

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].

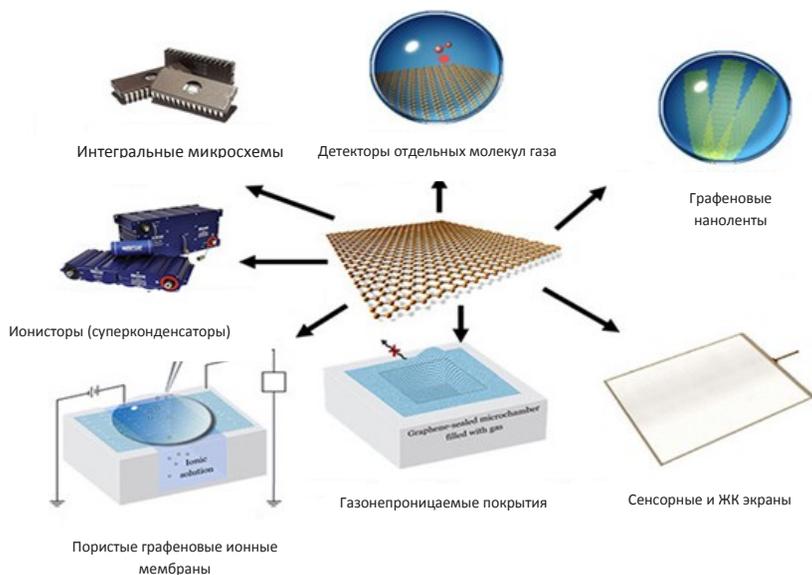


Рис. 2. Области применения графена.

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.

