

УДК 538.953;538.911

<https://doi.org/10.25587/2222-5404-2025-22-1-37-47>

Оригинальная научная статья

Воздействие быстрого джоулева нагрева на свойства углеродных пленок, сформированных осаждением в плазме метана

Е. П. Неустроев ✉, **А. Р. Прокопьев**

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

✉ neustr@mail.ru

Аннотация

Быстрый джоулев нагрев аморфных углеродных пленок, сформированных осаждением в плазме метана, производился электрическим разрядом батареи конденсаторов общей емкостью 180 мФ, заряженных до напряжения от 100 до 300 В. Для исследований привлечены методы спектроскопии комбинационного рассеяния света, сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии и вольт-амперных характеристик. В спектрах комбинационного рассеяния света образцов после джоулева нагрева отчетливо проявляются G-, 2D- и D-пики, характерные для графеновых структур с sp^2 -гибридизованными связями. Анализ спектров показал, что отношение интенсивностей 2D- и G-пииков и D- и G-пииков свидетельствует о высоком качестве формируемых чешуек плоских структур турбостратного графена. Наиболее эффективным, с точки зрения формирования однослойных графенов, оказался джоулев, проведенный в результате протекания через углеродную пленку тока разряда конденсаторов, заряженных до напряжения $U=160$ В. Методами электронной микроскопии установлено, что быстрый термический нагрев при электрическом разряде приводит к значительной трансформации состояния атомарно-гладкой поверхности аморфной углеродной пленки. В результате на поверхности образуются сферические частицы размерами около 1 мкм, которые имеют зернистую структуру с размерами зерен около 100 нм. С другой стороны, сферические частицы собираются в агломерации размерами до нескольких единиц микрометров. Элементный анализ, проведенный методом энергодисперсионной спектроскопии, помимо углерода, показал высокое содержание кислорода в сферических частицах. Наиболее вероятной причиной данного явления может являться поглощение кислорода сформированными графеновыми чешуйками. Исследования смачиваемости поверхности образцов до и после джоулева нагрева показали повышение гидрофобности. Причиной возникновения водоотталкивающих свойств может являться «эффект лотоса», вызванный формированием сферических частиц размерами до 1 мкм и их более крупных конгломератов на поверхности пленки. Обнаружено кардинальное уменьшение электрического сопротивления исходной аморфной пленки от значений, соответствующих изолятору ($R > 1$ ТОм), до единиц кОм на квадрат поверхности. Увеличение электропроводности объясняется переходом углерода из аморфного состояния в электропроводящую графеноподобную структуру.

Ключевые слова: плазма метана, осаждение углерода, углеродная аморфная пленка, быстрый джоулев нагрев, графеноподобная структура, электронная микроскопия, морфология поверхности, рамановский спектр, гидрофобная поверхность, электропроводность

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

Для цитирования: Неустроев Е. П., Прокопьев А. Р. Воздействие быстрого джоулева нагрева на свойства углеродных пленок, сформированных осаждением в плазме метана. *Вестник СВФУ*. 2025, Т. 22, № 1. С. 37–47. DOI: 10.25587/2222-5404-2025-22-1-37-47

Original article

Effect of fast Joule heating on the properties of carbon films formed by methane plasma deposition

Efim P. Neustroev ✉, *Aisen R. Prokopiev*

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

✉ neustr@mail.ru

Abstract

Fast Joule heating of amorphous carbon films formed by deposition in methane plasma was performed by electric discharge of a capacitor bank with a total capacity of 180 mF charged to a voltage of 100 to 300 V. The methods of Raman spectroscopy, scanning electron microscopy, X-ray energy-dispersive spectroscopy and current-voltage characteristics were used for the study. The Raman spectra of the samples after fast Joule heating clearly show G-, 2D- and D-peaks characteristic of graphene structures with sp²-hybridized bonds. Analysis of the spectra showed that the intensity ratio of the 2D- and G-peaks and the D- and G-peaks indicates a high quality of the formed flakes of turbostratic graphene structures. The most effective, in terms of the formation of single-layer graphenes, was fast Joule heating, carried out as a result of the discharge current of capacitors charged to a voltage of $U = 160$ V. Electron microscopy methods have established that fast thermal heating during electric discharge leads to a significant transformation of the state of the atomically smooth surface of the amorphous carbon film. As a result, spherical particles of about 1 μm in size are formed on the surface, which have a granular structure with grain sizes of about 100 nm. On the other hand, spherical particles are collected in agglomerations of up to several micrometers in size. Elemental analysis carried out by energy-dispersive spectroscopy, in addition to carbon, showed a high oxygen content in spherical particles. The most likely cause of this phenomenon may be the absorption of oxygen by the formed graphene flakes. Studies of the wettability of the surface of the samples before and after Joule heating showed an increase in hydrophobicity. 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 larger conglomerates on the film surface. A radical decrease in the electrical resistance of the original amorphous film from values corresponding to an insulator ($R > 1 \text{ T}\Omega$) to units of k Ω per square of surface was found. The increase in electrical conductivity is explained by the transition of carbon from an amorphous state to an electrically conductive graphene-like structure.

