

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 538.911

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-487-494>

Оригинальная статья

Наноструктурированные углеродные пленки, полученные методом осаждения в плазме CH_4 с последующей термообработкой: структурные особенности, их влияние на электрические и оптоэлектронные свойства

А. Р. Прокопьев[✉], Е. П. Неустроев

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
г. Якутск, Российская Федерация
[✉]aisenprokopiev@mail.ru

Аннотация

В работе представлены результаты исследования структуры, электрических и оптоэлектронных свойств наноструктурированных углеродных пленок, полученных методом осаждения в плазме метана с последующей термообработкой. Показано, что условия получения пленок влияют на конечные физико-химические параметры. Изучение морфологии пленок проведено методами атомно-силовой микроскопии, сканирующей электронной микроскопии, рамановской и рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии, анализа вольт-амперных характеристик (ВАХ). Толщины пленок составляют от 20 до 150 нм с отношением содержания атомов углерода к атомам кислорода (C/O) 4:1. Исследования структуры показали, что полученные пленки состоят из нанографитовых чешуек, латеральные размеры которых лежат в диапазоне от 5 до 12 нм с различным соотношением sp^3/sp^2 кристаллических фаз углерода. Установлено, что с увеличением температуры постплазменной термообработки от 650 до 800 °C повышается дефектность структуры углеродных пленок. В то же время растет степень графитизации, на что указывают данные рамановской спектроскопии и значения слоевых сопротивлений, определенные из ВАХ. Из температурных зависимостей ВАХ были вычислены значения фототоков, показавшие, что образцы проявляют фоточувствительность в диапазоне температур от комнатной температуры до –173 °C. Данные результаты могут быть полезны при создании сенсоров дневного и ночного освещения, а также датчиков температуры, пригодных для использования в широком интервале температур.

Ключевые слова: наноструктурированная углеродная пленка, осаждение углерода в плазме, термообработка, sp^2 -нанокристаллиты графита, температурная зависимость ВАХ, фототок, низкие температуры

Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ FSRG-2022-0011) и гранта Главы РС(Я) для молодых ученых, специалистов и студентов «Получение углеродсодержащих пленочных покрытий, осажденных на различные поверхности в плазме метана».

Для цитирования: Прокопьев А.Р., Неустроев Е.П. Наноструктурированные углеродные пленки, полученные методом осаждения в плазме CH_4 с последующей термообработкой: структурные особенности, их влияние на электрические и оптоэлектронные свойства. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(3):487–494. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-487-494>

Nanostructured carbon films obtained by CH₄ plasma deposition and annealing at high temperature: structural features and their effects on electrical and optoelectronic properties

A. R. Prokopenv✉, E. P. Neustroev

Amnosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

✉aisenprokopenv@mail.ru

Abstract

This article is dedicated to the study of the structural, electrical, and optoelectronic properties of nanostructured carbon films obtained by methane plasma deposition, followed by annealing at high temperatures (650–800 °C). The conditions for obtaining the films affected the final physicochemical parameters. We studied the film morphology using atomic force microscopy, scanning electron microscopy, Raman spectroscopy, X-ray energy-dispersive analysis, and analysis of the current voltage (C-V) characteristics. The film thickness ranged from 20 to 150 nm, with a C/O ratio of 4:1. Structural studies have shown that the resulting nanostructured carbon films consist mainly of nanographite flakes, the lateral dimensions of which lie in the lateral size (La) range of 5 to 12 nm, and contain different fractional concentrations of sp³/sp² crystalline phases of carbon. We have established that with an increase in the annealing temperature, the defectiveness of the carbon film structure increases; however, at the same time, the degree of graphitization increases, as indicated by the Raman spectroscopy data and the calculated values of layer resistances from the C-V characteristics. The values of photocurrents were calculated, from which it was found that the samples exhibited photosensitivity in the temperature range of room temperature to –173 °C, based on the temperature dependences of the C-V. The obtained results can be useful in creating day and night light sensors as well as temperature sensors suitable for use at low temperatures.

