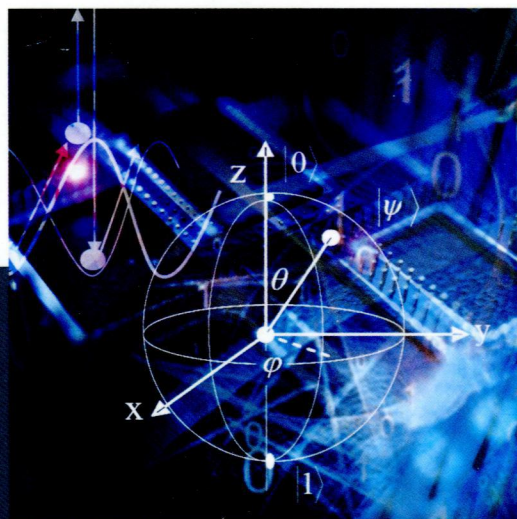


ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Динамика кубита

В. К. Прилипко
И. И. Коваленко



E.LANBOOK.COM

В. К. ПРИЛИПКО, И. И. КОВАЛЕНКО

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ
ДИНАМИКА КУБИТА

Монография
Издание второе, стереотипное



ЛАНЬ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
МОСКВА
КРАСНОДАР
2024

УДК 519.688
ББК 32.86я73

П 76 Прилипко В. К. Физические основы квантовых вычислений. Динамика кубита : монография / В. К. Прилипко, И. И. Коваленко. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2024. — 216 с. : ил. — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-507-50139-7

Предлагаемое издание продолжает обширную тему квантовых вычислений, основаниям которых посвящена наша книга «Физические основы квантовых вычислений. От битов к кубитам». В идейном плане книга состоит из двух частей. Первая часть посвящена теме реализации квантовых вычислений в рамках схемной модели и демонстрации уникальных возможностей, даваемых квантовыми алгоритмами. Вторая часть посвящена проблеме их практической реализации в конкретных квантовых средах, рассматриваемых как квантовые процессоры.

Изложение материала сопровождается значительным количеством примеров и задач.

Издание предназначено для студентов старших курсов, а также магистрантов, аспирантов, обучающихся по направлениям «Фундаментальная информатика и информационные технологии», «Физика».

УДК 519.688
ББК 32.86я73

Рецензенты:

И. Ч. МАШЕК — доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой общей физики-1 Санкт-Петербургского государственного университета;

В. В. ФЕДОРОВ — доктор физико-математических наук, профессор, зав. лабораторией рентгеновской и гамма-спектроскопии Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Обложка
Е. А. ВЛАСОВА

© Издательство «Лань», 2024
© В. К. Прилипко,
И. И. Коваленко, 2024
© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2024

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Кубит. Основные сведения	5
1.1. Кубит как математический объект	5
1.2. Динамика кубита	8
1.3. Составные системы. Запутанные состояния	13
Задачи к рассмотренной выше теме	16
1.4. Измерение кубита	17
1.5. Положительное операторно-значимое измерение (ПОЗИ) Positive Operator-Valued Measure	23
1.6. Смешанные состояния. Матрица плотности	24
1.7. Частичный след — центральное понятие в квантовых вычислениях	30
1.8. Разложение Шмидта	31
1.9. Расширение до чистого состояния	34
Глава 2. Квантовые схемы	36
2.1. Квантовые логические элементы — однокубитовый элемент	37
2.2. Двухкубитовый элемент. Условные операции	39
2.3. Универсальный набор квантовых элементов	42
2.4. Реализация измерений в квантовых схемах	45
Глава 3. Квантовые алгоритмы	49
3.1. Вероятностный и квантовый алгоритмы. Сравнение	49
3.2. Быстрые вычисления на квантовом компьютере. Алгоритм Дойча	53
3.3. Алгоритм Дойча — Джозса	57
3.4. Алгоритм Саймона	60
3.5. Квантовый алгоритм поиска Гровера	62
3.6. Протокол сверхплотного кодирования	66
3.7. Протокол квантовой телепортации	68
Глава 4. Алгоритм Шора	70
4.1. Задача факторизации [9]	70
4.2. Нахождение порядка и факторизация	72
4.3. Демонстрация свойства периодичности функции $f = C^x \bmod N$	73
4.4. Квантовый алгоритм Шора	75
Приготовления к квантовой части алгоритма Шора	76
4.5. Подробнее о квантовом преобразовании Фурье	79
Глава 5. Реализация квантовых алгоритмов на атомах в квантовом электродинамическом резонаторе	82
5.1. КЭД резонаторы. Теория и практическая реализация	83
5.2. Эксперименты с ридберговскими атомами в группе С. Ароша	84
5.3. Эксперимент по наблюдению осцилляций Раби	87
5.4. Квантовые логические операции, основанные на вакуумных осцилляциях Раби	90
5.5. Синтез трехчастичного запутанного состояния	93
5.6. Заключение и перспективы	94