Keywords: methane plasma, carbon deposition, carbon amorphous film, fast Joule heating, graphene-like structure, electron microscopy, surface morphology, Raman spectrum, hydrophobicity, electrical conductivity

Funding. This study was carried out with support from the Russian Science Foundation (Project No. 24-22-20087)

For citation: Neustroev E. P., Prokopiev A. R. Effect of fast Joule heating on the properties of carbon films formed by methane plasma deposition. *Vestnik of NEFU*. 2025, Vol. 22, No. 1. Pp. 37–47. DOI: 10.25587/2222-5404-2025-22-1-37-47

Введение

Углеродные пленки сочетают в себе уникальные электрические, оптические и механические свойства, которые в перспективе позволяют применять данную структуру во многих приложениях, от нанoeлектроники до космической промышленности [1, 2]. В работе Луонга и др. [3] предложен метод получения турбостратного флэш-графена из углеродных прекурсоров методом мгновенного джоулевого нагрева и последующего быстрого охлаждения. Такой нагрев происходит благодаря протеканию через образец больших (сотни ампер) токов электрического разряда батареи конденсаторов большой емкости в силу закона Джоуля-Ленца. Температура образца за несколько миллисекунд или секунд достигает 2500–3500 °C [4–6]. Из-за скоротечности процесса и возникающего яркого свечения при нагреве обработка получила название «флэш-нагрев» (flash – вспышка) [2]. В результате воздействия высоких температур и приложенного электрического поля во время процесса разрываются связи углеродных прекурсоров и при охлаждении реорганизуются в структуры с sp^2 -гибридизацией графеновых слоев как более благоприятных с точки зрения термодинамической устойчивости. Высокая скорость процесса не позволяет сформироваться стабильным и устойчивым слоям графита с АВ-укладкой. В результате формируются метастабильные состояния в виде турбостратного графена (тФг), представляющего собой графеновые слои, повернутые относительно перпендикулярной к поверхности оси [7]. Наличие вращательного беспорядка увеличивает межплоскостное расстояние и позволяет сохранить графеновые свойства при большом количестве слоев [6]. Во многих работах в качестве прекурсоров использованы такие материалы, как полимерные отходы, резина, уголь и т. д. [3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11], которые измельчаются в виде аморфного углеродного порошка. Флэш-обработка – это электротермический процесс, результат воздействия которого зависит от тепловых и электрических свойств материала, таких как удельное электрическое сопротивление, теплопроводность и теплоемкость [6]. Поэтому изначально неоднородный состав обрабатываемых материалов, включающий примеси и различные добавки, вызывает затруднения в понимании природы структурной трансформации при флэш-обработке и установлении необходимых параметров процесса. Применение исходно однородного прекурсора способствовало бы решению этой проблемы. В данной работе исследуется воздействие быстрого джоулевого нагрева на аморфную углеродную пленку, осажденную в плазме метана на подложку SiO_2/Si .

Материалы и методы

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 cm^3/min , 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-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 А. Р. Прокопьева и др. [12]. На установке, использованной в данной работе, конденсаторный блок имел суммарную емкость 180 мФ (конденсаторы 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. Так как исходный материал обладал изолирующими свойствами на начальном этапе, разряд конденсаторов осуществлялся через алюминиевую фольгу, закрепленную между контактами. В процессе разряда при увеличении температуры до ~ 1000 °С и выше начинается процесс графитизации аморфного углерода [13], приводящий к повышению его электропроводности. При этих температурах алюминиевая фольга полностью расплавляется и испаряется, а ток разряда уже идет через графитизированную пленку. Процесс проводился в атмосфере азота при давлении $\sim 0,3$ бар.

