



Российская Академия Наук

НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Труды XXVIII
Международного симпозиума

11–15 марта 2024 года

Том 1

Нижний Новгород
2024

НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Труды XXVIII Международного симпозиума

11–15 марта 2024 г., Нижний Новгород

Том 1

Секция 1

Сверхпроводящие наносистемы

Секция 2

Магнитные наноструктуры

Секция 5

Многослойная и кристаллическая рентгеновская оптика

Нижний Новгород
ИПФ РАН
2024

УДК 538.9(063)
ББК 22.37я431
32.844.2я431
Н-25

Н-25 **Нанопизика и наноэлектроника. Труды XXVIII Международного симпозиума (Нижний Новгород, 11–15 марта 2024 г.).**
В 2 томах. Том 1-й. — Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2024. — 560 с.
ISBN 978-5-8048-0123-7

Организаторы

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Отделение физических наук РАН
Научный совет РАН по физике полупроводников
Научный совет РАН по физике конденсированных сред
Институт физики микроструктур РАН
Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
Благотворительный фонд «От сердца к сердцу»

Программный комитет

А. В. Акимов, к.ф.-м.н.	РКЦ, ФИАН им. П. Н. Лебедева РАН, Москва
А. Ю. Аладышкин, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
В. В. Бельков, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
И. С. Бурмистров, д.ф.-м.н.	ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН, Черногoловка
В. А. Бушуев, д.ф.-м.н.	МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
В. А. Быков, д.т.н.	NT-MDT Spectrum Instruments, Москва
В. А. Волков, д.ф.-м.н.	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
В. И. Гавриленко, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
С. В. Гапонов, академик РАН	ИФМ РАН, Нижний Новгород
А. Б. Грановский, д.ф.-м.н.	МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
К. Н. Ельцов, д.ф.-м.н.	ИОФ им. А. М. Прохорова РАН, Москва
С. В. Зайцев-Зотов, д.ф.-м.н.	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
С. В. Иванов, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Е. Л. Ивченко, чл.-корр. РАН	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
В. В. Кведер, академик РАН	ИФТТ РАН, Черногoловка
З. Ф. Красильник, чл.-корр. РАН	ИФМ РАН, Нижний Новгород, председатель
И. В. Кукушкин, академик РАН	ИФТТ РАН, Черногoловка
В. Д. Кулаковский, академик РАН	ИФТТ РАН, Черногoловка
А. В. Латышев, академик РАН	ИФП СО РАН им. А. В. Ржанова, Новосибирск
А. С. Мельников, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
М. А. Миляев, д.ф.-м.н.	ИФМ УрО РАН им. М. Н. Михеева, Екатеринбург
В. Л. Миронов, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
С. В. Морозов, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
С. А. Никитов, чл.-корр. РАН	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
А. В. Новиков, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Д. В. Рощупкин, д.ф.-м.н.	ИПТМ РАН, Черногoловка
В. В. Рязанов, д.ф.-м.н.	ИФТТ РАН, Черногoловка
А. В. Садовников, к.ф.-м.н.	СГУ им. Н. Г. Чернышевского, Саратов
<u>Н. Н. Салащенко</u> , чл.-корр. РАН	ИФМ РАН, Нижний Новгород
М. В. Сапожников, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
А. А. Саранин, чл.-корр. РАН	ИАПУ ДВО РАН, Владивосток
Д. А. Татарский, к.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород, учёный секретарь
Ю. А. Филимонов, д.ф.-м.н.	Саратовский филиал ИРЭ РАН, Саратов
А. А. Фраерман, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Д. Р. Хохлов, чл.-корр. РАН	МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
А. В. Чаплик, академик РАН	ИФП СО РАН им. А. В. Ржанова, Новосибирск
Н. И. Чхало, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Т. В. Шубина, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