Keywords: nanostructured carbon films, carbon deposition in plasma, annealing, sp²-nanocrystalline graphite, temperature dependencies of C-V, photocurrent, low temperatures

Funding. This study was funded by the Ministry of Science and Higher Education (number FSRG-2022-001) and a grant from the Head of the Republic of Sakha (Yakutia) for young scientists, specialists and students “Production of carbon-containing film coatings deposited on various surfaces in methane plasma”.

For citation: Prokopenv A.R., Neustroev E.P. Nanostructured carbon films obtained by CH₄ plasma deposition and annealing at high temperature: structural features and their effects on electrical and optoelectronic properties. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(3):487–494. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-487-494>

Введение

В связи с интенсивным промышленным и технологическим освоением территорий Крайнего Севера все острее ощущается потребность в пригодных для эксплуатации в условиях низких температур электронных сенсоров, в том числе датчиков освещения и температуры [1]. Основой для создания таких приборов могут быть различные конфигурации углерода, такие как графен, нанотрубки, аморфный углерод и др. К примеру, графен обладает уникальными оптическими характеристиками и имеет высокую подвижность носителей заряда [2]. Не решенные до настоящего времени технологические проблемы применения графена и углеродных нанотрубок (УНТ) в масштабируемом производстве электронных приборов ограничивают их использование [2, 3]. Успешную конкуренцию этим материалам при создании температурных и оптических

сенсоров могут составить наноструктурированные углеродные пленки (нсУП) с различным соотношением алмазных и графитовых (sp³/sp²) фаз углерода, благодаря технологичности производства [4–6]. Углеродные фазы, находящиеся в состоянии различной степени spⁿ-гибридизации, определяют конечные физические и химические свойства материала [7]. Так, например, графитоподобная (GLC) фаза отличается более упорядоченной структурой и высокими показателями электропроводности [8, 9]. Напротив, алмазоподобная (DLC) фаза характеризуется высокой оптической прозрачностью и устойчивостью к механическим воздействиям [10–12]. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили чувствительность к температуре наногуглеродных покрытий, полученных методом плазменного осаждения в паровой фазе (PECVD) на поверхности твердотельных подложек [13–18].

В работе [19] авторы исследовали углеродные пленки с содержанием нанографеновых чешуек, которые показали высокую чувствительность к фототоку на освещение (0,35 А/Вт).

В настоящей работе исследуются оптические и электрические свойства нанографитовых чешуек, полученных с применением стандартных технологических процессов, включающих плазменное осаждение и термообработку.

Экспериментальная часть

Наноструктурированные углеродные пленки были сформированы осаждением в плазме метана (CH_4) с последующей термообработкой, подробно описанной авторами в работе [20]: мощность высокочастотного (13,56 МГц) индуктивного источника плазмы (ЭТНА-100-ПТ, Зеленоград, Россия) – 200 Вт, время осаждения атомов углерода на поверхности подложек кремния – до 9 мин. Нагрев образцов внутри реакционной камеры не превышал 50 °С. Камера предварительно откачивается до давлений, близких к 10^{-4} мбар. Скорость потока CH_4 составляет 30 см³/мин. Рабочее давление в камере после запуска газа составляло около 0,0045 мбар. На втором этапе синтеза образцы были подвергнуты термообработке в атмосфере аргона (Ar) при следующих условиях: температура отжига ($T_{\text{отж}}$) – от 650 до 800 °С, длительность – от 15 до 45 мин.

Для исследования структуры полученных пленок были использованы методы атомно-силовой микроскопии (АСМ) (NTegra Spectra, Зеленоград, Россия) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, Oxford Instruments, Великобритания), спектроскопия комбинационного рас-

сеяния света (КРС) (Ntegra Spectra, Зеленоград, Россия). Для возбуждения спектров КРС использовалось лазерное излучение с диаметром пучка 1 мкм и длиной волны 532 нм. Для определения элементного состава использована рентгеновская энергодисперсионная спектроскопия (РЭДС) (JEOL-7800F, Япония). Измерения температурных зависимостей вольт-амперных характеристик (ВАХ) были проведены на установке ASEC-03 (Зеленоград, Россия). Для создания электрических контактов использовалась серебряная паста. Контакты были нанесены на поверхности сформированных пленок и высушены при температуре 120 °С в течение 20 мин. Для исследований фоточувствительности была использована галогеновая лампа мощностью 35 Вт с общим световым потоком 490 Лм.

