

- [1] К е с а е в И.Г. Катодные процессы электрической дуги, М.: Наука, 1968. 244 с.
- [2] Б е к - Б у л а т о в И.Х., Б о р у х о в М.Ю., Н а г а й б е к о в Р.Б. - ЖТФ, 1973, т. 33, № 10, с. 2211.
- [3] H a n t z s c h e E. - Beitr., Plasmaphys., 1974, В 14, N 4, с. 135.
- [4] Б е й л и с И.И., Л ю б и м о в Г.А. - ТВТ, 1975, т. 13 № 6, с. 1137.
- [5] Р а х о в с к и й В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме, М.: Наука, 1970. 536 с.
- [6] Г р а н о в с к и й В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток, М.: Наука, 1971. 544 с.
- [7] А н и с и м о в С.И. - ЖЭТФ, 1968, т. 54, № 1, с. 339.
- [8] Б р о н и н С.Я., П о л и ш у к В.П. и др. - Препринт ИВТАН № 2-199, М., 1986. 48 с.

Институт высоких температур
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию
9 марта 1988 г.

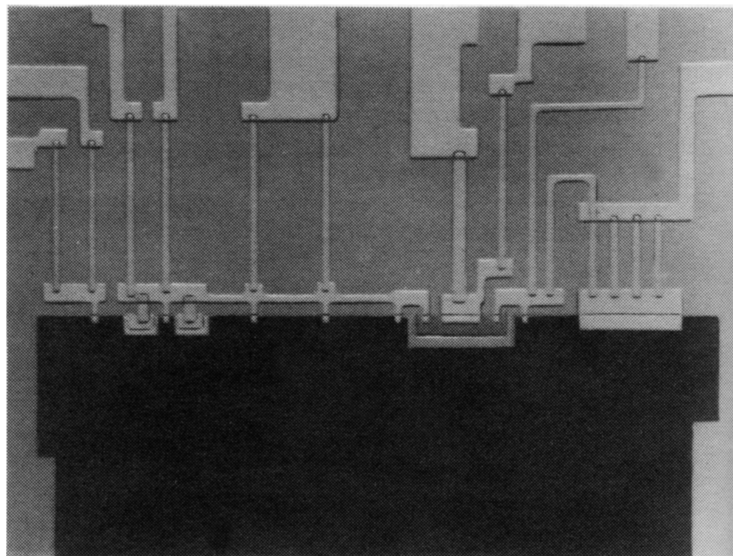
Письма в ЖТФ, том 14, вып. 12

26 июня 1988 г.

ДЖОЗЕФСОНОВСКИЙ РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ТРИОД КАК ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ КОМПАРАТОР

А.Л. Г у д к о в, В.К. К о р н е в,
В.И. М а х о в, С.И. М у ш к о в,
В.К. С е м е н о в, В.Д. Щ е д р и н

Применение джозефсоновских переходов в импульсных компараторах уже позволило [1-3] улучшить чувствительность и временное разрешение стробоскопического преобразования до уровня, по всей видимости, недостижимого для полупроводниковой элементной базы. Целью настоящей работы являлось экспериментальное изучение возможности дальнейшего улучшения параметров сверхпроводниковых стробоскопических преобразователей за счет использования в качестве импульсного компаратора джозефсоновского „регенеративного импульсного триода“ - балансной системы джозефсоновских переходов, работающей в одноквантовом режиме. Применение в качестве компаратора пары одинаковых нелинейных элементов с гистерезисной вольт-амперной характеристикой (так называемой пары Гото [5]) уже исследовалось как на полупроводниковой (см., например, [6]), так и на сверхпроводниковой [7] элементных базах. В отличие от этих случаев в работе используется балансная система джозефсоновских переходов с безгистерезисной вольтамперной характеристикой.



40 мкм

a

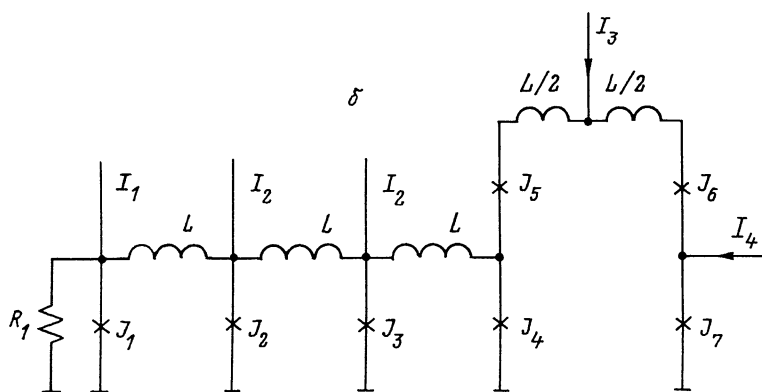


Рис. 1.

