

- [5] Takahashi Y., Kowashima M., Horikoshi J. - Jap. J. Appl. Phys., 1980, v. 19, N 4, p. 693-701.
- [6] Клейнман Л. Туннелирование в полупроводниках с участием фононов. В кн.: Туннельные явления в твердых телах (пер. с англ.), М.: Мир, 1973, с. 175-186.
- [7] Корольков В.И., Михайлова М.П. - ФТП, 1983, т. 17, в. 4, с. 569-582.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе  
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию  
15 февраля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 11

12 июня 1988 г.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ  
НА ОДИНОЧНЫХ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО  
СОЕДИНЕННЫХ ТОРЦЕВЫХ  
ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ ПЕРЕХОДАХ

А.Л. Гудков, В.Н. Лаптев,  
С.Б. Розанов

1. В супергетеродинных приемниках миллиметрового (ММ) и субмиллиметрового (СММ) диапазонов для повышения чувствительности используются охлаждаемые преобразователи частоты [1]. Преобразователи на джозефсоновских переходах (ДП) с внешним гетеродином способны, в принципе, усиливать сигнал, переносимый на промежуточную частоту (ПЧ), при собственной однополосной шумовой температуре около  $20 T$ , где  $T$  - физическая температура ДП [2, 3]. Использование цепочек из одинаковых последовательно соединенных ДП расширяет динамический диапазон приемника. В данной работе изложены результаты исследования преобразователя частоты диапазона 2.2 мм с внешним гетеродином на торцевых ДП из тугоплавких материалов и цепочках из них. Ранее такие ДП и цепочки использовались в детекторном приемнике диапазона 4-8 мм [4, 5]. Работы по преобразователям частоты с внешним гетеродином на торцевых ДП авторам неизвестны.

2. Торцевые ДП с непосредственной проводимостью  $Nb/\alpha-Si/Nb$  с площадью  $S \lesssim 1$  мкм<sup>2</sup> и цепочки длиной 0.2 мм из 11 одинаковых ДП изготавливались на кремниевых пластинах толщиной  $t = 0.4$  мм по методике, подробно описанной в [5, 6]. Значения нормального сопротивления ДП  $R_N$  и их характеристического напряжения  $V_c = I_c R_N$  ( $I_c$  - критический ток) указаны в таблице. Емкость переходов  $C \lesssim 0.01$  пФ, так что вольт-амперные характеристики (ВАХ) как одиночных ДП, так и цепочек не имеют гистерезиса. ДП данного типа не меняют параметров при многократных охлаждениях до ге-

$N$	$R_H, \text{ Ом}$	$t, \text{ мм}$	$V_c, \text{ мВ}$	$L_{np}, \text{ дБ}$ $DSB (SSB)$	$T_{np}, \text{ К}$ $DSB (SSB)$	$P_{гет}, \text{ нВт}$ $DSB (SSB)$	$P_{нас}, \text{ нВт}$	$\xi$
I	66	0.4	0.49	7.1	730	19 <sup>x</sup>		0.96
I	47	0.4	0.24	12.1	670	100 <sup>x</sup>		0.96
I	30	0.4	0.42	12.3(13.8)	580(940)	15(8.2)	-	0.97
		0.15	0.45	8.7(9.9)	340(530)	4.2(2.2)	0.5	0.98
I	51	0.4	0.53	12.2	640	5.2	3.6	1
		0.15	0.46	7.6(11.1)	790(2800)	2.3(1.7)	-	0.99
I	49	0.4	0.49	12.2	750	19	-	1
I	41	0.4	0.44	14.0	1910	40	-	1
		0.10	0.41	7.1(11.9)	380(1420)	3.3(3.3)	-	0.94
II	62	0.4	9.2	12.1	2500	1.4·10 <sup>4</sup>	5·10 <sup>2</sup>	0.77
II	118	0.4	5.9	8.5	230	2.3·10 <sup>3</sup>	-	0.56
		0.15	5.7	10.9	3000	1.9·10 <sup>3</sup>	-	0.55
II	149	0.4	7.3	6.8	2100	2.6·10 <sup>3</sup>	-	0.82
		0.15	7.8	4.0(7.0)	2100(4500)	2.9·10 <sup>2</sup>	5.2	0.51
II	108	0.4	7.0	11.9	960	4.5·10 <sup>3</sup>	3.1·10 <sup>2</sup>	0.64

Примечание. Частота гетеродина  $f_{гет} = 138.5$  ГГц, ПЧ  $f_{пч} = 3.4-3.9$  ГГц; в случаях  $x - f_{гет} = 136.3$  ГГц,  $f_{пч} = 1.5-1.8$  ГГц.

