



Оригинальная статья

Обработка быстрым джоулевым нагревом 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

Практическое применение углеродных наноматериалов стимулирует искать новые методы эффективного синтеза. Одним из таких перспективных методов является способ получения графеноподобных материалов путем быстрого (флэш) джоулевого (или омического) нагрева углеродсодержащего прекурсора. В работе представлены результаты исследования воздействия флэш-джоулевого нагрева на аморфные углеродные пленки, сформированные осаждением в плазме метана на подложки Si/SiO₂. Нагрев образцов производился путем пропускания тока разряда конденсаторного блока емкостью 180 мФ, заряженных до напряжения от 100 до 300 В. При исследованиях были привлечены методы спектроскопии комбинационного рассеяния, сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии и вольт-амперных характеристик. Выявлено, что наиболее упорядоченной структурой является углеродная пленка после воздействия быстрого джоулевого нагрева при напряжении разряда 160 В. Также установлено, что флэш-нагрев приводит к значительному росту электропроводности и повышению гидрофобности материала. Наиболее высокие показатели наблюдались для углеродных пленок после разряда конденсаторного блока, заряженного до напряжения 160 В. Полученные результаты могут быть 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 более крупных конгломератов на поверхности пленки. Полученные результаты могут быть использованы для синтеза из аморфного углерода графеноподобных наноматериалов с высокой гидрофобностью и электропроводностью. Материалы с такими характеристиками представляют интерес, в частности, при разработке конструкций всепогодных беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: углеродные пленки, джоулев нагрев, кристаллизация, электропроводность, гидрофобность
Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта «Создание гидрофобных покрытий с применением плазменного осаждения углерода и последующей низкотемпературной кристаллизации» Российского научного фонда № 24-22-20087 (региональный проект).

Благодарности. Авторы благодарны сотрудникам молодежной лаборатории «Север» за помощь при проведении флэш-обработок материалов.

Для цитирования: Неустроев Е.П., Прокопьев А.Р. Обработка быстрым джоулевым нагревом углеродных пленок, сформированных осаждением в плазме метана. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):162–170. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-162-170>

Original article

Fast Joule heating of carbon films formed by methane plasma deposition

Efim P. Neustroev[✉], Aisen R. Prokopen

Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation
[✉]neustr@mail.ru

Abstract

The practical application of carbon nanomaterials drives the search for new methods of efficient synthesis. One promising approach is the production of graphene-like materials through fast (flash) Joule heating (or Ohmic heating) of a carbon-containing precursor. In this study, we investigated the effects of flash Joule heating on amorphous carbon

films formed by deposition in methane plasma on Si/SiO₂ substrates. Joule heating was conducted via electric discharge through samples from a capacitor block with a total capacitance of 180 mF, charged to voltages ranging from 100 to 300 V. We used various methods, including Raman spectroscopy, scanning electron microscopy, X-ray energy-dispersive spectroscopy, and current-voltage characteristics. The findings revealed that the most ordered structure is the carbon film subjected to fast Joule heating at a discharge voltage of 160 V. Furthermore, flash heating significantly enhances both the electrical conductivity and hydrophobicity of the material. The highest values were observed for carbon films after the discharge of a capacitor bank charged to 160 V. These results can be attributed to the transition of the initial amorphous carbon film to a crystalline structure characterized by a predominance of sp²-hybridized bonds, which exhibit low electrical resistance. The emergence of water-repellent properties can be explained by the “lotus effect, the formation of spherical particles up to 1 μm in size and their larger conglomerates on the film surface. These findings can be used to synthesize graphene-like nanomaterials with high hydrophobicity and electrical conductivity from amorphous carbon. Such materials are particularly relevant for the development of designs for all-weather unmanned aerial vehicles.

Keywords: carbon films, Joule heating, crystallization, electrical conductivity, hydrophobicity

Funding. This study was conducted within the project “Creation of hydrophobic coatings using plasma deposition of carbon and subsequent low-temperature crystallization” of the Russian Science Foundation under Grant No. 24-22-20087 (regional project).

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the staff of the laboratory “Sever” for their assistance in conducting the flash processing of materials.