Результаты

Для определения толщины синтезированных образцов были проделаны сколы шириной до нескольких десятков микрометров алмазным резцом, в результате с поверхности подложки были удалены полосы углеродной пленки. На границе между пленкой и подложкой методом АСМ были измерены высоты сформированных ступенек, соответствующие толщине сформированной углеродной пленки. Из полученных результатов следует, что пленки имеют толщину от 20 до 150 нм. Толщина пленок зависит как от условий плазменного осаждения (мощности плазмы и времени обработки), так и от параметров последующей термообработки (температуры и длительности). На рис. 1 приведено изображение 3D-профиля поверхности пленки ($P = 200$ Вт,

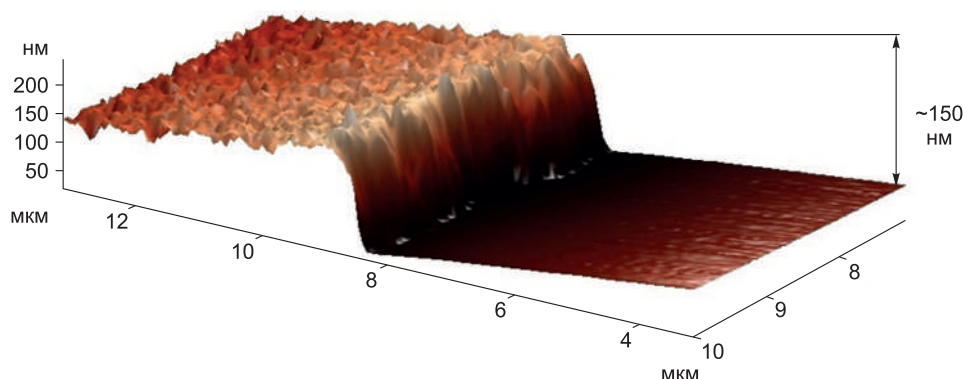


Рис. 1. АСМ-изображение границы раздела углеродная пленка/ SiO_2 -подложка, сформированной плазменным осаждением в метане и последующей термообработкой при $T = 650$ °С, длительность 15 мин.

Fig. 1. AFM image of the interface carbon film/ SiO_2 -substrate formed by plasma deposition in CH_4 and subsequent heat treatment at $T = 650$ °С for 15 min.

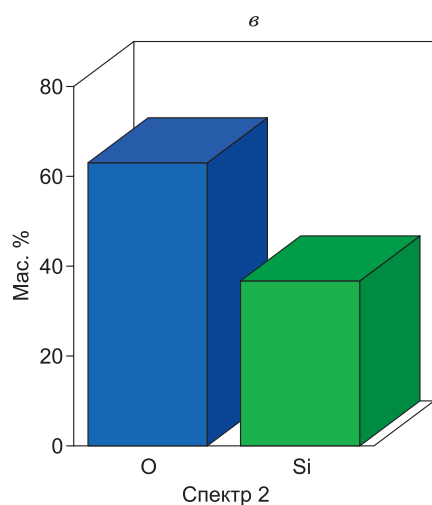
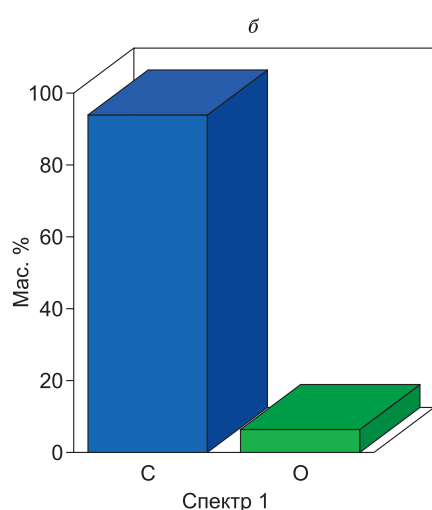
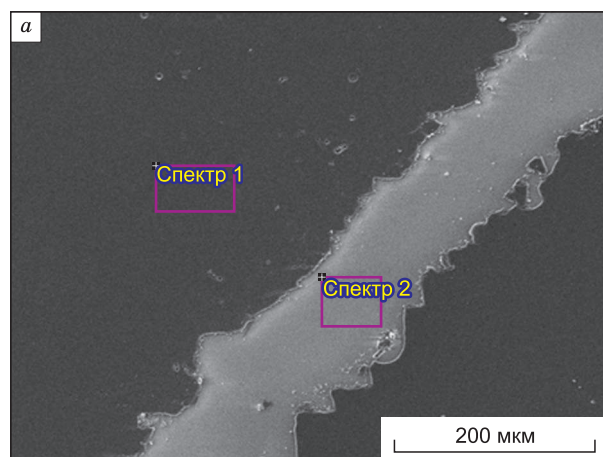


