



Перспективы графеновой наноэлектроники



Любовь ЖУРАВЛЕВА
Lyubov M. ZHURAVLEVA

Юлия НИКУЛИНА
Yulia A. NIKULINA



Анна ЛЕБЕДЕВА
Anna S. LEBEDEVA

Журавлева Любовь Михайловна – кандидат технических наук, доцент Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия. Никулина Юлия Александровна – студентка 4-го курса МИИТ, Москва, Россия. Лебедева Анна Константиновна – студентка 4-го курса МИИТ, Москва, Россия.

Prospects of Graphene Nanoelectronics (текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 76)

В статье рассмотрены актуальные вопросы совершенствования электроники и перехода на новый технологический уклад, связанный с нанотехнологией. Отмечено, что главным направлением развития наноэлектроники является создание новых материалов типа графена. Проанализирована возможность замены основного сейчас в этой сфере функционального материала кремния на графен. Приведены краткие сведения о преимуществах, способах изготовления, а также методах открытия запрещенной зоны – перевода графена в полупроводник. Предложен способ изготовления полупроводникового графена, позволяющий организовать его промышленное производство.

Ключевые слова: транспорт, наука, функциональный материал, графен, графит, электроника, наноэлектроника, нанотехнологии.

Разработка и реализация долгосрочной программы развития железнодорожной связи неразрывно связаны с вопросами совершенствования качественных показателей базовых элементов волоконно-оптических систем передачи информации. Улучшение оптоэлектронных характеристик полупроводниковых лазеров, фотоприёмников, оптических модуляторов напрямую влияет на качество передачи служебной информации, оперативность управления технологическими процессами и безопасностью движения поездов. В настоящее время главным направлением повышения технического уровня элементной базы оптоэлектроники становится выбор функционального материала (увеличение быстродействия носителей заряда, снижение инерционности среды). Один из самых перспективных здесь – графен.

Графен – двумерная аллотропная модификация углерода, образованная слоем атомов углерода толщиной в один атом,

находящихся в sp^3 -гибридизации и соединённых в гексагональную двумерную кристаллическую решётку. Его можно представить как одну плоскость графита, отделённую от объёмного кристалла [1].

Материал сочетает в себе уникальные свойства: высокую механическую прочность, электро- и теплопроводность, непроницаемость для газов, прозрачность для света и т. д., что делает его привлекательным для многих приложений, включая транспортные механизмы и машины.

Так, подвижность электронов у графена при комнатной температуре соизмерима со скоростью света [2], модуль Юнга — 1 ТПа, внутреннее сопротивление деформации — 130 ГПа, теплопроводность выше 3000 Вт, он способен поддерживать чрезвычайно высокую плотность электрического тока (в миллион раз выше по сравнению с медью). Однако некоторые из этих характеристик зафиксированы только на образцах высочайшего качества, полученных в условиях механического отслаивания чешуек графена (рис. 1) с помощью гибкой ленты и последующего нанесения их на специальные подложки из гексагонального нитрида бора.

Свойства графена и области его применения (рис. 2) очень зависят от качества материала, подложки, типа дефектов и т. д., которые производны во многом от метода и условий производства.



Рис. 1. Графен.

Масштабы и сроки внедрения графена как функционального материала в конечную продукцию, прежде всего электронику, связаны с проблемами промышленного производства в больших количествах графеновых листов размерами в несколько сантиметров. При этом способы получения графена можно разделить на три класса:

- графен или хлопьевидный восстановленный оксид графена для композитных материалов, проводящих красок и т. п.;
- плоский графен для низкопроизводительных и неактивных устройств;
- плоский графен для высокопроизводительных электронных устройств.

Промышленные методы производства графена представлены в таблице 1.

Главной сферой применения графена является наноэлектроника (высокочастотные транзисторы, фотодетекторы, оптические модуляторы, лазеры с синхронизацией мод, оптические поляризаторы и т. д.) [3].

