазме SiH₄ с импульсной модуляцией намного меньше, чем в плазме непрерывного действия [25]. Lloret и др. использовал модулированный высокочастотный разряд для осаждения тонких пленок аморфного кремния и обнаружил, что частота модуляции оказывает сильное влияние на пористость и шероховатость пленок, и объяснил это эффектами модуляции на формирование наночастиц в плазме [26]. В высокочастотной модулированной плазме Howling и др. показали, что плотности отрицательных ионов значительно снижаются для частот модуляции около 1 кГц [27].

При импульсных разрядах плазма периодически «включается» на короткое время (t_{on}), а затем «выключается» на определенное время (t_{off}). Авторы работы [28] показали, что во время t_{off}

могут происходить обычные процессы полимеризации из частиц, образующихся во время t_{on} . В этом случае могут быть синтезированы шероховатые пленки, образованные из наночастиц.

Целью данной работы было исследование влияния импульсно модулированного ВЧ разряда на формирование и роста углеродных наночастиц в смеси газов аргон-метан, при постоянной мощности и времени синтеза.

Экспериментальная часть

Исследования проводились на экспериментальной установке, работающей на основе ВЧ емкостного разряда. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 1. Плазма зажигалась между двумя параллельными электродами из нержавеющей стали с диаметрами 100 мм и расстоянием 30 мм. Кроме того, следует отметить, что верхний электрод был подключен к ВЧ генератору, а нижний электрод был заземлен. ВЧ мощность с частотой 13,56 МГц генерировалась генератором ВЧ сигналов Serep-R301. Этот сигнал модулировался импульсами с помощью функции модуляции сигнала данного генератора. Эксперименты проводились при давлении газа 0,99 Торр. Мощность разряда и время синтеза оставались постоянными, 10 Вт и 5 сек (100 циклов), соответственно. Частота импульсного сигнала варьировалась от 1 Гц до 10 кГц, в то время как коэффициент заполнения импульсного сигнала был фиксированным, 50%. Перед каждым экспериментом камера откачивалась до высокого вакуума 10^{-5} Торр. В качестве подложки использовались кремний, стекло и сетки для ПЭМ. Подробное описание экспериментальной установки описано в работе [29].

В данной работе синтезированные углеродные наночастицы осаждались на кремниевые подложки, которые очищались этанолом и сушились чистым инертным газом. В качестве источника углерода использовали метан (CH_4), который подавали в камеру как смесь газов аргон и метан с концентрацией $Ar(96\%)+CH_4(4\%)$ с фиксированной скоростью 15 сссм. Контроль потока газа осуществляется расходомером MFC Bronkhorst. Все эксперименты проводились при комнатной температуре.

Результаты и обсуждение

Углеродные наночастицы были анализированы с помощью сканирующего электронного

микроскопа СЭМ (Crossbeam 540). Были получены несколько микрофотографий с разными кратностями увеличения в нескольких местах подложки. На каждом СЭМ изображении были определены размеры наночастиц и были построены графики распределения по размерам. На рисунке 2 представлены СЭМ изображение и график распределения по размерам углеродных наночастиц синтезированных при различных частотах импульсного ВЧ разряда: 2а – 100 Гц, 2б – 1 кГц, 2в – 10 кГц и 2г – без модуляции. В результате анализа распределения частиц по размерам были получены следующие данные: $42 \pm 0,5$ нм при частоте модуляции 100 Гц; при 1 кГц – $52 \pm 2,5$ нм; при 10 кГц – $61 \pm 7,7$ нм; и без модуляции – 67 ± 8 нм.

