

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 538.911

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.01.010

ПРИМЕНЕНИЕ БЫСТРОГО ДЖОУЛЕВА НАГРЕВА ДЛЯ СИНТЕЗА УГЛЕРОДНЫХ НАНОПЛЕНОК

Ефим Петрович Неустроев¹, Айсен Русланович Прокопьев^{1,2}

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 677000, г. Якутск, Российская Федерация

²Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск, 677000, Российская Федерация

¹neustr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8163-2012>

^{1,2}aisenprokopiev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2212-2485>

Аннотация. В работе представлен двухэтапный синтез углеродных нанопленок, содержащих в своей структуре графеновые чешуйки. На первом этапе были получены аморфные а-С:Н пленки в низкотемпературном осаждении в плазме метана атомов углерода на подложки Si/SiO₂. Быстрый джоулев нагрев (fast Joule heating) образцов производился при электрическом разряде конденсаторов емкостью 180 мФ, заряженных до напряжения от 100 до 300 В. Для исследований привлечены методы спектроскопии комбинационного рассеяния, сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии и вольт-амперных характеристик. Установлено, что нагрев приводит к значительному росту электропроводности и повышению гидрофобности материала. Максимальные результаты получены при разряде конденсаторного блока, заряженного до напряжения 160 В. Также, при данном напряжении разряда, наблюдается высокая степень структурной упорядоченности углеродных пленок по отношению к образцам, полученных при иных параметрах быстрого джоулева нагрева. Полученные результаты объяснены переходом исходной аморфной углеродной пленки в кристаллическую структуру с преобладанием sp²-гибридизированных связей, имеющую малое электрическое сопротивление. Причиной возникновения водоотталкивающих свойств может являться «эффект лотоса», вызванный формированием сферических частиц размерами до 1 мкм и их конгломератов на поверхности пленки.

Ключевые слова: углеродные пленки, плазменное осаждение, быстрый джоулев нагрев, графеновые чешуйки, спектроскопия комбинационного рассеяния света, эффект лотоса.

Благодарности: Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (проект №24-22-20087).

Для цитирования: Неустроев Е.П., Прокопьев А.Р. Применение быстрого джоулева нагрева для синтеза углеродных нанопленок // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 1. С. 100-108/ doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.01.010.

Original article

APPLICATION OF FAST JOULE HEATING FOR SYNTHESIS OF CARBON NANOFILMS

Efim P. Neustroev¹, Aisen R. Prokopiev^{1,2}

¹M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 677000, Yakutsk, Russian Federation

²Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), 677000, Yakutsk, Russian Federation

¹neustr@mail.ru, [/orcid.org/0000-0002-8163-2012](https://orcid.org/0000-0002-8163-2012)

^{1,2}aisenprokopiev@mail.ru, orcid.org/0000-0002-2212-2485

Abstract. The paper presents a two-step synthesis of carbon nanofilms containing graphene flakes in their structure. In the first stage, amorphous a-C:H films were obtained in low-temperature plasma deposition of methane on Si/SiO₂ substrates. Fast Joule heating of the samples was carried out by electric discharge of 180 mF capacitors charged to a voltage of 100 to 300 V. The studies involved the methods of Raman spectroscopy, scanning electron

microscopy, X-ray energy-dispersive spectroscopy and current-voltage characteristics. It was found that heating leads to a significant increase in electrical conductivity and an increase in the hydrophobicity of the material. The maximum results were obtained when discharging a capacitor block charged to a voltage of 160 V. Also, at this discharge voltage, a high degree of structural ordering of carbon films is observed in relation to samples obtained with other parameters of fast Joule heating. The obtained results are explained by the transition of the initial amorphous carbon film into a crystalline structure with a predominance of sp^2 -hybridized bonds, which has low electrical resistance. The reason for the emergence of water-repellent properties may be the "lotus effect" caused by the formation of spherical particles up to 1 μm in size and their conglomerates on the surface of the film.

Keywords: carbon nanofilms, plasma deposition, fast Joule heating, graphene nanoflakes, Raman spectroscopy, Lotus effect.

Acknowledgments: This work was carried out within the framework of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 24-22-20087).

For citation: Neustroev E.P., Prokopen A.R. (2025). Application of fast joule heating for synthesis of carbon nanofilms. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(1), 100-108/ (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.01.010.

