

Нестационарный эффект Джозефсона: обнаружение электромагнитного излучения

(Обзор)

И.К. Янсон

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина
E-mail: yanson@ilt.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 22 января 2004 г.

Дан исторический обзор открытия и начального периода исследований эффектов Джозефсона. Подробно описаны эксперименты по изучению туннельного эффекта в сверхпроводниках, проводившиеся в 60-е годы в Физико-техническом институте низких температур, г. Харьков, и приведшие к обнаружению джозефсоновского электромагнитного излучения. Экспериментальные данные проиллюстрированы оригинальными кривыми с указанием даты их получения. Рассмотрен физический механизм генерации высокочастотного излучения в сверхпроводящих туннельных переходах и кратко перечислены некоторые наиболее перспективные применения нестационарного эффекта Джозефсона.

Надано історичний огляд відкриття та початкового періоду досліджень ефектів Джозефсона. Докладно описано експерименти по вивченню тунельного ефекту у надпровідниках, які проводилися у 60-ті роки у Фізико-технічному інституті низьких температур, м. Харків, та привели до виявлення джозефсонівського електромагнітного випромінювання. Експериментальні дані проілюстровано оригінальними кривими з указанням дати їх отримання. Розглянуто фізичний механізм генерації високочастотного випромінювання у надпровідних тунельних переходах та коротко перелічено деякі найбільш перспективні застосування нестационарного ефекту Джозефсона.

PACS: 74.50.+r

Содержание

1. Введение	689
2. Начало туннельных исследований сверхпроводников в ФТИНТ НАНУ	691
3. Обнаружение джозефсоновского электромагнитного излучения	693
4. Механизм генерации электромагнитного излучения на резонансных частотах туннельного перехода	695
5. Некоторые перспективы дальнейшего развития исследований и приложений нестационарного эффекта Джозефсона	696
Список литературы	697

1. Введение

В первой половине 1962 года молодой английский аспирант-теоретик Брайан Джозефсон, выполняя расчеты туннельного тока между двумя сверхпроводниками, обнаружил дополнительные слагаемые. По Джозефсону выходило, что через потенциальный барьер могут просачиваться не только «нормальные»

электроны, т.е. те носителя тока, движение которых в металле встречает сопротивление и приводит к выделению тепла. Оказалось, что и «сверхпроводящие» электроны, которые, взаимодействуя с кристаллической решеткой, притягиваются друг к другу, образуя так называемые куперовские пары с зарядом $2e$ (e — элементарный электрический заряд), также имеют сравнимую по величине вероятность просачи-

вания через потенциальный барьер. Сверхпроводящие электроны при движении в металле со скоростью, не превышающей критическую, не встречают сопротивления. Просачивание нормальных электронов через диэлектрическую прослойку толщиной в несколько нанометров находит естественное объяснение в рамках квантовомеханического туннельного эффекта. Туннелирование куперовских пар можно образно назвать «дважды» квантовым эффектом, так как оно обязано своим происхождением волновой природе всего ансамбля сверхпроводящих электронов как целого, описываемого единой квантовомеханической волновой функцией $\Psi(\mathbf{r})$. Действительно, с точки зрения квантовой механики, без учета явления сверхпроводимости одновременное туннелирование двух электронов пропорционально квадрату коэффициента прозрачности потенциального барьера, что составляет обычно пренебрежимо малую величину. Необычно, что на самом деле прозрачность барьера для куперовской пары имеет тот же порядок величины, что и для одного нормального электрона.

В кратком сообщении, опубликованном в одном из первых номеров только что созданного журнала «Physics Letters» [1] (8.06.–1.07.1962 г.)*, Джозефсон очень четко изложил следствия, вытекающие из его теоретических расчетов. Кроме *постоянного* сверхпроводящего тока, протекающего при *нулевом* напряжении на барьере, должен был существовать *переменный* сверхпроводящий ток, текущий при *постоянном* напряжении на барьере. При разности потенциалов в 1 мкВ частота осцилляций переменного тока составляет 483,6 МГц. На самом деле, для того чтобы быть наблюдаемым, переменный ток Джозефсона должен приводить к появлению небольшой переменной компоненты разности потенциалов на барьере, которая ответственна за тот или иной механизм диссипации энергии колебаний. Джозефсон указал также, в каких экспериментах наиболее ярко должны проявляться необычные свойства туннельного тока куперовских пар. Для постоянного тока это осциллирующая зависимость критического (т.е. максимально возможного) сверхпроводящего тока от слабых постоянных магнитных полей, пронизывающих площадь сечения туннельного перехода. Эта зависимость является следствием чувствительности фазы $\chi(r)$ волновой функции сверхпроводящих электронов $\Psi(r) = |\Psi(r)|e^{i\chi(r)}$ к магнитному полю, а точнее, к полю вектор-потенциала $\mathbf{A}(r)$. Другим

экспериментом, указывающим на существование переменного сверхпроводящего тока, могло служить весьма необычное детектирование внешнего электромагнитного излучения СВЧ джозефсоновской туннельной структурой. Поскольку частота переменного тока пропорциональна напряжению на туннельном переходе, то небольшая СВЧ добавка, индуцируемая внешним полем, приводит к частотной модуляции переменного тока, в спектре которого появляются постоянные составляющие каждый раз, когда постоянное напряжение на контакте удовлетворяет соотношению

$$2eV = n\hbar\omega \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (1)$$

Следовательно, на вольт-амперной характеристике (ВАХ) появляются вертикальные участки (ступени), где ток изменяется при почти постоянном напряжении.