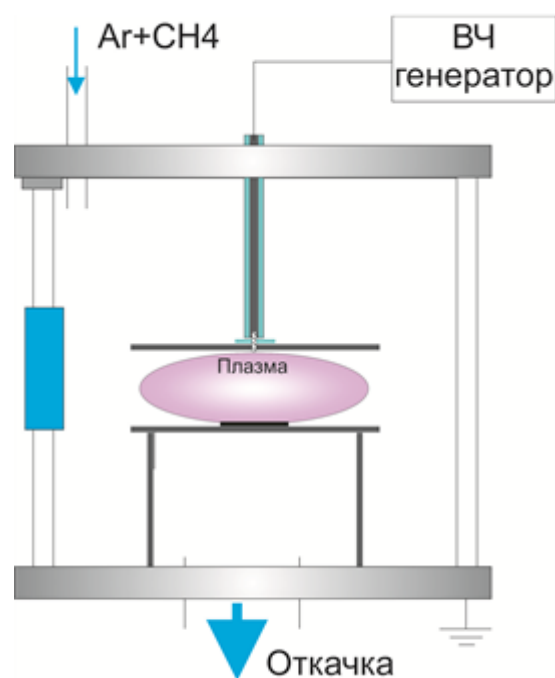
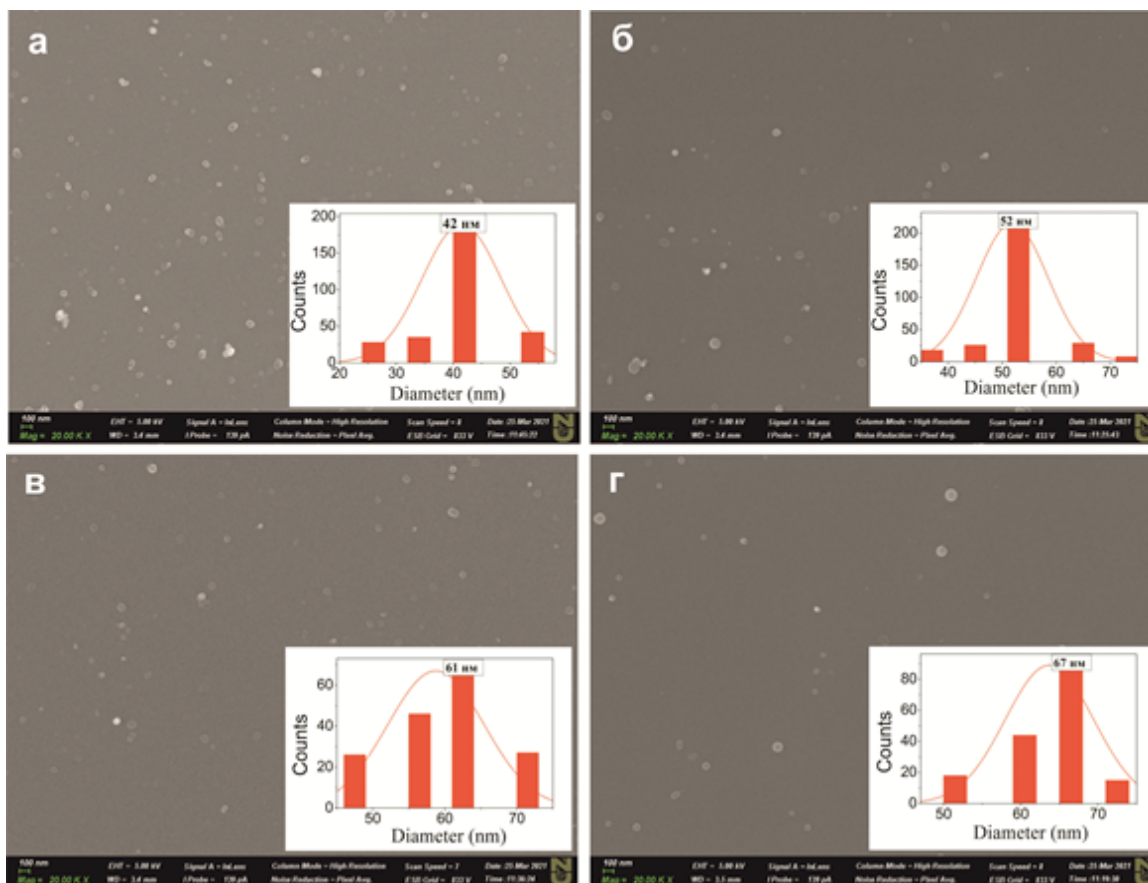


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки ВЧ емкостного разряда.

