

Обратимая квантовая логика (RQL)

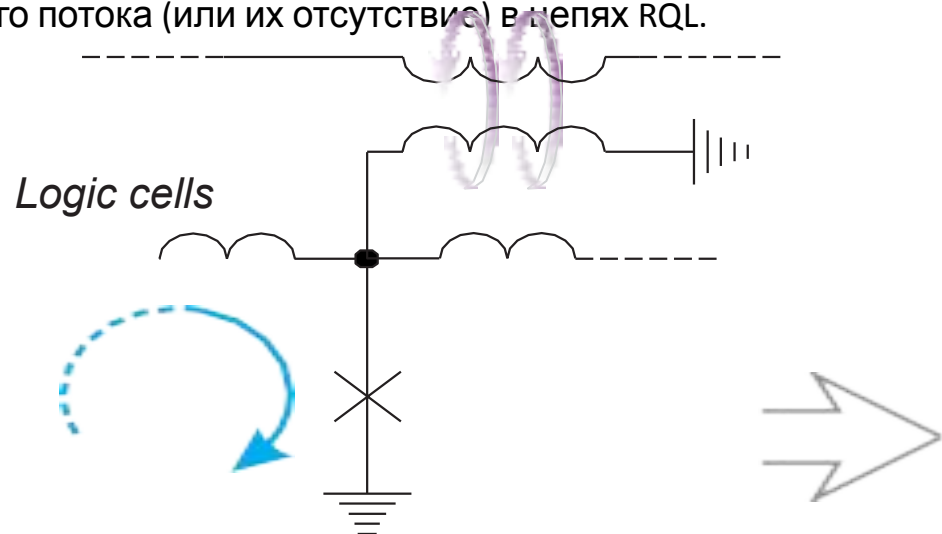
Обратимая квантовая логика (RQL)

RQL была предложена в 2011 году. Она была разработана как альтернатива традиционной RSFQ и представлена как «сверхмаломощная сверхпроводниковая логика». Основное различие между RQL и RSFQ заключается в способе питания. В то время как в RSFQ это - мощность постоянного тока, прикладываемая к джозефсоновским переходам параллельно через резисторы смещения, в RQL это - мощность переменного тока, подаваемая последовательно через трансформаторы смещения, см. слайд. Такая схема электроснабжения обладает рядом преимуществ.

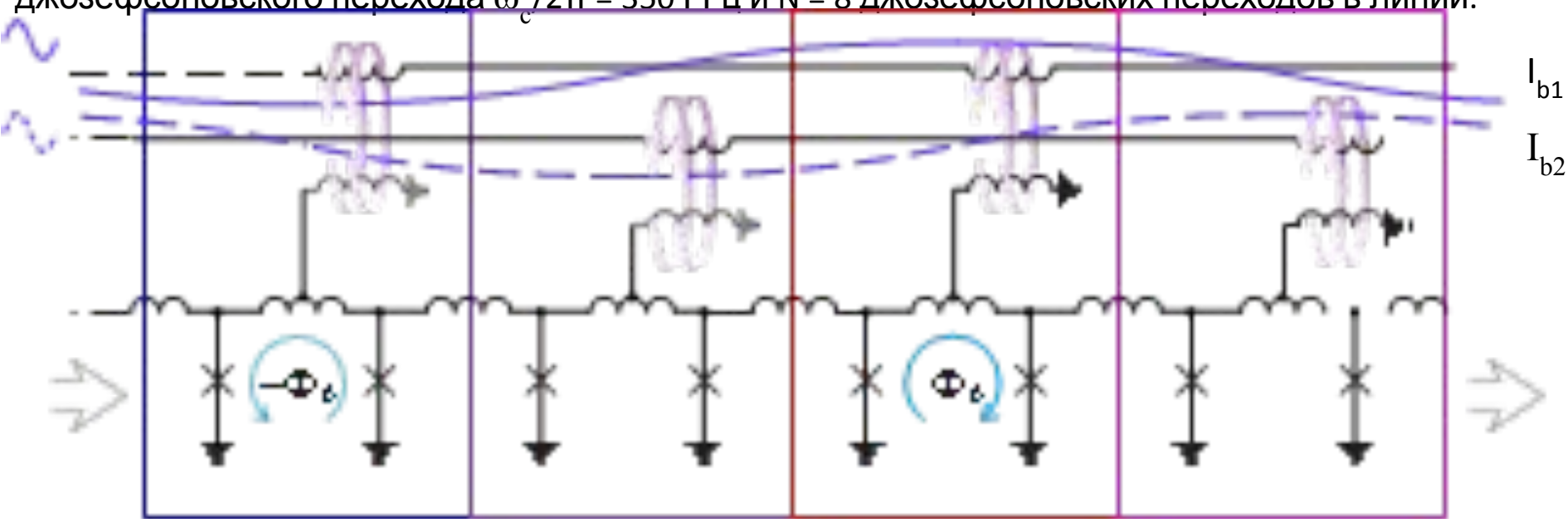
- (i) Отсутствие постоянного тока смещения и резисторов смещения означает нулевое статическое рассеяние мощности внутри криогенного холодильника. Ток смещения выводится за пределы микросхемы при комнатной температуре.
- (ii) Хорошо известной проблемой проектирования схем RSFQ является большое магнитное поле обратного тока смещения, влияющее на логические ячейки. Рекомендуется поддерживать максимальный ток смещения ниже 100 мА в линии питания RSFQ. Этот обратный ток полностью отсутствует в RQL из-за упомянутого прекращения тока смещения вне кристалла.
- (iii) Последовательное питание смещения позволяет поддерживать амплитуду тока смещения на очень низком уровне порядка $I_b \sim 1,8$ мА независимо от количества джозефсоновских переходов на кристалле. Нет необходимости в масштабном разбиении схемы.
- (iv) Ток смещения играет роль тактового сигнала. Нет необходимости в распределительной сети часов SFQ.
- (v) На часы не влияет тепловой шум. Логическая единица (ноль) представлена парой SFQ, имеющих противоположные направления магнитного потока (или их отсутствие) в цепях RQL.