Соотношение (1) легко интерпретировать с физической точки зрения. Действительно, куперовские пары обладают суммарным спином, равным нулю, и потому подчиняются статистике Бозе–Эйнштейна. При температурах много ниже температуры перехода металла в сверхпроводящее состояние в результате бозе-конденсации почти все они занимают один и тот же энергетический уровень, отвечающий химическому потенциалу электронов проводимости. Если между двумя сверхпроводниками, находящимися в туннельном контакте, приложено постоянное напряжение, то их химпотенциалы отличаются на eV . Следовательно, элементарным актом туннельного перехода куперовской пары, имеющей заряд $2e$, в этом случае будет процесс, сопровождающийся излучением или поглощением одного или нескольких квантов энергии $\hbar\omega$. Легко видеть, что соотношение (1) выражает закон сохранения энергии в таких элементарных процессах.

События, относящиеся к экспериментальному открытию предсказанных эффектов, развивались стремительно. Спустя полгода после появления первой работы Джозефсона [1] под осторожным названием «Новые возможные эффекты при туннелировании между сверхпроводниками» Ф. Андерсон и Дж. Роуэлл опубликовали экспериментальную работу [4] (11.01.–15.03.1963 г.), под не менее осторожным названием «Вероятное наблюдение сверхпроводящего туннельного эффекта Джозефсона», в которой привели некоторые факты, не укладывающиеся в существовавшую до Джозефсона теорию

* В дальнейшем таким образом будем указывать даты направления в печать и опубликования для пионерских работ. Как вспоминает Ф. Андерсон [2], при выборе журнала для публикации было решено не посылать первую заявочную статью в «старый» американский журнал «Physical Review Letters» из-за важности и необычности полученных результатов и боязни не быть понятым рецензентами. Как показал дальнейший ход событий [3], даже дважды нобелевский лауреат Джон Бардин не сразу согласился с выводами Джозефсона.

токов через туннельный контакт и находящие естественное объяснение в рамках созданной им теории постоянного сверхпроводящего тока. Полное торжество развитых Джозефсоном идей наступило в середине 1963 года, когда Роуэлл сообщил о наблюдении осциллирующей зависимости критического тока [5] (24.07.–1.09.1963 г.), непосредственно доказывающей существование постоянного сверхпроводящего тока. С. Шапиро в экспериментах с детектированием внешнего электромагнитного излучения наблюдал предсказанные Джозефсоном ступеньки тока [6] (13.06.–15.07.1963 г.), которые можно было рассматривать как убедительное косвенное доказательство существования переменного тока. Эти успехи были подытожены 26–29 августа 1963 года на Международной конференции по сверхпроводимости в Колгейтском университете (США). Там, кроме уже упомянутых достижений, был заслушан и доклад М. Фиске [7], содержащий экспериментальное подтверждение предсказанной температурной зависимости критического тока Джозефсона и сообщение о наблюдении вертикальных ступенек тока при конечных напряжениях в отсутствие внешнего излучения СВЧ. В опубликованном в этом же номере журнала выступлении во время дискуссии известного английского ученого Б. Пиппарда содержалась догадка (блестяще оправдавшаяся впоследствии) о механизме возникновения этих ступеней как следствия возбуждения электромагнитных колебаний миниатюрного полоскового резонатора с открытыми стенками, образуемого туннельным переходом. Б. Пиппарда вместе с Ф. Андерсоном можно считать «крестными отцами» эффекта Джозефсона, так как именно с ними Б. Джозефсон обсуждал свои идеи и получил от них полное взаимопонимание и поддержку. Ф. Андерсон, кроме того, внес большой вклад в разработку и разъяснение физической сущности предсказанных Джозефсоном эффектов. В частности, он совместно с А. Дайемом впервые показал [8] (18.06.–10.08.1964 г.), что эффекты Джозефсона наблюдаются и в сверхпроводящих микромостиках, расширив тем самым класс объектов «слабой сверхпроводимости», т.е. структур, для которых проявляются эти эффекты. Сам Джозефсон еще в первой работе отмечал, что предсказываемые им эффекты могут иметь место не только в туннельных структурах металл–диэлектрик–металл, но и в так называемых структурах S–N–S, т.е. двух сверхпроводниках, разделенных тонким слоем нормального металла.

2. Начало туннельных исследований сверхпроводников в ФТИНТ НАНУ

Первые туннельные измерения энергетической щели в спектре квазичастичных возбуждений сверхпроводников были выполнены в 1960 году И. Гьевером в США [9]*. В этом же году в Харькове был создан Физико-технический институт низких температур АН УССР (ФТИНТ АН УССР). Туннелирование в сверхпроводниках было включено в план научно-исследовательских работ института. Однако ввиду необходимости создания всей экспериментальной базы «с нуля», воспроизвести гьеверовские результаты удалось лишь в начале 1963 года. Это были измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) тонкопленочных туннельных структур алюминий–окись алюминия–свинец, олово или индий. Одна из первых характеристик, на которой ярко проявилась энергетическая щель свинца ($\Delta = 1,34$ мэВ), показана на рис. 1.

