

Парадигма графена и квантовая информация

В.Г. Плеханов

Computer Science College, Erika Street 7a, Tallinn, 10416, ESTONIA

plekhanov@iati.ee

За прошедшее десятилетие технология вычислительной техники пережила два небывалых скачка: первый, связанный с использованием изотопически чистого кремния и обусловивший рост скорости вычислений свыше 3 ГГц, а второй – с ростом объемов памяти, вызванный многоядерностью процессоров современного компьютера.

Всем хорошо известно, что быстродействие микропроцессоров зависит от элементной базы, электронных характеристик материалов, а также технологии производства. Однако использование традиционного кремния в компьютерной технологии является в тоже время тормозом в дальнейшем росте скорости вычисления и плотности числа гейтов, поскольку хорошо известно большое значение эффективной массы электрона в этом веществе [1] $m_{eff} = (0,012 - 0,44)m_0$, где m_0 – масса свободного электрона. Альтернативным материалом кремнию может явиться графен с безмассовыми релятивистскими частицами Дирака [2], скорость которых составляет $\approx 1/300$ скорости света.

Графен – это одноатомный слой атомов углерода с sp^2 связью. Графен – это полуметалл у которого зона проводимости и валентная зона соприкасаются в К-точке зоны Бриллюэна (рис.1) [3].

В области указанных точек дисперсия энергии электронов $E(\vec{k})$ не параболическая, как в большинстве твердых тел (см., например [1]), а $E(\vec{k}) \approx \vec{k}$, т.е. наблюдается линейная зависимость (см. также [2, 3] и цитированную там литературу). Именно это обстоятельство позволяет говорить о безмассовости релятивистских электронов в графене, поведение которых описывается уравнением Дирака для фермионов, не имеющих массы.

Как уже сказано графен – это полуметалл, и если графеновой электронике суждено прийти (а это будет так) на смену кремниевой, то графен должен будет обладать полупроводниковыми свойствами. С этой целью были предложены разные способы создания полупроводникового графена: нанополоски [4], которые могут создавать ширину запрещенной зоны E_g до 100 мэВ, одноосное растяжение (сжатие) графена, в этом случае $E_g \leq 300$ мэВ, а также изотопическое создание полупроводникового графена [3], величина E_g которого может варьироваться до ≈ 1 эВ, практически равной E_g кремния. Согласно оценкам, сделанным в работе [6], эффективная масса электрона в полупроводниковом графене с $E_g \approx 1$ эВ будет равна $0,022m_0$, т.е. почти на порядок меньше, чем в кремнии, что позволит создавать высокоскоростные процессоры компьютеров с меньшим энергопотреблением.

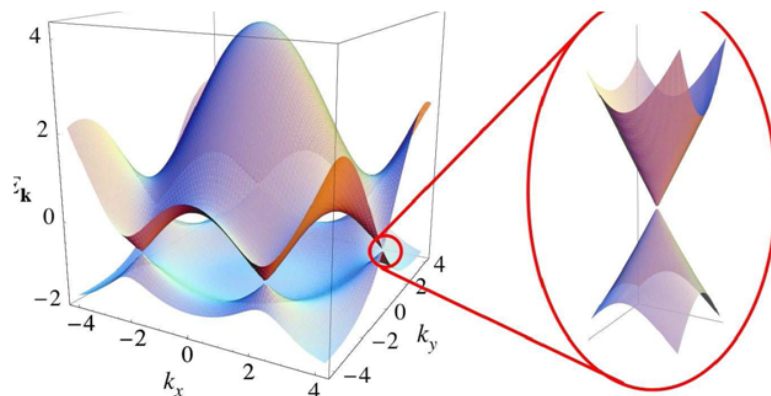


Рис. 1. Зонная структура графена. Левая часть – это полная картина зонной структуры и правая – где показана линейная дисперсия энергии электронов в К-точке зоны Бриллюэна.

