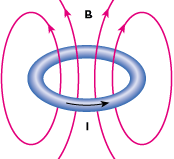
$\Phi_{0} = h/(2e) = 2,07*10^{-15}$Вб (h - постоянная Планка).

Рис. 1.Незатухающий ток и создаваемое им магнитное поле не могут иметь произвольную величину, они квантуются так, что магнитный поток, пронизывающий кольцо, принимает значения, кратные элементарному кванту потока $\Phi_{0} = h/(2e) = 2,07*10^{-15}$Вб (h - постоянная Планка).

Туннельный эффект - это типичная задача квантовой механики. Частица (например, электрон в металле) подлетает к барьеру (например, к слою диэлектрика), преодолеть который она по классическим представлениям никак не может, так как ее кинетическая энергия недостаточна, хотя в области за барьером она со своей кинетической энергией вполне могла бы существовать. Напротив, согласно квантовой механике, прохождение барьера возможно. Частица с некоторой вероятностью может как бы пройти по туннелю через классически запрещенную область, где ее потенциальная энергия как бы больше полной, то есть классическая кинетическая энергия как бы отрицательна. На самом деле с точки зрения квантовой механики для микрочастицы (электрона) справедливо соотношение неопределенностей $\Delta x\Delta p > h$(x - координата частицы, p - ее импульс). Когда малая неопределенность ее координаты в диэлектрике $\Delta x = d $(d-толщина слоя диэлектрика) приводит к большой неопределенности ее импульса $\Delta p \geq h/\Delta x$, а следовательно, и кинетической энергии p2/(2m) (m - масса частицы), то закон сохранения энергии не нарушается. Опыт показывает, что действительно между двумя металлическими обкладками, разделенными тонким слоем диэлектрика (туннельный переход), может протекать электрический ток тем больший, чем тоньше диэлектрический слой.

Джозефсон рассматривал частный случай туннельного эффекта - туннелирование куперовских пар - и предсказал существование двух эффектов. Первый из них состоит в том, что через туннельный переход с тонким слоем диэлектрика, когда его толщина меньше или порядка длины когерентности, возможно протекание сверхпроводящего тока, то есть тока без сопротивления. Это стационарный эффект Джозефсона. Предсказывалось, что критическое значение этого тока будет своеобразно зависеть от внешнего магнитного поля. Если ток через такой переход станет больше критического, то переход будет источником высокочастотного электромагнитного излучения. Это нестационарный эффект Джозефсона.

Понадобилось немного времени, чтобы обнаружить эти эффекты экспериментально. Более того, вскоре стало ясно, что эффекты Джозефсона присущи не только туннельным переходам, но и более широкому классу объектов - сверхпроводящим слабым связям, то есть участкам сверхпроводящей цепи, в которых критический ток существенно подавлен, а размер участка порядка длины когерентности.

В основе эффектов Джозефсона лежат квантовые свойства сверхпроводящего состояния. Действительно, сверхпроводящее состояние характеризуется когерентностью куперовских пар: эти пары электронов находятся на одном квантовом уровне и описываются общей для всех пар волновой функцией, ее амплитудой и фазой. Они когерентны как частицы света - фотоны в излучении лазера, которое также характеризуется амплитудой и фазой электромагнитной волны.

Представим теперь себе два массивных куска одного и того же сверхпроводника, полностью изолированных друг от друга. Так как оба они находятся в сверхпроводящем состоянии, каждый из них будет характеризоваться своей волновой функцией. Поскольку материалы и температуры одинаковы, модули обеих волновых функций должны совпадать, а фазы произвольны. Однако, если установить между ними хотя бы слабый контакт, например туннельный, куперовские пары будут проникать из одного куска в другой и установится фазовая когерентность. Возникнет единая волновая функция всего сверхпроводника, которую можно рассматривать как результат интерференции волновых функций двух половинок.