Схема питания переменного тока RQL.

Синяя стрелка - ток SFQ,
фиолетовые стрелки -
магнитная связь.



SFQ в этой логике могут быть переданы в одном направлении с применением обратно направленных токов смещения (слайд). SFQ помещены в положительный / отрицательный полупериод волны переменного тока соответственно. К сожалению, одного переменного тока смещения недостаточно для направленного распространения SFQ. Он может обеспечить только периодические пространственные колебания квантов потока. RQL использует два переменного тока смещения со сдвигом фазы $\pi/2$. Ячейки RQL подключаются к этим двум линиям питания поочередно (слайд). Такая связь производит пространственное разделение общего тока смещения/тактовых импульсов на четыре окна, сдвинутых на $0, \pi/2, \pi$ и $3\pi/2$ периода волны. Такая четырехфазная схема смещения обеспечивает направленность распространения SFQ. Логические элементы, подключенные к одной линии смещения переменного тока в одном окне фазы тактового сигнала, образуют конвейер. Конвейер в RQL может содержать произвольное количество ячеек. Максимальную тактовую частоту схем RQL можно оценить как $f_{\max} \sim 17$ ГГц для стандартной характеристической частоты джозефсоновского перехода $\omega_c / 2\pi = 350$ ГГц и $N = 8$ джозефсоновских переходов в линии.



$I_{b1,2}$ - токи смещения переменного тока; они же - тактовый

Схема смещения RQL обеспечивает самосинхронизацию данных. Ранние импульсы ждут на краю линии повышения тока смещения в следующем фазовом окне и поэтому ошибки синхронизации незначительны, в отличие от RSFQ.

Логические ячейки RQL - это конечный автомат, аналогичный ячейкам RSFQ, и полный набор логических ячеек RQL состоит всего из трех вентилях, а именно: вентиль «И-ИЛИ», вентиль «А-не В» и защелка «Set-Reset». Эти ячейки ведут себя как комбинационная логика. При этом, если количество нулей и единиц в данных равны, то оценка рассеяния энергии как в логике RQL, так и в логике ERSFQ дает примерно одинаковую величину.