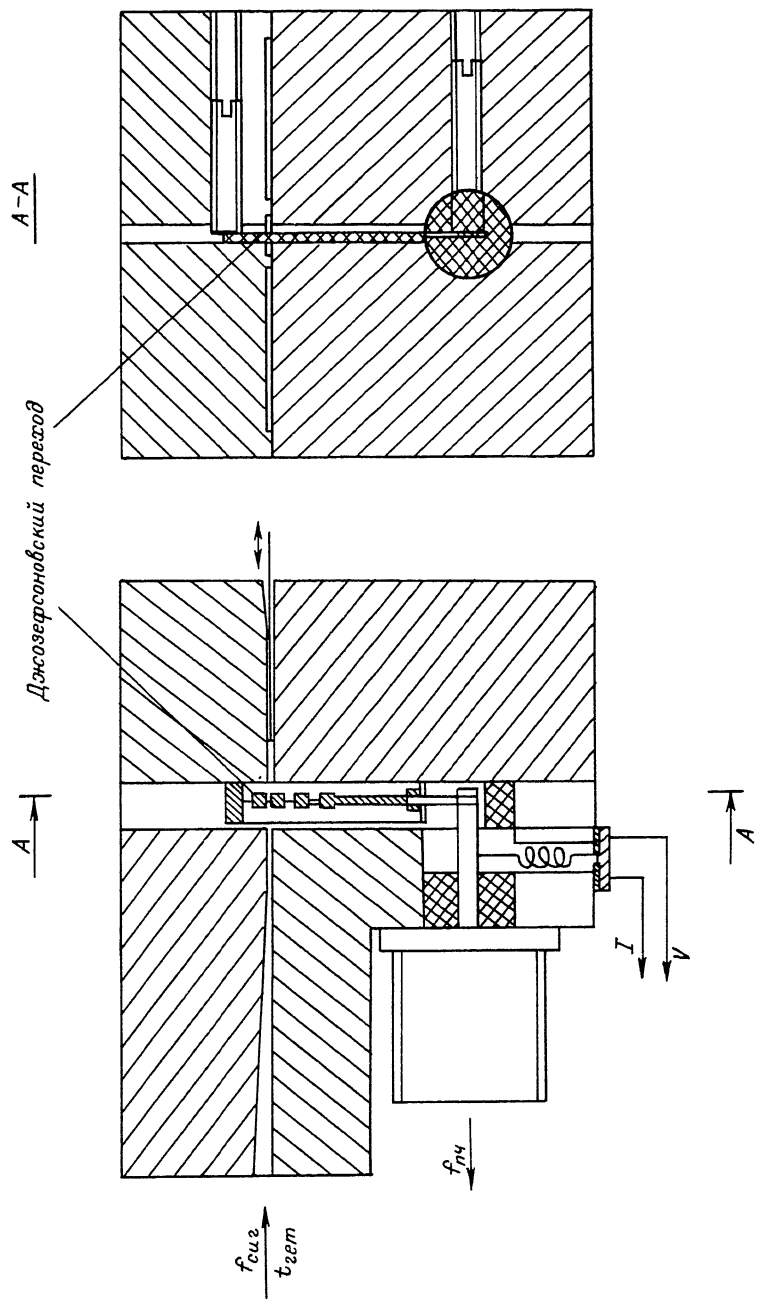


Рис. 1. Конструкция преобразователя частоты.

лиевых температур и длительном хранении на воздухе. Пластины с ДП разрезались на элементы с размерами  $8 \times 0.8 \text{ мм}^2$ , содержащие один ДП или цепочку ДП и микрополосковые фильтры нижних частот.

