УДК 533.924 *Оригинальная статья*

Фторирование пленок CVD-графена в индуктивно связанной плазме CF_4

Е.П. Неустроев, И.И. Куркина
ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»
677000, Россия, Якутск, ул. Белинского, 58
neustr@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.109

Аннотация: Синтез диэлектрических пленок нанометровых толщин представляет собой одну из ключевых задач в нано- и оптоэлектронике, что связано с растущими требованиями к миниатюризации и функциональности устройств. В данной работе представлены результаты исследования оптических и электрических свойств графена, фторированного индуктивно связанной плазмой CF_4. Фторирование производилось в плазме мощностью от 125 до 200 Вт длительностью до 1 мин. Использованы два способа расположения образцов в реакционной камере плазмы: 1) графеновой пленкой в сторону плазмы и 2) подложкой в сторону плазмы. Исследования проводились методами спектроскопии комбинационного рассеяния света, рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии и вольт-амперных характеристик. Показано, что в результате непосредственного плазменного воздействия на образцы в положении 1 происходит травление графена вплоть до полного удаления пленки. В положении 2 интенсивного травления при обработках длительностью до 1 мин не наблюдалось. В этом случае происходит фторирование графеновой пленки и отношение количества атомов фтора к углероду достигает значения ~0,2. В результате плазменной обработки происходит значительный рост сопротивления графена, которое составило от нескольких кОм/кв для исходного графена до сотен ГОм/кв и десятков МОм/кв для образцов, подвергнутых плазменному воздействию в положениях 1 и 2, соответственно. Увеличение сопротивления может инициироваться как введением дефектов при плазменной обработке, так и процессом фторирования, формирующего sp^3-гибридизованные C-F связи искажающих плоскую структуру графена. Повторные оценки сопротивлений, проведенные через три недели, показали уменьшение сопротивления на два порядка для образцов, обработанных в плазме в положении 2. Данное уменьшение может быть вызвано процессами дефторирования и восстановления плоской структуры графена.

Ключевые слова: графен, химическое осаждение из газовой фазы, фторирование, плазма, четырехфтористый углерод, оптические свойства, электрическое сопротивление.

Неустроев Ефим Петрович – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры радиофизики и электронных систем физико-технического института, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный Федеральный университет им. М.К. Аммосова»
Куркина Ирина Ивановна – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник физико-технического института, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный Федеральный университет им. М.К. Аммосова»

Original paper

Fluorination of CVD graphene films by inductively coupled plasma CF_4

E.P. Neustroev, I.I. Kurkina
North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.109

Abstract: Synthesis of nanometer-thick dielectric films is one of the key tasks in nano- and optoelectronics, which is associated with growing requirements for miniaturization and functionality of devices. This paper presents the results of a study of optical and electrical properties of graphene fluorinated by inductively coupled plasma CF_4. Fluorination was carried out in plasma with a power of 125 to 200 W for duration of up to 1 min. Two methods of arranging samples in the plasma chamber were used: 1) with a graphene film facing plasma and 2) with a substrate facing plasma. The methods of Raman spectroscopy, X-ray energy-dispersive spectroscopy, and current-voltage characteristics

were used in the study. It was shown that the direct plasma action on the samples in position 1 results in graphene etching until the film is completely removed. In position 2, no intensive etching is observed during treatments lasting up to 1 min. In this case, fluorination of the graphene film occurs. As a result, the ratio of the number of fluorine atoms to carbon reaches a value of ~0,2. As a result of plasma treatment, there is a significant increase in the electrical resistance of graphene. The increase in surface resistance was from several kΩ/sq for the initial graphene to hundreds of GΩ/sq and tens of MΩ/sq for the samples subjected to plasma action in positions 1 and 2, respectively. The increase in the electrical resistance may be due to both the appearance of defects during plasma treatment and the fluorination process, which forms sp^3-hybridized *C-F* bonds that distort the flat structure of graphene. Repeated conductivity assessments carried out after three weeks showed a decrease in resistance by two orders of magnitude for samples treated in plasma in position 2. This decrease may be due to the processes of defluorination and restoration of the flat structure of graphene.
Keywords: graphene, chemical vapor deposition, fluorination, plasma, carbon tetrafluoride, electrical resistance.

