

# Получение характеристик сверхпроводящих кубитов

Область применения: квантовые вычисления, цепи QED

Продукты: UHFLI, UHF-AWG, UHF-DIG, UHF-MF

Дата выпуска: октябрь 2016 г.

## Введение

### Квантовые вычисления

Квантовые вычисления обещают прогресс в числовой вычислительной мощности по сравнению с классическими вычислениями, используя квантовые физические явления [ 1 , 2]. Современные экспериментальные работы в этой области сосредоточены на совершенствовании устройств, которые, в конечном счете, взяли бы на себя функцию транзисторов в классических процессорах: квантовых битов (кубитов). Сверхпроводящие кубиты являются одними из наиболее перспективных кандидатов, изучаемых сегодня [3, 4]. Будучи основанными на технологии микропроизводства и чисто электрическом управлении, сверхпроводящие кубиты имеют четкую дорожную карту для крупномасштабной интеграции сотен кубитов в одном процессоре. Неуклонное улучшение времени когерентности, достигнутое за последние годы, внушает уверенность в том, что эти устройства могут быть спроектированы с таким качеством, которое позволит применять практические численные алгоритмы.

### Растущая сложность

Управление сверхпроводящими кубитами требует сложных импульсных СВЧ-сигналов по нескольким каналам с точной синхронизацией. По мере увеличения числа кубитов и каналов возникает потребность в более интегрированных, стандартизированных и надежных электронных системах управления. Прибор Zurich Instruments UHFLI удовлетворяет этому требованию, поскольку он сочетает в себе генератор произвольной формы сигнала (AWG) для синтеза точно сформированных импульсных сигналов и синхронный усилитель 600 МГц с оцифровщиком для обнаружения. Объединение генерации и обнаружения в одном приборе снижает сложность настройки, улучшает синхронизацию, сокращает пространство в приборной стойке и позволяет использовать передовые методы управления, основанные на передаче данных от обнаружения к генерации, например ветвление последовательности.

Здесь мы опишем, как использовать инструмент UHFLI для характеристики сверхпроводящих кубитов

с точки зрения их частоты, времени жизни состояния кубита и времени когерентности. Представленные измерения также обеспечивают настройку форм импульсов, используемых для составления последовательностей квантовых вычислений. Однокубитное устройство, используемое в представленных здесь экспериментах, разработано в соответствии со схемой квантовой электродинамики [5], которая может быть расширена в сторону многокубитных экспериментов. Измерения проводились в лаборатории квантовых устройств профессора A. Wallraff в Цюрихе, Швейцария.

## Настройка и образец

Квантовые вычислительные устройства предназначены для управления и считывания квантового состояния кубита. Квантовое состояние обычно представляет собой квантовую суперпозицию двух физических конфигураций кубитного устройства, кодирующей информацию, обрабатываемую в квантовом компьютере. Образец, показанный на рис. 1 (а), состоит из резонансных цепей на основе ниобия и алюминия на сапфировом кристалле. Фактический кубит представляет собой нелинейный резонатор, сформированный из небольшого сверхпроводящего квантового интерференционного устройства (SQUID) и встроенного в чип конденсатора (оранжевого цвета на изображении). Конструкция SQUID позволяет настраивать диапазон частот кубитов в диапазоне от 4 до 75 ГГц путем регулировки небольшого магнитного поля, приложенного к устройству. Копланарный волновод (зеленый) направляет внешние сигналы непосредственно на кубит для управления им. Кубит связан с компланарно-волноводным резонатором (синего цвета) [ 5 ] на частоте 4,78 ГГц. Этот считывающий резонатор подключен через встроенный в кристалл фильтр к паре коаксиальных кабелей, которые обеспечивают интерфейс для считывания квантового состояния кубита. На рис. 1 (б) показана схема измерительной установки, в которой образец устанавливается в разбавляющий холодильник для обеспечения хорошо изолированной низкотемпературной среды, защищающей квантовые свойства образца.

