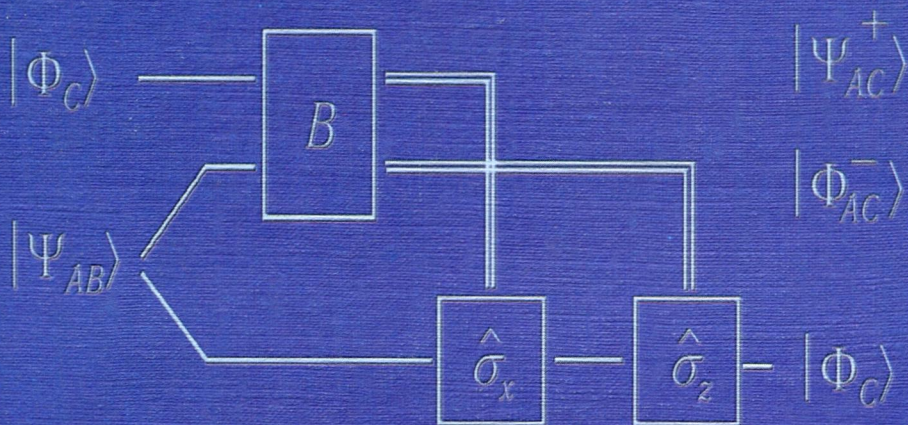


К. А. Валиев, А. А. Кокин

# КВАНТОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ: НАДЕЖДЫ И РЕАЛЬНОСТЬ



**R&C**  
Dynamics

**К.А.Валиев, А.А.Кокин**

# **КВАНТОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ:**

**НАДЕЖДЫ И РЕАЛЬНОСТЬ**

**R&C**  
*Dynamics*

*PXD*

Москва · Ижевск

2001

**Валиев К. А., Кокин А. А.**

Квантовые компьютеры: надежды и реальность. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001, 352 стр.

Предлагаемая монография представляет собой первую отечественную попытку систематического изложения как математических, так и физических основ квантовых вычислений и принципов работы квантовых компьютеров. В ней определены необходимые понятия квантовой теории информации, описаны основные квантовые логические операции и квантовые алгоритмы; обсуждаются ограничения, препятствующие полномасштабным квантовым вычислениям, и возможные пути их преодоления; детально рассматриваются отдельные варианты уже реализованных прототипов квантовых компьютеров и пока нереализованных предложений, а также анализируются их преимущества, недостатки и проблемы реализации. В книгу включены некоторые результаты, полученные авторами.

Содержание книги отражает опыт исследований, накопленный на 2000-й год, и отраженный, главным образом, в зарубежной периодической литературе и Интернете.

Книга представляет интерес для широкого круга специалистов — математиков, физиков и инженеров-разработчиков вычислительных систем. Она будет также полезна преподавателям, аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.



Издание осуществлено при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований  
по проекту № 01-02-30047

---

ISBN 5-93972-024-2

© НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001

<http://rzd.ru>

---

---

# Содержание

Предисловие . . . . .	9
Введение . . . . .	12
<b>ГЛАВА 1. Преобразование информации в квантовых систе- мах . . . . .</b>	<b>20</b>
1.1. Необратимые и обратимые классические информацион- ные процессы . . . . .	20
1.1.1. Информационная энтропия Шеннона. Количество информации . . . . .	20
1.1.2. Термодинамический предел для энергии переключе- ния логического элемента . . . . .	23
1.1.3. Пропускная способность информационного канала. Энергетическая цена передаваемого бита информа- ции . . . . .	23
1.1.4. Обратимые логические операции и обратимые вен- тили . . . . .	25
1.2. Основные понятия квантовой теории информации . . . . .	29
1.2.1. Оператор (матрица) плотности. Чистое и смешан- ное состояние . . . . .	29
1.2.2. Энтропия фон Неймана . . . . .	31
1.2.3. Взаимная информация. Информация Халево . . . . .	33
1.3. Квантовые двухуровневые информационные ячейки-кубиты	35
1.4. Запутывание квантовых состояний . . . . .	39
1.4.1. Чистые состояния . . . . .	39
1.4.2. Смешанные состояния . . . . .	45
1.5. Декогерентизация . . . . .	50
1.5.1. Основные понятия . . . . .	50
1.5.2. Точно решаемая квантовая модель декогерентизации	55
Литература . . . . .	61