For citation: Neustroev E.P., Prokojev A.R. Fast Joule heating of carbon films formed by methane plasma deposition. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):162–170. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-162-170>

Введение

Арктическая зона в отличие от более умеренных широт выделяется значительными сезонными (от –60 до +40 °C) и суточными (до +20 °C) перепадами температуры. При суточных перепадах температуры или в условиях высокой влажности и сильных ветров материалы могут подвергаться неоднократным обледенениям. Кроме этого, к материалам предъявляются высокие требования к способности выдерживать высокие механические нагрузки. Этим требованиям во многом отвечают материалы на основе углерода, и поэтому они находят все более широкое применение при освоении территорий Арктики и Субарктики [1]. Углеродные материалы, в том числе композитные, во многом заменили металлические конструкции в беспилотных летательных аппаратах, ветряных электростанциях, в наземных и водных транспортных средствах благодаря своей легкости, прочности и технологичности [2–6].

Класс углеродных материалов очень широк, они различаются как по структуре, так и по методам формирования [7–9]. Углеродные фазы в таких материалах могут находиться в состояниях различной степени spⁿ-гибридизации, где n = 1, 2, 3 [7, 10], определяющих физические и химические свойства [7–10]. Отдельный интерес вызывает фаза с sp²-гибридизацией, формирующая плоские шестиугольные ячейки из атомов

углерода. Такой структурой обладают графит и графен. Уникальные свойства графена и графеноподобных материалов описаны во многих работах, например, [11–14]. Практическое применение таких материалов стимулирует исследователей постоянно искать новые методы эффективного синтеза. Одним из таких перспективных методов является получение графеноподобных материалов путем быстрого (меньше 1 с) флэш-джоулевого нагрева углеродсодержащего прекурсора [15–17]. Синтезированный таким способом материал может содержать упорядоченные агрегированные чешуйки sp²-доменов, атомы углерода в состоянии sp³-гибридизации и аморфного углерода (a:C), а также турбостратного графена (тГф) [15–17]. В турбостратной структуре графеновые чешуйки повернуты относительно друга, что приводит к увеличению межслойного расстояния и ослаблению ван-дер-ваальсовых взаимодействий между слоями [15, 18, 19]. При флэш-обработке такая неупорядоченная укладка возникает из-за кинетической фиксации графеновых слоев вследствие быстрого нагрева и охлаждения. Увеличенное межслоевое расстояние приводит к тому, что свойства тГф, несмотря на большое количество слоев, близки к свойствам однослойного графена [15–19]. Это сходство отражается в спектрах комбинационного рассеяния турбостратного графена и однослойного графена [15–19].

Исследования воздействия быстрого омического нагрева проведены преимущественно для полимерных отходов и природных материалов [15–26], которые имеют в составе различные примеси и включения. В то же время, методика крайне чувствительна к неоднородностям структуры. Это обусловлено влиянием таких включений на электропроводность материалов. В результате могут существенно измениться основные параметры процесса, такие как ток разряда, температура нагрева и длительность процесса. Для устранения влияния различных примесей и дефектов на условия обработки следует использовать однородные структуры. Аморфные углеродные пленки, осажденные в плазме метана, относятся к таким материалам. Кристаллы кремния с покрытием из диоксида кремния, обладающего диэлектрическими свойствами, имеют высокую термоустойчивость. Технологии получения высокочистых и структурно совершенных кристаллов кремния и диоксида кремния как основных материалов современной электроники являются наиболее отработанными. Поэтому представляет интерес использование материалов с известными и предсказуемыми свойствами для изучения воздействия быстрого омического нагрева на свойства углеродной пленки.

Известно, что аморфные углеродные пленки успешно кристаллизуют методами термического отжига, микроволнового излучения и др. Однако данные методы характеризуются длительностью проведения процесса, использованием катализаторов, дорогостоящего оборудования. Метод джоулевого нагрева, представленный в работе, заметно отличается от вышеперечисленных технологий графитизации аморфных структур коротким временем проведения процесса (за доли секунды).

Таким образом, целью данной работы стало исследование воздействия быстрого джоулевого нагрева на свойства углеродной аморфной пленки, осажденной в плазме метана на подложку SiO_2/Si .

