

# ПАМЯТЬ СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРОВ

А. М. ТИШИН

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

## MEMORY OF MODERN COMPUTERS

A. M. TISHIN

*The designs and operating principles of the two recording systems used in the modern computers, i.e., magnetic and optical, are described. The principle of 3D optical storage is discussed. In the nearest future, the use of magnetic memory will become as promising as that of the optical memory.*

*Обсуждены конструкции и принципы действия двух систем записи и считывания информации в современных компьютерах: магнитной и оптической. Рассмотрена суть трехмерного способа оптической записи информации. В ближайшем будущем использование магнитной памяти станет не менее перспективным, чем оптической.*

## ВВЕДЕНИЕ

Получая в 1956 году Нобелевскую премию, Джон Бэрдин, Вальтер Брэттэйн и Вильям Шокли вряд ли предполагали, что изобретенный ими транзистор откроет новую эру в истории человечества и даст толчок к созданию широкого спектра новых радиоэлектронных устройств. Одним из таких устройств является компьютер. Современные компьютеры используют уже не отдельные транзисторы, а микропроцессоры-чипы, состоящие из 12–13 млн транзисторов. За последние 25 лет количество транзисторов, содержащихся в одном чипе, выросло более чем в 3000 раз, а видимая уже сейчас перспектива – 1 млрд транзисторов в чипе к 2011 году. Быстрое развитие микропроцессорной техники позволило значительно увеличить быстродействие компьютеров. Появившаяся возможность обрабатывать большие объемы информации определила необходимость значительного увеличения плотности ее записи. Последние исследования ученых продемонстрировали возможность записи нескольких десятков гигабит информации на 1 см<sup>2</sup>. Современные портативные накопители информации типа ZIV могут вмещать до 30 Гбайт и при этом легко помещаться в карман рубашки.

За точку отсчета в развитии магнитной памяти следует принимать далекий 1898 год. Именно в том году датский инженер В. Поулсен, работавший в Копенгагенской телефонной компании, продемонстрировал прибор, который мог записать речь на стальную струну (рис. 1). Вначале его друзья были озадачены странным поведением Поулсена – он перемещался от одного конца проволоки к другому, говоря в микрофон, подсоединенный к электромагнитной катушке. Последняя передвигалась по струне с помощью тележки. Однако, когда Поулсен вернул тележку в исходное положение и заменил микрофон динамиком, друзья смогли вновь услышать его голос в процессе движения тележки. В основе современных устройств магнитной записи информации лежит этот же принцип с той лишь разницей, что струна заменена тонкой магнитной пленкой. Применяемые в настоящее время способы записи и считывания информации можно разбить на две группы: магнитный и оптический.

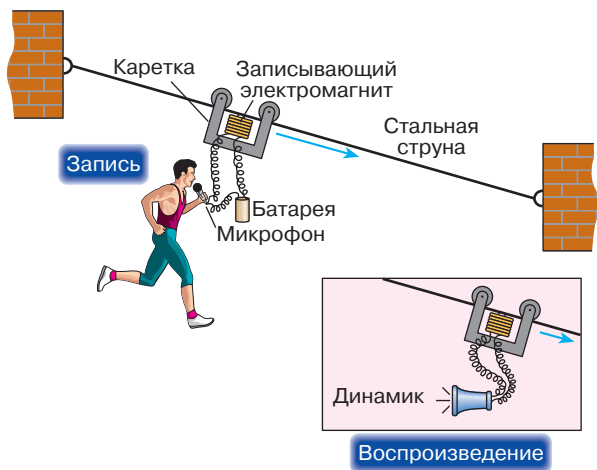


Рис. 1. Опыт Пуулсена по магнитной записи информации

## МАГНИТНАЯ ПАМЯТЬ

Технология магнитной записи стала широко использоваться в различных элементах памяти с начала 1950-х годов. Именно эта технология до сих пор применяется в работе большинства компьютеров. Она позволила обеспечить экспоненциальный рост плотности записи за последние тридцать лет (рис. 2) и достигнуть его 100%-ного ежегодного увеличения в настоящее время.