К середине 1964 года удалось разработать технологию приготовления туннельных структур сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник достаточно высокого качества [10], позволившую начать изучение эффектов Джозефсона. Уже в первой работе [11] (30.07.–12.1964 г.) было показано, что приготовленные нами туннельные структуры олово–окисел–олово имели тонкий и однородный потенциальный барьер. Характерная осциллирующая зависимость максимального тока Джозефсона была получена в новой постановке эксперимента, когда

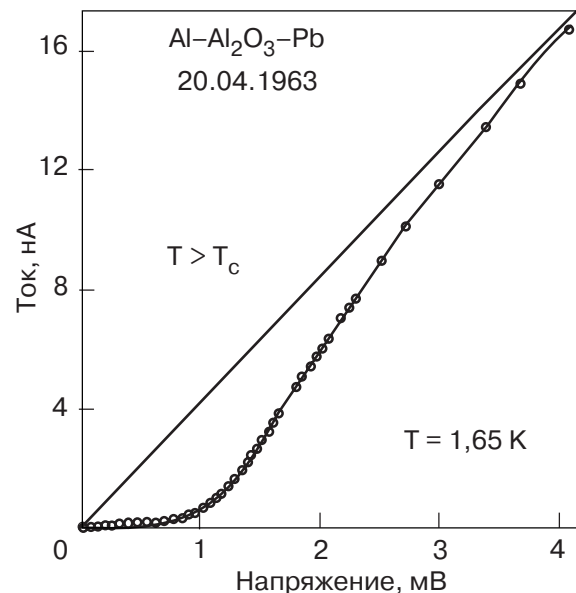


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика перехода Al–Al₂O₃–Pb.

* В 1975 году Гьевер вместе с Джозефсоном и Л. Езаки, открывшим еще раньше туннелирование электронов в сильно легированных полупроводниках, были удостоены Нобелевской премии.

«внешнее» магнитное поле создавалось дополнительным током, протекающим по одной из пленок. Для туннельных переходов с шириной сверхпроводящих пленок меньшей, чем так называемая джозефсоновская глубина проникновения магнитного поля в туннельный переход (составляющей обычно несколько десятых долей мм), зависимость критического тока от поля H_0 , приложенного параллельно пленке шириной L , хорошо следует зависимости

$$I_c(H_0) = I_0 \left| \frac{\sin(\pi\Phi/\Phi_0)}{(\pi\Phi/\Phi_0)} \right|, \quad (2)$$

где I_0 — максимальный постоянный ток Джозефсона; $\Phi_0 = h/2e$ — квант магнитного потока в сверхпроводниках, равный $2 \cdot 10^{-15}$ Вб; $\Phi = (d + 2\lambda_L) \times \times LH_0$ — магнитный поток, пронизывающий туннельный переход; d — толщина диэлектрической прослойки (окисла, разделяющего сверхпроводящие пленки), λ_L — так называемая лондоновская глубина проникновения постоянного и не слишком высокочастотного переменного магнитного поля в сверхпроводник. На рис. 2 показана зависимость критического тока Джозефсона $I_c(H_0)$ от магнитного поля для перехода, на котором впервые наблюдалось предсказанное Джозефсоном электромагнитное излучение. В этом случае размеры перехода превосходили джозефсоновскую глубину проникновения. Следовательно, магнитное поле проникало в переход неоднородно, в виде квантованных нитей или трубок магнитного потока. С этим связано отклонение наблюдаемой зависимости

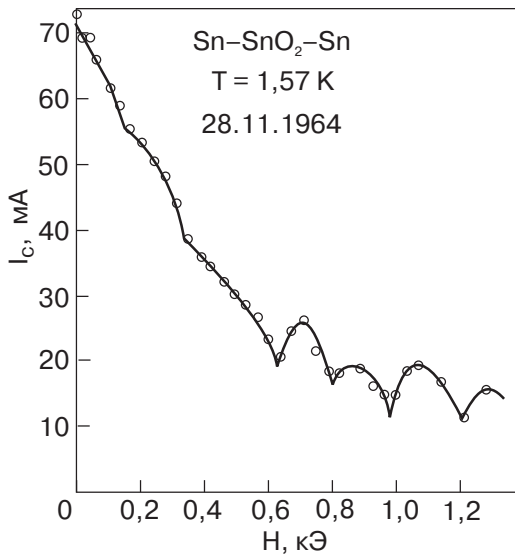


Рис. 2. Зависимость критического тока от дополнительного тока по пленке, пересчитанного в напряженность магнитного поля в туннельном переходе.

от формулы (2). Тем не менее осциллирующая зависимость с убывающей огибающей отчетливо наблюдается, что указывает на однородность диэлектрической прослойки и отсутствие микрозакоротов в туннельном барьере [11]. В сравнительно больших магнитных полях распределение магнитного поля в переходе становится близким к однородному, и зависимость критического тока от поля приближается к формуле (2).