Материалы и методы

В качестве исходного материала была использована углеродная пленка, полученная осаждением на поверхность подложки SiO_2/Si в плазме метана. Толщины SiO_2 и Si составляли 300 нм и 400 мкм соответственно. Процесс проводился в камере, предварительно откачанной до давления, не превышающего 0,005 мбар. Затем в камеру напускался поток метана со скоростью

60 $\text{см}^3/\text{мин}$, и давление возрастало до 0,08 мбар. Осаждение углерода проводилось в индуктивно связанной плазме мощностью 200 Вт в течение 6 минут. Температура образца в процессе обработки не превышала 50 °С. В результате осаждения формировались пленки аморфного углерода толщиной 70–80 нм, определенные с помощью рефлектометра Thetrametrisis SA FR-pOrtable (Греция). Для проведения процессов флэш-обработки углеродных пленок была использована установка быстрого джоулевого нагрева, схема которой приведена в работе [27]. В установке были заменены конденсаторы (Jianghai CD135, Китай) на более емкие в целях увеличения мощности разряда; таким образом, конденсаторный блок имел суммарную емкость 180 мФ и в данной работе заряжался от 100 до 300 В. Образец помещался в вакуумную камеру и обхватывался прижимными контактами. В связи с тем, что исходная углеродная пленка являлась изолятором, для инициализации разряда использовалась алюминиевая фольга, которая плавится при достижении температур выше 660 °С [28]. При таких температурах начинаются процессы графитизации и ток идет через углеродную пленку. При разряде длительностью меньше 100 мс конденсаторного блока через образец достигались температуры от 1800 до ~3000 °С в зависимости от напряжения разряда конденсаторного блока. Расчеты длительности и температуры процесса проводились в соответствии с формулой, приведенной в работе [17], и по закону Джоуля–Ленца при первом приближении. Быстрый джоулев нагрев проводился в атмосфере азота при давлении ~0,3 бар.

Для исследований спектров комбинационного рассеяния света (КРС) использовалась установка NTegra Spectra (Зеленоград, Россия) с длиной волны лазера 532 нм (2,32 эВ) и диаметром светового потока около 1 мкм. Мощность лазера устанавливалась не более 1 мВт для устранения перегрева исследуемых образцов. Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) JEOL 7800F с приставкой рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии (РЭДС) использованы для изучения морфологии поверхности и проведения элементного анализа состава поверхности образцов. Измерения вольт-амперных характеристик полученных образцов были проведены двухзондовым методом при постоянном напряжении (ASEC-03, Зеленоград, Россия) и комнатной температуре.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены результаты исследований, проведенных с помощью NTeгра Spectra, до и после быстрой термической обработки образцов при различных напряжениях на образцах (100, 160 и 300 В). Исходная углеродная пленка (a:C) имеет широкую полосу фотолюминесценции, свойственную полимерному аморфному углероду [29, 30], которая полностью затмевает спектр КРС. Термическая флэш-обработка приводит к кристаллизации исходной аморфной пленки с формированием графитовой структуры. Это следует как из подавления интенсивной полосы фотолюминесценции, так и из появления характерных для кристаллической графитовой структуры пиков в спектрах КРС. Такими пиками являются G- (1580 см^{-1}) и D-пики (1350 см^{-1}), связанные с движением растяжения связей sp^2 -пары атомов С и «дыхательными» колебаниями шестиугольных ароматических колец атомов углерода соответственно [31, 32]. 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) [32]. Кроме того, в спектрах КРС имеются полосы в окрестностях длин волн 2700 (2D-пик) и 2930 см^{-1} (D+G-пик) [32–34]. 2D-пик является обертоном D-пика, но для его наблюдения в спектрах КРС не требуется наличие нарушений структуры решетки [32, 33]. D+G-полоса является комбинацией D- и G-пиков и также активируется в спектрах КРС при наличии дефектов. Пики TS_1 (1886 см^{-1}) и TS_2 (2031 см^{-1}), соответствующие турбостратному графену [17, 25, 26], в спектрах КРС не обнаружены. Отношение интенсивностей пиков D и G (I_D/I_G) используется для оценки степени дефектности кристаллической структуры графита, и чем больше это отношение, тем выше разупорядоченность решетки [32].