Для исследований спектров комбинационного рассеяния (КР) света использовалась нанолaborатория «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 рис. 1 представлены спектры КР света до (рис. 1а) и после разряда батареи конденсаторов, заряженных до различных напряжений (100 В (рис. 1б), 160 В (рис. 1в) и 300 В (рис. 1г)), через исследуемые образцы. Исходная углеродная пленка, полученная плазменным осаждением в метане на поверхность SiO_2/Si , имеет типичную для аморфного углерода (а:С) широкую и интенсивную полосу фотолюминесценции [14, 15], которая полностью затмевает спектр КР света. Проведенная флэш-обработка приводит к кристаллизации исходной аморфной пленки с формированием кристаллической структуры с sp^2 -гибридизованными связями. Это следует как из подавления интенсивной полосы фотолюминесценции аморфного углерода, так и из появления характерных для кристаллической структуры пиков графена в окрестности ~ 1580 cm^{-1} (G-пик), ~ 2700 cm^{-1} (D-пик) и ~ 1350 cm^{-1} (D-пик) в спектрах КР света [16, 17]. Следует отметить, что воздействие джоулевого нагрева неоднородно по поверхности пленки. При разряде конденсаторов через образец образуются локальные пути прохождения 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 КР света были выбраны области пленок с наибольшей степенью воздействия тока разряда батареи конденсаторов.

В спектрах КР света природа пиков G и D связана с дважды вырожденной (продольной оптической и плоскостной поперечной оптической) фононной модой (симметрия E_{2g}) в центре зоны Бриллюэна [16, 17] и «дыхательными» колебаниями

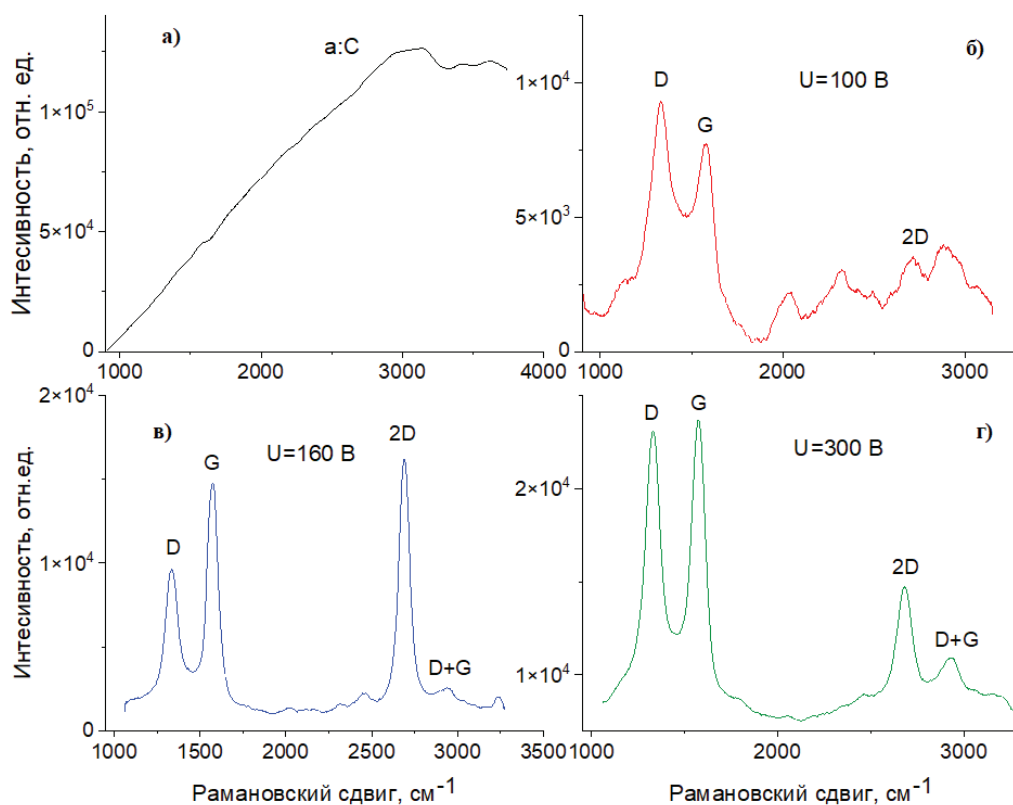


Рис. 1. Спектры КР света углеродной пленки после плазменного осаждения в метане (a:C) и флэш-обработки при напряжениях 100, 160 и 300 В