Динамика нуклеации наночастиц в этом типе разряда недавно была изучена с помощью моделирования [30]. При импульсных разрядах время «включения» (t_{on}) и время «выключения» (t_{off}) плазмы зависит от коэффициента заполнения и частоты модулированного сигнала f . Частота определяется по следующей формуле:

$$f = \frac{1}{t_{on} + t_{off}} \quad (1)$$



а) 100 Гц; б) 1 кГц; в) 10 кГц; г) без модуляции

Рисунок 2 – СЭМ изображение и распределение углеродных наночастиц по размерам, синтезированных при различных значениях частоты модуляции

Было обнаружено, что с увеличением частоты модулированного сигнала, увеличивается диаметр синтезируемых наночастиц. Это объясняется тем, что низкие частоты модуляции приводят к замедлению частиц плазмы и, следовательно, к их локальному накоплению. Этот результат объясняется обратным влиянием различных частот модуляции на значения плотности частиц плазмы при уменьшении частоты модуляции [31]. Более того, можно предположить, что увеличение частоты модуляции влияет на рост концентрации радикалов, которые являются основными составляющими синтезируемых наночастиц. Однако, примечательно то, что концентрация радикалов углерода уменьшается во время t_{off} . Это связано с тем, что, радикалы эффективно теряются на стенках реактора при отключенном состоянии плазмы [30].

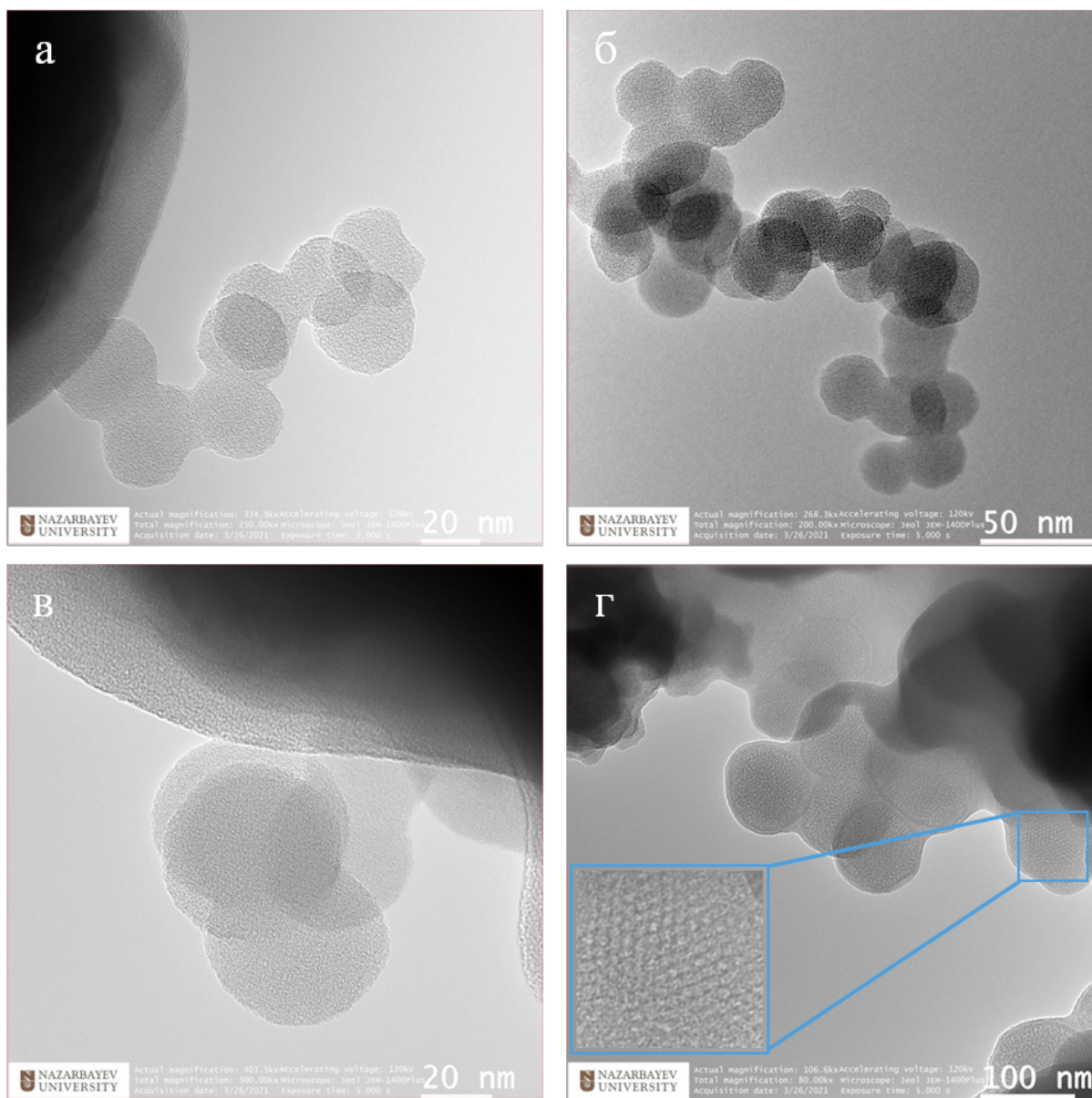
Для ПЭМ анализа углеродные наночастицы были синтезированы на специальные медные