Наименьшее значение I_D/I_G достигается при напряжении 160 В и составляет $\sim 0,8$, что свидетельствует о значительной степени упорядоченности сформированной структуры. При уменьшении и увеличении напряжения разряда отношения I_D/I_G пиков возрастают (~ 2 при 100 В и $\sim 1,1$ при 300 В). В первом случае это может быть вызвано недостаточной степенью кристаллизации, связанной с малой тепловой мощностью, выделяемой джоулевым нагревом. В то же время,

происходят перестройки в структуре, приводящие к формированию sp^2 -гибридизированных связей и подавляющие люминесценцию аморфного углерода. При большем напряжении (300 В) избыточная тепловая мощность может приводить к росту степени дефектообразования формируемых графитовых структур, на что указывает увеличение интенсивности D-пика. Отношение интенсивностей пиков 2D и G (I_{2D}/I_G) в спектрах КРС используется для определения количества слоев графена [26,27,32], где $I_{2D}/I_G < 1$ обозначает наличие многослойного мультиграфена, а $I_{2D}/I_G > 1$ означает присутствие однослойного графена [34]. Отношения интенсивностей этих пиков составили $\sim 1,2$ при 160 В и $\sim 0,5$ при 300 В. Как следует из полученных данных, при использовании напряжения 300 В преимущественно формируются многослойные графеновые чешуйки.

Изображения исходной поверхности аморфной пленки углерода после флэш-обработок при напряжениях батареи 160 В и 300 В, полученные методом СЭМ, приведены на рис. 2. Поверхность аморфного углерода, сформированная осаждением в плазме метана, имеет ровную и однородную структуру (см. рис. 2, а). Флэш-обработка при разряде батареи напряжением 160 В приводит к изменению морфологии поверхности (см. рис. 2, б, в). На поверхности можно выделить частицы округлой формы размерами до 1 мкм и их скопления более крупных размеров (см. рис. 2, в). Местами эти объекты слипаются между собой, образуя вытянутые структуры. Также

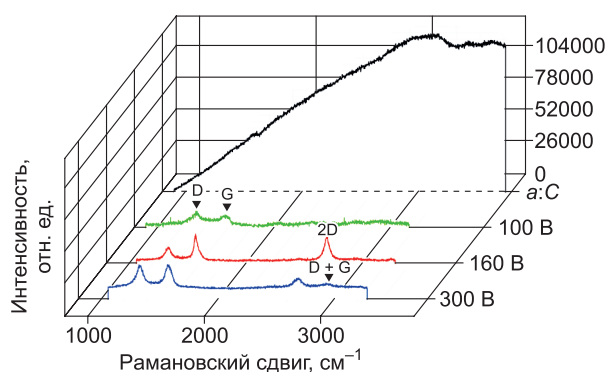


Рис. 1. Спектры КРС углеродной пленки после плазменного осаждения в метане (a:C) и флэш-обработки при напряжениях 100, 160 и 300 В

Fig. 1. Raman spectra of the initial (a:C film) and the carbon film after fast Joule heating at various voltages (100 V, 160 V, 300 V).

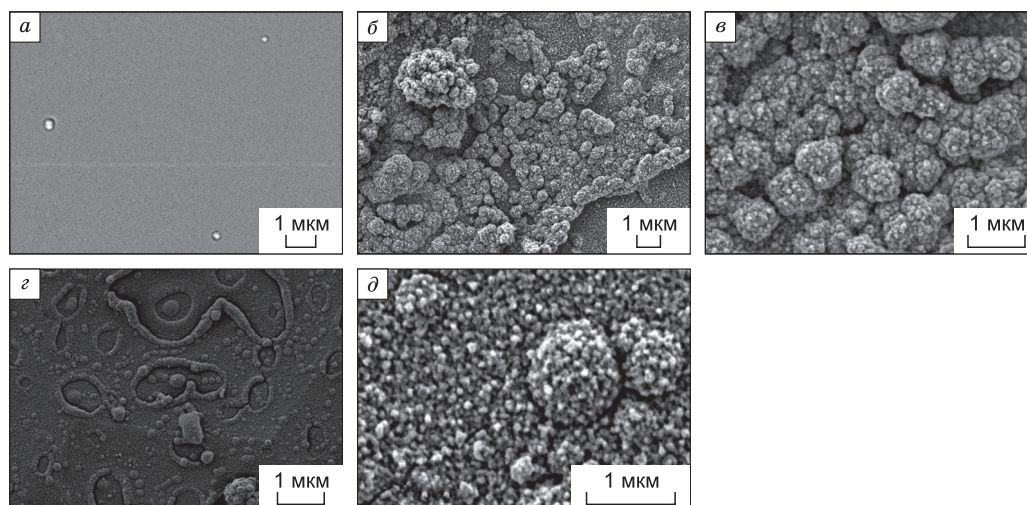


Рис. 2. Изображения, полученные методом СЭМ: *а* – исходной поверхности аморфной пленки углерода; *б* и *в* – после флэш-обработки при разрядке батареи напряжением 160 В при различных увеличениях; *г* и *д* – после флэш-обработки при разрядке батареи напряжением 300 В при различных увеличениях