Рис. 2. СЭМ-изображение образца на SiO_2 -подложке, сформированного при $P=200$ Вт, 9 мин, 650°C , 30 мин. (а) и содержание химических элементов на пленке (б) и подложке (в), полученных методом РЭДС

Fig. 2. a) SEM image of a sample on a SiO_2 substrate formed at $P = 200$ W, 9 min, 650°C , 30 min. Content of chemical elements on: б) film; в) substrate obtained by the EDS method

9 мин), сформированной при отжиге 650°C , 15 мин. Увеличение температуры и времени термообработки приводит к уменьшению толщины пленки, вплоть до полного удаления.

На рис. 2, а приведено изображение царапины на поверхности углеродной пленки, полученное методом СЭМ. Область, обозначенная на рисунке как «Спектр 1», соответствует углеродной пленке, «Спектр 2» – подложке. С помощью установленного на СЭМ JEOL-7800F анализатора РЭДС было обнаружено, что пленки в основном содержат атомы углерода и незначительное количество кислорода (О) (рис. 2, б). На месте царапины, как и ожидалось, состав соответствует подложке SiO_2 .

В предыдущей нашей работе [21] было показано, что после проведения первого этапа синтеза (осаждения углерода в плазме метана) образуется пленка, соответствующая аморфной гидрогенизированной пленке углерода (a:C-H) с широкой полосой фотолуминесценции в диапазоне от 1000 см^{-1} до 3300 см^{-1} . После проведения второго этапа синтеза (термообработки) в спектрах КРС начинают отчетливо проявляться D- ($\sim 1355\text{ см}^{-1}$) и G- ($\sim 1590\text{ см}^{-1}$) пики, характерные для графит-содержащих структур [22–24]. Интенсивность D-пики зависит от дефектности структуры и интенсивности колебаний sp^3 -гибридизированного углерода, в то время как интенсивность G-пики связана с «дыхательными» колебаниями sp^2 -гибридизированного углерода в шестиугольных ячейках графена [22]. Следует отметить, что спектры КРС изменяются в зависимости от условий проведения термообработок. На рис. 3 представлены спектры КРС для образцов, термообработанных при температурах 700 , 750°C с одинаковой длительностью 30 мин и 800°C длительностью 15 мин. Обнаружено, что увеличение температуры обработки приводит к росту отношения интегральной интенсивности D-пики к G-пику (I_D/I_G) от 1,7 до 3,5 (см. таблицу). Природа данного эффекта может быть обусловлена ростом дефектности графеновых ячеек и/или изменением отношения sp^3/sp^2 кристаллических фаз углерода в структуре пленки [22, 25]. В пользу последнего говорит факт смещения максимума G-пики от 1590 до 1582 см^{-1} при увеличении температуры обработки, что связано с ростом доли sp^3 -фазы в углеродной пленке [22–24].