Организационный комитет

А. В. Новиков	ИФМ РАН, Нижний Новгород, председатель
В. Г. Беллюстина	ИФМ РАН, Нижний Новгород
М. В. Зорина	ИФМ РАН, Нижний Новгород
А. В. Иконников	МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
Д. А. Камелин	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Р. С. Малофеев	ИФМ РАН, Нижний Новгород
М. С. Михайленко	ИФМ РАН, Нижний Новгород
С. В. Морозов	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Е. Н. Садова	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Е. Е. Пестов	ИФМ РАН, Нижний Новгород

ISBN 978-5-8048-0123-7

ББК 22.37я431

32.844.2я431

© ИПФ РАН, 2024

© ИФМ РАН, 2024

Управление трансмон-кубитами при помощи биполярных последовательностей однокуантовых импульсов

М. В. Бастракова^{1,2,*}, В. А. Вожаков^{1,3}, М. А. Сергеев¹, А. В. Линев¹, Д. С. Куландин¹, Н. В. Кленов⁴, И. И. Соловьев³

¹ Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603022

² Российский квантовый центр, ул. Большой бульвар, 30, стр. 1, Сколково, Москва, 143045

³ МГУ им. М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, Ленинские горы, 1, Москва, 119991

⁴ МГУ им. М. В. Ломоносова, Физический факультет, Ленинские горы, 1, Москва, 119991

*bastrakova@phys.unn.ru

В работе представлено биполярное импульсное управление SFQ трансмон-кубитами для реализации квантовых операций с точностью 99,99%. Нами разработаны надежные алгоритмы оптимизации для нахождения структуры последовательности, которая минимизирует утечку состояния кубита из вычислительного подпространства. Показано, что предлагаемое биполярное управление SFQ сокращает время квантовой однокубитной операции вдвое по сравнению с современными методами однополярного SFQ-управления.

Введение

Среди возможных реализаций кубита – базовой ячейки квантового процессора – одним из самых перспективных кандидатов является сверхпроводниковый кубит специального типа – трансмон, который лежит в основе квантовых процессоров Google, IBM, Rigetti. Для трансмонов разработаны протоколы управления посредством микроволнового поля, позволяющие совершать квантовые операции с достаточно высокой точностью [1]. Однако при масштабировании таких систем существует проблема, связанная с дополнительными каналами декогеренции из-за огромного числа электроники для индексного управления каждым кубитом в регистре. В связи с этим развиваются альтернативные подходы к управлению трансмонами, нацеленные на борьбу с возникающими проблемами. Одним из таких подходов является использование длительных регулярных последовательностей управляющих импульсов с широким спектром – коротких (длительность \sim пс) униполярных импульсов (Single Flux Quantum, SFQ), генерируемых в цепях цифровой сверхпроводниковой электроники [2]. При этом период между импульсами соответствовал периоду собственных колебаний кубита (~ 200 пс), далее данный способ был модифицирован на случай нерегулярных последовательностей импульсов SCALLOP (SCALable Leakage Optimized Pulse Sequences) [3], когда был предложен алгоритм по подбору SFQ-последовательностей на частоте тактового генератора с периодом ~ 40 пс и при этом операции реализованы на временах ~ 10 – 20 нс.

В данной работе представлена схема цифрового управления на основе импульсов различной полярности и показана возможность ускорения квантовой операции $Y_{\pi/2}$ до 4–6 нс. Для подбора последовательностей с заданными параметрами нами использованы методы [4, 5]: покоординатного спуска, генетического алгоритма и машинного обучения. Критерием оптимизации для всех алгоритмов являлась точность операций $\langle F \rangle > 99,99\%$ (fidelity).

Результаты

Для численного моделирования реализации квантовых операций в трансмон-кубите под действием

SFQ-импульсов сформулируем математическую модель системы с генератором SFQ-импульсов (dc/SFQ-конвертером). Трансмон-кубит представляет собой сверхпроводящий двухконтактный интерферометр [1]. Гамильтониан в рамках модели Бозе – Хаббарда имеет вид

$$H = \omega_{01} \hat{a}^\dagger \hat{a} - \frac{\alpha}{2} \hat{a}^\dagger \hat{a} (\hat{a}^\dagger \hat{a} - 1) - i\varepsilon(t)(\hat{a}^\dagger - \hat{a}), \quad (1)$$

