

СПИНОВЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ВЕНТИЛИ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

Л. А. ОПЁНОВ

Московский инженерно-физический институт

LOGICAL SPIN GATES BASED ON QUANTUM DOTS

L. A. OPENOV

The potentialities of a modern computer technique based on microelectronics are almost exhausted. A majority of specialists in computer science are not pondering the ways of further progress, while physicists already work in this direction. A possible way of development of logical elements at the atomic level is discussed.

Современная вычислительная техника, основанная на микроэлектронике, приближается к пределу своих возможностей. Большинство специалистов по компьютерам об этом даже не догадываются, а физики уже вовсю работают в этом направлении. В статье рассказывается об одном из возможных путей создания логических элементов на атомном уровне.

www.issep.rssi.ru

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вычислительная техника подошла к пределу своих возможностей по быстродействию компьютеров ($\sim 10^9$ Гц) и размеру микросхем ($\sim 0,1$ мкм). Масштаб $\sim 0,1$ мкм (то есть 10^{-7} м) определяет границу применимости законов классической физики [1] к расчету характеристик электронных приборов. При дальнейшем увеличении быстродействия и уменьшении размеров мы попадаем в новый физический мир со своими законами — наномир. Основное отличие наномира от микромира состоит в том, что в нем доминируют квантовые эффекты, которые, как правило, несущественны на микроуровне. Поэтому для решения задач конструирования вычислительных устройств нового поколения — задач нанoeлектроники [2] — требуется принципиально новый подход.

В последние годы стала широко обсуждаться идея использования квантовых состояний для хранения и обработки информации [3]. Большую роль здесь играют так называемые квантовые точки [4] — системы атомов, имеющие размер ~ 1 нм (то есть 10^{-9} м). Электрон в квантовой точке локализован, поэтому энергетический спектр квантовой точки является дискретным, как у атома, так что квантовые точки можно считать искусственными атомами. В статье мы расскажем о том, как дискретность электронных состояний в квантовой точке и наличие у электрона собственного вращательного момента (спина) могут быть использованы при конструировании сверхминиатюрных логических элементов (вентилей). Вначале мы приведем некоторые сведения из вычислительной техники и физики, касающиеся принципов функционирования обычных ЭВМ и квантовых свойств электронов. После этого станет ясно, как извлечь выгоду из квантовых эффектов при цифровом кодировании информации и ее обработке.

Мы не ставим перед собой цель дать полный (хотя бы и краткий) обзор современного состояния соответствующих исследований и сосредоточимся лишь на одном из направлений, названном в научной литературе

“одноэлектронные вычисления”, а более конкретно – на спиновых логических вентилях.

**ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ –
ОСНОВА ЭЛЕКТРОННЫХ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

Мы привыкли использовать для расчетов десятичную систему счисления. В этой системе любое число можно записать с помощью десяти различных цифр – от нуля до девяти. Если число меньше 1 или превышает 9, то в дело идут степени числа 10, например $354 = 3 \cdot 10^2 + 5 \cdot 10^1 + 4 \cdot 10^0$. При обработке чисел в ЭВМ удобнее использовать двоичную систему, в которой для записи любого числа требуются всего две цифры: 0 и 1. Например, число 354 в двоичной форме будет выглядеть так: 101 100 010. Действительно, $354 = 1 \cdot 2^8 + 0 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0$. Конечно, числа, записанные в двоичной форме, выглядят для нас непривычно, а для ЭВМ такая форма представления чисел очень удобна, поскольку цифры 0 и 1 естественным образом реализуются при помощи электрических сигналов (грубо говоря, лампа не горит – 0, лампа горит – 1). Десятичные числа, которые мы вводим в ЭВМ, сразу же преобразуются в двоичные, и все арифметические операции производятся в двоичной системе. Интересующий нас ответ при выводе из ЭВМ преобразуется обратно к десятичному виду, так что операции ЭВМ остаются для нас незаметными.

