

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ, НАНОСИСТЕМ И НАНОМАТЕРИАЛОВ

УДК 538.911; 538.913

Оригинальная статья

Исследование электрофизических свойств чистого и интеркалированного высокоориентированного пиролитического графита

З.А. Ахматов^{1,2,3}, А.Х. Хоконов^{2,3,4}, И.Н. Сергеев²

¹ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»
360004, Россия, Нальчик, ул. Чернышевского, 173

²ФГБУН «Институт ядерных исследований РАН»
117312, Россия, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а

³ФГБНУ «Кабардино-Балкарский научный центр РАН»
360000, Россия, Нальчик, ул. И. Арманд, 37

⁴ФГБОУ ВО «Адыгейский государственный университет»
38500, Россия, Майкоп, ул. Первомайская, 208

ahmatov.z@bk.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.007

Аннотация: Интеркалированные соединения графита привлекли большое внимание исследователей благодаря своим уникальным физическим свойствам. Внедряемые в межплоскостные промежутки графита металлы и молекулы могут являться донорами или акцепторами электронов. Это означает, что интеркалирование различными химическими элементами может влиять на концентрацию свободных носителей в графите. Как следствие, интеркалированные соединения графита могут проявлять различные электронные, тепловые и магнитные свойства. В настоящей работе продемонстрирована возможность модификации электрофизических свойств высокоориентированного пиролитического графита посредством его интрекаляции атомами калия. Интеркаляция высокоориентированного пиролитического графита калием производилось с помощью двухзонного метода. Степень интеркаляции образца была определена по спектрам комбинационного рассеяния света. Измерения электрофизических величин чистого и интеркалированного графита проводились с использованием метода ван дер Пау (четырёхзондовый метод). Показано, что интеркалирование калием высокоориентированного пиролитического графита приводит к уменьшению его удельного сопротивления и постоянной Холла, тогда как для значений концентрации и подвижности носителей имеет место существенное увеличение. Принимая во внимание то, что изменение электрофизических свойств графита при его интеркаляции происходит без разрушения кристаллической структуры, приводящей к ухудшению физических характеристик, можно с уверенностью сказать, что данная методика является одной из перспективных для управления свойствами (электронными, поверхностными и др.) слоистых углеродных материалов.

Ключевые слова: *высокоориентированный пиролитический графит, электрофизические свойства, постоянная Холла, щелочные металлы, интеркаляция, двухзонный метод, спектроскопия комбинационного рассеяния.*

Ахматов Зейтун Ануарович – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник кафедры теоретической и экспериментальной физики ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»; старший научный сотрудник лаборатории «Астрофизика и физика космических лучей» ФГБУН «Институт ядерных исследований РАН»; старший научный сотрудник Института информатики и проблем регионального управления ФГБНУ «Кабардино-Балкарский научный центр РАН»

Хоконов Азамат Хазрет-Алиевич – ведущий научный сотрудник ФГБУН «Институт ядерных исследований РАН»; старший научный сотрудник Института информатики и проблем регионального

управления ФГБНУ «Кабардино-Балкарский научный центр РАН»; ведущий научный сотрудник ФГБОУ
ВО «Адыгейский государственный университет»

Сергеев Игорь Николаевич – старший научный сотрудник, лаборатория «Астрофизика и физика
космических лучей», ФГБНУ «Институт ядерных исследований РАН»

Original paper

Study of electrophysical properties of pure and intercalated highly oriented pyrolytic graphite

Z.A. Akhmatov^{1,2,3}, A.Kh. Khokonov^{2,3,4}, I.N. Sergeev²

¹*Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia*

²*Institute for Nuclear Research of the RAS, Moscow, Russia*

³*Kabardino-Balkar Scientific Center of the RAS, Nalchik, Russia*

⁴*Adyghe State University, Maykop, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.007

