

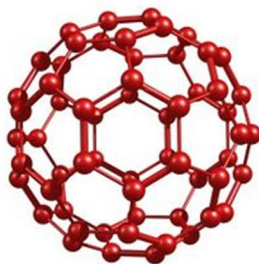
Графен (применение в технике СВЧ)

В данной работе описаны первые шаги получения атомарно тонких слоев углерода, получивших название графен. Дается краткое описание технологии получения графена, описана зонная структура графена и способы его применения в технике СВЧ: полевые транзисторы, невзаимные устройства на основе графена в магнитном поле.

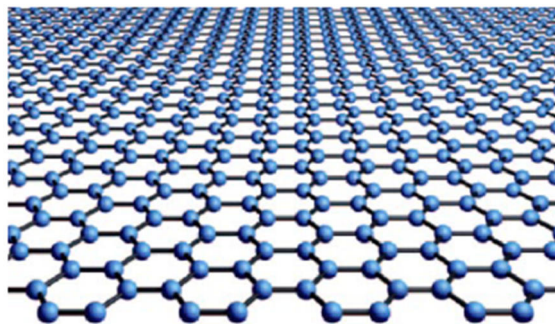
Ключевые слова: графен, зонная структура, транзистор, гиротропность

В октябре 2004 г. в журнале “**Science**” была опубликована статья А. Гейма, К. Новоселова, С. Морозова и др. «Эффект электрического поля в атомарно тонких пленках углерода», в которой впервые были описаны свойства графена. В краткой аннотации к статье авторы писали [1]: «Мы сообщаем о встречающемся в природе двумерном материале - графене, который можно рассматривать как гигантскую молекулу фуллерена, - описываем также его электронные свойства и демонстрируем полностью металлический полевой транзистор, в котором однозначно проявляется баллистический транспорт заряда на субмикронных расстояниях даже при комнатной температуре».

На рис.1 показана схема молекулы фуллерена в виде сферы, на поверхности которой расположены 60 или 70 атомов углерода [2]. Рядом показана схема кристаллической структуры графена, образованной атомами углерода, выстроенными в решетку «пчелиные соты» [1].



Молекула фуллерена



Кристаллическая структура графена

Рисунок 1

Работы над физикой графена интенсивно продолжались [3]. В 2010 г. Сергей Морозов, активный сотрудник А. Гейма и К. Новоселова, защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук [4]. Высказанную К. Новоселовым идею создания полевого транзистора на основе канала из графена после

публикации 2004 г. активно развивали коллеги из технического университета г. Ильменау [5].

5 октября 2010 г. по решению Шведской Королевской академии наук Нобелевская премия по физике была присуждена **Андрею Гейму** и **Константину Новоселову** (Университет Манчестер, Великобритания) за *новаторские эксперименты по исследованию двумерного материала графена*. Перевод лекции, произнесенной при вручении Нобелевской премии, опубликован в журнале Успехи физических наук [6].

На первых шагах для изготовления и элементарного исследования слоя графена использовалось метод расслоения верхних слоев кристалла графита [6]. Чтобы отщепить несколько верхних слоев графита от объемного кристалла, использовалась клейкая лента. Лента с отщепленными чешуйками графита прижимается к выбранной подложке (например, Si/SiO₂). Некоторые чешуйки остаются на подложке после удаления (растворения) липкой ленты. Толщина слоя SiO₂ выбрана порядка 300 нм. Тонкие графитовые чешуйки могут иметь толщину порядка нанометра - тогда их свойства близки к свойствам графена. На рис.2 показана структура, состоящая из проводящего кремния n⁺Si (подложка), изолирующего слоя SiO₂ и пленки графена с металлическими электродами для измерения электрических параметров пленки графена.

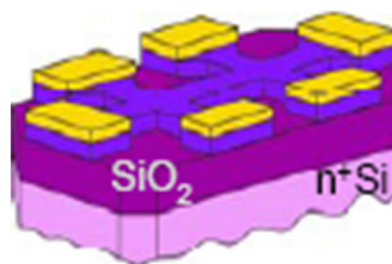


Рисунок 2

Разумеется, метод клейкой ленты не может найти применения при изготовлении действующих приборов. Получение пленок графена, пригодных для практического применения, должно быть основано на традиционных методах пленочной технологии. Назовем два из них [6, 7]. 1) Нанесение углерода на поверхность подложки химическим осаждением из паровой или газовой среды объединяются общей терминологией Chemical Vapor Deposition (CVD). 2) Разложение тонкого слоя карбида кремния при весьма высокой температуре приводит к испарению избыточного кремния и кристаллизации углерода в виде тонкого слоя графена.