Что представляет собой один бит магнитной информации? В современных носителях это один магнитный домен, направление вектора намагниченности в котором может быть изменено внешним полем. В магнитной записи используются так называемые продольные домены, намагниченность которых ориентирована

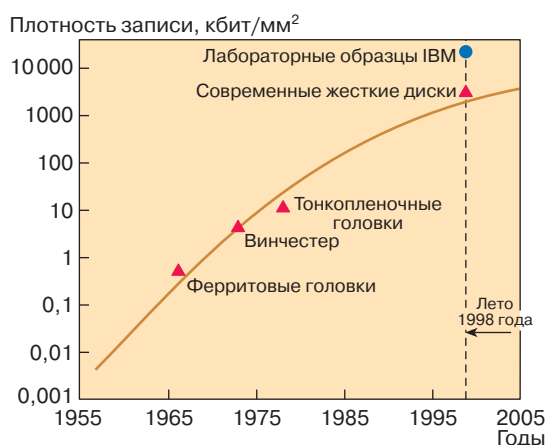


Рис. 2. Диаграмма роста плотности записи информации на жестких дисках

в плоскости диска (рис. 3). Запись одного бита информации осуществляется путем подачи тока в электрическую катушку. Считывание информации при данной схеме работы может осуществляться различными способами. Схема, подобная представленной на рис. 3, используется в процессе работы жестких дисков компьютеров, флоппи-дисков и стримеров. Для записи битов с высокой плотностью записи необходимо, чтобы не только расстояние между магнитной средой и считывающей/записывающей головкой было исчезающе мало, но и чтобы сама среда была как можно более тонкой и гладкой.

Одним из наиболее хорошо известных магнитных материалов, используемых для записи, является порошок в связывающей матрице (например, лаке). Порошок представляет собой микрочастицы с большой остаточной намагниченностью размером от 0,05 до 1,0 мкм, температурой Кюри от 125 до 770 К и коэрцитивной силой  $H_c$  от 22 до 240 кА/м (0,4–3 кЭ) в зависимости от материала. Соединение  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  в недалеком прошлом являлось наиболее популярным материалом для ленточных магнитных накопителей. Позднее было показано, что твердый раствор соединений  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  и  $\gamma\text{-Fe}_3\text{O}_4$ , а также кобальтсодержащий  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  имеют существенно большую коэрцитивную силу, чем соединение  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ . Величина  $H_c$  существенно зависит от размера и формы частиц и, например, в случае феррита бария  $H_c$  может изменяться от 56 до 240 кА/м (700–3000 Э).

Желание использовать для записи тонкие и достаточно высококоэрцитивные материалы объясняется тем, что разрешающая способность прямо пропорциональна величине  $H_c$  и обратно пропорциональна толщине носителя. В соответствии с оценками ряда авторов для сверхплотной магнитной записи значение  $H_c$  должно находиться в диапазоне от 2,5 до 4,5 кЭ. Разрешающая способность также пропорциональна величине остаточной индукции, поскольку для надежного считывания информации поле рассеяния, создаваемое одним битом, должно иметь достаточно большую величину.

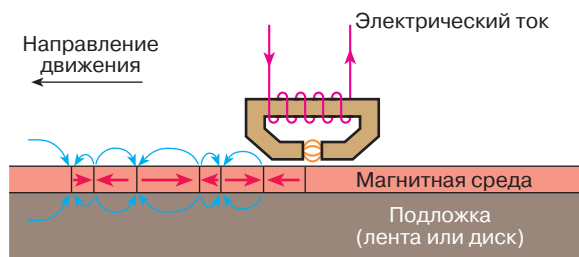


Рис. 3. Схематическое изображение устройства для записи магнитной информации

В отличие от порошковых материалов тонкие пленки – это практически полностью магнитный материал, и, следовательно, в процессе записи информации весь материал пленки находится в зоне действия большого магнитного поля. В то же время при считывании поле, создаваемое отдельными доменами, сконцентрировано вблизи поверхности пленки (вблизи головки) и, следовательно, информация может быть считана более эффективно. Таким образом, использование пленок позволяет добиться более высокой по сравнению с порошковыми материалами плотности записи. В качестве материалов для записи информации используются, например, пленки сплавов кобальта, нанесенные на алюминиевые или стеклянные пластины. Причем скорость их вращения может достигать 7200 об./мин. Толщина магнитного (рабочего) слоя в пленочных продольных носителях составляет около 10–50 нм. В течение последних лет коммерчески доступными являются диски с плотностью записи несколько гигабит на  $1 \text{ см}^2$ , то есть один бит информации имеет размер  $0,8 \times 0,06 \text{ мкм}$  и менее.