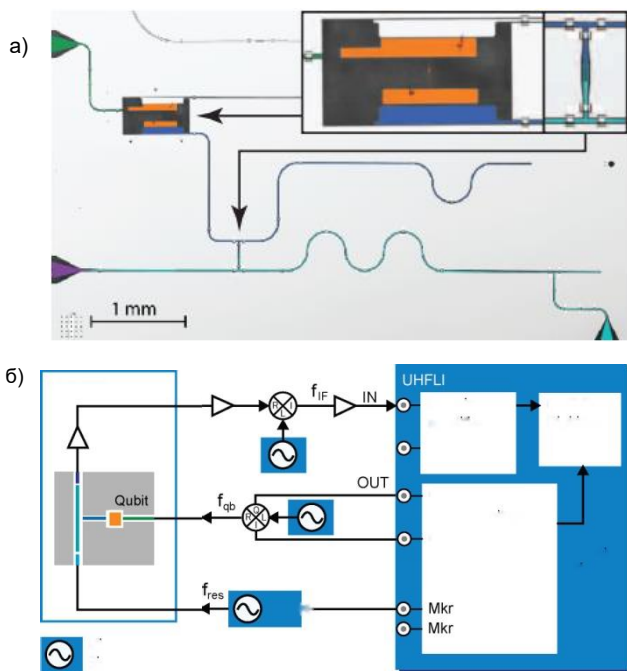


Рисунок 1. (а) Оптическая микрофотография образца, показывающая считывающий резонатор (синий) и пластины кубитового конденсатора (оранжевый). Резонатор соединен с входной и выходной линиями через фильтр Перселла [ 6 ] (голубой). Вставки показывают увеличенный вид кубита и ответвителя между резонатором и фильтром Перселла. (б) упрощенная схема экспериментальной установки, основанной на приборе UHFLI, интегрирующем синхронный усилитель и AWG. Образец сверхпроводящего кубита охлаждается в холодильнике для разбавления.

Управляющие импульсы генерируются квадратурной модуляцией микроволнового сигнала с использованием двух каналов AWG. Импульсы для считывания кубитов генерируются путем подачи одного из маркерных каналов AWG на вход затвора генератора сигналов. После передачи через считывающий резонатор импульсы усиливаются, и считываемый сигнал преобразуется с понижением частоты до промежуточной частоты  $f_{IF}$  и измеряется с помощью одного из каналов синхронного усилителя UHFLI.

## Измерения

### Кубитовая спектроскопия

Начнем со спектроскопических измерений частоты и ширины линии кубита и резонатора считывания. Спектроскопия также позволяет нам найти оптимальное смещение магнитного поля, установленное с помощью небольшой катушки на образце.

Для измерения считывающего резонатора мы приложим непрерывный микроволновый тон к резонатору и измерим амплитуду понижаемого передаваемого сигнала с помощью синхронного усилителя. Частота  $\nu_{res}$  этого тона качается в диапазоне частоты резонатора  $f_{res}$ . Такое измерение показано на рис. 2 (б). Форма АЧХ резонатора представляет собой узкий провал на  $f_{res}$  поверх более широкого пика, который обусловлен встроенным фильтром Парселла [ 6 ].

Для измерения частоты перехода кубита мы используем технику двух микроволновых тонов. Первый микроволновый сигнал подается на считывающий резонатор с фиксированной частотой, близкой к резонанс-