Была подтверждена также температурная зависимость критического тока Джозефсона и обнаружены так называемые «субгармонические щелевые особенности» [11].

Для темы настоящей статьи особый интерес представляет наблюдение в этих измерениях так называемой ступенчатой структуры ВАХ при смещениях меньших порогового (т.е. при eV меньших энергетической щели Δ). Характерный пример такой структуры показан на рис. 3, где приведена ВАХ перехода, на котором впервые наблюдалось джозефсоновское электромагнитное излучение. Штриховым кружком показана ступенька, на которой располагалась рабочая точка во время этих экспериментов. Иногда можно было наблюдать необычное поведение на таких ступеньках: при увеличении тока рабочая точка перескакивала не на большие, а на меньшие напряжения*, что никак нельзя было объяснить возможным разрушением каких-либо сверхпроводящих токовых путей, включенных последовательно в цепь. Было высказано предположение [11], что ступенчатая структура «...вероятно, мо-

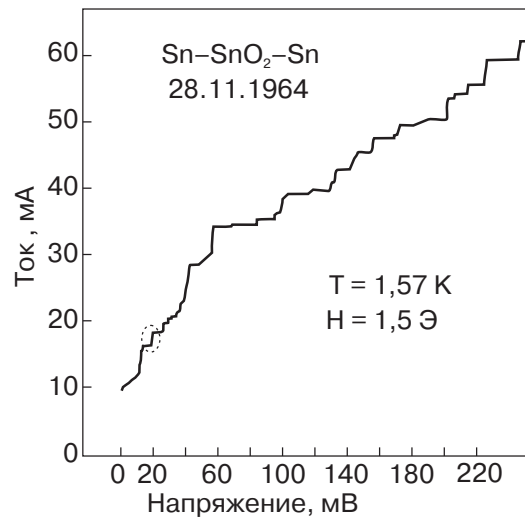


Рис. 3. Ступенчатая структура ВАХ туннельного перехода, на котором впервые было обнаружено джозефсоновское электромагнитное излучение (см. ступень внутри штрихового кружка).

* Следует отметить, что запись ВАХ обычно осуществлялась с источником тока. Поэтому падающий участок ВАХ не мог быть зафиксирован непосредственно, а проявлялся в виде гистерезиса при прямом и обратном направлении записи.

жет быть связана с возбуждением сверхпроводящего переменного тока, предсказанного Джозефсоном...». Таким образом, к середине 1964 года наши работы приблизительно соответствовали уровню, который был достигнут за рубежом еще к августу 1963 года.*

3. Обнаружение джозефсоновского электромагнитного излучения

Несмотря на то что механизм возникновения вертикальных участков на ВАХ туннельных контактов был нам неизвестен, казалось несомненным, что он связан с переменным током Джозефсона. Доказательством этого могло бы быть прямое обнаружение электромагнитного излучения, сопровождающего переменный сверхпроводящий ток. Регистрация излучения явилась бы непосредственным свидетельством туннелирования куперовских пар с излучением фотонов — одного из двух фундаментальных квантовых процессов, предсказанных Джозефсоном. До этого существовали лишь косвенные свидетельства, упоминавшиеся выше [6,7].

Было известно, что напряжение должно быть связано с частотой излучения соотношением Джозефсона:

$$\hbar\omega = 2eV. \quad (3)$$

Кроме того, было замечено, что положение ступеней на оси напряжений зависело от размеров туннельного перехода. Более широкие пленки характеризовались меньшим расстоянием между соседними ступенями. Это позволяло эмпирическим путем подобрать пленки такой ширины, чтобы напряжение, при котором наблюдалась какая-нибудь ступень, соответствовало соотношению (3) для частоты, на которой ведется регистрация излучения. Высота ступеней зависела от постоянного магнитного поля, приложенного в плоскости туннельного перехода.

В качестве приемника излучения использовали радиометр СВЧ П5-10 для 3-сантиметрового диапазона длин волн. Его преимущества заключались в высокой пороговой чувствительности ($\approx 10^{-16}$ Вт), самокалибруемости, сравнительно небольших габаритах. Впоследствии оказалось, что именно выбор в качестве приемника прибора с максимальной пороговой чувствительностью решил успех всего эксперимента, так как первоначально обнаруженная мощность оказалась очень малой (на уровне $\approx 10^{-14}$ Вт), рис. 4.

Эксперименты проводили следующим образом [12] (9.12.1964 г.—03.1965 г.). Подбирали пленки

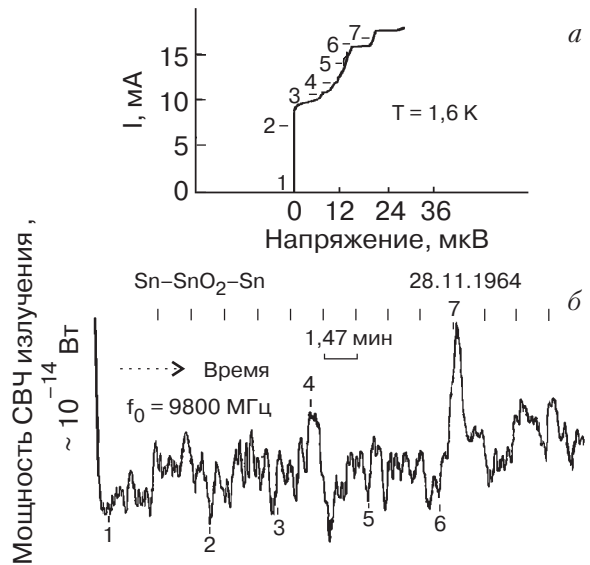


Рис. 4. Одновременная запись вольт-амперной характеристики вблизи ступени (а) и выходного сигнала приемника СВЧ с обнаружением излучения (б).