В итоге, как показывает более детальный анализ, **только адиабатическое переключение логических ячеек заметно улучшает энергоэффективность сверхпроводящих цепей.**

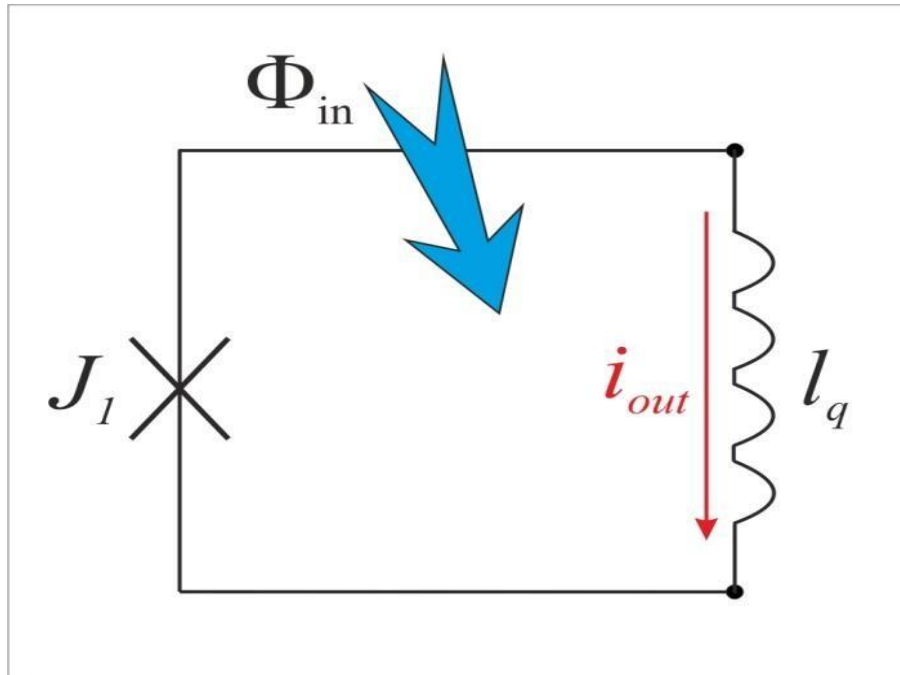
Адиабатическая сверхпроводниковая логика

Построение адиабатической сверхпроводящей логики (АСЛ) связано с идеей ячейки «параметрического квантрона» (см. рисунок).

Состояние квантрона определяется внешним магнитным потоком Φ_{in} и током I_{out} , который отвечает за критический ток Джозефсоновского перехода. Потенциальная энергия такой ячейки состоит из двух частей: джозефсоновская часть $E_J = (E_0 / 2\pi) \cdot [1 - \cos\phi]$ и магнитная энергия, запасенная в индуктивности, $E = (E / 2\pi) \cdot [\phi - \phi_{in}]^2 / 2l_q$:

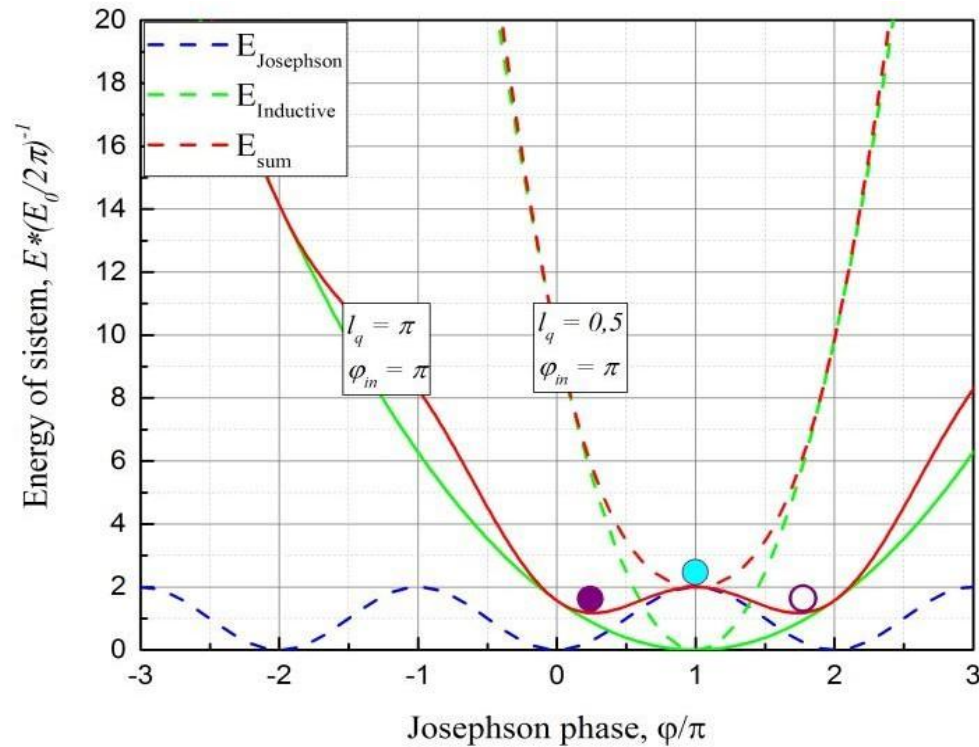
$$E = (E_0 / 2\pi) \times \{1 - \cos\phi + [\phi - \phi_{in}]^2 / 2l_q\},$$

$\phi_{in} = 2\pi\Phi_{in} / \Phi_0$, $l_q = 2\pi L_q I_C / \Phi_0$ (таким образом, индуктивность также зависит от I_{out}).