Abstract: Graphite intercalated compounds have attracted significant attention from researchers due to their unique physical properties. Metals and molecules introduced into the interplanar spacing of graphite can act as donors or acceptors of electrons. This means that intercalation with different chemical elements can influence the carrier concentration in graphite. As a result, graphite intercalated compounds can exhibit different electronic, thermal and magnetic properties. In this work, the possibility of modifying the electrophysical properties of highly oriented pyrolytic graphite by intercalating it with potassium atoms is demonstrated. Intercalation of highly oriented pyrolytic graphite by potassium was performed using a two-zone method. The intercalation stage of the sample was determined from Raman spectra data. Measurements of the electrophysical properties of pure and intercalated graphite were carried out using the van der Pauw method (four-probe method). It has been shown that intercalation of highly oriented pyrolytic graphite by potassium leads to a decrease in its specific resistance and Hall constant, while there is a significant increase in the concentration and mobility of charge carriers. Considering that the change in the electrophysical properties of graphite during its intercalation occurs without the destruction of the crystalline structure, which leads to a deterioration in the physical characteristics, it can be said with confidence that this method is one of the most promising in modifying electronic, surface, and other properties of layered carbon materials.

Keywords: Highly oriented pyrolytic graphite, electrophysical properties, Hall constant, alkali metals, intercalation, two-zone method, Raman spectroscopy.

Zeitun A. Akhmatov – Ph. D., Senior Researcher of the Department of Theoretical and Experimental Physics, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov; Senior Researcher of the Laboratory of Astrophysics and Cosmic Ray Physics, Institute for Nuclear Research of the RAS; Senior Researcher of the Institute of Informatics and Regional Management Problems, Kabardino-Balkar Scientific Center of the RAS, ORCID: 0000-0002-3859-0056

Azamat Kh. Khokonov – Dr. Sc, Leading Researcher, Institute for Nuclear Research of the RAS; Senior Researcher of the Institute of Informatics and Regional Management Problems, Kabardino-Balkar Scientific Center of the RAS; Leading Researcher, Adyghe State University

Igor N. Sergeev – Ph. D., Senior Researcher of the Laboratory of Astrophysics and Cosmic Ray Physics, Institute for Nuclear Research of the RAS

Поступила в редакцию/received: 21.04.2025; после рецензирования/reviced: 19.07.2025; принята/accepted: 21.07.2025.

1. Введение

Интеркалированные соединения графита (ИСГ) образуются путем внедрения атомных или молекулярных слоев различных химических веществ, называемых промежуточным веществом, между слоями в графитовом материале-хозяине. Интеркаляционные соединения встречаются в сильно анизотропных слоистых структурах, где внутрислоистые силы связи велики по сравнению с межслоистыми силами связи. Внедряемые в межслоистые промежутки графита

металлы и молекулы могут являться донорами или акцепторами электронов. Это приводит к тому, что интеркалирование различными химическими элементами может влиять на концентрацию свободных носителей в графите. В результате, ИСГ могут демонстрировать различные электронные, тепловые и магнитные свойства. Например, ИСГ с калием и кальцием проявляют при низких температурах свойства сверхпроводимости. Так, в случае структуры CaC_6 температура сверхпроводящего перехода составила 11,5 К при давлении 0 ГПа и 15,5 К при 7,5 ГПа, что привлекло большое внимание исследователей [1, 2]. ИСГ могут также использоваться в качестве прокладочного материала для экранирования электромагнитных помех, поскольку их электропроводность и высокая удельная площадь поверхности усиливают отражение высокочастотного (до ГГц) электромагнитного излучения. Гетероструктуры на основе интеркалированных графита и многослойного графена представляют собой перспективную материальную платформу для продвижения достижений в области высокопроизводительных фотодетекторов, датчиков изображений, устройств ночного видения и фотоэлектрических элементов [3]. Таким образом, несмотря на то, что ИСГ начали активно изучаться уже с 1980-х годов, актуальность исследования их свойств, в том числе электрофизических, продолжает расти и на сегодняшний день.

В настоящей работе проведены измерения электрофизических свойств чистого и интеркалированного калием высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ). Методом ван дер Пау [4] получены значения удельного сопротивления, постоянной Холла, концентрации и подвижности носителей заряда для чистого и интеркалированного образцов.

