



УДК 538.955-405
ББК 22.314

СПИНТРОНИКА – ТЕХНОЛОГИЯ БУДУЩЕГО

М.С. Сергеев

Каков путь развития электронных вычислительных машин? Как долго еще будет выполняться знаменитый закон Мура? И какие предпосылки несет с собой спинтроника? Над этими вопросами стоит задуматься всерьез уже сегодня. В данной работе предложен один из путей их разрешения.

Ключевые слова: наноэлектроника будущего, магнитные моменты, спинтроника, квантовая электроника, графен, косвенное взаимодействие.

Еще 15–20 лет назад многие даже и не задумывались над возможной заменой кремния. Мало кто мог предполагать, что уже в начале двадцать первого века между компаниями, производящими полупроводники, начнется настоящая «гонка нанометров» [2]. Постепенное сближение с наномиром заставляет задуматься: а что же будет дальше? Будет ли продолжен знаменитый закон Мура? Ведь с переходом на более тонкие производственные нормы перед разработчиками каждый раз предстают все более сложные задачи [1]. Многие специалисты вообще склонны считать, что через десяток-другой лет кремний приблизится к физически непреодолимой границе, когда создавать более тонкие кремниевые структуры уже будет невозможно [2]. Судя по последним исследованиям, одними из наиболее вероятных, но далеко не единственных кандидатов на должность «кремниезаменителей» являются материалы на основе углерода – углеродные нанотрубки и графен, которые, предположительно, могут стать основой наноэлектроники будущего [4].

В обычной твердотельной микроэлектронике информация представляется с помощью электрического заряда, то есть это привычная нам бинарная логика, где 1 означает наличие заряда на элементе и 0 – его отсутствие. Состояние магнитного момента при этом не за-

дано – собственные магнитные моменты частиц ориентированы хаотично (рис. 1).

Новая технология, бурно развивающаяся в последние годы, отличается тем, что использует дополнительную возможность представления информации с помощью магнитного момента квантовых частиц (рис. 2).

Так что же представляет собой эта технология, называемая спинтроникой, как наука?

Спинтроника (spintronics – от spintransportelectronics или spinbasedelectronics) – это область квантовой электроники, в которой для физического представления информации наряду с зарядом используется спин частиц, связанный с наличием у них собственного магнитного момента [8]. Спин (от англ. spin – *верчение, кружение*) в свою очередь можно было бы представить как результат вращения частицы вокруг своей оси (рис. 3).

Однако, несмотря на наглядность такого представления и очевидный смысл самого термина, классическая физика не может объяснить появление спина в результате вращательного движения частиц в трехмерном пространстве.

Понятие «спин» можно рассматривать с двух точек зрения в зависимости от направления представления. Так, с точки зрения квантовой теории, спин будет являться одним из параметров частицы, таким же как, например, масса частицы, только спин может иметь как положительное, так и отрицательное значения, что и будет являться логикой описания действий, похожей на логику заряда на элементе. С физической точки зре-

ния или, лучше сказать, с точки зрения не наноэлектроники спин будет являться некоторой степенью свободы частицы, но физическая точка зрения нас меньше интересует. Для того чтобы дать понять значимость спинтроники как науки, приведем следующий факт из истории существования науки. Учеными Альбертом Фертом и Петером Грюнбергом в 1988 г. было сделано открытие гигантского магнитного сопротивления [3]. Гигантское магнитное сопротивление – это квантово-механический эффект, наблюдаемый в тонких металлических пленках, состоящих из чередующихся ферромагнитных и проводящих немагнитных слоев. Эффект состоит в существенном изменении электрического сопротивления такой структуры при изменении взаимного направления намагниченности соседних магнитных слоев. Направлением намагниченности можно управлять, например, приложением внешнего магнитного поля. В основе эффекта лежит рассеяние электронов, зависящее от направления спина. За это открытие Альбер Ферт и

Петер Грюнберг были удостоены Нобелевской премии по физике в 2007 году. Гигантское магнитное сопротивление (GMR) в конце 1990-х было использовано в магнитных головках жестких дисков. В результате емкость дисков за пять лет выросла в сто раз.

Высокое быстродействие устройств спинтроники может также достигаться за счет того, что здесь не обязательно перемещать в пространстве заряд и связанную с ним массу. Для переключения состояния достаточно лишь развернуть спин в обратном направлении (рис. 4).