Введение

Графен, гексагональная углеродная структура толщиной в один атомный слой, сочетает в себе уникальные электрические, оптические, тепловые и механические свойства, представляющий интерес для многих практических приложений, в диапазоне от нано- и спиновой электроники до несущих частей летательных аппаратов и элементов строительных конструкций [1,2]. Масштабируемые методы производства углеродных пленок, такие как химический газофазовый метод осаждения (CVD) или химическое расслоение в растворах (метод Хаммерса), имеют ограничения по площади, монослойности, дефектности и необходимости переноса формируемых пленок. Эти проблемы стимулируют исследователей всего мира искать новые способы и методы синтеза графена. Одним из перспективных направлений является получение графена из углеродных прекурсоров методом быстрого (<100 мс) джоулевого (или омического) нагрева (флэш-нагрев), предложенный недавно Луонгом и др. [3]. В настоящее время класс углеродных прекурсоров, которые были использованы исследователями для синтеза графена данным методом носит ограниченный характер и не в полной мере охватывает весь круг возможных материалов [3-7]. Кроме того, исследованные материалы были структурно неоднородные (пластиковые отходы, полимеры, природные материалы), что вызывает затруднения в понимании природы структурной трансформации при флэш-нагреве. Применение исходно однородного прекурсора способствовало бы решению этой проблемы. В данной работе исследуется воздействие быст-

рого джоулевого нагрева на аморфную углеродную пленку, осажденную в плазме метана на подложку SiO_2/Si .

Методика эксперимента

В качестве исходного материала была использована пленка, полученная осаждением атомов углерода на поверхность подложки SiO_2/Si в плазме метана. Толщины SiO_2 и Si составляли 300 нм и 400 мкм, соответственно. Осаждение углерода проводилось на установке ЭТНА-100-ПТ (Зеленоград, Россия) с индуктивно связанным источником плазмы. Мощность высокочастотного (13,56 МГц) генератора плазмы составляла 200 Вт при отраженной мощности 1-2 Вт. Метан запускался в реакционную камеру, предварительно откачанную до давления 0,005 мбар, со скоростью потока 60 $\text{см}^3/\text{мин}$, что увеличивало давление до 0,08 мбар. Длительность процесса осаждения составляла от 6 до 9 минут. Температура образца в процессе обработки не превышала 50 °C. В результате осаждения формировались пленки гидрированного аморфного углерода ($a\text{-C:H}$) толщиной 70-80 нм, имеющие цветовой оттенок отличный от подложки. Толщины пленок были измерены с помощью рефлектометра Thetrametrisis SA FR-pOrtable (Греция) и атомно-силового микроскопа (АСМ) в составе нанолaborатории Интегра Спектра (Зеленоград, Россия).

Установка быстрого джоулевого нагрева была собрана согласно схеме, приведенной в работе Луонга и др. [3]. На установке, использованной в данной работе, конденсаторный блок имел суммарную ёмкость 180 мФ (конденсато-

ры Jianghai CD135 емкостью 18 мФ, Китай) и был заряжен от 100 до 300 В. Образец помещался в реакционную камеру и обхватывался прижимными контактами. При замыкании ключа через заземленный держатель с образцом происходила разрядка батареи конденсаторов длительностью до 100 мс. Процесс проводился в атмосфере азота при давлении $\sim 0,3$ бар.

Для исследований спектров комбинационного рассеяния света (КРС) использовалась нанолаборатория Интегра Спектра (Зеленоград, Россия) с длиной волны излучения лазера 532 нм (2,32 эВ) и диаметром светового пучка ~ 1 мкм. Мощность лазера составляла 1 мВт для устранения перегрева исследуемых образцов. Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) JEOL 7800F с приставкой рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии (РЭДС) использован для изучения морфологии поверхности и проведения элементного анализа состава поверхности образцов. Измерения вольтамперных характеристик полученных образцов были проведены двухзондовым методом при постоянном напряжении и комнатной температуре. Для создания контактов использована серебряная паста.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены спектры КРС до и после разряда батареи конденсаторов, заряженных до различных напряжений (100 В,

160 В и 300 В), через исследуемые образцы. Исходная углеродная пленка, полученная плазменным осаждением в метане на поверхность SiO_2/Si , имеет типичную для аморфного углерода широкую и интенсивную полосу фотолюминесценции [8,9], которая полностью затмевает спектр КРС. Проведенная флэш-обработка приводит к структурной перестройке аморфной пленки с формированием графитовой кристаллической структуры. Это следует как из подавления интенсивной полосы фотолюминесценции аморфного углерода, так и появления характерных для кристаллической структуры пиков в окрестности $\sim 1580 \text{ см}^{-1}$ (G-пик) и $\sim 1350 \text{ см}^{-1}$ (D-пик) в спектрах КРС. Следует отметить, что воздействие омического нагрева неоднородно по поверхности пленки. При разряде конденсаторов через образец образуются локальные пути протекания тока, в которых происходит наибольший разогрев. По мере удаления от этих областей степень кристаллизации значительно снижается и на окраинах пленки мало отличается от исходной. Прохождение тока разряда через образец вызывает почернение, связанное с графитизацией углеродной пленки, различной степени интенсивности в токопроводящих каналах и прилегающих областях. Для сравнения спектров КРС были выбраны области пленок с наибольшей степенью воздействия тока разряда батареи конденсаторов.