сетки. На рисунке 3 представлены ПЭМ изображения углеродных наночастиц синтезированных при различных частотах импульсного ВЧ разряда: рисунок 3а соответствует 100 Гц; 3б – 1 кГц; 3в – 10 кГц; 3г – синтезу без модуляции.

Из рисунка 3 видно, что частицы агрегированы друг с другом, но форма каждой частицы сферическая. Известно, что частицы в плазме заряжаются отрицательно из-за большой энергии электронов в плазме. Отрицательно заряженные частицы обладают электростатическим отталкиванием, и агрегации частиц может не произойти. Однако заряд на частицах вблизи электродов может оторваться от поверхности частицы, тем самым меняя заряд частицы в положительную сторону, то есть приводит к флуктуации заряда. Вследствие этого частицы могут агрегировать друг с другом [32]. Углеродные наночастицы, которые были синтезированы без модулированного сигнала, что показали кристаллическую структуру, по-

казанную на изображении ПЭМ как вставка с высоким разрешением (рисунок 3г). Авторы работы [24] выявили, что заряженные частицы могут влиять на кристаллическую структуру

частиц. Поскольку большие частицы состоят из более мелких частиц, это указывает на то, что большая частица является агломератом мелких частиц.



а) 100 Гц; б) 1 кГц; в) 10 кГц; г) без модуляции

Рисунок 3 – ПЭМ изображения углеродных наночастиц, синтезированных при различных частотах модуляции

Заключение

Эксперименты, проведенные в импульсном разряде аргон-метан, показывают, что частота модулированного импульсного сигнала суще-

ственно влияет на рост и формирования углеродных наночастиц. Посредством импульсного ВЧ сигнала с частотами 100 Гц до 10 кГц появляется возможность контроля размеров углеродных частиц в диапазоне 40-70 нм. По результатам

экспериментальных работ и анализа СЭМ и ПЭМ микроскопий было выявлено, что модулированный ВЧ сигнал, в основном, влияют на процесс формирования и роста наночастиц. Так как основными составляющими синтезируемых углеродных наночастиц являются радикалы углеводорода, данный эффект, в конечном итоге, влияет на концентрацию радикалов углерода, которая возрастает с увеличением частоты. Та-

ким образом, их численность увеличивается во время импульса и остается неизменной во время отсутствия импульса.

Благодарности

Работа была выполнена в рамках гранта АР08957305 Министерства образования и науки Республики Казахстан.