Из найденных отношений интегральных интенсивностей пиков D и G можно оценить лате-

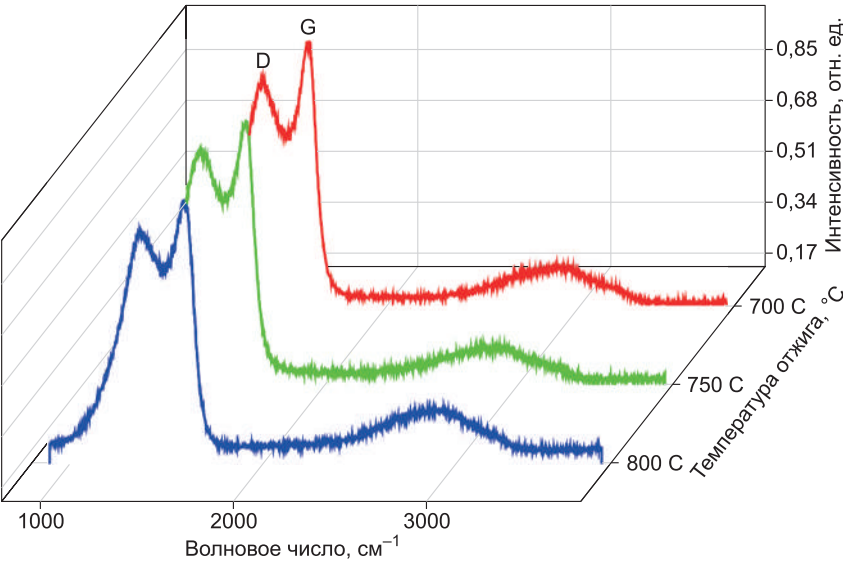


Рис. 3. КРС-спектры углеродных пленок, осажденных (P = 200 Вт, 6 мин) на SiO₂-подложки и термообработанных при 700, 750 °С длительностью 30 мин и 800 °С длительностью 15 мин.

Fig. 3. Raman spectra of carbon films deposited (P = 200 W, 6 min) on SiO₂ substrates and post-annealed at 700 °C, 750 °C for 30 min and 800 °C for 15 min.

ральные размеры sp²-нанокристаллитов графита [22–24] по формуле, предложенной в [24]:

$$L_a(\text{нм}) = (2,4 \cdot 10^{-10})\lambda^4 \left(\frac{I_D}{I_G} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где λ – длина волны лазерного излучения источника. Оценки показали, что латеральные размеры L_a нанографитовых доменов уменьшаются от 12 нм (T = 650 °C) до 5 нм (T = 800 °C) (см. таблицу). Такое уменьшение L_a также может быть причиной изменения соотношения кристаллических фаз в состояниях sp²- и sp³-гибридизаций в формируемых углеродных пленках [23, 24].

Из температурных зависимостей ВАХ, которые имели линейный вид (рис. 4, а), были опре-

делены значения слоевых сопротивлений углеродных пленок в диапазоне температур от 80 до 300 К. Как показано на рис. 4, б, увеличение температуры термообработки от 650 до 750 °C на втором этапе синтеза пленок приводит к уменьшению относительного сопротивления R_i/R₀, где R₀ – сопротивление пленки после термообработки при T = 650 °C, R_i – сопротивление после обработки при различных температурах. При использовании 800-градусной обработки наблюдается незначительный рост сопротивления.

Из полученных результатов следует, что повышение электропроводности (до T = 750 °C) сопровождается уменьшением размеров нанографитовых чешуек. Увеличение электропровод-

Значения I_D/I_G образцов и вычисленных размеров нанографитовых доменов L_a в зависимости от условий формирования углеродных пленок

Values of I_D/I_G of samples and calculated sizes nanographite domains (L_a) depending on the conditions of formation of carbon films

Мощность и длительность осаждения	Температура, время отжига	I _D /I _G	L _a
P = 200 Вт, t = 9 мин	650 °C, 30 мин	1,7	12 нм
P = 200 Вт, t = 9 мин	700 °C, 30 мин	2,2	8 нм
P = 200 Вт, t = 9 мин	750 °C, 30 мин	2,5	7 нм
P = 200 Вт, t = 9 мин	800 °C, 15 мин	3,5	5 нм