Efim P. Neustroev – Ph. D., Docent, Department of Radiophysics and Electronic Systems, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, ORCID: 0000-0002-8163-2012
Kurkina Irina Ivanovna – Ph. D., senior researcher, Institute of Physics and Technologies, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, ORCID: 0000-0002-1076-0631

Поступила в редакцию/received: 05.07.2025; после рецензирования/revised: 08.09.2025; принята/accepted: 11.09.2025.

1. Введение

Фторированный графен является одним из важных производных графена и обладает большим потенциалом для применения в нано- и оптоэлектронике [1, 2]. Уникальность свойств фторированного графена во многом связана с образованием различных видов $F-C$-связей от ионных до ковалентных [2]. Характер связи во многом зависит от уровня фторирования, переходящего от ионного (sp^2-конфигурация) к ковалентному (sp^3-конфигурация) с увеличением отношения атомов фтора к атомам углерода (F/C) [2, 3]. Формирование sp^3- гибридизированных связей, нарушает плоскую структуру sp^2-связей графена и сопровождается значительным снижением электропроводности [4, 5]. В настоящее время предлагаются различные методы фторирования графена, рассмотренные в обзорных работах [2, 6-8]. Среди этих методов плазменное фторирование выгодно отличается простотой, эффективностью и масштабируемостью процесса [9, 10]. Вместе с тем, воздействие плазмы приводит не только к функционализации графена, но и к увеличению физического беспорядка в решетке [11]. Структурные нарушения решетки приводят к изменению спектров комбинационного рассеяния (КР) света графена в виде возрастания интенсивности D-пика (I_D) относительно G-пика (I_G), который можно использовать как показатель уровня фторирования графена [12]. Интенсивность физического воздействия плазмы можно значительно уменьшить за счет снижения энергии бомбардирующих поверхность ионов. В этом отношении, использование индуктивно связанной плазмы (ИСП) является более предпочтительной в отличие от плазмы, генерированной емкостными источниками, обеспечивая высокую концентрацию заряженных частиц при низком давлении в отсутствии ускоряющего напряжения. Кроме того, используется расположение образцов в плазменной камере «лицевой» стороной в противоположную сторону от области возгорания плазмы, что уберегает прямую бомбардировку поверхности графена продуктами реакций в плазме [13].

Наиболее популярными прекурсорами для плазменного фторирования являются такие газы, как тетрафторид углерода (CF_4) [11,14-17] и гексафторид серы (SF_6) [17-20]. Применение CF_4 в качестве фторирующего агента позволяет проводить контролируемую настройку концентрации фтора в графене [14]. Именно это является одной из ключевых проблем функционализации графена, связанной с точностью контроля количества и типом функциональных групп, прикрепляемых к поверхности графена. В случае применения плазмы SF_6 содержание атомов фтора при начальных временах обработки увеличивается, а затем спадает [20]. Таким образом, наблюдается более сложная зависимость содержания фтора от времени обработки. Исходя из этого, для повышения точности контроля C/F целесообразной является использование CF_4-прекурсора.

В данной работе приведены результаты плазменного фторирования в CF_4 пленок малослойного графена. Методами структурного анализа и электрофизических измерений определено влияние плазменного фторирования на свойства графена при двух положениях образцов: 1) графеновой пленкой в сторону плазмы и 2) перевернутом (подложка повернута в сторону плазмы), в котором графен экранируется подложкой от непосредственного облучения продуктами реакций в плазме.