Fig. 1. Raman spectra of methane plasma-deposited amorphous carbon (a:C) films following flash Joule heating at 100, 160, and 300 V

шестиугольных ароматических колец атомов углерода [14, 16] 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) [16, 17]. Отношение интенсивностей пиков D и G (I_D/I_G) используется для оценки степени дефектности кристаллической структуры графена [16, 17]. Значение I_D/I_G в образцах, подвергнутых флэш-обработке, представлено в табл. Наименьшее значение I_D/I_G достигается при напряжении разряда $U_{\text{разр}} = 160$ В и составляет $\sim 0,65$, что свидетельствует о значительной степени упорядоченности сформированной структуры. Как при уменьшении, так и при 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

Отношение интенсивностей пиков в спектрах КР света в образцах, подвергнутых флэш-обработке

Table

Intensity ratios of Raman spectral bands in flash Joule-heated samples

U, В	I_D/I_G	I_{2D}/I_G
100 В	~1,18	~0,44
160 В	~0,65	~1,09
300 В	~0,97	~0,65

В спектрах КРС, помимо G- и D-пиков, имеются полосы в окрестностях волновых чисел $\sim 2700\text{ см}^{-1}$ (2D-пик) и $\sim 2930\text{ см}^{-1}$ (D+G-полоса) (рис. 1). 2D-пик является обертоном D-пика, но для его наблюдения в спектрах КР света не требуется наличие нарушений структуры решетки [16]. Интенсивность этого пика максимальна при $U_{\text{разр}} = 160\text{ В}$ и значительно уменьшается при повышении напряжения разряда до 300 В. При флэш-обработке с $U_{\text{разр}} = 100\text{ В}$ данный пик не проявляется. Отношение интенсивностей пиков 2D и G (I_{2D}/I_G) в спектрах КР света используется для оценки количества слоев графена [9, 16, 17], где $I_{2D}/I_G < 1$ обозначает наличие многослойного мультиграфена, а $I_{2D}/I_G > 1$ означает присутствие однослойного графена [9]. Оценки интенсивностей этих пиков представлены в табл. Как следует из полученных данных, при $U_{\text{разр}} = 160\text{ В}$ формируется больше однослойного графена, чем при 300 В, в котором преобладают многослойные графеновые чешуйки. Вместе с этим незначительное значение соотношения I_{2D}/I_G ($\sim 1,09$) и достаточно высокое значение I_D/I_G ($\sim 0,65$) свидетельствуют в пользу того, что формируются чешуйки сморщенного графена [16].

Слабая и широкая D+G-полоса является комбинацией D- и G-пиков и проявляется в спектрах КРС при наличии дефектов [16, 17]. 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 [2, 3, 4, 10], не обнаружены. Возможно, это связано с малой интенсивностью данных пиков.

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

Изображения исходной поверхности аморфной пленки углерода и после ее флэш-обработки при $U_{\text{разр}} = 160\text{ В}$, полученные методом СЭМ, показаны на рис. 2. Поверхность а-С:H, сформированная осаждением в плазме метана, имеет ровную и однородную структуру (рис. 2а). Флэш-обработка при $U_{\text{разр}} = 160\text{ В}$ приводит к значительному изменению морфологии поверхности (рис. 2б, в, г). На снимках можно выделить шарообразные частицы размерами до 1 мкм. Местами эти объекты слипаются между собой, образуя агрегации размерами до нескольких единиц микрометров (рис. 2в, г). С другой стороны, структура этих образований имеет зернистую структуру с диаметром зерен

