



ИЗОТОПИЧЕСКАЯ НАНОИНЖЕНЕРИЯ ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Л.Журавлева, к.т.н., В.Плеханов, д-р ф.-м.н. / zhlubov@mail.ru

Развитие телекоммуникационных систем требует повышения пропускной способности и скорости передачи информации. Это возможно при переходе на алгоритмы ее обработки на основе квантовых систем, для чего необходима принципиально новая элементная база. Одно из эффективных направлений связано с совершенствованием технологий ее производства на основе низкоразмерных структур. В этой связи внимание разработчиков направлено на моделирование с помощью изотопической наноинженерии, которая в сочетании с ядерными технологиями может стать эффективным способом создания квантовых систем с заданными характеристиками.

Наиболее перспективны в сфере телекоммуникаций волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) информации, причем пропускная способность оптических каналов определяется в основном быстродействием элементной базы и оптическим форматом модуляции. Время прохождения сообщений по ВОСП зависит от скорости передачи оптических сигналов и от качества узлов, соединяющих отдельные участки сети, где происходит коммутация каналов и управление сетью с помощью микроэлектронной техники. Таким образом, на характеристики сети на базе ВОСП влияет быстродействие оптоэлектронных и электронных устройств.

Увеличение скорости передачи сигналов и повышение производительности используемых микросхем возможны, прежде всего, при совершенствовании технологии их производства. Своеобразным "хронометром" полупроводниковой технологии считается эмпирический закон Мура, уточнение характера изменения которого позволило выделить два периода в ее развитии (рис.1) [1].

Первый цикл - примерно с 1971 по 1999 год. Начавшийся в 2000 году второй цикл будет значительно короче и, по всей видимости, закончится в середине текущего десятилетия. Следующим должен стать период революционных перемен в обработке и передаче информации, что зависит от темпов внедрения

открытий в области материаловедения, успехов наноинженерии и нанотехнологии, объемов финансирования.

Довольно долго господствовала ситуация, когда потребность в увеличении пропускной способности опережала возможности средств связи, что стимулировало развитие сетей передачи информации. Однако с 2000 года предложения по передаче данных стали опережать спрос, поэтому началась переориентация на предоставление более широкополосных услуг связи. Акцент сместился на способы повышения скорости передачи информации по ВОСП.

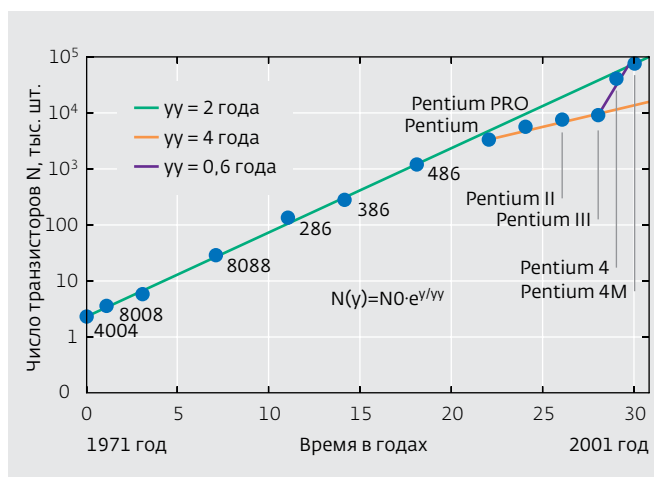


Рис.1. Закон Мура



ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Сделать это можно, совершенствуя технологии производства элементной базы. Первый вариант – расширение возможностей оптоэлектронных устройств для использования всего диапазона частот "окон прозрачности" оптического волокна. Главную роль здесь играют размеры, качество материала, технология производства низкоразмерных структур. Второй вариант – повышение числа бит информации, приходящихся на один оптический импульс, связан с совершенствованием информационных технологий.

Согласно формуле К.Шеннона, определяющей пропускную способность оптических волноводов, увеличение скорости и числа каналов ВОСП за счет нанотехнологий происходит линейно, а повышение числа переносимых единичным импульсом бит информации описывается логарифмически. При одинаковых значениях аргументов скорость роста линейной зависимости больше, чем логарифмической. По этой причине важнейший способ повышения скорости передачи информации по ВОСП – совершенствование элементной базы с помощью нанотехнологий.

НАНОТЕХНОЛОГИИ И СКОРОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Увеличение скорости передачи информации непосредственно связано с уменьшением геометрических размеров элементной базы, которую можно уменьшить до размеров нескольких молекул и даже отдельных атомов [2], и улучшением технологии ее производства. Причем, чем меньше размеры, тем больше должна быть точность ее изготовления, тем более высокие требования предъявляются к используемым технологиям.