3. Подложки с ДП устанавливались в преобразователе частоты в Е - плоскости пониженного волновода сечением  $1.6 \times 0.2 \text{ мм}^2$  (см. рис. 1). Настройка преобразователя производилась контактным поршнем. Сигнал и гетеродин подводились к преобразователю, находившемуся в криостате при температуре  $T = 4.2 \text{ К}$ , по лучеводу  $\varnothing 20 \text{ мм}$ . Источниками сигнала служили поглощающие нагрузки при температурах  $T_0 = 294 \text{ К}$  и  $T_N = 77 \text{ К}$  и лампа обратной волны (ЛОВ) ОВ-68. Мощность гетеродина (генератор Г4-142 с удвоителем частоты) вводилась в лучевод с помощью диэлектрического делителя луча. При однополосных измерениях использовался квази-оптический фильтр [7], настраивавшийся на частоту сигнала  $f_{\text{сиг}}^- = f_{\text{гет}} + f_{\text{пч}}$ , который подавлял сигнал с частотой  $f_{\text{сиг}}^+ = f_{\text{гет}} - f_{\text{пч}}$  более, чем на 13 дБ. Потери сигнала во входном тракте  $L_{\text{вх}} = 4.2 \text{ дБ}$  (4.9 дБ с фильтром), эффективная температура тракта  $\bar{T}_{\text{вх}} = 229 \text{ К}$  (235 К с фильтром). Сигнал на выходе преобразователя регистрировался измерительным приемником (ИП) с чувствительностью 0.1 К. Затухание в кабеле ПЧ  $L_{\text{вых}} = 1.1 \text{ дБ}$ , эффективная температура кабеля  $\bar{T}_{\text{вых}} = 170 \text{ К}$ .

4. Если перед лучеводом установлена поглощающая нагрузка с температурой  $T_{\text{сиг}}$ , то шумовая температура на входе ИП

$$T_{\text{пч}} = \frac{T_{\text{сиг}} \xi}{L_{\text{вх}} L_{\text{пр}} L_{\text{вых}}} + \frac{\bar{T}_{\text{вх}} \xi}{L_{\text{пр}} L_{\text{вых}}} \left(1 - \frac{1}{L_{\text{вх}}}\right) + \frac{T_{\text{пр}} \xi}{L_{\text{пр}} L_{\text{вых}}} + \bar{T}_{\text{вых}} \left(1 - \frac{1}{L_{\text{вых}}}\right) \left(1 + \frac{1 - \xi}{L_{\text{вых}}}\right) + \frac{T_0 (1 - \xi)}{L_{\text{вых}}^2}; \quad T_{\text{сиг}} = T_0; T_N. \quad (1)$$

Здесь  $L_{\text{пр}}$  и  $T_{\text{пр}}$  - потери преобразования и шумовая температура преобразователя частоты с учетом коэффициента рассогласования

по выходу  $\xi = \frac{4R_d R_{\text{пч}}}{(R_d + R_{\text{пч}})^2}$ , где  $R_d = \left. \frac{dV}{dI} \right|_{P_{\text{гет}}}$ ,  $R_{\text{пч}} = 50 \text{ Ом}$ . По-

следний член в (1) представляет собой отраженное от ДП при  $\xi < 1$  тепловое излучение находящейся при температуре  $T_0$  нагрузки в нерабочем плече циркулятора на входе ИП. Этот член дает острые пики на зависимостях  $T_{\text{пч}}(V)$  (рис. 2, б, д), соответствующие вертикальным джозефсоновским ступенькам тока на динамиче-

ских ВАХ при напряжениях  $V_n = \frac{hf_{\text{гет}} N}{2e} n$ ;  $n = 0, 1, 2, \dots$  (рис. 2,

а, г). Здесь  $N$  - число ДП в цепочке. Из рис. 2, в, е видно, что в соответствии с [2, 3] эффективность преобразования сигнала на ПЧ максимальна ( $L_{\text{пр}}$  минимально) при напряжении  $0 < V_{\text{опт}} < V_n$ . На рис. 2, в кроме джозефсоновских пиков преобразования сигнала видны два слабых квазичастичных пика выше и ниже напряжения