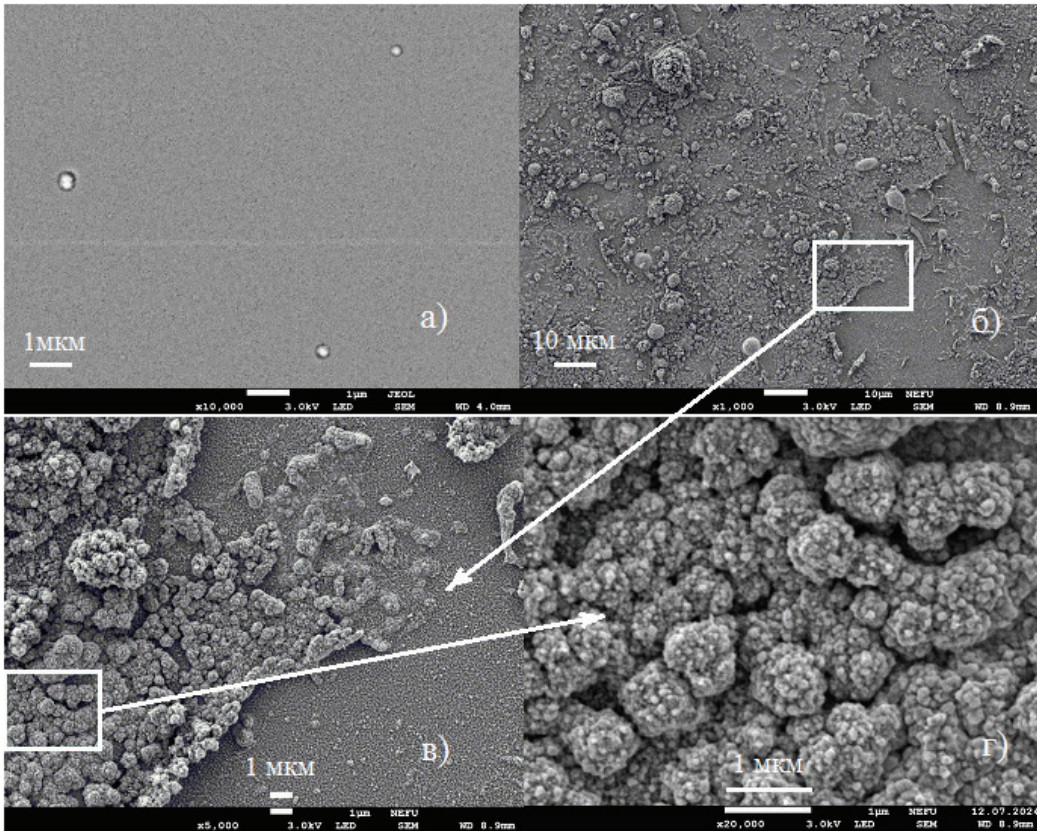


Рис. 2. Изображения, полученные методом СЭМ: а) исходной поверхности аморфной пленки углерода; б), в) и г) после флэш-обработки при разряде батареи напряжением 160 В при различных увеличениях

Fig. 2. SEM images of: а) pristine amorphous carbon film; б), в) and d) films after flash Joule heating at 160 V, obtained at different magnifications

около 100 нм (рис. 2в). При разряде батареи, заряженной до напряжения 300 В, количество шарообразных частиц становится заметно меньше, вместе с этим увеличивается концентрация мелких зерен размерами ~100 нм. Увеличение числа таких зерен могло быть вызвано распадом крупных микрометровых шаровидных частиц при увеличении напряжения воздействия.

Элементный анализ, проведенный методом РЭДС, показал высокое содержание кислорода в исследуемых пленках (вставка на рис. 3). Причиной этого может являться поглощение кислорода из окружающей среды в течение и/или после флэш-обработки. Отношение содержания атомов кислорода и углерода (О/С) в разных точках на поверхности пленок варьирует в пределах от 0,9 до 1,1 после флэш-обработки при напряжении разряда 160 В. С увеличением напряжения до 300 В это отношение изменяется в пределах от 0,7 до 1,25. Разброс значений О/С можно объяснить неравномерным разогревом образца от каналов протекания электрического тока разряда к периферийным областям, приводящего к разным скоростям реакций, идущих с участием кислорода. Особенностью методики РЭДС является нечувствительность к содержанию атомов водорода. С другой стороны, ранее авторами было показано наличие комплексов водорода в аморфных углеродных пленках, полученных осаждением в плазме метана [18].