Существуют два принципа формирования наноструктур: "сверху-вниз" и "снизу-вверх". В соответствии с первым структуры создаются избирательным удалением части материала (литография). Во втором – их формирование осуществляется селективным осаждением атомов и молекул на заданные участки поверхности подложки (эпитаксия).

Третий возможный способ формирования наноструктур основан на методе нейтронного трансмутационного легирования (НТЛ). Он позволяет создавать структуры из изотопов исходного вещества [3].

В основе НТЛ лежит реакция поглощения нейтронов ядрами исходного вещества и переход одного изотопа в другой, более

тяжелый, с последующим превращением в иной химический элемент (например, нестабильный изотоп кремния Si^{31} превращается в фосфор, что сопровождается β -излучением). Таким образом, можно получать различные изотопические слои определенной конфигурации. Метод НТЛ применяется при создании многослойных структур и p-i-n-сверхрешеток, например, из изотопов германия (Ge^{70} , Ge^{72} , Ge^{74}), он получил название изотопной инженерии [4, 5]. Преимущества его обусловлены тем, что в методе разделены рост слоев и их легирование. Слои выращиваются без примесей и имеют совершенную структуру, что позволяет избежать размытия границ "гетероперехода" и добиться снижения числа дефектов.

Способы на основе эпитаксии могут обеспечить высокую точность геометрических размеров структур, но малопроизводительны [6]. Для массового производства более перспективна литография, например, на основе сверхжесткого излучения. Основным фактором, ограничивающим точность изготовления таких структур, – дифракционные эффекты, зависящие от длины волны используемого излучения. Поэтому минимальный размер наноструктуры определяется этим параметром. Последние достижения в литографии позволяют обеспечить разрешающую способность порядка 10 нм [2]. Следовательно, для изготовления структур, требующих точность изготовления выше 10 нм, нужны другие решения. Для этих целей можно использовать источники облучения с длиной волны менее 10 нм. К ним относятся тепловые нейтроны, применяемые для изготовления изделий микроэлектроники методом НТЛ.

Основные достоинства рассматриваемого метода – точность легирования, контролируемая временем облучения потоком нейтронов, высокая однородность распределения изотопов вещества, экономическая эффективность. Так, например, в США и ряде стран Европы на базе исследовательских ядерных реакторов получают сотни тонн легированного кремния в год [3].

Искусственное изменение изотопического состава исходного материала для создания наноструктур различной конфигурации и размеров позволяет назвать его изотопической наноинженерией [7]. Важно отметить, что для кремния возможности метода ограничены малой разницей в ширине запрещенных зон его изотопов, однако существуют материалы, например, LiH и LiD, у которых этот параметр существенно выше [8].



ПРЕДЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Пределная рабочая частота устройств зависит от размеров отдельных элементов, например, транзисторов, и определяется временем пролета электрона и длиной затвора. Технологии уже позволяют создавать оксидный слой затвора толщиной 1,2 нм (менее пяти атомных слоев) и достигать рабочую частоту транзистора в 1 ТГц. Однако уменьшение размеров приборов не может происходить бесконечно. Это объясняется пределами, обусловленными фундаментальными законами природы. Первый – релятивистский: скорость распространения сигнала не может быть выше скорости света. Второй связан с принципом неопределенности Гейзенберга, согласно которому в транзисторе с ростом частоты достигается квантовый предел. Существуют и технологические ограничения, связанные с разбросом параметров, которые невозможно контролировать при пропорциональном уменьшении размеров [6].

Для повышения быстродействия требуются не только уменьшение размеров элементной базы и совершенствование технологий, но и новые архитектура, принципы работы устройств, материалы. Большие надежды связываются с графеном [9], имеющим толщину одного атомарного слоя. С его помощью планируется создать суперкомпьютер с уменьшенными в миллионы раз размерами вычислительных ячеек.

Переход на более высокий уровень возможен при создании новых устройств обработки и передачи информации с помощью молекулярной электроники [6], разновидностью которой является изотоптроника – наука о применении физики изотопов в ряде областей науки и техники [10]. В мезоскопической физике основное внимание уделяется использованию изотопических свойств химических элементов для получения новых эффектов и создания перспективных технологий. При этом применяются различные методы исследования, в том числе моделирование на уровне атомарных слоев изотопического состава вещества.