где ω_{01} – частота перехода между основным «0» и первым «1» возбужденным состоянием, α – параметр нелинейности, а управляющее поле определено как

$$\varepsilon(t) = \frac{C_c V(t)}{2} \sqrt{\frac{\omega_{01}}{2C_Q}}, \quad \text{где } C_Q \text{ – шунтирующая емкость, а}$$

C_c – связующая емкость кубита с dc/SFQ-конвертером. Управляющий SFQ-импульс имеет пикосекундную длительность τ , тогда как его интеграл по напряжению во времени равен кванту магнитного потока $\Phi_0 = \int_0^\tau V(t) dt$. При этом одиночный импульс в последовательности вызывает дискретное вращение на угол $\Delta\theta = C_c \Phi_0 \sqrt{\frac{\omega_{01}}{2C_Q}}$ на сфере Блоха, соответствующей изменению состояния кубита (рис. 1).

Расчет динамики населенностей уровней $W_m(t) = |\langle m | \psi(t) \rangle|^2$ ($m = 0, 1, 2, \dots$) кубита (1) производился при помощи решения нестационарного уравнения Шредингера методом Кранка – Николсона, а точность (fidelity) квантовой операции контролировалась как

$$\langle F \rangle = \frac{1}{6} \sum_{|\psi_0\rangle} |\langle \psi_0 | U^\dagger U_g | \psi_0 \rangle|^2, \quad (2)$$

усредненной по начальным состояниям на различных полюсах сферы Блоха $|\psi_0\rangle = \{|x_\pm\rangle, |y_\pm\rangle, |z_\pm\rangle\}$. Здесь U_g – это гейтовая матрица при реализации идеальных квантовых операций, а U – матрица эволюции в результате численных расчетов. Например, для операции $Y_{\pi/2}$: $U_g = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1| + |1\rangle\langle 0| - |0\rangle\langle 1|)$.

В данной работе нами предложена модификация SCALLOP [3] последовательностей SFQ-импульсов управления путем введения импульсов с отрицательной полярностью с использованием схемы с двумя dc/SFQ-конвертерами для генерации импульсов с отрицательной амплитудой на половине периода собственных колебаний кубита π/ω_{01} .

Для нахождения оптимальной управляющей биполярной SFQ-последовательности были разработаны

оптимизационные алгоритмы [4, 5]: покоординатного спуска, генетический алгоритм и нейросетевой на основе AlphaZero. Предполагалось, что параметры системы и управляющих импульсов соответствуют типичным экспериментальным данным и лежат в следующих диапазонах: собственная частота кубита $\omega_{01}/2\pi \in [3 \dots 7]$ ГГц, ангармонизм $\alpha/2\pi \in [0,2 \dots 0,45]$ ГГц, тактовые частоты генератора $\omega_g/2\pi \in [25 \dots 50]$ ГГц, эффективный угол поворота $\Delta\theta \in [0,021 \dots 0,033]$.

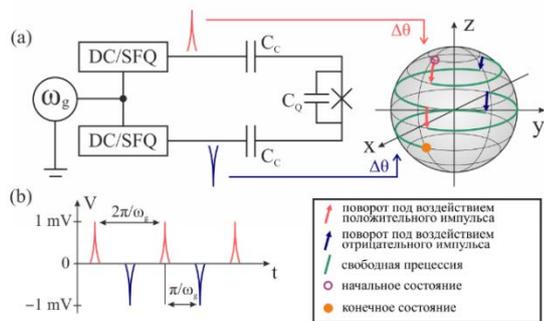


Рис. 1. Биполярная последовательность одноквантовых импульсов (а), поступающая на трансмон с двух dc/SFQ-конвертеров, соединенных в дифференциальную пару. Динамика квантового состояния под воздействием последовательности изображена на сфере Блоха. Схематичное изображение регулярной биполярной последовательности (б)