Любое математическое действие (умножение, деление, извлечение корня и т.д.) в конечном итоге сводится к сложению. Следовательно, главное, что должна уметь делать ЭВМ, – это складывать числа, записанные в двоичной форме. Соответствующий элемент ЭВМ называется сумматором [5]. Сумматор можно построить из трех простейших элементов, соединенных между собой надлежащим образом [5]. Это логические элементы «НЕ», «ИЛИ», «И». Логическими их называют потому, что они отвечают за определенные логические операции (название каждого элемента соответствует выполняемой им логической функции), то есть определенным образом связывают между собой входные и выходные логические переменные (нули и единицы). Мы не будем углубляться в дебри математической логики (это отдельная, очень важная наука со своими законами). Для дальнейшего изложения представляют интерес лишь таблицы истинности трех упомянутых логических элементов. Эти таблицы определяют соответствие между значениями входных и выходных сигналов (нулей и единиц). Таблица истинности логического элемента «НЕ» имеет вид

X	Y
0	1
1	0

Здесь X – входной сигнал, Y – выходной сигнал. Операция «НЕ» сводится, таким образом, к замене значения входного двоичного сигнала на противоположное, поэтому элемент «НЕ» часто называют инвертором. Таблицы истинности элементов «ИЛИ» и «И» таковы:

X1	X2	Y	X1	X2	Y
0	0	0	0	0	0
1	0	1	1	0	0
0	1	1	0	1	0
1	1	1	1	1	1

Здесь X1 и X2 – входные сигналы, Y – выходной сигнал. Эти элементы выполняют функции логического сложения и умножения соответственно.

Простота логических элементов «НЕ», «ИЛИ», «И» по сравнению с сумматором обусловлена тем, что все они имеют лишь один выходной сигнал (против двух у сумматора), а инвертор «НЕ» имеет, кроме того, еще и лишь один входной сигнал (против трех у сумматора). Поэтому для изготовления ЭВМ оказывается проще сконструировать сначала сравнительно несложные элементы «НЕ», «ИЛИ», «И», а уже из них потом собирать сумматоры.

С помощью все тех же трех логических элементов («НЕ», «ИЛИ», «И») можно изготовить не только сумматор, но и триггер, дешифратор, преобразователь кодов и прочие устройства, то есть все, что нужно для функционирования ЭВМ. Тот факт, что этих трехэлементов достаточно для реализации практически любого узла ЭВМ, является в конечном итоге выражением следующей глубокой истины: мысль любой сложности может быть выражена при помощи всего лишь трех логических связей: «НЕ», «ИЛИ», «И» [5]. Здесь необходимо сделать замечание, касающееся терминологии. Вместо сочетания “логический элемент” в литературе обычно используется термин “логический вентиль”. Итак, основу ЭВМ составляют логические вентили «НЕ», «ИЛИ», «И».

Отметим, что от набора перечисленных трех вентилях можно перейти и к другим полным наборам, достаточным для изготовления любого вычислительного устройства, например к такому: «НЕ», «ИЛИ–НЕ», «И–НЕ». Таблицы истинности вентилях «ИЛИ–НЕ» и «И–НЕ» получаются из таблиц истинности вентилях «ИЛИ» и «И» соответственно путем инвертирования выходного сигнала (то есть замены $0 \rightarrow 1$ и $1 \rightarrow 0$ на выходе Y). Они имеют вид

X1	X2	Y	X1	X2	Y
0	0	1	0	0	1
1	0	0	1	0	1
0	1	0	0	1	1
1	1	0	1	1	0

Этот набор вентиляей более удобен для дальнейшего изложения.

СПИН ЭЛЕКТРОНА

Оставим на время вычислительную технику и займемся физикой. Нас будут интересовать некоторые квантовые свойства электронов — элементарных частиц, обладающих отрицательным электрическим зарядом.