2. Материалы и методы

Графеновые пленки были синтезированы методом химического осаждения из газовой фазы (CVD). CVD-графен наносили на медные подложки, которые предварительно очищали потоком аргоно-водородной смеси. Процесс осаждения проводился в атмосфере аргона, водорода и метана в диапазоне температур 1040-1050°C в течение 10 мин. Расход составлял 5-10 см^3/мин для метана и 100 см^3/мин для аргоно-водородной смеси, соответственно. Затем образцам дали остыть естественным способом до комнатной температуры. Впоследствии, используя метод «мокрого» переноса [21], пленки графена были перенесены на подложки Si/SiO_2. Плазменная обработка проводилась на установке плазмохимического травления «Этна-100ПТ» (НТ МДТ), оснащенной радиочастотным (13,56 МГц) генератором ИСП. Часть образцов устанавливались так, чтобы подложка Si/SiO_2 экранировала непосредственную бомбардировку поверхности графена продуктами реакций в плазме (позиция 2). Перед плазменной обработкой реакционную камеру, содержащую образцы, откачивали форвакуумным и турбомолекулярными насосами до давления 4×10^{-3} мбар. После этого в камеру вводился газообразный CF_4 со скоростью потока 100 см^3/мин, в результате которого рабочее давление увеличивалось до 0,4 мбар. Длительность воздействия плазмы CF_4 мощностью от 125 Вт до 200 Вт составляла до 1 мин. Нагрев образцов на протяжении всего процесса не превышал 50°C. Оптические и электрические свойства, химический состав пленки исследовали методами рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии (РЭДС) («Inca Energy»), спектроскопии КР света («Ntegra Spectra») и вольт-амперных характеристик (ВАХ). Измерения методом КР выполнены при комнатной температуре с использованием возбуждающего излучения с длиной волны 532 нм (2,31 эВ). Для предотвращения нагрева образца мощность излучения лазера не превышала 1 мВт, размер диаметра пучка составлял 0,5 мкм. ВАХ измерялись двухзондовым методом при комнатной температуре. В качестве контактного материала была использована серебряная паста.

3. Результаты и обсуждение

Спектры КР света до (1) и после обработки в плазме CH_4 мощностью 125 Вт (2) при расположении образцов лицевой стороной вниз (позиция 2) показаны на рис. 1. Для исходной пленки при рамановском сдвиге ~1580 см$^{-1}$ наблюдается основная полоса КР первого порядка в графене (G-полоса). Самым интенсивным пиком в графене является полоса $2D$ при 2700 см$^{-1}$ ($2D$-пик), являющийся обертоном D-пика [22]. Форма и отношение интенсивностей $2D$ и G полос соответствует двухслойному графену [22]. После плазменной обработки G-пик смещается в длинноволновую область до ~1600 см$^{-1}$ и появляются пики, связанные с дефектами (D-пик) при ~1350 см$^{-1}$ и $D+G$ при ~2930 см$^{-1}$. Аналогичное смещение G-пика, но в меньшей степени наблюдалось и при расположении образцов в позиции 1. В качестве дефектов могут выступать любые нарушения решетки графена, в том числе связанные с наличием примесей. Отношение интегральных интенсивностей D и G пиков (A_D/A_G) используется для оценки количества дефектности структуры графена при их высокой концентрации и размерах кристаллитов меньше 2 нм [23]. После плазменной обработки плотность дефектов высока и поэтому было использовано отношение A_D/A_G, которое достигало 1,9 и 1,4 при положении образцов 1 и 2 соответственно. Увеличение интенсивности

D-пика может быть вызвано не только ростом дефектности решетки при воздействии плазмы, но также функционализацией фтором графена, сопровождаемое формированием sp^3-связей, искажающих планарную структуру графена. Измерение методом РЭДС показывает содержание фтора от 0,5 ат.% до 2 ат.%. Спектр РЭДС в одной из точек измерения показан на рис. 3. Кроме фтора содержатся углерод (~9,5 ат.%), кислород (63,2 ат.%) и кремний (25,2 ат.%). Наличие кремния и кислорода обусловлено влиянием подложки SiO_2 на спектры РЭДС, а также адсорбированных атомов кислорода на поверхности графена и подложки [14]. Если исключить влияние подложки SiO_2, то отношение атомов F/C в графене будет составлять ~0,2. Измерения методом РЭДС для графена, обработанного в позиции 1, не позволили выявить наличие фтора. Можно предположить, что количество фтора лежало ниже порога чувствительности установки.