Fig. 2. SEM images: *a*) Initial surface of the a:C-film; *б*, *в*) Subsequent fast Joule heating (160 V) at various magnifications; *г*, *д*) Subsequent fast Joule heating (300 V) at various magnifications

видно, что структура этих образований имеет зернистую структуру с диаметром зерен около 100 нм (см. рис. 2, *в*). При разряде батареи, заряженной до напряжения 300 В, на поверхности появляются крупные «кратеры» размерами от нескольких единиц до десятков микрометров (см. рис. 2, *г*). Количество шарообразных частиц становится заметно меньше, вместе с этим увеличивается концентрация мелких зерен размерами ~100 нм, которые покрывают всю поверхность (см. рис. 2, *д*). Увеличение числа таких зерен могло быть вызвано распадом крупных шарообразных частиц при увеличении напряжения воздействия, сопровождаемом ростом тока разряда и выделяемого количества теплоты.

Элементный анализ, проведенный методом РЭДС, показал высокое содержание кислорода в полученных пленках. Отношение процентного 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. При джоулевом нагреве наиболее высокие температуры в пленках будут в каналах протекания электрического тока пробоя и спадать при удалении от этих областей. Разброс значений О/С можно объяснить неравномерным разогревом образца, приводящим к разным скоростям реакций, идущих с участием кислорода.

Для исследования гидрофильных свойств наносилась капля дистиллированной воды на поверхность образца. Измерения краевого угла смачивания поверхности пленки были проведены до (рис. 3, *а*) и после (рис. 3, *б*) флэш-обработки при напряжении 160 В. Как видно из рисунка, краевой угол смачивания ~70°, соответствующий аморфному углероду, возрастает до ~105° после обработки. Такой переход из гидрофильного состояния в гидрофобное можно объяснить «эффектом лотоса» [35], связанным с наличием большого числа сферических частиц 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), до значений ~1,5 кОм/квадрат после флэш-обработки ($U = 160$ В). Наиболее вероятной причиной повышения электропроводности при тепловой обработке является трансформация углерода из аморфного состояния в графитизированную структуру, содержащую sp^2 -домены. Это предположение следует из данных спектроскопии комбинационного рассеяния, рассмотренных выше.

Как было показано в работе Стэнфорда и др. [25], при быстром джоулевом нагреве углеродных прекурсоров преимущественно формируются две углеродные структуры – это турбостратный флэш-графен и слои сморщенного

графена. Проведенное Стэнфордом и соавторами атомистическое моделирование показало, что при термическом отжиге преимущественно формируется сморщенный графен, в отличие от тГф, формируемого при прямом воздействии тока, проходящего через материал. Источником кристаллической структуры в обоих случаях служит подвижный углерод из аморфного слоя. В соответствии с этим механизмом на начальных этапах нагрева аморфный углерод, не имеющий жесткой структуры, подвергается быстрой кристаллизации, сопровождаемой дегазацией неуглеродных материалов, 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 (см. рис.1).

Наблюдаемые в СЭМ шарообразные формирования подобны сферическим частицам, формируемым в углеродных материалах, после флэш-обработки являющихся зародышами тГф [25]. Отсутствие пиков TS_1 и TS_2 , связанных с присутствием тГф, в спектрах КРС может быть вызвано недостаточной тепловой мощностью, выделяемой при джоулевым нагреве, которая не приводит к образованию 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) [36]. Увеличение содержания кислорода в образцах может происходить во время или после флэш-обработки за счет реакций окисления. Кроме того, при термообработках активно выделяется водород, содержащийся в исходной аморфной пленке углерода [37], который замещается атомами кислорода.