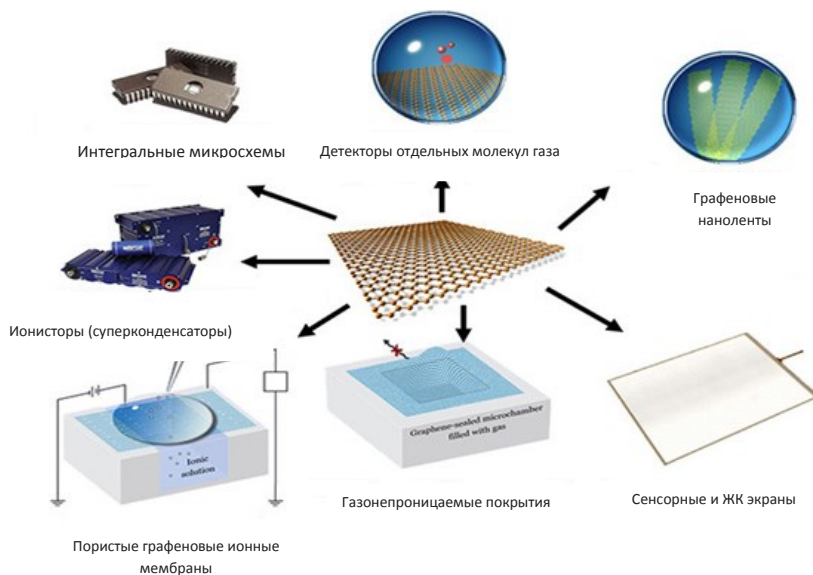


Рис. 2. Области применения графена.

Промышленные способы получения графена

Метод	Размер кристаллита (мкм)	Размер образца (мм)	Подвижность носителей заряда (комнатн. темп.) ($\text{см}^2 \text{В}^{-1} \text{с}^{-1}$)	Сфера применения
Механическое отслаивание	>1000	>1	$>2 \cdot 10^5$ и 10^6 (при низкой темп.)	Исследования
Химическое отслаивание	$\leq 0,1$	—	100 (для слоя из перекрывающихся друг друга хлопьев)	Покрывтия, краски/чернила, композитные материалы, прозрачные проводящие слои, конденсаторы, биоприложения
Химическое отслаивание через оксид графена	~ 100	—	1 (для слоя из перекрывающихся друг друга хлопьев)	Покрывтия, краски/чернила, композитные материалы, прозрачные проводящие слои, конденсаторы, биоприложения
CVD	1000	~ 1000	10000	Фотоника, наноэлектроника, прозрачные проводящие слои, сенсоры, биоприложения
SiC	50	100	10000	Высокочастотные транзисторы и другие электронные устройства

Особенно следует отметить значение создания фотодетекторов на основе графена. В отличие от полупроводниковых фотодетекторов, имеющих ограниченную ширину поглощения света, графен может поглощать свет любого цвета (весь спектр). При этом графен обладает высокой пропускной способностью, что делает его незаменимым материалом для высокоскоростных систем передачи информации по оптическому волокну.

Однако графен сможет заменить кремний только в случае открытия в нем запрещенной зоны (преобразования графена-полуметалла в графен-полупроводник). Нужно не только открыть запрещенную зону, но и сделать ее соизмеримой с шириной запрещенной зоны кремния. Существует несколько способов создания полупроводникового графена. В частности:

1) нанесение на полоски графена химических элементов, влияющих на электропроводность графена;

2) механическое одноосное напряжение на полоску графена.

Основной недостаток этих методов — сложность реализации в промышленных условиях.



Рис. 3. Схема облучения заготовки из графита.

Для массового выпуска полупроводникового материала из графена наиболее подходящим видится изотопический способ (изменение числа нейтронов в ядре при неизменном числе протонов). С добавлением одного нейтрона в ядро углерода происходит перенормировка электронной энергии и увеличение (или открытие) запрещенной зоны. Так, замещение легкого изотопа ^{12}C более тяжелым ^{13}C увеличивает энергию межзонных переходов, что приводит к изменениям частоты оптической фононной моды.

