

УДК 539.21

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ
КВАНТОВОГО КОМПЬЮТЕРА И СИСТЕМЫ КВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ**

© 2014 г.

И.Ю. Забавичев, А.А. Потехин

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

zabavichev.rf@gmail.com

Поступила в редакцию 24.09.2013

Выполнены оценки радиационной стойкости квантового компьютера и системы квантовой криптографии. Расчеты показали, что использование многомерного массива квантовых точек в полупроводниковых элементах системы квантовой криптографии повышает её радиационную стойкость

Ключевые слова: квантовый компьютер, квантовая криптография, радиационная стойкость, квантовая точка, поток нейтронов.

Введение

В последние годы все чаще используют квантовые компьютеры и системы квантовой криптографии [1]. Криптографические методы считаются наиболее надежным способом защиты информации при передаче по незащищенным каналам связи. За последний десяток лет квантовая криптография проделала путь от идеи до первых коммерческих образцов [1, 2].

Квантовый компьютер призван решать задачи, которые являются нерешаемыми на классических компьютерах. Этот ряд задач ограничен, но они исключительно актуальны для криптоанализа. Благодаря высокой скорости разложения на простые множители [3], квантовый компьютер позволяет расшифровывать сообщения, зашифрованные при помощи популярного асимметричного криптографического алгоритма *RSA*. До сих пор этот алгоритм считался сравнительно криптостойким, так как эффективный способ разложения чисел на простые множители для классического компьютера неизвестен. Важность данного направления обусловлена особыми требованиями к безопасности военной и коммерческой связи, в том числе использующей космические каналы. Последнее обуславливает необходимость разработки радиационно стойких систем, выдерживающих воздействие излучений космического пространства и ядерного взрыва.

Одним из возможных вариантов реализации квантового компьютера является система, построенная на базе кубитов, состоящих из пары асимметричных квантовых точек разного размера с существенно отличающимися собствен-

ными энергиями. Кубит квантового компьютера является аналогом бита обычного компьютера, то есть является наименьшим элементом хранения информации. Декогерентизация – это процесс нарушения состояния когерентности квантовой системы ввиду взаимодействия ее с окружающей средой. Одной из главных проблем бесбойного функционирования квантового компьютера является зависимость времени декогерентизации от температуры [4]. Это обусловлено обязательной когерентностью состояний системы для правильной работы квантовых алгоритмов. Как следствие, для стабильной работы квантового компьютера необходимо поддержание экстремально низких температур (ниже 1 кельвина).

Одним из условий обеспечения безопасности передачи данных в квантовой криптографии является однофотонный характер используемого излучения. Информация кодируется различными поляризациями излучения. При измерении состояния фотона это состояние разрушается, и в случае одного фотона восстановить информацию не представляется возможным. Этот факт позволяет по количеству ошибок, возникающих при передаче сообщения, сделать заключение о несанкционированном прослушивании канала.

В настоящее время источники единичных фотонов могут быть выполнены в виде *p-i-n*-диодов с массивом квантовых точек в *i*-области, металлической или оксидной апертуры диаметром ~ 1 мкм, чтобы над апертурой находилась одна квантовая точка, и брэгговских зеркал для увеличения квантовой эффективности. Также массив квантовых точек может использоваться

в приемной аппаратуре, что благотворно скажется на её фоточувствительности [5].

Следует отметить, что радиационная стойкость интегральных схем обычного компьютера такова, что уже при флюенсах нейтронов $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и дозе гамма-квантов $10^2 \dots 10^4$ рад они либо полностью выходят из строя, либо весьма сильно изменяют свои параметры, так что их работоспособность становится проблематичной [6]. Примерно этими же диапазонами флюенсов и доз определяется радиационная стойкость фотопреобразователей, необходимых для системы квантовой криптографии. Как следствие, возникает необходимость поиска новой элементной базы для построения радиационно стойкой аппаратуры, предназначенной для работы в условиях открытого космоса и применяемой в военной технике.

Анализ влияния радиационных дефектов на физические процессы в квантовой точке подразумевает исследование целого комплекса процессов. Следует учитывать влияние напряженных химических связей на гетерограницах точки на ее размер и состав исходных комплексов дефектов, возникших при эпитаксиальном выращивании полупроводниковых структур. Необходимо принимать в расчет диффузию радиационных дефектов из объемных слоев, которыми зарастаются квантовые точки, а также распределение дефектов внутри квантовой точки. Проведение расчетов осложняется отсутствием экспериментальных данных по изменению температуры в квантовой точке в момент попадания нейтрона.

1. Физико-математическая модель

1.1. Физическая модель. Для анализа стойкости приборов на основе квантовых точек необходимо оценить радиационную стойкость непосредственно самих точек. Публикации по данной тематике в отечественной и англоязычной литературе практически отсутствуют, и, как следствие, не развиты математические модели, описывающие поражение квантовых объектов.

В нашей работе для теоретических расчетов использовались данные, полученные экспериментально в [7], где были рассмотрены гетероструктуры Si/Ge, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии из твердых источников на подложках Si(001). Исследовались структуры с SiGe квантовой ямой (КЯ), тонким слоем Ge, с одним слоем самоформирующихся Ge(Si)-наноостровков и многослойные структуры с Ge(Si)-наноостровками [8, 9]. Структуры с КЯ выращены при 700°C , а с наноостровками –

при 600°C [7]. При данных условиях роста (температуре и толщине осажденного Ge) в структурах с островками формируется массив куполообразных Ge(Si)-наноостровков высотой 10...12 нм, размером в плоскости роста 65...75 нм и поверхностной плотностью около 10^{10} см^{-2} .