Недавно в Сингапуре разработан способ получения слоя графена на шайбе Si/SiO₂ диаметром 200 мм на базе полупроводниковой технологии массового производства. В основе способа лежит CVD на подслое меди с последующим травлением меди и спеканием слоя графена с подложкой [8].

Вернемся к кристаллической структуре графена (рисунок 1). Каждый атом углерода может иметь четыре валентных связи. Три из них использованы при построении решетки в виде «пчелиных сот». Свободная валентная связь служит основой для формирования

системы подвижных носителей заряда (электронов или дырок). На рисунке 3 показана зонная структура типичного полупроводника и графена. При отсутствии внешнего электрического поля или легирующих примесей зона проводимости и валентная зона графена смыкаются в одной точке, образуя эффективную частицу с нулевым зарядом и нулевой массой. Проводник, обладающей такой зонной структурой, называют полуметаллом.

На рисунке 4 показано изменение зонной структуры графена при воздействии на него внешнего электрического поля, нормального поверхности.

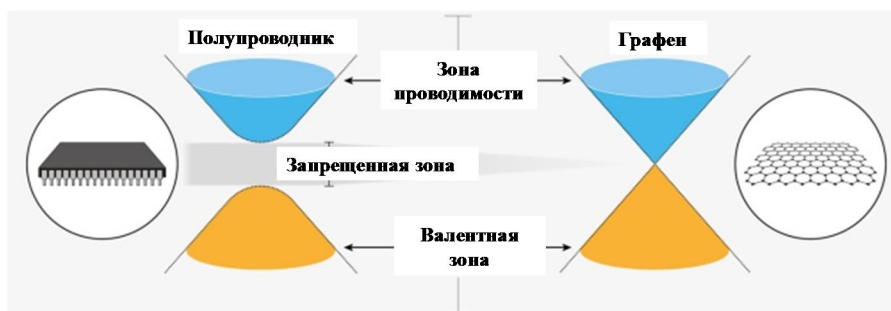


Рисунок 3

Изменение напряженности приложенного электрического поля приводит к изменению концентрации и знака носителей заряда в слое графена. При изменении зонной структуры электрическое сопротивление пленки графена изменяется на несколько порядков.

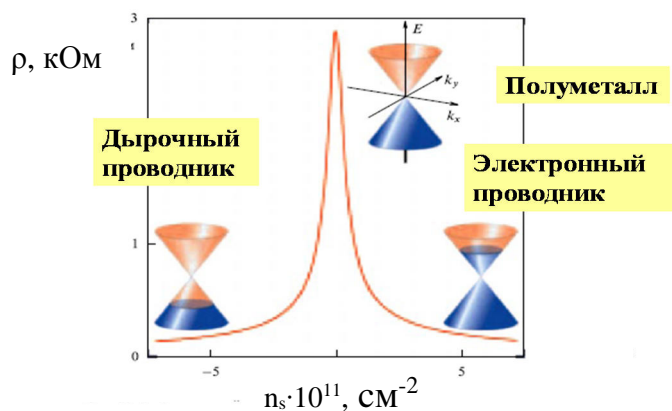


Рисунок 4

На рисунке 5 показана схема полевого транзистора, в котором проводящий канал образован пленкой графена [5].

