

ГРАФЕН И ГЕКСАГОНАЛЬНЫЙ НИТРИД БОРА: СОВМЕСТНЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ В НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

А.А. Троицкий

Графен в последнее десятилетие стал одним из самых привлекательных материалов для микро- и нанoeлектроники. Графен представляет собой монослой кристаллического графита и состоит из атомов углерода, составляющих правильную гексагональную элементарную ячейку (рис. 1).

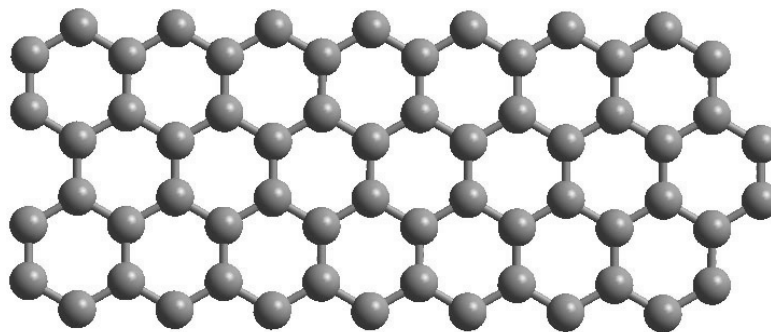


Рис. 1. Структура графена

Детальное теоретическое описание зонной структуры, проводимости, зоны Бриллюэна графита (и графена в частности) было проведено в 1947 году [1], но сам материал был получен микромеханическим методом лишь в 2004 году, что дало мощнейший толчок изучению различных свойств и созданию всевозможных прототипных устройств на его основе.

Графен находится в центре внимания не только из-за своих электрических, прочностных и прочих характеристик, а также из-за того факта, что это первый полученный двумерный кристалл. Интересно отметить, что на протяжении нескольких десятилетий существование таких двумерных структур считалось невозможным с точки зрения термодинамического равновесия (Ландау, Мермин и др.) [2].

Основными замечательными свойствами этого материала являются высокая подвижность носителей заряда (при нормальных условиях в 10 раз больше чем в кремнии) [3], амбиполярный полевой эффект [4], баллистический транспорт при нормальных условиях [5], возможность изучения квантового эффекта Холла [6] и др.

Однако с графеном не все так просто. Во-первых, вблизи границы зоны Бриллюэна закон дисперсии имеет линейную зависимость, а зона проводимости и валентная зона смыкаются в точке Дирака – таким образом, графен обладает нулевой запрещенной зоной (рис. 2) [7]. Отсутствие зазора между зонами может затруднить создание эффективных транзисторов на основе графена из-за невозможности переключения между состояниями транзистора. Во-вторых, производство одного слоя бездефектного графена большого размера еще не отлажено. В-третьих, возникают сложности с выбором подходящей изолирующей подложки, а также переносом графена с поверхности проводящего металла на диэлектрик без нарушения размеров и структуры монослоя графена. Несмотря на эти и другие ограничения графен по-прежнему захватывает умы ученых.

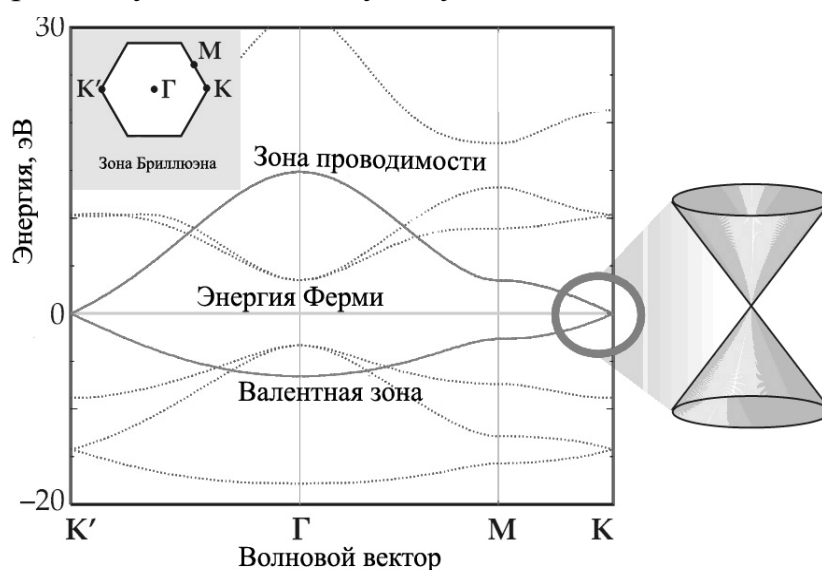


Рис. 2. Зона Бриллюэна и закон дисперсии для графена

Однако пристальное внимание только к графену, как отмечает один из его «создателей», является неоправданным, так как графен оказался не единственным двумерным кристаллом, который можно получить как на подложке, так и во взвешенном состоянии. Монослой гексагонального нитрида бора (h-BN) – еще один пример двумерного кристалла. Причинами меньшего интереса к нему как к материалу нанoeлектроники можно объяснить, во-первых, очень большой шириной запрещенной зоны идеального образца (~5,97 эВ), во-вторых, сложной по сравнению с графеном методикой получения этих образцов [8].