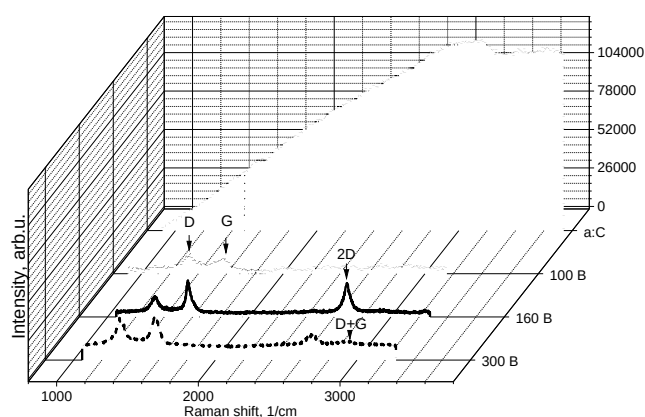


Рис.1. Спектры КРС углеродной пленки после плазменного осаждения в метане (a-C:H) и быстрого джоулева нагрева при напряжениях 100, 160 и 300 В.

Fig.1. Raman spectra of carbon film after plasma deposition in methane (a-C:H) and rapid Joule heating at voltages of 100, 160 and 300 V.

В спектрах КРС природа пиков G и D связаны с дважды вырожденной (продольной оптической и плоскостной поперечной оптической) фононной модой (симметрия E_{2g}) в центре зоны Бриллюэна [10] и «дыхательными» колебаниями шестиугольных ароматических колец атомов углерода [11], соответственно. Движение атомов, вызывающее появление D-пика в идеальной решетке графита, является запрещенным, но становится возможным при наличии разупорядочения в плоской структуре шестиугольных ячеек графита (или графена) [10]. Отношение интенсивностей пиков D и G (I_D/I_G) используется для оценки степени дефектности кристаллической структуры графена [10]. Значение I_D/I_G в образцах, подвергнутых флэш-обработке представлено в таблице 1. Наименьшее значение I_D/I_G достигается при напряжении разряда $U_{\text{разр}} = 160$ В и составляет $\sim 0,8$, что свидетельствует о значительной степени упорядоченности сформированной структуры. Как при уменьшении, так и увеличении напряжения от 160 В отношения I_D/I_G пиков возрастают. В первом случае это может быть вызвано недостаточной степенью кристаллизации, связанной с малой тепловой мощностью, выделяемой при джоулевым нагреве. В то же время, происходят перестройки в структуре, которые приводят к формированию sp^2 -гибридизированных связей и подавлению люминесценции аморфного углерода. При большем напряжении ($U_{\text{разр}} = 300$ В) избыточная тепловая мощность вероятно приводит к росту степени дефектообразования формируемых графитовых структур, на что указывает увеличение интенсивности D-пика.

Таблица 1. Отношение интенсивностей пиков в спектрах КРС в образцах, подвергнутых джоулеву нагреву при разряде батареи конденсаторов, заряженных до различных напряжений.

Table 1. Ratio of peak intensities in Raman spectra of samples subjected to Joule heating during discharge of a bank of capacitors charged to different voltages.

U, В	I_D/I_G	I_{2D}/I_G
100 В	~ 2	-
160 В	$\sim 0,8$	$\sim 1,2$
300 В	$\sim 1,1$	$\sim 0,5$

В спектрах КРС, помимо G- и D-пиков, имеются полосы в окрестностях волновых чи-

сел ~ 2700 см^{-1} (2D-пик) и ~ 2930 см^{-1} (D+G-полоса) (рис.1). 2D-пик является обертоном D-пика, но для его наблюдения в спектрах КРС не требуется наличие нарушений структуры решетки [10,12]. Интенсивность этого пика максимальна при $U_{\text{разр}} = 160$ В и значительно уменьшается при повышении напряжения разряда до 300 В. При флэш-обработке с $U_{\text{разр}} = 100$ В данный пик не проявляется. Отношение интенсивностей пиков 2D и G (I_{2D}/I_G) в спектрах КРС используется для оценки количества слоев графена [7,13], где $I_{2D}/I_G < 1$ обозначает наличие многослойного мультиграфена, а $I_{2D}/I_G > 1$ означает присутствие однослойного графена [7]. Оценки интенсивностей этих пиков представлены в таблице 1. Как следует из полученных данных, при $U_{\text{разр}} = 160$ В формируется больше однослойного графена, чем при 300 В, в котором преобладают многослойные графеновые чешуйки. Вместе с этим, незначительное значение соотношения I_{2D}/I_G ($\sim 1,2$) и достаточно высокое значение I_D/I_G ($\sim 0,8$) свидетельствуют в пользу того, что формируются чешуйки сморщенного графена [14].