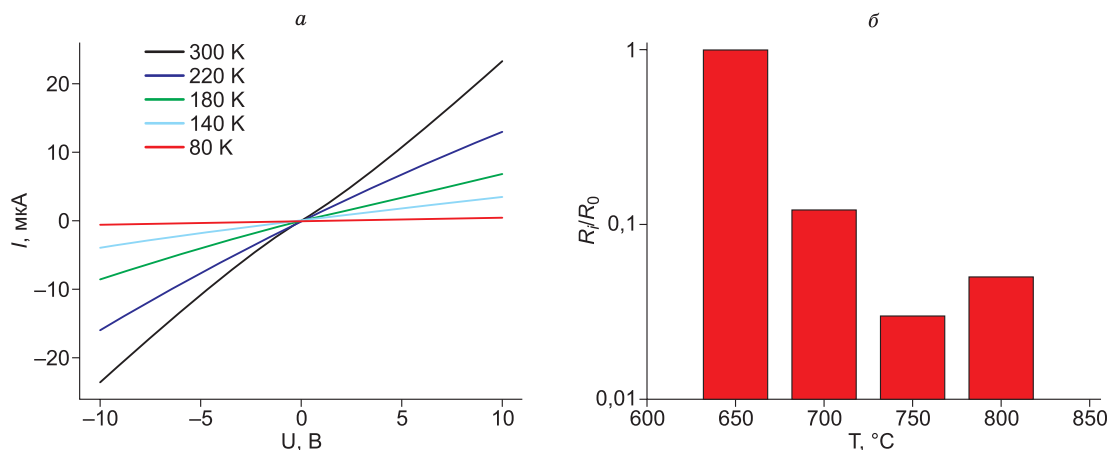


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики исследованной пленки, сформированной при $P = 200$ Вт, 6 мин, 700°C , 30 мин. (а), и график зависимости относительных сопротивлений углеродных пленок, сформированных при различных условиях отжига (б)

Fig. 4. a) C-V characteristics of the carbon films formed at $P = 200$ W, 6 min, 700°C , 30 min; б) plot of relative resistances of carbon films formed under different annealing conditions

ности в этом случае может быть вызвано более эффективным формированием нанокристаллического углерода, как указано в работе Феррари и др. [22]. Можно предположить, что сформированные таким образом пленки, состоящие преимущественно из нанографитовых и графеновых чешуек, будут иметь более однородную структуру с относительно высокой электропроводностью. В то же время, увеличение сопротивления при температуре 800°C может быть связано с уменьшением толщины формируемых пленок, сопровождаемым повышением дефектности. Следует отметить, что при увеличении времени обработки до 30 мин ($T = 800^\circ\text{C}$) исходные аморфные

углеродные пленки полностью удаляются с поверхности подложки.

Для исследования фоточувствительности исследуемых пленок на контакты измерительного зонда подавалось напряжение смещения 8 В. Путем включения и выключения источника света фиксировались изменения тока. Время реакции углеродной пленки на изменение освещения составляло $\sim 0,1$ с. Фототоки (I_ϕ) были вычислены в соответствии с формулой

$$I_\phi = I_C - I_T,$$

где I_C – сила тока при освещении, I_T – сила тока при отсутствии освещения. На рис. 5 показаны изменения I_ϕ при различных температурах. I_ϕ возрастает от ~ 80 мкА при температуре измерения 100 К до ~ 180 мкА при 250 К. Наибольшие фототоки наблюдались после обработки при 750°C на втором этапе синтеза.

Для оценки фоточувствительности и квантового выхода фотоэффекта был взят интегральный поток света (490 лм) галогеновой лампы с максимумом при ~ 550 нм. Расчеты в первом приближении дают величины для фоточувствительности $\sim 0,3$ мкА/Вт и квантового выхода $\sim 10^{-3}$. Наблюдаемую фоточувствительность сформированных углеродных пленок можно объяснить поглощением света в нанокристаллах графита и графена, формируемых в процессе термообработки.

