

УДК 538.913; 538.915; 538.975

Оригинальная статья

Исследование интеркалированного калием графита методом спектроскопии комбинационного рассеяния

З.А. Ахматов^{1,2,3}, А.Х. Хоконов^{2,3}, И.Н. Сергеев², М.Г. Амбарцумов⁴

¹ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова»

360004, Россия, Кабардино-Балкарская республика, Нальчик, ул. Чернышевского, 173

²ФГБУН «Институт ядерных исследований РАН»

117312, Россия, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а

³ФГБУН «ФНЦ «Кабардино-Балкарский научный центр РАН»

360000, Россия, Кабардино-Балкарская республика, Нальчик, ул. И. Арманд, 37

⁴ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

355017, Россия, Ставропольский край, Ставрополь, ул. Пушкина, 1

ahmatov.z@bk.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.024

Аннотация: В настоящей работе методом спектроскопии комбинационного рассеяния света проведено исследование интеркалированного соединения графита с калием. Целью исследования являлось определение степени интеркаляции и изучение влияния интеркалированных атомов на колебательные свойства решетки высокоориентированного пиролитического графита. Интеркалирование высокоориентированного пиролитического графита калием производилось с использованием двухзонного метода. Рамановские спектры были получены как для чистого, так и для интеркалированного высокоориентированного пиролитического графита. Проведенные эксперименты по идентификации синтезированных структур показали образование интеркалированного соединения графита шестой степени. Знание степени интеркалированного соединения графита является важным при его использовании в качестве сверхпроводящего материала, а также в суперконденсаторах. Кроме того, степень интеркаляции является ключевым фактором при получении графена путем химического отшелушивания интеркалированного соединения графита, так как количество графеновых слоев будет напрямую зависеть от степени интеркаляции. В полученных рамановских спектрах наблюдается эффект расщепления G-пика, показывающий изменение колебательных свойств решетки графита при его интеркаляции за счет переноса заряда (charge transfer) от интеркалята к углеродным слоям. Величина переносимого заряда определена с применением расчетов из первых принципов.

Ключевые слова: спектроскопия комбинационного рассеяния, высокоориентированный пиролитический графит, щелочные металлы, интеркаляция, двухзонный метод, расчеты из первых принципов.

1. Введение

Графит является аллотропом углерода с уникальной анизотропией. В плоскости атомы углерода в графите взаимодействуют друг с другом посредством ковалентной связи, тогда как связь атомов углерода вне плоскости обусловлена слабым взаимодействием Ван-дер-Ваальса. Графит легко расслаивается, что дало возможность получить графен – слой атомов углерода толщиной в один атом [1]. Высокое значение

электропроводности графита (порядка 10^4 См/см) при комнатной температуре [2] позволило предложить его в качестве проводящего наполнителя в полимерных композитах, которые будут использоваться в батареях, светоизлучающих устройствах, электромагнитных экранах, антистатических покрытиях и электродных материалах [3]. Однако, слишком высокая концентрация графита в качестве проводящего наполнителя может привести к ухудшению механических свойств полимерного композита. Использование тонких графитовых листов, интеркалированных атомами донорного типа, позволило бы создать проводящую сеть внутри полимерной матрицы с как можно меньшим количеством наполнителя и высоким значением электропроводности.

Интеркалированные соединения графита (ИСГ) образуются путем внедрения атомных или молекулярных слоев различных химических веществ, называемых промежуточным веществом, между слоями в графитовом материале-хозяине. Интеркалированные соединения встречаются в сильно анизотропных слоистых структурах, где внутриплоскостные силы связи велики по сравнению с межплоскостными силами связи. При этом, интеркалируя атомы металлов можно радикально изменить электронные свойства графита. Например, ИСГ с калием и кальцием проявляют при криогенных 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 [4, 5]. Из различных типов интеркалированных соединений особый физический интерес представляют соединения графита из-за их относительно высокой степени структурной упорядоченности. Важнейшим и характерным свойством упорядочения интеркалированных соединений графита является стадийность, характеризующаяся периодическим расположением интеркалированных слоев в матрице графита. Интеркаляционные соединения графита, таким образом, классифицируются по индексу стадии (ступени) n , обозначающему количество слоев графита между соседними слоями интеркалята, как показано на рис. 1. Это стадийное явление присуще всем ИСГ, даже в образцах с очень разбавленными концентрациями интеркалятов ($n \sim 10$).