Изотоптроника – субнанонаука и субнанотехнология, поскольку размеры создаваемых с ее помощью структур на порядок меньше нанометра [8]. Химические свойства изотопов одного и того же элемента практически идентичны, но физические свойства различны, что определяется разными массой, радиусом, спином и магнитными параметрами ядер, а также величиной запрещенной зоны. В телекоммуникационных системах

изотоптроникой можно использовать для создания электронных и оптоэлектронных приборов, применяя специальные методы проектирования и способы производства изотопических наноструктур [7].

НОВЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ ОБРАБОТКИ И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Уменьшение элементной базы имеет пределы – размеры отдельных атомов. Дальнейшее повышение пропускной способности телекоммуникационных систем возможно при переходе к принципиально другим, основанным на квантовой теории, алгоритмам обработки и передачи информации. Необходима также новая элементная база. Она может быть реализована с помощью нанотехнологий, обеспечивающих разрешающую способность не хуже одного нанометра.

Одна из актуальных задач – создание квантового процессора, быстродействие которого несоизмеримо выше, чем самого совершенного изделия настоящего времени [11]. Несмотря на то, что современная вычислительная техника способна обеспечить производительность более 10^{12} опер./с, требуются еще большие мощности. Так, например, для отыскания простых сомножителей 300-значного числа самому скоростному процессору потребуются тысячелетия. Квантовый же компьютер сможет решить эту задачу за несколько секунд [12].

Для обмена квантовой информацией большое значение имеет телепортация – исчезновение объекта в одном и появление его в другом, удаленном от первого, месте. Квантовая телепортация способна оказать огромное влияние на алгоритмы управления различными объектами, передачу секретных кодов, квантовые вычисления. Ключевую роль в этом процессе играют фотонные пары, находящиеся в так называемом "сцепленном состоянии" [11, 13]. В этом случае изменение состояния одной частицы мгновенно влияет на другую, которая может быть удалена от первой на значительное расстояние. С помощью квантовой телепортации реализуется квантовый канал связи. Успешные опыты в этом направлении проведены в Швейцарии, Австралии, Японии. Основное достижение состоит в том, что с помощью поляризационных сцепленных фотонов квантовую телепортацию удалось осуществить на расстоянии более 10 км [11].

В конце 90-х годов прошлого века по дну Женевского озера по стандартному оптическому волокну была успешно проведена передача



квантового кода на расстояние 67 км [11]. Эти опыты положили начало квантовым телекоммуникационным системам.

Передача квантовых состояний (отдельных фотонов света определенной поляризации на большие расстояния) с помощью оптической связи важна, например, для квантовой криптографии. Абсолютно секретная передача информации может быть осуществлена, когда код представляет собой большую последовательность "истинно случайных чисел" и используется только один раз [14]. На практике каждый раз при посылке сообщения нужно создавать новую последовательность чисел, что связано с серьезными трудностями. Изменить ситуацию может передача квантовых состояний, позволяющих на приемной стороне обнаружить попытку "перехвата" секретного кода, поскольку любое проникновение в систему передачи такой информации сопровождается воздействием на квантовый объект, который необратимо изменяет свое состояние. Оно фиксируется с помощью специального алгоритма "сравнение уровня ошибок".

Таким образом, решить приоритетную задачу сегодняшнего дня – развитие квантовых устройств обработки и передачи информации – можно с помощью специальной элементной базы, которая позволила бы хранить, обрабатывать и передавать состояния квантовых объектов. Для этого необходимо уметь манипулировать отдельными молекулами и атомами, развивать молекулярную электронику и наноинженерию, создавать новую технологию, позволяющую обеспечить точность изготовления элементов толщиной в один атомный слой.

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА КВАНТОВЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Для кодирования квантовой информации необходимо использовать различные состояния объектов, возбуждаемых в изолированных структурах, образующих квантовую систему. В качестве кодирующего признака можно рассматривать направления поляризации фотона, фонона, экситона, ядра атома или их спинов. Важно время, в течение которого сохраняется квантовое состояние, например, горизонтальное или вертикальное направления поляризации. Это время когеренции τ_k отводится на вычислительные операции, передачу информации по квантовым каналам или ее запоминание. В зависимости от объекта оно может значительно различаться.

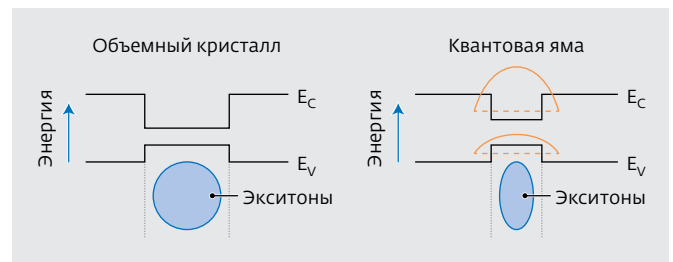


Рис.2. Орбиты экситона в объемном кристалле и квантовой яме

Квантовые состояния чувствительны к внешним возмущениям, поэтому необходимо создать систему, максимально изолированную от окружающей среды. Наиболее перспективны с точки зрения управления и сохранения когерентности квантовых состояний экситоны – не обладающие электрическим зарядом связанные состояния электрона и дырки, возникающие в низкоразмерных структурах (НРС) в результате поглощения фотона [7].

