

2) островковый (трехмерный) рост слоя. Он имеет место при плохом смачивании;

3) промежуточный механизм роста, при котором сначала происходит послойный рост слоя В, который затем сменяется островковым ростом. Этот механизм наблюдается при наличии смачивания и значительном рассогласовании решеток А и В.

Последний механизм используется для получения самоорганизующихся квантовых точек в системе InGaAs/GaAs. Самый важный результат изучения данного механизма — возможность получения массива однородных по размерам, бездефектных, напряженных нанокластеров InGaAs в матрице GaAs, обладающих свойствами квантовых точек.

Часто применяется получение массивов квантовых точек с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии, основанное на использовании самосогласованного роста по механизму Странского-Крастанова. Но квантовые точки, полученные в таком процессе, оказываются значительно напряженными. Это приводит к существенным сдвигам спектра электронных состояний и к изменению управляющих параметров.

В зависимости от условий создания квантовых точек могут быть использованы различные виды представления удерживающего потенциала.

Для круглой квантовой точки возможно представление потенциала в виде:

$$U(x,y) = \frac{m_e^*}{2} \Omega^2 (x^2 + y^2)$$

Это достаточно адекватно для не слишком больших квантовых точек. Для больших квантовых точек адекватна модель «жестких стенок». Но и в том, и в другом случае получается дискретный энергетический спектр, как у атома.

рис. 02 → Стрoение двумерной квантовой точки

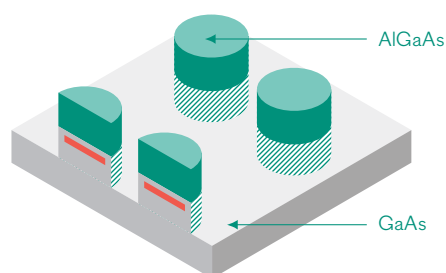
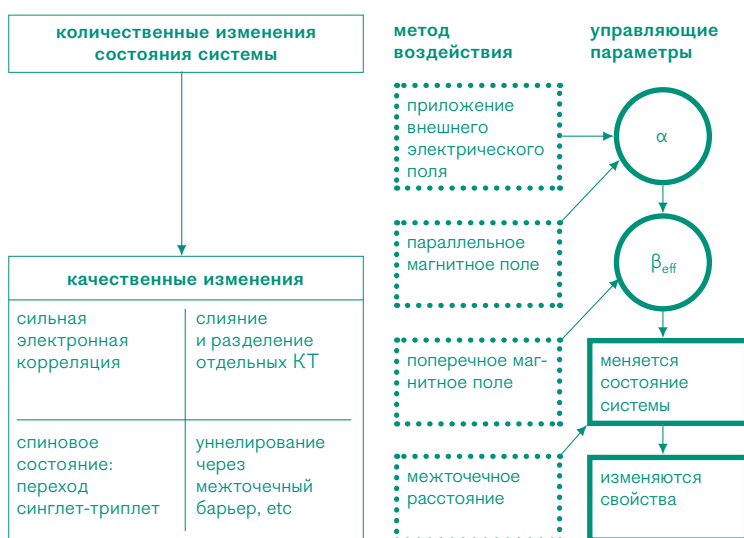


рис. 03 → Изменения состояния системы



Возможности управлять состоянием отдельных квантовых точек и систем квантовых точек и методы воздействия, схематически изображены на рисунке 03.

Квантовые точки активно применяются в различных полупроводниковых лазерах, детекторах излучения, дозиметрах, биосенсорах, солнечных батареях и т.д.

## Квантовые точки в квантовых компьютерах

В последнее время возрос интерес к квантовым точкам в качестве элементной базы нанoeлектроники, для мало- и одноэлектронных транзисторов, элементов памяти, в том числе с возможностью иерархического доступа, кубитов и логических вентилей.

Идеи квантовой механики входят в теорию вычислительных систем двумя путями. Во-первых, квантовые вычислительные алгоритмы, благодаря заложенному в них параллелизму, основанному на суперпозиции квантовых состояний, могут решать классические неполиномиальные задачи за полиномиальное время. Во-вторых, миниатюризация элементной базы компьютеров приводит к необходимости учета конечной, но отличной от единицы, вероятности перехода отдельных битов между состояниями «0» и «1» и конечной вероятности влияния этих переходов на состояние соседних битов.

Кандидатом на роль квантовой ячейки памяти в нанoeлектронных устройствах, стабильной на практически значимых временах миллисекундного порядка, может быть кубит на основе электронных состояний квантовой точки. Основное состояние спина электрона в изолированной КТ может быть надежно приготовлено с помощью оптической накачки, или же с помощью тепловой релаксации в магнитном поле. Время декогеренции спина в КТ имеет порядок микросекунд, и спиновый кубит на основе КТ является перспективным элементом хранения и обработки квантовой информации.