такой ширины, чтобы на ВАХ наблюдалась ступенька при требуемом напряжении (приблизительно 19,6 мкВ). Из ряда туннельных структур выбирали те, для которых критический ток, осциллируя, плавно убывает в постоянном магнитном поле, параллельном пленкам (подобно зависимости, изображенной на рис. 2). Удовлетворение этому требованию свидетельствовало о получении тонкого и однородного слоя окисла. После этого подбирали такое значение магнитного поля, чтобы требуемая ступенька имела максимальную высоту. Образец представлял собой стеклянную подложку 18×18 мм (покровное стеклышко для микроскопа), на которую в высоком вакууме под прямым углом друг к другу были нанесены две оловянные пленки шириной около 1 мм и толщиной 10^{-4} мм. Тонкий слой диэлектрика (толщиной 2 нм), покрывающий первую пленку, создавался ее окислением в воздухе или кислороде. Таким образом, туннельный переход представлял собой место пересечения этих пленок размерами $\sim 1 \times 1 \times 10^{-4}$ мм. Остальные элементы структуры служили для подключения токовых и потенциальных проводов. Туннельный переход располагали при температуре жидкого гелия в стандартном 3-сантиметровом волноводе параллельно его широкой стенке недалеко от короткозамыкающего поршня. К другому концу волновода, выходящему из криостата, подключали приемник П5-10.

* Материалы Колгейтской конференции по сверхпроводимости, опубликованные в январском (1964 г.) номере журнала «Reviews of Modern Physics», стали нам известны лишь осенью.

На рис. 4 начальный участок ВАХ (график *a*) показан вместе с записью выходного сигнала приемника излучения (график *b*), осуществлявшейся при плавном изменении тока (и напряжения) через переход. Ступень, удовлетворяющая соотношению (3) для частоты f_0 , на которую был настроен приемник, расположена в районе меток 6, 7. Метки 1–7 на графиках рис. 4, *a* и *b* соответствуют одинаковым моментам времени. Приемник П5-10 имеет сравнительно узкую полосу пропускания (~ 1 МГц), поэтому сигнал наблюдается лишь в окрестности определенной точки на ступени. При настройке приемника на другую (близкую) частоту, эта точка перемещается на ступени в соответствии с соотношением (3). Можно заметить также и некоторое увеличение сигнала в районе метки 4, отвечающей соотношению (1) при $n = 2$, т.е. наблюдаемое незначительное увеличение сигнала было обусловлено второй гармоникой джозефсоновского излучения. Мощность излучения в первых экспериментах была очень малой ($\sim 10^{-14}$ Вт). Это связано с тем, что лишь малая доля генерируемого излучения просачивается в волновод и может быть зарегистрирована. Большая его часть рассеивается внутри туннельного перехода, превращаясь в тепло. Кроме того, в первых экспериментах постоянное магнитное поле было направлено вдоль оси волновода, и, следовательно, направление распространения электромагнитного поля, генерируемого волной тока Джозефсона, строго говоря, было ортогонально оси. Тем не менее из-за неоднородности поля вблизи краев перехода заметная часть электромагнитной энергии излучалась и вдоль оси волновода, и поэтому могла быть зарегистрирована. В более поздних экспериментах [13] типичная мощность излучения составляла $\approx 10^{-12}$ Вт и в некоторых случаях могла быть увеличена до 10^{-9} Вт [14] за счет лучшего согласования с внешним пространством. Сама по себе обнаруженная мощность весьма мала, но, учитывая, что она генерируется в объеме порядка 10^{-6} см³, удельная мощность СВЧ составляла до 10 мВт/см³ и могла быть доведена до 1–10 Вт/см³. Основным преимуществом джозефсоновских туннельных генераторов СВЧ является легкость, с которой они могут быть включены в интегральные пленочные микросхемы, работающие при низких температурах и, следовательно, обладающие малыми шумами.

Приемник П5-10 в качестве одного из выходных индикаторов имеет громкоговоритель, фиксирующий шумовой сигнал в полосе звуковых частот. При настройке на рабочую точку ВАХ, удовлетворяющую соотношению частот Джозефсона, шум обычно заметно возрастал. Интересно, что однажды вместо шума при достижении напряжения на переходе, удовлетворяющего соотношению частот Джозефсона

(3), из динамика послышалась музыка. Оказалось, что собственная ширина линии джозефсоновского излучения оказалась настолько узкой, что сигнал ВЧ наводки от близлежащей радиотрансляционной станции привел к частотной модуляции джозефсоновского излучения СВЧ. После двойного гетеродинамирования в приемнике П5-10 сигнал этой радиостанции был воспроизведен в громкоговорителе.