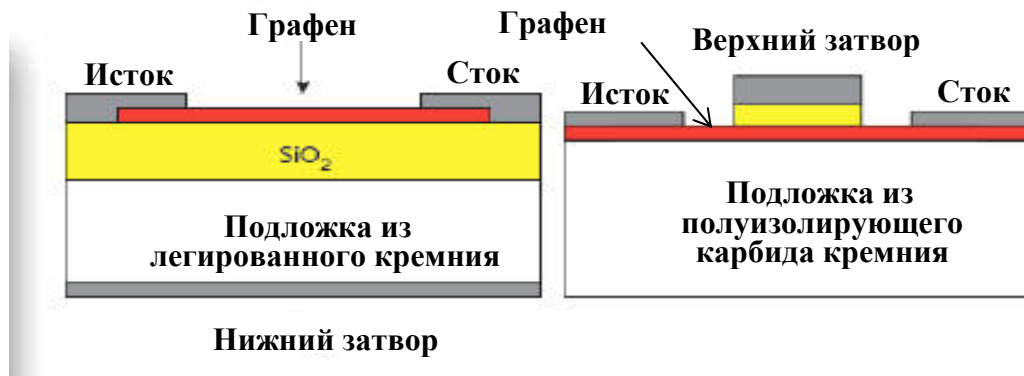


Рисунок 5

Принцип действия транзистора объясняется изменением сопротивления канала в под воздействием управляющего поля, действующего между каналом и затвором. Ток стока обратно пропорционален сопротивлению канала (рисунок 6, а).

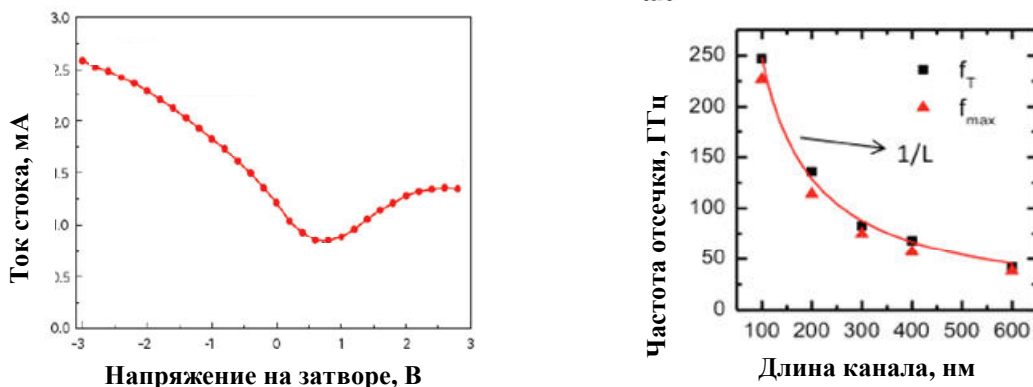


Рисунок 6

Высокая подвижность носителей заряда в графене обеспечивает высокую частоту отсечки транзистора при умеренно коротком канале (рисунок 6, б). Частота отсечки обратно пропорциональна длине канала. На поле рисунка показаны f_{max} - максимальная частота генерации и f_T - максимальная частота усиления мощности.

Недавно описана возможность усиления мощности в терагерцовом диапазоне в структуре, подобной НЕМТ транзистору, в которой проявляется отрицательная дифференциальная проводимость между затвором транзистора и 2D электронным газом [9]. Фундаментальный механизм, обеспечивающий усиление в терагерцовом диапазоне в описываемом приборе, – это распространение плазменных волн в 2D электронном газе в условиях существования отрицательной дифференциальной проводимости между затвором и 2D электронным газом. Усиление на частоте 2 или 4 ГГц достигает 10 дБ.

На рисунке 7, а показана пленка графена, расположенная в постоянном магнитном поле с индукцией B_0 . Нормально к поверхности слоя графена на него падает плоская электромагнитная волна. Электрическое поле волны возбуждает в слое графена поверхностный электрический ток. Под действием магнитного поля в проводящей пленке возникает поверхностный ток, перпендикулярный направлению электрического поля в

падающей волне, то есть происходит поворот плоскости поляризации волны. Это, в сущности, проявление эффекта Холла. Как показано на рисунке 7, а поворот плоскости поляризации происходит по часовой стрелке как для волны, падающей справа налево, так и для волны, падающей слева направо. Так же происходит вращение плоскости поляризации волны, распространяющейся в намагниченном феррите (эффект Фарадея).

Слой графена прозрачен для электромагнитной волны и в то же время обладает достаточной проводимостью. Проводимость графена в магнитном поле проявляет свойства не взаимности, подобно не взаимности феррита в магнитном поле. Интересным примером практического использования графена является осуществление пространственного «изолятора» на основе графена. На рисунке 7,б показана схема пространственного «изолятора» на основе графена. В «изоляторе», наряду со слоем графена в магнитном поле, имеются два поляризационных фильтра, которые образованы проволочными решетками, нанесенными на диэлектрические пластины. Волна, в которой направление вектора электрического поля совпадает с ориентацией решеток, отражается от поляризационного фильтра. Напротив, волна, в которой направление вектора электрического поля перпендикулярно ориентации решеток, свободно проходит через фильтр.