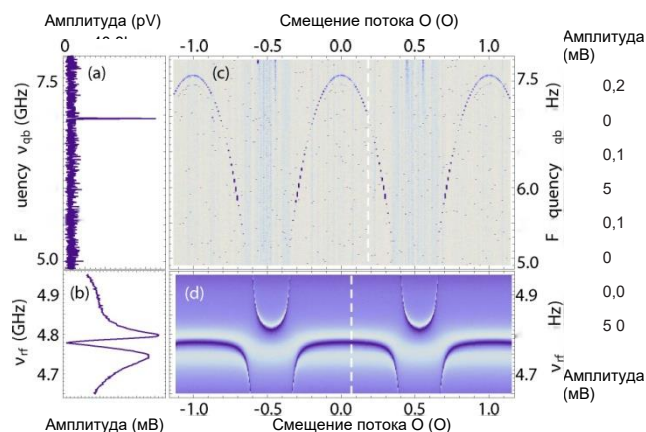


Рисунок 2. Спектры кубита ( а ) и считывающего резонатора ( б ). Измерение в ( а ) получается путем измерения передачи на фиксированной частоте  $\nu_{IF}$ , близкой к частоте резонанса резонатора ( б ), и качанием частоты возбуждения кубита  $\nu_{qb}$ . ( в ) Дугообразная зависимость от магнитного потока  $\Phi$  характерна для этого типа кубита. Когда частота кубита пересекает частоту резонатора считывания вдоль горизонтальной оси в ( г ), обе стороны избегают пересечения. Цветовая шкала показывает амплитуду сигнала, передаваемого через резонатор считывания после усиления.

ной  $f_{res}$ . При измерении амплитуды передачи второй тон подается на линию затвора кубита, и его частота  $\nu_{qb}$  качается в широком диапазоне. Вследствие дисперсионной связи между кубитом и резонатором считывания, изменение сигнала обнаруживается, когда  $\nu_{qb}$  становится резонансным с переходом кубита на  $f_{qb}$  [ 5 ]. Это приводит к особенности в  $f_{qb}$ , как видно на рис. 2 (а). На рис. 2 (в) и (г) показаны спектры кубита и резонатора в зависимости от магнитного поля. Частота перехода кубита имеет характерную дугообразную зависимость от магнитного поля [ 7 ]. При определенных магнитных полях частоты кубита и считывающего резонатора показывают исключенное пересечение, показанное в (г). Это так называемое вакуумное расщепление Раби является результатом сильной связи между кубитом и резонатором.

Все последующие измерения являются импульсными, а не непрерывными, чтобы исследовать динамические свойства кубита. Основой этих измерений является последовательность импульсов, состоящая из управляющей части и считывающей части. Во время управляющей части мы прикладываем импульсы к линии затвора кубита на частоте, близкой к  $f_{qb}$ . Эти резонансные импульсы приводят к когерентным колебаниям кубита между его основным и возбужденным состоянием, известным как колебания Раби. После управляющей части мы прикладываем импульс к резонатору считывания на частоте, близкой к  $f_{res}$ , и выполняем триггерное измерение сигнала после прохождения через образец. Для этого обратный сигнал сначала преобразуется с понижением частоты в аналоговом домене до  $f_{IF} = 28,125$  МГц, а затем демодулируется в цифровом домене с использованием синхронного усилителя. Использование цифровой синхронной технологии вместо прямого понижающего преобразования в постоянный ток защищает измерение от дрейфа напряжения смещения усилителя и шума  $1/f$  [8]. Весь цикл повторяется несколько тысяч раз чтобы