Слабая и широкая полоса D+G-полоса является комбинацией D- и G-пиков и проявляется в спектрах КРС при наличии дефектов [10]. Пики TS_1 (1886 см^{-1}) и TS_2 (2031 см^{-1}), соответствующие турбостратному графену и наблюдаемые в спектрах КРС после флэш-обработки углеродных прекурсоров [3,5,6,14], не обнаружены.

Таким образом, проведенный анализ спектров КРС показывает наличие оптимальных условий флэш-обработки, которые могут привести к формированию графеноподобных структур высокой степени совершенства.

Изображения исходной поверхности аморфной пленки углерода и после её флэш-обработок при $U_{\text{разр}} = 160$ В-300 В, полученные методом СЭМ, показаны на рисунке 2. Поверхность а-С:N, полученная осаждением в плазме метана, имеет ровную и однородную структуру (рис.2 а). Флэш-обработка при $U_{\text{разр}} = 160$ В приводит к значительному изменению морфологии поверхности (рис.2 б, в). На поверхности можно выделить частицы округлой формы размерами до 1 мкм. Местами эти объекты слипаются между собой, образуя агрегации размерами до нескольких единиц микрометров (рис.2 б). Также видно, что эти образования имеют зернистую структуру с диаметром зерен около 100 нм (рис.2 в). При разряде батареи, заряженной до напряжения 300 В, на поверхности по-

являются «кратеры» размерами от нескольких единиц до десятков микрометров (рис. 2 г). Количество шарообразных частиц становится заметно меньше, вместе с этим увеличивается концентрация мелких зерен размерами ~ 100 нм, которыми усеяна вся поверхность (рис. 2 д).

Увеличение числа таких зерен могло быть вызвано распадом крупных ~ 100 нм шаровидных частиц при увеличении напряжения воздействия, сопровождаемое ростом тока разряда и выделяемого количества теплоты.

