

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В.ЛОМОНОСОВА»**

**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА АТОМНОЙ ФИЗИКИ, ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

**Пятков Всеволод Дмитриевич**

**Piatkov Vsevolod**

**КУРСОВАЯ РАБОТА**

**Сравнительный анализ методов создания квантовых битов и особенностей их  
взаимодействия с электромагнитными полями**

**Comparative analysis of methods for creating quantum bits and features of their  
interaction with electromagnetic fields**

**Научный руководитель:  
к. ф.-м. н., д. т. н, профессор  
Кленов Николай Викторович**

**«Допускается к защите»**

\_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

**Москва**

**2024**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>3</b>
<b>1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О КВАНТОВЫХ БИТАХ.....</b>	<b>4</b>
1.1. Основные принципы работы и свойства квантовых битов .....	4
1.2. Технические требования к реализации квантовых систем .....	4
<b>2. НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ КВАНТОВЫХ БИТОВ .....</b>	<b>5</b>
2.1. Ионы в ловушках .....	5
2.2. Спин на нейтральных атомах.....	6
2.3. Спин в полупроводниковой матрице .....	7
2.4. Квантовый бит на сверхпроводящей элементной базе .....	8
2.5. Сравнение характеристик квантовых битов .....	12
<b>3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ .....</b>	<b>13</b>
3.1. Эволюция двухуровневой системы.....	13
3.2. Взаимодействие атома с резонансным импульсом .....	16
3.3. Использование квантовых битов как детекторов СВЧ сигнала .....	17
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>17</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>19</b>

## ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия произошел значительный прогресс в развитии электронных нано- и микроструктур. Современные микропроцессоры совершенствуются долгое время в основном за счет уменьшения размеров транзистора, что в конечном итоге приведет к тому, что они станут настолько малыми, что пренебрежение квантовыми эффектами станет неприемлемым, а традиционные принципы построения компьютеров и микроэлектроники станут малоэффективными.

Одним из важнейших направлений развития высоких технологий является создание квантового компьютера, элементами которого являются квантовые биты (кубиты), представляющих собой двухуровневую квантовую систему. На данный момент реализованы простейшие квантовые биты на основе спинов элементарных частиц, двухъямных потенциалов ионов и атомов, фотонов, а также туннельных джозефсоновских контактов (сверхпроводниковые кубиты). Работа всех этих устройств основывается на принципах квантовой механики: принцип суперпозиции и квантовая неопределенность. Информация здесь хранится в волновой функции, являющейся суперпозицией двух базисных состояний кубита. Манипулирование этими квантовыми состояниями позволяет осуществлять неклассические вычисления и решать задачи, которые нарушают возможности классических компьютеров, в силу возможности работать с суперпозициями состояний.

Для управления многими типами кубитов и рядом других квантовых устройств сегодня используют сверхвысокочастотные (СВЧ) сигналы. Микроволны обеспечивают широкую полосу пропускания, высокие скорости передачи данных, а также способны передаваться на большие расстояния без значительных потерь. Классические методы регистрации такого электромагнитных излучений обладают рядом недостатков, таких как ограниченность динамического диапазона, сложность реализации и громоздкость. Детекторы же на основе квантовых битов способны решить эти проблемы.

**Целью курсовой работы** является анализ и сравнение основных типов квантовых битов, а также изучение их взаимодействия с электромагнитными полями и возможности использования как детекторов слабого сигнала.

### **Задачи курсовой работы:**

- Выделение критериев сравнения квантовых битов;
- Обзор методов создания и принципов действия некоторых типов кубитов;
- Их сравнение по заданным критериям;

- Описание взаимодействия кубитов с электромагнитными полями, на примере простейшей двухуровневой системы;
- Изучение возможности использования квантовых битов в качестве усилителей СВЧ сигнала.

## **4. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О КВАНТОВЫХ БИТАХ**

### **4.1. Основные принципы работы и свойства квантовых битов**

Квантовые биты (кубиты) являются основными строительными блоками квантовых вычислений и квантовой информатики. В отличие от классических битов, которые могут принимать значения 0 или 1, состояние кубита может быть суперпозицией двух базисных состояний. Это позволяет одновременно обрабатывать множество вариантов данных, что обеспечивает потенциальную выгоду (по сравнению с классическими алгоритмами) в решении определенных задач, таких как оптимизация, факторизация больших чисел, поиск в неструктурированных базах данных.

Квантовая механика, заложившая основы квантовой информатики, описывает поведение частиц на микроскопическом уровне. Она основана на нескольких ключевых принципах, которые являются основой для понимания квантовых систем: принцип суперпозиции, описанный выше; коллапс волновой функции при измерении, приводящий к вырождению системы в одно определенное состояние с определенным значением измеряемой величины; квантовая запутанность, описывающая коррелированные состояния между частицами; принцип неопределенности, утверждающий, что нельзя одновременно точно измерить два коммутирующих параметра.