Для предупреждения повреждения пленки, особенно когда диск начинает двигаться, проводится текстурирование дисков: импульсным лазерным излучением на вращающийся диск наносятся кратероподобные шишки высотой около 20 нм. Шишки расположены по спирали, начинающейся от внутреннего радиуса диска, остальная поверхность диска имеет минимальную шероховатость, является рабочей и используется для магнитной записи. Ожидается, что в ближайшее время будет достигнут практически прямой контакт между ступицей и головкой. С этой целью необходимо использовать практически гладкие материалы толщиной 5–10 нм, покрытые слоем смазки, обеспечивающей практически безфрикционное движение головки относительно плоскости диска.

К средам для магнитной записи предъявляются также следующие требования: стабильность свойств при изменении температуры, механических воздействиях, радиации и сырости; неограниченное количество циклов записи и сохранность записанной информации более 30 лет; возможность нанесения антифрикционных/защитных покрытий и использования подложек с хорошей аэродинамикой и, что самое главное, малая стоимость производства.

К преимуществам магнитной записи можно отнести простоту и высокую надежность записи (малую вероятность ошибки), более высокую скорость записи/считывания по сравнению с оптическими системами; малую стоимость одного бита и сравнительно низкую стоимость дальнейшего увеличения плотности записи. Недостатками магнитных систем являются ограничение скорости записи индуктивностью используемого коль-

ца, а также определенное ограничение емкости диска. При использовании механических систем ограничения накладываются также на время доступа к информации и точность позиционирования головки.

В настоящее время для магнитной записи информации используются индукционные головки. В процессе работы головки поле, создаваемое электрической микрокатушкой, концентрируется с помощью магнитопровода в непосредственной близости от поверхности диска (см. рис. 3). В отличие от диска (который вращается по окружности) головка может перемещаться только в радиальном направлении. Запись продольных доменов различной ориентации осуществляется за счет изменения направления тока в микрокатушке. Существуют универсальные головки, которые совмещают как функцию записи, так и воспроизведения. Современные жесткие компьютерные диски емкостью 120 Гбайт имеют шесть головок для записи и считывания информации.

Наиболее плотная магнитная запись достигнута с применением тонкопленочных головок для считывания информации, действие которых основано на эффекте гигантского магнитосопротивления. Этот эффект заключается в изменении сопротивления материалов под воздействием магнитного поля. Он был открыт лордом Кельвином в 1856 году в обычном железе и составлял  $1/3000$  долю от величины сопротивления железа в нормальных условиях. Ученым удалось найти вещества, в которых относительное изменение сопротивления превышает величину  $1\%/\text{Э}$ . Этот гигантский эффект и используется в считывающих головках компьютеров для регистрации поля, создаваемого одним доменом (магнитное поле на поверхности диска не превышает 20–25 Э). Отметим, что в современных компьютерах запись информации осуществляется с помощью индукционной головки, а считывание – экранированной (от полей, создаваемых индукционной головкой) магниторезистивной головкой.

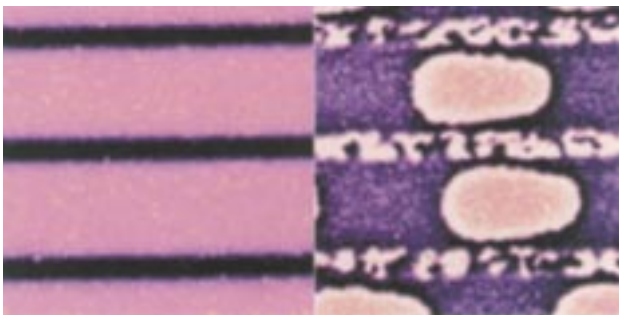
## ОПТИЧЕСКАЯ ПАМЯТЬ

В середине 1970-х – начале 1980-х годов фундаментальные исследования в области оптической записи достигли уровня, позволившего таким промышленным гигантам, как RCA, “Sony” и “Philips”, запустить в производство оптические устройства хранения информации. Первый оптический диск для хранения информации был выпущен в 1985 году. Наиболее известными устройствами такого рода в России являются компакт-диски (CD). В каждую из систем для считывания информации с CD встроен лазерный диод, работающий в ближней инфракрасной области спектра. Этот диод способен легко детектировать выбитые на поверхности диска ямы с характерным размером около 1 мкм и тем