Знание ступени ИСГ является важным при их использовании в качестве сверхпроводящего материала, а также в суперконденсаторах. Кроме того, степень интеркаляции является ключевым фактором при получении графена путем химического отшелушивания ИСГ, так как количество графеновых слоев будет напрямую зависеть от ступени интеркаляции. Величина n также влияет на электронную зонную структуру [6, 7] и фононный спектр слоистых углеродных материалов.

Таким образом, определение ступени в ИСГ является на сегодняшний день важной и актуальной задачей. Одним из методов идентификации ступени интеркалированного графита является анализ спектров комбинационного рассеяния. Рамановская спектроскопия также позволяет исследовать образец на наличие дефектов решетки и функциональных групп.

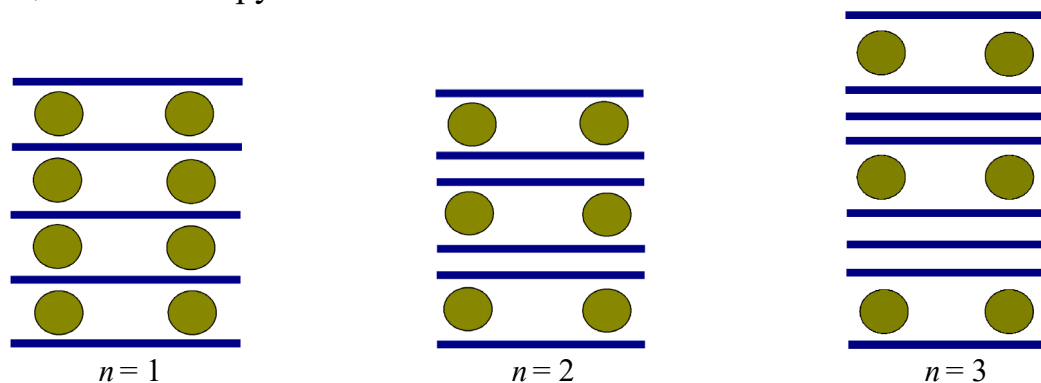


Рис. 1. Схематическое представление различных ступеней интеркаляции. Если атомы интеркалянта (серые кружки) располагаются через каждый углеродный слой, то структура называется ИСГ первой ступени $n = 1$. Для случая, когда атомы интеркалянта расположены через каждые два или три углеродных слоя, мы наблюдаем ИСГ второй ($n = 2$) и третьей ($n = 3$) ступени.

В настоящей работе нами предпринята попытка определения ступени интеркаляции синтезированного ИСГ с калием при помощи спектроскопии комбинационного рассеяния света.

2. Методика экспериментов и обсуждение результатов

Интеркаляция высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ) калием была проведена с использованием двухзонного метода [8]. Данный метод предполагает, что калий и графит помещаются в реактор отдельно, затем реактор вакуумируют и герметизируют. После этого герметичный реактор помещают в двухзонную печь, где температура должна регулироваться с высокой точностью. Интеркалят обычно нагревают до некоторой температуры T_i , при которой начинается его испарение. Во второй зоне, где находится графит, температура T_g регулируется в зависимости от желаемой ступени соединения [9]. В нашем эксперименте разность температур между зонами составила $T_g - T_i = 230^\circ\text{C}$. Схема описанного метода показана на рис. 2.

Процесс интеркаляции ВОПГ калием длился 24 часа. Фотография полученного ИСГ с калием показана на рис. 3.

Эксперименты по определению ступени интеркалированного образца производились с использованием Рамановского микроскопа InVia

Renishaw. Длина волны используемого в спектрометре лазера составляет $\lambda = 514$ нм.