### **4.2. Технические требования к реализации квантовых систем**

Реализация квантовых систем и квантовых вычислений требует соблюдения ряда технических требований (которые в дальнейшем будут использоваться как критерии сравнения квантовых битов):

1. Иметь хорошее время когерентности (Coherence time): время, за которое кубит самопроизвольно и необратимо теряет запасенную информацию. Оно должно быть много больше характерного времени выполнения операции. Электромагнитные поля, шумы и радиационные воздействия могут негативно влиять на работу квантовых систем, приводя к потере когерентности и

деградации квантовых состояний. Для обеспечения высокой стабильности и точности работы необходимы средства изоляции от внешних помех.

2. Обладать потенциалом к масштабированию (Scalability): наращивание мощности при интеграции нескольких компонентов квантовых систем.
3. Иметь возможность считывания (Measurability): для обработки информации на квантовых битах необходимы методы считывания и измерения их состояний. Это может включать использование высокочувствительных детекторов и методов усиления сигнала для точного определения квантовых состояний. Также для анализа информации необходимо, чтобы базисные состояния системы были макроскопически различимы.
4. Обладать высокой точностью управления (Controllability): квантовые биты должны быть точно и стабильно управляемыми, чтобы обеспечить корректное выполнение квантовых операций.
5. Простота изготовления (Manufacturability).

## **5. НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ КВАНТОВЫХ БИТОВ**

### **5.1. Ионы в ловушках**

Ионные квантовые биты, представляют собой тип квантового вычислительного блока, который зависит от внутренних энергетических уровней ионов. Квантовая информация хранится в электронной конфигурации и энергетических уровнях ионов. Лазеры используются для индуцирования переходов между различными энергетическими уровнями ионов, позволяя манипулировать квантовой информацией, хранящейся в системе.

Ионные ловушки — это устройства, которые используют электромагнитные поля для удержания ионов в локализованной области, обеспечивая стабильную среду для квантовых операций. Ионы, используемые для квантовых вычислений, часто ловятся с помощью электромагнитных полей.

Изначальная модель представляла собой цепочку ионов, помещенную в линейную радиочастотную ловушку и охлажденных настолько, что их движение, связанное между собой кулоновской силой, носит квантово-механический характер. Каждый кубит будет образован двумя внутренними уровнями каждого иона, лазер будет использоваться для выполнения манипуляций с квантово-механическими амплитудами вероятностей состояний. Квантовое состояние таких ионов может быть считано путем наблюдения

флуоресценции или других измеримых свойств при переходе ионов между различными энергетическими уровнями. Этот процесс считывания является ключевым для извлечения результата квантовых вычислений.

Отличительной особенностью ионных кубитов является относительно длительное время когерентности по сравнению с другими типами квантовых вычислительных блоков. Однако, построение масштабируемых квантовых компьютеров на их основе имеет определенные трудности. Точная манипуляция отдельными ионами и поддержание их запутанности в рамках более крупных систем требует сложных техник контроля.

Для использования преимуществ различных типов кубитов и решения конкретных проблем, связанных с каждым из них, некоторые архитектуры квантовых вычислений комбинируют ионные с другими типами кубитов [1].

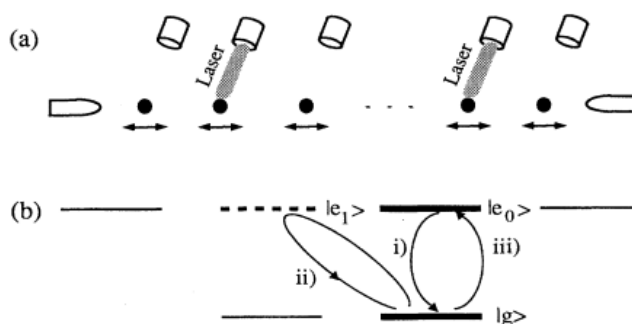


Рис. 1. (a)  $N$  ионов в линейной ловушке, взаимодействующие с  $N$  различными лазерными пучками; (b) Схема атомных уровней для иона [1]

## 5.2. Спин на нейтральных атомах

Существует еще один перспективный подход к созданию квантовых битов, в основе которого лежат магнитные свойства нейтральных атомов.

Нейтральные атомы в своем электронном основном состоянии крайне слабо взаимодействуют с окружающей средой, что позволяет потенциально очень длительные времена когерентности. Также в большинстве ситуаций такие атомы очень слабо взаимодействуют между собой, но межатомные взаимодействия могут быть созданы по требованию за счет индуцированных электрических диполь-дипольных взаимодействий, столкновений в основном состоянии или обмена реальными фотонами.

Способность включать взаимодействия только по мере необходимости имеет большое преимущество, поскольку это уменьшает взаимодействие с окружающей средой и распространение ошибок во время вычислений. Слабые атомные взаимодействия также делают относительно простым ловушку и охлаждение нейтральных атомов в больших

количествах, что благоприятно сказывается на масштабировании до множества кубитов и возможности параллельной обработки.

В настоящее время лучшим способом такого тесного удержания является оптическая решетка. Оптические решетки представляют собой периодические массивы микронных ловушек, созданных набором пересекающихся лазерных лучей. Используя решетчатый свет, смещенный далеко от атомного резонанса, можно значительно снизить скорость рассеяния фотонов, а при этом большая интенсивность позволяет поддерживать сильный потенциал удержания.