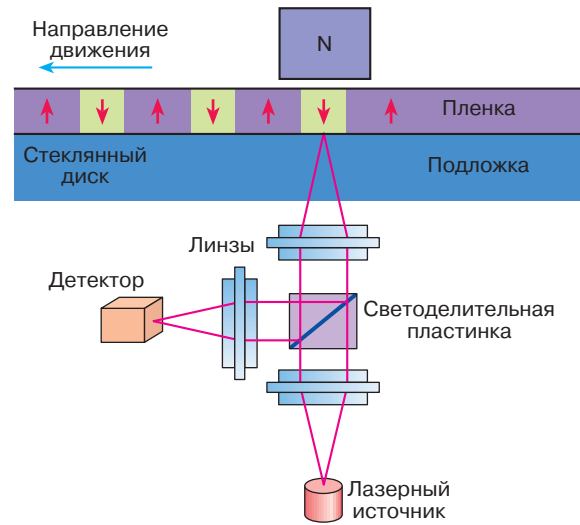
самым считывать записанную информацию. Увеличение плотности записи информации на оптических дисках в некоторой степени сдерживается отсутствием твердотельных лазеров с меньшей длиной волны. Выпускаемые CD позволяют перезаписывать информацию до ста раз. Оптические системы (так называемые Jukebox) наибольшей емкости могут записывать до 1,45 Тбит на 278 дисках.

Логическим продолжением этих работ стало развитие магнитооптического способа записи информации. Помимо обсуждаемой выше продольной записи, которая используется при создании магнитной памяти, существует также и перпендикулярная запись, при которой вектор намагниченности доменов ориентирован перпендикулярно к плоскости диска. Такой тип записи применяется в магнитооптических системах памяти. Первая коммерческая версия магнитооптической системы была выпущена только в 1994 году. Топографическое и магнитное изображение поверхности магнитооптического диска представлено на рис. 4. На правом рисунке отчетливо видны продолговатые микроустройства размером  $2 \times 1$  мкм<sup>2</sup>, соответствующие одному биту магнитной информации.

Принципиальная схема магнитооптического устройства представлена на рис. 5. При комнатной температуре величина  $H_c$  пленки составляет величину  $\sim 2$  кЭ, и она не может быть перемагничена постоянным полем 200–400 Э, создаваемым катушкой, расположенной с противоположной стороны пленки. Для записи информации лазерный луч нагревает необходимый участок магнитной пленки до почти 500 К. При этой температуре расположенный в точке нагрева домен может быть легко перемагничен полем катушки. В процессе считывания информации используется тот же лазерный источник, но уже в другой (несиловой) моде, которая не вызывает существенного нагрева пленки. Магнитооптические системы используют в своей работе



**Рис. 4.** Топографическое (слева) и магнитное (справа) изображения поверхности магнитооптического диска, полученные компанией "Digital Instruments" (США)



**Рис. 5.** Схема магнитооптической записи информации

полярный эффект Керра. При этом информация об ориентации намагниченности домена получается при анализе степени вращения плоскости поляризации лазерного луча при отражении от пленки (около  $0,3^\circ$ ). Первые такие системы использовали ферромагнитные аморфные сплавы редкоземельных и переходных металлов, обладающие перпендикулярной магнитной анизотропией. Состав пленок подбирается таким образом, чтобы температура, при которой происходит перемагничивание домена, была близка к точке магнитной компенсации или точке Кюри, где величина  $H_c$  значительно уменьшается. Эффективными составами для магнитооптической записи считаются GdFe, TbCo, TbFe, TbFeCo, Co/Pt, Co/Pd и др.

В настоящее время существуют, например, 5,25-дюймовые перезаписываемые удаляемые (переносные) магнитооптические диски емкостью до 2,3 Гбайта, 14-дюймовые двухсторонние диски имеют емкость 12 Гбайт. Предполагается, что в ближайшее время цифра возрастет до 20 Гбайт даже для 5,25-дюймового диска (при двухсторонней записи).