Известно, что механическое одноосное напряжение, равное 1% от соответствующей максимальной для межатомных связей, приводит к образованию запрещенной зоны величиной в 300 мэВ. Об этом свидетельствует красный частотный сдвиг оптического фонона в спектре комбинационного рассеяния, равный $14,2 \text{ см}^{-1}$ [4]. Аналогичные сдвиги имеют место при изотопическом замещении в графене изотопа ^{12}C на изотоп ^{13}C . Величина сдвига зависит от процентного содержания более тяжелого изотопа. Отсюда можно сделать вывод, что при изотопическом замещении в графене более тяжелым изотопом произойдет открытие запрещенной зоны [4]. Такое замещение следует осуществить с помощью метода нейтронного облучения. Наиболее подходящими для облучения являются тепловые нейтроны с энергией от 0,025 до 1 эВ (рис. 3).

Так, среднее значение глубины поглощения нейтронов заготовкой из графита L определяется по формуле:

$$L = 1/K_{0\sigma_i} \quad (1)$$

где K_0 – число атомов графита в 1 см^3 , равное $3,402 \cdot 10^{23} \text{ ат/см}^3$;

$\sigma_i = 0,0033 \text{ барн}$ – сечение поглощения изотопа ^{12}C .

После подстановки значений K_0 и σ_i в формулу (1) получим глубину поглощения нейтронов, которая составит $L = 8,91 \text{ м}$. Эта цифра свидетельствует о том, что на глубине в несколько сантиметров, например, каждый второй изотоп ^{12}C будет переведен с высокой вероятностью в изотоп ^{13}C . При этом величина запрещенной зоны в графене достигнет более 600 мЭВ.

Время, которое требуется для повышения концентрации изотопа ^{13}C в заготовке из графита, можно рассчитать по формуле (2). В частности, интегральный поток ϕt для 50% перевода ^{12}C в изотоп ^{13}C равен:

$$\phi t = 0,5/\sigma_i, \quad (2)$$

где ϕ – интенсивность нейтронного потока; t – время облучения.

При интенсивности нейтронного потока 10^{19} н/с см^2 время t составит 175,365 суток. С увеличением интенсивности на порядок для облучения потребуется 17,54 суток. Полученные цифры подтверждают реальность получения полупроводникового графена с помощью тепловых нейтронов. Величину запрещенной зоны можно вывести из следующей пропорции:

$$x = [32(\text{см}^{-1}) \cdot 300(\text{мЭВ})]/14,2(\text{см}^{-1}) = 676(\text{мЭВ}),$$

где 32 см^{-1} – частотный сдвиг оптического фона при 50-процентном замещении изотопов.

Облученную заготовку из графита механическим путем следует расщепить на отдельные атомарные полоски графена, которые слабо связаны между собой. При соприкосновении с химически чистой и ровной поверхностью подложки из окиси кремния на поверхности останется слой графена, площадь которого способна достигнуть 1 см^2 . Нейтронное облучение можно осуществлять на исследовательских реакторах РФ.

С запуском промышленных мощностей по выпуску полупроводникового графена наступит эра графеновой нанoeлектроники.

Таков вариант решения задачи. И он же одновременно наш прогноз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Графен. [Электронный ресурс]: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B5%D0%BD>. Доступ 27.11.2015.

2. Поверенная М. Графеновый бум: итоги // Нанотехнологическое сообщество. – Выпуск 26 октября 2012. [Электронный ресурс]: http://www.nanometer.ru/2012/10/26/13512365078102_298275.html. Доступ 27.11.2015.

3. За создание графена присуждена Нобелевская премия в области физики. [Электронный ресурс]: <http://venture-biz.ru/tekhnologii-innovatsii/93-grafen-nobelevskaaya-premiya>. Доступ 27.11.2015.

4. Журавлева Л. М., Плеханов В. Г. Изотопическое создание полупроводникового графена // Нанотехника. – 2012. – № 3. – С. 34–39.

5. Графен. Физика. [Электронный ресурс]: http://4108.ru/u/grafen_fizika. Доступ 27.11.2015.

6. Юдинцев В. Графен. Нанoeлектроника стремительно набирает силы // Электроника, наука, технология, бизнес. – 2009. – № 6. [Электронный ресурс]: <http://www.electronics.ru/journal/article/269>. Доступ 27.11.2015.

7. Самардак А. Графен: новые методы получения и последние достижения // Элементы. – Выпуск 30.09.2008. [Электронный ресурс]: http://elementy.ru/novosti_nauki/430857/Grafen_novye_metody_polucheniya_i_poslednie_dostizheniya. Доступ 27.11.2015.

8. Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., Firsov, A. A. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films // Science. V. 306. P. 666–669. 22 October 2004.

9. Bekyarova E., Itkis M. E., Cabrera N., Zhao B., Yu A., Gao J., Haddon R. C. Electronic Properties of Single-walled Carbon Nanotube Networks // J. Am. Chem. Soc. 2005. Vol. 127, No. 16. P. 5990–5995.

10. Palnitkar U. A., Kashid R. V., More M. A., Joag D. S., Panchakarla L. S., Rao C.N.R. Remarkably Low Turn-on Field Emission in Undoped, Nitrogen-doped, and Boron-doped Graphene // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 97, № 6. P. 063102–063102.

11. Чернозатонский Л. А., Сорокин П. Б., Белова Е. Е., Брюнинг Й., Фёдоров А. С. Сверхрешетки, состоящие из «линий» адсорбированных пар атомов водорода на графене // Письма в ЖЭТФ. – 2007. – Т. 85. – № 1. – С. 84–89.

12. Новосёлов К. С. Графен: Материалы Флатландии // УФН. – 2011. – Т. 181. – С. 1299–1311.

13. McCann E., Koshino M. The Electronic Properties of Bilayer Graphene // Rep. Prog. Phys. 2013. Vol. 76, № 5. P. 056503(28).

14. Чернозатонский Л. А., Сорокин П. Б., Белова Е. Е., Брюнинг Й., Фёдоров А. С. Сверхрешетки металл-полупроводник (полуметалл) на графитовом листе с вакансиями // Письма в ЖЭТФ. – 2006. – Т. 84. – № 3. – С. 141–145. ●

Координаты авторов: Журавлева Л. М. – zhlubov@mail.ru, Никулина Ю. А. – yulcka1995@mail.ru, Лебедева А. К. – anka2381105@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 02.06.2015, актуализирована 27.11.2015, принята к публикации 28.11.2015.



PROSPECTS OF GRAPHENE NANO ELECTRONICS

Zhuravleva, Lyubov M., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.
Nikulina, Yulia A., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.
Lebedeva, Anna C., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

ABSTRACT

The article with regard to transport developments deals with topical issues of improving electronics engineering and of transition to new technological structures associated with nanotechnology. It is noted that the main direction of evolution of nanoelectronics is linked to new electronics components based on new materials like graphene. Possibility and prospect of

replacing traditional and most used silicon materials with graphene are reviewed. Brief information about methods of manufacturing, benefits and advantages of the use of graphene is followed by the arguments in favor of development of technique capable to open the band gap, allowing transition of graphene into semiconductor. Methods of mass commercial manufacturing of graphene semiconductor are discussed.

Keywords: transport, science, functional material, graphene, graphite, electronics, nanoelectronics, nanotechnology.

Background. Development and implementation of a long-term program of railway network development is inextricably linked to the issues of improving the quality indicators of basic elements of optical fiber information transmission systems (OFITS). Improving optoelectronic characteristics of semiconductor lasers, photodetectors, optical modulators directly affect the quality of transmission of service information through operational and technological communication, process control efficiency and traffic safety. Currently, the main focus of raising the technical level of the element base of optoelectronics is to improve the quality of the functional material (increasing the speed of the charge carriers, reducing the inertia of the environment). One of the most promising materials of optoelectronics is graphene.

Objective. The objective of the authors is to review advantages and to consider prospects of graphene use in transport-related nanoelectronics.

Methods. The authors use general scientific and engineering methods, comparative analysis.

Results. Graphene is a two-dimensional allotropic modification of carbon, formed by a single atom thick layer of carbon atoms in the state of sp^3 -hybridization and connected within a two-dimensional hexagonal crystal lattice. It can be represented as a single graphite plane, separated from the bulk crystal [1].

Graphene combines unique properties: high mechanical strength, electrical and thermal conductivity, gas impermeability, transparency to light, etc., making it an attractive material for many applications, including transport equipment and machinery.