Таким образом, благодаря нашими работами по прямому обнаружению электромагнитного излучения была поставлена точка в захватывающей цепи открытий, связанных с предсказаниями Джозефсона.

За рубежом экспериментальные исследования нестационарного эффекта Джозефсона развивались прежде всего в направлении выяснения механизма косвенных проявлений существования переменного сверхпроводящего тока. Экк, Скалапино и Тэйлор [15] (18.05.–6.07.1964 г.) в туннельных переходах свинец–окисел–свинец обнаружили широкий резонансный максимум на ВАХ в области смещений меньше полуширины энергетической щели свинца ($\Delta_{Pb} = 1,34$ мэВ). Положение этого максимума было пропорционально напряженности магнитного поля, приложенного в плоскости перехода. Этот максимум возникает в результате самодетектирования бегущей электромагнитной волны, возбуждаемой бегущей волной переменного тока Джозефсона. Из-за большого затухания и структурных неоднородностей, характерных для свинцовых туннельных переходов, отражения электромагнитных волн от границ перехода не наблюдалось. Несколько позже [16] эти же авторы наблюдали и объяснили ступенчатую структуру для свинцовых переходов лучшего качества. Ступени возникали как следствие самодетектирования резонансных типов электромагнитных колебаний, генерируемых переменным током Джозефсона. Аналогичное объяснение дали Кун и Фиске [17] (5.10.1964 г.–3.05.1965 г.) для ступенчатой структуры оловянных туннельных переходов. К сожалению, последние две работы долгое время оставались нам неизвестны, и мы независимо пришли к аналогичным результатам (см. [18] (18.05.–1.07.1965 г.), [19] (12.06.–1.08.1965 г.)).

Параллельно с выяснением механизма генерации джозефсоновского излучения другие исследователи проводили эксперименты по его непосредственному обнаружению. Так, например, в работе [17] «... была предпринята попытка обнаружить излучение путем применения передающей линии, гладко расходящейся от ~ 1 нм — расстояния между пленками в туннельном переходе — к макроскопическим размерам коаксиального кабеля или волновода. Никакой мощности не было обнаружено вплоть до 10^{-12} Вт, несмотря на то что один из переходов давал туннель-

ный ток 30 мА при напряжении ~ 20 мкВ». Сейчас мы знаем, что причина неудачи заключалась в недостаточной чувствительности приемника излучения, так как рассогласование волновых сопротивлений туннельного перехода как полосковой линии и стандартного волновода велико.

4. Механизм генерации электромагнитного излучения на резонансных частотах туннельного перехода

Между двумя сверхпроводниками, разделенными тонким слоем диэлектрика, могут распространяться электромагнитные волны как в полосковой линии. Эти волны были рассмотрены Свихартом [20]. Он показал, что при толщине диэлектрической прослойки много меньшей, чем глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник, электромагнитные волны сильно замедлены. Глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник равна

$$\lambda_L = \left(\frac{mc^2}{4\pi n_s e^2} \right)^{1/2}.$$

Здесь e и m — заряд и масса электрона, c — скорость света, n_s — плотность сверхпроводящих электронов, которая имеет тот же порядок величины, что и плотность электронов проводимости в металле при условии, что температура значительно ниже критической температуры T_c перехода в сверхпроводящее состояние. Для олова $T_c = 3,7$ К, $\lambda_L = 50$ нм. Толщина d диэлектрической прослойки в туннельном переходе не превышает 2 нм. Следовательно, электрическое и магнитное поля разделены в пространстве. Первое сосредоточено в диэлектрическом зазоре, а второе — в основном в приповерхностных слоях сверхпроводника, занимая в целом вдоль оси x расстояние $\Lambda = 2\lambda_L + d \approx 100$ нм (рис. 5).

Волновое сопротивление такой полосковой линии на несколько порядков ниже волнового сопротивления свободного пространства, и электромаг-

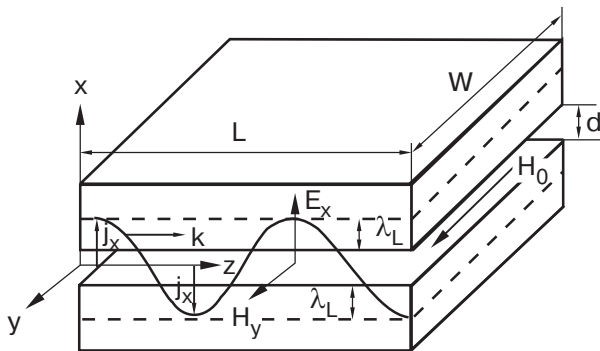


Рис. 5. Модель туннельного перехода и электромагнитные поле и ток в нем.

нитные волны почти полностью отражаются от краев туннельного перехода как от открытого конца передающей линии. Ограниченный с двух сторон туннельный переход представляет собой полосковый резонатор с резонансными частотами

$$\omega_n = \frac{\pi n}{L} c_0, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

обратно пропорциональными размеру перехода L , вдоль которого устанавливается стоячая электромагнитная волна. Фазовая скорость замедленной электромагнитной волны равна

$$c_0 = c \left(\frac{d}{\epsilon_0 \Lambda} \right)^{1/2}$$

и для типичных значений параметров приблизительно в 20 раз меньше скорости света c в свободном пространстве. Это как раз и означает, что туннельный переход с размерами несколько больше 1 мм будет резонировать в 3-сантиметровом диапазоне длин волн.