Наиболее значительное возрастание сопротивления графеновых пленок после воздействия плазмы CF_4 наблюдалось при расположении образцов в позиции 1. Сопротивления образцов были определены из ВАХ. На рис. 3 а представлены ВАХ исходного малослойного графена CVD и на рис. 3 б и 3 в обработанных в плазме CF_4 в течение 1 минуты мощностью 125 Вт и 150 Вт, соответственно. ВАХ демонстрировали близкое к линейному поведение, небольшой изгиб для графена, обработанного плазмой мощностью 150 Вт (см. рис. 4 в), связан с выпрямляющим эффектом контакта графен-металл [24]. Как следует из рис. 3 поверхностное сопротивление графена возрастет от 5,6 кОм/кв до десятков ТОм/кв после плазменной обработки мощностью 150 Вт в течение 1 мин. После воздействия плазмой мощностью 125 Вт сопротивление увеличивается до единиц ТОм/кв. При расположении образцов в позиции 2 сопротивление увеличение сопротивление не столь значительно и достигает десятков МОм/кв. Меньшие значения сопротивления при расположении пленки графена лицевой стороной вниз объясняются менее значительными нарушениями кристаллической решетки графена. В данном случае увеличение сопротивления происходит в основном за счет химической функционализации графена фтором.

Следует отметить, что повторные измерения ВАХ, проведенные через 3 недели, показали уменьшение сопротивления графена на 2 порядка. Аналогичное уменьшение сопротивления графена, фторированного газообразным XeF_2, наблюдалось в работе Стайна и др. [25]. В этой работе уменьшение сопротивления наблюдалось в слабофторированном графене (< 10-20 ат.% F) и сопровождалось дефторированием и восстановлением углерода в sp^2-состояниях. При расположении образцов в положении 1 уменьшения сопротивления не происходило. Наиболее вероятно, что это связано с большим количеством структурных дефектов решетки, вводимых при такой обработке.

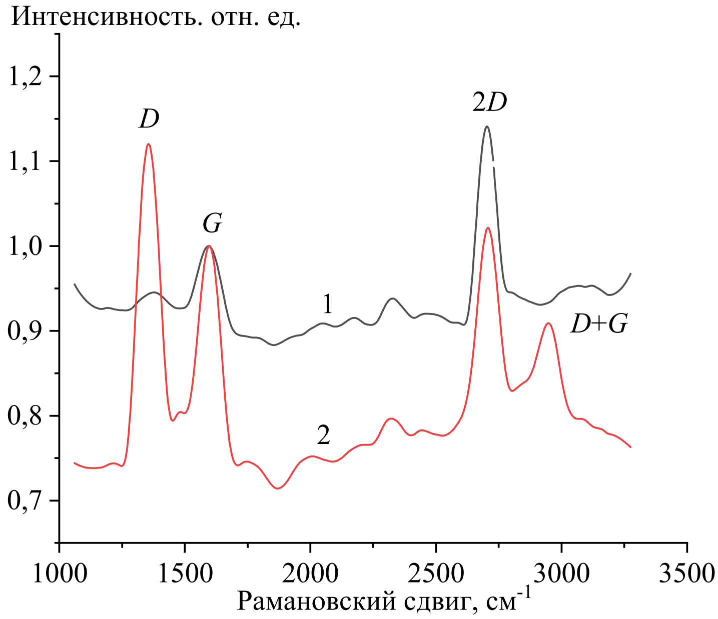

Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния света исходной пленки графена (1) и после обработки в плазме CF_4 мощностью 125 Вт в течение 0,5 мин при расположении графеновой пленки в позиции 2 (2).

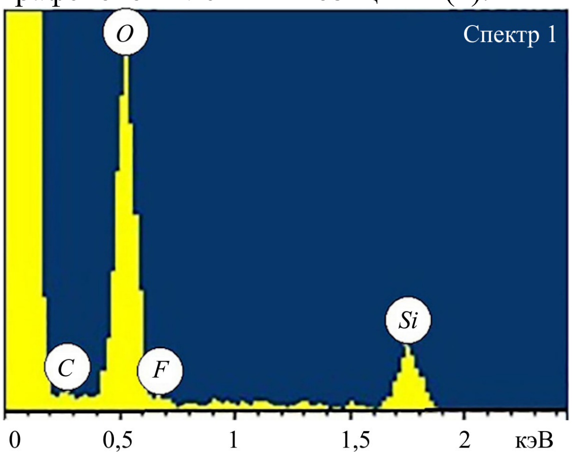

Рис. 2. Спектр РЭДС графена в позиции 2, обработанного в плазме CF_4 мощностью 125 Вт в течение 30 с.

