

О проводимости графена

G. Shpenkov

Бельско-Бяла, Польша

e-mail: g.shpenkov@gmail.com

Частное решение волнового уравнения в сферических полярных координатах даёт расположение узлов стоячих волн в трёхмерном сферическом пространстве. Это решение впервые было представлено нами в графическом виде. Структура узлов стоячих волн подобна кристаллическому [1-3]. Расположенные последовательно в соответствии с квантовыми числами l и m , графические образы решения (с пронумерованными нами потенциальными узлами) образуют систему, которая, как оказалось, чётко коррелирует с периодичностью расположения элементов в периодической системе Д. И. Менделеева.

В итоге была обнаружена связь полученных решений с внутренней пространственной структурой атомов. Это неудивительно, поскольку атомы, как и все сущее во Вселенной, находящееся в состоянии постоянного колебательно-волнового движения, имеют волновую природу. Для прямой экспериментальной проверки открытия был выбран углерод, как один из наиболее распространённых элементов в природе, и его двумерное образование – графен.

Атом углерода ^{12}C , как следует из полученных в графическом виде решений, представляет собой элементарную нуклонную молекулу, оболочечно-узловая структура которого имеет: 5 полярных потенциально-кинетических узлов, расположенных вдоль оси z (при $m=0$), это узлы покоя и движения одновременно, а потому в данном стабильном изотопе углерода они пустые (незаполненные нуклонами); 6 кинетических полярно-азимутальных (пустых) узлов; 6 заполненных спаренными нуклонами потенциальных полярно-азимутальных узлов на двух волновых полярно-азимутальных оболочках – 2 узла на внутренней ($l=1, m=\pm 1$) и 4 узла на внешней ($l=2, m=\pm 1$) оболочках.

Двумерная гексагональная решётка графена, образованная из атомов углерода, имеющих оболочечно-узловое строение, должна быть анизотропной. Это, естественно, должно отражаться на физических параметрах графена, в частности, на его электрической проводимости. Эксперименты по проверке анизотропии последней проводились на

ненапряжённом первородном графене, на специально приготовленных образцах круглой формы. На основании полученных данных построены полярные диаграммы температурной зависимости проводимости. Все они имеют типичную для анизотропных материалов эллипсоидальную форму. Вдоль одного из направлений в плоскости графен ведет себя как полупроводник. В перпендикулярном направлении, вдоль цепочки связанных в графене пустых полярных потенциально-кинетических узлов, сопротивление в графене практически не зависит от температуры, подвижность носителей заряда высока – максимальна среди всех известных материалов.

Таким образом, анизотропия графена, следующая из оболочечно-узлового строения атомов углерода, была подтверждена экспериментально, а тем самым подтверждена и их волновая природа. Двумерная гексагональная решётка графена имеет вращательную симметрию 2-го порядка. Невидимые полярные узлы, расположенные вдоль оси симметрии z (при $m=0$), будучи связанными друг с другом, образуют в кристалле графена параллельную систему пустых каналов, благоприятствующих “баллистическому” (без рассеяния) движению носителей зарядов.

Поэтому становится понятным и объяснимым теперь, почему “*Graphene...is an interesting mix of a semiconductor...and a metal*” и “*Electrons in graphene ... have very long mean free paths*” [4], а также почему “*Carbon nanotubes can be metallic or semiconducting ,...*” [5].

[1] G.P. Shpenkov, Chapter 7 in “*The Mathematic of the Periodic Table*” (Nova Sci. Publishers, NY) 119-160 (2006).

[2] G.P. Shpenkov, Chapter 12 in “*Quantum Frontiers of Atoms and Molecules*” (Nova Science Publishers, NY) 277-324 (2011).

[3] Г.П. Шпеньков, Механизм образования связей в соединениях атомов, имеющих оболочечно-узловое строение. Сб. трудов Международной конференции “Аморфные и микрокристаллические полупроводники”, ФТИ им. Иоффе, СПб 3–5 июля 2023 г., 155–156.

[4] A.H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov and A. K. Geim, *The electronic properties of graphene*, Rev. Mod. Phys. 81 (2009).

[5] Tsuneya Ando, *The electronic properties of graphene and carbon nanotubes*, Review, NPG Asia Materials (2009) 1, 17–21; doi:10.1038/asiamat.2009.1.