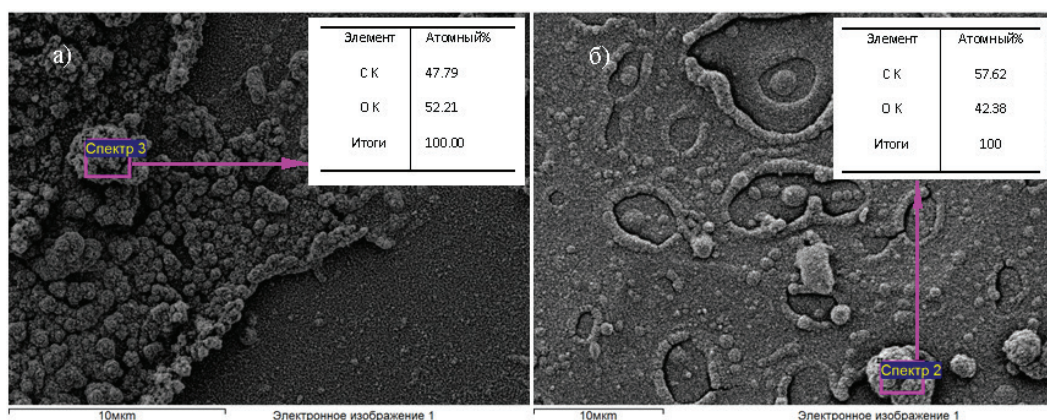


Рис. 3. Содержание кислорода и углерода на поверхности пленки после разряда напряжениями а) 160 В и б) 300 В

Fig. 3. Oxygen and carbon content on the film surface after discharge at a) 160 V and b) 300 V

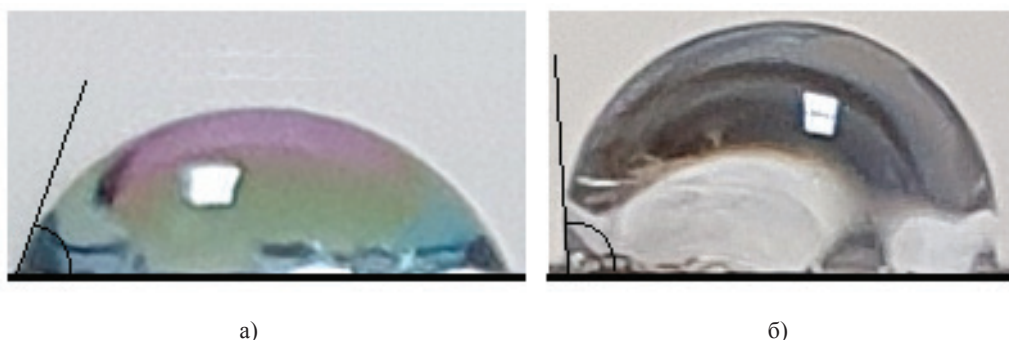


Рис. 4. Краевые углы смачивания а) исходной углеродной пленки и б) после флэш-обработки ($U = 160$ В)

Fig. 4. Contact angles of a) the pristine amorphous carbon film and b) the film after flash Joule heating ($U = 160$ V)

Наблюдаемые на рис. 3б кратеры могли быть вызваны интенсивным выходом газов (прежде всего водорода) из структуры материала при флэш-нагреве. Кроме того, водород может активно участвовать в поглощении кислорода в процессе флэш-обработки.

Для исследования гидрофильных свойств наносилась капля дистиллированной воды на поверхность образца (рис. 4). В результате флэш-обработки при $U_{\text{разр}} = 160$ В краевой угол смачивания возрастает от $\sim 70^\circ$ (гидрофильное состояние), соответствующих аморфному углероду, до $\sim 105^\circ$ (гидрофобное состояние). Такое изменения смачиваемости может являться проявлением «эффекта лотоса» [19], обусловленного наличием большого числа сферических частиц микронных размеров и их агломераций на поверхности пленки.

Измерения вольт-амперных характеристик показали значительное уменьшение электрического сопротивления исходной аморфной углеродной пленки, являющейся изолятором ($R > 10^{12}$ Ом/квadrat), до значений $\sim 1,5$ кОм/квadrat после флэш-обработки ($U = 160$ В). Увеличение электропроводности объясняется переходом углерода из аморфного состояния в электропроводящую графеноподобную структуру.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что флэш-обработка аморфного углерода, осажденного на диэлектрическую поверхность, приводит к формированию графеноподобных структур. Оптимальным параметром обработки при конденсаторном разряде батареи является напряжение 160 В.