Широкий спектр свойств, характеризующих потенциал решетки, может быть контролирован в реальном времени путем изменения геометрии лазерного пучка, поляризации, интенсивности и частоты, а также добавлением статических электрических и магнитных полей. Особый интерес представляет способность проектировать потенциалы удержания, которые очень близки к идентичным для двух сверхтонких спиновых состояний, используемых для кодирования атомного кубита. Также возможно кодирование нескольких отдельных атомных кубитов, удерживаемых на решеточных сетках, которые могут перемещаться независимо друг от друга. Это предоставляет механизм для наложения и связывания любых двух кубитов из двух решеток, обеспечивая параллельную обработку данных [2].

### 5.3. Спин в полупроводниковой матрице

Спиновые кубиты в полупроводниковых квантовых точках представляют собой выдающееся семейство твердотельных кубитов. Они образуются, когда электроны или дырки заключены в статическую потенциальную яму в полупроводнике (микроскопического размера), что обеспечивает им квантованный энергетический спектр. В зависимости от своей конфигурации они могут управляться как магнитным, так и электрическим полем и, следовательно, сильно подвержены дефазировке внешним шумом.

Простейшей реализацией являются спины одиночных атомов легирующего элемента со связанным зарядом в полупроводнике с логическим подпространством  $|\uparrow\rangle$  и  $|\downarrow\rangle$ . Для управления энергиями различных состояний такой квантовой точки можно использовать методы магнитного резонанса, для чего необходимы специальные электроды (квантовые затворы).

Хотя существует широкий спектр спиновых кубитов на основе квантовых точек, они обладают одним и тем же базовым набором свойств. Дальнейшее усложнение обеспечивается добавлением дополнительных квантовых точек, которые позволяют управлять большим количеством параметров.

Так, например, электроны могут быть ограничены двумя измерениями благодаря слоистой структуре полупроводника, либо на границе раздела между двумя различными полупроводниками или между изолятором и полупроводником, при этом двумерный проводящий слой принято называть двумерным электронным газом (2DEG). Эти слои обычно находятся на десятки нанометров ниже поверхности. Основными управляемыми параметрами в квантовых точках этого типа являются число электронов в точке, туннельная связь с выводами, которая контролируется расположением и напряжением на соседних затворах, и магнитное поле, приложенное к точке. Типы электродов затвора обозначены как Р – плунжерный (отвечает за химический потенциал точки, т.е. количество электронов), L – свинцовый (влияет на туннельную связь между точкой и выводами) и Т – туннельный (определяет туннельную связь между точками). Исток и сток, обозначенные как S и D и являются областями 2DEG, которые представляют собой выводы для двух квантовых точек [3].

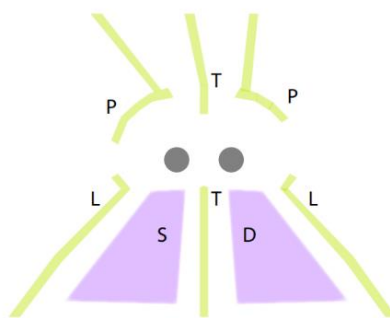


Рис. 2. Пример электродов затвора, используемых для управления в двойной квантовой точке [3]

#### 5.4. Квантовый бит на сверхпроводящей элементной базе

Сверхпроводящие квантовые биты используют принцип сверхпроводимости для кодирования и манипулирования квантовой информацией. Эти кубиты реализуются с использованием сверхпроводящих цепей, которые способны нести электрический ток с нулевым сопротивлением при охлаждении до экстремально низких температур, что также обеспечивает снижение внешнего теплового шума.



Основной строительный блок сверхпроводящих квантовых битов — это джозефсоновский переход, нелинейный электрический элемент, образованный двумя сверхпроводящими материалами, разделенными тонким изоляционным барьером.

Сверхпроводящий кубит характеризуется двумя энергиями, определяющими его гамильтониан: амплитудой джозефсоновской энергии связи  $E_J = \frac{I_c \times \Phi_0}{2\pi}$ , где  $I_c$  — критический сверхпроводящий ток туннельного контакта,  $\Phi_0$  — квант магнитного потока,  $E_C = \frac{(2e)^2}{2C_J}$  — энергия электрической «перезарядки» туннельной SIS структуры с емкостью  $C_J$  при переходе сверхпроводящей электронной (куперовской) пары с зарядом  $2e$  с одной сверхпроводящей  $S$  обкладки туннельного контакта на другую. Зарядовая  $Q$  и магнитная (фазовая  $\varphi$ ) степени свободы кубита являются двумя сопряженными квантово-механическими переменными, подчиняющимися соотношению неопределенности  $\Delta Q \Delta \varphi \sim 2e$ . Такая неопределенность фазы обеспечивает связь квантовых уровней энергии (зависящих от магнитного потока  $\Phi$ , влияющих на фазу  $\varphi$ ) кольца с субмикронными джозефсоновскими переходами.