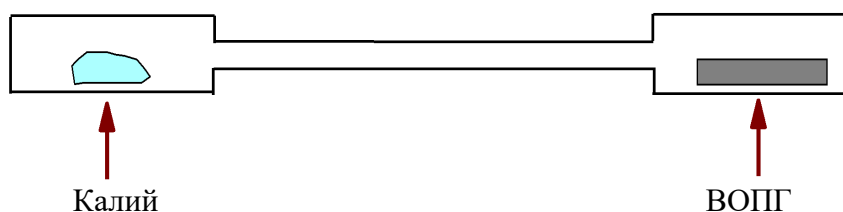


Рис. 2. Схема реализации двухзонного метода интеркаляции для получения ИСГ с калием.

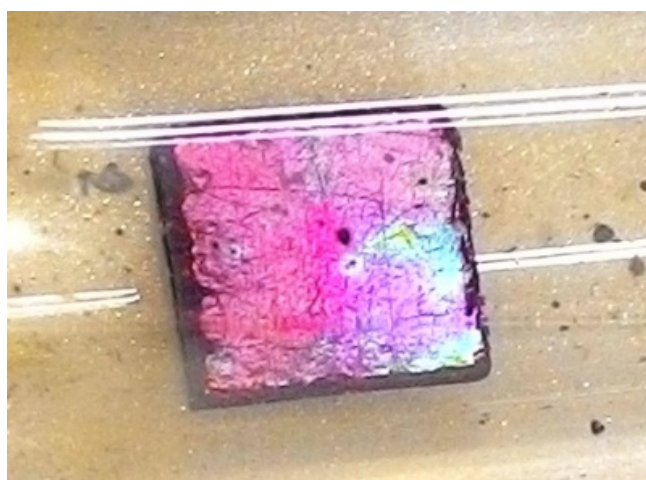


Рис. 3. Поверхность ВОПГ в вакуумированной ампуле после интеркаляции калием.

Рамановская спектроскопия является хорошо зарекомендовавшим себя методом исследования слоистых углеродных структур [10]. Этот метод позволяет отличить графен от графита и многослойного графена, также он чувствителен к избыточному заряду (легированию), деформации и типу структуры краев (кресло или зигзаг) графена [11-13]. 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' . Они активируются однофононным процессом междолинного и внутримолекулярного рассеяния, соответственно [14].

С целью получения эталонного спектра нами вначале был исследован чистый образец ВОПГ. Спектр комбинационного рассеяния чистого образца показан на рис. 4.

Для чистого образца ВОПГ в спектре комбинационного рассеяния наблюдаются два основных пика $G \sim 1580$ см^{-1} и $2D \sim 2720$ см^{-1} [10, 15]. Линия G обусловлена колебаниями в плоскости sp^2 – гибридных атомов углерода и является наиболее характерной особенностью большинства графитовых материалов. Пик $2D$ появляется в результате

двухфононного резонансного процесса с участием фононов вблизи точки высокой симметрии K . За наличие в решетке образца различных дефектов отвечает пик $D \sim 1350 \text{ см}^{-1}$, его отсутствие на спектре говорит о высоком качестве ВОПГ.