Разработанная для этого интегральная схема (рис. 1,а) содержит семь одинаковых торцевых джозефсоновских переходов $Nb-\alpha Si$ с малой собственной емкостью (параметр $\beta_C < 1$), аналогичных описанным в работе [4], пять сверхпроводящих индуктивностей из Nb ($L = 3$ пГн) и шесть резисторов на основе пленок Ti .

Эквивалентная схема устройства показана на рис. 1,б. Она содержит генератор периодической последовательности одиночных квантов магнитного потока (переход J_1), частота следования которых задана

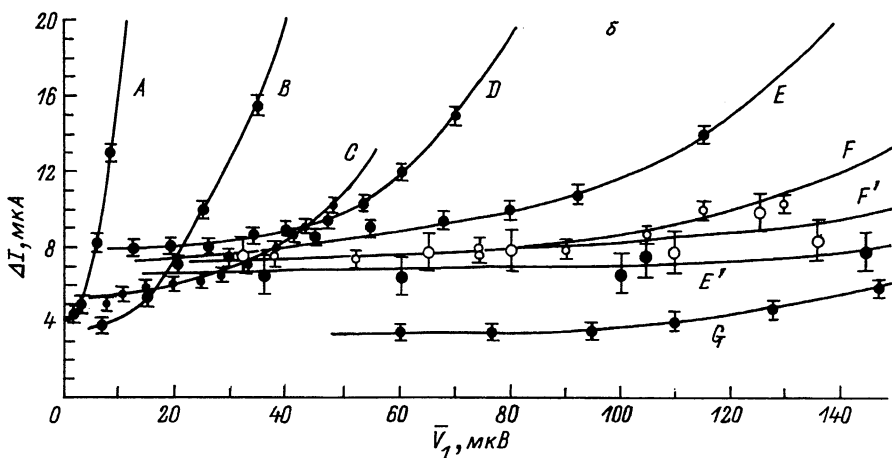
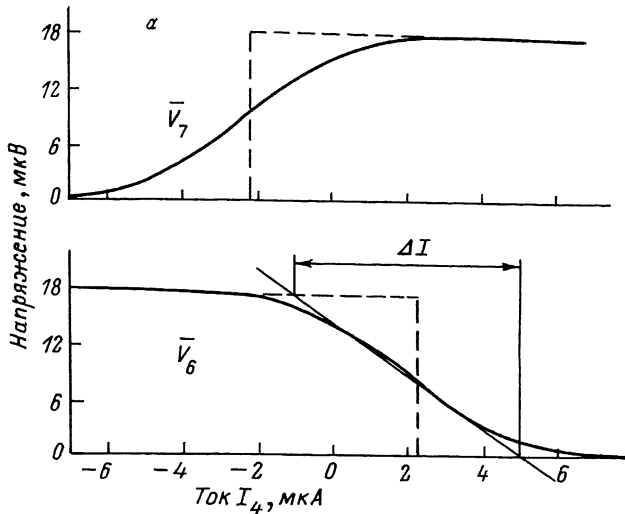


Рис. 2.

ется постоянным током питания I_1 , превышающим по величине критический ток перехода I_c (резисторы в цепях задания токов питания на рис. 1Б для простоты не показаны). Этот генератор нагружен на дискретную джозефсоновскую линию передачи ($J_2 - J_4$), которая может выполнять функцию регулируемой тока I_2 линии задержки одиночных квантов и, кроме этого, развязывает генератор от регенеративного импульсного триода (J_6, J_7).

№ образца	T, K	I_C , мкА	R_H , Ом	U_C , мкВ	$(I_T^2 I_C)^{1/3}$, мкА
A	8.6	50	0.6	30	1.9
B	8.0	50	2.0	100	1.9
C	6.9	80	3.0	240	1.8
D	4.2	150	3.5	530	1.7
E	4.2	85	7.6	650	1.4
E'	2.65	105	7.6	800	1.1
F	4.2	48	14.5	700	1.1
F'	3.0	56	14.5	800	1.0
G	4.2	16	27.4	430	0.8