Thus, the mobility of electrons in graphene at room temperature is comparable to the speed of light [2], Young's modulus is equal to 1 TPa, internal resistance to deformation – 130 GPa, thermal conductivity is above 3000 W, the ability to maintain

an extremely high density of current (a million times higher than copper). However, some of these characteristics are fixed only in samples of highest quality obtained under mechanical delamination of graphene flakes (Pic. 1) using a flexible tape and through their subsequent application to special substrate of hexagonal boron nitride.

Properties of graphene and its use (Pic. 2) are very dependent on the quality of material, substrate, type of defects, etc. which are derivatives for the most part of the method and conditions of production.

Extent and timing of implementation of graphene as a functional material in the final product, especially electronics, are connected to the problems of industrial production in large quantities of graphene sheets with dimensions of a few centimeters. Thus methods for obtaining graphene can be divided into three classes:

- Graphene or flake-shaped recovered graphene oxide for composite materials, conductive inks, etc. ;
- Flat graphene for low-performance and inactive devices;
- Flat graphene for high-performance electronic devices.

Industrial methods for graphene production are presented in the table 1.

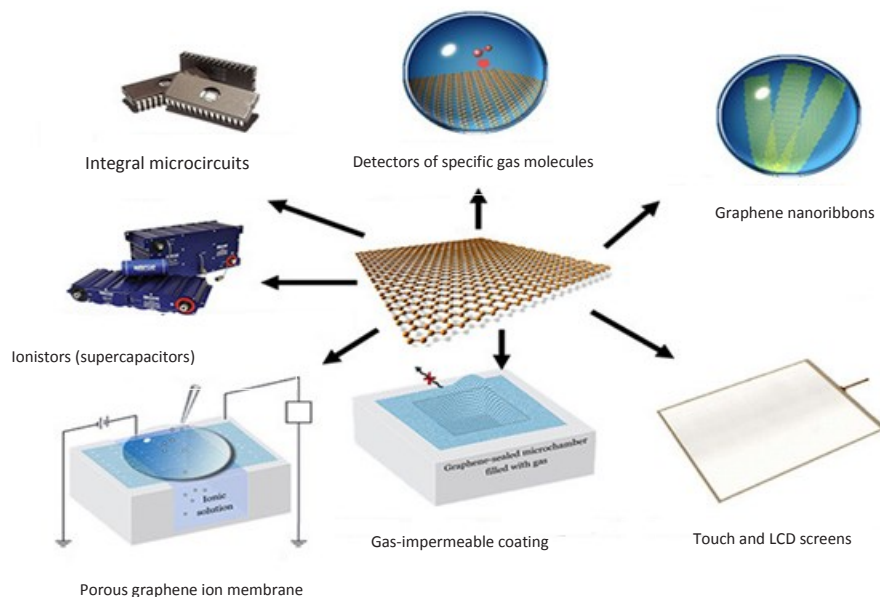
The main area of application of graphene is nanoelectronics (high-frequency transistors, photodetectors, optical modulators, lasers with mode synchronization, optical polarizers, etc.) [3].

Of particular note is the importance of creating graphene-based photodetectors. In contrast to semiconductor photodetectors having a limited width of the light absorption graphene can absorb light of any color (full spectrum). Thus, graphene has high capacity, which makes it an indispensable material for high speed data transmission systems built with optical fiber components.

However, graphene could replace silicon only in the case of opening in a band gap (conversion of

Pic. 1. Graphene.





Pic. 2. Areas of application of graphene.

Table 1

Industrial methods for obtaining graphene

Method	Crystallite size (microns)	Sample size (mm)	Mobility of charge carriers (room temp.) ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	Area of application
Mechanical flaking-off	>1000	>1	$>2 \cdot 10^5$ and 10^6 (at low temperature)	Research
Chemical flaking-off	$\leq 0,1$	—	100 (for a layer of flakes, overlapping each other)	Coatings, paints / inks, composite materials, transparent conductive layers, capacitors, bioapplications
Chemical flaking-off through graphene oxide	~100	—	1 (for a layer of flakes, overlapping each other)	Coatings, paints / inks, composite materials, transparent conductive layers, capacitors, bioapplications
CVD	1000	~1000	10000	Photonics, nanoelectronics, transparent conductive layers, sensors, bioapplications
SiC	50	100	10000	High-frequency transistors and other electronic devices

grapheme-semimetal into graphene-semiconductor). It is necessary not only to open a band gap, but also to make it commensurate with the width of the band gap of silicon. There are several ways to create a semiconductor graphene:

- 1) coating strips of graphene with chemical elements affecting electrical conductivity of graphene;
- 2) mechanical uniaxial stress on the strip of graphene.