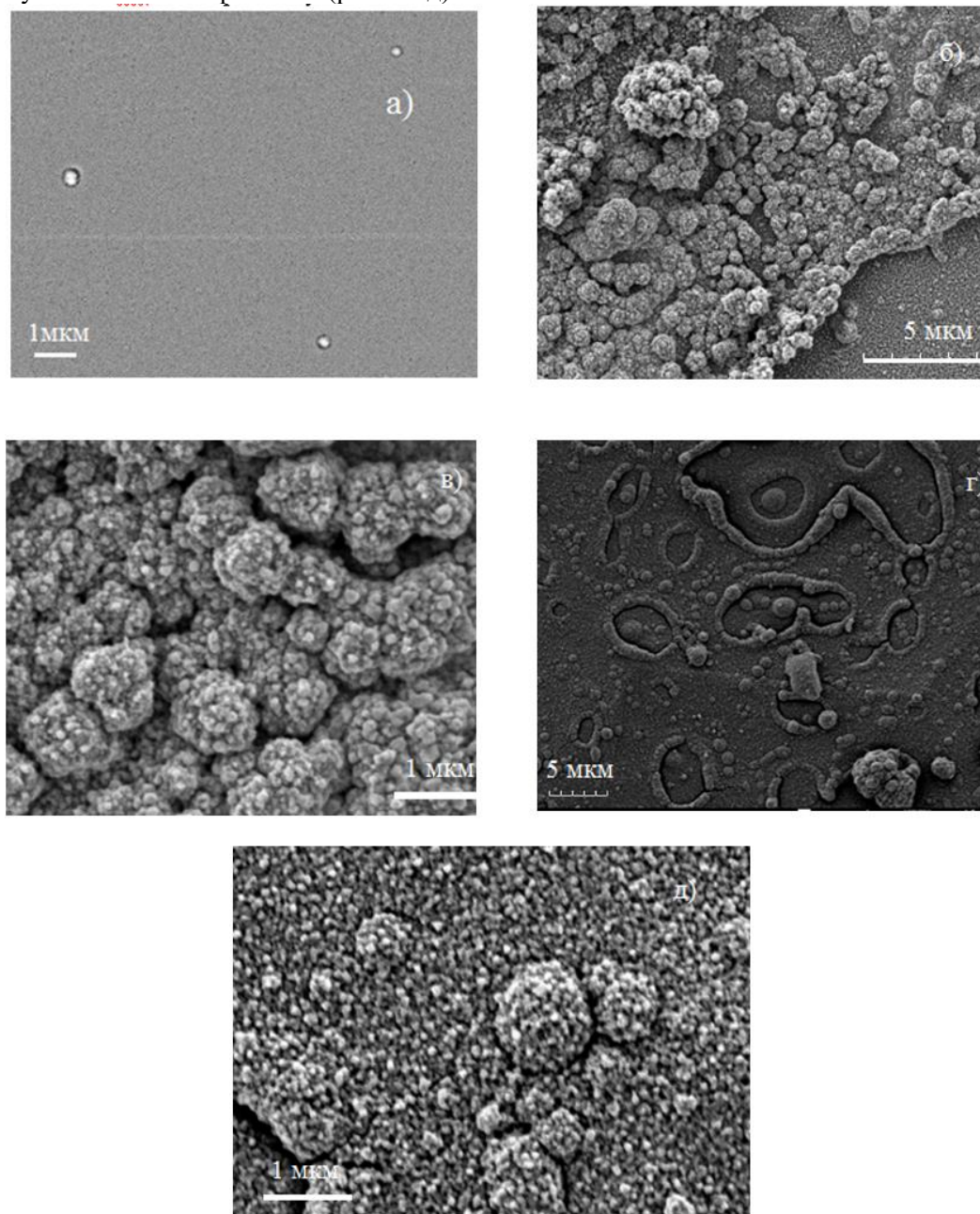


Рис.2. Изображения, полученные методом СЭМ: а) исходной поверхности аморфной пленки углерода; б) и в) после флэш-обработки при разряде батареи напряжением 160 В при различных увеличениях; г) и д) после флэш-обработки при разряде батареи напряжением 300 В при различных увеличениях

Fig.2. SEM images of a) the initial surface of the amorphous carbon film; b) and c) after flash treatment with a battery discharge of 160 V at different magnifications; d) and e) after flash treatment with a battery discharge of 300 V at different magnifications.

Элементный анализ, проведенный методом РЭДС, показал высокое содержание кислорода в полученных пленках (вставка на рис.3). Отношение содержания атомов кислорода и углерода (О/С) в разных точках на поверхности пленок варьирует в пределах от 0,9 до 1,1 при напряжении разряда 160 В. При увеличении напряжения до 300 В это отношение увеличивается до 1,25. Разброс значений О/С может быть вызван неравномерным разогревом образца от каналов протекания электрического тока разряда к периферийным областям, приводящее к разным скоростям реакций, идущих с участием кислорода. Особенностью

методики РЭДС является нечувствительность к содержанию атомов водорода, но проведенные предварительные исследования показали наличие интенсивных пиков в ИК-спектрах, связанных с наличием комплексов водорода, в термообработанных при 650 °С аморфных углеродных пленках, полученных осаждением в плазме метана [15]. Наблюдаемые на рисунке 2 г кратеры могли быть вызваны интенсивным выходом газов (прежде всего водорода) из структуры материала при разогреве.

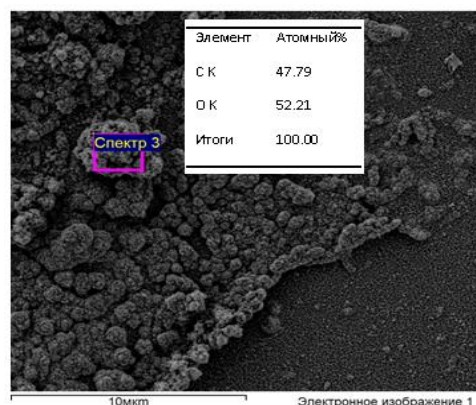


Рис.3. Содержание кислорода и углерода на поверхности пленки в области, обозначенной как «Спектр 3»

Fig.3. Oxygen and carbon content on the film surface in the area designated as «Спектр 3»

Для исследования гидрофильных свойств наносилась капля дистиллированной воды на поверхность образца (рис.4). Краевой угол смачивания показан на рисунке 4. В результате флэш-обработки при $U_{\text{разр}}=160$ В краевой угол смачивания, возрастает от $\sim 70^\circ$ (гидрофильное состояние), соответствующий аморфному углероду, до $\sim 105^\circ$ (гидрофобное состояние). Такой переход из гидрофильного состояния в гидрофобное может быть вызван «эффектом лотоса» [16], связанного с наличием большого числа сферических частиц микрометровых размеров и их агломераций на поверхности пленки.