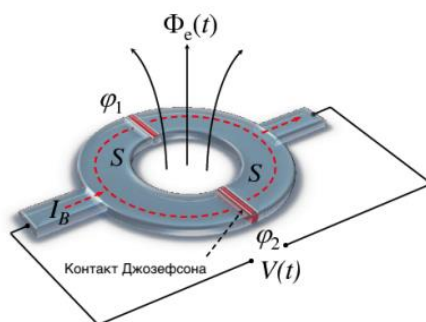


Рис. 3. Сверхпроводящий интерферометр с двумя джозефсоновскими контактами [9]

Для того, чтобы классический джозефсоновский контакт превращался в квантовую систему, необходимо выполнение некоторых условий. Характерная энергия кубита, которая задается частотой перехода между основным и первым возбужденным состоянием, должна быть велика на фоне энергий тепловых флуктуаций:  $k_B T < \hbar \omega_{01} < \Delta$ . У сверхпроводников, которые используются для создания таких вычислительных систем, есть щель в спектре возбуждений. Расстояние в энергетических единицах между уровнями кубита должно быть мало на фоне этой щели в спектре возбуждений. Иначе контакт заведомо не будет работать как квантовая система.

Многочисленные эксперименты показали, что наилучший материал, который можно использовать в качестве сверхпроводника, является алюминий. Гетероструктура

напыляется на алюминий, далее формируется структура в том месте, где будет джозефсоновский контакт. Следующий слой - изолятор, а выше - слой алюминия. Несмотря на то, что для перехода алюминия в сверхпроводящий режим необходимы значительно более низкие температуры по сравнению с похожими материалами, такой элемент очень прост в изготовлении, а  $\text{AlO}_x$  хороший изолятор.

В случае, когда зарядовая энергия  $E_C$  сравнима или превышает джозефсоновскую энергию  $E_J$ , именно заряд  $Q$  является хорошо определенной квантово-механической переменной, и кубит, работающий в этом пределе, называется **зарядовым**. Такой кубит сильно подвержен «зарядовым шумам» - основным источникам декогерентности. Поэтому долгое время предпочтение отдавалось **фазовым** и **потокковым** кубитам, для которых  $E_J \gg E_C$ , и хорошо определенной квантово-механической переменной является сверхпроводящая разность фаз  $\phi$  или магнитный поток  $\Phi$  в кубите соответственно.

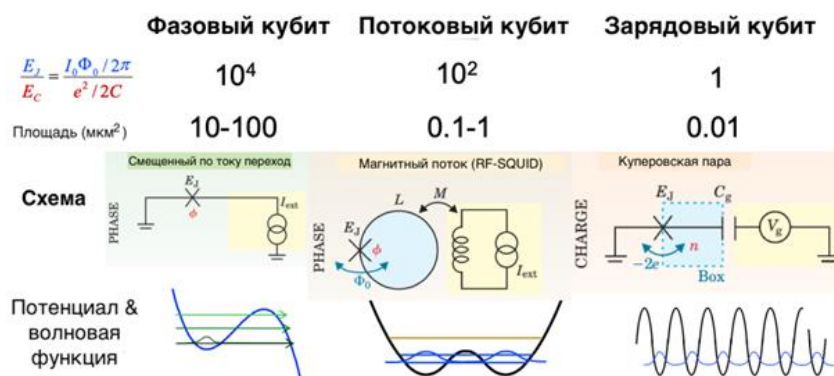


Рис. 4. Типы сверхпроводящих кубитов и соотношения между потенциальными энергиями, типичные площади контактов, эквивалентные схемы и виды потенциальной энергии с волновыми функциями стационарных состояний для них [9]

Фазовый кубит - ангармонический осциллятор, в который ввели нелинейность и за счет этого исказили его потенциал, создали нарушение эквидистантности в спектре. Потокковый кубит эквивалентен двухъямному потенциалу. С классической точки зрения система может быть локализована либо в левом, либо в правом минимуме. За счет квантово-механических эффектов возникает туннелирование через потенциальный барьер, это приводит к расщеплению основных уровней. В качестве основного первого возбужденного уровня выступает именно это основное расщепленное состояние. Зарядовый кубит же представляет собой систему многочисленных потенциальных ям [4].

Для фазового и потокового кубита рабочая точка задается с использованием источника тока, для зарядового кубита эта процедура осуществляется приложением напряжения к конденсатору, который отделяет землю от джозефсоновского контакта.