Заключение

В работе проведено исследование воздействия быстрой джоулевой (омической) обработки на свойства аморфных углеродных пленок, сформированных осаждением в плазме метана. Для джоулевого нагрева исследуемых образцов использована конденсаторная батарея емкостью 180 мФ. Ток разряда конденсаторов, заряженных до напряжения в пределах от 100 до 300 В, вызывает

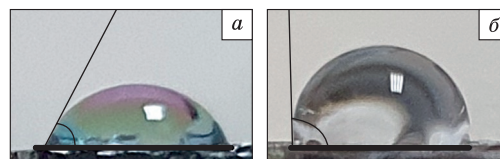


Рис. 3. Изменение гидрофильных свойств поверхности пленки до (а) и после (б) флэш обработки после разрядки конденсатора, заряженного до $U = 160$ В

Fig. 3. Changes in the hydrophilic properties of the film surface before (a) and after (b) fast Joule heating following the discharge a capacitor bank at $U = 160$ V

выделение значительного количества тепла и нагрев образца до ~ 3000 °С за короткий промежуток времени. В результате флэш-обработки происходят кардинальные изменения состояния поверхности и электропроводности, переход из гидрофильного состояния исходного аморфного материала в гидрофобное. Наиболее вероятной причиной повышения электропроводности (от состояния изолятора до 1,5 кОм/квадрат) является переход из аморфного состояния в графеноподобную кристаллическую структуру с преобладанием sp^2 -гибридизированных связей. Природа гидрофобных свойств объяснена «эффектом лотоса», вызванным формированием сферических частиц на поверхности пленок при флэш-обработке. Полученные результаты могут быть использованы для синтеза из аморфного углерода графеноподобных наноматериалов с высокой гидрофобностью и электропроводностью. В дальнейшем планируется развитие методики джоулевой флэш-обработки в сторону применения композитных углеродных материалов для достижения требуемых значений механических параметров и электропроводности. Такие материалы представляют интерес, в частности, при разработке конструкций всепогодных беспилотных летательных аппаратов.

Список литературы / References

1. Путилина П.М., Куцевич К.Е., Исаев А.Ю. Полимерные композиционные материалы на основе углеродных и стеклянных волокон для изготовления деталей беспилотных летательных аппаратов и перспективы их развития. *Труды ВИАМ*. 2023; 126(8):85–99. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2023-0-8-85-99>
- Putilina P.M., Kutsevich K.E., Isaev A.Yu. Carbon fiber-reinforced and glass fiber-reinforced polymer composites for the manufacture of components for unmanned aerial vehicles and their developing prospects. *Trudy VIAM*. 2023;126(8):85–99. (In Russ.)

