

ным и осциллирует с частотой  $\omega$ , связанной с напряжением  $V$  соотношением Джозефсона  $\omega = 2eV/\hbar$  (нестационарный эффект Джозефсона). Такой перем. ток приводит либо к генерации излучения из контакта, либо к появлению ступенек на ВАХ при облучении джозефсоновского контакта СВЧ-излучением.

Необычно происходит изменение критич. тока туннельного контакта  $I_c$  при приложении магн. поля  $H$ . Если ширина контакта  $L$  мала [ $L$  по сравнению с джозефсоновской глубиной проникновения  $\lambda_J = c\Phi_0/8\pi^2 j_c d$ ], где  $j_c$  — плотность критич. тока;  $d$  — толщина области, в к-рую проникает магн. поле;  $\Phi_0$  — квант магнитного потока], то поле  $H$  проникает в область контакта однородно, а зависимость критич. тока от приложенного магн. поля описывается ф-цией, характерной для фраунгоферовой дифракц. картины:

$$I_c(H) = I_c(0) \left| \frac{\sin(\pi\Phi/\Phi_0)}{\pi\Phi/\Phi_0} \right|,$$

где  $\Phi = HLd$ . Если напряжение отлично от нуля, то в присутствии магн. поля в контакте могут распро-

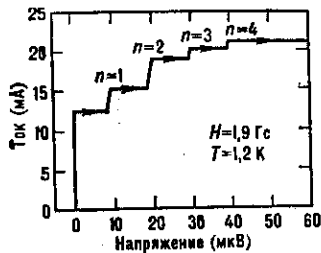


Рис. 3. Типичная картина ступенчатой Фиске контакта Sn — SnO<sub>x</sub> — Sn при наличии магнитного поля.

страняться волны плотности тока, скорость к-рых  $v = cV/Hd$ . Эти волны наблюдаются по ступеням на ВАХ [ступени Фиске (M. Fiske, 1964)] (рис. 3). Если ширина контакта  $L > \lambda_J$ , то магн. поле проникает в туннельный контакт неоднородно в виде джозефсоновских вихрей (нитей магн. потока, магн. поле в к-рых экспоненциально спадает на длине  $\lambda_J$ ). Джозефсоновские вихри могут перемещаться вдоль контакта под действием тока. На С. с. (из-за малости критич. параметров) сильно влияют флуктуации, к-рые приводят к двум эффектам. Случайные изменения вдоль плоскости контакта джозефсоновской фазы или плотности критич. тока, связанные с локальными неоднородностями туннельного контакта (структурные флуктуации), приводят к искажению фраунгоферовой зависимости критич. тока от магн. поля. С др. стороны, на контакте может возникнуть разность потенциалов при токе, меньшем критического, связанная со случайным изменением джозефсоновской фазы во времени. Вероятность таких скачков фазы возрастает с увеличением темп-ры, но при низких темп-рах возможно макроскопич. квантовое туннелирование (существует ненулевая вероятность изменения джозефсоновской фазы со временем при  $T \rightarrow 0$ ).

Рассмотренные эффекты могут проявляться во всех слабосвязанных системах. Кроме того, в нек-рых структурах возникают и др. явления. Так, для контактов с прослойкой из нормального металла возможна несинусоидальная зависимость джозефсоновского тока  $I$  от ф.

В структурах с непосредств. сверхпроводимостью (рис. 1, б — г), в отличие от обычного туннельного контакта, малость джозефсоновского тока определяется не слабой проницаемостью диэлектрич. барьера (для куперовских пар), а возрастанием плотности тока в области слабой связи (рис. 1, б — г) либо нарушением корреляции электронов в нормальном металле (рис. 1, д, е). В таких структурах наблюдается неравновесная С. с., обусловленная изменением ф-ции распределения электронов по энергиям. Это приводит к возрастанию критич. тока слабосвязанных систем в СВЧ-поле и к избыточному току при больших напряжениях (ВАХ системы отличается от закона Ома,  $I = I_{ex} + V/R$ , где  $I_{ex}$  — избыточный ток,  $R$  — сопротивление контакта в нормальном состоянии). В контактах с полупроводниковой прослойкой возможно изменение критич. параметров, связанных с изменением туннельной прозрачности

барьера. На прозрачность барьера сильно влияет концентрация свободных носителей заряда в полупроводнике, к-рую можно изменять как введением примесей, так и с помощью освещения образца. Кроме того, критич. ток  $I_c$  может возрастать из-за прохождения куперовских пар по «флуктуац. каналам» — областям с локально пониженным потенци. барьером, а также из-за резонансного туннелирования (резкое возрастание прозрачности барьера при прохождении куперовских пар по цепочкам периодически расположенных локализов. центров).