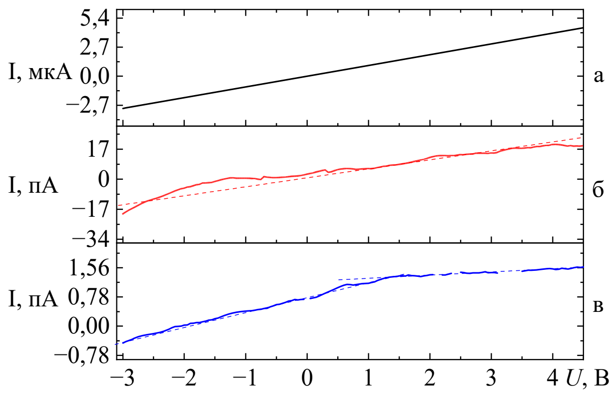

Рис. 3. Вольт-амперные характеристики исходного CVD-графена (а) и после обработок в плазме CF_4 мощностью 125 Вт (б) и 150 Вт (в) в течение 1 мин в положении 1.

4. Заключение

В статье представлено исследование графеновой пленки CVD фторированной плазмой CF_4. Установлено, что увеличение времени воздействия плазмы ($P = 150$ Вт) более чем на 1 минуту или увеличение мощности плазмы до 200 Вт полностью удаляет однослойные или двухслойные графеновые пленки с поверхности подложки Si/SiO_2. При расположении образцов лицевой стороной вниз такого активного травления не наблюдалось. В то же время, отношение атомов F/C в пленке графена может достигать ~20%. Анализ изменения сопротивлений образцов после воздействия плазмы показывает значительное возрастание до значений близких для диэлектрика. Наибольшее увеличение до десятков ТОм/кв наблюдалось для графена, обработанного в плазме в положении 1. При перевернутом расположении образцов поверхностное сопротивление возрастало до десятков МОм/кв. Кроме того, в этом случае с течением времени (3 недели) сопротивление уменьшается на два порядка значений, измеренных сразу после плазменной обработки. Наиболее вероятно, что более значительное возрастание сопротивления в первом случае обусловлено бóльшим вкладом дефектов, так как в данном случае воздействие плазмы приводит к интенсивному травлению пленки графена вплоть до ее полного удавления. Во втором случае преобладают процессы химического фторирования с меньшим физическим воздействием на решетку. В то же время такой процесс фторирования является неустойчивым и с течением времени приводит к уменьшению сопротивления. Данный процесс может быть связан с процессами дефторирования, сопровождаемых восстановлением плоской структуры графена.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-79-00065, https://rscf.ru/en/project/23-79-00065/).

Библиографический список:

1. **Ao, Z.** Enhancement of the stability of fluorine atoms on defective graphene and at graphene/fluorographene interface / Z. Ao, Q. Jiang, S. Li et al. // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2015. – V. 7. – I. 35. – P. 19659-19665. DOI: 10.1021/acsami.5b04319.
2. **Feng, W.** Two-dimensional fluorinated graphene: synthesis, structures, properties and applications / W. Feng, P. Long, Y. Feng, Y. Li // Advanced Science. – 2016. – V. 3. – I. 7. – Art. № 1500413. – 22 p. DOI: 10.1002/advs.201500413.
3. **Zhou, S.** Chemical bonding of partially fluorinated graphene / S. Zhou, S.D. Sherpa, D.W. Hess, A. Bongiorno // The Journal of Physical Chemistry C. – 2014 – V. 118. – I. 45. – P. 26402-26408. DOI: 10.1021/jp508965q.
4. **Nair, R.R.** Fluorographene: a two-dimensional counterpart of Teflon / R.R. Nair, W. Ren, R. Jalil et al. // Small. – 2010. – V. 6. – I. 24. – P. 2877-2884. DOI: 10.1002/smll.201001555.
5. **Withers, F.** Tuning the electronic transport properties of graphene through functionalisation with fluorine / F. Withers, S. Russo, M. Dubois, M.F. Craciun // Nanoscale Research Letters. – 2011. – V. 6. – I. 1. – Art. № 526. – 11 p. DOI: 10.1186/1556-276X-6-526.
6. **Ahmad, Y.** Preparation and applications of fluorinated graphenes / Y. Ahmad, N. Batisse, X. Chen, M. Dubois // Journal of Fluorine Chemistry. – 2021. – V. 7. – I. 1. – Art. № 20. – 23 p. DOI: 10.3390/c7010020.
7. **Padamata, S.K.** Fluorination of two-dimensional graphene: A review // S.K. Padamata, A. Yasinskiy, S. Stopic, B. Friedrich // Journal of Fluorine Chemistry. – 2022. – V. 255-256. – Art. № 109964. – 14 p. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2022.109964.
8. **Chen, X.** Recent advances in fluorinated graphene from synthesis to applications: critical review on functional chemistry and structure engineering / X. Chen, K. Fan, Y. Liu et al. // Advanced Materials. – 2022. – V. 34. – I. 1. – Art. № 2101665. – 44 p. DOI: 10.1002/adma.202101665.
9. **Felten, A.** Controlled modification of mono-and bilayer graphene in O_2, H_2 and CF_4 plasmas / A. Felten,