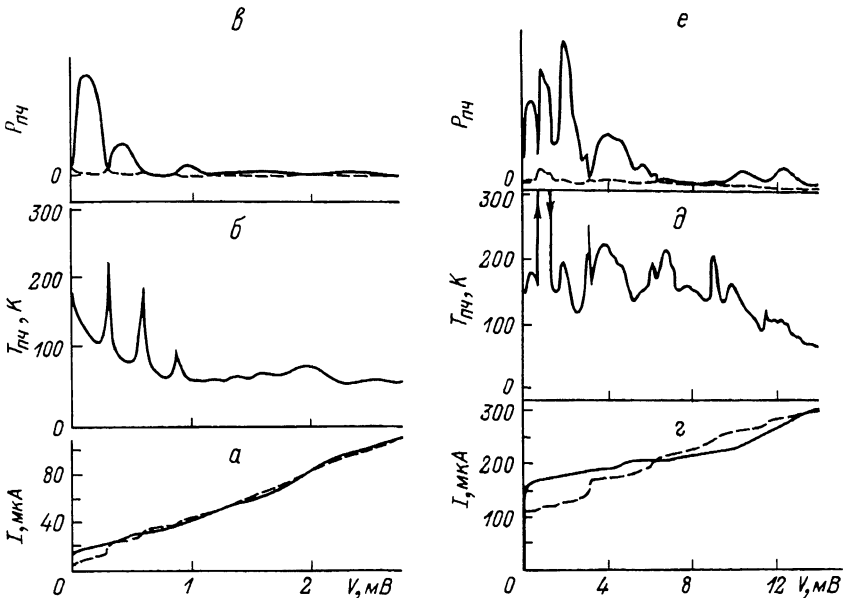


Рис. 2. Примеры экспериментальных зависимостей для преобразователя частоты на одиночном ДП (а-в) и цепочке из II ДП (г-е): а, г - ВАХ  $I(V)$  при выключенном (сплошные кривые) и включенном (пунктирные кривые) гетеродине; б, д - шумовая температура на входе ИП  $T_{шч}(V)$  при оптимальной мощности гетеродина ( $P_{гет} = 4.2$  нВт для  $N = 1$  и  $P_{гет} = 14$  мкВт для  $N = II$ ); в, е - мощность на выходе преобразователя при постоянной мощности сигнала от ЛОВ (сплошные кривые,  $P_{сиг} = 0.22$  нВт для  $N = 1$  и  $P_{сиг} = 2.2$  нВт для  $N = II$ ) и при  $P_{сиг} = 0$  (пунктирные кривые).

щели  $V_g = 2$  мВ. Нерегулярный ход зависимостей  $T_{шч}(V)$  и  $P_{шч}(V)$  для цепочки ДП между ступеньками тока связан с неполной синхронизацией переходов.

Значение  $L_{пр}$  при  $V = V_{онт}$  определялось по величине отклика  $\Delta T_{шч}$  на входе ИП при перепаде температуры источника сигнала  $\Delta T_{сиг} = T_0 - T_N$ . Затем из (1) вычислялась  $T_{пр}$ . Двухполосные (DSB) и однополосные (SSB) значения  $L_{пр}$  и  $T_{пр}$  приведены в таблице, лучшие результаты подчеркнуты. Ошибки не превосходят  $\pm 1$  дБ для  $L_{пр}$  и  $\pm 30\%$  для  $T_{пр}$ . Значения  $L_{пр}$  при  $N = I$  и  $N = II$  в целом примерно одинаковы, но уровень шума цепочек, как правило, выше. То, что  $L_{пр}$  и  $T_{пр}$  при DSB и SSB приеме отличаются не точно в 2 раза (на 3 дБ) связано, во-первых, с возможным преобразованием на ПЧ шумового сигнала на частотах  $f_{сиг m}^{\pm} = m f_{гет} \pm f_{шч}$ ,  $m = 2, 3, 4, \dots$  и, во-вторых, с изменением импедансов внешней цепи для ДП в преобразователе на частотах  $m f_{гет}$  и  $f_{сиг m}^{\pm}$  ( $m \geq 1$ ) при установке режекторного

фильтра. Последнее подтверждается различием значений мощности гетеродина  $P_{гет}$  при  $DSB$  и  $SSB$  измерениях (см. таблицу). Дополнительные измерения, проведенные для нескольких джозефсоновских элементов при толщине подложки  $z = 0.1-0.15$  мм, показали существенное (до 7 дБ) уменьшение  $L_{pp}$  и снижение  $P_{гет}$  для всех одиночных ДП и одной из цепочек. Это свидетельствует о значительном поглощении излучения в кремнии. Параметры преобразователя, вероятно, могут быть улучшены при использовании подложек из плавленого кварца.

