Сверхпроводниковая цифровая электроника

Физическая основа работы логических схем

Фундаментальные физические явления, лежащие в основе работы сверхпроводящих логических схем, - это эффект сверхпроводимости, квантование магнитного потока и эффект Джозефсона. Первое явление позволяет передавать баллистический сигнал, не ограниченный мощностью, необходимой для зарядки емкости межкомпонентных линий. Оно обеспечивает наибольшее преимущество в энергоэффективности по сравнению с традиционной технологией CMOS, т.к. сверхпроводящие микрополосковые линии способны передавать пикосекундные сигналы без искажений со скоростью, приближающейся к скорости света, на расстояниях, значительно превышающих типичный размер чипа, и с низкими перекрестными помехами. Это основа для быстрых дальнодействующих взаимодействий в сверхпроводящих цепях.

Отсутствие сопротивления ($R = 0$) приводит к отсутствию напряжения ($V = 0$) в сверхпроводящей цепи в стационарном состоянии. При этом протекание сверхпроводящего тока вызвано не разностью электрических потенциалов (т.е. напряжением $V = \delta U=0$), а разностью фаз сверхпроводящего параметра порядка $\delta\theta$. Магнитный поток Φ в сверхпроводящем контуре индуктивности L обеспечивает увеличение сверхпроводящей фазы вдоль петли и приводит к постоянному циркулирующему току $I = \Phi / L$. Это соотношение аналогично закону Ома $I = V / R$. Это позволяет писать линейные уравнения Кирхгофа для сверхпроводящих цепей. Магнитный поток Φ в сверхпроводящем контуре индуктивности L обеспечивает увеличение сверхпроводящей фазы вдоль петли и приводит к постоянному циркулирующему току $I = \Phi / L$. Это соотношение аналогично закону Ома $I = V / R$ и позволяет писать линейные уравнения Кирхгофа для сверхпроводящих цепей.

Квантование магнитного потока вносит принципиальную разницу в работу КМОП и сверхпроводящих схем. Это следует из однозначности волновой функции сверхпроводящих электронов. Действительно, увеличение сверхпроводящей фазы на петле соответствует магнитному потоку как $\Phi = (\Phi_0 / 2\pi) \nabla\theta dl$ (где $\Phi_0 = h / 2e \approx 2 \times 10^{-15}$ Вб - квант магнитного потока (single flux quantum (SFQ)), h - постоянная Планка, а e – заряд электрона). Выполнение этого соотношения возможно, если $\theta dl = 2\pi n$ (где n целое) и, следовательно, $\Phi = n\Phi_0$. Магнитный поток в сверхпроводящем замкнутом контуре соответственно, может принимать только значения, кратные кванту потока.

Физическое представление информации обычно основано на квантовании магнитного потока. Например, наличие или отсутствие SFQ в сверхпроводящем контуре можно рассматривать, как логическую единицу «1» или ноль «0». Чрезвычайно важно, что благодаря такому представлению информация физически локализована. Это принципиально отличается от представления информации в полупроводниковых схемах. Локализация приводит к глубокой аналогии между сверхпроводящими логическими ячейками и клеточными автоматами фон Неймана, где преобладают короткодействующие взаимодействия.

Нелинейным элементом в сверхпроводящих цепях является джозефсоновский переход. Это слабое звено между двумя сверхпроводниками, например, наиболее часто используемый сэндвич сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (SIS). Одним из наиболее важных параметров джозефсоновского перехода является критический ток I_c. Это максимальный сверхпроводящий ток, который может протекать через переход. Джозефсоновский переход можно переключить из сверхпроводящего в резистивное состояние, увеличивая ток выше I_c, что позволяет изменять магнитный поток в сверхпроводящем контуре и, следовательно, выполнять цифровую логическую операцию.

Динамика SIS-перехода обычно описывается в рамках модели резистивно-шунтированного перехода с емкостью (RSJC). Эта модель представляет джозефсоновский переход как параллельное соединение самого перехода (пропускает только сверхпроводящий ток I_s), резистора (нормальный ток $I_r = V / R$) и конденсатора (емкостный ток $I_{cap} = C (\partial V/\partial t)$, где t – время). Полный ток через переход равен сумме $I = I_s + I_r + I_{cap}$. Эта модель основана на эффектах Джозефсона постоянного и переменного тока, которые определяют сверхпроводящий ток I_s и напряжение V.