На рис.2 изображены два случая: в первом боровской радиус r вращения экситона меньше размеров структуры, что соответствует объемному кристаллу; во втором этот радиус больше геометрических размеров квантовой ямы [6], что приводит к "сжатию" экситона и усилению кулоновского притяжения. По этой причине возбуждение экситонов в таких квантовых структурах значительно облегчается даже при комнатной температуре. Примеры квантовых структур, которые могут быть использованы для создания квантовых систем, приведены на рис.3.

Размеры квантовых структур сильно влияют на локализацию экситонов (энергию связи и время когеренции), поэтому при их изготовлении требуется очень высокая точность (менее 1 нм).

Обеспечение времени когеренции, влияющего на продолжительность и количество квантовых операций, – задача чрезвычайно сложная. Главную роль здесь играет экситон-фононное взаимодействие внутри квантовой структуры. Экситон при

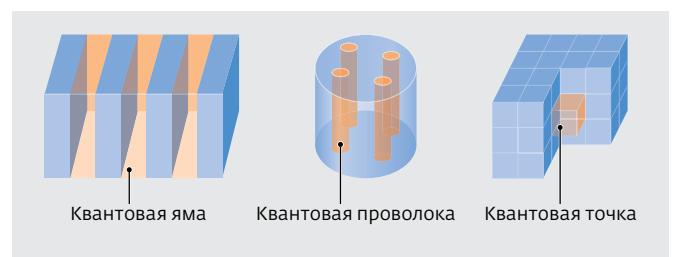


Рис.3. Примеры квантовых структур



вращении вокруг центра "тяжести" генерирует квазичастицы – фононы – локализованные области колеблющихся атомов, перемещающиеся по кристаллу в виде квантов энергии, поведение которых описывается уравнением Шредингера [15].

Хотя энергия фонона меньше, чем экситона на три порядка, их волновые функции могут пересекаться. В результате происходит декогеренция экситона, вероятность которой определяется соотношением размеров квантовой структуры и длины свободного пробега электрона. Так, критические размеры для Si и GaAs при 20°C равны 100 и 120 нм, соответственно [2, 6].

Энергия фононов зависит от изотопического состава материала. Создавая квантовую структуру из разных изотопов, можно не только избирательно возбуждать экситоны, но и менять энергию фононов, увеличивая время когеренции τ_k . Исходя из этого, для решения проблемы декогеренции квантовых систем необходимо уменьшать влияние фононов, снижая их количество и энергию. Это позволит повысить возможности квантовых процессоров, быстродействие оптоэлектронных устройств, зависящее от испускания и поглощения фононов, накопление которых происходит во многих размерно-ограниченных полупроводниковых структурах [15].

Использование изотопически "родственных" материалов для создания квантовых структур с одинаковыми зарядами ядер и мало отличающейся постоянной кристаллической решетки может снизить число собственных фононных мод и время их жизни. Кроме собственных колебаний такой решетки и движения электронов, другой причиной возникновения фононов может быть механическое напряжение в гетеропереходе при сопряжении слоев полупроводника с разной постоянной решетки, приводящее к сжимающему или растягивающему механическому воздействию [6].

Изотопические квантовые структуры, имеющие близкие значения постоянной кристаллической решетки, позволяют не только существенно уменьшить вероятность образования фононов, но и механические напряжения в "гетеропереходе". Поэтому изотопическую наноинженерию можно считать одним из перспективных направлений создания квантовых структур. Полученные с ее помощью изотопические структуры могут иметь разные размеры, число координат пространственного ограничения, формы, конфигурацию кристаллической решетки, количество и порядок чередования слоев. В многослойных структурах слои могут состоять

из чистых изотопов либо быть "легированными" более тяжелыми [7].

ИЗОТОПИЧЕСКАЯ НАНОИНЖЕНЕРИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАНТОВЫХ СТРУКТУР

Повышение быстродействия устройств, переход на квантовые принципы обработки и передачи информации требуют новых подходов к созданию наноструктур и прежде всего прогнозированию поведения фононных мод. Можно предположить, что "фононные технологии" станут главными направлениями при создании квантовых устройств.