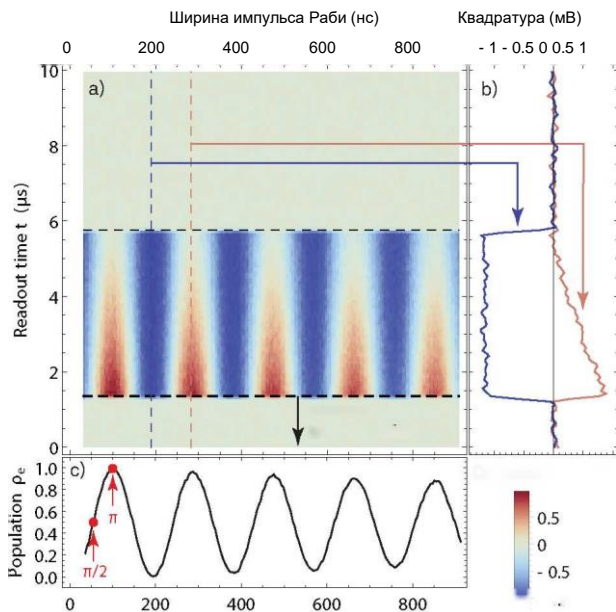


Рисунок 3. Измерение колебаний Раби. В зависимости от ширины управляющего импульса, кубит периодически эволюционирует из основного состояния в возбужденное состояние и обратно. Это приводит к синусоидальной амплитуде сигнала считывания как функции ширины импульса (горизонтальная ось), как видно на цветном графике в (а). (б) Зависимый от времени сигнал считывания при двух значениях ширины импульса, отмеченных в (а). Время между 1,2 и 5,8 пс соответствует импульсу считывания. (в) График осцилляций Раби, полученный путем усреднения данных в (а) и нормализации результата для получения средней совокупности возбужденных состояний. Измерение позволяет определить параметры для  $\pi$ - и  $\pi/2$ -импульсов (красные метки).

увеличить отношение сигнал/шум и усреднить квантовые флуктуации. Обычно преобразование с понижением частоты выполняется после усреднения необработанных данных. Цифровые демодуляторы UHFLLI обеспечивают преобразование с понижением частоты перед усреднением. Этот метод исключает один этап последующей обработки данных из эксперимента и устраняет необходимость выбирать промежуточную частоту, которая соизмерима с частотой повторения. Кроме того, это важно при реализации протоколов прямой связи, где демодулированный сигнал должен быть быстро доступен.

### Колебания Раби

Применение управляющего импульса приводит к четко определенному изменению состояния кубита, которое можно использовать в качестве операции стробирования одного кубита. Такие операции требуются для реализации квантовых вычислительных алгоритмов, так же как, например, логическая инверсия требуется для классических вычислительных алгоритмов. Измерение осцилляций Раби позволяет определить параметры импульса для заданной операции затвора.

Для этого измерения мы генерируем контрольный импульс с огибающей, сформированной гладкими краями (время нарастания/спада 3,9 нс) и плоским плато с переменной шириной. За контрольным импульсом следует импульс считывания, представляющий собой микроволновый импульс с приблизительно прямоугольной огибающей. Вероятность нахождения кубита в возбужденном состоянии зависит от синусоидальной эволюции как функции площади управляющего

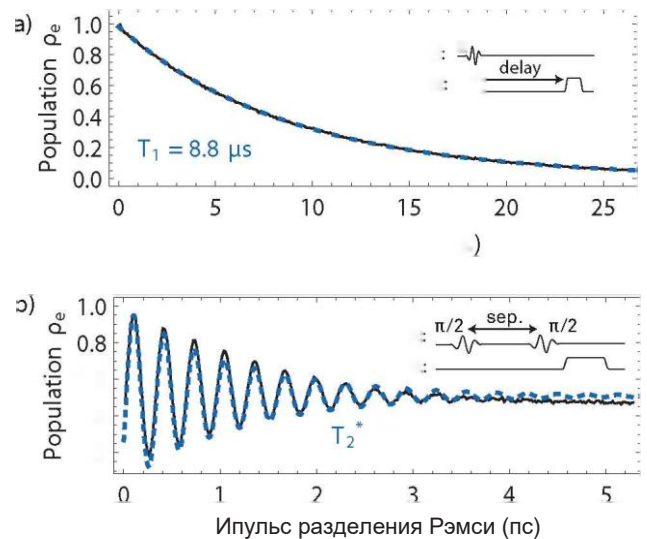


Рисунок 4. (а) измерение времени жизни кубита  $T_1$ . Кубит приводится

в возбужденное состояние  $\pi$ -импульсом. Последующее экспоненциальное затухание затем измеряется для увеличения задержек перед импульсом считывания. (б) Измерение по Рэмси. Поскольку задержка между двумя  $\pi/2$ -импульсами изменяется, сигнал считывания кубита следует за затухающей колебательной эволюцией, отражающей постепенную потерю фазовой когерентности. Измерение используется для определения времени когерентно-