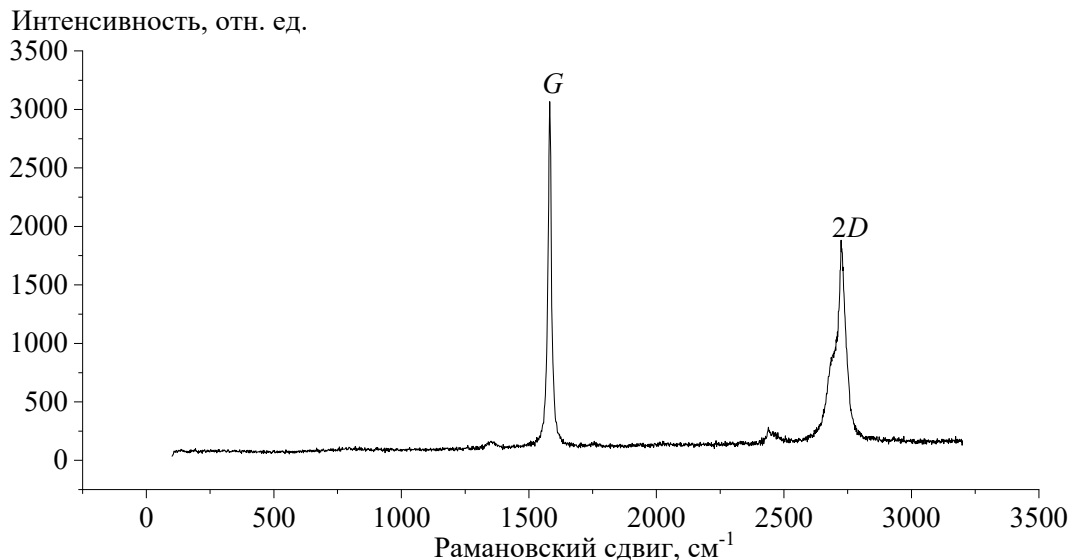


Рис. 4. Рамановский спектр чистого ВОПГ.

Рассмотрим теперь Рамановский спектр образца, интеркалированного калием (см. рис. 5).

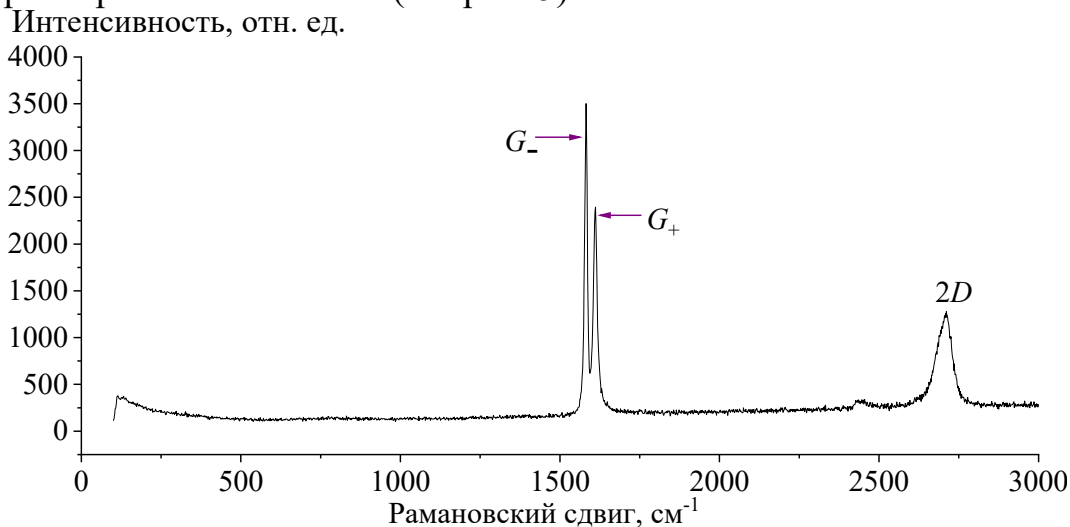


Рис. 5. Рамановский спектр ВОПГ, интеркалированного атомами калия.

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. Для расчета величины заряда, передаваемого графеновым слоям, мы провели расчеты из первых принципов [16] для

двухслойного графена, интеркалированного атомами калия. Далее используя анализ заряда Бейдера [17] мы обработали выходные данные *scf*-расчетов. Проведенный анализ показал, что один атом калия передает углеродной плоскости заряд равный 0,43 *e*.

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}). Наблюдаемый эффект указывает на возможность управления частотами колебательных мод в слоистых углеродных структурах, что является актуальным при конструировании источников терагерцового излучения на основе графеноподобных материалов.

Определение степени ИСГ проводится путем анализа положений G_+ и G_- пиков и отношения их интенсивностей [18]. Отношение интенсивности пика G_- к G_+ будем обозначать как I_G . Для случая, когда $I_G \leq 1$ наблюдается образование ИСГ пятой степени и ниже. Если же $1 < I_G \leq 1,5$ мы заключаем, что образовалось ИСГ шестой степени или структура KC_{72} . В данной структуре атомы калия занимают межплоскостное пространство в графите через каждые шесть слоев графена.