В 20-х годах XX столетия в результате интенсивных исследований электронных свойств изолированных атомов и макроскопических атомных систем (например, металлов) было установлено, что электроны подчиняются принципу Паули. Этот принцип состоит в том, что в одном и том же состоянии может находиться не более одного электрона. В квантовой физике состояние частицы характеризуется набором так называемых квантовых чисел. Например, в атоме такими числами для электронов являются главное квантовое число n (определяющее энергию электрона), орбитальное квантовое число l (определяющее абсолютную величину момента вращательного движения электрона вокруг ядра) и азимутальное квантовое число m (определяющее проекцию этого момента на какую-либо ось).

Физики, однако, с удивлением обнаружили, что известных им квантовых чисел недостаточно для описания электронных состояний. Выходило так, что в каждом состоянии может находиться не один, а два электрона. Что оставалось делать? Отказываться от фундаментального принципа Паули? Был найден другой выход. Все имевшиеся противоречия теории с экспериментом удалось разрешить, предположив, что у электрона есть еще одна, ранее не учитываемая степень свободы. Эта степень свободы является внутренней, то есть она не связана с движением электрона как целого. Дело обстоит так, как если бы электрон вращался вокруг своей собственной оси. При этом абсолютная величина момента собственного вращательного движения электрона составляет $\hbar S$, где $\hbar \approx 1,055 \cdot 10^{-27}$ эрг · с — универсальная константа, называемая постоянной Планка, а $S = 1/2$ — спин электрона (англ. spin — кружение, верчение). Представление электрона в виде квантового волчка является, конечно, весьма приблизительным и может быть использовано лишь для облегчения восприятия на начальном уровне.

Заметим, что момент вращательного движения является вектором. Если бы вращение электрона было классическим, то проекция этого вектора на любую ось (назовем ее осью z) могла бы принимать любые значения в интервале от $-\hbar S$ до $+\hbar S$. Согласно же квантовой теории, проекция момента импульса может принимать только дискретные значения с интервалом \hbar . Поскольку $S = 1/2$, то проекция момента собственного вращательного движения электрона может равняться лишь

$-\hbar/2$ и $+\hbar/2$. По-другому говорят, что проекция спина электрона на ось z может принимать лишь два значения: $S_z = -1/2$ и $S_z = +1/2$. Таким образом, действительно оказывается, что в состоянии, например, с заданными квантовыми числами n, l, m могут находиться два электрона: один с $S_z = -1/2$ и один с $S_z = +1/2$. Иными словами, принцип Паули справедлив, но известные для электрона квантовые числа нужно дополнить еще одним — спиновым квантовым числом S_z , то есть состояние электрона в атоме характеризуется набором не трех, а четырех квантовых чисел (n, m, l, S_z) и каждое такое состояние может быть занято не более чем одним электроном.

Здесь необходимо сделать важное отступление. Оно касается того факта, что, согласно современным представлениям, электрон является точечной частицей, то есть он не имеет структуры. Как это можно увязать с доказанным фактом наличия у электрона внутренней степени свободы — спина? Ведь у точки нет внутренностей! Ответ на этот вопрос пока не найден. Поэтому мы будем просто использовать то, что не в состоянии объяснить.

Вспомним, что электрон обладает зарядом. Поэтому, подобно тому как вращение классического заряженного тела ведет к появлению у него магнитного момента, собственное вращение (спин) индуцирует у электрона собственный магнитный момент μ . Он направлен противоположно спину (так как заряд электрона отрицателен) и равен по абсолютной величине одному магнетону Бора $\mu_B = |e|\hbar/(2mc) \approx 0,927 \cdot 10^{-20}$ эрг/Гс (здесь e и m — заряд и масса электрона соответственно, c — скорость света). Проекция магнитного момента электрона на произвольно выбранную ось z , как и проекция спина электрона на эту ось S_z , квантуется, то есть может принимать лишь два дискретных значения: $\mu_z = -\mu_B$ (если $S_z = 1/2$) и $\mu_z = \mu_B$ (если $S_z = -1/2$). В следующем разделе мы увидим, как можно использовать факт наличия у электрона спина и собственного магнитного момента при конструировании логических элементов (вентилей) на атомном уровне.

СПИНОВЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ВЕНТИЛИ

Выше мы уже говорили, что ЭВМ оперирует с числами, выраженными в двоичной форме, то есть состоящими только из нулей и единиц. На заре вычислительной техники логические элементы ЭВМ выполнялись на основе реле (ключ разомкнут — 0, ключ замкнут — 1), потом на смену реле пришли электронные лампы, а затем — полупроводниковые структуры [2]. Все перечисленные электронные устройства являются, по сути дела, объектами макромира, поскольку для выполнения ими своих функций требуется наличие макроскопического (многие миллионы и даже миллиарды) числа электронов.

Давайте теперь пристальнее посмотрим на один отдельно взятый электрон. Он обладает спином $S = 1/2$, который может проецироваться на произвольно выбранную ось z только двумя способами: $S_z = -1/2$ (спин вниз) и $S_z = +1/2$ (спин вверх). Такое впечатление, что сама Природа говорит нам: “Вот он, электрон, – естественный кандидат для представления чисел в двоичной форме”. Действительно, приписав электронам со спином вниз и вверх соответственно логический нуль и логическую единицу, мы можем каждой конкретной спиновой конфигурации системы электронов поставить в соответствие определенный набор таких нулей и единиц, то есть определенное число, записанное в двоичной форме, или, другими словами, определенную информацию (при этом один электрон является носителем одного бита информации).

Наличие соответствия между знаком проекции спина электрона, с одной стороны, и логическими переменными (нулями и единицами) – с другой, само по себе недостаточно для конструирования конкретных вычислительных схем и устройств. Пока это лишь голая идея. Нужно придумать какие-то реальные способы ввода, хранения, обработки и вывода спиновой информации. И прежде всего нужно научиться локализовать отдельные электроны в небольших областях пространства (чем меньше будут размеры этих областей, тем выше будет плотность информации и тем больше логических элементов мы сможем разместить в единице объема или на единице площади).

На современном уровне развития технологии для этой цели как нельзя лучше подходят так называемые квантовые точки – полупроводниковые структуры с размерами ~ 1 нм. Потенциальная энергия электрона в квантовой точке имеет локальный минимум, отделенный энергетическим барьером от пространства, окружающего квантовую точку. Поэтому движение электрона в квантовой точке ограничено во всех трех направлениях, и энергетический спектр является полностью дискретным, как в атоме [4]. Кроме того, особенности электронного спектра полупроводников таковы, что все электроны занимают уровни энергии в низлежащей (так называемой валентной) энергетической зоне, тогда как уровни энергии в верхней энергетической зоне (зоне проводимости) вакантны.

Поскольку (вспомним принцип Паули) на каждом уровне валентной зоны находится по два электрона (один со спином вниз и один со спином вверх), то суммарная проекция S_z спина всех электронов квантовой точки равна нулю. Следовательно, равен нулю и магнитный момент квантовой точки (при условии, конечно, что она состоит из немагнитных атомов). Если теперь в квантовую точку добавить один лишний электрон (современные экспериментальные методы позволяют это

сделать), то он займет нижний вакантный уровень в зоне проводимости. В результате магнитный момент квантовой точки станет отличен от нуля, а его направление (вниз или вверх) будет определяться направлением спина избыточного электрона ($S_z = +1/2$ или $S_z = -1/2$ соответственно).

Итак, мы смогли предложить конкретный способ реализации исходной идеи кодирования информации спинами электронов: логическим нулю и единице мы поставили в соответствие знак проекции спина (или магнитного момента) не просто какого-то абстрактного электрона, а квантовой точки – вполне осязаемого образования. Теперь пришла пора подумать о том, как организовать из нескольких квантовых точек, имеющих по одному лишнему электрону, логические вентили «НЕ», «ИЛИ–НЕ», «И–НЕ» (мы уже знаем, что этих трех вентилях достаточно для реализации любого узла ЭВМ). Такие логические вентили называются спиновыми, поскольку значение логической переменной (0 или 1) определяется направлением спина электрона в квантовой точке.

