

К. т. н. С. Ю. ЛАРКИН

Украина, г. Киев, Научно-производственный концерн «Наука»
E-mail: nauka_concern@ukr.net

Дата поступления в редакцию
21.10 2005 г. — 29.05 2006 г.

Оппоненты д. т. н. Б. Н. ФОРМОЗОВ
(БГТУ "Военмех" им. Д. Ф. Устинова, г. С.-Петербург),
к. т. н. С. А. ЖГУН (МЭИ, г. Москва)

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ ДЛЯ АНАЛИЗА СПЕКТРА СИГНАЛОВ СВЧ

Изложен опыт разработки частотомеров-спектрометров электромагнитного излучения монохроматических и полигармонических СВЧ-сигналов на основе эффекта Джозефсона и перспективы их дальнейшего усовершенствования.

В НПК «Наука» проводятся исследования с целью промышленного внедрения частотомеров-спектроанализаторов электромагнитного излучения мм- и субмм-диапазона длин волн на основе эффекта Джозефсона. Эти устройства предназначены для анализа спектра недетерминированных полигармонических сигналов с получением точных значений частоты каждой гармоники в сверхвысоком диапазоне частот.

Создание таких устройств [1] связано с практическим решением следующих проблем [2]:

- выбор параметров чувствительного элемента — перехода Джозефсона (ДП);
- выбор способа и средств исследования его вольт-амперных характеристик;
- выбор средств охлаждения и термостабилизации чувствительного элемента;
- выбор и реализация сверхширокополосной системы связи ДП с источниками электромагнитного излучения;
- выбор и оптимизация устройств сопряжения и согласования ДП с СВЧ-трактом, обеспечивающим канализацию внешнего сигнала к охлажденному переходу Джозефсона;
- обеспечение защиты ДП от стороннего электромагнитного излучения в сверхшироком диапазоне частот от НЧ до верхних рабочих частот;
- разработка системы экранов для защиты ДП от воздействия магнитного поля большой напряженности с учетом эксплуатации вблизи наводок и помех;
- разработка интерфейса пользователя и программного обеспечения управления процессом измерения и регистрации, а также обработки результатов измерения.

В качестве чувствительного элемента были использованы переходы Джозефсона типа SNS структур Nb–Al₂O₃–Nb, разработанные и изготовленные в НИИ физических проблем (г. Зеленоград). Это переходы торцевого типа с площадью контакта 0,25 мкм², нормальным сопротивлением 0,5...20 Ом. Контакты выполнены в виде микросхемы на под-

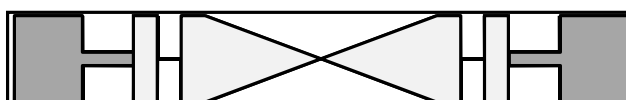


Рис. 1. Схематическое изображение перехода Джозефсона:

■ — сверхпроводящий слой; □ — проводящий слой;
□ — кремниевая подложка

ложке из высокоомного кремния размерами 10×1,5×0,3 мм (рис. 1).

В качестве активного элемента также применялись цепочки переходов Джозефсона в виде SINIS-структур (сверхпроводник—изолятор—нормальный металл—изолятор—сверхпроводник), созданные по Nb–Al/AIO_x-технологии в Немецком государственном физико-техническом институте (г. Брауншвейг). Фотография такой сверхпроводящей наноструктуры приведена на рис. 2. Изготовление переходов Джозефсона на базе ниобий-алюминиевой технологии описано в [3]. Переходы выдерживают многократное термоциклирование (до 50—100 раз).

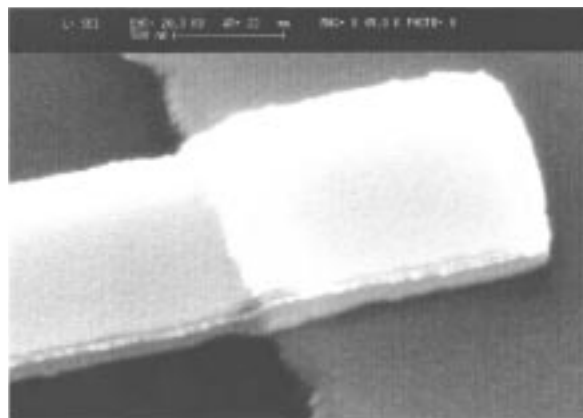


Рис. 2. Джозефсоновский переход в виде SINIS-структуры

В процессе работы в 2005 г. разработан аппаратный комплекс для проведения экспериментальных исследований и отработки элементов системы. Внешний вид установки приведен на рис. 3.