Экспериментальные способы анализа релаксации кристаллической решетки требуют специальных методов с атомным разрешением, использование которых крайне затруднено [2]. При проектировании квантовых систем на базе наноструктур максимальное подавление помех когерентности квантовых объектов может стать основной задачей математического моделирования. При ее решении определенные преимущества имеет изотопическая наноинженерия. Главное в ней – исходные материалы близки по химическому составу, но различны по оптоэлектронным характеристикам. Это позволяет создавать пространственные ограничения без посторонних химических элементов, что увеличивает эффективность возбуждения экситонов и время их жизни [6]. Применение метода НТЛ дает возможность формировать "гетеропереход" без "шероховатостей" и посторонних элементов и обеспечивать высокую точность геометрических размеров НРС.

Используя математическое моделирование, можно дать рекомендации по изотопическому составу и форме наноструктур, кристаллической решетке, их оптимальным размерам и другим характеристикам. Основной задачей может стать поиск изотопических наноструктур, более "устойчивых" к генерации фононов или создание структур, позволяющих "подавлять" фононы. В основе моделирования могут быть разные модели, описываемые различными уравнениями, учитывающими движение кристаллообразующих частиц, деформацию упругой среды, волновые процессы и др. [1, 2, 10]. Представляется, что определенного эффекта в борьбе с помехами удастся достичь с помощью изотопических наноструктур различной геометрии и формы, способных "гасить" фононы, к которым могут быть отнесены квантовые проволоки.

Другим эффективным вариантом реализации изотопических наноструктур могут стать квантовые



точки в виде "колец, эллипсов или микроколлаидеров", причем повышения времени когеренции квантовых объектов можно добиться путем интерференции фононов друг с другом при условии их противофазности, полученной с помощью введенного дефекта. Изотопическая нанотехнология создает возможность формировать квантовые системы с заданными параметрами экситонов и фононов. Качество таких систем сильно зависит от точности изготовления, которую может обеспечить метод НТЛ [3–5].

Важно отметить и другие способы получения изотопически чистых материалов. Это, например, очистка исходного вещества от более тяжелых изотопов, выращивание однородных слоев из одного и того же изотопа. Таким образом, моделирование поведения фононных мод в наноструктурах и использование изотопической нанотехнологии может стать одним из направлений проектирования устройств передачи и обработки информации.

Литература

1. **Дьяконов В.П.** Mathcad в математике: Справ. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007.
2. **Борисенко В.Е., Воробьева А.И., Уткина Е.А.** Нанотехнология. – М.: Бином, 2009.
3. **Шлимак И.С.** Нейтронное трансмутационное легирование полупроводников: наука и приложение. – Физика твердого тела, 1999, т. 41, вып. 5, с.794–798.
4. **Berezin A.A.** Isotope superlattice and isotopically ordered structures. – Solid State Commun., 1988, 65, p.819–821.
5. **Haller E.E.** Isotopically engineered semiconductors. – J. Appl. Phys., 1995, 77, p.2857.
6. **Мартинес-Дуарт Дж.М., Мартин-Палма Р.Дж., Агулло-Руеда Ф.** Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники. – М.: Техносфера, 2007.
7. **Журавлева Л.М., Плеханов В.Г.** Изотопическая нанотехнология низкоразмерных структур. – Нано- и Микросистемная техника, 2010, №9, с.8–13.
8. **Плеханов В.Г.** Экситонная спектроскопия кристаллов с изотопическим составом. – Успехи физических наук, 1997, т. 167, №6, с.577–604.
9. **Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника.** / Сб. под ред. д.т.н., проф. Мальцева П.П. – М.: Техносфера, 2006.
10. **Журавлева Л.М., Плеханов В.Г.** Изотопитроника и квантовая информация. – Нано- и Микросистемная Техника, 2011, №3, с.46–54.
11. **Килин С.Я.** Квантовая информация. – Успехи физических наук, 1999, т. 169, №5.
12. **Shor P.W.** Polynomial – time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer, in Proc. Of the 35th Ann.Symp.of the Foundations of Computer Sci.(Ed S Goldwasser) (Los Alamitos, CA:IEEE Computer Society, 1994) p.124.
13. **Spiller T.** Quantum information processing: cryptography, computation, and teleportation. – Proc. IEEE 84, 1996 p.1719–1746.
14. **Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H.** Quantum cryptography. – Rev. Mod. Phys., 2002, 74, № 1, p.145–195.
15. **Строшио М., Дуга М.** Фононы в наноструктурах. – М.: Физматлит, 2006.