Разнообразие эффектов позволяет использовать С. с. как для физ. исследований (определение сверхпроводящей щели по ВАХ одночастичного тока, исследование неоднородностей и т.д.), так и для практич. применений (сверхпроводящие приёмники излучения, сквиды и т.д.).

Лит.: Асламазов Л. Г., Губанков В. Н., Слабая сверхпроводимость, М., 1982; Варона А., Патерно Д., Эффект Джозефсона: физика и применения, пер. с англ., М., 1984; Ляхарев К. К., Введение в динамику джозефсоновских переходов, М., 1985. М. В. Фистуль.

**СЛАБАЯ ФОКУСИРОВКА** — фокусировка частиц в ускорителе, при к-рой за один оборот частица совершает меньше одного бетатронного (поперечного) колебания. К С. ф. относится, напр., фокусировка частиц магн. полем с пост. градиентом.

**СЛАБОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ** — одно из четырёх известных фундам. взаимодействий между элементарными частицами. С. в. значительно слабее сильного и эл.-магн. взаимодействий, но гораздо сильнее гравитационного. В 80-х гг. установлено, что слабое и эл.-магн. взаимодействия — разл. проявления единого электро-слабого взаимодействия.

Об интенсивности взаимодействий можно судить по скорости процессов, к-рые оно вызывает. Обычно сравнивают между собой скорости процессов при энергиях  $\sim 1$  ГэВ, характерных для физики элементарных частиц. При таких энергиях процесс, обусловленный сильным взаимодействием, происходит за время  $\sim 10^{-24}$  с, эл.-магн. процесс за время  $\sim 10^{-21}$  с, характерное же время процессов, происходящих за счёт С. в. (слабых процессов), гораздо больше:  $\sim 10^{-10}$  с, так что в мире элементарных частиц слабые процессы протекают чрезвычайно медленно.

Другая характеристика взаимодействия — длина свободного пробега частицы в веществе. Сильно взаимодействующие частицы (адроны) можно задержать железной плитой толщиной в неск. десятков см, тогда как нейтрино, обладающее лишь С. в., прошло бы, не испытав ни одного столкновения, через железную плиту толщиной порядка миллиарда км. Ещё более слабым является гравитац. взаимодействие, сила к-рого при энергии  $\sim 1$  ГэВ в  $10^{33}$  раз меньше, чем у С. в. Однако обычно роль гравитац. взаимодействия гораздо заметнее роли С. в. Это связано с тем, что гравитац. взаимодействие, как и электромагнитное, имеет бесконечно большой радиус действия; поэтому, напр., на тела, находящиеся на поверхности Земли, действует гравитац. притяжение всех атомов, из к-рых состоит Земля. Слабое же взаимодействие обладает очень малым радиусом действия: ок.  $2 \cdot 10^{-16}$  см (что на три порядка меньше радиуса сильного взаимодействия). Вследствие этого, напр., С. в. между ядрами двух соседних атомов, находящихся на расстоянии  $10^{-8}$  см, ничтожно мало, несравненно слабее не только электромагнитного, но и гравитац. взаимодействий между ними.

Однако, несмотря на малую величину и короткодействие, С. в. играет очень важную роль в природе. Так, если бы удалось «выключить» С. в., то погасло бы Солнце, поскольку был бы невозможен процесс превращения протона в нейтрон, позитрон и нейтрино, в результате к-рого четыре протона превращаются в  ${}^4\text{He}$ , два позитрона и два нейтрино. Этот процесс служит осн. источником энергии Солнца и большинства звёзд (см. Водородный цикл). Процессы С. в. с испусканием нейтрино вообще исключительно важны в эво-