2. Elfaham M.M., Mostafa A.M., Nasr G.M. Unmanned aerial vehicle (UAV) manufacturing materials: Synthesis, spectroscopic characterization and dynamic mechanical analysis (DMA). *Journal of Molecular Structure*. 2020;1201:127211. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.127211>
3. Lyu M.Y., Choi T.G. Research trends in polymer materials for use in lightweight vehicles. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2015; 16:213–220. <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0029-x>
4. Zhang J., Lin G., Vaidya U., Wang H. Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications *Composites Part B: Engineering*. 2023;250:110463. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110463>
5. Agarwal N., Rangamani A., Bhavsar K., et al. An overview of carbon-carbon composite materials and their applications. *Frontiers in Materials*. 2024;11: 1374034. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1374034>
6. Mishnaevsky Jr.L., Branner K., Petersen H.N., et al. Materials for wind turbine blades: An overview. *Materials*. 2017;10(11):1285. <https://doi.org/10.3390/ma10111285>
7. Li J., Yin D., Qin Y. Carbon materials: structures, properties, synthesis and applications. *Manufacturing Review*. 2023;10:13. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2023011>
8. Meunier V., Souza Filho A.G., Barros E.B., Dresselhaus M.S. Physical properties of low-dimensional sp²-based carbon nanostructures *Reviews of Modern Physics*. 2016;88(2):025005. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.88.025005>
9. Titirici M.M., White R.J., Brun N., et al. Sustainable carbon materials. *Chemical Society Reviews*. 2015;44(1): 250–290. <https://doi.org/10.1039/C4CS00232F>
10. Дроздов М.Н., Дроздов Ю.Н., Охалкин А.И. и др. Анализ углеродсодержащих материалов методом вторично-ионной масс-спектрометрии: содержание атомов углерода в sp²- и sp³-гибридных состояниях. *Письма в Журнал технической физики*. 2020;46(6):38–42. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.06.49164.18151>
11. Drozdov M.N., Drozdov Y.N., Okhapkin A.I., et al. Sims analysis of carbon-containing materials: content of carbon atoms in sp² and sp³ hybridization states. *Technical Physics Letters*. 2020;46(3):290–294. <https://doi.org/10.1134/S1063785020030190>
12. Papageorgiou D.G., Kinloch I.A., Young R.J. Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites. *Progress in Materials Science*. 2017;90: 75–127. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.07.004>
13. Hina M., Kamran K., Bashir S., et al. Extra ordinary properties of graphene. In: Subramaniam R.T., Kasi R., Bashir S., Kumar S.S.A. (eds) *Graphene. Engineering Materials*. Singapore; Springer; 2023, pp. 21–52. <https://doi.org/10.1007/978-981-99-1206-3>
14. Kumar A., Sharma K., Dixit A.R. A review of the mechanical and thermal properties of graphene and its hybrid polymer nanocomposites for structural applications. *Journal of Materials Science*. 2019;54(8):5992–6026. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-03244-3>
15. Ji X., Xu Y., Zhang W., et al. Review of functionalization, structure and properties of graphene/polymer composite fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2016;87:29–45. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.04.011>
16. Luong D.X., Bets K.V., Algozeeb W.A., et al. Gram-scale bottom-up flash graphene synthesis. *Nature*. 2020;577(7792):647–651. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-1938-0>
17. Sun Z., Hu Y.H. Ultrafast, low-cost, and mass production of high-quality graphene. *Angewandte Chemie International Edition*. 2020;59(24):9232–9234. <https://doi.org/10.1002/anie.202002256>
18. Algozeeb W.A., Savas P.E., Luong D.X., et al. Flash graphene from plastic waste. *ACS nano*. 2020;14(11): 15595–15604. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsnano.0c06328>
19. Deng B., Eddy L., Wyss K.M., et al. Flash Joule heating for synthesis, upcycling and remediation. *Nature Reviews Clean Technology*. 2025;1:32–54. <https://doi.org/10.1038/s44359-024-00002-4>
20. Kokmat P., Surinlert P., Ruammitree A. Growth of high-purity and high-quality turbostratic graphene with different interlayer spacings. *ACS Omega*. 2023(8):4010–4018. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06834>
21. Wyss K.M., Luong D.X., Tour J.M. Large-scale syntheses of 2D materials: flash joule heating and other methods. *Advanced Materials*. 2022;34(8):2106970. <https://doi.org/10.1002/adma.202106970>
22. Wyss K.M., De Kleine R.D., Couvreur R.L., et al. Upcycling end-of-life vehicle waste plastic into flash graphene. *Communications Engineering*. 2022;1(1):3. <https://doi.org/10.1038/s44172-022-00006-7>
23. Wyss K.M., Li J.T., Advincula P.A., et al. Upcycling of waste plastic into hybrid carbon nanomaterials. *Advanced Materials*. 2023;35(16):2209621. <https://doi.org/10.1002/adma.202209621>
24. Eddy L., Luong D.X., Beckham J.L., et al. Automated laboratory kilogram-scale graphene production from coal. *Small Methods*. 2024;8(3):2301144. <https://doi.org/10.1002/smt.202301144>
25. Huang P., Zhu R., Zhang X., Zhang W. Effect of free radicals and electric field on preparation of coal pitch-derived graphene using flash Joule heating. *Chemical Engineering Journal*. 2022;450:137999. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137999>
26. Stanford M.G., Bets K.V., Luong D.X., et al. Flash graphene morphologies. *ACS Nano*. 2020;14(10):13691–13699. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c05900>
27. Advincula P.A., Luong D.X., Chen W., et al. Flash graphene from rubber waste. *Carbon*. 2021;178:649–656. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.03.020>
28. 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. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-651-660>

Prokopyev A.R., Vasilieva E.D., Loskin N.N., Popov D.N. Production of graphene-containing carbon powders via fast Joule heating for fiberglass modification. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(4):651–660. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-651-660>

28. Kanel G.I., Razorenov S.V., Baumung K., et al. Dynamic yield and tensile strength of aluminum single crystals at temperatures up to the melting point. *Journal of Applied Physics*. 2001;90(1):136–143. <https://doi.org/10.1063/1.1374478>

29. Ferrari A.C., Robertson J. Resonant Raman spectroscopy of disordered, amorphous, and diamondlike carbon. *Physical Review B*. 2001;64(7):075414. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.64.075414>

30. Casiraghi C., Ferrari A.C., Robertson J. Raman spectroscopy of hydrogenated amorphous carbons. *Physical Review B*. 2005;72(8):085401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.085401>

31. Ferrari A.C., Robertson J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon *Physical Review B*. 2000;61(20):14095. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.14095>