3. Заключение

Методом двухзонной интеркаляции получено ИСГ с калием. Идентификация интеркалированной структуры (определение степени интеркаляции) проводилась с использованием Рамановской спектроскопии. Анализ спектров комбинационного рассеяния указал на образование ИСГ шестой степени или структуры KC_{72} . Показано, что интеркаляция ВОПГ калием приводит к расщеплению G -пика на высокочастотную G_+ и низкочастотную G_- моды. Объясняется это переходом заряда от калия к графеновым слоям, т.е. частоты колебательных мод заряженной графеновой плоскости выше, чем у незаряженной плоскости. Величина переходящего от одного атома калия к графеновой плоскости заряда, рассчитанная с использованием пакета для квантово-химических вычислений Quantum Espresso, составила 0,43 *e*.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-22-20102).

Библиографический список:

1. **Novoselov, K.S.** Electric field effect in atomically thin carbon films / K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov et al. // Science. – 2004. – V. 306. – I. 5696. – P. 666-669. DOI: 10.1126/science.1102896.
2. **Spain, I.L.** Electronic transport properties of graphite acceptor compounds / I.L. Spain, K.J. Volin // MRS

- Proceedings. – 1982. – V. 20. – I. 1. – P. 173-178. DOI: 10.1557/proc-20-173.
3. **Afanasov, I.M.** Preparation, electrical and thermal properties of new exfoliated graphite-based composites / I.M. Afanasov, V.A. Morozov, A.V. Kepman et al. // *Carbon*. – 2009. – V. 47. – I. 1. – P. 263-270. DOI: 10.1016/j.carbon.2008.10.004.
4. **Nishiyama, S.** Preparation and characterization of a new graphite superconductor: $\text{Ca}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{C}_6$ / S. Nishiyama, H. Fujita, M. Hoshi et al. // *Scientific Reports*. – 2017. – V. 7. – Art. № 7436. – 10 p. DOI: 10.1038/s41598-017-07763-y.
5. **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.
6. **Ohta, T.** Controlling the electronic structure of bilayer graphene / T. Ohta, A. Bostwick, T. Seyller, K. Horn, E. Rotenberg // *Science*. – 2006. – V. 313. – I. 5789. – P. 951-954. DOI: 10.1126/science.1130681.
7. **Csanyi, G.** The role of the interlayer state in the electronic structure of superconducting graphite intercalated compounds / G. Csanyi, P.B. Littlewood, A.H. Nevidomskyy, C.J. Pickard, B.D. Simons // *Nature Physics*. – 2005. – V. 1. – I. 1. – P. 42-45. DOI: 10.1038/nphys119.
8. **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.
9. **Dresselhaus, M.S.** Intercalation compounds of graphite / M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus // *Advances in Physics*. – 2002. – V. 51. – I. 1. – P. 1-186. DOI: 10.1080/00018730110113644.
10. **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.
11. **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.
12. **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.
13. **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.
14. **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.
15. **Akhmatov, Z.A.** Vibrational dynamics of pristine and the hydrogenated graphene surface / Z.A. Akhmatov, A.Kh. Khokonov, V.A. Tarala // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2016. – V. 80. – I. 11. – P. 1341-1343. DOI: 10.3103/S1062873816110058.
16. **Giannozzi, P.** QUANTUM ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials / P. Giannozzi, S. Baroni, N. Bonini // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2009. – V. 21. – № 39. – Art. № 395502. – 19 p. DOI: 10.1088/0953-8984/21/39/395502.
17. **Tang, W.** A grid-based Bader analysis algorithm without lattice bias / W. Tang, E. Sanville, G. Henkelman // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2009. – V. 21. – № 8. – Art. № 084204. – 7 p. DOI: 10.1088/0953-8984/21/8/084204.
18. **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.

References:

1. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V. et al. Electric field effect in atomically thin carbon films, *Science*, 2004, vol. 306, issue 5696, pp. 666-669. DOI: 10.1126/science.1102896.
2. Spain I.L., Volin K.J. Electronic transport properties of graphite acceptor compounds, *MRS Proceedings*, 1982, vol. 20, issue 1, pp. 173-178. DOI: 10.1557/proc-20-173.
3. Afanasov I.M., Morozov V.A., Kepman A.V. et al. Preparation, electrical and thermal properties of new exfoliated graphite-based composites, *Carbon*, 2009, vol. 47, issue 1, pp. 263-270. DOI: 10.1016/j.carbon.2008.10.004.
4. 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.