Аналогично тому, как в электронных приборах СВЧ модулированный по плотности электронный луч возбуждает замедленные электромагнитные волны, в сверхпроводящем туннельном переходе волна плотности сверхпроводящего тока Джозефсона $j_x(z, t)$ возбуждает резонансные электромагнитные колебания миниатюрного СВЧ резонатора, составленного из пересекающихся сверхпроводящих пленок (рис. 5). Ток Джозефсона течет вдоль оси x , т.е. между сверхпроводящими пленками. Его зависимость от времени определяется частотой (3). Зависимостью плотности тока Джозефсона от координат можно управлять с помощью постоянного магнитного поля H_0 , приложенного в плоскости перехода. В простейшем случае достаточно слабой связи между двумя сверхпроводниками (т.е. при достаточно малой прозрачности барьера для туннелирования куперовских пар) эта зависимость носит гармонический характер для направления z , лежащего в плоскости перехода, но перпендикулярного внешнему магнитному полю:

$$j = j_c \sin(\omega t - kz); \quad k = \frac{2e\Lambda H_0}{c}; \quad \omega = \frac{2eV}{\hbar}.$$

Фазовая скорость волны плотности тока Джозефсона равна

$$v_p = \frac{\omega}{k} = c \frac{V}{\Lambda H_0}$$

и зависит как от напряжения на переходе V , так и от магнитного поля H_0 , с помощью которого ею можно управлять независимо от возбуждаемых электромагнитных волн. Максимальное взаимодействие волны плотности тока Джозефсона и электромагнитной волны в туннельном переходе осуществ-

ляется при равенстве фазовых скоростей поля и плотности тока. Это условие отвечает равенству

$$V = \frac{c_0}{c} H_0,$$

дающему значение магнитного поля, при котором самоиндуцированная ступень на вольт-амперной характеристике туннельного перехода имеет максимальную высоту. Это соотношение соответствует также равенству длины волны плотности тока Джозефсона длине волны электромагнитного поля. При увеличении магнитного поля H_0 длина волны тока Джозефсона уменьшается и происходит расфазировка волны тока и возбуждаемого поля. Однако каждый раз, когда волна плотности тока составляет целое кратное от волны поля, эффективность взаимодействия вновь возрастает. Поэтому интенсивность генерации на данном типе колебаний, а вместе с ней и высота соответствующей ступени на вольт-амперной характеристике осциллирует при увеличении магнитного поля, причем амплитуда этих осцилляций постепенно убывает.

На рис. 6 показаны зависимости высоты самоиндуцированных ступеней на ВАХ джозефсоновского туннельного перехода Sn-SnO₂-Sn от внешнего магнитного поля. Номер n каждой ступени указан возле соответствующего главного максимума, положение которого на оси напряжений как функции поля приведено на вставке к этому рисунку. Отклонение критического тока Джозефсона (соответствующего $n = 0$) от зависимости (2) обусловлено тем, что данный переход, как и тот, на котором впервые было обнаружено излучение, имеет размеры, превышающие джозефсоновскую глубину проникновения. Схема автоматической регистрации этих кривых работает таким образом, что зависимость каждой последующей ступени от поля может быть зафиксирована, если только она расположена на ВАХ при больших токах, чем предыдущая. Одина-

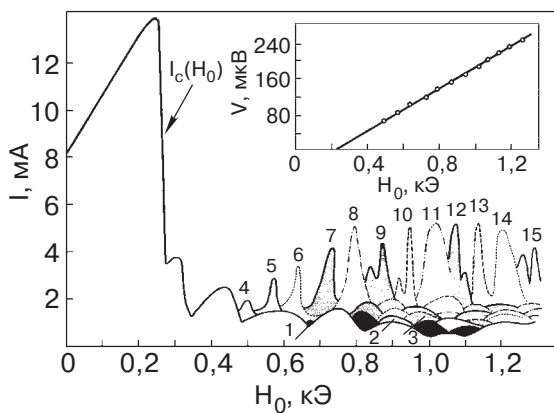


Рис. 6. Высоты собственных ступеней на ВАХ джозефсоновского туннельного перехода во внешнем магнитном поле.

ковым ступеням (кроме $n = 0$) соответствует одинаковая штриховка при огибающей в виде сплошной линии или одинаковый вид огибающей при отсутствии штриховки. Наблюдаемая сложная зависимость в целом очень хорошо описывается существующей теорией.

5. Некоторые перспективы дальнейшего развития исследований и приложений нестационарного эффекта Джозефсона

Несмотря на то что эффекты Джозефсона были открыты уже сравнительно давно, их исследование и разработка продолжают интенсивно и в настоящее время. Целая область низкотемпературной электроники связана с применением так называемых сквидов — сверхпроводящих квантовых интерференционных устройств, основанных на очень высокой чувствительности тока Джозефсона к постоянному магнитному полю. Сквиды используют как датчики, обладающие рекордной чувствительностью к напряженности и градиенту напряженности магнитного поля, для усиления и измерения малых токов и напряжений. Они находят применения в геологоразведке при поиске полезных ископаемых, в медицинской диагностике, составляя основу таких приборов, как магнитокардиографы и магнитоэнцефалографы, и в других областях.