Для осуществления записи необходимо выполнение ряда магнитных, термомагнитных и магнитооптических требований: направление магнитного момента домена должно быть перпендикулярно плоскости пленки; распределение намагниченности по пленке должно быть устойчиво к воздействию размагничивающих полей и малых температурных колебаний; в материале должна существовать регулярная и воспроизводимая доменная структура с размером домена около 1 мкм; возможность уменьшения коэрцитивной силы по величине приблизительно на порядок при нагревании;



отсутствие изменений в соседних доменах при нагреве (сравнительно плохая теплопроводность); достаточная (для считывания) величина полярного эффекта Керра; максимально возможное отношение сигнала к шуму (более 25 дБ) во всем рабочем интервале температур и т.д.

## ПЕРСПЕКТИВЫ

Важными направлениями научных исследований в этой области является изучение эффектов, влияющих на сверхплотную запись информации, таких, как тепловые ограничения, так называемые магнитные временные эффекты и флуктуации различного характера.

Однако проблема заключается не только в том, какую среду использовать для записи информации, но и каким образом эту информацию записать и считать с данного носителя. Например, если для записи и считывания информации непосредственно использовать луч лазера, то размер одного бита информации не может быть существенно меньше половины длины волны. Цифровые видеодиски уже используют красный лазер с  $\lambda \approx 630\text{--}635$  нм, недалекая перспектива в этой области — широкое использование голубого полупроводникового GaN-лазера с длиной волны 410–415 нм.

Учеными разрабатываются несколько оптических методов записи и хранения информации. К наиболее известному из них можно отнести так называемую DVD-технология, которая уже частично пришла на смену обычным CD. Аббревиатура DVD может быть расшифрована как Digital (цифровой) Video (или Versatile) (видео- или многоцелевой) Disk (диск). DVD является форматом оптического запоминающего устройства, используемого для записи информации на удаляемых (переносных) дисках. Емкость таких 5,25-дюймовых дисков колеблется от 4,7 Гбайта для односторонних однослойных дисков до 17 Гбайт для двухсторонних двухслойных дисков (напомним, что емкость современного CD около 650 Мбайт). Использование DVD-носителей позволяет выпускать, например, двухчасовые видеофильмы, записанные на одном диске.

Большое внимание исследователей привлекает оптическая память ближнего поля. Оптика ближнего поля использует тот факт, что свет может проходить сквозь отверстия гораздо меньшего размера, чем длина волны  $\lambda$ . Однако свет при этом может распространяться на очень короткую дистанцию — так называемую область ближнего поля. Ученые предлагают реализовать данную схему путем, например, перфорирования отверстия диаметром около 250 нм на покрытом металлом конце лазерного диода. Технология же самой записи заключается в использовании летающей на малой высоте от подложки оптической головки, содержащей записывающее кольцо для магнитной записи и два оп-

тических элемента. Одним из этих элементов является твердая иммерсионная линза. Линза используется для фокусировки лазерного луча в пятно ультрамалого размера, которое затем проецируется на поверхность диска. По некоторым оценкам, уменьшение размера отверстия на лазере до 30 нм может позволить достичь плотности записи более чем 80 Гбит/см<sup>2</sup>.

Активно разрабатываются устройства, позволяющие проводить запись и считывание информации в объеме материала, то есть осуществлять трехмерное хранение информации. Использование трехмерной (3D-память) оптической памяти позволит записывать до  $10^{12}$  бит на 1 см<sup>3</sup>. Место бита в объеме материала может быть определено с помощью простых пространственных, спектральных или временных координат. Так, например, при голографической записи, концепция которой возникла еще в 1960-х годах, информация хранится в толще среды как “страницы” электронных изображений (то есть отдельные биты информации сохраняются коллективно).

Если упомянутые нами выше DVD имеют на каждой стороне лишь по два слоя для записи информации, то развиваемая сейчас двухфотонная технология записи позволяет использовать по несколько сот слоев на каждой стороне диска (созданные прототипы имеют 100 слоев при толщине 8 мм). При этом атом или молекула могут перейти из одного энергетического состояния в другое только при одновременной абсорбции двух фотонов. Использование двух лазерных лучей (возможно, даже разной длины волны) позволяет легко варьировать месторасположение бита информации в толще материала. Индуцированные изменения при этом могут быть зафиксированы как изменения абсорбции, флуоресценции, отражательной способности или электрических свойств материала в точке расположения бита. Такая технология позволит сохранять до 100 Гбайт информации на одном диске того же, что и CD и DVD, размера. Одной из перспективных сред, которая может, например, абсорбировать или флуоресцировать при записи битов, является материал spirobenzopyran. Однако при комнатной температуре записанная в нем информация может храниться не более 20 часов. Неограниченно долго данный материал может сохранять информацию только при температуре  $-32^\circ\text{C}$ , то есть при температуре сухого льда. Исследуется также возможность использования для двухфотонной записи фотохромного протеина bacteriorhodopsin и нитронафталиальдегида (rhodamine B).