импульса, которая снова пропорциональна его ширине на половине максимума. Эта эволюция отражается в измеренном сигнале во время фазы считывания, показанного на рис. 3. Кривая позволяет определить ширину импульсов затвора кубита, релевантных для следующих измерений: так называемая ширина  $\pi$ -импульса соответствует первому максимуму, а ширина  $\pi/2$ -импульса соответствует периоду первой четверти.  $\pi$ -импульс переводит кубит из своего основного в возбужденное состояние, тогда как  $\pi/2$ -импульс переводит кубит в равную когерентную суперпозицию основного и возбужденного состояний. Для этого измерения каждый контрольный импульс повторялся 4000 раз с частотой 13 кГц.

### Время жизни кубита

Переход от возбужденного состояния кубита к основному состоянию ограничивает длительность вычислительного алгоритма. Таким образом, измерение среднего срока службы  $T_1$  является важной частью характеристики устройства. Для измерения  $T_1$  мы применяем  $\pi$ -импульс в начале последовательности, затем ждем переменное время  $t$  и, наконец, измеряем состояние кубита. Полученные данные приведены на рис. 4 (а). Из этой экспоненты  $\exp(-t/T_1)$  мы извлекаем время жизни  $T_1 = 8,8$  пс.

Управляющее программное обеспечение UHFLLI LabOne® способно генерировать сигналы и последовательности напрямую. Для этого измерения мы сгенерировали серию из 200 шаблонов с помощью UHF-AWG, используя цикл секвенсора, увеличивая задержку импульса считывания с 0 пс до примерно 26 пс, используя переменные секвенсора во время выполнения и динамические времена ожидания. Это означает, что все управляющие импульсы кубита могут быть сгенерированы с помощью одной  $\pi$ -импульсной огибающей с менее чем 400 выборками данных

сигнала для обоих каналов. Это в отличие от обычных методов, где шаблоны для всех импульсных задержек должны быть загружены в AWG выборка за выборкой, что потребовало бы данных о сигнале приблизительно  $200 \times (26 \text{ пс}) \times (2 \text{ канала}) \times (1,8 \text{ ГВЫб/с}) = 18,7 \text{ МВЫб}$  и, следовательно, намного более длительное время передача сигнала.

### Время когерентности кубита

Измерение бахромы Рэмси показывает свободную когерентную эволюцию кубита. Она обеспечивает измерение времени когерентности кубита. Последовательность Рэмси состоит из двух  $\pi/2$ -импульсов, разделенных переменным временем задержки, за которым следует считывание кубита. В отсутствие декогеренции, два  $\pi/2$ -импульса складываются в полный  $\pi$ -импульс и кубит оказывается в возбужденном состоянии. Дефазирование и релаксация во время задержки приводят к тому, что сложение импульсов является несовершенным, а это означает, что вероятность нахождения в возбужденном состоянии уменьшается со временем задержки. Кроме того, небольшая расстройка частоты импульсов относительно  $f_{\text{qb}}$  вызывает биение между фазой кубита и фазой несущей управляющего импульса, что приводит к колебательному вкладу в сигнал считывания. Из измерения на рис. 4 (б) мы извлекаем время дефазировки  $T_2^* = 1,2 \text{ пс}$ .

Импульсы, генерируемые двухканальным AWG, имеют несущие промежуточной частоты 112,5 МГц, генерируемые с использованием режима модуляции UHF-AWG, работающей в цифровой области. Промежуточная частота впоследствии преобразуется с повышением частоты к частоте перехода кубита с помощью аналогового смесителя. Использование амплитудной модуляции означает, что частоту и фазу несущей можно регулировать или регулировать без перепрограммирования AWG.

