

УДК 621.383.5

МНОГОКРИСТАЛЬНЫЙ КВАНТОВЫЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬА.В. КОРОЛЁВ, А.В. АНДРЕЕНКО, А.В. КРИВОШЕЕВА,
А.Л. ДАНИЛЮК, В.Е. БОРИСЕНКО*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь,**Поступила в редакцию 29 сентября 2006*

Предложена компоновка многокристального квантового вычислительного модуля на ансамблевых кубитах с использованием постоянного V-образного магнита. Дана оценка критериев разделения резонансных частот и измеримости состояний ансамблевых кубит на основе квантовых шнуров индия. Показано, что магнитное поле, создаваемое V-образным постоянным магнитом, лежит в диапазоне 10^4 – 10^5 А/м и имеет градиент порядка $4 \cdot 10^{10}$ А/м², что достаточно для организации квантовых вычислений.

Ключевые слова: ансамблевые кубиты, квантовые вычисления, квантовые шнуры.

Введение

Квантовая информатика является одной из наиболее быстро развивающихся отраслей современных знаний. Практическая же реализация квантовых вычислений сталкивается с проблемой поиска физического объекта (системы объектов), на котором можно реализовать квантовый вычислительный гейт – ядро квантового вычислительного модуля. Наиболее изученными и экспериментально реализованными на сегодняшний день являются квантовые гейты на основе ядерного магнитного резонанса (ЯМР) в жидкостях при комнатной температуре и на ионах в одномерном ионном кристалле в ловушке Пауля [1]. С точки зрения практики перспективны конструкции квантовых вычислительных гейтов, изготавливаемых на основе твердотельных технологий.

В данной работе предлагается компоновка квантового вычислительного модуля, в который входят: вычислительный гейт, магнитообразующая структура, элементы управления. В качестве вычислительного гейта авторы предлагают использовать ансамблевые кубиты, состоящие из квантовых шнуров индия (спиновое число 9/2), сформированных на поверхности кремния. В качестве магнитообразующей структуры используется постоянный магнит V-образного типа.

Компоновка многокристального квантового вычислительного модуля

Ранее, в работе [2], нами предложено использовать в качестве магнитообразующей структуры тонкопленочную магнитную головку (ТМГ). На основе ТМГ возможно получать магнитные поля очень удобной, с точки зрения квантовых вычислений, конфигурации, т.е. с высоким градиентом магнитного поля в одном направлении и близким к нулю в другом. Еще одним преимуществом ТМГ является то, что структура, на которой реализованы ансамблевые кубиты, находится в магнитном поле только при подаче в обмотку ТМГ тока. Однако изготовление ТМГ необходимого микрометрового размера является достаточно сложным с технологи-

ческой точки зрения. В данной работе мы предлагаем в качестве магнитообразующей структуры использовать постоянный магнит V-образной конфигурации.

Геометрические размеры, конфигурация и рассчитанное распределение магнитного поля предлагаемого постоянного магнита представлены на рис.1. В качестве материала магнита используется сплав АЛЬНИКО. Расчет распределения магнитного поля осуществлен с использованием программного комплекса ELCUT [3]. Предварительными расчетами проанализированы магнитообразующие структуры различных геометрических форм (полоса, П-образная форма, V-образная) с точки зрения их применимости для разделения резонансных частот ансамблевых кубит и управления ими. Проведенные расчеты распределения магнитного поля показали, что с помощью выбранной V-образной конфигурации магнитообразующей структуры возможно получить величину напряженности магнитного поля, более высокую по сравнению с другими рассмотренными геометрическими формами. Отметим, что важным фактором в данном случае является получение требуемого градиента магнитного поля ($> \sim 10^{10}$ А/м²) в выбранном направлении и близкого к нулю в перпендикулярном к выбранному. Таким образом, V-образная форма постоянного магнита была выбрана после анализа распределения магнитных полей, создаваемых различными конфигурациями, как наиболее оптимальная для данной задачи.