32. Ferrari A.C., Basko D.M. Raman spectroscopy as a versatile tool for studying the properties of graphene.

Nature Nanotechnology. 2013;8(4):235–246. <https://doi.org/10.1038/nnano.2013.46>

33. Тимофеева Т.Е., Неустроев Е.П., Попов В.И. и др. Применение вейвлет-преобразований к анализу компонентов 2D-пика рамановского спектра трех- и четырехслойного графена. *Оптика и спектроскопия*. 2018;125(5):588–594. <https://doi.org/10.21883/OS.2018.11.46815.153-18>

Timofeeva T.E., Neustroev E.P., Popov V.I., et al. Application of wavelet transforms to the analysis of components of the 2D peak of the Raman spectrum of three- and four-layer graphene. *Optics and spectroscopy*. 2018;125(5):588–594. (In Russ.)

34. Liu X., Luo H. Preparation of coal-based graphene by flash joule heating. *ACS Omega*. 2024;9(2):2657–2663. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07438>

35. Patankar N.A. Mimicking the lotus effect: influence of double roughness structures and slender pillars. *Langmuir*. 2004;20(19):8209–8213. <https://doi.org/10.1021/la048629t>

36. Randviir E.P., Brownson D.A., Gómez-Mingot M., et al. Electrochemistry of Q-graphene. *Nanoscale*. 2012;4(20):6470–6480. <https://doi.org/10.1039/C2NR31823G>

37. Neustroev E.P., Prokopyev A.R., Popov V.I., et al. Optical properties of thin films formed by carbon deposition in methane plasma and subsequent annealing *AIP Conference Proceedings*. 2021;2328(1):050017. <https://doi.org/10.1063/5.0042175>

Об авторах

НЕУСТРОЕВ Ефим Петрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Радиофизика и электронные системы» Физико-технического института, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-8163-2012>, ResearcherID: A-3860-2014, Scopus Author ID: 6603429455, SPIN: 8488-1115, e-mail: neustr@mail.ru

ПРОКОПЬЕВ Айсен Русланович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Лаборатория «Дизайн-центр электроники «Север», Физико-технический институт, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-2212-2485>, ResearcherID: AFG-0633-2022, Scopus Author ID: 57200722270, SPIN: 7047-8695, e-mail: aisenprokopyev@mail.ru

Вклад авторов

Неустроев Е.П. – разработка концепции, верификация данных, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, получение финансирования; **Прокопьев А.Р.** – проведение исследований, ресурсное обеспечение исследования

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

NEUSTROEV, Efim Petrovich, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Institute of Physics and Technologies, Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8163-2012>, ResearcherID: A-3860-2014, Scopus Author ID: 6603429455, SPIN: 8488-1115, e-mail: neustr@mail.ru

PROKOPIEV, Aisen Ruslanovich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory “Design Center of Electronics “Sever”, Institute of Physics and Technologies, Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Fed-

Е. П. Неустроев, А. Р. Прокопьев • Обработка быстрым джоулевым нагревом углеродных пленок...

eration, <https://orcid.org/0000-0002-2212-2485>, ResearcherID: AFG-0633-2022, Scopus Author ID: 57200722270, SPIN: 7047-8695, e-mail: aisenprokopiev@mail.ru

Authors' contribution

Neustroev E.P. – conceptualisation, validation, writing – original draft, writing – review & editing, funding acquisition; **Prokopiev A.R.** – investigation, resources

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 17.09.2024

Поступила после рецензирования / Revised 27.02.2025

Принята к публикации / Accepted 03.03.2025

Редактор *О.В. Уарова*
Корректурa *З.А. Корнилова*
Компьютерная верстка *И.В. Мелехов*
Обложка *Б.В. Яковлев*

Дата выхода в свет 31.03.2025. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая
Усл. п.л. 19,75. Тираж 100 экз. Заказ № 935. Цена свободная.

Адрес редакции:

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, тел. 8(4112) 33-57-11, <https://resar.elpub.ru>

Адрес издателя:

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, ГБУ «Академия наук Республики Саха (Якутия)»,
тел. 8(4112) 33-57-11, e-mail: anrsya@mail.ru

Адрес типографии:

ООО «Компания «Дани-Алмас»
677008, г. Якутск, ул. Билибина, д. 10А
тел. 8(4112) 36-93-38, e-mail: ardah@inbox