5. Yang S.L., Sobota J.A., Howard C.A. et al. Superconducting graphene sheets in CaC₆ enabled by phonon-mediated interband interactions, *Nature Communications*, 2014, vol. 5, art. no. 3493, 5 p. DOI: 10.1038/ncomms4493.
6. Ohta T., Bostwick A., Seyller T., Horn K., Rotenberg E. Controlling the electronic structure of bilayer graphene, *Science*, 2006, vol. 313, issue 5789, pp. 951-954. DOI: 10.1126/science.1130681.
7. Csanyi G., Littlewood P.B., Nevidomskyy A.H., Pickard C.J., Simons B.D. The role of the interlayer state in the electronic structure of superconducting graphite intercalated compounds, *Nature Physics*, 2005, vol. 1, issue 1, pp. 42-45. DOI: 10.1038/nphys119.
8. 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.
9. Dresselhaus M.S., Dresselhaus G. Intercalation compounds of graphite, *Advances in Physics*, 2002, vol. 51, issue 1, pp. 1-186. DOI: 10.1080/00018730110113644.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Akhmatov Z.A., Khokonov A. Kh., Tarala V.A. Vibrational dynamics of pristine and the hydrogenated graphene surface, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2016, vol. 80, issue 11, pp. 1341-1343. DOI: 10.3103/S1062873816110058.
16. Giannozzi, P., Baroni S., Bonini N. QUANTUM ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2009, vol. 21, no. 39, art. no. 395502, 19 p. DOI: 10.1088/0953-8984/21/39/395502.
17. Tang W., Sanville E., Henkelman G. A grid-based Bader analysis algorithm without lattice bias, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2009, vol. 21, no. 8, art. no. 084204, 7 p. DOI: 10.1088/0953-8984/21/8/084204.
18. 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.

Original paper

Study of potassium intercalated graphite by Raman spectroscopy

Z.A. Akhmatov^{1,2,3}, A.Kh. Khokonov^{2,3}, I.N. Sergeev², M.G. Ambartsumov⁴

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

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

³*Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS, Nalchik, Russia*

⁴*North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.024

Abstract: In this paper, a study of a graphite intercalation compound by potassium was carried out using Raman spectroscopy. The purpose of the study was to determine the intercalation stage and study the influence of intercalated atoms on the vibrational properties of highly oriented pyrolytic graphite lattice. The intercalation of highly oriented pyrolytic graphite by potassium was performed using a two-zone method. Raman spectra were obtained for both pure and intercalated highly oriented pyrolytic graphite. The experiments carried out to identify the synthesized structures showed the formation of sixth stage graphite intercalation compound. Knowledge of the stage of the intercalated graphite compounds is important for its use as a superconducting material, as well as in supercapacitors. In addition, the intercalation stage is a key factor in obtaining graphene by chemical exfoliation of graphite intercalation compound, since the number of graphene layers will directly depend on the intercalation stage. In the obtained Raman spectra, the effect of G-peak splitting is

observed, indicating a change in the vibrational properties of the graphite lattice during its intercalation due to the charge transfer from the intercalate to the carbon layers. The value of the transferred charge is determined using first-principles calculations.

Keywords: Raman spectroscopy, highly oriented pyrolytic graphite, alkali metals, intercalation, two-zone method, first-principles calculations.

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 ФГБУН «ФНЦ «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 ФГБУН «ФНЦ «Кабардино-Балкарский научный центр РАН».

Сергеев Игорь Николаевич – старший научный сотрудник лаборатории «Астрофизика и физика космических лучей» ФГБУН «Институт ядерных исследований РАН»

Амбарцумов Михаил Георгиевич – ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории технологии тонких пленок и наногетероструктур научно-лабораторного комплекса чистых зон физико-технического факультета ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

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 of Nuclear Research of RAS, Senior Researcher of the Institute of Informatics and Regional Management Problems, Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS

Azamat Kh. Khokonov – Leading Researcher, Institute of Nuclear Research of RAS; Senior Researcher of the Institute of Informatics and Regional Management Problems, Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS

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

Mikhail G. Ambartsumov – Ph. D., Leading Researcher of North-Caucasus Federal University

Поступила в редакцию/received: 11.08.2024; после рецензирования/revised: 06.09.2024; принята/accepted 07.09.2024.