Литература

- 1 Reckmeier C.J., Schneider J., Susha A.S., Rogach A.L. Luminescent colloidal carbon dots: Optical properties and effects of doping // *Opt. Express* – 2016. – Vol. 24. – P.A312–A340.
- 2 Goryacheva I.Y., Sapelkin A.V., Sukhorukov G.B. Carbon nanodots: Mechanisms of photoluminescence and principles of application // *Trends Anal. Chem.* – 2017. – Vol. 90. – P.27–37.
- 3 Kokorina A.A., Prikhozhenko E.S., Sukhorukov G.B., Sapelkin A.V., Goryacheva I.Y. Luminescent carbon nanoparticles: Synthesis, methods of investigation, applications // *Russ. Chem. Rev.* – 2017. – Vol. 86. – P. 1157–1171.
- 4 Liu H., Ding J., Zhang K., Ding L. Construction of biomass carbon dots based fluorescence sensors and their applications in chemical and biological analysis // *TrAC Trends Anal. Chem.* – 2019. – Vol. 118. – P. 315–337.
- 5 Lim S.Y., Shen, W., Gao Z. Carbon quantum dots and their applications // *Chem. Soc. Rev.* – 2015. – Vol. 44. – P. 362–381.
- 6 Yuan F., Li S., Fan Z., Meng X., Fan L., Yang S. Shining carbon dots: Synthesis and biomedical and optoelectronic applications // *Nano Today* – 2016. – Vol.11. – P. 565–586.
- 7 Zhu C., Liu C., Zhou Y., Fu Y., Guo S., Li H., Zhao S., Huang H., Liu Y., Kang Z. Carbon dots enhance the stability of CdS for visible-light-driven overall water splitting // *Appl. Catal. B Environ.* – 2017. – Vol.216. – P.114–121.
- 8 Wu X., Zhu C., Wang L., Guo S., Zhang Y., Li H., Huang H., Liu Y., Tang J., Kang Z. Control strategy on two-/four-electron pathway of water splitting by multidoped carbon based catalysts // *ACS Catal.* – 2017. – Vol.7. – P. 1637–1645.
- 9 Zhu C., Liu C., Fu Y., Gao J., Huang H., Liu Y., Kang Z. Construction of CDs/CdS photocatalysts for stable and efficient hydrogen production in water and seawater // *Appl. Catal. B Environ.* – 2019. – Vol.242. – P. 178–185.
- 10 Orazbayev S., Zhumadilov R., Zhunisbekov A., Gabdullin M., Yerlanuly Y., Utegenov A., Ramazanov, T. Superhydrophobic carbonous surfaces production by PECVD methods // *Applied Surface Science* – 2020. – Vol.515. – P. 146050.
- 11 Orazbayev S., Gabdullin M., Ramazanov T., Dosbolayev M., Omirbekov D., Yerlanuly Y. Obtaining of superhydrophobic surface in RF capacitively coupled discharge in AR/CH₄ medium // *Applied Surface Science.* – 2019. – Vol.472. – P. 127–134.
- 12 Bouchoule A. *Dusty Plasmas: Physics, Chemistry and Technological Impacts in Plasma Processing* // Wiley & Sons. – 1999. – P. 418.
- 13 Hollenstein C., Dorier J.L., Dutta J., Sansonnens L., Howling A. A. Diagnostics of particle genesis and growth in RF silane plasmas by ion mass spectrometry and light scattering // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 1994. – Vol.3. – P. 278.
- 14 Qin Y., Bilik N., Kortshagen U.R., Aydil E.S. Laser light scattering from silicon particles generated in an argon diluted silane plasma // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2016. – Vol. 49. – P.085203.
- 15 Hong S., Berndt J., Winter J. Growth precursors and dynamics of dust particle formation in the Ar/CH₄ and Ar/C₂H₂ plasmas // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2003. – Vol.12. – P. 46.
- 16 Kovacevic E., Berndt J., Strunskus T., Boufendi L. Size dependent characteristics of plasma synthesized carbonaceous nanoparticles // *J. Appl. Phys.* – 2012. – Vol.112. – P.013303.
- 17 Berndt J., Acid H., Kovacevic E., Cachoncinlle C., Strunskus T., Boufendi L. Deposition and tuning of nanostructured hydrocarbon deposits: From superhydrophobic to superhydrophilic and back // *J. Appl. Phys.* – 2013. – Vol. 113. – P. 063302.
- 18 Berndt J., Kovacevic E., Stefanovic I., and Boufendi L. Controlled dust formation in pulsed rf plasmas // *J. Appl. Phys.* – 2009. – Vol. 106. – P. 063309.
- 19 Van de Wetering F.M. J.H., Beckers J., Kroesen G.M.W. Anion dynamics in the first 10 milliseconds of an argon–acetylene radio-frequency plasma // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2012. – Vol. 45. – P. 485205.
- 20 Greiner F., Carstensen J., Kohler N., Pilch I., Ketelsen H., Knist S., Piel A. Imaging Mie ellipsometry: dynamics of nano-dust clouds in an argon–acetylene plasma // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2012. – Vol. 21. – P. 065005.
- 21 Anderson H.M., Radovanov S., Mock J.L., Resnick P.J. Particles in C₂F₆-CHF₃ and CF₄-CHF₃ etching plasmas // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 1994. – Vol. 3. – P. 302.
- 22 Buss R.J., Hareland W.A. Gas phase particulate formation in radiofrequency fluorocarbon plasmas // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 1994. – Vol. 3. – P. 268.
- 23 Pilch, I., Söderström, D., Lundin, D., Helmersson, U. The use of Highly Ionized Pulsed Plasmas for the Synthesis of Advanced Thin Films and Nanoparticles // *KONA Powder and Particle Journal* – 2014. – Vol.31. – P.171–180.
- 24 Matsui, I. Preparation of magnetic nanoparticles by pulsed plasma chemical vapor synthesis // *Journal of Nanoparticle Research* – 2006. – Vol.8. – P.429–443.
- 25 Verderyn J.T., Beberman J., Overzet L., Vac J. Modulated discharges: Effect on plasma parameters and deposition // *Sci. Technol.* – 1990. – Vol.8. – P.1851.
- 26 Lloret A., Bertran E., Andujar J.L., Canillas A., Morenza J.L. Ellipsometric study of a-Si:H thin films deposited by square wave modulated rf glow discharge // *J. Appl. Phys.* – 1991. – Vol.69. – P.632.