The main disadvantage of those methods is complexity of implementation in industrial environment.

Isotopic method (changing number of neutrons in the nucleus while number of protons is constant) seems to be most appropriate method for mass production of semiconductor material from graphene. With addition of one neutron in the carbon nucleus, a renormalization of the electron energy and the increase (or opening) in a band gap occurs. Thus, the replacement of the light isotope ^{12}C with a heavier ^{13}C

increases the energy of interband transitions, which leads to changes in the frequency of the optical phonon mode.

It is known that uniaxial mechanical tension of 1% of the corresponding peak for atomic bonds leads to formation of a band gap with a size of 300 meV. This is indicated by the red optical phonon frequency shift in the Raman spectrum, equal to $14,2 \text{ cm}^{-1}$ [4]. Similar changes occur in isotopic substitution in graphene of ^{12}C isotope by the isotope ^{13}C . The magnitude of the shift depends on the percentage of the heavier isotope. It can be concluded that in case of isotopic substitution in graphene by a heavier isotope opening of the band gap will occur [4]. Such replacement must be done using the method of neutron irradiation. Thermal neutrons with energy from 0,025 to 1 eV are most suitable for irradiation (Pic. 3).

Thus, the average value of neutron absorption depth by graphite preform L is given by:

$$L = 1/K_{0,017} \tag{1}$$



Flow of neutrons

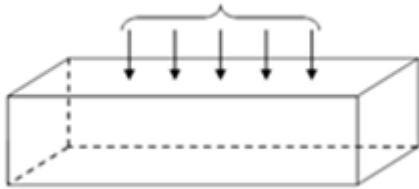


Fig. 3. Scheme of irradiation of graphite preform.

where K_0 is number of graphite atoms in 1 cm^3 , equal to $3,402 \cdot 10^{23} \text{ at/cm}^3$;

$\sigma_i = 0,0033 \text{ barn}$ – absorption cross-section of isotope ^{12}C .

After substituting values K_0 and σ_i in the formula (1) we obtain the neutron absorption depth which will be $L = 8,91 \text{ m}$. This figure indicates that at a depth of several centimeters, for example, every second isotope ^{12}C will be transferred with a high probability into isotope ^{13}C . The value of the band gap in graphene will reach more than six hundred meV.

The time required to increase concentration of the isotope ^{13}C in the graphite preform can be calculated according to the formula (2). In particular, the integrated flow ϕt for 50% transfer of ^{12}C into the isotope ^{13}C is equal to:

$$\phi t = 0,5/\sigma_i, \quad (2)$$

where ϕ is intensity of neutron flow;

t is time of exposure.

When the intensity of neutron flow is 10^{19} n/s cm^2 time t is 175,365 days. If intensity is increased by an order (by 10 times), then irradiation will require 17,54 days. These figures confirm the reality of obtaining semiconductor graphene using thermal neutrons. The magnitude of the band gap can be deduced from the following proportion:

$x = [32 (\text{cm}^{-1}) \cdot 300 (\text{meV})]/14,2 (\text{cm}^{-1}) = 676 (\text{meV})$, where 32 cm^{-1} is frequency shift of the optical phonon at 50 percent substitution of isotopes.

Conclusion. The irradiated preform of graphite should be split mechanically into separate atomic strips of graphene that are poorly linked. Once in contact with a chemically clean and smooth surface of the substrate of silicon oxide, a graphene layer remains on the surface, which is able to reach an area of 1 cm^2 . Neutron irradiation can be performed on research reactors RF. With the launch of industrial facilities for production of semiconductor graphene an era of graphene nanoelectronics will come.

This is an option for solving the problem. And it is at the same time our forecast.

REFERENCES

1. Graphene. [Electronic source]: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B5%D0%BD>. Last accessed 27.11.2015.