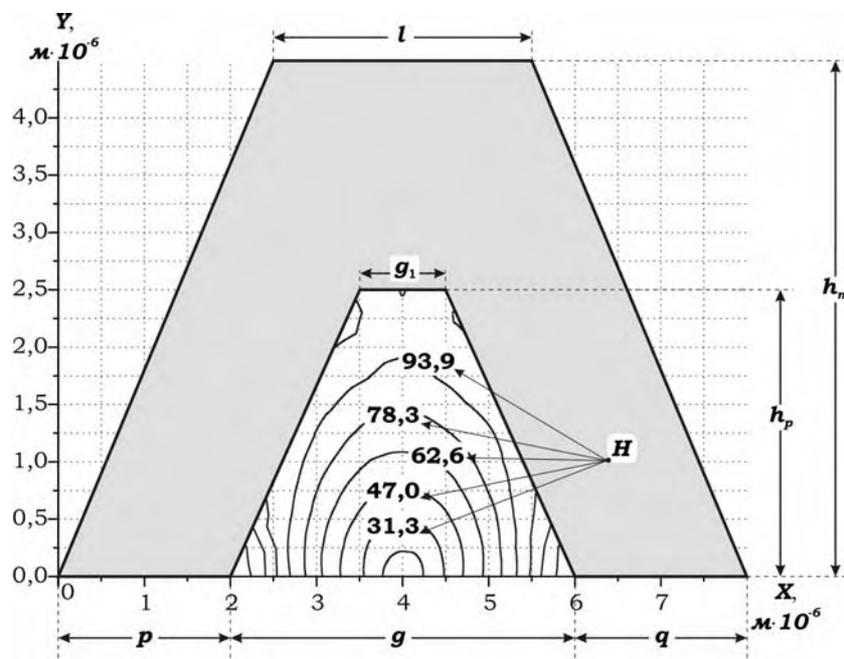


Рис. 1. Геометрические размеры и распределение магнитного поля постоянного V-образного магнита. Распределение магнитного поля — $H \cdot 10^3$ А/м

Характерными геометрическими размерами исследуемой V-образной структуры являются: ширина полюсов p и q , максимальное g и минимальное g_1 расстояние между полюсами, общая высота структуры h_m , высота полюсов h_p , расстояние между полюсами l , рис. 1. Толщина структуры на подложке выбиралась постоянной и равной 1 мкм. Указанные размеры варьировали в пределах, приведенных в таблице.

Параметры моделируемой V-образной магнитной структуры

Параметр	p , мкм	q , мкм	g , мкм	g_1 , мкм	h_m , мкм	h_p , мкм	l , мкм
Диапазон значений	1–2	1–2	1–11	0–1	4,5–6	2,5–5	0–3

В результате моделирования установлено, что оптимальным соотношением характерных геометрических размеров структуры для последующего удовлетворения критериям, предъявляемым к организации квантовых вычислений, являются следующие: $p=q=2$ мкм, $g=4$ мкм, $g_1=1$ мкм, $h_m=5$ мкм, $h_p=2,5$ мкм, $l=3$ мкм.

Распределение магнитного поля внутри зазора носит нелинейный характер по направлению к смыканию полюсов и практически линейный в перпендикулярном направлении, т.е. на каждом заданном уровне от общей высоты структуры (рис. 1). Выявленное нелинейное распределение магнитного поля характеризуется изменением его напряженности в области 10^4 – 10^5 А/м. Градиент магнитного поля при этом по оси симметрии структуры составляет порядка $4 \cdot 10^4$ А/м² (или $\sim 0,04$ Тл/мкм). При отклонении от оси симметрии на 0,5 мкм величина градиента уменьшается на 10%.

Для контролируемого ввода структуры с ансамблевыми кубитами в магнитное поле предлагается использовать пьезоэлектрический эффект. Хорошие результаты дают материалы, обладающие гигантской электрострикцией [4]. Однако на сегодняшний день разработаны и используются в производстве высокоточных пошаговых двигателей пьезокерамические актюаторы так называемой пакетной компоновки [5].