При создании математической модели использовался ряд гипотез, основанных на данных о радиационной чувствительности спектров фотолюминесценции [7], фоточувствительности [10] и литературных данных о радиационно-стимулированном изменении параметров гетеропереходов и приборов на их основе [8, 9, 11–21]:

1. Возникающие в точке дефекты вымещаются к гетерогранице, ввиду наличия избыточного давления из-за разности постоянных кристаллических решеток материалов [7, 11, 13–15];

2. Снижение мощности фотолюминесценции также можно объяснить увеличением концентрации радиационных дефектов и их кластеров [12, 16], которые являются центрами безызлучательной рекомбинации [15];

3. Смещение спектра в область низких энергий может быть обусловлено уменьшением эффекта «бутылочного горлышка» для фононов [22]. Этот эффект заключается в увеличении времени жизни электрона в квантовой точке из-за разницы фононных спектров объемного материала и квантовой точки;

4. Для многослойной структуры можно сделать предположение, что первый слой будет являться геттером, в котором будет происходить абсорбция структурных дефектов, в то время как в остальных слоях концентрация дефектов будет ниже [10, 19–21];

5. Используя данные о стойкости *p-i-n*-диода [10, 11], можно сделать вывод об образовании структурных дефектов в кремнии, в то время как спектр фоточувствительности самих квантовых точек не претерпевает изменений; следовательно, в самой точке не происходит дефектообразования, и изменение спектра фоточувствительности происходит из-за безызлучательной рекомбинации на структурных дефектах кремния;

6. Также на квантовую точку оказывает влияние диффузия дефектов из смачивающего слоя и слоя, которым зарастаются квантовые точки [7].

Обобщение приведенных данных позволяет предложить несколько механизмов изменения параметров квантовой точки в связи с образованием кластеров радиационных дефектов, которые будут влиять на функционирование квантового компьютера и системы криптографии:

1) При возникновении кластера дефектов внутри квантовой точки возможен дрейф ато-

мов германия в объемный кремний и перемешивание атомов кремния и германия на гетерогранице (рис. 1). Это вызывает изменение процентного состава вещества квантовой точки, и, как следствие, происходит изменение ширины и высоты квантовой ямы;

2) При попадании кластера дефектов в квантовую точку также происходит локальный разогрев структуры (рис. 1а и 1г) в соответствии с теорией упругих шаров [12, 16, 18, 23, 24]. Из-за этого может произойти изменение высоты потенциального барьера квантовой ямы, а также термический выброс электрона из ямы;

3) При возникновении дефектов в квантовой точке или непосредственной близости от нее происходит тепловой дрейф дефектов к гетерогранице раздела Si-Ge (рис. 1б), где они частично закрепляются, а частично рекомбинируют [7, 24, 25].

Для системы квантовой криптографии критериями работоспособности являются однофотонный характер излучения и вероятность ложного срабатывания фотодетектора. Для квантового компьютера критическими параметрами работоспособности являются температура и время декогерентизации кубитов [26].

1.2. Математическая модель. Для описания физических процессов (рис. 1) использовалась следующая математическая модель.

1.2.1. *Геометрические размеры и уровни в квантовой точке.* Для описания уровней в квантовой точке использовалась модель одномерной прямоугольной квантовой ямы конечной глубины [28]. На основании соотношения

$$k_2 a = \pi n - 2 \arcsin \left(\frac{\hbar k_2}{\sqrt{2m_0 U_0}} \right), \quad (1)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots,$$

где

$$k_2 = \sqrt{\frac{2m_0}{\hbar^2} E}, \quad (2)$$

которое и определяет вид энергетического спектра частицы в яме, можно выделить величины, влияющие на положение уровней (рис. 1в): a – ширина ямы, которая может изменяться под действием дефектообразования; m_0 – эффективная масса частицы, зависящая от процентного состава вещества в яме, изменяющегося из-за вносимых дефектов и перемешивания атомов; U_0 – высота потенциального барьера.