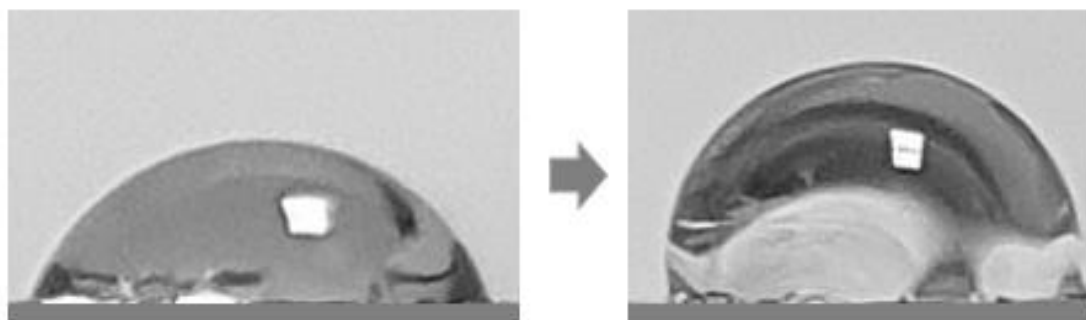


Рис.4. Изменение краевого угла смачивания углеродной пленки до и после флэш-обработки при напряжении $U = 160$ В

Измерения вольт-амперных характеристик показали значительное уменьшение электрического сопротивления исходной аморфной углеродной пленки, являющейся изолятором ($R > 10^{12}$ Ом), до значений $\sim 1,5$ кОм/квadrat после флэш-обработки ($U=160$ В). Увеличение элек-

тропроводности объясняется переходом углерода из аморфного состояния в электропроводящую графитизированную структуру.

При быстром джоулевым нагреве углеродных прекурсоров в основном формируются две углеродные структуры – это турбостратный

флэш-графен (тФг) и листы сморщенного графена [14]. Проведенное в работе Стэнфорда и др. [14] атомистическое моделирование показало, что при термическом отжиге преимущественно формируется сморщенный графен, в котором выравнивание графитовых плоскостей минимально или вовсе отсутствует, в отличие от тФг, формируемого при прямом воздействии тока, проходящего через материал. Источником формирования кристаллической структуры в обоих случаях служит подвижный углерод из аморфного слоя. В соответствии с этим механизмом на начальных этапах нагрева аморфный углерод не имеет жесткой ~~изначальной~~ структуры и подвергается быстрой кристаллизации, сопровождаемой дегазацией, что приводит к образованию графеноподобной структуры. Быстрое охлаждение приводит к «застыванию» образовавшейся структуры. Этот процесс приводит к существенной трансформации спектров КРС, приводящей к преобладанию sp^2 -гибридизированных связей в структуре материала (рис.1).

Наблюдаемые в СЭМ шарообразные формирования подобны сферическим частицам, формируемым в флэш-графене, и которые являются зародышами тФг [14]. Отсутствие пиков TS_1 и TS_2 , связанных с присутствием тФг, в спектрах КРС может быть вызвано недостаточной тепловой мощностью, выделяемой при джоулевом нагреве образцов и их слабой интенсивностью [3]. В результате этого не происходит слияния сфероидальных частиц и образование ориентированных турбостратных листов графена. Как следует из данных РЭДС, полученные пленки имеют высокие значения отношения содержания атомов кислорода к углероду (О/С) (от 0,9 до 1,25), существенно превышающие этот параметр для оксида графена (до 0,49) и чистого графена (0,052) [17]. Размеры формируемых углеродных сферических частиц могут существенно возрастать при впитывании воды или ее паров из окружающей среды. Как было показано в работе Цай и др. [18], размеры частиц Q-графена значительно расширились (от 100 нм до 1,5 мкм в диаметре) при погружении в воду. Это объясняет наличие крупных сферических объектов (до 1 мкм) в полученных пленках (рис.2). Кроме того, наличие водорода в исходных пленках углерода, а также поглощение кислорода из окружающей среды в процессе флэш-обработки и/или после

флэш-обработки могут быть причиной высокого содержания воды в пленках.

Заключение

Впервые проведено исследование воздействия быстрого (<100 мс) джоулевого нагрева на свойства аморфных углеродных пленок, сформированных осаждением в плазме метана. Ток разряда батареи конденсаторов емкостью 180 мФ, заряженных до напряжения в пределах от 100 до 300 В, вызывает выделение значительного количества тепла и нагрев образцов до высоких температур за короткий промежуток времени. Анализ спектров КРС показал наличие оптимальных условий быстрого джоулевого нагрева, которые приводят к формированию графеноподобных структур высокой степени совершенства. В результате такой обработки происходит структурная перестройка а-С:Н, приводящая к графитизации и значительному повышению электропроводности (от состояния изолятора до 1,5 кОм/квадрат). Исследования морфологии поверхности показали формирование шарообразных частиц и их агломератов размерами до единиц микрометров, состоящих из зерен диаметром около 100 нм. Такая структура вероятно ответственна за переход состояния поверхности из гидрофильного в гидрофобное благодаря «эффекту лотоса». Полученные результаты могут быть востребованы для лучшего понимания физических процессов, протекающих при флэш-обработке углеродных прекурсоров, с целью получения графеноподобных материалов, пригодных для широкого круга практического применения.

