

Поступило в Редакцию
 21 апреля 1987 г.

Журнал технической физики, т. 58, в. 6, 1988

СИГНАЛЬНЫЕ И ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ РЕЛАКСАЦИОННЫХ СКВИДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Ю. В. Масленников, О. В. Снизигрев

1. В работе [1] были сообщены предварительные результаты исследования характеристик релаксационных сквидов с проволочными навесными шунтами. Конструкция датчика с навесным шунтом с сопротивлением $R_s = (2-5)$ Ом и индуктивностью $L_s \sim 10^{-7}$ Гн обеспечивала частоты релаксации порядка 15 МГц и тем самым реализацию «низкочастотного» предела [2] режима работы сквида. Энергетическое разрешение таких сквидов в области белого шума было порядка $7 \cdot 10^{-30}$ Дж/Гц.

Для улучшения характеристик датчика мы перешли к полностью интегральной конструкции с пленочными высокоомными резисторами, что позволило поднять частоту ре-

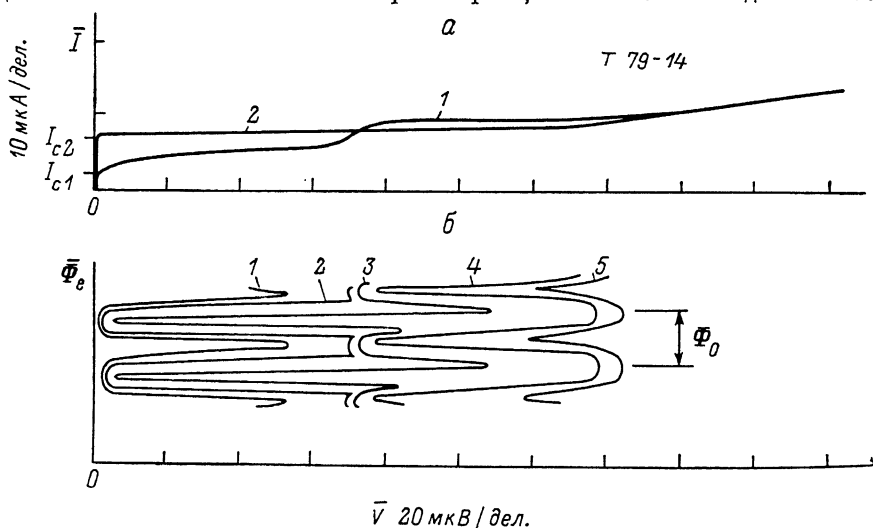


Рис. 1.

лаксационных колебаний до уровня 100—200 МГц и приблизиться к «высокочастотному» пределу режима работы сквида [2]. В настоящей работе сообщаются результаты исследования сигнальных и шумовых характеристик таких датчиков.

2. Интегральные сверхпроводящие квантовые интерферометры с туннельными джозефсоновскими переходами NbN—Nb/PbSb [3] имели топологию, описанную нами в [1]. В качестве материала для шунтирующих резисторов были использованы пленки ниобия с критической температурой перехода в сверхпроводящее состояние $T_c < 4.2$ К. Метод их изготовления основывался на том, что присутствие кислорода в ходе осаждения пленки ниобия понижает ее критическую температуру T_c и увеличивает удельное сопротивление [4]. Полученные пленки толщиной 50 нм имели значение сопротивления на квадрат $R_{\square} \sim 140$ Ом при $T = 4.2$ К, что в несколько раз превышает значения для обычно используемых материалов и позволяет легко формировать низкоиндуктивные шунты с сопротивлением $R_s > 10$ Ом.

3. Мы исследовали вольт-амперные и сигнальные характеристики нескольких серий релаксационных сквидов с пленочными резисторами. На рис. 1, а представлено семейство