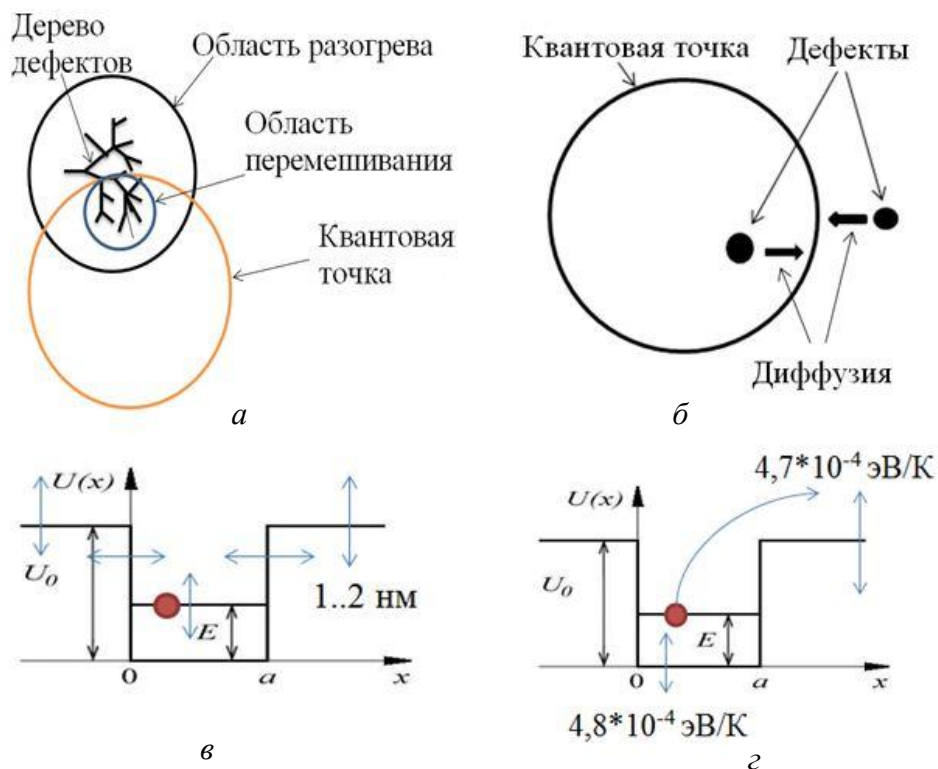


Рис. 1. а) Области разогрева и перемешивания при образовании субкластера радиационных дефектов; б) диффузия дефектов и вытеснение их к гетерогранице за счет напряженных химических связей; в) изменение ширины квантовой точки и её уровней из-за изменения размеров точки и её процентного состава вещества; г) изменение высоты барьера и уровней вследствие повышения температуры структуры [27]

1.2.2. *Изменение температуры структуры при облучении.* При прохождении интегрального потока частиц происходит общий нагрев полупроводниковой структуры, содержащей массив квантовых точек, из-за столкновения нейтронов с атомами кристаллической решетки. Под действием температуры происходит изменение положения уровней дна зоны проводимости двух материалов (рис. 1з), которое приводит к изменению высоты потенциального барьера, а следовательно, и спектра квантовой точки.

Общий нагрев структуры оценивался исходя из того, что вся энергия, заключенная в интегральном потоке нейтронов, выделится в виде тепла:

$$\Delta T = \frac{E_A \Phi S}{c_p \rho V}, \quad (3)$$

где E_A – энергия налетающих частиц; Φ – поток частиц; c_p – удельная теплопроводность; ρ – плотность материала; S – площадь грани образца, V – объем структуры.

Общий нагрев структуры интегральным потоком приводит к потере работоспособности квантового компьютера и системы квантовой криптографии ввиду изменения температурных характеристик приборов. Время потери работоспособности зависит от того, как скоро система охлаждения сможет вернуть температурный режим, необходимый для нормального функционирования квантового компьютера и системы квантовой криптографии.

1.2.3. *Изменение температуры квантовой точки при облучении.* Процессы, протекающие в момент акта столкновения нейтрона с атомом вещества, оказывают влияние на квантовую точку (рис. 1а). Изменение температуры при этом можно оценить по формуле [23]:

$$T(r, t) = T_0 + \frac{E_A}{(4\pi)^{3/2} cd} \frac{1}{(Dt)^{3/2}} e^{-\frac{r^2}{4Dt}}, \quad (4)$$

где D – коэффициент диффузии, c – теплоемкость, d – плотность.

Нагрев вещества вблизи квантовой точки может привести к термическому выбросу электрона из неё, что приведет к сбою в работе квантового компьютера, т.к. произойдет спонтанное изменение состояния кубита, вследствие чего будет получен неверный результат обработки данных. Для системы квантовой криптографии термический выброс из точки не столь критичен, т.к. это приведет к тому, что данная точка на время перестанет давать вклад в полезный сигнал.

1.2.4. *Дефектообразование.* После возникновения дерева дефектов происходит их диффузия и закрепление на гетерогранице квантовой точки (рис. 1б), так как наличие механических напряжений на границе обуславливает наличие здесь потенциальной ямы для точечных дефектов [7]. Из экспериментальных данных известно [23], что поток нейтронов с энергией ~ 1 МэВ на 99% задерживается в слое толщиной ~ 10 см. Учитывая тот факт, что при столкновении с атомом кристаллической решетки нейтрон теряет около 10% от своей первоначальной энергии, можно вычислить количество столкновений в данном объеме. Рассчитаем количество возникших дефектов N_k для выбранного объема:

$$N_k = \frac{N \Phi S V}{V_{all}}, \quad (5)$$

где N – количество первичных атомов, смещенных одним нейтроном; Φ – интегральный поток; S – площадь грани объема, через которую проходил интегральный поток; V – выбранный объем; V_{all} – объем, в котором целиком задерживается данный интегральный поток, рассчитанный как возведенная в куб толщина слоя ослабления потока нейтронов на 99%.

Вероятность поражения квантовой точки в эксперименте с единичным нейтроном определялась формулой:

$$p = \frac{V_{kt}}{V}, \quad (6)$$

где V_{kt} – объем квантовой точки; V – выбранный объем.

При этом было учтено, что в результате столкновения с нейтроном образуется кластер радиационных дефектов, состоящий из субкластеров размером ~ 10 нм и расстоянием между ними 20...50 нм [12], что увеличивает вероятность поражения квантовой точки.