В качестве криостата наиболее подходящим оказалось использование транспортного сосуда Дьюара с расширенной горловиной диаметром 45 мм и объемом 40 л. Термостатирование датчика при температуре кипения гелия осуществляется погружением



Рис. 3. Экспериментальная установка частотомера-спектроанализатора с использованием перехода Джозефсона

криозонда непосредственно в жидкий гелий. Стабильность температуры кипения гелия обеспечивается поддержанием фиксированного давления паров с помощью маностата.

Криовод (см. рис. 4) для линии передачи исследуемого сигнала использовался либо в виде тонкостенных волноводов из нержавеющей стали типа ОХ18Н9Т со слюдяной вставкой на теплом конце волновода (которая не пропускает газообразный гелий и в то же время не препятствует прохождению СВЧ-сигнала), либо (в основном) в виде квазиоптического сверхразмерного металлodieлектрического волновода (МДВ) сечением 14×14 мм, подробно описанного в [2, с. 226]. (Эти вводы позволяют такому частотомеру работать без подливки жидкого гелия на протяжении четырех недель, что является вполне достаточным для такой аппаратуры.) Такой выбор обусловлен малыми погонными потерями, широкополосностью и фиксацией поляризации электромагнитной волны. Установка позволяет проводить исследования

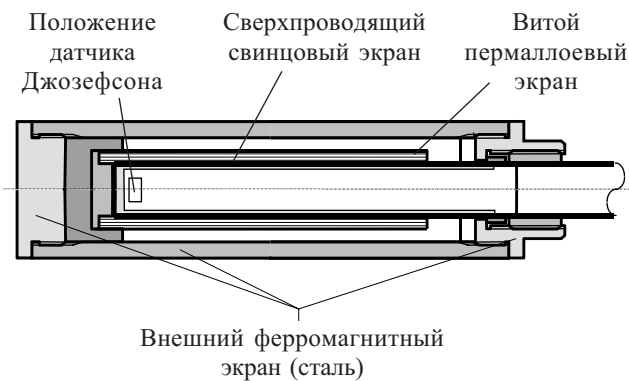


Рис. 4. Устройство многослойного магнитного экрана криовода диаметром 40 мм

в диапазоне частот не менее 50...600 ГГц, т. е. практически перекрывает мм- и суб-мм-диапазоны длин волн.

Для сопряжения и согласования ДП с электромагнитным полем волновода использовались устройства типа перехода с МДВ на Н-образный волновод, щелевые антенны на основе фин-лайн и др. Окончательно остановились на применении логопериодической плоской антенны, установленной в фокальной плоскости гиперсферической линзы, размещенной на торце волновода (рис. 5).

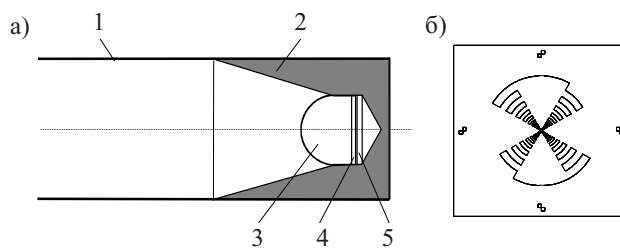


Рис. 5. Конструкция приемной головки на основе планарной логопериодической антенны и гиперполусферической линзы (а) и топология планарной логопериодической антенны (б):

1 — волноводная секция; 2 — полый конус из поглощающего материала; 3 — кремниевая гиперполусферическая линза; 4 — подложка с переходами Джозефсона; 5 — антенна планарная логопериодическая

Диапазонные свойства этой системы приведены на графике рис. 6. Этот график построен в виде зависимости входной мощности, соответствующей нормированной величине ступеньки Шапиро ($\Delta I = 0,006 I_{кр}$, где $I_{кр}$ — критический ток контакта) от частоты.

