

# 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  $\Phi$  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  $\Phi$  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  $V$ .

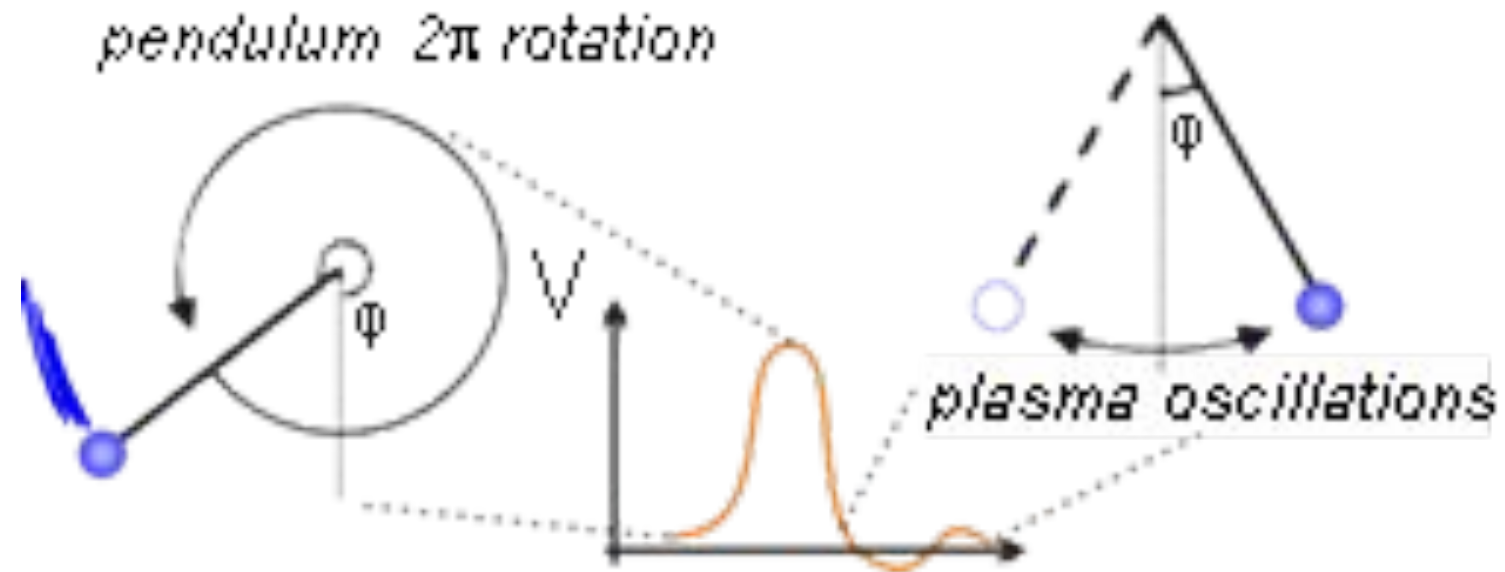
Эффект Джозефсона постоянного тока описывает сверхпроводящее фазовое соотношение (CPR) тока. Для SIS-перехода это  $I_s = I_c \sin \phi$ , где  $\phi = \theta$  - разность фаз сверхпроводящего параметра порядка через джозефсоновский переход, которая называется фазой Джозефсона. Представляя связь между 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  $2\pi$  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  $E_J \sim I_c \Phi_0 \sim 2 \cdot 10^{-19}$  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  $I_s$ ,  $I_r$  и  $I_{cap}$  модели RSJC через фазу Джозефсона  $\phi$ , 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  $\beta_c / \omega^2$  (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  $2\pi$  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.