Полученные результаты подставляли в формулу нахождения вероятности для схемы Бернулли:

$$P_n(k) = C_n^k p^k q^{n-k}, \quad (7)$$

где n – количество испытаний (в нашем случае – количество столкновений в заданном объеме); k – число «успехов» в n испытаниях (количество попаданий в квантовую точку с учетом размера радиационного субкластера); p – вероятность успеха в единичном испытании (в нашем случае – отношение объемов квантовой точки и выбранного объема); $q = 1 - p$.

В статье рассматривался случай интегрального потока нейтронов $\sim 10^{15}$ см⁻², поэтому число столкновений в выбранном объеме будет

большим. А при большом числе испытаний распределение в схеме Бернулли стремится к распределению Пуассона и вероятность в этом случае вычисляется по формуле:

$$P_n(k) = \frac{np^k}{k!} e^{-np}. \quad (8)$$

Тогда вероятность попадания в точку один или более раз:

$$P = 1 - e^{-np}. \quad (9)$$

Следует отметить, что предложенная модель будет описывать концентрацию дефектов в структуре с большим количеством слоев квантовых точек с погрешностью, так как крайние слои структуры будут являться геттерами, т.е. собирать дефекты из объема материала, поэтому концентрация дефектов в них будет выше. Следовательно, вероятность поражения квантовых точек в крайних слоях возрастет, а для внутренних слоев, наоборот, будет меньше.

Попадание субкластера дефектов в квантовую точку приведет к двум последствиям: изменению размеров квантовой точки и ее энергетического спектра согласно (1). Пораженная точка из-за безызлучательной рекомбинации на дефектах перестает давать вклад в излучаемую мощность. Для системы квантовой криптографии увеличение концентрации дефектов в активной области фотодетектора приведет к увеличению вероятности ложного срабатывания и к росту числа ошибок. Изменение размеров квантовой точки может привести к функциональному отказу квантового компьютера ввиду невозможности системы считывания различить состояния логических «0» и «1».

1.3. Методика проведения вычислений.

Ниже представлена блок-схема методики проведения вычислений. Авторами предложено определение вариантов отказа квантового компьютера и системы квантовой криптографии на основе оценок вероятности поражения квантовой точки и изменения температуры, которые в свою очередь зависят от параметров интегрального потока нейтронов.

Для оценки общего нагрева по формуле (3) в качестве исходных данных использовались параметры интегрального потока, такие как флюенс частиц и их средняя энергия, а также размеры и материал полупроводниковой структуры.

Для оценки локального нагрева использовалась формула (4), в которой в качестве начальных параметров выступают коэффициенты, характеризующие материал и среднюю энергию налетающих частиц. Из построенных зависимо-

стей определялись характерные временные и пространственные масштабы локализации воздействия, которые сравнивались с рабочими частотами системы и геометрическими размерами квантовых объектов. На основании этого делались выводы о возможном сбое в работе системы.

Для анализа вероятности поражения квантовой точки кластером радиационных дефектов была использована методика, приведенная в п. 1.2.3, и, соответственно, формулы (5), (6) и (9). В них в качестве входных данных использовались параметры интегрального потока: флюенс и средняя энергия частиц, которая определяет количество дефектов, генерируемых одним нейтроном, а также изменение геометрических размеров и формы квантовой точки. На основе данной оценки делались выводы о концентрации дефектов в активной области прибора и об их возможном влиянии на работу системы. Блок-схема вычислений приведена на рис. 2.

2. Результаты расчетов и их обсуждение

В данном разделе решается модельная задача оценки вероятности поражения квантовой точки кластером радиационных дефектов, а также оцениваются характерные изменения температуры структуры, вызванные взаимодействием потока нейтронов с атомами полупроводниковой структуры. Представлены результаты расчета общего нагрева структуры, дана оценка локального нагрева квантовой точки, а также вероятность попадания кластера дефектов в квантовую точку в зависимости от флюенса излучения. Расчеты проводились согласно методике, приведенной в разделе 1.3. В таблице 1 представлена зависимость общего нагрева структуры от потока частиц. Предполагалось, что длительность импульса излучения менее 1 мс, так что структура не успевает остыть.

Таблица 1

Зависимость интегрального нагрева полупроводниковой структуры от флюенса частиц

Флюенс, см ⁻²	10 ¹³	10 ¹⁴	3×10 ¹⁴	5×10 ¹⁴	10 ¹⁵
Нагрев, К	1	10	30	50	100

Видно, что при увеличении интегрального потока растет и общий нагрев. Время потери работоспособности квантового компьютера и системы квантовой криптографии определяется тем, как быстро система охлаждения сможет вернуть оптимальный температурный режим функционирования приборов.