Заключение

Были исследованы наноструктурированные углеродные пленки, полученные осаждением в

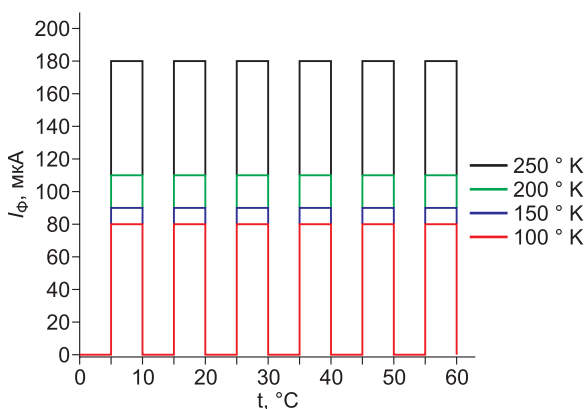


Рис. 5. Графики зависимостей I_ϕ углеродной пленки ($P = 200$ Вт, 6 мин, 750°C , 30 мин) от температуры

Fig. 5. Dependences of the I_ϕ of a carbon film ($P = 200$ W, 6 min, 750°C , 30 min) on measurement temperature

плазме метана и последующей термообработкой в диапазоне от 650 до 800 °С. Из результатов АСМ измерений было обнаружено, что толщина сформированных пленок составила от 20 до 150 нм. Из измерений спектров КРС установлено, что углеродные пленки имеют основные типовые пики, относящиеся к графитсодержащим структурам. Из положения, а также из интегральных интенсивностей основных пиков D и G были оценены латеральные размеры sp²-нанокристаллитов графита, которые составили, в зависимости от условий получения, от 5 до 12 нм. Кроме того, установлено, что с ростом температуры отжига исходных а:С-Н пленок возрастает доля sp³/sp²-гибридизованного углерода в получаемых структурах. Также исследованы температурные зависимости фототоков, из которых было обнаружено, что фотоотклик полученных углеродных пленок сохраняется в диапазоне от комнатной температуры до –173 °С. Таким образом, из полученных результатов исследования следует, что представленные в работе наноструктурированные углеродные пленки могут применяться в качестве сенсоров температуры, а также фотодатчиков дневного и ночного освещения в условиях Арктики и Крайнего Севера.

Список литературы / References

1. Zeng Y. et al. Thermally conductive reduced graphene oxide thin films for extreme temperature sensors. *Advanced Functional Materials*. 2019;29(27):1901388. <https://doi.org/10.1002/adfm.201901388>.
2. Neumaier D. et al. Integrating graphene into semiconductor fabrication lines. *Nature materials*. 2019;18(6):525–529. <https://doi.org/10.1038/s41563-019-0359-7>.
3. Wang Z. et al. Recent advances in 3D graphene architectures and their composites for energy storage applications. *Small*. 2019;15(3):1803858. <https://doi.org/10.1002/sml.201803858>.
4. Aslan N. Structural, photovoltaic and optoelectronic properties of graphene–amorphous carbon nanocomposite. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2021;32(12):16927–16936. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-06254-1>.
5. Yu D. et al. Scalable synthesis of hierarchically structured carbon nanotube–graphene fibers for capacitive energy storage. *Nature nanotechnology*. 2014;9(7):555–562. <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0718-1>.
6. Bezzon V.D.N. et al. Carbon nanostructure-based sensors: a brief review on recent advances. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019;2019:1–21. <https://doi.org/10.1155/2019/4293073>.
7. Дроздов М.Н. 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>.
8. Христолюбова В.И. Особенности экспериментальных исследований модификации материалов ВЧ-плазмой пониженного давления. *Вестник Казанского технологического университета*. 2015;18(12):114–117.
9. Hristolyubova V. I. Peculiarities of experimental studies of the modification of materials by low-pressure RF plasma. *Vestnik of Kazan Technology University*. 2015;18(12):114–117. (In Russ.)
10. Li X. et al. Suppressing corrosion of aluminum foils via highly conductive graphene-like carbon coating in high-performance lithium-based batteries. *ACS applied materials & interfaces*. 2019;11(36):32826–32832. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b06442>.
11. Saleem M. et al. Humidity sensing properties of CNT–OD–VETP nanocomposite films. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2010;43(1):28–32. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2010.06.011>.
12. Rajak D.K. et al. Diamond-like carbon (DLC) coatings: Classification, properties, and applications. *Applied Sciences*. 2021;11(10):4445. <https://doi.org/10.3390/app11104445>.
13. Kasirowski T. et al. Microstructural and tribological characterization of DLC coatings deposited by plasma enhanced techniques on steel substrates. *Surface and Coatings Technology*. 2020;389:125615. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125615>.
14. Kumar V. et al. Formation of carbon nanofilms on diamond for all-carbon based temperature and chemical sensor application. *Carbon*. 2011;49(4):1385–1394. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.12.004>.
15. Muthuraja A. et al. Experimental investigation on chromium-diamond like carbon (Cr-DLC) coating through plasma enhanced chemical vapour deposition (PECVD) on the nozzle needle surface. *Diamond and Related Materials*. 2019;100:107588. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.107588>.
16. Chunjaemsri T. et al. Influence of RF power and CH₄ flow rate on properties of diamond-like carbon films deposited by PECVD technique. *Radiation Physics and Chemistry*. 2020;176:109073. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109073>.
17. Huang B. et al. Effect of deposition temperature on the microstructure and tribological properties of Si-DLC coatings prepared by PECVD. *Diamond and Related Materials*. 2022;129:109345. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109345>.
18. Paramanik B., Das D. Synthesis of nanocrystalline diamond embedded diamond-like carbon films on