2. Poverennaya, M. Graphene boom. Results [Grafenovyj bum: itogi]. *Nanotekhnologicheskoe soobshhestvo*, Iss. October 26, 2012. [Electronic source]: http://www.nanometer.ru/2012/10/26/13512365078102_298275.html. Last accessed 27.11.2015.

3. Nobel Prize in physics was awarded for creation of graphene [Za sozhdanie grafena prisuzhdena Nobelevskaja premija v oblasti fizike]. [Electronic source]: <http://venturebiz.ru/tehnologii-innovatsii/93-grafen-nobelevskaya-premiya>. Last accessed 27.11.2015.

4. Zhuravleva, L. M., Plekhanov, V. G. Isotopic creation of semiconductor graphene [Izotopicheskoe sozhdanie poluprovodnikovogo grafena]. *Nanotekhnika*, 2012, Iss. 3, pp. 34–39.

5. Graphene. Physics [Grafen. Fizika]. [Electronic source]: http://4108.ru/u/grafen_-fizika. Last accessed 27.11.2015.

6. Yuditsev, V. Graphene. Nanoelectronics is rapidly gaining strength [Grafen. Nanoelektronika stremitel'no nabiraet sily]. *Elektronika, nauka, tehnologija, biznes*, 2009, Iss. 6. [Electronic source]: <http://www.electronics.ru/journal/article/269>. Last accessed 27.11.2015.

7. Samardak, Alexander. Graphene, new methods of synthesis and the latest advances [Grafen: novye metody polucheniya i poslednie dostizheniya]. *Elementy*. Iss. 30.09.2008. [Electronic source]: http://elementy.ru/novosti_nauki/430857/Grafen_novye_metody_polucheniya_i_poslednie_dostizheniya. Last accessed 27.11.2015.

8. Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., Firsov, A. A. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, V. 306, 22 October 2004, pp. 666–669.

9. Bekyarova, E., Itkis, M. E., Cabrera, N., Zhao, B., Yu, A., Gao, J., Haddon R. C. Electronic Properties of Single-walled Carbon Nanotube Networks. *Journal of American Chemical Society*, 2005, Vol. 127, No. 16, pp. 5990–5995.

10. Palnitkar, U. A., Kashid, R. V., More, M. A., Joag, D. S., Panchakarla, L. S., Rao, C.N.R. Remarkably Low Turn-on Field Emission in Undoped, Nitrogen-doped, and Boron-doped Graphene. *Applied Physics Letters*, 2010, Vol. 97, No. 6, pp. 063102–063102.

11. Chernozatonsky, L. A., Sorokin, P. B., Belova, E. E., Bruening, J., Fedorov, A. S. Superlattices consisting of «lines» of adsorbed hydrogen atom pairs on graphene [Sverhreshetki, sostojashhie iz «linij» adsorbirovannyh par atomov vodoroda na grafene]. *Pis'ma v ZhETF*, 2007, Vol. 85, Iss. 1, pp. 84–89.

12. Novoselov, K. S. Graphene: Materials of Flatland [Grafen: Materialy Flatlandii]. *UFN*, 2011, Vol. 181, pp. 1299–1311.

13. McCann E., Koshino M. The Electronic Properties of Bilayer Graphene // *Reports on Progress in Physics*, 2013, Vol. 76, No. 5, pp. 056503(28).

14. Chernozatonsky, L. A., Sorokin, P. B., Belova, E. E., Bruening, J., Fedorov, A. S. Superlattices metal – semiconductor (semimetal) on a graphite sheet with vacancies [Sverhreshetki metall – poluprovodnik (polumetall) na grafitovom liste s vakansijami]. *Pis'ma v ZhETF*, 2006, Vol. 84, Iss. 3, pp. 141–145. ●

Information about the authors:

Zhuravleva, Lyubov M. – Ph.D. (Eng.), associate professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, zhlyubov@mail.ru.

Nikulina, Yulia A. – 4th year student of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, yulcka1995@mail.ru.

Lebedeva, Anna C. – 4th year student of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, anka238105@yandex.ru.

Article received 02.06.2015, revised 27.11.2015, accepted 28.11.2015.