При больших абсолютных значениях тока I_4 ($|I_4| > I_n$, где I_n - пороговое значение) кванты магнитного потока, поступающие в контур $J_4 - J_5 - J_6 - J_7$ через переход J_4 , в зависимости от знака I_4 выходят либо через переход J_6 (при $I_4 < -I_n$), либо через переход J_7 (при $I_4 < I_n$). При малых значениях тока I_4 ($|I_4| < I_n$) через оба перехода (J_6 и J_7) выходит по одному кванту магнитного потока [7]; в этом случае в контур $J_4 - J_5 - J_6 - J_7$ входит один дополнительный квант через переход J_5 . При использовании такого компаратора в стробоскопическом преобразователе напряжение U_7 может служить сигналом рассогласования для цепи обратной связи [2, 3], а ток I_4 состоит из исследуемого периодического сигнала и постоянного тока обратной связи. К преимуществам предлагаемого режима работы можно отнести меньшие времена переключения и установления, которые дают возможность как улучшить временное разрешение, так и поднять частоту следования строб-импульсов до нескольких гигагерц [8].

Оценить чувствительность компаратора можно без использования внешних импульсных сигналов по зависимости напряжения на переходе J_7 от постоянного тока I_4 при фиксированных значениях токов I_1, I_2, I_3 (рис. 2,а). Без учета влияния флуктуаций эта зависимость (а также показанная на рис. 2,а аналогичная зависимость для перехода J_6) имела бы ступенчатый вид (штриховые линии на рисунке), отражая пороговые условия прохождения квантов магнитного потока через соответствующие переходы. Флуктуации в компараторе приводят к размытию ступенчатой зависимости, ширина которого является естественной мерой интенсивности флуктуаций.

На рис. 2,б показаны типичные результаты измерения зависимости ширины этого размытия от напряжения U_7 на переходе J_7 , которое связано обычным джозефсоновским соотношением с частотой следования квантов магнитного потока. При малых напряжениях U_7 ширина размытия достигает минимальной величины $\Delta I_{min} = 3-8$ мкА. Согласно теоретическим оценкам [9], она должна быть примерно равна $(I_T^2 I_C)^{1/3}$, где $I_T = 2ek_B T / \hbar$, T - рабочая температура. Для образцов D, E, E', F, F' экспериментальные значения ΔI_{min} в 4-7 раз превышают теоретические оценки (см.

таблицу), однако для остальных образцов между теоретическими и экспериментальными значениями имеется количественное соответствие. Оно доказывает, что в наших экспериментах основную роль среди источников флуктуаций могут играть тепловые флуктуации.

В описанном режиме работы компаратора среднеквадратичное значение шума напряжения на нем δU в полосе частот Δf [10, с. 469] можно представить в виде

$$(\delta U)^2 = (h/2e)(U_6 \cdot U_7 / U_1) \Delta f.$$

Для типичных значений параметров ($U_6 = U_7 = 0.5 U_1$, $U_1 = 10$ мкВ) $\delta U \approx 7 \cdot 10^{-11}$ В/Гц^{1/2}. Отсюда, учитывая реальные значения дифференциального сопротивления $R_D \approx U_1 / \Delta I \approx 1 \dots 10$ Ом (см. рис. 2), можно оценить предельную токовую чувствительность компаратора $\delta I \approx 10^{-10}$ А/Гц^{1/2}.

В заключение авторы выражают благодарность К.К. Лихареву за полезные дискуссии и В.А. Мордашову за помощь в работе.

Л и т е р а т у р а

- [1] У е б е р С. - Электроника, 1987, т. 60, № 4, с. 19-24.
- [2] W o l f P., V a n Z e g h b o r o e c k B.J., D e u t s c h U. - IEEE Trans. Magn., 1985, v. MAG-21, N 2, p. 226-229.
- [3] T u k e r m a n D.B. - Appl. Phys. Lett., 1980, v. 36, N 12, p. 1008-1010.
- [4] Г у д к о в А.Л., Л и х а р е в К.К., М а х о в В.И. - Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, № 23, с. 1423-1428.
- [5] G o t t o E. et al. - IRE Trans. Electron. Computers, 1960, v. EC-9, p. 25-29.
- [6] К р у м и н ь ш К.Я., Х е р м а н и с Э.Х. - Автоматика и вычислительная техника, 1972, № 3, с. 87-94.
- [7] P e t e r s e n D.A., К о Н., V a n D u z e r T. - IEEE Trans. Magn., 1987, v. MAG-23, N3.
- [8] В ы с т а в к и н А.Н., К о ш е л е ц В.П. и др. - Письма в ЖТФ, 1987, т. 13, № 5, с. 286-290.
- [9] Л и х а р е в К.К. Введение в динамику джозефсоновских структур, М.: Наука, 1985. 320 с.
- [10] Л е в и н Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Книга 1-я, М.: Советское радио, 1974. 550 с.

Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова

Поступило в Редакцию
22 марта 1988 г.