вольт-амперных характеристик, снятых при различных значениях внешнего магнитного потока $\bar{\Phi}_e$; $1 - \Phi_e = (n+1/2)$, $2 - \Phi_e = n\Phi_0$. I_{c1} и I_{c2} — минимальное и максимальное значения критического тока интерферометра, Φ_0 — квант магнитного потока. Семейство сигнальных характеристик (1–5) для токов смещения $I_{c1} < \bar{I} \ll \bar{I}_s < I_{c2}$ показано на рис. 1, б. Данный интерферометр имел величину максимального критического тока I_c порядка 8 мкА; параметр $l = 2\pi I_c L / \Phi_0$, близкий к 3, шунтировался резистором $R_s \sim 15$ Ом и индуктивностью $L_s \sim 10^{-8}$ Гн. Глубина модуляции критического тока ΔI_c внешним магнитным потоком составляла 4 мкА, а максимальный размах сигнальной характеристики $\Delta \bar{V}(\Phi_e)$ около 70 мкВ. Это значение находится в хорошем соответствии с теоретической оценкой $|\Delta \bar{V}(\Phi_e)| = \Delta I_c(\Phi_e) R_s = 60$ мкВ, полученной из выражения для вольт-амперной характеристики $\bar{V}(\Phi_e) = (\bar{I} - I_c(\Phi_e)) R_s$ [1]. Высокие значения коэффициента преобразования $H = \partial \bar{V} / \partial \Phi_e > 0.5$ мВ/ Φ_0 дали возможность снизить до величины порядка 10^{-6} Φ_0 /Гц шум использованного нами усилителя, приведенный к входу интерферометра.

4. Собственный шум интегральных релаксационных скивдов исследовался в полосе частот 1.5–1000 Гц. С помощью селективного нановольтметра типа «Unipan-233» с мало-

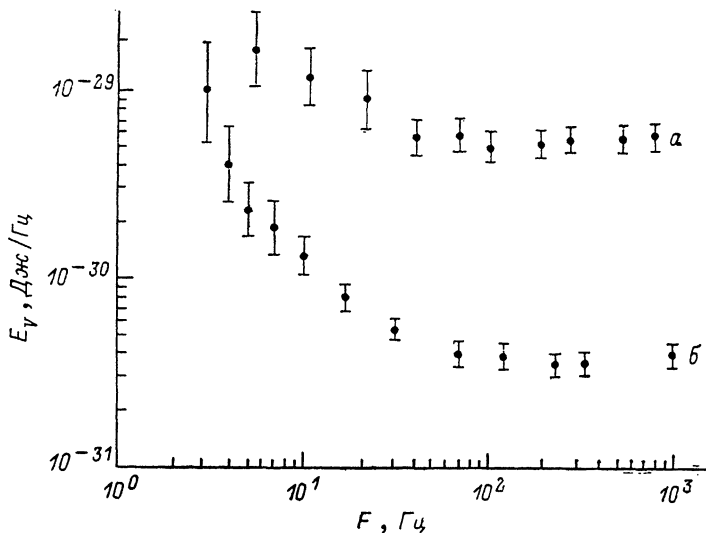


Рис. 2.

шумящим предусилителем «Unipan-233-5» регистрировалось напряжение непосредственно на интерферометре. Значительное внимание при измерении шумов мы уделили стабилизации рабочей точки интерферометра по току смещения \bar{I} и потоку подмагничивания $\bar{\Phi}_e$. Для этого в цепях задания \bar{I} и $\bar{\Phi}_e$ были использованы батарейные источники напряжения РЦ-83-Х, RC-фильтры высоких частот с частотой среза $f_{cp} \sim 1$ МГц и охлаждаемые резистивные аттенуаторы. Цепь задания потока подмагничивания содержала также трехвитковую катушку с индуктивностью порядка 10^{-8} Гн, имевшую коэффициент связи с интерферометром $k \sim 0.1$.

Измерения шумов проводились для ряда фиксированных значений частоты наблюдения. Эквивалентный шумовой поток в интерферометре рассчитывался по величине шумового напряжения и экспериментальному значению коэффициента преобразования H в рабочей точке сигнальной характеристики. На рис. 2 представлены зависимости энергетической чувствительности скивда от частоты для датчиков с проволочным (а) и пленочным (б) шунтирующими резисторами. Видно, что на частотах > 10 Гц ее уровень имеет типичные значения: $E_v \sim 7 \cdot 10^{-30}$ Дж/Гц для первого и $E_v \sim 4 \cdot 10^{-31}$ Дж/Гц для второго типа датчиков. Такое повышение чувствительности скивдов с пленочным резистором обусловлено возрастанием частоты релаксационных колебаний при уменьшении индуктивности L_s шунта и находится в качественном соответствии с результатами расчетов [2]. Сравнение с традиционными скивдами, изготовленными с использованием такой же технологии [5], показывает, что наши релаксационные скивды имеют уровни чувствительности одного с ними порядка.