5. Известно, что цепочка из  $N$  одинаковых ДП с таким же полным сопротивлением, как у одиночного ДП, который она заменяет в преобразователе, требует в  $N^2$  раз большую мощность гетеродина и позволяет увеличить максимальную мощность сигнала (мощность насыщения)  $P_{нас}$  также в  $N^2$  раз [8]. Критерием насыщения мы считали увеличение  $L_{pp}$  на 10% (0.4 дБ) при возрастании мощности сигнала от ЛОВ. Как видно из таблицы, в большинстве случаев для  $P_{гет}$  и  $P_{нас}$  "закон  $N^2$ " выполняется с точностью до коэффициента порядка единицы (с учетом различий в  $R_N$  и  $L_{pp}$ ) и  $\frac{P_{нас}}{P_{гет}} = 0.02-0.12$ .

6. Полученные результаты показывают возможность использования торцевых ДП из тугоплавких материалов и цепочек ДП в преобразователях частоты ММ диапазона. Преобразователи с внешним гетеродином на торцевых ДП, площадь которых может быть сделана меньше  $0.1 \text{ мкм}^2$ , представляются перспективными при продвижении в СММ диапазон.

### Л и т е р а т у р а

- [1] Кошелёв В.П., Овсянников Г.А. - Зарубеж. радиоэлектрон., 1983, № 6, с. 31-50.
- [2] Claassen J.H., Richards P.L. - J. Appl. Phys., 1978, v. 49, N 7, p. 4117-4129.
- [3] Таур У. - IEEE Trans. Electron Dev., 1980, v. ED-27, N 10, p. 1921-1928.
- [4] Гудков А.Л., Куликов В.А., Лаптев В.Н., Матвеев Л.В., Махов В.И. - Письма в ЖТФ, 1986, т. 12, в. 9, с. 527-533.
- [5] Гудков А.Л., Куликов В.А., Лаптев В.Н., Матвеев Л.В., Махов В.И. - Письма в ЖТФ, 1987, т. 13, в. 18, с. 1109-1112.
- [6] Гудков А.Л., Лихарев К.К., Махов В.И. - Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, в. 23, с. 1423-1428.
- [7] Розанов С.Б. В сб.: Тезисы докладов XVII Всесоюзной конференции "Радиоастрономическая аппаратура". Ереван, 10-12 октября 1985 г. Ереван, 1985, с. 169-170.

[8] Л и х а р е в К.К. Введение в динамику джоуэфсоновских переходов, М.: Наука, 1985. 320 с.

Физический институт  
им. П.И. Лебедева  
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию  
12 марта 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 11

12 июня 1988 г.

## ОПТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ТИПА С КАЧАЮЩИМСЯ ЗЕРКАЛОМ

Н.А. Е с е п к и н а, С.Ю. Б о н д а р ц е в,  
А.П. Л а в р о в, К.В. М о р о з о в,  
А.В. Н и к а н д р о в, М.Р. Ш у б и ч

Для спектрального анализа сигналов с высоким частотным разрешением в оптике предложено большое число методов и устройств, причем в последнее время большое внимание исследователей привлекают акустооптические анализаторы спектра с временным интегрированием [1, 2].

В данной статье рассматривается оптический анализатор спектра (ОАС) с временным интегрированием интерференционного типа, в котором для создания сетки опорных временных частот используется не частный сдвиг дифрагированного на акустооптическом модуляторе светового пучка, а линейный фазовый сдвиг, создаваемый сканирующим дефлектором, в качестве которого используется подвижное зеркало [3]. Очевидными преимуществами рассматриваемого ОАС являются компактность и простота оптической схемы и управляющих электронных блоков.

Структурная схема рассматриваемого ОАС представлена на рис. 1. В этой схеме коллимированный световой пучок полупроводникового лазера (ПЛ), формируемый с помощью формирователя (Ф), делится на два пучка делителем (Д). Один из этих пучков используется для контроля интенсивности излучения ПЛ (линза  $L_1$  и фотодиод ФД), а второй — для реализации собственно спектроанализатора. Этот пучок отражается от подвижного (качающегося вокруг оси  $O$ ) зеркала дефлектора (ПЗ) и попадает на жесткий интерферометр (И), состоящий из делительного кубика, прямоугольной призмы и неподвижного зеркала. Линза  $L_2$  формирует в выходной плоскости (ВП) спектроанализатора изображение апертуры подвижного зеркала с коэффициентом увеличения  $\beta$ .

Пусть дефлектор управляется таким образом, что  $\sin \theta = \alpha t$  в течение некоторого интервала времени  $[0, T]$ . Здесь  $\theta$  — угол отражения от подвижного зеркала по отношению к падающему пучку.