4. Квантовая интерференция

Уже в первом эксперименте было обнаружено, что максимальный сверхпроводящий ток Ic в магнитном поле, параллельном плоскости контакта, немонотонно зависит (с периодом, равным кванту потока $\Phi_{0}$) от величины магнитного потока $\Phi$, проникающего в контакт. Эта зависимость показана на [рис. 2](http://phys.web.ru/db/msg/1184538/page2.html#picture2). Как видно из рисунка, в случае, когда поток равен целому числу квантов $\Phi_{0}$, происходит компенсация токов, текущих в противоположные стороны в разных точках контакта, и результирующий критический ток оказывается равным нулю. Этот график аналогичен зависимости интенсивности света на экране при [дифракции](http://phys.web.ru/db/search.html?not_mid=1184538&words=%E4%E8%F4%F0%E0%EA%F6%E8%E8) на одиночной щели от расстояния до центральной точки и наглядно демонстрирует волновые свойства сверхпроводящих токов.

|  |
| --- |
| Зависимость критического тока Im |
| Рис. 2.Зависимость критического тока Im (нормированного на критический ток при отсутствии поля Ic) джозефсоновского контакта от величины потока внешнего магнитного поля |

Чтобы рассмотрение этого явления стало более простым, включим туннельный контакт в сверхпроводящий контур (кольцо). Магнитный поток $\Phi$через площадь сверхпроводящего кольца (не содержащего контакта) строго постоянен. Его значение, как уже говорилось, квантуется. Оно равно целому числу квантов $\Phi_{0}$, и изменить его, не переводя кольцо в нормальное состояние, невозможно. Но если кольцо содержит слабую связь, то магнитный поток может меняться - кванты потока проникают в контур через это слабое место.

Посмотрим, как при изменении внешнего магнитного поля меняется величина потока $\Phi$ и тока I в кольце со слабой связью. Пусть сначала внешнее поле и ток в контуре равны нулю ([рис. 3](http://phys.web.ru/db/msg/1184538/page2.html#picture3), а). Поток $\Phi$ при этом тоже равен нулю. Увеличим внешнее поле - по [закону индукции Фарадея](http://phys.web.ru/db/search.html?not_mid=1184538&words=%E7%E0%EA%EE%ED%F3%20%E8%ED%E4%F3%EA%F6%E8%E8%20%D4%E0%F0%E0%E4%E5%FF) в контуре появится сверхпроводящий ток, своим магнитным полем по [закону Ленца](http://phys.web.ru/db/search.html?not_mid=1184538&words=%E7%E0%EA%EE%ED%F3%20%CB%E5%ED%F6%E0) компенсирующий внешний поток. Так будет происходить, пока ток в контуре не станет равным критическому току контакта Ic ([рис. 3](http://phys.web.ru/db/msg/1184538/page2.html#picture3), б ). Для простоты рассмотрения выберем площадь кольца такой, чтобы при I = Ic внешнее поле создавало поток $\Phi$, равный половине кванта потока: $\Phi = \Phi_{0}/2$.

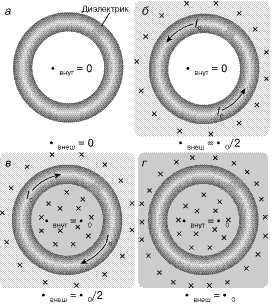
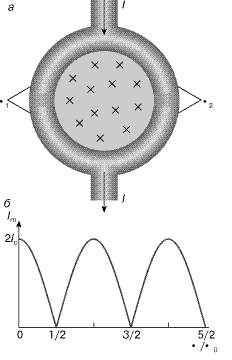


Рис. 3.Сверхпроводящий контур с джозефсоновским элементом во внешнем магнитном поле



. 4.Двухконтактный интерферометр. Схема (а) и зависимость критического тока от величины магнитного потока (б)

Как только ток станет больше Ic , сверхпроводимость в контакте нарушится и в контур войдет квант потока $\Phi_{0}$([рис. 3](http://phys.web.ru/db/msg/1184538/page2.html#picture3), в). При этом отношение $\Phi/\Phi_{0}$скачком увеличится на единицу, а направление тока изменится на противоположное, хотя его величина останется прежней Ic . Действительно, если до вхождения кванта потока $\Phi_{0}$ток Ic полностью экранировал внешний поток $\Phi = \Phi_{0}/2$, то после вхождения он должен усиливать внешний поток $\Phi_{0}/2$до значения $\Phi_{0}$. Таким образом, контур перешел в новое квантовое состояние.

При дальнейшем увеличении внешнего поля ток в кольце будет уменьшаться, а поток будет оставаться равным $\Phi_{0}$. Ток обратится в нуль, когда внешний поток станет равным $\Phi_{0}$([рис. 3](http://phys.web.ru/db/msg/1184538/page2.html#picture3), г), а затем ток потечет в обратном направлении, частично экранируя внешний поток. При внешнем потоке $3\Phi_{0}/2$ток опять станет равным Ic , сверхпроводимость нарушится, войдет следующий квант потока и т.д. Ступенчатый характер рассмотренных зависимостей позволяет почувствовать отдельные кванты потока, а ведь эта величина очень мала, всего лишь порядка $\sim 2*10^{-15}$Вб.