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 КР света 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 более мелких 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.

Л и т е р а т у р а

1. Aslan N. Structural, photovoltaic and optoelectronic properties of graphene–amorphous carbon nanocomposite. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2021;32(12):16927-16936.
2. Wyss KM, Luong DX, Tour JM. Large-scale syntheses of 2D materials: flash joule heating and other methods. *Advanced materials*. 2022;34(8):2106970.
3. Luong DX, Bets KV, Stanford MG, et al. Gram-scale bottom-up flash graphene synthesis. *Nature*. 2020;577(7792):647-651.
4. Advincula PA, Luong DX, Chen W, et al. Flash graphene from rubber waste. *Carbon*. 2021;178: 649-656.
5. Choi CHW, Shin J, Eddy L, et al. Flash-within-flash synthesis of gram-scale solid-state materials. *Nature Chemistry*. 2024;16(11):1831-1837.
6. Deng B, Eddy L, Wyss KM, et al. Flash Joule heating for synthesis, upcycling and remediation. *Nature Reviews Clean Technology*. 2025;1(1):32-54.
7. Бобенко Н.Г., Чумаков Ю.А., Белослудцева А.А. Особенности адсорбции фтора и водорода на поверхности турбоэлектродного графена. *Химическая физика и мезоскопия*. 2022;24(1):69-81.
8. Sun Z, Hu YuH. Ultrafast, low-cost, and mass production of high-quality graphene. *Angewandte Chemie International Edition*. 2020;59(24):9232-9234.
9. Liu X, Luo H. Preparation of Coal-Based Graphene by Flash Joule Heating. *ACS omega*. 2024;9(2):2657-2663.
10. Stanford MG, Bets KV, Luong DX, et al. Flash graphene morphologies. *ACS nano*. 2020;14(10):13691-13699.
11. Chen W, Li JT, Wang Zhe, et al. Ultrafast and Controllable Phase Evolution by Flash Joule Heating. *ACS Nano*. 2021;15(7):11158-11167.

12. Прокопьев А.Р., Васильева Е.Д., Лоскин Н.Н., Попов Д.Н. Получение быстрым джоулевым нагревом углеродных графенсодержащих порошков и их применение в качестве модификаторов для стекловолокна. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(4):651-660.
13. Kim T, Lee J, Lee KH. Full graphitization of amorphous carbon by microwave heating. *RSC advances*. 2016;6(29):24667-24674.
14. Ferrari AC, Robertson J. Resonant Raman spectroscopy of disordered, amorphous, and diamondlike carbon. *Physical Review B*. 2001;64(7):075414.
15. Casiraghi C, Ferrari AC, Robertson J. Raman spectroscopy of hydrogenated amorphous carbons. *Physical Review B*. 2005;72(8):085401.
16. Wu JB, Lin ML, Cong X, et al. Raman spectroscopy of graphene-based materials and its applications in related devices. *Chemical Society Reviews*. 2018;47(5):1822-1873.
17. Beams R, Cançado LG, Novotny L. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2015;27(8):083002.
18. Neustroev EP, Prokopiev AR, Popov VI, et al. Optical properties of thin films formed by carbon deposition in methane plasma and subsequent annealing. *AIP Conference Proceedings*. 2021;2328(1):050017.
19. Zhang Ch, Liang F, Zhang W, et al. Constructing mechanochemical durable and self-healing superhydrophobic surfaces. *ACS omega*. 2020;5(2):986-994.