В современных компьютерах размер деталей в микропроцессорах уменьшился с 90 до 22–18 нм (см., например [7]). Но по мере уменьшения размера элементов в микросхемах современных компьютеров, расстояние между ними становится слишком мало, чтобы их можно было надежно друг от друга изолировать, а выделяемое ими тепло – слишком велико, чтобы его можно было эффективно рассеять. Таким образом уже с точки зрения классической информации, граница размеров элементов в несколько нанометров в микропроцессорах представляется принципиально непреодолимой. Более того приближение размера вычислительного гейта к атомному (в ближайшие 10–20 лет) диктует с необходимостью учета законов квантовой механики при работе такого микропроцессора. Кодирование, хранение и обработка информации по законам квантовой механики и составляет предмет и суть квантовой информации [8, 9].

Физика квантовой информации и квантовых вычислений – новая, стремительно развивающаяся область науки, возникшая на стыке квантовой механики, современной математической физики и информатики. Огромный интерес к ней во многом стимулируется захватывающими перспективами, которые обещают открыть реализация ее идей практически во всех областях человеческой деятельности, связанных с передачей, хранением и обработкой информации. Впервые кардинально новая идея о квантовых вычислениях была высказана выдающимся советским математиком Ю.И. Маниным в 1980 году [10], и которая стала активно обсуждаться в научной литературе лишь после опубликования в 1982 году статьи американским физиком Р. Фейнманом [11].

Любая классическая двухуровневая система, как и квантовая, имеет основное $|0\rangle$ и не основное $|1\rangle$ базисные состояния. Примером классической двухуровневой системы является оператор НЕ [7]. В зависимости от того заняты ли эти состояния с вероятностями $P(0)=1, P(1)=0$ или $P(0)=0, P(1)=1$ мы имеем пример булевых логических состояний "0" или "1". В квантовом случае возникающая ситуация является более богатой. Волновая функция квантовых состояний двухуровневой системы – квантового бита, получившего название квантового бита (quantum bit or qubit, см. также рис. 3.4 в [12]), может представлять собой суперпозицию базисных состояний (по Шредингеру – вектор состояния [13]) следующего вида [8, 9]:

$$|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle,$$

где α, β – комплексные амплитуды состояний, при этом

$$\alpha^2 + \beta^2 = 1.$$

Помимо вероятностей $P(0) = |\alpha|^2$ и $P(1) = |\beta|^2$ заполнения базисных состояний $|0\rangle$ и $|1\rangle$, состояние характеризуется когерентными или интерференционными слагаемыми [8, 9] в вероятности состояния $|\Psi\rangle$ определяемых произведениями комплексных амплитуд $\alpha^*\beta$ и $\alpha\beta^*$. Состояние кубита в отличие от классического бита может изменяться не только путем изменения вероятностей $P(0)$ и $P(1)$, но и более того путем изменения амплитуд состояний α и β , что соответствует поворотам вектора состояния $|\Psi\rangle$ в так называемом гильбертовом двумерном пространстве состояний. В этом и состоит принципиальное различие кубита и классического бита.

Общепризнанным является факт, что законы квантовой физики являются линейными и обратимыми, то и соответствующие квантовые логические устройства [8, 9], производящие операции с когерентными квантовыми состояниями отдельных кубитов, оказываются также логическими и термодинамически обратимыми [17], а квантовые вычислительные операции представляются унитарными операторами [9, 12] (либо матрицами $2^L \times 2^L$ в 2^L – мерном гильбертовом пространстве. Квантовые вентили аналогичны соответствующим обратимым классическим вентилям [7], но в отличие от классических, квантовые способны совершать унитарные операции над суперпозициями состояний. Элементарным шагом при квантовых вычислениях является унитарная операция над L -кубитовой суперпозицией состояний регистра из L кубитов, при этом выполняется параллельная обработка сразу всех 2^L комплексных амплитуд, тогда как для классического компьютера подобная операция потребовала бы 2^L отдельных элементарных шагов. Описанное свойство называется квантовым параллелизмом в работе квантовых устройств, и оно приводит к экспоненциальному ускорению вычислительного процесса. Отсюда видно, что вычислительный процесс в таких устройствах носит характер интерференции – комплексные амплитуды состояний многих кубитов могут складываться как конструктивно, так и деструктивно. Именно описанный параллелизм создает одно из главных преимуществ квантовых компьютеров по сравнению с классическими компьютерами.