В настоящее время высокими темпами ведется разработка спиновых полевых нанотранзисторов (spin-FET) с переносом заряда и нанотранзисторов с переносом спина.

Все выше сказанное подтверждает тот факт, что в связи с бурным развитием спинтроники, основанной на спиновом эффекте, большой интерес ученых вызывают материалы, способные изменять свои электронные и магнитные свойства. К таким материалам, безусловно, относятся углеродные структуры, а именно графен.

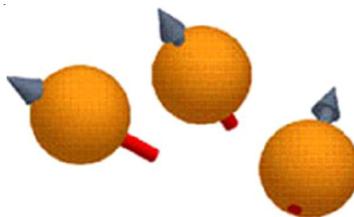


Рис. 1. Собственные магнитные моменты частиц ориентированы хаотично

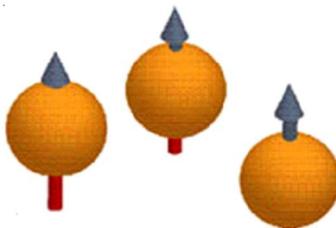


Рис. 2. Собственные магнитные моменты частиц представлены упорядоченно



Рис. 3. Вращение частицы вокруг своей оси

Графен – слой графита толщиной в атом. Структура графена в 200 раз прочнее стали, она очень гибка к механическим деформациям поверхности. Это то, что можно сказать о поверхностных свойствах. Скорость перемещения электронов в нем в 200 раз выше, чем в кремнии, на базе которого сейчас работает вся микроэлектроника [4]. Кристаллическая структура графена аналогична другим веществам на основе углерода, таким как алмаз, графит, и представляет собой плоскую сетку, состоящую из правильных шестиугольников, в узлах которой находятся атомы углерода (рис. 5) [7].

Многочисленные эксперименты подтверждают тот факт, что допированный графен может менять свои магнитные свойства в широком диапазоне. Поэтому одной из актуальных задач является исследование глубоко квантового вида взаимодействия, а именно обменного.

Прямое обменное взаимодействие примесей исчезающе мало и не может использоваться в прикладных задачах. Нами было исследовано косвенное обменное взаимодействие атомов на поверхности графена. Косвенное обменное взаимодействие – обменное взаимодействие между спиновыми степеня-

ми свободы локализованных электронов (или атомных ядер) через возмущение электронной подсистемы (посредников при взаимодействии): диамагнитных ионов, окружающих магнитные ионы в магнитных диэлектриках, либо электронов проводимости в полупроводниках и металлах [5]. В нашем случае локализованными атомами выступали атомы примесей, присоединенные к поверхности графена в результате адсорбции, а «посредниками» взаимодействия выступили электроны проводимости самого графена.

Выражение для константы косвенного обменного взаимодействия было получено в [6]. Для непосредственного расчета четырехмерного интеграла была написана программа на языке C++. Результаты численного моделирования представлены на графике (рис. 6).

На графике видно, как происходит постепенное изменение свойств исследуемого вещества от антиферромагнитного упорядочения спинов примесей ($J < 0$) к ферромагнитному ($J > 0$) при увеличении расстояния между элементами структуры вещества. Расстояние выражено в постоянных кристаллической решетки. Таким образом, варьированием внешних параметров, таких как t , можно менять магнитное упорядочение атомов.