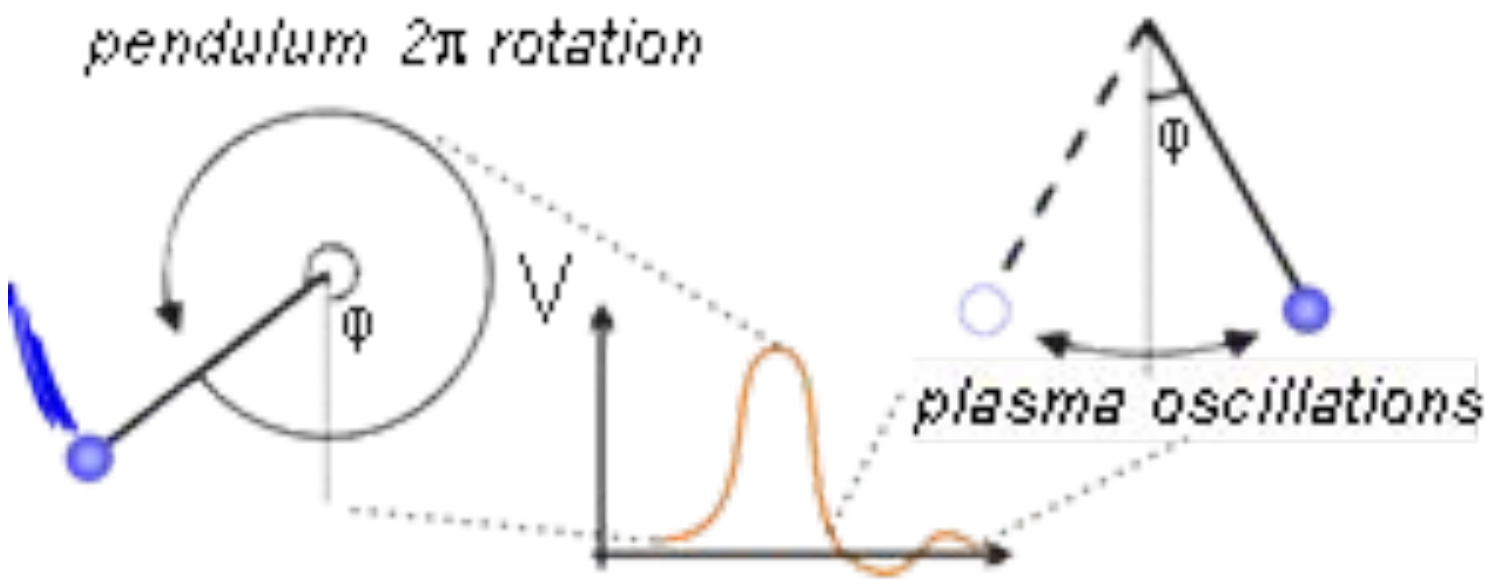
Эффект Джозефсона постоянного тока описывает сверхпроводящее фазовое соотношение (CPR) тока. Для SIS-перехода это - $I_s = I_c \sin \phi$, где $\phi = \theta$ - разность фаз сверхпроводящего параметра порядка через джозефсоновский переход, которая называется фазой Джозефсона. Представляя связь между сверхпроводящей фазой параметра порядка и магнитным потоком как $\phi = 2\pi\Phi / \Phi_0$, отметим, что CPR связывает ток с магнитным потоком в сверхпроводящей петле. Основное соотношение эффекта Джозефсона переменного тока (нестационарного эффекта Джозефсона) связывает напряжение на джозефсоновском переходе в резистивном состоянии со сверхпроводящей фазовой эволюцией как $V = (\Phi_0 / 2\pi) [\partial\phi / \partial t]$. Согласно этому соотношению рост джозефсоновской фазы на 2π сопровождается появлением на переходе импульса напряжения, для которого $\int V\, dt = \Phi_0$. Следовательно, однократное переключение джозефсоновского перехода в резистивное состояние соответствует прохождению SFQ-импульса через переход.

Энергия, рассеиваемая в процессе переключения, составляет $E_J \sim I_c\Phi_0 \sim 2\ 10^{-19}$ Дж, принимая типичное значение $I_c \sim 0{,}1$ мА. Такое типичное значение критического тока обусловлено рабочей температурой (жидкий гелий), T = 4,2 К. Для правильной работы схем оно должно быть примерно на три порядка выше, чем эффективное значение теплового шумового тока при этой температуре, $I_T = (2\pi/\Phi_0)\, k_B T \sim 0{,}18$ мкА, где k_B - постоянная Больцмана. Характерная частота процесса переключения джозефсоновского перехода определяется параметрами джозефсоновского перехода, $\omega_c = (2\pi/\Phi_0)\, I_c R_n$, где произведение $I_c R_n = V_c$- характеристическое напряжение джозефсоновского перехода, а R_n - сопротивление перехода в нормальном состоянии. Поскольку SIS-переходы обладают большой емкостью, они обычно шунтируются внешними резисторами, чтобы избежать LC-резонансов. При этом сопротивление R_n оказывается практически равным сопротивлению шунта. Для переходов на основе Nb характерная частота порядка $\omega_c /2\pi \sim 100$-350 ГГц (характеристическое напряжение V_c на уровне 0,2-0,7 мВ). Индустриально изготавливаемые сверхпроводящие цифровые схемы преимущественно основаны на туннельных переходах из-за высокой точности процесса их изготовления и высоких характеристических частот.

Выражая токи Is, Ir и Icap модели RSJC через фазу Джозефсона ϕ, можно представить полный ток, протекающий через переход, в следующей форме:

$$I/I_c = \sin\phi + \omega^{-1}\dot{\phi} + \beta\ \omega^{-2}\ddot{\phi},$$

Это уравнение полностью аналогично уравнению для механического маятника с моментом инерции β_c / ω^2 (емкость здесь аналогична массе), коэффициентом вязкости $1 / \omega_c$ (сопротивление определяет демпфирование) и приложенным крутящим моментом I / I_c. Эта простая аналогия позволяет рассматривать сверхпроводящую цифровую схему как сеть связанных маятников. Вращение маятника на 2π сопровождается последующими колебаниями вокруг точки устойчивого равновесия.



Импульс напряжения на джозефсоновском переходе, соответствующий прохождению SFQ через него и механическая аналогия этого процесса с вращением маятника.