A. Eckmann, J.J. Pireaux et al. // Nanotechnology. – 2013. – V. 24. – № 35. – Art. № 355705. – 8 p. DOI: 10.1088/0957-4484/24/35/355705.

10. **Неустроев, Е.П.** Модификация термовостановленного оксида графена под действием плазмы SF_6/Ar / Е.П. Неустроев, М.В. Ноговицына, В.И. Попов, В.Б. Тимофеев // Перспективные материалы. – 2017. – Вып. 1. – С. 61-68. DOI: 10.1134/S2075113317050215.

11. **Shen, C.** Thinning and functionalization of few-layer graphene sheets by CF_4 plasma treatment / C. Shen, G. Huang, Y. Cheng // Nanoscale Research Letters. – 2012. – V. 7. – I. 1. – Art. № 268. – 8 p. DOI: 10.1186/1556-276X-7-268.

12. **Baraket, M.** The functionalization of graphene using electron-beam generated plasmas / M. Baraket, S.G. Walton, E.H. Lock et al. // Applied Physics Letters. – 2010. – V. 96. – I. 23. – P. 231501-1-231501-3. DOI: 10.1063/1.3436556.

13. **Tahara, K.** Effect of radical fluorination on mono-and bi-layer graphene in Ar/F_2 plasma / K. Tahara, T. Iwasaki, A. Matsutani, M. Hatano, // Applied Physics Letters. – 2012. – V. 101. – I. 16. – P. 163105-1-163105-4. DOI: 10.1063/1.4760268.

14. **Cheng, L.** Partially fluorinated graphene: structural and electrical characterization / L. Cheng, S. Jandhyala, G. Mordi et al. // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2016. – V.8. – I. 7. – P. 5002-5008. DOI: 10.1021/acsami.5b11701.

15. **Wang, B.** Fluorination of gGraphene: a spectroscopic and microscopic study / B. Wang, J. Wang, J. Zhu // ACS Nano. – 2014. – V. – 8. – I. 2. – P.1862-1870. DOI: 10.1021/nn406333f.

16. **Chen, M.** Layer-dependent fluorination and doping of graphene via plasma treatment / M. Chen, H. Zhou, C. Qiu // Nanotechnology. – 2012. – V. 23. – I. 11. – Art. № 115706. – 6 p. DOI: 10.1088/0957-4484/23/11/115706.

17. **Struzzi, C.** Probing plasma fluorinated graphene via spectromicroscopy / C. Struzzi, M. Scardamaglia, N. Reckinger et al. // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2017. – V. 19. – I. 46. – P. 31418-31428. DOI: 10.1039/C7CP05305C.

18. **Chen, M.** Fluorination of edges and central areas of monolayer graphene by SF_6 and CHF_3 plasma treatments / M. Chen, C. Qiu, H. Zhou et al. // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. – 2013. – V. 13. – I. 2. – P. 1331-1334. DOI: 10.1166/jnn.2013.5996.

19. **Zhang, H.** Spectroscopic investigation of plasma-fluorinated monolayer Ggraphene and application for gas sensing / H. Zhang, L. Fan, H. Dong et al. // ACS applied materials & interfaces. – 2016. – V. 8. – I. 13. – P. 8652-8661. DOI: 10.1021/acsami.5b11872.

