

Реализация квантового компьютера на ионной ловушке

Вопрос по выбору к ГКЭ, январь 2023

Талашкевич Даниил Б01-008

Московский физико-технический институт

Содержание

- Введение в квантовые вычисления
- Принцип работы ионной ловушки
 - Захват иона
 - Доплеровское охлаждение
- Кубит на ионной ловушке
 - Физическая реализация кубита
 - Приготовление начального состояния
 - Измерение конечного результата

Введение в квантовые вычисления

Классический бит: 0 или 1 - два состояния.

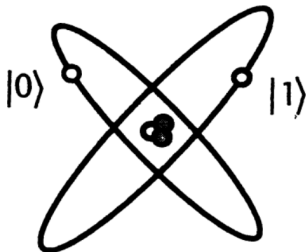
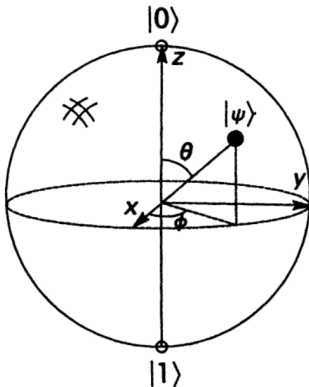
Квантовый бит: $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$, $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ - бесконечно много состояний?

Представление на сфере Блоха:

$$|\psi\rangle = e^{i\gamma} \left(\cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\phi} \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle \right) \sim \cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\phi} \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle,$$

где γ, θ и ϕ - действительные числа.

Введение в квантовые вычисления



Захват ионов

Принцип работы ионной ловушки

- По *теореме Ирншоу* заряд не может находиться в положении устойчивого равновесия, однако если используя осциллирующие электрические поля можно обойти эту теорему.
- Используется линейную ловушку Пола для захвата ионов.
- Получаем уравнение движения в x -плоскости:

$$\frac{d^2 x_i}{d\tau^2} = -\frac{4eV_0}{Mr_0^2\Omega^2} \cos(2\tau)x_i \quad (1)$$

Доплеровское охлаждение

Принцип работы ионной ловушки

- Стационарный атом не видит лазерного смещения ни в красную, ни в синюю сторону и не поглощает фотон.
- Атом, удаляющийся от лазера, видит его сдвиг в красную область и не поглощает фотон.

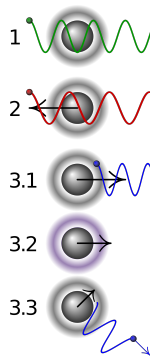


Рис. 1: Иллюстрация
доплеровского охлаждения

Доплеровское охлаждение

Принцип работы ионной ловушки

- движущийся атом, видит, что он смещен в синий цвет, и поглощает фотон, замедляясь. поглощение фотона.
- Фотон возбуждает атом, переводя электрон в более высокое квантовое состояние.
- Атом повторно излучает фотон в случайном направлении.

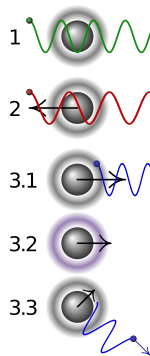


Рис. 2: Иллюстрация доплеровского охлаждения

Физическая реализация кубита

Кубитная ионная ловушка

- Кубит представляет собой атомные состояния сверхтонкой структуры, удерживаемых в ловушке атомов.
- Два сверхтонких уровня основного состояния (они называются «сверхтонкими кубитами»)
- Уровень основного состояния и возбужденный уровень (они называются «оптическими кубитами»)

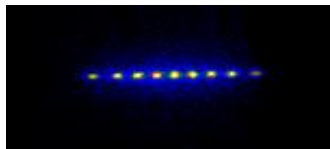


Рис. 3: Девять атомов кальция в ловушке

Физическая реализация кубита

Кубитная ионная ловушка

- Кубит на сверхтонкой структуре - время существования существенно больше времени существования на оптических фотонах.
- Можно рассмотреть на примере иона кальция с уровнем $4S_{1/2}$

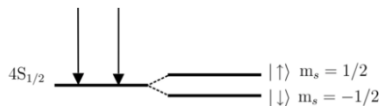


Рис. 4: Сверхтонкая структура

Приготовление начального состояния

Кубитная ионная ловушка

- Состояния ионных кубитов могут быть приготовлены в с помощью процесса, называемого **оптической накачкой**.

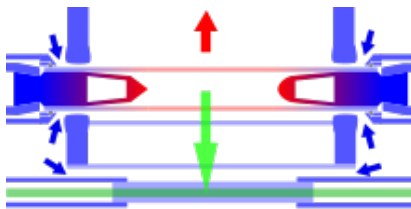


Рис. 5: Оптическая накачка лазерного стержня дуговой лампы

Приготовление начального состояния

Кубитная ионная ловушка

- Рассмотрим энергетические переходы в ионе кальция
- Учитывая, что времена жизни должны быть порядка микросекунд для совершения квантовых операций, получим, что некоторые состояния не годятся для выбора в качестве состояния $|1\rangle$

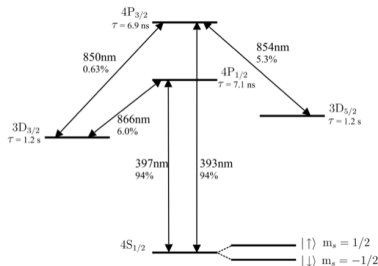


Рис. 6: Возможные энергетические переходы

Приготовление начального состояния

Кубитная ионная ловушка

- Например, состояние $3D_{5/2}$ Обладает временем жизни 1.2 с. Это время жизни годится, так как квантовые операции занимают микросекунды. За время состояние системы не успеет поменяться.

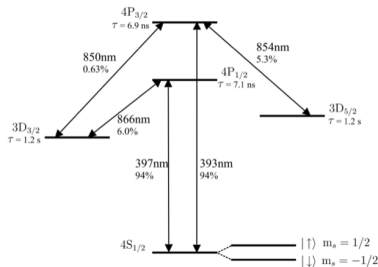


Рис. 6: Возможные энергетические переходы

Весь процесс приготовления кубита

Кубитная ионная ловушка

- Ионизация вещества
- Заключение в ионную ловушку
- Доплеровское охлаждение
- Использование спонтанного и вынужденного излучения для задание состояния иона

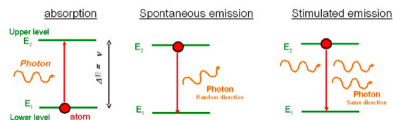


Рис. 7: Спонтанное и вынужденное излучение

Измерение состояния

Кубитная ионная ловушка

- Необходимо воздействовать на ион излучением с частотой перехода с уровня S сверхтонкой структуры на уровень P

Измерение состояния

Кубитная ионная ловушка

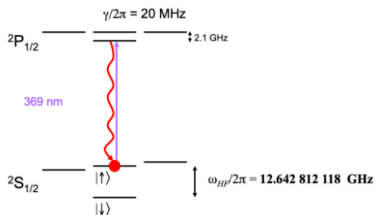


Рис. 8: Детектирование состояния 0 (есть излучение)

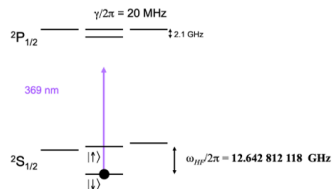


Рис. 9: Детектирование состояния 1 (нет излучения)