На рис. 2 представлена компоновка предлагаемого многокристального квантового вычислительного модуля. Он включает постоянный магнит с локализованными вблизи его рабочего зазора кубитами, прикрепленными к актюатору. При приложении питающего напряжения к контактам актюатора происходит увеличение линейного геометрического размера на заданную величину Δ , которая должна быть в пределах 1,5–2 мкм. При снятии напряжения с контактов актюатора структура возвращается в исходное состояние, выходя при этом из области действия магнитного поля постоянного V-образного магнита.

Для определения рабочего участка V-образного магнита для размещения структуры с ансамблевыми кубитами определены критерии, определяющие принципиальную для данной компоновки квантового вычислительного модуля возможность осуществления квантовых логических операций.

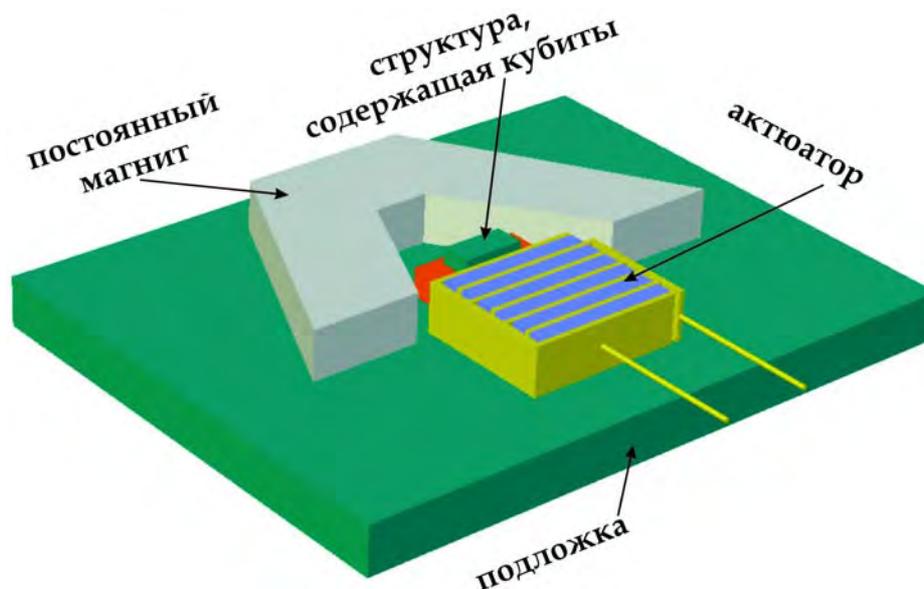


Рис. 2. Компоновка многокристального квантового вычислительного модуля

Критерии разделения резонансных частот и измеримости ансамблевых кубит в магнитном поле постоянного V-образного магнита

Для организации квантовых вычислений с использованием ансамблевых кубит на ядерных спинах необходима разработка способа для определения состояний спинов группы атомов. Одной из наиболее перспективных на данном этапе развития технологии является методика, основанная на эффектах взаимодействия ядер с магнитным полем заданной конфигурации. Теоретическое обоснование использования этой методики представлено в [6]. В данной работе приведено несколько практических критериев, позволяющих дать оценку принципиальной возможности организации квантовых вычислений в рассматриваемой системе.

Первый критерий основан на том, что для разграничения состояний ядерных спинов двух соседних ансамблевых кубит необходимо, чтобы энергия взаимодействия каждого из них с внешним магнитным полем была больше энергии их собственного взаимодействия. Это можно выразить следующим критерием [6]:

$$\eta = \frac{\Delta\omega}{A_{nd}/\hbar} = \frac{4\pi b^4 |I|}{\mu_N \mu_0 g_I} \frac{d|B|}{dr} > 1, \quad (1)$$

где $\Delta\omega$ — разность частот взаимодействия с магнитным полем двух соседних ансамблевых кубит, A_{nd} — константа дипольного взаимодействия между двумя ядерными ансамблевыми кубитами; I — спиновое число ядер; g_I — гиромагнитное отношение ядра; μ_N — ядерный магнетон, $d|B|/dr$ — градиент внешнего магнитного поля (далее будем обозначать ∇B); r — координата; b — расстояние между двумя соседними кубитами.