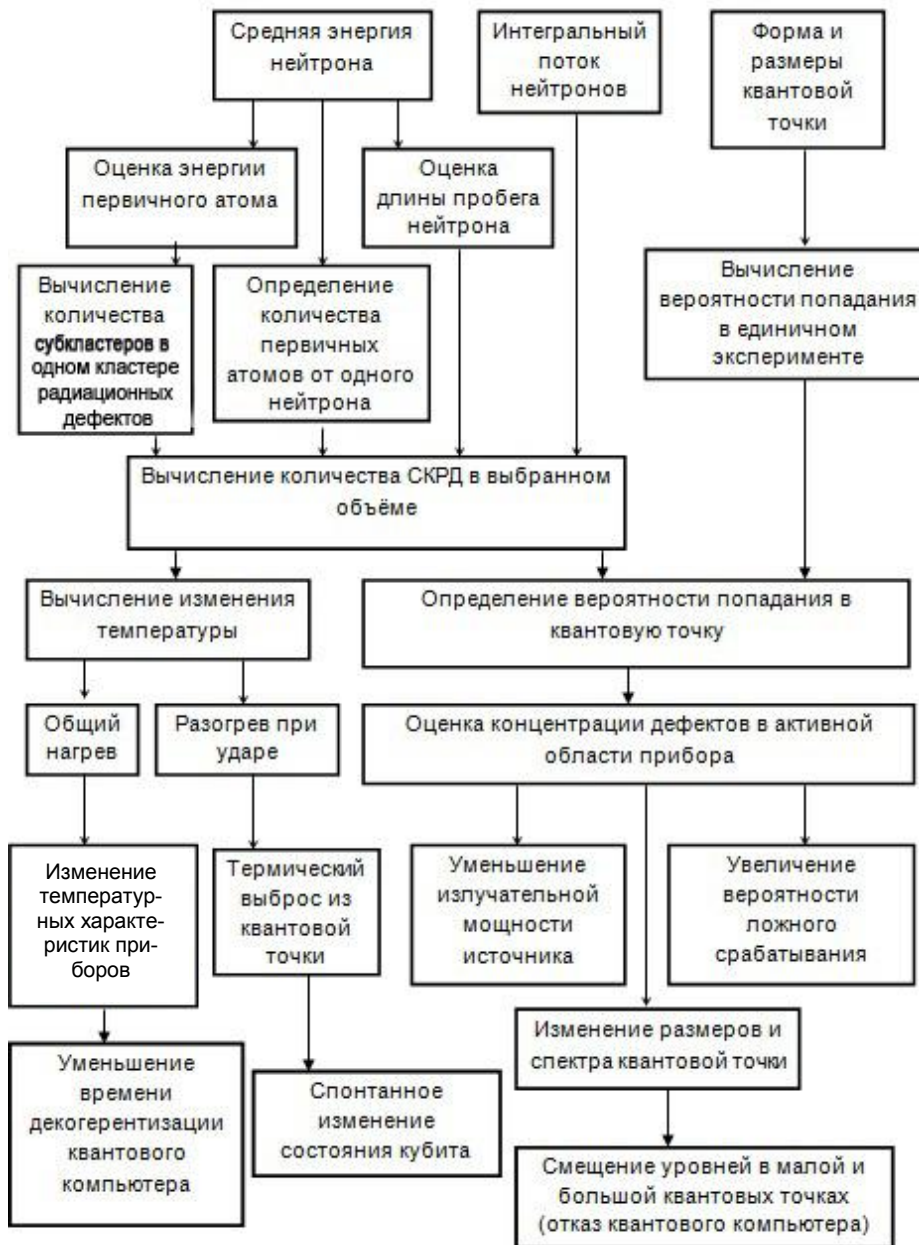


Рис. 2. Методика проведения расчётов сбоя и отказа квантового компьютера и системы квантовой криптографии

На рисунках 3 и 4 представлены временная и пространственная зависимости изменения температуры в момент удара нейтрона. Расчеты показали, что непосредственно при ударе нейтрона об атом кристаллической решетки возникают вторичные смещения атомов кристаллической решетки, формируется каскад столкновений и происходит локальный нагрев кристалла на 10^3 К и больше, что согласуется с данными [23]. Пространственный и временной масштабы указанного события составляют ~ 10 нм и ~ 10 пс соответственно. Затем температура быстро спадает за счет передачи тепла в окружающую решетку [23].

В силу малых пространственного и временного масштабов локальный нагрев оказывает влияние только на близлежащие квантовые точки, приводя к термическому выбросу электронов из них. На систему квантовой криптографии это не оказывает большого влияния, т.к. это означает, что данная точка на время перестает давать вклад в полезный сигнал. Напротив, для квантового компьютера термический выброс приводит к изменению состояния квантовой системы с нарушением когерентизации состояний кубитов, что, в свою очередь, приводит к нарушению выполнения алгоритма вычислений.

Таблица 2

**Оценка вероятности попадания кластера дефектов
в квантовую точку в зависимости от флюенса частиц**

Флюенс, см ⁻²	10 ¹³	10 ¹⁴	3×10 ¹⁴	5×10 ¹⁴	10 ¹⁵	3×10 ¹⁵	5×10 ¹⁵
Вероятность, %	1	14	36	53	77	98	99

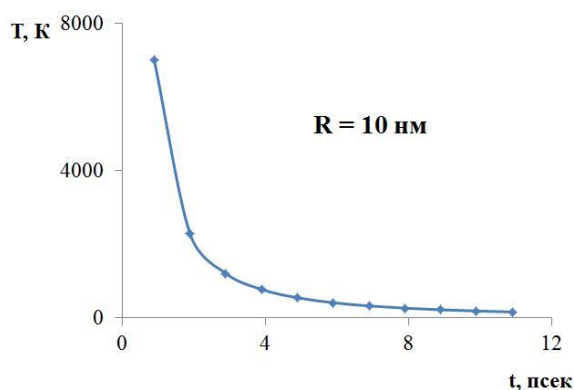


Рис. 3. Зависимость температуры локального нагрева от времени при фиксированном расстоянии