Список литературы

1. Aslan N. Structural, photovoltaic and optoelectronic properties of graphene–amorphous carbon nanocomposite //Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2021. V. 32. N. 12. P. 16927-16936.
2. Mbayachi V. B., Ndayiragije E., Sammani T., Taj S., Mbuta E. R. Graphene synthesis, characterization and its applications: A review //Results in Chemistry. 2021. V. 3. P. 100163.
3. Luong D. X., Bets K. V., Algozeeb W. A., Stanford M. G., Kittrell C., Chen W., Tour J. M. Gram-scale bottom-up flash graphene synthesis //Nature. 2020. V. 577. N. 7792. P. 647-651.
4. Sun Z., Hu Y. H. Ultrafast, low-cost, and mass production of high-quality graphene

//Angewandte Chemie International Edition. 2020. V. 59. N. 24. P. 9232-9234.

5. Wyss K. M., Luong D. X., Tour J. M. Large-scale syntheses of 2D materials: flash joule heating and other methods //Advanced materials. 2022. Vol. 34. N. 8. P. 2106970.

6. Advincula, P. A., Luong, D. X., Chen, W., Raghuraman, S., Shahsavari, R., Tour, J. M. Flash graphene from rubber waste //Carbon. 2021. V. 178. P. 649-656.

7. Liu X., Luo H. Preparation of Coal-Based Graphene by Flash Joule Heating //ACS omega. 2024. V. 9. N. 2. P. 2657-2663.

8. Ferrari A. C., Robertson J. Resonant Raman spectroscopy of disordered, amorphous, and diamondlike carbon //Physical review B. 2001. V. 64. N. 7. P. 075414.

9. Casiraghi C., Ferrari A. C., Robertson J. Raman spectroscopy of hydrogenated amorphous carbons //Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics. 2005. V. 72. N. 8. P. 085401.

10. Wu, J. B., Lin, M. L., Cong, X., Liu, H. N., Tan, P. H. Raman spectroscopy of graphene-based materials and its applications in related devices //Chemical Society Reviews. 2018. V. 47. N. 5. P. 1822-1873.

11. Thapliyal, V., Alabdulkarim, M. E., Whelan, D. R., Mainali, B., Maxwell, J. L. A concise review of the Raman spectra of carbon allotropes //Diamond and Related Materials. 2022. V. 127. P. 109180.

12. Тимофеева, Т. Е., Неустроев, Е. П., Попов, В. И., Винокуров, П. В., Тимофеев, В. Б. Применение вейвлет-преобразований к анализу компонентов 2D-пика рамановского спектра трех-и четырехслойного графена //Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 125. – №. 5. – С. 588-594.

13. Beams R., Cançado L. G., Novotny L. Raman characterization of defects and dopants in graphene //Journal of Physics: Condensed Matter. 2015. V. 27. N. 8. P. 083002.

14. Stanford M. G., Bets K. V., Luong D. X., Advincula P. A., Chen W., Li J. T., Tour J. M. Flash graphene morphologies //ACS nano. 2020. V. 14. N. 10. P. 13691-13699.

15. Neustroev E. P., Prokopiev A. R., Popov V. I., Protopopov F. F., Semenov S. O. Optical properties of thin films formed by carbon deposition in methane plasma and subsequent annealing //AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2021. V. 2328. N. 1.

16. Zhang C., Liang F., Zhang W., Liu H., Ge M., Zhang Y., Tang Y. Constructing mechanochemical durable and self-healing superhydrophobic surfaces //ACS omega. – 2020. V. 5. N. 2. P. 986-994.

17. Randviir E. P., Brownson D. A., Gómez-Mingot M., Kampouris D. K., Iniesta J., Banks C. E. Electrochemistry of Q-graphene //Nanoscale. 2012. V. 4. N. 20. P. 6470-6480.

18. Cai Y., Feng L., Hua Y., Liu H., Yin M., Lv X., Wang H. Q-Graphene-loaded metal organic framework nanocomposites with water-triggered fluorescence turn-on: fluorimetric test strips for directly sensing trace water in organic solvents //Chemical Communications. 2018. V. 54. N. 96. P. 13595-13598.

Информация об авторах

Е. П. Неустроев – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры радиофизики и электронных систем физико-технического института Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова.

А. Р. Прокопьев – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Дизайн-центр электроники «Север»» Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, ведущий научный сотрудник Академии наук РС(Я).