Идеальным с точки зрения сочетания преимуществ зарядового и фазового кубитов оказался «трансмон» - зарядовый кубит, шунтированный большой внешней емкостью. Он наименее восприимчив к зарядовым шумам по двум причинам. Во-первых, он, как всякий зарядовый кубит, имеет малые размеры, определяющие малую исходную емкость. Это обеспечивает сравнительно небольшое количество «зарядовых флуктуаторов», двухуровневых дефектов, находящихся в туннельном барьерном слое из неупорядоченного оксида  $\text{AlOx}$ . Шунтирование такого кубита большой внешней емкостью, приводящее к существенному уменьшению зарядовой энергии  $E_C$ , делает его довольно слабо восприимчивым к зарядовым шумам, что обычно свойственно фазовым кубитам с  $E_J \gg E_C$ , которые, однако, для увеличения  $E_J$  по сравнению с  $E_C$  требуют довольно большой площади переходов и, следовательно, большой площади неупорядоченного туннельного оксида с дефектами. Индуктивное шунтирование двумя большими переходами приводит к потоковому кубиту. Шунтирование большим количеством переходов для реализации гораздо большей индуктивности лежит в основе конструкции флаксоинума. Оба этих индуктивно шунтированных кубита могут быть также емкостно шунтированы для дальнейшего подавления флуктуаций заряда [5].

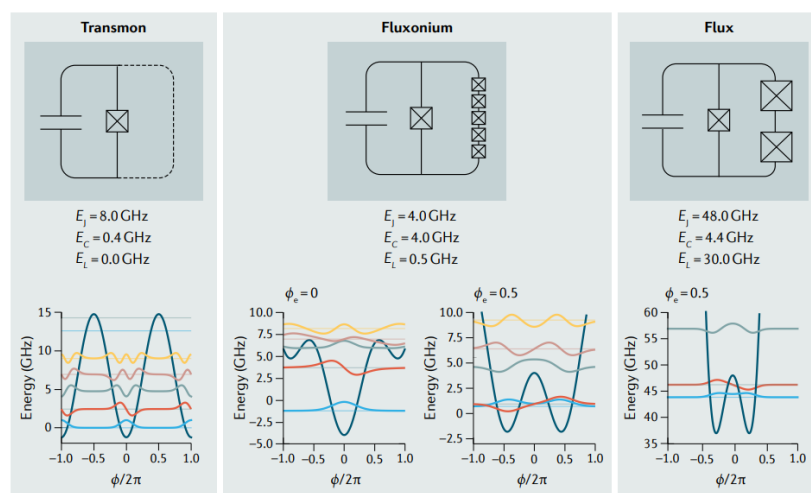


Рис. 5. Схемы, потенциальные энергии и волновые функции стационарных состояний для трансмона, флаксоинума и потокового кубитов [5]

## 5.5. Сравнение характеристик квантовых битов

### Ионы в ловушках.

Преимущества:

- Большое время когерентности ( $>20$  с для ядерных спинов);
- Операции несколько быстрее, чем у нейтральных атомов ( $\sim 0,01$  мс)
- Индивидуальная адресация проста;
- Высокоточные эксперименты уже стали обычным явлением.

Трудности:

- Масштабирование до многих кубитов требует сложных ловушек;
- Более медленные затворы, чем многие твердотельные реализации.

### Спин на нейтральных атомах.

Преимущества:

- Возможность производства больших квантовых регистров;
- Огромный потенциал параллелизма в операциях;
- Большое время когерентности ( $>20$  с).

Трудности:

- Операции обычно медленнее других реализаций ( $\sim 1$  мс);
- Необходима индивидуальная адресация.

### Спин на полупроводниках.

Преимущества:

- Более быстрое время операции ( $\sim 1$  нс).

Трудности:

- Производство регулярных массивов является нетривиальной задачей;
- Быстрая декогеренция ( $\sim 30$  мкс).

### Квантовый бит на сверхпроводящей базе.

Преимущества:

- Быстрое время операции ( $\sim 1$  нс);
- Большой потенциал модернизации.

Трудности:

- Производство регулярных массивов кубитов нетривиально;
- Быстрая декогеренция ( $\sim 0,5-10$  мкс);
- Необходимы сверхнизкие температуры.

	Кубит на ионах в ловушках	Кубит на нейтральных атомах	Кубит на спинах в полупроводниках	Сверхпроводящий кубит
Возможность применения при комнатной температуре	Да	Да	Да	Нет
Manufacturability	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■ ■ ■
Scalability	■	■ ■ ■	■ ■ ■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■ ■
Measurability	■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■ ■
Controllability	■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■ ■ ■
Coherence time	■ ■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■

Рис. 6. Сравнение характеристик квантовых битов

### 3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ

#### 3.1. Эволюция двухуровневой системы

Одиночный кубит — это вектор  $|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$ , параметризованный двумя комплексными числами, удовлетворяющими условию  $|a|^2 + |b|^2 = 1$ . Операции над кубитом должны сохранять эту норму, и поэтому они описываются унитарными матрицами  $2 \times 2$ . Среди них наиболее важными являются матрицы Паули, являющиеся нормированными операторами проекции спина для электрона на одну из осей в декартовой системе координат.

$$\sigma_x \equiv X \equiv \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \sigma_y \equiv Y \equiv \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix} \quad \sigma_z \equiv Z \equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \vec{\sigma} \equiv \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z\}$$

Будем считать, что измерение в квантовых вычислениях — это процесс соединения одного или нескольких кубитов с классической системой таким образом, что через некоторый промежуток времени состояние кубитов отображается состоянием классической системы. Например, состояние кубита  $|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$ , представленное основным и возбужденным состояниями двухуровневого атома, может быть измерено путем накачки возбужденного состояния и поиска флуоресценции. Если электрометр

покажет, что флуоресценция была обнаружена фотоумножителем, то кубит коллапсирует в состояние  $|1\rangle$ ; это произойдет с вероятностью  $|b|^2$ . В противном случае электромметр не обнаружит заряда, и кубит коллапсирует в состояние  $|0\rangle$  [6].