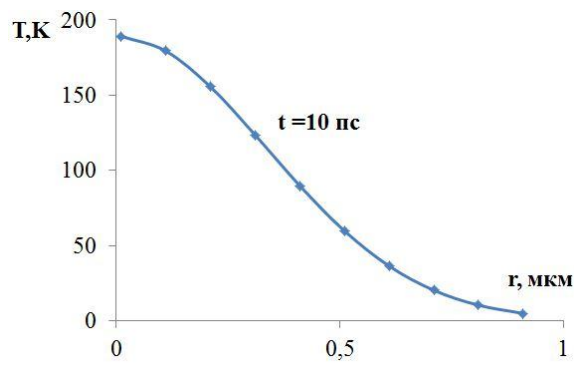


Рис. 4. Зависимость температуры локального нагрева от расстояния при фиксированном времени

В таблице 2 представлена оценка вероятностей, рассчитанных по формуле (9) для различных значений потока нейтронов.

Большая вероятность поражения квантовой точки кластером дефектов при флюенсе $\sim 10^{15}$ см⁻² отражает тот факт, что при данных значениях интегрального потока кластеры радиационных дефектов начинают перекрываться [24]. Поэтому для создания радиационно стойких систем квантовой криптографии придется отказаться от перспективных лабораторных устройств, обеспечивающих высокую скорость передачи данных, т.к. в них используется один низкоразмерный слой квантовых точек. В качестве источников и фотоприемников в радиационно стойких системах квантовой криптографии рекомендуется использовать приборы с многомерным массивом квантовых точек, т.к. это позволяет достичь высоких уровней предельно допустимых значений интегрального потока частиц ($\sim 10^{14} - 10^{15}$ см⁻²).

При большом числе попаданий нейтронов в квантовую точку, возможно, будет наблюдаться эффект «выключения» точки. Это будет наблюдаться при уменьшении размеров квантовых точек менее длины волны электрона в материале (10...30 нм), когда количество электронных уровней в квантовой яме уменьшится до нуля и точка перестанет «функционировать». Вероятность возникновения этого эффекта должна определяться экспериментально.

Выводы

В данной работе исследована радиационная стойкость квантового компьютера и системы квантовой криптографии. Авторами была предложена методика проведения подобных расчётов. Результаты работы позволяют сделать некоторые выводы:

1. Общий нагрев структуры оказывает влияние на работоспособность квантовых систем, но его воздействие краткосрочное (доли секунды), а время восстановления определяется параметрами охлаждающих систем.

2. Локальный нагрев при попадании кластера дефектов в квантовую точку имеет сравнительно малые пространственный и временной масштабы (~ 10 нм и ~ 10 пс соответственно), поэтому не оказывает влияния на работу приборов системы квантовой криптографии, использующий массив квантовых точек, отстоящих на расстояния значительно больше указанных. Наоборот, функционирование квантового компьютера может быть нарушено, потому что локальное изменение температуры может вызвать изменение состояния кубита, т.е. привести к сбою в работе компьютера.

Таким образом, использование в аппаратуре системы квантовой криптографии многомерного массива квантовых точек позволяет достичь высоких значений радиационной стойкости. В отличие от системы квантовой криптографии, в квантовом компьютере использование одного

«рабочего» слоя квантовых точек принципиально важно для функционирования. Поэтому квантовый компьютер менее стойкий к воздействию нейтронного излучения.