Монослой h-BN может помочь в разрешении проблем, обозначенных выше. Пленка материала рассматривается как один из лучших вариантов подложки для эпитаксиально выращенного графена. Во-первых, h-BN также имеет гексагональную структуру, а расхождение в параметре решетки составляет всего 1,7 %, что способствует формированию больших плоских образцов графена на подложке. Во-вторых, в чистом виде h-BN является широкозонным полупроводником и в ситуации с графеном его можно рассматривать как диэлектрик. В-третьих, h-BN считается относительно инертным материалом, на поверхности которого отсутствуют ловушки заряда и свободные связи, присутствующие, например, в подложках из кремния и диоксида кремния [8]. И, наконец, в-четвертых, было предсказано возникновение запрещенной зоны в графене в планарной системе графен/h-BN (рис. 3), однако экспериментально такого эффекта пока еще не обнаружено [8, 9, 10].

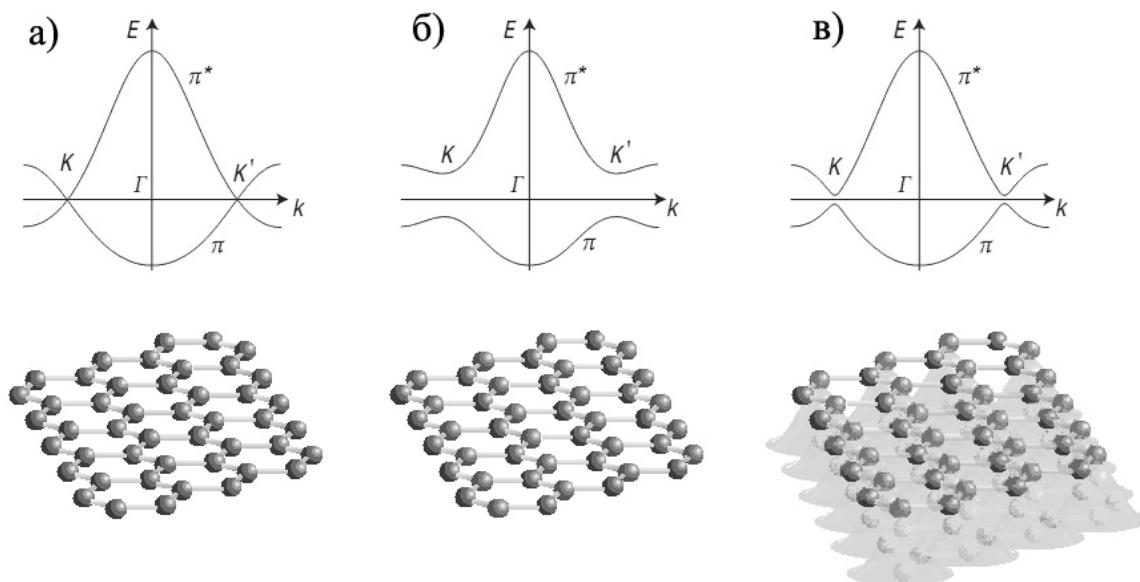


Рис. 3. Закон дисперсии для графена (а), h-BN (б) и эпитаксиальный графен на подложке (в)

Кроме подложки для графена рассматриваются и другие варианты применения гексагонального нитрида бора в наноэлектронике. Самыми интересными направлениями изучения материала становятся структуры с различным количеством и порядком слоев h-BN и графена [11], влияние дефектов, адатомов и типов границ на электрические свойства и, наконец, пленочные гетероструктуры, содержащие различный процентный состав графена/h-BN и имеющие различное расположение доменов, в которых будет возможно получать желаемые значения запрещенной зоны для конкретных применений [12]. Можно сделать предположение, что самые важные достижения в углеродной наноэлектронике будут связаны с применением как больших пленок h-BN, так и его мелких доменных структур.

Библиографический список

1. Wallace, P.R. The band theory of graphite / P.R. Wallace // *Phys. Rev.* – 1947. – V. 71, № 9. – P. 622–634.
2. Geim, A. The rise of graphene. / A.K. Geim, K. S. Novoselov // *Nature Mater.* – 2007. – V. 6. – P. 183–191.
3. Schwierz, F. Graphene Transistors / F. Schwierz // *Nature Nanotech.* – 2010. – V. 5, P. 487–496.
4. Gong, Gu. Field effect in epitaxial graphene on a silicon carbide substrate / Gong Gu, Shu Nie, R. M. Feenstra // *Appl. Phys. Lett.* – 2007. – V. 90, 253507.
5. Geim, A. Graphene: Status and Prospects. / A.K. Geim // *Science.* – 2009. – V. 324, P. 1530–1534.
6. Williams, J.R. Quantum Hall Effect in a Gate-Controlled p-n Junction of Graphene / Williams J.R., DiCarlo L., Marcus C.M. // *Science.* – 2007. – V. 317. – P. 638–641.
7. Geim, A. Graphene: Exploring Carbon Flatland / A.K. Geim, A.H. MacDonald // *Physics Today.* – 2007. – № 8. – P. 35–41.
8. Dean, C.R. Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics / C.R. Dean, A.F. Young, I. Eric // *Nanotech.* – 2010. – V. 5. – P. 722–726.
9. Novoselov, K. Mind the Gap / K.S. Novoselov // *Nature Mater.* – 2007. – V. 6. – P. 720–721.
10. Usachov, D. Quasifreestanding single-layer hexagonal boron nitride as a substrate for graphene synthesis / D. Usachov, V.K. Adamchuk // *Phys. Rev. B* – 2010. – V. 82, 075415.
11. Sławińska, J. Reversible modifications of linear dispersion Graphene between boron nitride monolayers / J. Sławińska, I. Zasada, P. Kosiński // *Phys. Rev. B.* – 2010. – V. 82, 085431.
12. Lijie, Ci. Atomic layers of hybridized boron nitride and graphene domains / Lijie Ci, Li Song, Chuanhong Jin // *Nature Mater.* – 2010. – V. 9. – P. 430–435.