20. **Sherpa, S.D.** Photoelectron spectroscopy studies of plasma-fluorinated epitaxial graphene / S.D. Sherpa, S.A. Paniagua, G. Levitin // Journal of Vacuum Science & Technology B. – 2012. – V. 30. – I. 3. – P. 03D102-1-03D102-7. DOI: 10.1116/1.3688760.

21. **Yoon, M.A.** Surface properties of CVD-grown graphene transferred by wet and dry transfer processes / M.A. Yoon, C. Kim, J.H. Kim // Sensors. – 2022. – V. 22. – I. 10. – Art. № 3944. – 11 p. DOI: 10.3390/s22103944.

22. **Ferrari, A.C.** Raman spectrum of graphene and graphene layers / A.C. Ferrari, J.C. Meyer, V. Scardaci et al. // Physical review letters. – 2006. – V. 97. – I. 18. – P. 187401-1-187401-4. DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.187401.

23. **Anusuya, T.** Deconvolution and quantification of defect types from the first order Raman spectra of graphene oxide derivatives / T. Anusuya, D.K. Pathak, R. Kumar, V. Kumar // FlatChem. – 2022. – V. 35. – Art. № 100422. – 9 p. DOI: 10.1016/j.flatc.2022.100422.

24. **Liu, W.** A study on graphene–metal contact / W. Liu, J. Wei, X. Sun, H. Yu // Crystals. – 2013. – V. 3. – I. 1. – P. 257-274. DOI: 10.3390/cryst3010257.

25. **Stine, R.** Chemical stability of graphene fluoride produced by exposure to XeF_2 / R. Stine, W.K. Lee, K.E. Whitener Jr et al. // Nano Letters. – 2013. – V. 13. – I. 9. – P. 4311-4316. DOI: 10.1021/nl4021039.

References:

1. Ao Z., Jiang Q., Li S. et al. Enhancement of the stability of fluorine atoms on defective graphene and at graphene/fluorographene Interface, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, vol. 7, issue 35, pp. 19659-19665. DOI: 10.1021/acsami.5b04319.

2. Feng W., Long P., Feng Y., Li Y. Two-dimensional fluorinated graphene: synthesis, structures, properties and applications, *Advanced Science,* 2016, vol. 3, issue 7, art. no. 1500413, 22 p. DOI: 10.1002/advs.201500413.

3. Zhou S., Sherpa S. D., Hess D. W., Bongiorno A. Chemical bonding of partially fluorinated graphene, *The Journal of Physical Chemistry C,* 2014, vol. 118, issue 45, pp. 26402-26408. DOI: 10.1021/jp508965q.