Список литературы

1. Muller A., Herzog T., Tittel W. Plug and Play systems for quantum cryptography // *Appl. Phys. Lett.* 1997. **70**.
2. Bennett C. H. // *Phys. Rev. Lett.* 1992. **68**. P. 3121.
3. Zhigov Y. Quantum computers speed up classical with probability zero // *Chaos Solitons and Fractals*. 1999. **10**.
4. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация: Пер. с англ. М.: Мир, 2006.
5. Robert H. Hadfield single-photon detectors for optical quantum information applications // *Nature Photonics*. 2009.
6. Кулаков В.М., Ладыгин Е.А., Шаховцов В.И. и др. Действие проникающей радиации на электронные изделия. Сов. радио, 1980.
7. Новиков А.В., Яблонский А.Н., Платонов В.В. и др. Влияние радиационного воздействия на люминесцентные свойства низкоразмерных гетероструктур SiGe/Si(001) // *Физика и техника полупроводников*. 2010. Т. 44. Вып. 3.
8. Krasilnik Z.F., Novikov A.V., Lobanov D.N., et al. SiGe nanostructures with self-assembled islands for Si-based optoelectronics // *Semiconductor Science and Technology*. 2011. V. 26. № 1. P. 014029.
9. Krasilnik Z.F., Kudryavtsev K.E., Lobanov D.N., et al. Comparative analysis of radiation effects on the electroluminescence of Si and SiGe/Si(001) heterostructures with self-assembled islands // *Semiconductors*. 2011. V. 45. № 2. P. 225–229.
10. Иванова М.М., Качемцев А.Н., Ткачев О.В., Шукайло В.П. Исследование влияния облучения на изменение концентрации неравновесных носителей заряда в базе кремниевоего *p*n-диода с кванторазмерными включениями германия // Конференция по физике полупроводников МФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 2013.
11. Shmagin V.B., Kudryavtsev K.E., Kozlov V.A., et al. Electrical and luminescence properties of silicon-based tunnel transit-time light-emitting diodes p+/n+/n-Si:Er // *Semiconductors*. 2010. V. 44. № 11. P. 1486–1491.
12. Киселева Е.В., Оболенский С.В. Топология кластеров радиационных дефектов в GaAs полевых транзисторах Шоттки // *Микроэлектроника*. 2006. Т. 35. № 5. С. 374–381.
13. Kitaev M.A., Kiseleva E.V., Obolenskii S.V. et al. Quantum-aperture formation in a quasi-ballistic MESFET by neutron irradiation // *Russian Microelectronics*. 2005. V. 34. № 6. P. 359–364.
14. Kiseleva E.V., Obolensky S.V., Kitaev M.A., et al. Stability of quasi-ballistic MESFETS with various buffer layer structures under irradiation with neutrons possessing different energy spectra // *Technical Physics Letters*. 2005. V. 31. № 10. P. 881–884.
15. Murel A.V., Obolenskii S.V., Fefelov A.G., Kiseleva E.V. Resistance of proton-irradiated GaAs photodetectors to combined gamma and neutron radiation // *Semiconductors*. 2004. V. 38. № 7. P. 800–806.
16. Оболенский С.В. Сравнение структуры кластеров радиационных дефектов в полупроводниковых материалах // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2003. № 7. С. 53–56.
17. Козлов В.А., Оболенский С.В., Шмагин В.Б., Красильник З.Ф. Естественные неоднородности в распределении туннельного тока по площади обратномещенного кремниевого *p*-*n*-перехода // *Физика и техника полупроводников*. 2012. Т. 46. № 1. С. 134–139.
18. Obolensky S.V. Effect of radiation-induced defect clusters on current flow through a quasi-ballistic GaAs MESFET // *Russian Microelectronics*. 2004. V. 33. № 2. P. 120–125.
19. Оболенский С.В. Исследование процессов дальнего действия геттерирования при ионном и лазерном облучении транзисторных структур // *Микроэлектроника*. 2004. Т. 33. № 2. С. 148–152.
20. Obolensky S.V., Skupov V.D. Peculiarities of the long-range effects in GaAs-based transistor structures upon combined irradiation with ions of various masses // *Technical Physics Letters*. 2003. V. 29. № 1. P. 54–56.
21. Obolenskii S.V., Skupov V.D. Long-range action effect in irradiation of semiconductor structures with internal interfaces // *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2001. V. 16. № 5. P. 833–840.
22. Leon R., Swift G.M., Magness B., et al. Changes in luminescence emission induced by proton irradiation: InGaAs/GaAs quantum wells and quantum dots // *Apply Physic Letter*. 2000. **76**. P. 2074.
23. Вавилов В.С. Действие излучений на полупроводники. М.: Физматгиз, 1963. 264 с.
24. Киселева Е.В., Оболенский С.В. Внутренняя структура кластера радиационных дефектов при нейтронном облучении GaAs // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Физика твердого тела*. 2003. № 1. С. 20–25.
25. Оболенский С.В., Фефелов А.Г., Киселева Е.В., Мурель А.В. Исследование характеристик встречно-штыревых GaAs-структур при комбинированном протонном, гамма- и нейтронном облучении // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Физика твердого тела*. 2003. № 1. С. 96–104.
26. Валиев К.А. Квантовые компьютеры: можно ли их сделать «большими»? // *Успехи физических наук*. 1999. **169**. С. 691.
27. Новые полупроводниковые материалы. Наноструктуры. Биологические системы. Характеристики и свойства. <http://www.matprop.ru/>
28. Матвеев В.Н. Атомная физика: Учебное пособие для студентов вузов. М.: Высш. шк., 1989. 439 с.

SIMULATION OF RADIATION RESISTANCE OF A QUANTUM COMPUTER AND A QUANTUM CRYPTOGRAPHY SYSTEM

I.Yu. Zabavichev, A.A. Potekhin

Estimates are presented of the radiation resistance of a quantum computer and a quantum cryptography system. Calculations have shown that the use of a multi-dimensional array of quantum dots in semiconductor elements of the quantum cryptography system increases its radiation resistance.

Keywords: quantum computer, quantum cryptography, radiation resistance, quantum dot, neutron flux.