- 27 Howling A.A., Sansonnens L., Dorier J.-L., Hollenstein C. Time-resolved measurements of highly polymerized negative ions in radio frequency silane plasma deposition experiments // *J. Appl. Phys.* – 1994. – Vol.75. – P.1340.
- 28 De Vriendt V., Maseri F., Nonet A., Lucas S. Study of Nanoparticles Formation in a Pulsed Magnetron Discharge in Acetylene // *Plasma Processes and Polymers* – 2009. – Vol.6 – P.S6–S10.
- 29 Orazbayev S. A., Utegenov A. U., Zhunisbekov A. T., Slamyiya M., Dosbolayev M. K., Ramazanov T. S. Synthesis of carbon and copper nanoparticles in radio frequency plasma with additional electrostatic field // *Contributions to Plasma Physics.* – 2018. – Vol.58. – P.961–966.
- 30 Akhoundi A., Foroutan G. Simulation study of the nanoparticles nucleation in a pulse-modulated capacitively coupled rf acetylene discharge // *Physics of Plasmas* – 2018. – Vol.25. – P.063515.
- 31 Lin J., Hashimoto K., Togashi R., Utegenov A., Henault M., Takahashi K., Boufendi L., Ramazanov T. Transport control of dust particles by pulse-time modulated RF in dusty plasmas // *Journal of Applied Physics.* – 2019. – Vol. 126. – P. 1.5093349.
- 32 Kawasaki H., Sakamoto K., Maeda S., Fukuzawa T., Shiratani M. Watanabe Y. Transition of particle growth region in SiH₄ RF discharges // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 1998. – Vol.37. – P.5757–5762.