Произвольное чистое состояние двухуровневой системы можно представить как

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

где  $0 \leq \theta \leq \pi$  и  $0 \leq \phi \leq \pi$ . Таким образом, этому чистому состоянию сопоставить вектор единичной длины в пространстве, который характеризуется двумя углами  $\theta$  и  $\phi$ :

$$\vec{a} = \{\sin(\theta)\cos(\phi), \sin(\theta)\sin(\phi), \cos(\theta)\} = \{u, v, w\},$$

называемый вектором Блоха, а само пространство – пространством Блоха.

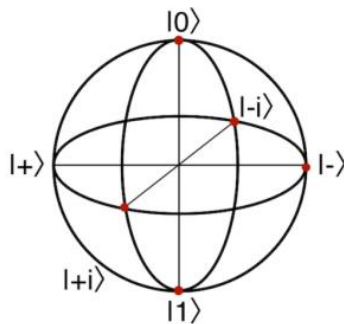


Рис. 7. Блоховская сфера [9]

$$|+\rangle \equiv |0\rangle + |1\rangle \quad |-\rangle \equiv |0\rangle - |1\rangle \quad |+i\rangle \equiv |0\rangle + i|1\rangle \quad |-i\rangle \equiv |0\rangle - i|1\rangle$$

Операторы поворота вокруг осей:

$$R_x(\theta) = e^{-i\theta X/2} = \cos(\theta/2)\hat{I} - i \cdot \sin(\theta/2)X = \begin{pmatrix} \cos(\theta/2) & -i \cdot \sin(\theta/2) \\ -i \cdot \sin(\theta/2) & \cos(\theta/2) \end{pmatrix};$$

$$R_y(\theta) = e^{-i\theta Y/2} = \cos(\theta/2)\hat{I} - i \cdot \sin(\theta/2)Y = \begin{pmatrix} \cos(\theta/2) & -\sin(\theta/2) \\ \sin(\theta/2) & \cos(\theta/2) \end{pmatrix};$$

$$R_z(\theta) = e^{-i\theta Z/2} = \cos(\theta/2)\hat{I} - i \cdot \sin(\theta/2)Z = \begin{pmatrix} e^{-i\theta/2} & 0 \\ 0 & e^{i\theta/2} \end{pmatrix},$$

изменение состояния системы будет эквивалентно повороту Блоховского вектора. [7]

В общем случае Гамильтониан двухуровневой системы может быть записан как

$$\hat{H} = E_0 \cdot \hat{I} + W_1 \cdot \sigma_x + W_2 \cdot \sigma_y + \Delta \cdot \sigma_z = \begin{pmatrix} E_0 + \Delta & W_1 - iW_2 \\ W_1 + iW_2 & E_0 - \Delta \end{pmatrix} = E_0 \cdot \hat{I} + \vec{r} \cdot \vec{\sigma},$$

где  $E_0 = \frac{1}{2}(E_1 + E_2)$ ,  $\Delta = \frac{1}{2}(E_1 - E_2)$ ,  $\vec{r} = \{W_1, W_2, \Delta\}$ . Тогда собственные значения Гамильтониана будут

$$\lambda_+ = E_+ = E_0 + \sqrt{\Delta^2 + |W|^2};$$

$$\lambda_- = E_- = E_0 - \sqrt{\Delta^2 + |W|^2},$$

где  $W = W_1 + iW_2 = |W|e^{i\phi}$  - константа связи для взаимодействия между системой и полем и её модуль  $|W|^2 = W_1^2 + W_2^2$ . Соответствующие им собственные векторы при учете  $\sin(\theta) = \frac{|W|}{\sqrt{\Delta^2 + |W|^2}}$  и  $\cos(\theta) = \frac{\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + |W|^2}}$  могут быть записаны в виде

$$|E_+\rangle = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ e^{i\phi}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{pmatrix} = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)|0\rangle + e^{i\phi}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)|1\rangle;$$

$$|E_-\rangle = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ e^{i\phi}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{pmatrix} = \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)|0\rangle - e^{i\phi}\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)|1\rangle.$$

Отсюда состояния  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$  могут быть записаны в базисе собственных векторов

$$|0\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)|E_+\rangle + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)|E_-\rangle;$$

$$|1\rangle = e^{-i\phi}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)|E_+\rangle - e^{-i\phi}\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)|E_-\rangle.$$

Если система была в состоянии  $|0\rangle$  в начальный момент времени, т.е. при  $t = 0$

$$|\psi(0)\rangle = |0\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)|E_+\rangle + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)|E_-\rangle,$$