References

1. Aslan N. Structural, photovoltaic and optoelectronic properties of graphene–amorphous carbon nanocomposite. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2021;32(12):16927-16936 (in English).
2. Wyss KM, Luong DX, Tour JM. Large-scale syntheses of 2D materials: flash joule heating and other methods. *Advanced materials*. 2022;34(8):2106970 (in English).
3. Luong DX, Bets KV, Stanford MG, et al. Gram-scale bottom-up flash graphene synthesis. *Nature*. 2020;577(7792):647-651 (in English).
4. Advincula PA, Luong DX, Chen W, et al. Flash graphene from rubber waste. *Carbon*. 2021;178: 649-656 (in English).
5. Choi CHW, Shin J, Eddy L, et al. Flash-within-flash synthesis of gram-scale solid-state materials. *Nature Chemistry*. 2024;16(11):1831-1837 (in English).
6. Deng B, Eddy L, Wyss KM, et al. Flash Joule heating for synthesis, upcycling and remediation. *Nature Reviews Clean Technology*. 2025;1(1):32-54 (in English).
7. Bobenko NG, Chumakov YuA, Belosludtseva AA. Features of adsorption of fluorine and hydrogen on the surface of turbostrate graphene. *Chemical physics and mesoscopy*. 2022;24(1):69-81 (in Russian).
8. Sun Z, Hu YuH. Ultrafast, low-cost, and mass production of high-quality graphene. *Angewandte Chemie International Edition*. 2020;59(24):9232-9234 (in English).
9. Liu X, Luo H. Preparation of Coal-Based Graphene by Flash Joule Heating. *ACS omega*. 2024;9(2):2657-2663 (in English).
10. Stanford MG, Bets KV, Luong DX, et al. Flash graphene morphologies. *ACS nano*. 2020;14(10):13691-13699 (in English).
11. Chen W, Li JT, Wang Zhe, et al. Ultrafast and Controllable Phase Evolution by Flash Joule Heating. *ACS Nano*. 2021;15(7):11158-11167 (in English).
12. Prokopev AR, Vasilieva ED, Loskin NN, Popov DN. Production of graphene-containing carbon powders via fast Joule heating for fiberglass modification *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(4):651-660 (in Russian).
13. Kim T, Lee J, Lee KH. Full graphitization of amorphous carbon by microwave heating. *RSC advances*. 2016;6(29):24667-24674 (in English).
14. Ferrari AC, Robertson J. Resonant Raman spectroscopy of disordered, amorphous, and diamondlike carbon. *Physical Review B*. 2001;64(7):075414 (in English).

15. Casiraghi C, Ferrari AC, Robertson J. Raman spectroscopy of hydrogenated amorphous carbons. *Physical Review B*. 2005;72(8):085401 (in English).
16. Wu JB, Lin ML, Cong X, et al. Raman spectroscopy of graphene-based materials and its applications in related devices. *Chemical Society Reviews*. 2018;47(5):1822-1873 (in English).
17. Beams R, Cançado LG, Novotny L. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2015;27(8):083002 (in English).
18. Neustroev EP, Prokopiev AR, Popov VI, et al. Optical properties of thin films formed by carbon deposition in methane plasma and subsequent annealing. *AIP Conference Proceedings*. 2021;2328(1):050017 (in Russian).
19. Zhang Ch, Liang F, Zhang W, et al. Constructing mechanochemical durable and self-healing superhydrophobic surfaces. *ACS omega*. 2020;5(2):986-994 (in English).

Сведения об авторах

НЕУСТРОЕВ Ефим Петрович – к. ф.-м. н., доцент кафедры радиофизики и электронных систем ФТИ, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», г. Якутск, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-8163-2012

E-mail: neustr@mail.ru

ПРОКОПЬЕВ Айсен Русланович – к. т. н., с. н. с. лаборатории «Дизайн-центр электроники «Север», ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», г. Якутск, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-2212-2485

E-mail: aisenprokopiev@mail.ru

Information about the authors

Efim P. NEUSTROEV – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Radiophysics and Electronic Systems, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-8163-2012

Aisen R. Prokopiev – Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, Laboratory of the Electronics Design Center “Sever”, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-2212-2485

Вклад авторов

Неустроев Е.П. – разработка концепции, методология, верификация данных, проведение исследования, ресурсное обеспечение исследования, редактирование рукописи, визуализация, получение финансирования, руководство исследованием

Прокопьев А.Р. – методология, верификация данных, проведение исследования, ресурсное обеспечение исследования, получение финансирования, создание черновика рукописи

Authors' contribution

Efim P. Neustroev – conceptualization, methodology, validation, investigation, resources, writing - review & editing, visualization, funding acquisition, supervision

Aisen R. Prokopiev – methodology, validation, investigation, resources, funding acquisition, writing - original draft

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests

The authors declare no relevant conflict of interest

Поступила в редакцию / Submitted 10.02.25

Принята к публикации / Accepted 24.02.25