Возрастание шумов на частотах ниже 10 Гц, по нашим оценкам, связано не с флуктуациями в самом скивде, а с недостаточностью тех мер, которые были приняты для стабилизации систем задания рабочих точек по току смещения \bar{I} и потоку подмагничивания $\bar{\Phi}_e$. Резуль-

таты более детальных исследований шумовых свойств интегральных датчиков в этом диапазоне частот будут сообщены отдельно.

Авторы работы глубоко признательны В. В. Мигулину и К. К. Лихареву за постоянное внимание к работе и полезные обсуждения.

Литература

- [1] Масленников Ю. В., Снигирев О. В. Письма в ЖТФ, 1986, т. 12, № 21, с. 1288—1293.
- [2] Снигирев О. В. РИЭ, 1984, т. 29, № 11, с. 2216—2223.
- [3] Кузьмин Л. С., Масленников Ю. В., Снигирев О. В. Микроэлектроника, 1986, т. 15, № 6, с. 535—537.
- [4] Войтович И. Д., Клушин А. М., Полищук А. С. Зарубежная радиоэлектроника, 1983, № 6, с. 71—97.
- [5] Martinis J. M., Clarke J. M. IEEE Trans., 1983, v. MAG-19, p. 446—448.

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
Физический факультет

Поступило в Редакцию
4 мая 1987 г.

УДК 533.566

Журнал технической физики, т. 58, в. 6, 1988

КОРОТКОВОЛНОВАЯ АСИМПТОТИКА ПОЛЯ ПРЕЛОМЛЕННОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ВБЛИЗИ ПРЕДЕЛЬНОГО ЛУЧА

А. С. Старков

Задача о распространении волн при наличии границы раздела между двумя различными средами, например воздухом и землей, водой и воздухом, слоями в ионосфере и т. д.; является классической задачей математической физики. Необходимость решения этой задачи возникает при изучении распространения волн над земной поверхностью и поверхностью океана, в ионосфере, при проведении геофизических исследований, при создании диэлектрических антенн. В большинстве работ, посвященных этой тематике, подробно рассматривается поле отраженной волны. В данной работе строится асимптотика поля преломленной волны в случае, когда точечный источник колебаний находится в высокоскоростной среде и не очень далеко от границы.

Пусть в цилиндрической системе координат (ρ, z) граница раздела двух сред — плоскость $z=0$. В точку с координатами $(0, -z_0)$, $z_0 > 0$ помещен точечный источник колебаний. Показатели преломления верхней ($z > 0$) и нижней ($z < 0$) сред n_1, n_2 будем считать действительными и связанными соотношением $n_1/n_2 \equiv n > 1$. Отношение скоростей $c_1/c_2 = n^{-1} < 1$. Поле преломленной волны имеет вид [1]

$$u_{np} = \frac{ikm}{8\pi} \int_{\Gamma} \frac{\sin 2\theta H_0^{(1)}(k\rho \sin \theta)}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta + m \cos \theta}} e^{ik(x\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} + z_0 \cos \theta)} d\theta, \quad (1)$$

где k — волновое число в нижнем полупространстве; m — постоянный множитель, характеризующий свойства сред. Интегрирование проводится в комплексной плоскости θ по обычному для таких задач контуру Γ , составленному из луча $(-i\infty - \pi/2, -\pi/2)$, отрезка $(-\pi/2, \pi/2)$ и луча $(\pi/2, \pi/2 - i\infty)$. Значение θ в стационарных точках имеет смысл угла падения.

При больших значениях $k\rho$ функцию Ханкеля можно заменить на асимптотику и получить

$$u_{np} = A \int_{\Gamma} e^{ik(x\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} + \rho \sin \theta + z_0 \cos \theta)} \frac{\sin \theta \cos \theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta + m \cos \theta}} \times \\ \times \left(1 + O\left(\frac{1}{k\rho \sin \theta}\right) \right) d\theta, \quad A = \frac{m\sqrt{k} e^{i\frac{\pi}{4}}}{2\sqrt{2\rho} \pi^{3/2}}. \quad (2)$$