4. Nair R.R., Ren W., Jalil R. et al. Fluorographene: a two-dimensional counterpart of Teflon, *Small*, 2010,

vol. 6, issue 24, pp. 2877-2884. DOI: 10.1002/smll.201001555.
5. Withers F., Russo S., Dubois M., Craciun M. F. Tuning the electronic transport properties of graphene through functionalisation with fluorine, *Nanoscale Research Letters*, 2011, vol. 6, art. no. 526, issue 1, 11 p. DOI: 10.1186/1556-276X-6-526.
6. Ahmad Y., Batisse N., Chen X., Dubois M. Preparation and applications of fluorinated graphenes, *Journal of Fluorine Chemistry*, 2021, vol. 7, issue 1, art. no. 20, 23 p. DOI: 10.3390/c7010020.
7. Padamata S. K., Yasinskiy A., Stopic S., Friedrich B. Fluorination of two-dimensional graphene: a review, *Journal of Fluorine Chemistry*, 2022, vol. 255-256, art. no.109964, 14 p. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2022.109964.
8. Chen X., Fan K., Liu Y. et al. Recent advances in fluorinated graphene from synthesis to applications: critical review on functional chemistry and structure engineering, *Advanced Materials*, 2022, vol. 34, issue 1, art.no. 2101665, 44 p. DOI: 10.1002/adma.202101665.
9. Felten A., Eckmann A., Pireaux J.J. et al. Controlled modification of mono-and bilayer graphene in O_2, H_2 and CF_4 plasmas, *Nanotechnology*, 2013, vol. 24, issue 35, art. no. 355705, 8 p. DOI: 10.1088/0957-4484/24/35/355705.
10. Neustroev E.P., Nogovitcyna M.V., Popov V.I., Timofeev V.B. Modification of thermally reduced graphene oxide by the SF_6/Ar plasma treatment, *Inorganic Materials: Applied Research*, 2017, vol. 8, issue 5, pp. 763-768. DOI: 10.1134/S2075113317050215.
11. Shen C., Huang G., Cheng Y. et al. Thinning and functionalization of few-layer graphene sheets by CF_4 plasma treatment, *Nanoscale Research Letters*, 2012, vol. 7, issue 1, art. no. 268, 8 p. DOI: 10.1186/1556-276X-7-268.
12. Baraket M., Walton S.G., Lock E.H. et al. The functionalization of graphene using electron-beam generated plasmas, *Applied Physics Letters*, 2010, vol. 96, issue 23, pp. 231501-1-231501-3. DOI: 10.1063/1.3436556.
13. Tahara K., Iwasaki T., Matsutani A., Hatano M. Effect of radical fluorination on mono-and bi-layer graphene in Ar/F_2 plasma, *Applied Physics Letters*, 2012, vol. 101, issue 16, pp. 163105-1-163105-4. DOI: 10.1063/1.4760268.
14. Cheng L., Jandhyala S., Mordi G. et al. Partially fluorinated graphene: structural and electrical characterization, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, vol. 8, issue 7, pp. 5002-5008. DOI: 10.1021/acsami.5b11701.
15. Wang B., Wang J., Zhu J. Fluorination of graphene: a spectroscopic and microscopic study, *ACS Nano*, 2014, vol. 8, issue 2, pp. 1862-1870. DOI: 10.1021/nn406333f.
16. Chen M., Zhou H., Qiu C. et al. Layer-dependent fluorination and doping of graphene via plasma treatment, *Nanotechnology*, 2012, vol. 23, issue 11, art. no. 115706, 6 p. DOI: 10.1088/0957-4484/23/11/115706.
17. Struzzi C., Scardamaglia M., Reckinger N. et al. Probing plasma fluorinated graphene via spectromicroscopy, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2017, vol. 19, issue 46, pp. 31418-31428. DOI:10.1039/C7CP05305C.
18. Chen M., Qiu C., Zhou H. et al. Fluorination of edges and central areas of monolayer graphene by SF_6 and CHF_3 plasma treatments, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2013, vol. 13, issue 2, pp. 1331-1334. DOI: 10.1166/jnn.2013.5996.
19. Zhang H., Fan L., Dong H. et al. Spectroscopic investigation of plasma-fluorinated monolayer Ggraphene and application for gas sensing, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, vol. 8, issue 13, pp. 8652-8661. DOI: 10.1021/acsami.5b11872.
20. Sherpa S.D., Paniagua S.A., Levitin G. Photoelectron spectroscopy studies of plasma-fluorinated epitaxial graphene, *Journal of Vacuum Science & Technology B,* 2012, vol. 30, issue 3, pp. 03D102-1-03D102-7. DOI:10.1116/1.3688760.
21. Yoon M.A., Kim C., Kim J.H. et al. Surface properties of CVD-grown graphene transferred by wet and dry transfer processes, *Sensors*, 2022, vol. 22, issue 10, art. no. 3944, 11 p. DOI: 10.3390/s22103944.
22. Ferrari A.C., Meyer, J.C., Scardaci V. Raman spectrum of graphene and graphene layers, *Physical Review Letters*, 2006, vol. 97, issue 18, pp. 187401-1-187401-4. DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.187401.
23. Anusuya T., Pathak D. K., Kumar R., Kumar V. Deconvolution and quantification of defect types from the first order Raman spectra of graphene oxide derivatives, *FlatChem*, 2022, vol. 35, art. no. 100422, 9 p. DOI: 10.1016/j.flatc.2022.100422.
24. Liu W., Wei J., Sun X., Yu H. A study on graphene–metal contact, *Crystals*, 2013, vol. 3, issue 1, pp. 257-274. DOI: 10.3390/cryst3010257.
25. Stine R., Lee W. K., Whitener Jr, K. E. et al. Chemical stability of graphene fluoride produced by exposure to XeF_2, *Nano Letters*, 2013, vol. 13, issue 9, pp. 4311-4316. DOI: 10.1021/nl4021039.