тогда в момент времени  $t$  состояние системы будет:

$$|\psi(t)\rangle = e^{\frac{-i\hat{H}t}{\hbar}}|\psi(0)\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)e^{\frac{-iE_+t}{\hbar}}|E_+\rangle + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)e^{\frac{-iE_-t}{\hbar}}|E_-\rangle.$$

Вероятность обнаружить систему в состоянии  $|1\rangle$  будет равна

$$P_{0 \rightarrow 1}(t) = |\langle 1|\psi(t)\rangle|^2 = \sin^2(\theta)\sin^2\left(\frac{(E_+ - E_-)t}{2\hbar}\right) = \frac{|W|^2}{\Delta^2 + |W|^2}\sin^2\left(\frac{(E_+ - E_-)t}{2\hbar}\right).$$

Видно, что вероятность колеблется с угловой частотой  $\Omega = \frac{E_+ - E_-}{2\hbar} = \frac{\sqrt{\Delta^2 + |W|^2}}{\hbar}$ ,

называемой частотой Раби, а такие колебания – Раби-осцилляциями. Период осцилляции Раби зависит от амплитуды используемого воздействия. При увеличении температуры или шумовых воздействий амплитуда осцилляций падает [8].

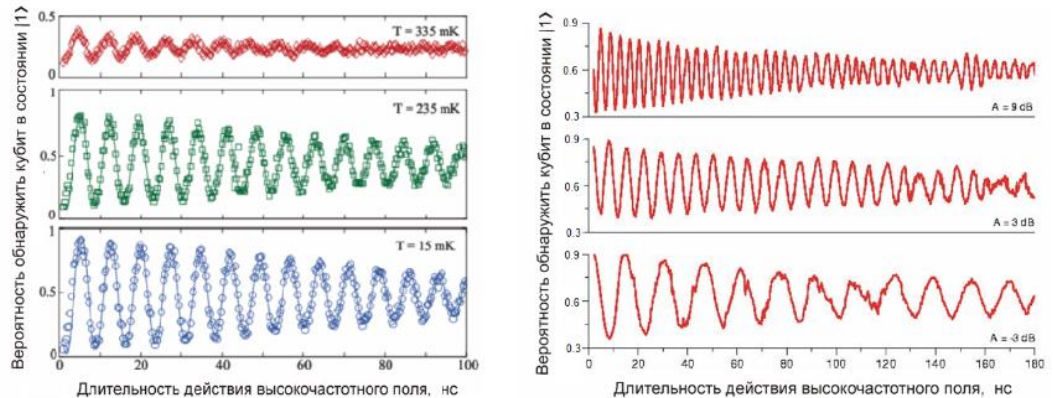


Рис. 8. Экспериментальные Раби-осцилляции в фазовых и потоковых кубитах [9]

### 3.2. Взаимодействие атома с резонансным импульсом

Рассмотрим простейшее приближение взаимодействия двухуровневого атома с монохроматическим светом, для которого энергия падающих фотонов совпадает с разностью энергий уровней атома  $\hbar\omega_0 = E_2 - E_1$ , а симметрии не препятствуют переходу. Тогда невозмущенный гамильтониан атома можно записать в виде

$$H_0 = \frac{\hbar\omega_0}{2} |1\rangle\langle 1| - \frac{\hbar\omega_0}{2} |0\rangle\langle 0| = \frac{\hbar\omega_0}{2} \sigma_z.$$

В резонаторной КЭД основным является дипольное взаимодействие между электрическим дипольным моментом  $\vec{d}$  атома и электрическим полем  $\vec{E}$ . В приближении, когда электрическое поле монохроматично с частотой  $\omega$  и занимает одну пространственную моду, его можно описать как  $\vec{E}(t) = \vec{E}_0 e^{-i\omega t} + \vec{E}_0^* e^{i\omega t}$ . Гамильтониан взаимодействия будет

$$H_1 = -\vec{d}\vec{E}.$$

В приближении вращающейся волны (RWA:  $\Delta\omega = \omega - \omega_0 \ll \omega + \omega_0$ ) итоговый Гамильтониан для системы атом-свет имеет вид

$$H = H_0 + H_1 = \frac{\hbar\omega_0}{2} \sigma_z + \frac{\hbar\Omega(t)}{2} \cos(\omega t) \sigma_x,$$

где  $\Omega(t) = \frac{\vec{d} \cdot \vec{E}(t)}{\hbar}$  — частота Раби. Тогда при  $\omega = \omega_0$  (резонансный случай) вероятность перехода из состояния  $|0\rangle$  в состояние  $|1\rangle$ :

$$P_{0 \rightarrow 1}(t) = \sin^2\left(\frac{\Theta}{2}\right);$$

$$\Theta = \int_{-\infty}^t \Omega(t') dt',$$

где  $t$  — момент окончания действия резонансного импульса на рассматриваемую систему. Таким образом, меняя длительность или форму импульса, вероятность найти атом в основном или возбужденном состоянии должна осциллировать [7].