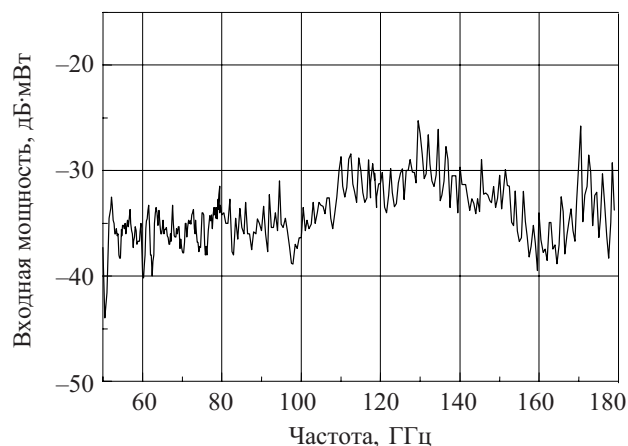


Рис. 6. АЧХ приемного криоблока частотомера

Большое внимание при разработке криозонда уделялось защите чувствительного элемента от стороннего электромагнитного излучения в сверхшироком диапазоне частот от НЧ до верхних рабочих частот. Защита обеспечивается тщательным экранированием криозонда и установкой специальных фильтров в цепях смещения ДП (рис. 7).

Значительное влияние на характеристики контакта Джозефсона оказывает магнитное поле. Для стабилизации его характеристик криозонд снабжен многослойной системой магнитных экранов, содержа-

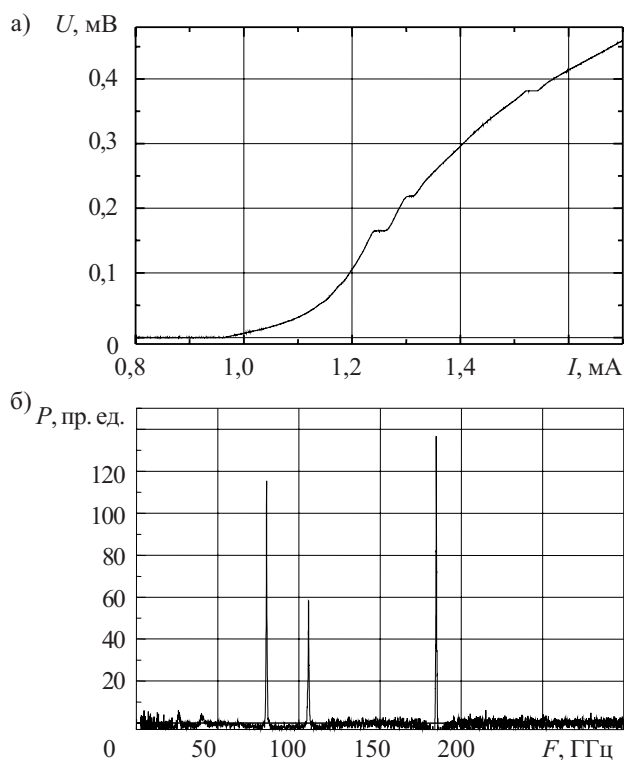


Рис. 7. ВАХ перехода Джозефсона при одновременном воздействии трех монохроматических СВЧ-сигналов (а) и восстановленный с помощью преобразования Гильберта спектр полигармонического сигнала (б)

щей сверхпроводящий (свинцовый) и ферромагнитные экраны (рис. 4). Применение сверхпроводящего экрана весьма эффективно. Выбирался материал экрана с более высокими критической температурой и критическим магнитным полем. Этому требованию наиболее полно удовлетворяют высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП-материалы).

Разработанная конструкция экранов и методика захлаживания криозонда позволяют свести к минимуму напряженность “замороженного” в нем магнитного поля. В качестве критерия минимизации замороженного поля используется стабильность величины критического тока от захлаживания к захлаживанию. Конструктивное исполнение криозонда обеспечивает возможность непрерывной работы системы до 30 суток без дозаправки жидким гелием.

Принцип работы частотомера основан на соотношении Джозефсона $\hbar\omega = 2eV$, связывающем с помощью лишь фундаментальных констант частоту сигнала ω и напряжение смещения на переходе V . Соотношение позволяет однозначно связать значение частоты сигнала с напряжением ступеньки на ВАХ, возникшей в результате воздействия этого сигнала на переход Джозефсона. Причем с изменением температуры перехода Джозефсона в пределах $T < T_c$ положение ступеньки по оси напряжений не изменяется, изменяется лишь высота ступеньки по оси токов, что связано с температурным изменением энергетической щели сверхпроводников, входящих в состав перехода Джозефсона.