В реальных вычислительных устройствах и устройствах квантовой памяти необходимо манипулировать не с отдельным кубитом, а с регистром из кубитов. Такие регистры могут быть построены, например, в виде массива КТ, отделенных друг от друга расстоянием, меньшим оптической длины волны. Непосредственная адресация к отдельному кубиту в таком массиве меняет состояние других кубитов и приводит к декогеренции. Однако возможно применить (Altaisky, Kaputkina IJQI 10, (2012), 1250026; arxiv.org:1105.1464) алгоритм иерархической записи информации в блоки из кубитов, реализованных на основе КТ, не использующий адресации к отдельным кубитам, а изменяющий состояние регистра как целого.

Достоинствами КТ в качестве элементной базы нанoeлектроники являются миниатюрность, возможности контроля уровней энергии, заряда и формы КТ, масштабируемость (наличие технологии, позволяющей собирать КТ в массивы), — а также возможность оптического приготовления/измерения состояний отдельных КТ. Недостатком КТ в качестве элементов сетевого квантового компьютера является неизбежность взаимодействия с фононами гетероструктуры, на которой реализованы КТ, и, как следствие, небольшие времена декогеренции. По этой причине известные алгоритмы сетевого квантового компьютеринга — факторизация (разложение на простые

## исследования

множители) по Шору и поиск в неупорядоченной базе данных по Гроверу — пока реализованы на других квантовых системах — ионах в ловушках и системах с ядерным магнитным резонансом. Эти системы, в отличие от КТ, позволяют добиться почти полной изоляции от окружения, но требуют больших затрат и не являются масштабируемыми.

Ситуация качественно изменилась примерно с 2011 года, когда компания D-wave Systems Inc. выпустила на рынок первые адиабатические квантовые компьютеры D-wave 1 («Rainier») на 128 кубит и D-wave 2 («Vesuvius») на 512 кубит (Johnson et al. Nature 473, (2011), 194). Отличие адиабатического компьютера от сетевого компьютера состоит в том, что ключевым его элементом является не унитарная эволюция начального состояния системы кубитов через систему квантовых гейтов к конечному состоянию (решению задачи), а процесс квантового туннелирования из приготовленного начального состояния в состояние, реализующее минимум энергии некоторого гамильтониана. Фактически было реализовано квантовое решение задачи поиска минимума квадратичной формы. К данному типу относится огромный класс задач в теории автоматического управления, экономике, распознавании образов. Их решение на квантовом адиабатическом компьютере может быть получено за полиномиальное время, в то время как на обычных компьютерах требуется экспоненциальное. При этом использование процесса квантового туннелирования не накладывает жестких ограничений на взаимодействие с окружением и по сути позволяет проводить вычисления в открытой квантовой системе.



### Квантовый компьютер

Это компьютер, базовая ячейка которого имеет квантовую природу, то есть может находиться не в одном из N дискретных состояний (обычно N=2), а сразу в их суперпозиции. Идея квантовых вычислений была высказана в начале 1980-х советским математиком Юрием Маниным и американским физиком Ричардом Фейнманом (Richard Phillips Feynman). Квантовый компьютер требует для выполнения стандартных операций иных, чем у классического, алгоритмов.

### Квантовые точки в искусственном интеллекте

Квантовые нейронные сети привлекли к себе внимание, когда Google и NASA анонсировали использование процессоров D-wave Systems Inc. для задач искусственного интеллекта и классификации больших данных, с огромным финансированием соответствующих проектов. Создание квантовых систем искусственного интеллекта, безусловно, является приоритетным направлением исследований для любой индустриально развитой державы. По сути, такой интеллект должен заменить человека при принятии решений в многофакторных оптимизационных задачах, с которыми обычные компьютеры не могут справиться в силу экспоненциальных затрат времени. Прежде всего это относится к задачам автономного управления летательными аппаратами, задачам медицинской диагностики, управлению сложными техническими системами.

Квантовые точки могут оказаться полезными при создании квантовых нейронных сетей. Использование молекул квантовых точек на основе GaAs для построения квантовой нейронной сети было впервые предложено Элизабет Берман с соавторами в 2001 г. Данная идея в ее оригинальной форме, предполагавшей использование фононов подложки для управления сетью, практически нереализуема из-за сложности, связанных с управлением спектром фононов и с его неустойчивостью. Нами разрабатывается методика построения квантовой нейронной сети на основе квантовых точек с диполь-дипольным взаимодействием (Алтайский, Капуткина, Крылов ЭЧАЯ 45, (2014), 1824) и проводятся численные расчеты перепутывания состояний в такой системе при ненулевых температурах.



### Алгоритм Шора

Алгоритм факторизации целого числа (то есть разложения его на простые множители) при помощи квантового компьютера. Алгоритм требует полиномиального времени. Разработан американцем Питером Шором (Peter Shor) в 1994 году. Классический (то есть без квантового компьютера) алгоритм факторизации требует экспоненциального времени.