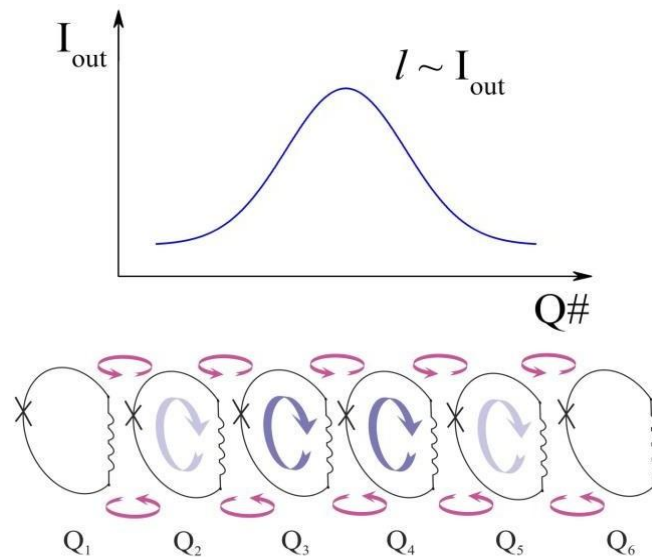
Схематическое изображение квантрона.

Потенциальная энергия параметрического квантрона.



При определенном значении внешнего магнитного потока (например, при $\phi_{in} = \pi$) суммарная энергия параметрического квантрона может иметь либо одну яму (случай $l < 1$), либо две ямы (случай $l > 1$). Логические ноль и единица могут быть представлены в виде состояний ячейки, которые будут соответствовать джозефсоновской фазе ϕ меньшей или большей, чем π . Для $l > 1$ эти состояния соответствуют минимумам профиля потенциальной энергии. Физически они соответствуют различным направлениям циркулирующего в кольце тока и при определенных условиях переход между ними может быть совершен адиабатически.

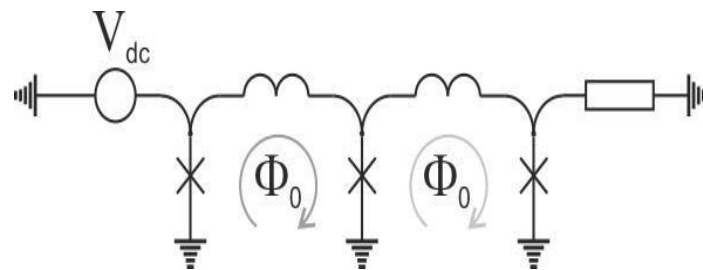
Передача логического состояния может быть осуществлена с помощью цепочки параметрических квантронов с разными l_q , связанных магнитным образом с заданием рабочей точки $\phi_{in} = \pi$, с максимумом I_{out} в той ячейке, которая обладает большим значением нормированной индуктивности l_q . При последовательном приложении магнитного потока Φ_{in} к каждой ячейке (и, тем самым, изменении тока в контуре I_{out}), нормированная индуктивность в каждом контуре будет также последовательно меняться, возрастая в одной ячейке и уменьшаясь в соседней. С помощью изменения формы управляющего тока (ток I_{out}) можно добиться адиабатической динамики подобного процесса.