Нам понадобятся еще некоторые сведения из физики – о взаимодействии спинов электронов, локализованных в двух соседних квантовых точках. Оказывается, что энергия этого взаимодействия зависит от взаимного направления спинов: $E_{12} = J(\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2)$, где \mathbf{S}_1 и \mathbf{S}_2 – векторы электронных спинов в квантовых точках с номерами 1 и 2 соответственно, а величина J зависит от геометрических характеристик и материала квантовых точек, а также от расстояния между ними. Таким образом, $E_{12} = JS^2$, если векторы \mathbf{S}_1 и \mathbf{S}_2 параллельны, и $E_{12} = -JS^2$, если они антипараллельны ($|\mathbf{S}_1| = |\mathbf{S}_2| = S = +1/2$ – абсолютная величина спина электрона). Поскольку при достаточно низкой температуре (а мы будем для простоты полагать $T = 0$) любая физическая система занимает состояние с минимальной энергией (такое состояние называется основным, откуда, кстати, берет свое название метод, о котором рассказывается в этой статье, “вычисления в основном состоянии”), то спинам двух соседних квантовых точек энергетически выгодно быть направленными в разные стороны (рис. 1).

Вспоминая теперь об установленном нами соответствии между направлением спина электрона и логическими переменными (спин вниз – 0, спин вверх – 1), мы видим из рис. 1, что две квантовые точки представляют собой логический вентиль «НЕ». Действительно, если спин электрона в одной квантовой точке (назовем ее входной, X) направлен вниз, то спин электрона во второй квантовой точке (назовем ее выходной, Y) направлен вверх, и наоборот, то есть реализуются обе строчки таблицы истинности вентиля «НЕ» ($X=0, Y=1$ и $X=1, Y=0$).

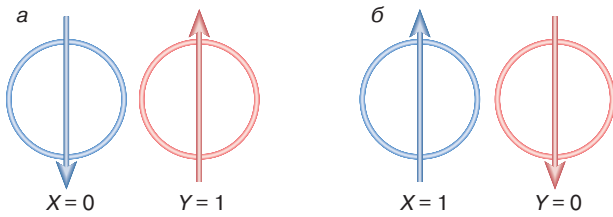


Рис. 1. Спиновый логический вентиль «НЕ» на основе двух квантовых точек. Квантовые точки схематически изображены кружками. Стрелки указывают направление спинов двух электронов, локализованных в квантовых точках. Направлению спина вниз и вверх отвечают логический ноль и логическая единица соответственно

Логический вентиль «ИЛИ–НЕ» имеет два входа (X_1 и X_2) и один выход (Y). Для его конструирования нам понадобятся три квантовые точки, расположенные в одну линию (рис. 2). Крайние квантовые точки являются входами вентиля, а центральная – его выходом. На рис. 2, *a* и *б* показаны ориентации спинов, соответствующие первой и последней строчкам таблицы истинности вентиля «ИЛИ–НЕ». Видно, что эти спиновые конфигурации действительно отвечают минимуму полной энергии вентиля ($E = -2JS^2$), поскольку минимальна энергия взаимодействия ($-JS^2$) каждого крайнего вентиля с центральным.

Сложнее обстоит дело с реализацией второй и третьей строк таблицы истинности. Например, если крайний левый спин направлен вверх ($X_1 = 1$), а крайний правый – вниз ($X_2 = 0$), то независимо от направления центрального спина энергия его взаимодействия с одним из крайних спинов равна $-JS^2$, а с другим JS^2 . Следовательно, две различные спиновые конфигурации ($\uparrow\downarrow\downarrow$ и $\uparrow\uparrow\downarrow$) имеют одинаковую (равную нулю) полную энергию, так что спин центральной квантовой точки “не может решить для себя”, в каком же направлении ему ориентироваться (так называемый эффект фрустрации, см. рис. 2, *в*).