Критерий, выраженный соотношением (1), так же показывает, какая величина градиента внешнего магнитного поля необходима в той или иной системе для организации квантовых вычислений.

После инициализации кубит (ориентации ядерных спинов в одном направлении) методом ядерного магнитного резонанса или оптическим способом необходимо оценить время жизни такого состояния. Это время определяется временем ядерной релаксации, т.е. временем, необходимым системе для возвращения в исходное состояние после прекращения действия электромагнитного поля, задающего ориентацию ядерных спинов. Эти процессы характеризуются продольным T_1 и поперечным T_2 временем ядерной релаксации. Время T_1 определяется процессами спин-решеточной релаксации, а время T_2 — процессами дипольного взаимодействия между спинами ядер.

Экспериментально наблюдаемое затухание свободной индукции, пропорциональное поперечному времени релаксации ядер T_2 , имеет экспоненциальный вид. Фурье-преобразование T_2 дает функцию Лоренца с шириной половины максимума, равной: $\Delta\nu = 1/\pi T_2$.

Важность масштаба времени T_2 для организации квантовых вычислений связана со вторым качественным критерием: чтобы управлять каждым ансамблевым кубитом индивидуально, разность резонансных частот для соседних кубит должна быть больше ширины линии $\Delta\nu$. Таким образом, второй критерий для организации квантовых вычислений определяется как отношение разности резонансных частот соседних кубит к ширине линии $\Delta\nu$:

$$\alpha = \frac{g_I \mu_N b \nabla B}{h \Delta\nu} = \frac{1}{2\hbar} T_2 g_I \mu_N b \nabla B. \quad (2)$$

Время T_2 оценим из соотношения [7]:

$$T_2 \approx (A_{nd} \gamma / 2\pi\hbar)^{-1}, \quad (3)$$

где $\gamma^2 = (9/16) \sum_k (1 - 3 \cos^2(\theta_{\mu}))^2 (a^6 / r_{jk}^6)$ — структурный фактор, определяющий вклад ядер одного (отдельного) ансамблевого кубита в поперечную релаксацию.

По предложенной выше методике была проведена оценка критериев η и α для квантовых шнуров индия на поверхности кремния в магнитном поле постоянного V-образного магнита. Взяты следующие параметры [2]: $b=0,8 \cdot 10^{-9}$ м, $I=9/2$, $T_2=3 \cdot 10^{-4}$ с. Результаты расчета критерия α представлены на рис. 3.

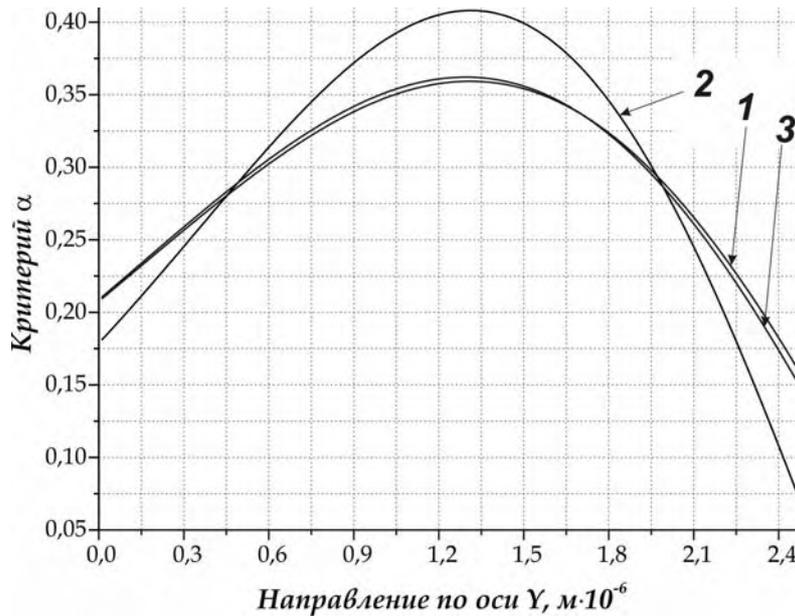


Рис. 3. Критерий α : кривая 1 — на уровне 3,5 мкм по оси x ; кривая 2 — на уровне 4 мкм по оси x ; кривая 3 — на уровне 4,5 мкм по оси x