2. Методика экспериментов и обсуждение результатов

Интеркаляция ВОПГ калием была проведена с использованием двухзонного метода [5]. Подробное описание эксперимента по интеркаляции ВОПГ калием указанным методом приведено в работе [6]. Процесс интеркаляции ВОПГ калием длился 24 часа. Фотография ампулы реактора для двухзонной интеркаляции до процесса интеркаляции показана на рис. 1. Отметим, что интеркаляция атомами калия вызывает увеличение межплоскостного расстояния в графите [7] и, как следствие, приводит к его расширению. После получения ИСГ с калием были проведены эксперименты по определению степени интеркаляции образца. Для этого был использован Рамановский микроскоп InVia Renishaw с длиной волны лазера $\lambda = 514$ нм. Рамановская спектроскопия является хорошо зарекомендовавшим себя методом исследования слоистых углеродных структур [8]. Этот метод позволяет отличить графен от

графита и многослойного графена, также он чувствителен к избыточному заряду (легированию), деформации и атомному расположению краев [9-11]. Рамановская спектроскопия способна идентифицировать дефекты в графитовых материалах, поскольку наряду с пиками G и $2D$, которые всегда удовлетворяют правилу Рамановского отбора, в спектре появляются запрещенные полосы D и D' [12].



Рис. 1. Ампула «реактора» для проведения двухзонной интеркаляции. На левой стороне находится калий, в правой ВОПГ.

С целью получения эталонного спектра нами вначале был исследован чистый образец ВОПГ. Спектр комбинационного рассеяния чистого образца показан на рис. 2.

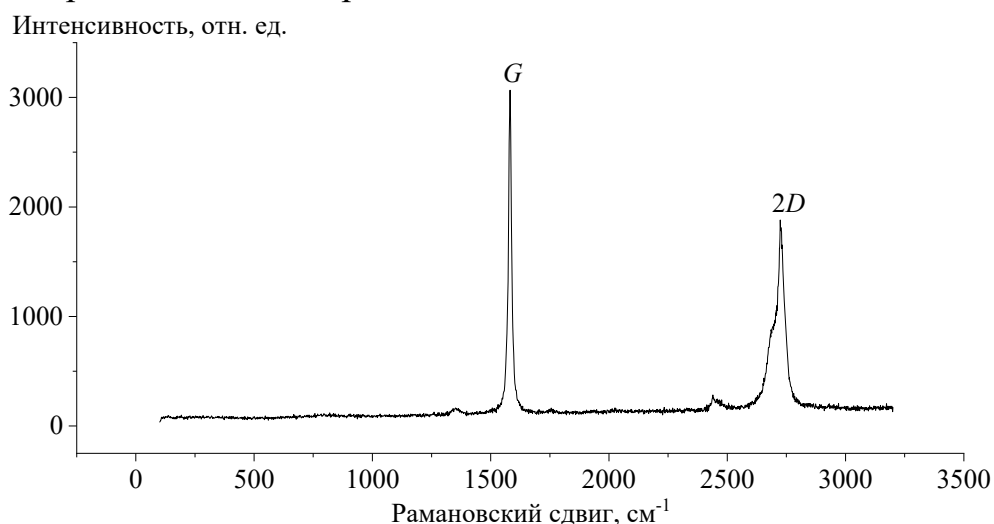


Рис. 2. Рамановский спектр чистого ВОПГ.