Выход из этой ситуации состоит в следующем. Поместим весь вентиль во внешнее магнитное поле \mathbf{H} , направленное так, как показано на рис. 2, *г*. Учтем, что энергия магнитного момента μ в параллельном ему магнитном поле равна $-\mu H$, а в антипараллельном μH . Так как магнитный момент квантовой точки направлен противоположно спину “избыточного” электрона, то полная энергия спиновой конфигурации $\uparrow\downarrow\downarrow$ в магнитном поле становится равной $\mu H - \mu H - \mu H = -\mu H$, поскольку в этой конфигурации один спин ориентирован по полю, а два – против поля. Энергия же конфигурации $\uparrow\uparrow\downarrow$ увеличивается и становится равной $\mu H + \mu H - \mu H = \mu H$. Следовательно, конфигурация $\uparrow\downarrow\downarrow$ является энергетически более выгодной, что нам и требуется,

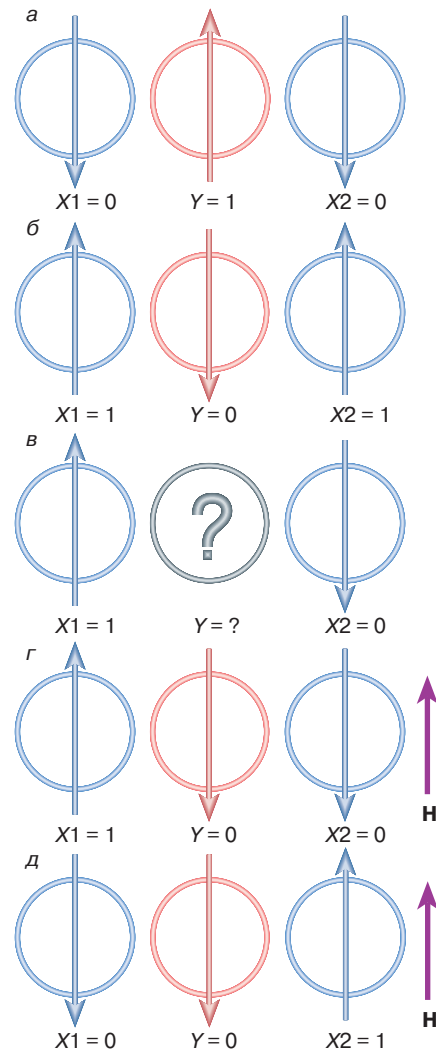


Рис. 2. Спиновый логический вентиль «ИЛИ–НЕ» на основе трех квантовых точек. Обозначения такие же, как на рис. 1

так как при этом мы имеем на выходе вентиля $Y = 0$ в соответствии со второй строчкой таблицы истинности. Легко убедиться, что при таком же направлении магнитного поля реализуется и третья строчка таблицы истинности (см. рис. 2, *д*).

Поскольку мы не знаем заранее, какие именно сигналы поступят на вход нашего вентиля (то есть какая из строк таблицы истинности должна реализоваться), мы не можем сказать *a priori*, потребуется ли внешнее магнитное поле для выполнения требуемой логической функции. Это, конечно, очень неудобно, поскольку вынуждает следить за значениями входных сигналов. Давайте посмотрим, не помешает ли наличие внешнего

магнитного поля (направленного так же, как на рис. 2, *г* и *д*) реализации первой и последней строчек таблицы истинности (спиновые конфигурации $\downarrow\uparrow\downarrow$ и $\uparrow\downarrow\uparrow$ соответственно). Что касается последней строчки, то энергия желательной конфигурации $\uparrow\downarrow\uparrow$ в магнитном поле составляет $-2JS^2 + \mu H$, то есть остается меньше энергии $2JS^2 + 3\mu H$ нежелательной конфигурации $\uparrow\uparrow\uparrow$ при любой величине H , как нам и нужно. Что же касается первой строчки, то в магнитном поле энергия желательной конфигурации $\downarrow\uparrow\downarrow$ равна $-2JS^2 - \mu H$, а энергия нежелательной конфигурации $\downarrow\downarrow\downarrow$ равна $2JS^2 - 3\mu H$. Следовательно, энергия нужной нам конфигурации $\downarrow\uparrow\downarrow$ будет минимальна, если $\mu H < 2JS^2$, то есть магнитное поле не должно быть слишком сильным. Итак, таблица истинности спинового логического вентиля «ИЛИ–НЕ» реализуется полностью, если весь вентиль целиком поместить во внешнее магнитное поле с напряженностью $H < 2JS^2/\mu$. При $J \sim 1$ мэВ и $\mu \sim \mu_B$ имеем $H < 10$ Тл, то есть нам подойдет практически любой магнит (было бы куда хуже, если бы требуемая величина H была ограничена снизу).

