**Спиновая четность как основа для архитектуры квантовых вычислительных устройств**

**Михайлов П.О.\*1, *Шорохов В.В.* 1, Трифонов А.С. 1, Крупенин В.А. 1**

\*аспирант

1. Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, лаборатория «Криоэлектроника», г. Москва, Россия

E–mail: mikhailov.po18@physics.msu.ru

Квантовые вычисления представляют собой фундаментально новый подход к обработке информации, основанный на принципах квантовой механики. Данный метод позволяет решать задачи, которые являются неразрешимыми для классических вычислительных систем. Физические реализации квантовых вычислений включают системы на основе сверхпроводящих элементов, ионов в ловушках, фотонных устройств [1]. Среди всех представленных реализаций особенно выделяются спиновые кубиты на основе квантовых точек в полупроводниках. Важнейшим преимуществом этих систем является длительное время дефазировки (в системах с изотопически чистым 28Si достигнуты $T\_{2}^{\*}=120 мкс, T\_{2}=28 мс$ с использованием феномена спинового эха [2]), что критически важно для реализации отказоустойчивых квантовых вычислений [3,4,5]. Дополнительным преимуществом таких кубитных систем являются широкие возможности по их масштабированию [6], поскольку их можно интегрировать в существующую инфраструктуру полупроводниковой промышленности. Наконец, кремниевые спиновые кубиты допускают работу при относительно высоких температурах (в области $1–4 К$ [7,8]), где более высокая мощность охлаждения позволяет использовать стратегии масштабирования с интеграцией управляющей электроники. Так, в системах полупроводниковых квантовых точек уже были продемонстрированы одно- и двухкубитные вентили с фиделити более $0.999$ [9,10], а также алгоритмы телепортации [11], запутывания трех кубитов [12] и четырехкубитные операции [13].

В настоящей работе выполнен анализ оригинального подхода к реализации квантовых вычислений, основанного на кодировании состояний кубитов при помощи спиновой четности [14]. Исходная система $N$ кубитов (называемых логическими) кодируется в расширенной системе из $K=N\left(N+1\right)/2$ физических кубитов, в которой состояние каждого физического кубита $\left(ij\right)$ определяется как полная спиновая четность пары логических кубитов $(i)$ и $\left(j\right)$:

$$\tilde{σ}\_{z}^{\left(ij\right)}\left|ψ\right⟩= σ\_{z}^{\left(i\right)}σ\_{z}^{\left(j\right)}\left|ψ\right⟩$$

 где $\left|ψ\right⟩$ – состояние гильбертова кодового пространства $H\_{K}$; $\tilde{σ}\_{z}^{\left(ij\right)}$, $σ\_{z}^{\left(i\right)}$ – операторы Паули $z$ для физических и логических кубитов соответственно. Основными преимуществами данной архитектуры являются: внутренняя устойчивость к ошибкам, связь каждого кубита системы с каждым, достигающаяся исключительно за счет локальных взаимодействий кубитов, и простота масштабирования архитектуры на большое количество кубитов.

В работе представлены текущие результаты по созданию измерительной системы для кубитов на основе квантовых точек в кремнии. В настоящее время ведется активная работа над изготовлением экспериментальных образцов, предназначенных для реализации элементарных квантовых операций в системах с квантовыми точками. Параллельно с этим осуществляется разработка измерительной системы, интегрирующей современные технологии программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), высокочастотных генераторов и детекторов. Особое внимание уделяется внедрению низкотемпературной и другой СВЧ техники, что позволит минимизировать тепловые шумы и обеспечить высокую точность считывания квантовых состояний. Разрабатываемая система ориентирована на достижение высокой скорости и точности измерений, что является ключевым фактором для дальнейшего масштабирования квантовых вычислений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда развития теоретической физики и математики «Базис», грант № 24-2-2-30-1, а также при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина», грант № 24 Ш06-07.

В работе использовалось оборудование Учебно-методического центра литографии и микроскопии МГУ им. М.В. Ломоносова.

**Литература**

[1]: Resch, Salonik, and Ulya R. Karpuzcu. "Quantum computing: an overview across the system stack." *arXiv preprint arXiv:1905.07240* (2019).

[2]: Veldhorst, M., et al. "An addressable quantum dot qubit with fault-tolerant control-fidelity." *Nature nanotechnology* 9.12 (2014): 981-985.

[3]: Knill, Emanuel. "Quantum computing with realistically noisy devices." *Nature* 434.7029 (2005): 39-44.

[4]: Fowler, Austin G., et al. "Surface codes: Towards practical large-scale quantum computation." *Physical Review A—Atomic, Molecular, and Optical Physics* 86.3 (2012): 032324.

[5]: Vandersypen, Lieven MK, and Mark A. Eriksson. "Quantum computing with semiconductor spins." *Physics Today* 72.8 (2019): 38-45.

[6]: Zwerver, A. M. J., et al. "Qubits made by advanced semiconductor manufacturing." *Nature Electronics* 5.3 (2022): 184-190.

[7]: Petit, Luca, et al. "Universal quantum logic in hot silicon qubits." *Nature* 580.7803 (2020): 355-359.

[8]: Yang, Chih Heng, et al. "Operation of a silicon quantum processor unit cell above one kelvin." *Nature* 580.7803 (2020): 350-354.

[9]: Yoneda, Jun, et al. "A quantum-dot spin qubit with coherence limited by charge noise and fidelity higher than 99.9%." *Nature nanotechnology* 13.2 (2018): 102-106.

[10]: Mądzik, Mateusz T., et al. "Precision tomography of a three-qubit donor quantum processor in silicon." *Nature* 601.7893 (2022): 348-353.

[11]: Qiao, Haifeng, et al. "Conditional teleportation of quantum-dot spin states." *Nature communications* 11.1 (2020): 3022.

[12]: Takeda, Kenta, et al. "Quantum tomography of an entangled three-qubit state in silicon." *Nature Nanotechnology* 16.9 (2021): 965-969.

[13]: Hendrickx, Nico W., et al. "A four-qubit germanium quantum processor." *Nature* 591.7851 (2021): 580-585.

[14]: Fellner, Michael, et al. "Universal parity quantum computing." *Physical Review Letters* 129.18 (2022): 180503.