Наилучший результат дает расположение структуры, содержащей ансамблевые кубиты, на уровне 4 мкм по оси x и на интервале 1,2–1,5 мкм по оси y . Однако в этом случае слишком узок интервал, где существует необходимый градиент магнитного поля в направлении оси x . Наиболее подходящим с этой точки зрения является интервал 1,5–1,8 мкм по оси y . Критерий η в выбранном диапазоне координат имеет значение ~ 140 –150.

Таким образом, в рамках предложенной компоновки квантовые вычисления могут осуществляться на ансамблевых кубитах (квантовые шнуры индия на поверхности кремния), помещенных в магнитное поле V-образного постоянного магнита в область 1,5–1,8 мкм по оси y на уровне 4 мкм по оси x .

Приведенные оценки параметров структуры показывают возможность осуществления квантовых логических операций с помощью предложенного квантового вычислительного модуля.

Выводы

Предложенная компоновка многокристального квантового вычислительного модуля может быть использована для осуществления основных квантовых логических операций, так как удовлетворяет критериям разделения резонансных частот и измеримости (сепарации кубит при измерении их состояния) и использует ансамблевые кубиты со спиновым числом $9/2$, что достаточно не только для воспроизведения работы вентиля "Дважды контролируемое унитарное преобразование" (Controlled Controlled Unitary Transformation) [8], но и для создания дополнительных ячеек памяти, что крайне важно для коррекции ошибок квантовых вычислений.

Проведенные расчеты показали, что магнитное поле, создаваемое V-образным постоянным магнитом, лежит в диапазоне 10^4 – 10^5 А/м и имеет градиент порядка $4 \cdot 10^{10}$ А/м², достаточный, чтобы удовлетворить критериям разделения частот ансамблевых кубит, а именно: $\alpha \approx 0,35$ –0,40 и $\eta \approx 140$ –150.

Данный вычислительный модуль может быть реализован в рамках хорошо отработанной кремниевой технологии с низкой стоимостью.

MULTICHIP QUANTUM COMPUTING CLUSTER

A.V. KOROLEV, A.V. ANDREYENKA, A.V. KRIVOSHEEVA,
A.L. DANILYUK, V.E. BORISENKO

Abstract

The design of multichip quantum computing cluster using assembly qubits and V-shaped magnet is proposed. Criteria for the frequency separation and the measurements of the qubit states have been estimated. The magnetic field produced by the V-shaped magnet was shown to be 10^4 – 10^5 A/m with the gradient of $4 \cdot 10^{10}$ A/m², which is sufficient for quantum computing.

Литература

1. *Валиев К.А.* // УФН. 2005. Т. 175, № 1. С. 3–39.
2. *Korolev A.V., Krivosheeva A.V., Giro A.M., Danilyuk A.L.* // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures, edited by V. E. Borisenko, S. V. Gaponenko, V. S. Gurin. World Scientific, Singapore, 2005, P. 327–330.
3. ELCUT™ Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. СПб., 2000.
4. *Гриднев С.А.* // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 5. С. 105–111.
5. Пьезоэлектрическая керамика: принципы и применение / Пер. с англ. Жукова С.Н. Минск. 2003.
6. *Goldman J.R., Ladd T.D., Yamaguchi F., Yamamoto Y.* // Applied Physics A. 2000. Vol. 71. P. 11–17.
7. *Ladd T.D., Goldman J.R., Yamaguchi F., Yamamoto Y.* // Applied Physics A. 2000. Vol. 71. P. 27–36.
8. *Кессель А.Р., Ермаков В.Л.* // Письма в ЖЭТФ. 2000. Т. 71, вып. 7. С. 443–447.