untreated glass substrates at low temperature using (C₂H₂+ H₂) gas composition in microwave plasma CVD. *Applied Surface Science*. 2022;579:152132. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.152132>.

18. Jatti V.S. et al. Particle Deposition of Diamond-Like-Carbon on Silicon Wafers using Inductively Coupled PECVD. *Int. J. Thin Film. Sci. Tec.* 2022;11(2):233–238. <https://doi.org/10.18576/ijtfst/110211>.

19. Zhang X. et al. Bias-modulated high photoelectric response of graphene-nanocrystallite embedded carbon film coated on n-silicon. *Nanomaterials*. 2019;9(3):327. <https://doi.org/10.3390/nano9030327>.

20. Neustroev E.P. et al. Research of Properties of a Carbon Film Formed in Methane Plasma and the Following Annealing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1079(4):042086. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/4/042086>.

21. Неустроев Е.П., Прокопьев А.Р. Свойства нанографита, образованного плазменным осаждением и последующей термообработкой. *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2019;11:629–635. <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2019.11.629>.

Neustroev E.P., Prokopen A.R. Properties of Nanographite Formed by Plasma Deposition and Subsequent Heat Treatment. *Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*. 2019;11:629-635. (In Russ.). <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2019.11.629>.

22. Ferrari A.C., Robertson J. Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2004;362(1824):2477–2512. <https://doi.org/10.1098/rsta.2004.1452>.

23. Sheka E.F., Golubev Y.A., Popova N.A. Graphene domain signature of Raman spectra of sp² amorphous carbons. *Nanomaterials*. 2020;10(10):2021. <https://doi.org/10.3390/nano10102021>.

24. Cançado L.G. et al. General equation for the determination of the crystallite size La of nanographite by Raman spectroscopy. *Applied physics letters*. 2006; 88(16). <https://doi.org/10.1063/1.2196057>.

25. Yang W.J. et al. Structural characteristics of diamond-like nanocomposite films grown by PECVD. *Materials Letters*. 2003;57(21):3305–3310. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00053-3](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00053-3).

Об авторах

ПРОКОПЬЕВ Айсен Русланович, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-2212-2485>, Scopus AuthorID: 1127739, ResearcherID: GPP-2928-2022, e-mail: aisenprokopiev@mail.ru

НЕУСТРОЕВ Ефим Петрович, кандидат физико-математических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-8163-2012>, Scopus AuthorID: 32482, ResearcherID: A-3860-2014, e-mail: neustr@mail.ru

About the authors

PROKOPEV, Aisen Ruslanovich, Researcher, Scopus AuthorID: 1127739, ResearcherID: GPP-2928-2022, <https://orcid.org/0000-0002-2212-2485>, e-mail: aisenprokopiev@mail.ru

NEUSTROEV, Efim Petrovich, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-8163-2012>, Scopus AuthorID: 32482, ResearcherID: A-3860-2014, e-mail: neustr@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 14.02.2023

Поступила после рецензирования / Revised 05.07.2023

Принята к публикации / Accepted 27.07.2023