Особенно ярко когерентные свойства сверхпроводящего состояния проявляются при включении в контур двух джозефсоновских контактов ([рис. 4](http://phys.web.ru/db/msg/1184538/page2.html#picture4), а). Полный ток I при этом определяется интерференцией токов, протекающих через контакты:

$I_{m}љ=љI_{c} \sin \varphi_{1}љ+I_{c} \sin \varphi_{2}$ (2)

где $\varphi_{1}$ и $\varphi_{2}$- скачки фаз волновых функций на переходах, а критические токи обоих контактов для простоты взяты одинаковыми и равными Ic.

В результате критический ток Im периодически зависит от внешнего магнитного поля и обращается в нуль, когда поток равен полуцелому числу квантов ([рис. 4](http://phys.web.ru/db/msg/1184538/page2.html#picture4), б ). Эта зависимость в точности соответствует оптическому аналогу - зависимости интенсивности света на экране от расстояния при дифракции на двух щелях.

Применение

Экспериментальные образцы приборов с контактом Джозефсона могут обнаруживать напряжения порядка 10–15 В. Магнитометры, способные обнаруживать магнитные поля порядка 10–13 Тл, используются при изучении магнитных материалов, а также в медицинских магнитокардиографах. Чрезвычайно чувствительные детекторы вариаций силы тяжести могут применяться в различных областях геофизики.

Техника сверхпроводимости и особенно контакты Джозефсона оказывают все большее влияние на метрологию. С помощью джозефсоновских контактов создан стандарт 1 В (об этом ниже). Был разработан также первичный термометр для криогенной области, в которой резкие переходы в некоторых веществах используются для получения реперных (постоянных) точек температуры. Новая техника используется в компараторах тока, для измерений радиочастотной мощности и коэффициента поглощения, а также для измерений частоты. Она применяется также в фундаментальных исследованиях, таких, как измерение дробных зарядов атомных частиц и проверка теории относительности.

Сверхпроводниковый суперкомпьютер

Идея использования джозефсоновских переходов в качестве элементной базы компьютеров появилась уже довольно давно. И если задача получения малых размеров переходов (плотность упаковки) и малого тепловыделения (в сверхпроводящем состоянии тепло вообще не рассеивается) довольно легко решается, то сверхвысокого быстродействия достичь долго не удавалось.

Принципиально новое решение этой проблемы было впервые предложено в группе профессора К.К. Лихарева в МГУ. Для обработки и запоминания информации здесь используется квант магнитного потока, то есть нуль и единица - отсутствие или наличие в джозефсоновской ячейке одного кванта потока. Логические элементы с джозефсоновскими переходами, в которых проводится квантование магнитного потока, называются квантронами. Расчеты и эксперименты показывают, что квантроны обладают очень высоким быстродействием, достигающим значений 1012 операций в секунду. Однако они не подчиняются традиционным правилам схемотехники и их следует применять в схемах нового типа. Здесь информация передается от одного элемента к другому с помощью кванта магнитного потока, поэтому обязательным условием является близкое расположение элементов. Характерные расстояния, разделяющие при этом элементы, достигают величин порядка десятых долей микрона. Такие схемы выгодно применять, например, при создании регистров сдвига - устройств с передачей информации вдоль периодической структуры элементов логики, причем информация смещается на единичный период при введении или изъятии единичного кванта потока.

Установка на основе эффекта Джозефсона для воспроизведения единицы напряжения постоянного тока

Во ВНИИФТРИ создана установка на основе матрицы джозефсоновских переходов для воспроизведения единицы напряжения постоянного тока.

Установка предназначена для калибровки и поверки многоразрядных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) в интегральном исполнении, может также использоваться для калибровки и поверки высокоточных мер напряжения и цифровых вольтметров.

Основным элементом установки является матрица джозефсоновских переходов, изготовленная в РТВ (Германия). Использование эффекта Джозефсона обеспечивает высокую точность воспроизведения напряжения.

Установка состоит из криозонда с джозефсоновской матрицей, СВЧ генератора (длина волны ~ 4 мм) с системой фазовой автоподстройки частоты, рубидиевого стандарта частоты, характериографа, транспортируемого гелиевого дюара.