Спиновый логический вентиль «И–НЕ» можно получить непосредственно из вентиля «ИЛИ–НЕ» просто путем изменения направления внешнего магнитного поля на противоположное. Читатель может убедиться в этом самостоятельно, в чем ему поможет рис. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы познакомились с возможной конструкцией трех простейших спиновых логических вентилях на основе квантовых точек, а попутно и с рядом фундаментальных физических понятий, принципов и эффектов, на которых базируется работа этих вентилях. Конечно, многие важные вопросы остались за пределами этой статьи. К таким вопросам относятся, например, организация взаимодействия между различными вентилями (то есть передача сигнала с выхода одного вентиля на вход другого), коррекция ошибок и многое другое. Существенно, однако, что спиновые логические вентиля не являются чем-то умозрительным. Они могут быть изготовлены уже на современном технологическом уровне (или по крайней мере в самом ближайшем будущем), составив тем самым основу для вычислительных систем нового поколения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кадоццев Б.Б.* Динамика и информация // Успехи физ. наук. 1994. Т. 164, № 5. С. 449–530.
2. *Борисенко В.Е.* Нанозлектроника – основа информационных систем XXI века // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 5. С. 100–104.
3. *Bennett C.H.* Quantum Information and Computation // Phys. Today. 1995. Oct. P. 24–30.

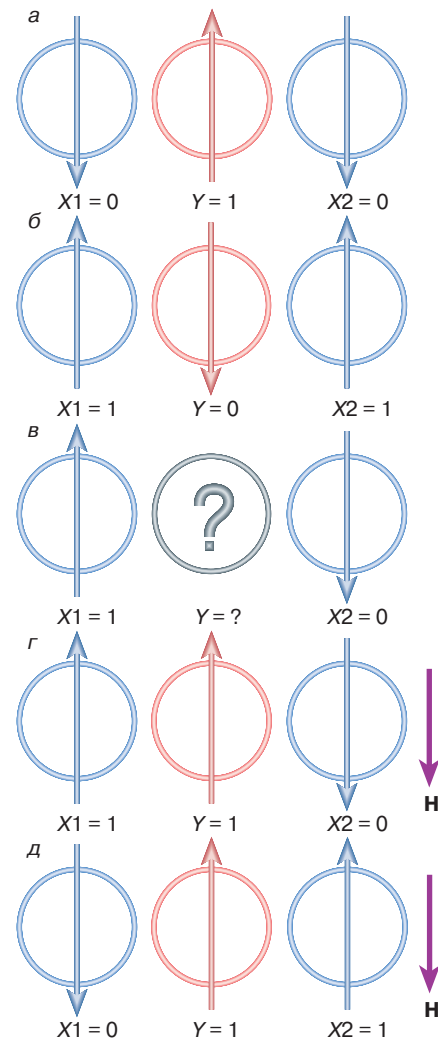


Рис. 3. Спиновый логический вентиль «И–НЕ» на основе трех квантовых точек. Обозначения такие же, как на рис. 1

4. *Демиковский В.Я.* Квантовые ямы, нити, точки. Что это такое? // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 5. С. 80–86.
5. *Соколов Е.А.* Интегральные схемы логических операций // Вычислительная техника и ее применение. 1988. № 5. С. 4–34.

Рецензент статьи А.С. Сигов

* * *

Леонид Артурович Опёнов, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры сверхпроводимости и физики наноструктур МИФИ. Область научных интересов – низкоразмерные системы, атомные кластеры, квантовые компьютеры, сверхпроводимость. Автор более 40 научных работ.