Джозефсоновские туннельные переходы как нелинейные элементы могут использоваться для смешения сигналов, преобразования частот, генерации гармоник и детектирования электромагнитного излучения в диапазоне частот вплоть до пороговой частоты, соответствующей величине энергетической щели в спектре квазичастичных возбуждений. Последняя для таких сверхпроводников, как свинец и олово, лежит в дальней инфракрасной области спектра, а для сверхпроводников с более высокими критическими температурами (например, Nb₃Sn или новые высокотемпературные материалы: YBa₂Cu₃O_{7-d} и др.) — в ИК области. В последнее время возродился интерес к применению джозефсоновских переходов в качестве активных приборов СВЧ (гетеродинов, смесителей и преобразователей частоты) в интегральных тонкопленочных схемах. От одного туннельного перехода удается получить мощность СВЧ до 10⁻⁷ Вт, а от системы связанных переходов — до 1 мкВт. При этом используются туннельные барьеры более высокой прозрачности. В этом случае плотность тока Джозефсона, возбуждающего резонансные моды полоскового резонатора, распространяется в переходе не в виде бегущей волны, а в форме солитона, представляющего собой квант магнитного потока, многократно отраженный от краев перехода. Этот солитон, который называют также флюксоном, порождается самим тун-

нтельным током, при этом внешнее постоянное магнитное поле отсутствует.

Говоря о перспективных приложениях нестационарного эффекта Джозефсона, нельзя не упомянуть квантовые стандарты напряжения, уже давно принятые в ряде стран как первичные государственные стандарты вольта. Такие приборы легко сравнивать друг с другом, так как в основе их поверки лежит сравнение частот эталонного и поверяемого приборов. Прецизионные измерения соотношения (1) позволили уточнить отношение фундаментальных постоянных h/e и ликвидировать некоторые кажущиеся противоречия между предсказаниями квантовой электродинамики и экспериментом, возникавшие из-за использования прежнего неточного значения этого отношения [21].

1. B.D. Josephson, *Phys. Lett.* **1**, 251 (1962).
2. P.W. Anderson, *Phys. Today* **23**, No. 11, 23 (1970).
3. J. Bardeen, *Phys. Rev. Lett.* **9**, No. 4, 147 (1962).
4. P.W. Anderson and J.M. Rowell, *Phys. Rev. Lett.* **10**, 230 (1963).
5. J.M. Rowell, *Phys. Rev. Lett.* **11**, 200 (1963).
6. S. Shapiro *Phys. Rev. Lett.* **11**, 80 (1963).
7. M.D. Fiske, *Rev. Mod. Phys.* **36**, 221 (1964).
8. P.W. Anderson and A.H. Dayem, *Phys. Rev. Lett.* **13**, 195 (1964).
9. I. Giaever, *Phys. Rev. Lett.* **5**, 148 (1960).
10. И.О. Кулик, И.К. Янсон, *Эффект Джозефсона в сверхпроводящих туннельных структурах*, Наука, Москва (1970).
11. И.К. Янсон, В.М. Свистунов, И.М. Дмитренко, *ЖЭТФ* **47**, 2091 (1964).
12. И.К. Янсон, В.М. Свистунов, И.М. Дмитренко, *ЖЭТФ*, **48**, 976 (1965).
13. D.N. Langenberg, D.J. Scalapino, B.N. Taylor, and R.E. Eck, *Phys. Rev. Lett.* **15**, 294 (1965).

14. И.М. Дмитренко, И.К. Янсон, *Труды 10-й Международной конференции по физике низких температур (LT-10)*, Москва, т. IIА (1966), с. 228.
15. R.E. Eck, D.J. Scalapino, and B.N. Taylor, *Phys. Rev. Lett.* **13**, 15 (1964).
16. R.E. Eck, D.J. Scalapino, and B.N. Taylor; *LT-9*, part A (1964), p. 415.
17. D.D. Coon and M.D. Fiske, *Phys. Rev.* **138**, 744 (1965).
18. И.М. Дмитренко, И.К. Янсон, *ЖЭТФ* **49**, 1741 (1965).
19. И.О. Кулик, *Письма в ЖЭТФ* **2**, 134 (1965).
20. J.C. Swihart, *J. Appl. Phys.* **32**, 461 (1961).
21. W.H. Parker, B.N. Taylor, and D.N. Langenberg, *Phys. Rev. Lett.* **18**, 287 (1967).

Nonstationary Josephson effect: observation of electromagnetic radiation

I.K. Yanson

The history of discovery of the Josephson effect and the first steps in its study are reviewed. The experiments on tunnelling in superconductors which led to the first direct observation of Josephson electromagnetic radiation at the Institute for Low Temperature Physics and Engineering, Kharkov, in sixties, are described in detail. The experimental data are illustrated by the original curves with the date of their recordings. The physical mechanism of high frequency irradiation in superconducting tunnel junctions is considered. Some of the most promising applications of the nonstationary Josephson effect are briefly described.