Ведутся также исследования новых возможностей трехмерной записи информации, делающих ее в некотором смысле четырехмерной. При этом способе записи предлагается помимо обычной использовать также такую информацию о каждой точке записи, как длина

волны, время или молекулярная структура (например, записывать информацию в одной и той же точке пространства на разных длинах волн). Таким образом, можно будет записывать до 100 бит информации в одной точке пространства микронного размера.

Однако чисто оптические методы записи, в которых среда для записи (или ее часть) расположена на заметном расстоянии от лазера, имеют одно важное ограничение — минимальный размер бита записываемой информации ограничен величиной  $\lambda/2$ . Это обусловлено дифракционными ограничениями. Даже при использовании голубого твердотельного лазера линейный размер одного бита информации может быть лишь около 215 нм. Хотя принципиальных ограничений на создание твердотельных лазеров с длиной волны менее 400 нм нет, но трудности создания хорошо управляемых компактных лазеров заметно возрастают при дальнейшем уменьшении длины волны. Таким образом, следует ожидать, что в случае даже полного развития трехмерной памяти и при использовании голубого лазера чисто оптические методы позволят записывать в одном кубическом сантиметре не более  $10^{14}$ – $10^{15}$  бит информации. Для достижения в компьютерах плотности записи  $10^{14}/\text{см}^3$  понадобится не менее 15–20 лет.

В настоящее время разрабатываются и другие виды оптической памяти, использующей, например, в качестве носителя информации уже отдельные молекулы или предлагающие перейти к многоуровневой логике вместо общепринятой сейчас бинарной.

Обещающим кажется и использование термомеханических процессов для считывания и записи информации на тонких полимерных органических пленках. Ученые компании IBM предлагают использовать для этого так называемый millipede — тысячи кантилеверов (чувствительных элементов), закрепленных на одной кремневой подложке, причем каждый из кантилеверов может записывать и считывать информацию на/с полимерной среды.

Однако в отличие от разработок технологии магнитной памяти доведение данных работ до промышленного прототипа требует огромных финансовых затрат. В то же время проведенные к настоящему времени исследования магнитного метода записи уже сейчас

позволяют увеличивать плотности записи в два раза за один год. Дальнейшее развитие магнитной памяти не требует чрезмерно больших затрат. Цена одного мегабайта магнитной информации уже сейчас снизилась приблизительно в 500 раз от начальной его цены и не превышает нескольких десятых цента. Таким образом, можно предположить, что в ближайшие 7–10 лет магнитные материалы будут оставаться наиболее используемой средой для записи информации (по крайней мере для жестких дисков компьютеров) и в ближайшем будущем будут успешно конкурировать с чисто оптическими и другими методами.

Точного ответа на вопрос, каков предельный размер магнитного носителя одного бита информации, до сих пор не существует. По всей видимости, один бит такой информации будет включать в себя от двух до нескольких сот атомов. Для окончательного решения этой проблемы необходимо найти ответы, например, на следующие вопросы: 1) до какого наименьшего размера нанобъекта существует ферро- или ферримагнетизм, 2) возможно ли перемагничивание данного объекта, 3) возможно ли создание стабильных матриц, содержащих регулярно распределенные нанобъекты с указанными свойствами?

Что же касается далекой перспективы, то не исключено, что компьютеры будущего будут использовать для вычислений уже не биты, а так называемые кубиты (квантовые биты) информации, представляющие собой суперпозицию квантовых состояний. Реальная работа таких квантовых компьютеров потребовала бы интеграции большого количества кубитов (например, невзаимодействующих молекул) с одновременным контролем их состояния.

*Рецензент статьи Ю.В. Копаев*

\* \* \*

Александр Метталинович Тишин, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры общей физики физического факультета МГУ. Область научных интересов — магнитные явления наноструктур и функциональные материалы. Автор и соавтор более 120 научных статей.