References

1. Aslan, N. (2021). Structural, photovoltaic and optoelectronic properties of graphene–amorphous carbon nanocomposite. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 32(12), 16927-16936.

2. Mbayachi, V. B., Ndayiragije, E., Sammani, T., Taj, S., & Mbuta, E. R. (2021). Graphene synthesis, characterization and its applications: A review. Results in Chemistry, 3, 100163.

3. Luong, D. X., Bets, K. V., Algozeeb, W. A., Stanford, M. G., Kittrell, C., Chen, W., ... & Tour, J. M. (2020). Gram-scale bottom-up flash graphene synthesis. Nature, 577(7792), 647-651.

4. Sun, Z., & Hu, Y. H. (2020). Ultrafast, low-cost, and mass production of high-quality graphene. Angewandte Chemie International Edition, 59(24), 9232-9234.

5. Wyss, K. M., Luong, D. X., & Tour, J. M. (2022). Large-scale syntheses of 2D materials:

flash joule heating and other methods. *Advanced materials*, 34(8), 2106970.

6. Advincula, P. A., Luong, D. X., Chen, W., Raghuraman, S., Shahsavari, R., & Tour, J. M. (2021). Flash graphene from rubber waste. *Carbon*, 178, 649-656.

7. Liu, X., & Luo, H. (2024). Preparation of Coal-Based Graphene by Flash Joule Heating. *ACS omega*, 9(2), 2657-2663.

8. Ferrari, A. C., & Robertson, J. (2001). Resonant Raman spectroscopy of disordered, amorphous, and diamondlike carbon. *Physical review B*, 64(7), 075414.

9. Casiraghi, C. F. A. R. J., Ferrari, A. C., & Robertson, J. (2005). Raman spectroscopy of hydrogenated amorphous carbons. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 72(8), 085401.

10. Wu, J. B., Lin, M. L., Cong, X., Liu, H. N., & Tan, P. H. (2018). Raman spectroscopy of graphene-based materials and its applications in related devices. *Chemical Society Reviews*, 47(5), 1822-1873.

11. Thapliyal, V., Alabdulkarim, M. E., Whelan, D. R., Mainali, B., & Maxwell, J. L. (2022). A concise review of the Raman spectra of carbon allotropes. *Diamond and Related Materials*, 127, 109180.

12. Timofeeva, T.E., Neustroev, E.P., Popov, V.I., Vinokurov, P.V., & Timofeev, V.B. (2018). *Primenenie vejvlet-preobrazovanij k analizu komponentov 2D-pika ramanovskogo spektra trekh-i chetyrehslojnogo grafena*. *Optika i spektroskopiya*, 125(5), 588-594.

13. Beams, R., Cançado, L. G., & Novotny, L. (2015). Raman characterization of defects and dopants in graphene. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 27(8), 083002.

14. Stanford, M. G., Bets, K. V., Luong, D. X., Advincula, P. A., Chen, W., Li, J. T., ... & Tour, J.

M. (2020). Flash graphene morphologies. *ACS nano*, 14(10), 13691-13699.

15. Neustroev, E. P., Prokopiev, A. R., Popov, V. I., Protopopov, F. F., & Semenov, S. O. (2021, March). Optical properties of thin films formed by carbon deposition in methane plasma and subsequent annealing. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2328, No. 1). AIP Publishing.

16. Zhang, C., Liang, F., Zhang, W., Liu, H., Ge, M., Zhang, Y., ... & Tang, Y. (2020). Constructing mechanochemical durable and self-healing superhydrophobic surfaces. *ACS omega*, 5(2), 986-994.

17. Randviir, E. P., Brownson, D. A., Gómez-Mingot, M., Kampouris, D. K., Iniesta, J., & Banks, C. E. (2012). Electrochemistry of Q-graphene. *Nanoscale*, 4(20), 6470-6480.

18. Cai, Y., Feng, L., Hua, Y., Liu, H., Yin, M., Lv, X., ... & Wang, H. (2018). Q-Graphene-loaded metal organic framework nanocomposites with water-triggered fluorescence turn-on: fluorimetric test strips for directly sensing trace water in organic solvents. *Chemical Communications*, 54(96), 13595-13598.

Information about the authors

E. P. Neustroev – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Radiophysics and Electronic Systems of the Physics and Technology Institute of the M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

A. R. Prokopev – Candidate of Technical Sciences (PhD in Technics), Senior Researcher of the Laboratory of Electronics Design Center “Sever” of the M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Leading Researcher of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 08.11.2024; одобрена после рецензирования 17.01.2025; принята к публикации 03.02.2025.

The article was received by the editorial board on 08 Nov. 2024; approved after reviewing 17 Jan. 2025; accepted for publication 03 Feb. 2025.