### Заключение

Эта серия существенных измерений кубитов демонстрирует возможности синхронного усилителя Zurich Instrument UHFLI и AWG в экспериментальной области, требующей высокой скорости, точности синхронизации и качества сигнала. Измерения обеспечивают обширную характеристику устройства кубита с точки зрения его рабочей частоты, времени жизни и времени когерентности. На основе элементарных импульсов, использованных для этих измерений, более сложные последовательности для экспериментов, таких как спиновое эхо или рандомизированный бенчмаркинг, устанавливаются прямым способом.

Zurich Instruments  
Technoparkstrasse 1  
CH-8005 Zurich  
Switzerland

Phone +41-44-5150410  
Fax +41-44-5150419  
Email [info@zhinst.com](mailto:info@zhinst.com)  
Web [www.zhinst.com](http://www.zhinst.com)

О Zurich Instruments

Zurich Instruments производит синхронные усилители, усреднители с узкополосным фильтром, схемы ФАПЧ, генераторы произвольных сигналов и анализаторы импеданса, которые произвели революцию приборов в диапазонах от средних частот (MF) до ультра-высоких частот (UHF) путем объединения приборов, работающих в частотной и временной областях в каждом продукте. Это уменьшает сложность лабораторных установок, устраняет источники проблем и обеспечивает новые подходы к измерениям, которые поддерживают прогресс исследований.

*Перевод выполнен компанией Интермера [www.intermera.ru](http://www.intermera.ru) [www.pribor4test.ru](http://www.pribor4test.ru)*

Отказ от ответственности

Содержание этого документа предоставлено Zurich Instruments (ZI) «как есть». ZI не дает никаких заверений и не дает никаких гарантий в отношении точности или полноты содержания данной публикации и оставляет за собой право вносить изменения в спецификацию в любое время без предварительного уведомления. Все торговые марки являются собственностью их соответствующих владельцев.

### Благодарности

Zurich Instruments хотела бы поблагодарить профессора Wallraff и его команду за то, что они поделились экспериментальными результатами и за их твердую приверженность развитию экспериментов с кубитами с использованием технологии Zurich Instruments. Особая благодарность выражается Michele Collodo за выполнение измерений и предоставление превосходной основы для интеграции UHFLI в существующую лабораторную инфраструктуру. Мы благодарим Theodore Walter за предоставление образца кубита и Yves Salathe, Simone Gasparinetti и Philipp Kurpiers за поддержку измерений и за обсуждения.

Эта работа была поддержана Swiss Federal Department of Economic Affairs, Education and Research через Commission for Technology and Innovation (CTI).

### Список использованной литературы

- [1] R. P Feynman. Simulating physics with computers. Int. J. of Theor. Phys., 21:467,1982.
- [2] T. D. Ladd, F. Jelezko, R. Laflamme, Y Nakamura, C. Monroe, and J. L. O'Brien. Quantum computers. Nature, 464:45, 2010.
- [3] Y. Nakamura, Pashkin, Yu. A., and Tsai J. S. Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box. Nature, 398:786,1999.
- [4] John Clarke and Frank K. Wilhelm. Superconducting quantum bits. Nature, 453:1031,2008.
- [5] A. Wallraff, D. I. Schuster, A. Blais, L. Frunzio, R.- S. Huang, J. Majer, S. Kumar, S. M. Girvin, and R. J. Schoelkopf. Strong coupling of a single photon to a superconducting qubit using circuit quantum electrodynamics. Nature, 431:1627, 2004.
- [6] M. D. Reed, L. DiCarlo, B. R. Johnson, L. Sun, D. I. Schuster, L. Frunzio, and R. J. Schoelkopf. High-fidelity readout in circuit quantum electrodynamics using the Jaynes-Cummings nonlinearity. Phys. Rev. Lett., 105:173601, Oct 2010.
- [7] Jens Koch, Terri M. Yu, Jay Gambetta, A. A. Houck, D. I. Schuster, J. Majer, Alexandre Blais, M. H. Devoret, S. M. Girvin, and R. J. Schoelkopf. Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box. Phys. Rev. A, 76:042319, Окт 2007
- [8] David Schuster. Circuit Quantum Electrodynamics. PhD thesis, Yale University, 2007