<b>Глава 2. Квантовые вычисления . . . . .</b>	<b>66</b>
2.1. Основные квантовые логические операции . . . . .	66
2.2. Некоторые квантовые алгоритмы . . . . .	70
2.2.1. Формирование запутанного состояния . . . . .	70
2.2.2. Задача Дойча . . . . .	71
2.2.3. Квантовая телепортация . . . . .	74
2.2.4. Клонирование сигнального состояния . . . . .	79
2.2.5. Квантовое фурье-преобразование . . . . .	81
2.2.6. Алгоритм факторизации Шора . . . . .	86
2.2.7. Алгоритм Гровера поиска в базе данных . . . . .	92
2.3. Помехоустойчивость квантовых вычислительных процес- сов . . . . .	95
2.3.1. Коррекция квантовых ошибок путем кодирования сигнала . . . . .	95
2.3.2. Универсальные помехоустойчивые квантовые вы- числения . . . . .	99
2.3.3. Помехоустойчивые квантовые вентили с телепор- тацией квантовых состояний . . . . .	103
Приложение П.2. Квантовое вейвлет-преобразование . . . . .	104
П.2.1. Некоторые общие сведения . . . . .	104
П.2.2. Построение ортонормированного вейвлет-базиса . . . . .	106
П.2.3. Дискретное вейвлет-преобразование . . . . .	108
П.2.4. Вейвлет-преобразование Хаара . . . . .	111
П.2.5. Квантовое вейвлет-преобразование как альтерна- тива фурье-преобразованию в алгоритме фактори- зации Шора . . . . .	114
Литература . . . . .	116
 <b>Глава 3. Квантовый компьютер на ионах в ловушках . . . . .</b>	 <b>121</b>
3.1. Основные требования, выполнение которых необходи- мо для реализации любого полномасштабного квантового компьютера . . . . .	121
3.2. Ловушки для ионов и нейтральных атомов . . . . .	123
3.2.1. Электромагнитная ловушка Пеннинга . . . . .	123
3.2.2. Ловушка Пауля . . . . .	124
3.2.3. Ловушки для нейтральных атомов. Оптические ре- шетки . . . . .	132

3.3. Лазерное охлаждение ионов . . . . .	134
3.4. Колебательное движение ионов в линейном ионном кристалле . . . . .	139
3.5. Внутренние кубиты на ионах в ловушке . . . . .	143
3.6. Взаимодействие между кубитами через посредство фононного кубита. Двухкубитовые операции . . . . .	146
3.7. Считывание результатов вычислений в квантовом компьютере на ионах в ловушке . . . . .	150
3.8. Лазерные системы квантового компьютера на ионах в ловушке . . . . .	151
3.9. Оптическая система адресации к отдельным ионам в кристалле . . . . .	153
3.10. Декогерентизация состояний в квантовом компьютере на ионах в ловушке . . . . .	156
3.10.1. Декогерентизация состояний, обусловленная не идеальностью управления кубитами с помощью лазерных импульсов . . . . .	158
3.10.2. Декогерентизация состояний внутренних кубитов на ионах в ловушке . . . . .	159
3.10.3. Декогерентизация состояний колебательного кубита на ионах в ловушке . . . . .	161
3.11. Точность воспроизведения квантовых логических операций и аккумуляирование ошибок при квантовых вычислениях . . . . .	162
3.12. Основные выводы . . . . .	165
Литература . . . . .	168

<b>Глава 4. Жидкостные ядерные магнитно-резонансные (ЯМР) квантовые компьютеры . . . . .</b>	<b>171</b>
4.1. Общие принципы . . . . .	171
4.2. Матрица плотности квазичистого состояния . . . . .	174
4.2.1. Переход от смешанного равновесного состояния к квазичистому состоянию . . . . .	174
4.2.2. Приготовление квазичистого начального состояния методом логической метки . . . . .	177
4.2.3. Приготовление квазичистого состояния методом пространственного усреднения . . . . .	180