Кратко опишем разработанные оптимизационные алгоритмы. Покоординатный спуск представляет собой процедуру постепенного изменения последовательности в лучшую по критерию оптимизации сторону, вдохновленную схожим методом SCALLOPS [3], когда импульсное воздействие происходит на тактовой частоте $T_g = 2\pi/\omega_g$. В стартовой последовательности перебираются все возможные варианты изменения одного символа («1» – SFQ-импульс положительной полярности, «-1» – отрицательной полярности, «0» – отсутствие импульса), из них выбирается лучшая по критерию, и она становится стартовой для следующего поколения. Вся процедура продолжалась до тех пор, пока новые поколения уже не давали улучшения. Минусом этого подхода является «жадность», т. е. он ищет наилучшую последовательность на каждом этапе, что сильно сужает пространство поиска – изменить его можно только выбором другой стартовой последовательности. Генетический алгоритм ищет последовательности при помощи скрещивания (разделением двух последовательностей на две части и перекрестной «склейки» их между собой) и мутаций (случайным изменением одного символа). Наши исследования показали, что эффективные последовательности при использовании генетического алгоритма находятся при выборе любой стартовой точки. Из всего многообразия алгоритмов глубокого обучения с подкреплением для выбранной задачи лучше всего подходит алгоритм PPO, являющийся проверенным стандартом для целого круга задач различной сложности. В данной работе нами

были произведены некоторые модификации алгоритма, в частности, на основе глубокой градации политики, а также добавление LSTM-ячеек в структуру нейросети, что позволило получить относительно стабильный и высокий результат.

Для демонстрации работы данных алгоритмов нами был выбран набор параметров из заданных диапазонов: $\omega_{01} = 5$ ГГц, $\alpha = 250$ МГц, $\omega_g = 25$ ГГц, $\Delta\theta = 0,024$ рад. Производился поиск управляющей последовательности для реализации операции $Y_{\pi/2}$. В таблице 1 приведены результаты работы алгоритмов. Отметим, что все три алгоритма нашли последовательности, состоящие из 120 SFQ-импульсов, а время операции составляет 4,7 нс. Таким образом, показано, что длина операции сокращается примерно вдвое относительно подхода SCALLOPS [3] и становится сравнимой с распространенной на сегодняшний день техникой DRAG управления кубитами при помощи микроволновых импульсов [7].

Таблица 1. Значения $1 - \langle F \rangle$ (infidelity) для разработанных оптимизационных алгоритмов по поиску биполярных SFQ-последовательностей

Алгоритм	$1 - \langle F \rangle, 10^{-5}$
Покоординатный спуск	4,23
Генетический алгоритм	1,27
Машинное обучение	5,03

Выводы

Таким образом, в данной работе приводится сравнение оптимизационных подходов и обсуждается возможность их применения для нахождения управляющего сигнала при совершении квантовых операций в многокубитных системах.

Финансирование

Разработка генетического алгоритма и покоординатного спуска была выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-12-00130. Нейросетевой алгоритм оптимизации разработан при финансовой поддержке фонда «БАЗИС» № 22-1-3-41-1.

Литература

1. P. Krantz, M. Kjaergaard, F. Yan, T. P. Orlando, S. Gustavsson, W. D. Oliver // Phys. Rev. Applied. 2019. V. 6, no. 2. P. 021318.
2. R. McDermott, M. G. Vavilov // Phys. Rev. Applied. 2014. V. 2, no. 1. P. 01400.
3. E. Leonard, Jr., M. A. Beck, J. Nelson, B. G. Christensen, T. Thorbeck, C. Howington // Phys. Rev. Applied. 2019. V. 11, no. 1. P. 014009.
4. M. V. Bastrakova, V. A. Vozhakov, I. I. Solov'yev, N. V. Klenov, A. M. Satanin // Quantum Science and Technology. 2023. V. 8. P. 035024.
5. M. V. Bastrakova, D. S. Kulandin, T. Lapyeva, V. A. Vozhakov, A. V. Liniyov // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2023. V. 44, no. 1. P. 1.
6. J. M. Gambetta, et al. // Phys. Rev. A. 2011. V. 83. P. 01.