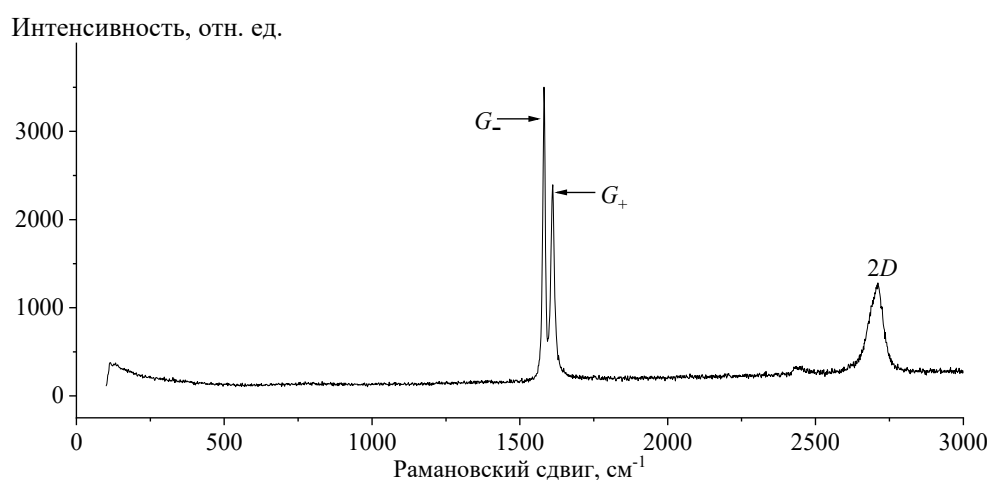


Рис. 3. Рамановский спектр ВОПГ, интеркалированного атомами калия.

Для чистого образца ВОПГ в спектре комбинационного рассеяния наблюдаются два основных пика $G \sim 1580 \text{ см}^{-1}$ и пик $2D \sim 2720 \text{ см}^{-1}$ [8]. За

наличие в решетке образца дефектов и беспорядков отвечает пик $D \sim 1350 \text{ см}^{-1}$, его отсутствие на спектре говорит о высоком качестве используемого ВОПГ.

Рассмотрим теперь Рамановский спектр образца, интеркалированного калием (см. рис. 3). Для интеркалированного образца в спектре комбинационного рассеяния наблюдается расщепление пика G на G_- и G_+ линии. Расщепление G -пика вызвано изменением электронных свойств ВОПГ, а именно увеличением электронной плотности на поверхности графеновых слоев, обусловленное переходом заряда («charge transfer») от атомов калия к графеновым слоям. Заряженный графеновый слой дает высокочастотный колебательный отклик – линию G_+ (1610 см^{-1}), тогда как для незаряженного слоя имеет место низкочастотная мода G_- (1580 см^{-1}).

Определение ступени ИСГ проводится путем анализа положений G_+ и G_- пиков и отношения их интенсивностей [13]. Отношение интенсивности пика G_- к G_+ будем обозначать как I_G . Для случая, когда $I_G \leq 1$ наблюдается образование ИСГ пятой ступени и ниже. Если же $1 < I_G \leq 1,5$ мы заключаем, что образовалось ИСГ шестой ступени или структура KC_{72} . В данной структуре атомы калия занимают межплоскостное пространство в графите через каждые шесть слоев графена.

Измерения электрофизических свойства чистого и интеркалированного калием ВОПГ проводились с использованием метода ван дер Пау. Данный метод является мощным инструментом исследования характеристики материалов, позволяющий получать точные данные об их электрических свойствах. Одним из важных преимуществ метода также является возможность измерения электрофизических параметров образцов произвольной формы [14]. Используемая в эксперименте измерительная ячейка с интеркалированным образцом представлена на рис. 4. Для проведения измерений необходимо, чтобы четыре контакта прикладывались к периметру образца как можно ближе к его краю. Предполагается, что контакты являются эквивалентными, каждая пара из них поочередно выступает в роли токовых контактов, а другая пара в это время является потенциальными контактами (для измерения напряжения). Напряжение, характеризующее проводимость образца, измеряется между двумя контактами, лежащими на одной стороне образца. Холловское напряжение измеряется между контактами, расположенными по диагонали образца, который помещается в магнитное поле (см. рис.5). Измерения проводятся с магнитным полем и без него, в каждом случае полученные данные усредняются. В Таблицах 1 и 2 представлены полученные значения

удельного сопротивления, постоянной Холла, концентрации и подвижности носителей заряда для чистого и интеркалированного образцов.

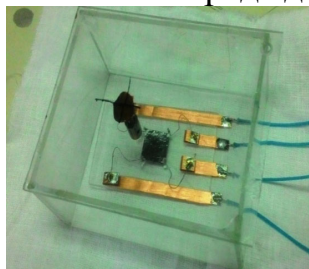


Рис. 4. Образец интеркалированного калием ВОПГ в измерительной ячейке.