4.2.4.	Приготовление квазичистого состояния методом временного усреднения . . . . .	180
4.3.	Формирование квантовых вентилях методами ЯМР . . . . .	182
4.3.1.	Однокубитовые квантовые операции . . . . .	182
4.3.2.	Двухкубитовый вентиль CNOT . . . . .	186
4.3.3.	Исключение влияния паразитных естественных процессов в двухкубитовых операциях . . . . .	191
4.4.	Экспериментальная реализация квантовых вычислений . . . . .	194
4.4.1.	Примеры реализации двухкубитовой операции CNOT . . . . .	195
4.4.2.	Реализация алгоритмов Дойча–Джозса и Гровера на двухкубитовом компьютере . . . . .	199
4.4.3.	Квантовые операции в системах с более, чем двумя кубитами . . . . .	203
4.5.	Подавление декогерентизации в ЯМР квантовых компьютерах . . . . .	207
4.5.1.	Метод контролируемого усреднения . . . . .	208
4.5.2.	Модель последовательности идеальных мгновенных импульсов . . . . .	211
4.6.	Перспективы ансамблевых жидкостных ЯМР квантовых компьютеров . . . . .	214
Приложение П.4	. . . . .	219
П.4.1.	Развязка с зеемановскими взаимодействиями с помощью неселективного импульса . . . . .	219
П.4.2.	Пример двухкубитового оператора, осуществляемого двумя неселективными импульсами . . . . .	220
П.4.3.	Элементарные сведения о геометрической фазе Берри . . . . .	222
Литература	. . . . .	223
<b>Глава 5.</b>	<b>Твердотельные ЯМР квантовые компьютеры . . . . .</b>	<b>228</b>
5.1.	Полупроводниковый ЯМР квантовый компьютер (модель Кейна) . . . . .	228
5.1.1.	Основные требования к полупроводниковой структуре . . . . .	228
5.1.2.	Электрон-ядерная спиновая система донорного атома в магнитном поле . . . . .	231

5.1.3. Электронная структура и постоянная сверхтонкого взаимодействия донорного атома в электрическом поле затвора . . . . .	234
5.1.4. Электрон-ядерная спиновая система двух соседних донорных атомов . . . . .	240
5.1.5. Измерение состояний отдельных ядерных спинов в полупроводниковом ЯМР квантовом компьютере	249
5.2. Полупроводниковый ЯМР квантовый компьютер, контролируемый СВЧ и лазерными импульсами . . . . .	254
5.3. Ансамблевые варианты твердотельных ЯМР квантовых компьютеров . . . . .	259
5.4. Квантовые компьютеры с архитектурой клеточных автоматов . . . . .	267
5.4.1. Квантовые автоматы на трех и двух типах двухуровневых элементов . . . . .	267
5.4.2. ЯМР квантовый клеточный автомат на основе антиферромагнитной структуры . . . . .	270
Приложение П.5. Двухкубитовая операция CNOT в ЯМР квантовом клеточном автомате . . . . .	280
Литература . . . . .	282
<b>Глава 6. Твердотельные квантовые компьютеры на квантовых точках . . . . .</b>	<b>286</b>
6.1. Клеточные автоматы на ячейках из квантовых точек с зарядовой поляризацией . . . . .	286
6.2. Клеточные автоматы на квантовых точках с электронной спиновой поляризацией . . . . .	293
6.3. Квантовые компьютеры на квантовых точках с электронными зарядовыми (орбитальными) состояниями . . . . .	296
6.3.1. Кубиты на паре квантовых точек с зарядовыми состояниями . . . . .	296
6.3.2. Кубит на одной квантовой точке, разделенной управляемым потенциальным барьером . . . . .	305
6.4. Квантовые компьютеры на квантовых точках с электронными спиновыми состояниями . . . . .	306
6.4.1. Квантовые точки с электронными спинами, связанными обменным взаимодействием . . . . .	306



---

6.4.2. Квантовые точки с электронными спинами в электродинамическом резонаторе . . . . .	313
6.5. Квантовые компьютеры на квантовых точках с несколькими электронными и одним ядерным спином . . . . .	318
Литература . . . . .	323
<b>ГЛАВА 7. Квантовые компьютеры на сверхпроводниковых элементах . . . . .</b>	<b>326</b>
7.1. Основные типы сверхпроводниковых кубитов . . . . .	326
7.1.1. Кубиты на зарядовых состояниях куперовских пар в сверхпроводниковых островках . . . . .	327
7.1.2. Кубиты на флюксонных состояниях в сверхпроводящих квантовых интерференционных приборах . . . . .	330
7.1.3. Вариант кубита на переходах Джозефсона в высокотемпературных сверхпроводниках . . . . .	332
7.2. Квантовый компьютер на сверхпроводниковых островках с переходами Джозефсона . . . . .	334
7.3. Диссипация и декогерентизация в сверхпроводниковых устройствах на обычных сверхпроводниках . . . . .	336
7.4. Экспериментальная реализация сверхпроводникового кубита . . . . .	337
Литература . . . . .	339
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>341</b>
<b>Предметный указатель . . . . .</b>	<b>346</b>