References

1. Muller A., Herzog T., Tittel W. Plug and Play systems for quantum cryptography // *Appl. Phys. Lett.* 1997. **70**.
2. Bennett C. H. // *Phys. Rev. Lett.* 1992. **68**. P. 3121.
3. Zhigov Y. Quantum computers speed up classical with probability zero // *Chaos Solitons and Fractals*. 1999. **10**.
4. Nil'sen M., Chang I. Kvantovye vychisleniya i kvantovaya informacija: Per. s angl. M.: Mir, 2006.
5. Robert H. Hadfield Single-photon detectors for optical quantum information applications // *Nature Photonics*. 2009.
6. Kulakov V.M., Ladygin E.A., Shahovcov V.I. i dr. Dejstvie pronikajushhej radiacii na jelektronnye izdelija. *Sov. radio*, 1980.
7. Novikov A.V., Jablonskij A.N., Platonov V.V. i dr. Vlijanie radiacionnogo vozdejstvija na ljuminescentnye svojstva nizkorazmernih geterostruktur Si-Ge/Si(001) // *Fizika i tehnika poluprovodnikov*. 2010. T. 44. Vyp. 3.
8. Krasilnik Z.F., Novikov A.V., Lobanov D.N., et al. SiGe nanostructures with self-assembled islands for Si-based optoelectronics // *Semiconductor Science and Technology*. 2011. V. 26. № 1. P. 014029.
9. Krasilnik Z.F., Kudryavtsev K.E., Lobanov D.N., et al. Comparative analysis of radiation effects on the electroluminescence of Si and SiGe/Si(001) heterostructures with self-assembled islands // *Semiconductors*. 2011. V. 45. № 2. P. 225–229.
10. Ivanova M.M., Kachemcev A.N., Tkachev O.V., Shukajlo V.P. Issledovanie vlijanija obluchenija na izmenenie koncentracii neravnovesnyh nositelej zarjada v baze kremnievogo *pin*-dioda s kvantovorazmernymi vkljuchenijami germanija // Konferencija po fizike poluprovodnikov MFTI im. A.F. Ioffe RAN, 2013.
11. Shmagin V.B., Kudryavtsev K.E., Kozlov V.A., et al. Electrical and luminescence properties of silicon-based tunnel transit-time light-emitting diodes p+/n+/n-Si:Er // *Semiconductors*. 2010. V. 44. № 11. P. 1486–1491.
12. Kiseleva E.V., Obolenskij S.V. Topologija klasterov radiacionnyh defektov v GaAs polevyh tranzistorah Shottki // *Mikroelektronika*. 2006. T. 35. № 5. S. 374–381.
13. Kitaev M.A., Kiseleva E.V., Obolenskij S.V. et al. Quantum-aperture formation in a quasi-ballistic MESFET by neutron irradiation // *Russian Microelectronics*. 2005. V. 34. № 6. P. 359–364.
14. Kiseleva E.V., Obolensky S.V., Kitaev M.A., et al. Stability of quasi-ballistic MESFETS with various buffer layer structures under irradiation with neutrons possessing different energy spectra // *Technical Physics Letters*. 2005. V. 31. № 10. P. 881–884.
15. Murel A.V., Obolenskij S.V., Fefelov A.G., Kiseleva E.V. Resistance of proton-irradiated GaAs photodetectors to combined gamma and neutron radiation // *Semiconductors*. 2004. V. 38. № 7. P. 800–806.
16. Obolenskij S.V. Sravnenie struktury klasterov radiacionnyh defektov v poluprovodnikovyh materialah // *Poverhnost'. Rentgenovskie, sinhrotronnye i nejtronnye issledovanija*. 2003. № 7. S. 53–56.
17. Kozlov V.A., Obolenskij S.V., Shmagin V.B., Krasil'nik Z.F. Estestvennye neodnorodnosti v raspredelenii tunnel'nogo toka po ploshhadi obratnosmeshhennogo kremnievogo *p-n*-peregoda // *Fizika i tehnika poluprovodnikov*. 2012. T. 46. № 1. S. 134–139.
18. Obolensky S.V. Effect of radiation-induced defect clusters on current flow through a quasi-ballistic GaAs MESFET // *Russian Microelectronics*. 2004. V. 33. № 2. P. 120–125.
19. Obolenskij S.V. Issledovanie processov dal'no-dejstvujushhego getterirovanija pri ionnom i lazernom obluchenii tranzistornyh struktur // *Mikroelektronika*. 2004. T. 33. № 2. S. 148–152.
20. Obolensky S.V., Skupov V.D. Peculiarities of the long-range effects in GaAs-based transistor structures upon combined irradiation with ions of various masses // *Technical Physics Letters*. 2003. V. 29. № 1. P. 54–56.
21. Obolenskij S.V., Skupov V.D. Long-range action effect in irradiation of semiconductor structures with internal interfaces // *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2001. V. 16. № 5. P. 833–840.
22. Leon R., Swift G.M., Magness B., et al. Changes in luminescence emission induced by proton irradiation: InGaAs/GaAs quantum wells and quantum dots // *Apply Physic Letter*. 2000. **76**. P. 2074.
23. Vavilov V.S. Dejstvie izluchenij na poluprovodniki. M.: Fizmatgiz, 1963. 264 s.
24. Kiseleva E.V., Obolenskij S.V. Vnutrennjaja struktura klastera radiacionnyh defektov pri nejtronnom obluchenii GaAs // *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. Serija: Fizika tverdogo tela*. 2003. № 1. S. 20–25.
25. Obolenskij S.V., Fefelov A.G., Kiseleva E.V., Murel' A.V. Issledovanie harakteristik vstrechnoshtyrevyh GaAs-struktur pri kombinirovannom proton-

nom, gamma- i nejtronnom obluchenii // Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. Serija: Fizika tverdogo tela. 2003. № 1. S. 96–104.

26. Valiev K.A. Kvantovye komp'jutery: možno li ih sdelat' «bol'shimi»? // Uspehi fizicheskikh nauk. 1999. **169**, S. 691.

27. Nove poluprovodnikovye materialy. Nanos-truktury. Biologicheskie sistemy. Harakteristiki i svojstva. <http://www.matprop.ru/>

28. Matveev V.N. Atomnaja fizika: Uchebnoe posobie dlja studentov vuzov. M.: Vyssh. shk., 1989. 439 s.