References

- 1 C.J. Reckmeier, J. Schneider, A.S. Susha, & A.L. Rogach, *Optics Express*, 24(2), A312 (2015).
- 2 I.Y. Goryacheva, A.V. Sapelkin, & G.B. Sukhorukov, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 90, 27–37 (2017).
- 3 A.A. Kokorina, E.S. Prikhozhenko, G.B. Sukhorukov, A.V. Sapelkin, & I.Y. Goryacheva, *Russian Chemical Reviews*, 86(11), 1157–1171 (2017).
- 4 H. Liu, J. Ding, K. Zhang, & L. Ding, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 118, 315–337 (2019).
- 5 S.Y. Lim, W. Shen, & Z. Gao, *Chemical Society Reviews*, 44(1), 362–381 (2015).
- 6 F. Yuan, S. Li, Z. Fan, X. Meng, L. Fan,, & S. Yang, *Nano Today*, 11(5), 565–586 (2016).
- 7 C. Zhu, C. Liu, Y. Zhou, Y. Fu, S. Guo, H. Li, ... Z. Kang, *Applied Catalysis B: Environmental*, 216, 114–121 (2017).
- 8 X. Wu, C. Zhu, L. Wang, S. Guo, Y. Zhang, H. Li, ... Z. Kang, *ACS Catalysis*, 7(3), 1637–1645 (2017).
- 9 C. Zhu, C. Liu, Y. Fu, J. Gao, H. Huang, Y. Liu, & Z. Kang, *Applied Catalysis B: Environmental*, 242, 178–185 (2018).
- 10 S. Orazbayev, R. Zhumadilov, A. Zhunisbekov, M. Gabdullin, Y. Yerlanuly, A. Utegenov, & T. Ramazanov, *Applied Surface Science*, 515, 146050 (2020).
- 11 S. Orazbayev, M. Gabdullin, T. Ramazanov, M. Dosbolayev, D. Omirbekov, & Y. Yerlanuly, *Applied Surface Science*, 472, 127–134 (2018).
- 12 A. Bouchoule, *Dusty Plasmas: Physics, Chemistry and Technological Impacts in Plasma Processing*, (Wiley & Sons, 1999), 418.
- 13 C. Hollenstein, J.-L. Dorier, J. Dutta, L. Sansonnens, & A.A. Howling, *Plasma Sources Science and Technology*, 3(3), 278–285 (1994).
- 14 Y. Qin, N. Bilik, U.R. Kortshagen, & E.S. Aydil, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49(8), 085203 (2016).
- 15 S. Hong, J. Berndt, & J. Winter, *Plasma Sources Science and Technology*, 12(1), 46–52 (2002).
- 16 E. Kovacevic, J. Berndt, T. Strunskus, & L. Boufendi, Size dependent characteristics of plasma synthesized carbonaceous nanoparticles. *Journal of Applied Physics*, 112(1) (2012).
- 17 J. Berndt, H. Acid, E. Kovacevic, C. Cachoncinlle, T. Strunskus, & L. Boufendi, *Journal of Applied Physics*, 113(6), 063302 (2013).
- 18 J. Berndt, E. Kovačević, I. Stefanović, & L. Boufendi, Controlled dust formation in pulsed rf plasmas. *Journal of Applied Physics*, 106(6), 063309 (2009).
- 19 F.M.J.H. Van de Wetering, J. Beckers,, & G.M.W. Kroesen, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45(48), 485205 (2012).
- 20 F. Greiner, J. Carstensen, N. Köhler, I. Pilch, H. Ketelsen, S. Knist, & A. Piel, *Plasma Sources Science and Technology*, 21(6), 065005 (2012).
- 21 H.M. Anderson, S. Radovanov, J.L. Mock, & P.J. Resnick, *Plasma Sources Science and Technology*, 3(3), 302–309 (1994).
- 22 R.J. Buss, & W.A. Hareland, *Plasma Sources Science and Technology*, 3(3), 268–272 (1994).
- 23 I. Pilch, D. Söderström, D. Lundin, & U. Helmersson, *KONA Powder and Particle Journal*, 31(0), 171–180 (2014).
- 24 I. Matsui, *Journal of Nanoparticle Research*, 8(3-4), 429–443 (2006).
- 25 J.T. Verdeyen, J. Beberman, & L. Overzet, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 8(3), 1851–1856 (1990).
- 26 A. Llore,, E. Bertran, J. L. Andujar, A. Canillas, & J. L. Morenza, *Journal of Applied Physics*, 69(2), 632–638 (1991).
- 27 A.A. Howling, L. Sansonnens, J.-L. Dorier, & C. Hollenstein, *Journal of Applied Physics*, 75(3), 1340–1353 (1994).
- 28 V.De Vriendt, F. Maseri, A. Nonet, & S. Lucas, *Plasma Processes and Polymers*, 6(S1), S6–S10 (2009).
- 29 S.A. Orazbayev, A.U. Utegenov, A.T. Zhunisbekov, M. Slamyiya, M.K. Dosbolayev, & T.S. Ramazanov, *Contributions to Plasma Physics*, 58, 961–966 (2018).
- 30 A. Akhoundi,, & G. Foroutan, *Physics of Plasmas*, 25(6), 063515 (2018).
- 31 J. Lin, K. Hashimoto, R. Togashi, A. Utegenov, M. Hénault, K. Takahashi, ... T. Ramazanov, *Journal of Applied Physics*, 126(4), 043302 (2019).
- 32 H. Kawasaki, K. Sakamoto, S. Maeda, T. Fukuzawa, M. Shiratani, & Y. Watanabe, *Japanese Journal of Applied Physics*, 37(Part 1, No. 10), 5757–5762 (1998).