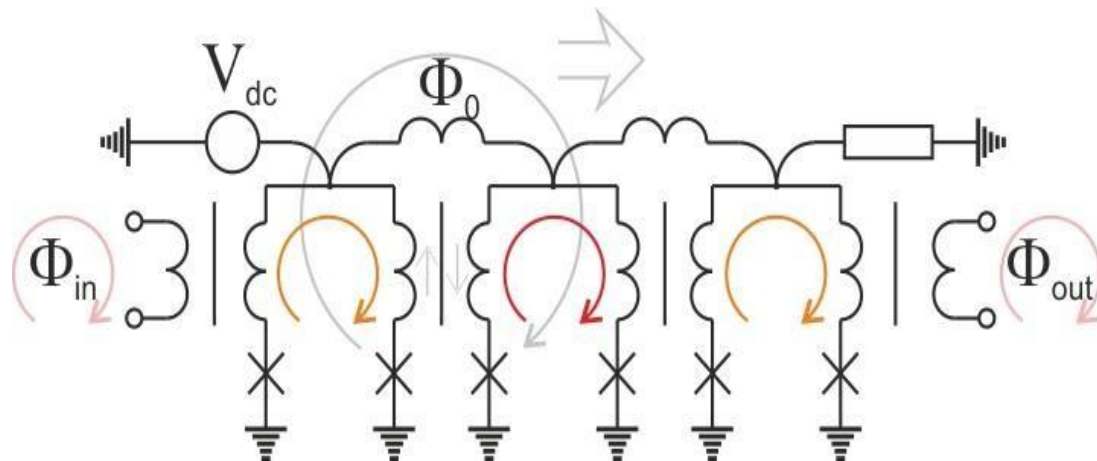
Передача логического состояния в цепочке квантронов, связанных магнитным образом.

Однако впервые разработанный в середине 1980-х годов процессор на физически и логически обратимых параметрических квантронах оказался непрактичным. Логическая обратимость может быть достигнута, только если промежуточные состояния будут временно сохраняться в буфере памяти, что представляет серьёзную трудность для физической реализации подобного устройства. Кроме этого, для усиления магнитной связи между ячейками необходимо сильно минимизировать расстояние между ними. Для реализации 8 битного 1024 точечного быстрого конвольвера (устройство для свертки двух входящих сигналов) потребуется более чем 10^7 параметрических квантронов и почти 90% из них – это шины данных для передачи информации внутри процессора.

Позже интерес к адиабатическим сверхпроводящим ячейкам вернулся ввиду попыток создания квантовых компьютеров и сверхпроводящих суперкомпьютеров. Компания D-Wave в контрольных и считывающих схемах их квантового компьютера, оптимизированных под квантовый адиабатический режим работы, использовала в качестве базовых элементов квантовые параметроны (Quantum Flux Parametron - QFP) с целью уменьшить их динамическое энергопотребление до фундаментального предела (предела Ландауэра) ($E_{min} = k_B T \ln 2$). При создании обратимых схем необходима организация топологии сверхпроводящих контуров таким образом, чтобы эволюция системы соответствовала адиабатическому процессу при внешнем контролируемом воздействии. Вариантом подобного контролирующего процесса является перемещение флаксона по цепочке параллельно соединенных джозефсоновских контактов (т.е. по JTL, см. рис.). Однако энергия уничтожения и рождения кванта потока сильно превышает предел Ландауэра.



Возможным выходом из этой ситуации является замена джозефсоновского контакта, на некоторую ячейку, например СКВИД, в которой бы информация представлялась не в виде наличия или отсутствия кванта, а в виде направления закручивания этого самого кванта.



Магнитный поток на входе шины подмагничивает первый СКВИД, далее переключение СКВИДов сопровождается возникновением в них магнитного потока одного знака (пропорционального разности фаз джозефсоновских контактов в СКВИДе). Этот магнитный поток передается из одной ячейки в другую посредством магнитной связи, организованной между ними. Флаксон Φ_0 играет роль тактирующего импульса и сам по себе никакой информации не несет. Информация же содержится в направлении магнитного потока, который закручивается в СКВИДе.

Для осуществления неадиабатических логических операций необходима энергия перехода между логическими состояниями, что соответствует $E_{\omega} \sim 10^3 - 10^4 k_B T$ (величина энергетического барьера между логическими состояниями). В общем случае, диссипация энергии связана с возникновением напряжения V : $E_{dis} = \int V I dt$, где I – ток через участок, на котором это напряжение возникло. В предлагаемой сверхпроводящей логике энергия переключения джозефсоновского перехода приблизительно равна $E_J \sim 10^{-19}$ Дж. Предполагая наличие логической необратимости, эта энергия может быть уменьшена до $E_{min} \sim 2 \times 10^{-23}$ Дж (при $T = 4.2$ K) при использовании адиабатических процессов переключения. При этом предел Ландауэра $E_{min} = 2k_B T \cdot \ln 2$ связан с изменением энтропии вычислительной системы при необратимых операциях. В то же время, для физически и логически обратимых процессов такого предела не существует и диссипация энергии на одну логическую операцию в адиабатических обратимых схемах может быть сведена к нулю.