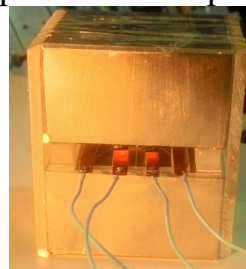
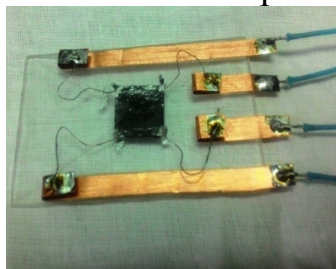


Рис. 5. Измерительная ячейка с интеркалированным образцом под воздействием магнитного поля. Величина магнитной индукции составляет $B = 660$ мТл.

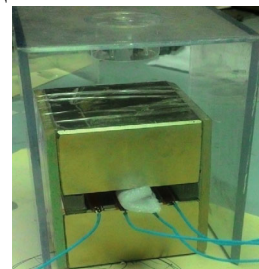


Таблица 1. Значения удельного сопротивление и постоянной Холла для чистого и интеркалированного ВОПГ, полученные методом ван дер Пау.

Вид графита	Толщина, мм	ρ , Ом×м	R_H , м ³ /Кл
Чистый ВОПГ	2,3	$6,3 \times 10^{-6}$	$6,7 \dots 7,5 \times 10^{-8}$
Интеркалированный калием ВОПГ	0,45	$4,3 \dots 7,7 \times 10^{-8}$	$2,6 \dots 3,0 \times 10^{-8}$

Из Таблицы 1 видно, что после процесса интеркаляции ВОПГ значения удельного сопротивления и постоянной Холла R_H уменьшились. Для вычисления концентрации n и подвижности носителей μ с помощью R_H , воспользуемся следующими выражениями

$$n = 1/q * R_H, \quad \mu = R_H / \rho, \quad (1)$$

где q и ρ элементарный электрический заряд и удельное сопротивление, соответственно. Полученные с использованием выражения (1) значения концентрации и подвижности носителей заряда представлены в Таблице 2.

Интеркаляция ВОПГ калием привела к значительному увеличению концентрации и подвижности носителей заряда по сравнению с чистым образцом. Важно отметить, что интеркаляция позволяет модифицировать свойства материала без ухудшения начальных физических свойств и разрушения кристаллической структуры, что подтверждается спектрами комбинационного рассеяния.

Таблица 2. Значения концентрации и подвижности носителей заряда для чистого и интеркалированного ВОПГ, полученные методом ван дер Пау.

Вид графита	n , м ³	μ , м ² В ⁻¹ с ⁻¹
ВОПГ	$8,3 \times 10^{25}$	0,012
Интеркалированный калием ВОПГ	$2,2 \times 10^{26}$	0,47

3. Заключение

Продемонстрирована возможность управления электрофизическими

свойствами ВОПГ посредством его интеркалирования атомами калия. Измерения электрофизических величин чистого и интеркалированного образца проводились с использованием метода ван дер Пау. Показано, что интеркалирование калием ВОПГ приводит к уменьшению удельного сопротивления на два порядка, постоянная Холла уменьшилась более чем в два раза по сравнению с чистым образцом. Отношение концентрации носителей интеркалированного образца к чистому составило $n_i/n_0 \approx 2,65$, тогда как для подвижности носителей отношение принимает значение $\mu_i/\mu_0 \approx 39,16$. Полученные результаты относятся к образцу с высокой (шестой, структура KC_{72}) ступенью интеркаляции, мы ожидаем, что для ИСГ низкой ступени (KC_{24} , KC_{36}) наблюдаемые эффекты будут еще более значительными. Важно также отметить, что процесс интеркалирования атомами металлов позволяет модифицировать электрофизические свойства слоистых углеродных материалов без разрушения кристаллической решетки, на что указывают данные Рамановской спектроскопии. В связи с этим данная методика представляется привлекательной и перспективной для управления физическими характеристиками материалов.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
<https://rscf.ru/project/24-22-20102> (проект № 24-22-20102).*