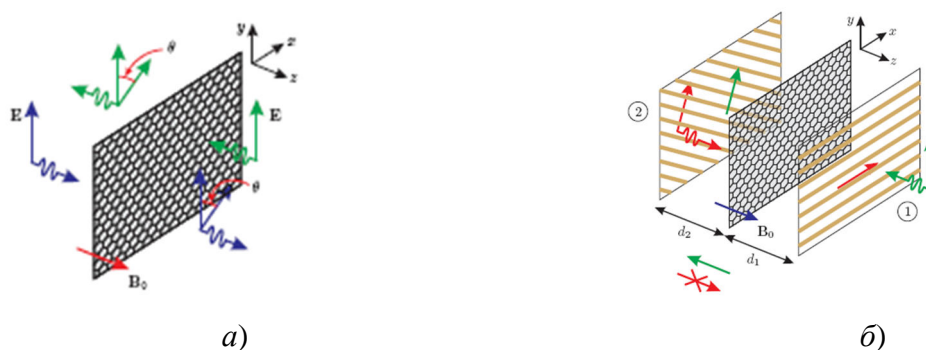


Рисунок 7

Волна, распространяющаяся в направлении 1 – 2, испытывает поворот плоскости поляризации на 45° и проходит без отражений через поляризационный фильтр. Волна, распространяющаяся в направлении 2 – 1, полностью отражается.

С момента открытия графена прошло 10 лет. За это время изучены физические свойства графена; разработана технология получения пленок графена, близкая к промышленному производству; предложен и испытан ряд устройств, основанных на использовании графена (в частности, в технике СВЧ). Ряд фирм (например, IBM) [11] разрабатывают пути применения графена в различных областях электроники.

Библиографический список

1. K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morosov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, A.A. Firsov, «Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films», *Science* Vol. 306, No. 6596, pp. 666 - 669, October 22, 2004.
2. Р.Е. Смоли, «Открывая фуллерены», (Нобелевская лекция, Стокгольм, 7 декабря 1996), УФН, №3, стр.323 -331, 1968 г.

3. K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, M.I. Katsnelson, I.V. Grigorieva, S.V. Dubonos, A.A. Firsov, "Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene", *Nature* Vol. 438, pp. 197–200 (2005).
4. С.В. Морозов, «Электронные свойства графена и других двумерных кристаллов». Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, Специальность 05.27.01, Черноголовка 2010 г.
5. Frank Schwierz, «Graphene transistors», *Nature Nanotechnology*, 5 (7): 487-496, JUL 2010
6. К.С. Новоселов, «Графен: материал Флатландии» (Нобелевская лекция, Стокгольм, 8 декабря 2010 г.) *УФН*, том 181, №12, стр. 1299 – 1311, 2011 г.
7. K. S. Novoselov, V. I. Fal'ko, L. Colombo, P. R. Gellert, M. G. Schwab and K. Kim, « A roadmap for grapheme», *NATURE*, Vol. 490, pp. 191-200, 11 Oct. 2012, doi:10.1038/nature11458.
8. Libo Gao, Guang-Xin Ni, Yanpeng Liu, *et al.* (Authors from Singapore), « Face-to-face transfer of wafer – scale graphene films», *NATURE*, Vol. 505, pp. 190т-194, 9 January 2014, doi:1038/nature12763.
- [9] Berardi Sensale-Rodriguez, «Graphene-insulator-graphene active plasmonic terahertz devices», *Appl. Phys. Lett.* Vol.103, p.123109 (2013).
- [10] D.L. Sounas and Ch. Caloz, «Electromagnetic nonreciprocity and gyrotropy of graphene», *Appl. Phys. Lett.* 98, 021911, 2011; *IEEE AP-S/URSI* (2011), pp. 1597 – 1600.
- [11] Shu-Jen Han, *IBM Research*, «Graphene circuit ready for wireless», <http://ibmresearchnews.blogspot.ru>