Схемы криогенной памяти

Хорошо известно, что основное время вычислений и потребляемая мощность связаны с обменом данными между логикой и схемами памяти. Отсутствие подходящей криогенной оперативной памяти является основным препятствием для реализации высокопроизводительных компьютерных систем и сигнальных процессоров на основе сверхпроводящей электроники. Логические ячейки, обладающие функцией внутренней памяти, сейчас рассматриваются как возможная элементная база для разработки новых, более эффективных компьютеров. Эта концепция, основанная на обычных ячейках ERSFQ, обещает увеличение тактовой частоты выше 100 ГГц в сочетании с десятикратным увеличением функциональной плотности. В целом указанная квантовая локализация информации и высокая нелинейность джозефсоновских переходов делает сверхпроводниковые цепи идеально подходящими для реализации нетрадиционных вычислительных парадигм, таких, как клеточные автоматы, искусственные нейронные сети или квантовые вычисления.

Среди множества попыток создать криогенную память, совместимую с энергоэффективной сверхпроводящей электроникой, можно выделить четыре наиболее продуктивных конкурирующих направления: (А) память на основе SQUID, (В) гибридная КМОП-Джозефсон память, (С) JMRAM и (D) OST-MRAM.

Память на основе SQUID

Наличие или отсутствие SFQ в сверхпроводящей петле может быть физической основой для цифрового элемента памяти. Благодаря высокой характеристической частоте джозефсоновского перехода, ячейки памяти на основе СКВИДов обладают необходимым для процессора данных быстрым (несколько пикосекунд) временем записи / чтения.

Однако, ячейки памяти на основе SQUID имеют очень низкую плотность интеграции, что не позволяет создать на их основе оперативные запоминающие устройства (ОЗУ) с необходимой степенью интеграции.

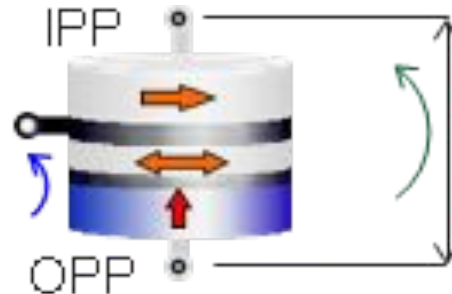
Гибридная память Джозефсона-КМОП

Для разработки низкотемпературной оперативной памяти разумной емкости было создано гибридное ОЗУ Джозефсона-КМОП, в котором схемы интерфейса Джозефсона были заменены микросхемой КМОП-памяти. Эта комбинация позволила разработать низкотемпературное (4 К) ОЗУ, 64 Кбайт, время чтения 400 пс и рассеиваемую мощность 21/12 мВт для операций записи/чтения, соответственно. При изготовлении по технологии CMOS 65 нм размер ячейки был примерно на три порядка меньше, чем у ее аналогов на основе SQUID.

Хотя подход с гибридной памятью показал лучшую емкость памяти, ее энергопотребление и временные требования по-прежнему остаются непомерно высокими. Для реализации практического низкотемпературного ОЗУ необходимо соответствовать следующим критериям: (i) масштабирование: размер элемента памяти <100 нм (шаг <200 нм); (ii) операция записи: энергия 10^{-18} Дж с задержкой по времени 50-100 пс на ячейку; (iii) операция чтения: энергия 10^{-19} Дж с временной задержкой 5 пс на ячейку. В настоящее время основная идея для выполнения этих требований - привести спинтронику (в том числе сверхпроводниковую спинтронику) в конструкцию RAM.

Резко уменьшить размер сверхпроводящей ячейки памяти можно, используя управляемый джозефсоновский переход с магнитными прослойками вместо SQUID. Топология такого магнитного джозефсоновского перехода (MJJ) обычно бывает двух типов: 1 - топология «сэндвич», которая хорошо подходит для КМОП-совместимой технологии изготовления, и 2 - топология с некоторой неоднородностью, слабой связи области перехода в плоскости слоев. Однако такой путь решения проблем не дает достаточного увеличения степени интеграции.