Библиографический список:

1. **Nishiyama, S.** Preparation and characterization of a new graphite superconductor: $Ca_{0.5}Sr_{0.5}C_6$ / S. Nishiyama, H. Fujita, M. Hoshi et al. // Scientific Reports. – 2017. – V. 7. – Art. № 7436. – 10 p. DOI: 10.1038/s41598-017-07763-y.
2. **Yang, S.L.** Superconducting graphene sheets in CaC_6 enabled by phonon-mediated interband interactions / S.L. Yang, J.A. Sobota, C.A. Howard et al. // Nature Communications. – 2014. – V. 5. – Art. № 3493. – 5 p. DOI: 10.1038/ncomms4493.
3. **Yahya, A.M.** Hybrid nanocomposites for enhanced photodetection: synthesis and application of $Ag_2O@graphene/Si$ heterojunctions / A.M. Yahya, A.I. Hassan, E.T. Salim, A.J. Addie // Journal of Alloys and Compounds. – 2024. – V. 1001. – I. 5. – Art. № 175133. – 11 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.175133.
4. **Van der Pauw, L.J.** A method of measuring the resistivity and Hall coefficient on lamellae of arbitrary shape / L.J. van der Pauw // Philips Technical Review. – 1958. – V. 20. – P. 220-224. DOI: 10.1142/9789814503464_0017.
5. **Stark, M.S.** Intercalation of layered materials from bulk to 2D / M.S. Stark, K.L. Kuntz, S.J. Martens, S.C. Warren // Advanced Materials. – 2019. – V. 31. – I. 27. – Art. № 1808213. – 47 p. DOI: 10.1002/adma.201808213.
6. **Ахматов, З.А.** Исследование интеркалированного калием графита методом спектроскопии комбинационного рассеяния / З.А. Ахматов, А.Х. Хоконов, И.Н. Сергеев, М.Г. Амбарцумов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2024. – Вып. 16. – С. 24-32. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.024.
7. **Ахматов, З.А.** Низкофононовый метод изотопных маркеров для измерения эффективности интеркаляции графита атомами калия / З.А. Ахматов, А.М. Гангапшев, В.С. Романенко, А.Х. Хоконов, В.В. Кузьминов // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2018. – Т. 49. – Вып. 4. – С. 1383-1391.
8. **Ferrari, A.C.** Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron–phonon coupling, doping and nonadiabatic effects / A.C. Ferrari // Solid State Communications. – 2007. – V. 143. – I. 1-2. – P. 47-57. DOI: 10.1016/j.ssc.2007.03.052.
9. **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. 8. – P. 187401-1-187401-4. DOI: 10.1103/physrevlett.97.187401.
10. **Casiraghi, C.** Probing disorder and charged impurities in graphene by Raman spectroscopy / C. Casiraghi // Physica Status Solidi (RRL) – Rapid Research Letters. – 2009. – V. 3. – I. 6. – P. 175-177. DOI: 10.1002/pssr.200903135.
11. **Zabel, J.** Raman spectroscopy of graphene and bilayer under biaxial strain: bubbles and balloons / J. Zabel, R.R. Nair, A. Ott et al. // Nano Letters. – 2012. – V. 12. – I. 2. – P. 617-621. DOI: 10.1021/nl203359n.
12. **Saito, R.** Probing phonon dispersion relations of graphite by double resonance Raman scattering / R. Saito, A. Jorio, A. G. Souza Filho et al. // Physical Review Letters. – 2001. – V.88. – I.2. – P. 027401-1-027401-4. DOI:10.1103/PhysRevLett.88.027401.
13. **Chacón-Torres, J.C.** Manifestation of charged and strained graphene layers in the Raman response of graphite intercalation compounds / J.C. Chacón-Torres, L. Wirtz, T. Pichler // ACS Nano. – 2013. – V. 7. – I. 10. – P. 9249-9259. DOI :10.1021/nn403885k.
14. **Hu, X.** Electrostatic derivation for the van der Pauw formula and simulation using arbitrarily shaped resistive materials / X. Hu, L. Zhu, K. Diao et al. // AIP Advances. – 2022. – V. 12. – I. 7. – Art. № 075208. – 10 p. DOI: 10.1063/5.0081561.