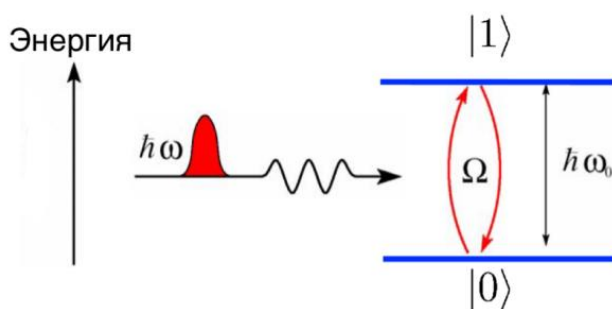


Рис. 9. Двухуровневая система и резонансный импульс [9]



### 3.3. Использование квантовых битов как детекторов СВЧ сигнала

Обычно частота кубита находится в гигагерцовом диапазоне, что делает важным развитие высокочувствительных детекторов в составе измерительного оборудования для анализа кубитов или для передачи информации. При создании устройств для лазерной генерации кубиты помещаются в квантовый резонатор на основе СВЧ компланарной линии передачи. Это позволяет энергии переходить от кубитов к резонатору в виде фотонов. Настройка резонатора производится в соответствии с разницей энергий между рабочими уровнями кубита, что требует частоты настройки в диапазоне 1-10 ГГц.

В современных криогенных системах уже распространены высокочувствительные СВЧ детекторы на основе эффекта сверхпроводимости, квантования магнитного потока и эффекта Джозефсона. Один из таких высокочувствительных детекторов магнитного поля является сверхпроводящий квантовый интерференционный детектор (SQUID).

Предлагается использовать в качестве детекторов СВЧ сигнала искусственные атомы, представляющие собой сверхпроводящие квантовые биты. Если поместить систему кубитов в квантовый резонатор, тогда стимулированный переход между энергетическими уровнями приведет к передаче энергии от кубитов в резонатор в виде фотонов с энергий  $\hbar\omega_{if} = E_i - E_f$ . При этом для работы квантового детектора необходимо, чтобы частота перехода  $\omega_{if}$  была равна частоте измеряемого поля. Использование природных атомов в данном методе также возможно, но для них спектр разрешенных значений энергий (собственных значений оператора Гамильтона) имеет конечные конкретные значения, а значит и строго определенные частоты перехода (в основном в видимой области), что заметно ограничивает область их применения. Искусственные атомы же на основе квантовых битов можно подготовить для любых частот и относительно просто регулировать их диапазон работы, как, например, в случае с фазовым или зарядовыми кубитами. Данный метод также в теории позволит регистрировать единичные фотоны низких энергий, что делает его перспективным для дальнейших исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были изучены основные методы создания квантовых битов и их принципы работы.

Структурированный сравнительный анализ этих кубитов по выделенным критериям позволил предположить, что наиболее перспективным по совокупности

показателей является сверхпроводящий квантовый бит. Несмотря на относительно небольшое время потери когерентности (десятки мс), время операции все равно остается много меньше, что позволяет эффективно проводить вычисления, а значительный потенциал к модернизации и простота создания выделяют его на фоне остальных типов кубитов.

Также на примере двухуровневого атома было исследовано взаимодействие квантового бита с резонансным электромагнитным импульсом, приводящее к колебаниям между чистыми состояниями системы. Предложен новый метод детектирования слабых электромагнитных сигналов с помощью искусственных атомов.

В дальнейших работах планируется развить теоретическое описание и экспериментальную реализацию детектора слабого (неклассического) микроволнового излучения с использованием квантовых битов (искусственных атомов).

**ЛИТЕРАТУРА**

- [1] J. I. Cirac, P. Zoller – “Quantum Computations with Cold Trapped Ions” – Physical Review Letters – 1994 – Vol. 74, № 20 – p. 1–4.
- [2] Ivan H. Deutsch, Gavin K. Brennen, Poul S. Jessen – “Quantum Computing with Neutral Atoms in an Optical Lattice” – Fortschritte der Physik – 2000 – Vol. 48, Issue 9-11 – p. 1-13.
- [3] Shannon Harvey – “Quantum Dots / Spin Qubits” – Oxford Research Encyclopedia of Physics – 2022 – p. 1–4.
- [4] И.С. Беседин, Г.П. Федоров, А. Ю. Дмитриев, В. В. Рязанов – “Разработка сверхпроводящих кубитов в России” – Квантовая электроника – 2018 – т. 48, н. 10 – с. 1–7.
- [5] Irfan Siddiqi – “Engineering high-coherence superconducting qubits” – Nature Reviews Materials – 2021 – Vol. 6 – p. 1–5.
- [6] Michael A. Nielsen, Isaac L. Chuang – “Quantum Computation and Quantum Information” – 2000 – p. 277–343.
- [7] Michel Le Bellac – “Short Introduction to Quantum Information and Quantum Computation” – 2007 – p. 1–72, 107–138.
- [8] T.P. Orlando – “Two-Level System with Static and Dynamic Coupling” – 2004 – p. 1–11, 20-21.
- [9] Н. В. Кленов – “Современные экспериментальные исследования основ квантовой механики”.