Перспективным типом криогенной памяти является гибридный подход, сочетающий сверхпроводящие схемы управления с устройствами памяти спинтроники, в которых из-за спиновых взаимодействий между атомами в кристаллической решетке и электронами ориентация намагниченности ферромагнетиков может определять величину протекающего тока. И наоборот, спин-поляризованный ток может влиять на ориентацию намагниченностей. Последний эффект - так называемый «крутящий момент передачи вращения» (STT) был предложен в качестве механизма управления магнитной памятью наряду с устройством ортогональной передачи спина (OST). Эта структура состоит из внеплоскостного ферромагнитного поляризатора (OPP), «слабого» F-слоя и «сильного» F-плоского поляризатора / анализатора (IPP).



«Запись» проходящего импульса тока через OPP обеспечивает STT-эффект в слабом F-слое, который снимает его намагниченность с плоскости.

Хотя JMRAM и OST-MRAM выглядят как наиболее продвинутые подходы, все еще требуется дальнейшее совершенствование в ряде критически важных областей. Прогресс в рассматриваемом разнообразии типов устройств без явного победителя невозможен без исследований новых магнитных материалов, таких как PdFe, NiFe (Nb, Cu, Mo), Co / Ru / Co, [Co / Ni] n и т. д., а также новых методов намагничивания. Они могут привести к разработке новых принципов работы, сочетающих сверхпроводимость и спинтронику.

Эффект обратной близости на границах S/F диктует использование довольно тонких (в нанометровом масштабе) магнитных слоев. Однако характеристики запоминающих устройств обычно экспоненциально зависят от толщины F-слоев и существенно зависят от шероховатости поверхности раздела. Эта задача может быть решена с помощью дальнейшего развития высокоточных тонкопленочных технологических процессов в современной производственной технологии.

Кроме того, значительная часть пространства, временной задержки и рассеиваемой энергии в матрице памяти связана с шинами дискретизации, а не с элементами памяти. Это делает оптимизацию внутриматричных соединений и архитектуры ячеек памяти очень важной.

Существует также множество других подходов к созданию наноразмерных управляемых сверхпроводящих устройств для приложений в памяти и логике, например, наноразмерная сверхпроводящая память, основанная на кинетической индуктивности, и сверхпроводящий квантовый интерференционный транзистор близости. Такие концепции могут внести новую идею в наноразмерный дизайн сверхпроводящих схем, но они находятся в стадии поисковых исследований и требуют еще много усилий и времени для получения нужного результата.

ИТОГИ

Мы обсудили различные логические схемы сверхпроводников, обеспечивающие быструю (550 ГГц) и энергоэффективную (10^{-19} - 10^{-20} Дж на бит) работу схем в неадиабатическом и адиабатическом режимах. Последний позволяет выполнение наиболее энергоэффективных физически и логически обратимых вычислений без ограничения минимального рассеяния энергии на одну логическую операцию. Перспективны возможности объединения схем, основанных на разной логике, а также использования разных (например, сверхпроводниковых и полупроводниковых) технологий в единой конструкции устройства.

Рассмотренные физические принципы, лежащие в основе работы сверхпроводящих схем, дают возможность разрабатывать устройства, основанные на нетрадиционных вычислительных парадигмах. Это могло бы стать основой для криогенного кроссплатформенного суперкомпьютера, где каждая задача может быть решена наиболее эффективно. Разработка нетрадиционных сверхпроводящих схем, таких как клеточные автоматы, искусственные нейронные сети, адиабатические, обратимые и квантовые вычисления, выполняющих неклассические вычисления, позволит реализовать все преимущества сверхпроводниковой технологии.

Основной проблемой рассматриваемой технологии является низкая плотность интеграции, а значит, и низкая функциональная сложность устройств. Эту проблему можно решить с помощью дальнейшей миниатюризации базовых элементов и модернизации библиотек ячеек, включая внедрение новых устройств,

таких как активно изучаемые управляемые магнитные джозефсоновские переходы.

Проблема низкой степени интеграции особенно остро стоит при проектировании RAM, где существует четыре различных подхода к разработке криогенного RAM без явного победителя. Прогресс в этой области теперь предполагает разработку новых принципов работы, основанных на синергии различных физических явлений, таких как сверхпроводимость и магнетизм, и появление новых эффектов, таких как, например, эффект памяти триплетного спинового клапана или сверхпроводящее управление магнитным полем. Предлагаемые концепции новых управляемых устройств могут в конечном итоге изменить облик сверхпроводниковой технологии, сделав ее универсальной платформой для будущих высокопроизводительных вычислений.