Мы используем сверхпроводники, хорошо описываемые моделью Бардина–Купера–Шриффера

(БКШ) [2]. Температурная зависимость энергетической щели сверхпроводника при $T < 0,5T_c$ имеет “полочку”, другими словами, энергетическая щель тут практически не меняется. Изменение температуры на 1 К приводит к изменению энергетической щели ниобия Δ_{Nb} (при 4,2 К $\Delta_{Nb} \approx 1,5$ мэВ) на $\approx 2\%$, т. е. $\delta\Delta_{Nb}/\delta T = 0,03$ мэВ/К. Тогда при стабильности температуры 10^{-2} К имеем стабильность энергетической щели 0,02%, а значит, и стабильность высоты ступеньки порядка 0,02%. Стабильность параметров определяет точность измерений. Отсюда следует, что по крайней мере с не меньшей точностью (0,02%) мы измеряем исследуемую частоту (на самом деле — с намного большей точностью).

Точность обеспечивается использованием преобразования Гильберта, которое позволяет установить положение ступеньки по оси напряжений. При этом, как известно, хотя высота ступеньки по оси токов и может меняться, положение ступеньки по оси напряжений не изменяется, что и обеспечивает высокую точность измерения частоты. При такой методике измерений нам нет необходимости использовать эталонный стандарт частоты, и точность измерения частоты фактически определяется точностью измерения напряжения.

Разработанная система регистрации ВАХ построена на основе АЦП и ЦАП высокой разрядности (32 разряда). Уровень собственного шума разработанного усилителя постоянного тока (УПТ) составляет $0,5 \dots 0,6$ нВ / $\sqrt{\text{Гц}}$. Разработанный интерфейс пользователя позволяет в широких пределах управлять параметрами системы по току смещения, полосе пропускания, коэффициенту усиления, периодичности развертки и количеству регистрируемых ВАХ. Система работает в реальном масштабе времени и может управляться с удаленного терминала.

Некоторые результаты исследований спектров монохроматических и полигармонических сигналов представлены на рис. 7. Для обработки результатов измерений используются различные численные методы преобразований ВАХ, как то гистограмм-анализ, Гильберт-преобразование, корреляционный анализ [4]. Одним из результатов проведенных исследований впоследствии будет разработка и создание панорамного измерителя частоты, обеспечивающего обнаружение сигнала и измерение частот полигармонических сигналов в диапазоне 60...600 ГГц [5].

Исследования показали, что методы, основанные на обработке ступенек Шапиро, обладают недостаточной чувствительностью и мало пригодны для анализа слабых широкополосных сигналов со сплошным спектром, например радиотепловых. В настоящее время усилия направлены на разработку методов измерения такого рода сигналов. Теория джозефсоновских переходов [4] дает направление поиска таких методов. Джозефсоновские переходы как квантовые измерительные приборы обладают уникальной возможностью измерять квантовые флуктуации объекта, не внося существенных дополнительных флуктуаций.

Ширина линии генерации перехода Джозефсона, которая является одним из параметров приемника,

связана с его конструктивными параметрами соотношением [4, с. 31]

$$\Gamma_1 = \pi \left(\frac{2e}{\hbar} \right)^2 S_V(0) = \pi \left(\frac{2e}{\hbar} \right)^2 R_d^2 \left(S_I(0) + \frac{I_c^2}{2I^2} S_I(\omega_J) \right), \quad (1)$$

где Γ_1 — полуширина линии Джозефсоновской генерации;
 $S_V(0)$ — спектральная плотность низкочастотных флуктуаций напряжения на ДП;
 R_d — дифференциальное сопротивление ДП в рабочей точке;
 $S_I(0)$ — спектральная плотность собственных низкочастотных флуктуаций тока через ДП;
 I_c — критический ток перехода Джозефсона;
 $S_I(\omega_J)$ — спектральная плотность флуктуаций тока через ДП в окрестности частоты джозефсоновской генерации.

Как следует из (1), в низкочастотные флуктуации напряжения на переходе вносят вклад флуктуации тока не только на низкой частоте, но и на частотах в области джозефсоновской генерации ω_J . Причем в ширину линии генерации вносят вклад только те компоненты спектра высокочастотных напряжений, частота которых находится в полосе порядка $\omega_J \pm \Gamma_1$. Это связано с особым характером нелинейности перехода: она, с одной стороны, является реактивной, а с другой стороны, из-за своих отрицательных значений допускает преобразование частоты вниз с эффективностью, близкой к единице [4, с. 42].

Таким образом, изменение ширины линии генерации перехода происходит только под действием флуктуаций, спектр которых ограничен шириной линии генерации перехода, что и обеспечивает селективность измерений спектральной плотности излучения. Ширину линии собственной генерации ДП можно определить не только спектрометрическим методом, но также и по его селективному отклику на слабый монохроматический сигнал [4].