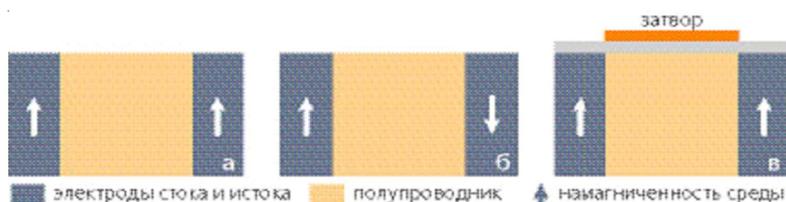


Рис. 4. Эффект изменения направления спина

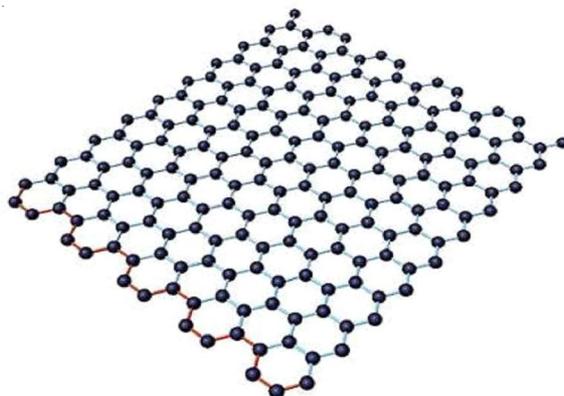


Рис. 5. Модель графена

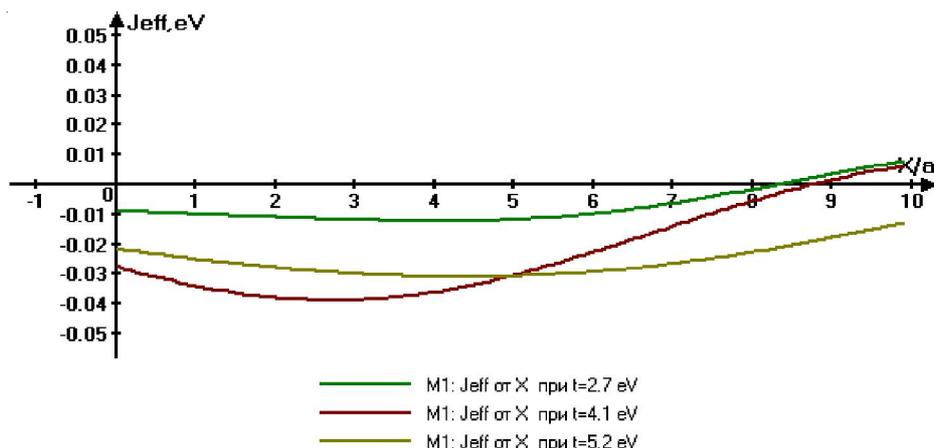


Рис. 6. Зависимость константы косвенного обменного взаимодействия от деформации поверхности

Менее чем за двадцать лет применение спинтронных явлений дало возможность существенно повысить емкость внешних накопителей, распространив технологию жестких дисков на такие мобильные устройства, как фото- и видекамеры и портативные мультимедийные плееры. Современные научные исследования явлений переноса спина, мультиферроиков, исследования в области полупроводниковой и молекулярной спинтроники открывают новые горизонты для многих практических применений [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Браун, О. М. Взаимодействие между частицами, адсорбированными на поверхности металлов / О. М. Браун, В. К. Медведев // Успехи физических наук. – 1989. – Т. 157, вып. 57. – С. 631–666 с.
2. Будик, А. «Углеродное» будущее электроники / А. Будик. – Электрон. текстовые дан. – Ре-

жим доступа: <http://www.ixbt.com/editorial/carbon.shtml>.

3. Жувикин, Г. Спинтронка / Г. Жувикин // Компьютерра. – 25 января 2005. – № 3.
4. Огнев, А. В. Спинтроника: физические принципы, устройства, перспективы / А. В. Огнев, А. С. Самардак // Вестник ДВО РАН. – 2006. – № 4. – С. 70–80.
5. Пак, А. В. Исследование косвенного взаимодействия в квантовых точках бислоя графена в рамках s-d модели / А. В. Пак, М. Б. Белonenко, Н. Г. Лебедев // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 37, вып. 15. – С. 69–78.
6. Пак, А. В. Особенности косвенного взаимодействия в примесном бислое графена в рамках s-d модели / А. В. Пак, М. Б. Белonenко, Н. Г. Лебедев, // Физика твердого тела. – 2011. – Т. 53, вып. 8. – С. 1604–1608.
7. Спонтанное поперечное поле в примесном графене / М. Б. Белonenко, Н. Г. Лебедев, А. В. Пак, Н. Н. Янюшкина // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, вып. 8. – С. 64–69.
8. Ферг, А. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники. Нобелевская лекция / А. Ферг. // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 178., вып. 12 – С. 1336–1348.

SPINTRONICS – TECHNOLOGY OF THE FUTURE

M.S. Sergeyev

What is the path of development of electronic computers? How long will run the famous Moore's Law? And what are the prerequisite brings spintronics? On these issues, it is worth considering in earnest today. In this paper we propose a way to resolve them.

Key words: *nanoelectronics of the future, magnetic moments, spintronics, quantum electronics, graphene, an indirect interaction.*