References:

1. Nishiyama S, Fujita H., Hoshi M. et al. Preparation and characterization of a new graphite superconductor: $\text{Ca}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{C}_6$, *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, art. no. 7436, 10 p. DOI: 10.1038/s41598-017-07763-y.
2. Yang S.L., Sobota J.A., Howard C.A. et al. Superconducting graphene sheets in CaC_6 enabled by phonon-mediated interband interactions, *Nature Communications*, 2014, vol. 5, art. no. 3493, 5 p. DOI: 10.1038/ncomms4493.
3. Yahya A.M., Hassan A.I., Salim E.T., Addie A.J. Hybrid nanocomposites for enhanced photodetection: synthesis and application of $\text{Ag}_2\text{O}@$ graphene/Si heterojunctions, *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, vol. 1001, issue 5, art. no. 175133, 11 p. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.175133.
4. Van der Pauw L.J. A method of measuring the resistivity and Hall coefficient on lamellae of arbitrary shape, *Philips Technical Review*, 1958, vol. 20, pp. 220-224. DOI: 10.1142/9789814503464_0017.
5. Stark M.S., Kuntz K.L., Martens S.J., Warren S.C. Intercalation of layered materials from bulk to 2D, *Advanced Materials*, 2019, vol. 31, issue 27, art. no. 1808213, 47 p. DOI: 10.1002/adma.201808213.
6. Akhmatov Z.A., Khokonov A. Kh., Sergeev I.N., Ambartsumov M.G. [Study of potassium intercalated graphite by Raman spectroscopy], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2024, issue 16, pp. 24-32. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.024. (In Russian).
7. Akhmatov Z.A., Gangapshv A.M., Romanenko V.S., Khokonov A.K., Kuzminov V.V. Low-background method of isotope markers for measuring the efficiency of intercalation of graphite by potassium atoms, *Physics of Particles and Nuclei*, 2018, vol. 49, issue 4, pp. 787-792. DOI: 10.1134/S1063779618040032.
8. Ferrari A.C. Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron-phonon coupling, doping and nonadiabatic effects, *Solid State Communications*, 2007, vol. 143, issue 1-2. pp. 47-57. DOI: 10.1016/j.ssc.2007.03.052.
9. Ferrari A.C., Meyer J.C., Scardaci V. et al. Raman spectrum of graphene and graphene layers, *Physical Review Letters*, 2006, vol. 97, issue 8, pp. 187401-1-187401-4. DOI: 10.1103/physrevlett.97.187401.
10. Casiraghi C. Probing disorder and charged impurities in graphene by Raman spectroscopy, *Physica Status Solidi (RRL) – Rapid Research Letters*, 2009, vol. 3, issue 6, pp. 175-177. DOI: 10.1002/pssr.200903135.
11. Zabel J., Nair R. R., Ott A. et al. Raman spectroscopy of graphene and bilayer under biaxial strain: bubbles and balloons, *Nano Letters*, 2012, vol. 12, issue 2, pp. 617-621. DOI: 10.1021/nl203359n.
12. Saito R., Jorio A., Souza Filho A.G. et al. Probing phonon dispersion relations of graphite by double resonance Raman scattering, *Physical Review Letters*, 2001, vol. 88, issue 2, pp. 027401-1-027401-4. DOI: 10.1103/PhysRevLett.88.027401.
13. Chacón-Torres J.C., Wirtz L., Pichler T. Manifestation of charged and strained graphene layers in the Raman response of graphite intercalation compounds, *ACS Nano*, 2013, vol. 7, issue 10, pp. 9249-9259. DOI:10.1021/nn403885k.
14. Hu X., Zhu L., Diao K. et al. Electrostatic derivation for the van der Pauw formula and simulation using arbitrarily shaped resistive materials, *AIP Advances*, 2022, vol. 12, issue 7, art. № 075208, 10 p. DOI: 10.1063/5.0081561.