Селективный отклик ДП на монохроматический сигнал описывается выражением [4, с. 48]

$$resp = \frac{\Delta v}{a^2} = \frac{1}{8v^2} \cdot \frac{\delta}{\delta^2 + \gamma^2}, \quad (2)$$

где Δv — изменение величины v ;
 $v = V/V_c$ — величина напряжения в рабочей точке, нормированная относительно величины характерного напряжения ДП;
 $a = A/I_c$ — амплитуда внешнего воздействия, нормированная относительно величины критического тока ДП;
 $\delta = (\Omega - \Omega_c)/\Omega_c$ — расстройка частоты воздействующего сигнала относительно частоты собственной генерации, нормированная относительно характерной частоты ДП Ω_c ;
 $\gamma = I_f/2I_c$ — нормированная величина флуктуаций тока через ДП.

Полуширина линии джозефсоновской генерации Γ_1 в формуле (1) и параметр γ в формуле (2) связаны соотношением [2, с. 55]

$$\gamma = \Gamma_1/\omega_c = \Gamma_1 / \left(\frac{2e}{\hbar} I_c R_N \right), \quad (3)$$

где R_N — нормальное сопротивление перехода Джозефсона.

Суть метода измерения спектрального распределения плотности широкополосного шумового СВЧ-сигнала заключается в определении изменения ширины линии собственной генерации ДП под воздействием исследуемого сигнала. Для этого к исследуемому сигналу подмешивается монохроматический сигнал от вспомогательного генератора, перестраиваемого в исследуемом диапазоне частот.

Дискретно изменяя частоту вспомогательного генератора и регистрируя селективный отклик ДП на его сигнал при наличии исследуемого сигнала и без него, по изменению параметров селективного отклика определяем спектральную плотность шумового СВЧ-сигнала в каждой частотной полосе $\omega_m \pm \Gamma_1$, где ω_m — частота монохроматического сигнала. Таким образом, получаем распределение спектральной плотности исследуемого сигнала в диапазоне частот, т. е. его спектр.

Этот подход позволяет поднять чувствительность спектрометра на 20...30 дБ. Дальнейшее повышение чувствительности и улучшение других рабочих параметров спектрометра связывается с использованием гетероструктур ДП.

В ставшей классической статье [6] показано, что при замене одиночного SIS-перехода (сверхпроводник—изолятор—сверхпроводник) на цепочку из n одинаковых SIS-переходов отношение сигнал/шум у приемников СВЧ-сигналов на базе цепочки из n переходов может быть улучшено в \sqrt{n} раз. В нашем случае ситуация аналогичная, поэтому улучшение отношения сигнал/шум составляет \sqrt{n} раз при замене одиночного перехода Джозефсона на цепочку из n одинаковых переходов Джозефсона в приемной части частотомера.

Однако эксперименты показывают, что ситуация тут даже лучше. Дело в том, что для работы в режиме частотомера нам необходимо лишь продетектировать наличие «ступеньки» на ВАХ, тогда напряжение, при котором возникает «ступенька» на ВАХ цепочки из n одинаковых переходов Джозефсона, возрастает в n раз, что позволяет в n раз увеличить точность определения частоты сигнала.

Разработанный частотомер ориентирован в первую очередь на измерение мощных сигналов, т. е. на случай, когда «ступенька» хорошо различима на фоне шумов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Пат. 25229 А Украины. Пристрій для визначення частоти електромагнітного випромінювання у міліметровому та субміліметровому діапазонах довжин хвиль / С. Ю. Ларкін, А. М. Мірошніков, Г. Т. Ацентюк.— 1998.— Бюл. № 9.
2. Ларкин С. Ю. Измерение частоты монохроматического СВЧ поля на основе нестационарного эффекта Джозефсона.— Киев: Наук. думка, 1999.
3. Müller F., Schulze H., Behr R. et al. The NbAl technology at PTB — a common base for different types of Josephson voltage standards // Physica C.— 2001.— Vol. 354.— P. 66—70.
4. Лихарев К. К. Введение в динамику джозефсоновских переходов.— М.: Наука, 1985.
5. Пат. 34552 А Украины. Спосіб вимірювання енергетичного спектру електромагнітного випромінювання / С. Ю. Ларкін, С. Є. Аніщенко, В. І. Чайковський.— 2001.— Бюл. № 2.
6. Tucker J. R., Feldman M. J. Quantum detection at millimeter wavelengths // Rev. Mod. Physics.— 1985.— Vol. 57.— P. 1055—1113.