Глава 6. Ионы в радиочастотной ловушке	96
6.1. Ионные ловушки	96
6.2. Охлаждение ионов	99
6.3. Колебательное движение ионов в кристалле	106
6.4. Внутренние кубиты на ионах в ловушках	106
6.5. Рамановская схема	107
6.6. Взаимодействие между кубитами через фононный кубит. Двухкубитовые операции	110
6.7. Измерение результатов	113
6.8. Система адресации к отдельным ионам	115
6.9. Декогерентизация состояний в квантовом компьютере на ионах	117
6.10. Декогерентизация состояний колебательного кубита на ионах в ловушке	118
Глава 7. Другие физические реализации квантовых компьютеров	120
7.1. Жидкостные ядерные магниторезонансные ЯМР компьютеры	120
7.2. Твердотельные ЯМР квантовые компьютеры. Полупроводниковый компьютер Кейна	121
7.3. Полупроводниковый ЯМР квантовый компьютер, контролируемый СВЧ и лазерными импульсами	123
7.4. Квантовые компьютеры с архитектурой клеточных автоматов	126
7.5. Твердотельные компьютеры на квантовых точках	127
7.6. Квантовые компьютеры на квантовых точках с несколькими электронными и одним ядерным спином	129
7.7. Квантовые компьютеры на сверхпроводящих элементах	130
Глава 8. Пример реализации квантового алгоритма Шора с использованием фотонных кубитов	135
Глава 9. Имитация квантовых вычислений на классическом компьютере	143
9.1. Имитация алгоритма Дойча	144
9.2. Программа-имитатор квантового алгоритма поиска порядка П. Шора	147
9.3. Проблема обратимости вычислений: как она решается	147
9.4. Возведение в степень по модулю	152
9.5. Обратимое сложение чисел	153
Глава 10. О состоянии дел и перспективах квантовых вычислений	160
10.1. Эксперименты	161
10.2. Коррекция ошибок	162
10.3. Точность квантовых амплитуд	164
10.4. Главная проблема теории коррекции ошибок	166
10.5. Резюме	167
10.6. Зачем нужен квантовый компьютер?	169
10.7. Моделирование квантовых систем	170
10.8. Заключение	170

Приложения	172
Приложение 1 к главе 1	172
Коррелированные состояния. Неравенство Белла	172
Приложение 2	177
Пример классического и квантового случая возникновения корреляции для двух частиц, или Непроведенный эксперимент не имеет результатов	177
Квантовый случай	179
Приложение 3	180
Сверхсветовая коммуникация невозможна	180
Приложение 4 к главе 5	182
Квантовая электродинамика резонаторов	182
Осцилляции Раби	184
Приложение 5 к главе 9	189
Приложение 5.1. Реализация алгоритма DDeutsch в MatLab (на входе x и y кубиты $ 0\rangle$ и $ 1\rangle$ соответственно)	189
Приложение 5.2. Программа-имитатор квантового алгоритма поиска порядка П. Шора. Первый вариант	190
Второй вариант программы алгоритма П. Шора	193
Приложение 5.3. Программа вычисления матрицы Фредкина	196
Программа вычисления матрицы Гоффоли	198
Приложение 5.4. Программа — обратимый полный сумматор Full adder ..	199
Приложение 5.5. Программа half-adder (полусумматор)	200
Приложение 5.6. Программа работы мажоритарного вентиля MGgate.m	201
Приложение 5.7. Программа схемы очистки бита переноса после полусумматора HCR	203
Литература	205