Уже Шредингером [13] было отмечено одно из наиболее интересных свойств квантовых состояний принципиально отличающих их от классических состояний. Это свойство, названное Шредингером запутанностью состояний, представляет собой когерентную суперпозицию состояний нескольких квантовых элементов, определяющее своеобразную нелокальную корреляцию этих состояний, возникающую при взаимодействии кубитов. Другими словами названное свойство говорило о том, что знание состояния системы из нескольких квантовых элементов этой системы, совсем не означает знание состояние этих составляющих систему элементов. Описанные состояния получили название запутанных (entanglement) состояний. Именно запутанные состояния являются тем огромным ресурсом в квантовой информации и квантовых вычислениях [9, 12]. Хотя, как отмечено выше, понятие запутывания было введено Шредингером еще в 1935 году, большое внимание оно к себе привлекло после лишь с 1993 года в

связи с обнаруженной Ч. Беннетом с сотрудниками [15] теоретической возможностью использования его для телепортации (передачи) неизвестного для отправителя A квантового состояния двухуровневой системы к получателю B без реального перемещения самого элемента. Эта мысль стала далее основной для развития принципиально нового метода криптографии (секретной передачи информации). Перечень возможных приложений запутанного состояния уже достаточно велик. С экспоненциальным ускорением квантовых вычислений обычно связывают [7, 8, 9, 12] перспективы решения так называемой NP – полной проблемы (Nondeterministic polynomial – time complete), т.е. проблемы решения таких задач, для которых это решение очень трудно найти с помощью классических компьютеров. Добавим, что квантовый алгоритм факторизации, предложенный П. Шором в 1994 году [16], позволяет производить разложение n -значного числа на простые множители за время полиномиально зависящее от n , т.е. с экспоненциальным ускорением по сравнению с самыми мощными классическими алгоритмами. Другим важным алгоритмом является алгоритм Гровера, использующий параллелизм вычислительного процесса поиска в неструктурированной базе данных [17].

В заключение заметим, что квантовые методы выполнения вычислительных операций, а также передачи и обработки информации, уже начинают воплощаться в реально функционирующих экспериментальных устройствах [7, 9], что стимулирует усилия по реализации квантовых компьютеров – этого нового направления в вычислительной технике.

Список литературы

- [1] Г.Л. Бир, Г.Е. Пикус, Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках, Наука, Москва, 1972.
- [2] S. Das Sarma, S. Adam, E.H. Hwang et al, Rev. Mod. Phys. 83, 407 - 470 (2011)
- [3] В.Г. Плеханов, Л.М. Журавлева, Нанотехника 3 (31) 34 - 38 (2012).
- [4] M.Y.Han, B. Czyilmaz and P. Kim, Phys. Rev. Lett. 98, 206805 (2007).
- [5] Z.H. Ni, T. Yu, Y.H. Ku et al., ACS Nano 3, 483 - 492 (2009).
- [6] T.G. Pedersen, A. - P. Jauho and K.P. Pedersen, Phys. Rev. B79, 113406 (2009).
- [7] К.А. Валиев, А.А. Кокин, Квантовые компьютеры: надежды и реальность, РХД, Ижевск - Москва, 2004.
- [8] В.Г. Плеханов, в сборнике статей Колледжа Вычислительной Технике, Таллин, 2004, с. 161 - 282.
- [9] М. Нильсен, И Чанг, Квантовые вычисления и квантовая информация, Мир, Москва, 2006.
- [10] Ю.И. Манин, Вычислимое и невычислимое, Советское радио, Москва, 1980.
- [11] R. Feynman, Intern. J. Theor. Phys. 21, 467 - 488 (1982).
- [12] V.G. Plekhanov, Isotope - Based Quantum Information, Springer, Heidelberg - Berlin, 2012.
- [13] E. Schrödinger, Naturwissenschaften 23, 807 - 812, 823 - 843, 844 - 849 (1935).
- [14] C. Bennett, IBM J. Res. Devel. 17, 525 - 532 (1973).
- [15] C.H. Bennett, G. Brassard, C. Crepeau et al., Phys. Rev. Lett. 70, 1895 - 1899 (1993).
- [16] P.Shor, SIAM J. Comp. 26, 1484 - 1509 (1997).
- [17] L.K. Grover, Phys. Rev. Lett. 78, 325 - 328 (1997).