

сионному элементу, полировался с двух противоположных торцов так, что свет, введенный гофрированным участком световода, фокусировался на противоположном торце планарного волновода. В области фокусировки излучения на торце волновода пристыковывался другой волоконный световод, при этом излучение из планарного волновода переходило в волоконный световод (рис. 1). Для возбуждения волоконного световода через решетку производилось обращение направления распространения света, т. е. свет, введенный в волоконный световод, попадал сначала в планарный волновод, затем на решетку на волокне и после этого в волоконный световод дисперсионного элемента. Эффективность такого возбуждения световода в этом демонстрационном эксперименте была невелика, однако оптимизация всех элементов такого устройства и особенно реализация однонаправленности вывода света в дисперсионном элементе, несомненно, позволят достичь большой эффективности возбуждения световода через решетку и откроют возможности создания новых волоконно-оптических элементов (например, мультиплексоров) для оптических линий связи.

В заключение отметим, что при создании дисперсионного элемента наряду с кварцевым блоком используется блок из кремния, на поверхности которого для укладки волокон изготавливаются V-канавки переменной глубины с помощью фотолитографии и селективного травления кремния. Достоинством этой технологии полировки волокна является возможность изготовления сразу большого количества дисперсионных элементов, а также существенное уменьшение габаритов элемента и, естественно, размеров всего устройства в целом.

Таким образом, реализация волоконной расширителя волноводного пучка света на базе волоконного световода с дифракционной решеткой создает новые возможности формирования широких волноводных пучков света для волноводной голографии, уменьшения размеров интегрально-оптических устройств с линзовыми системами, а также создание новых интегрально-оптических устройств для систем связи.

В заключение авторы выражают благодарность А. С. Свахиной за помощь в изготовлении образцов.

#### Список литературы

- [1] Yoseph T. R., Ranganath T. R., Lee J. Y., Pedinoff M. E. // SPIE. Integrated Optics. 1982. Vol. 321. N 11. P. 134—140.
- [2] Баблюмян А. С., Морозов В. И., Путилин А. Н., Шермегор Т. Д. // Тр. ФИАН. 1987. Т. 185. С. 164—190.
- [3] Zang De Yu. // Opt. Commun. 1983. Vol. 47. N 4. P. 248—250.
- [4] Stoll H. M. // Appl. Opt. 1978. Vol. 17. P. 2362.
- [5] Аюни Ю. Х., Беловолов М. И., Бородулин В. И. и др. // Квантовая электрон. 1982. Т. 9. № 11. С. 2197—2203.
- [6] Свахин А. С., Сычугов В. А., Тулайкова Т. В. // Квантовая электрон. 1986. Т. 13. № 2. С. 440—442.

Институт общей физики АН СССР  
Москва

Поступило в Редакцию  
24 мая 1989 г.

### ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕПОЧЕК ТОРЦЕВЫХ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ ПЕРЕХОДОВ

В. А. Ильин, М. Д. Китайгородский

Торцевые джозефсоновские переходы (ТДП) [1, 2] обладают стабильностью и воспроизводимостью параметров, которые достаточны для изготовления на их основе последовательных цепочек (ЦТДП). В [3—5] сообщается об использовании таких цепочек в детекторах и смесителях СВЧ диапазона волн. Параметры указанных устройств определяются в первую очередь характером нелинейности применяемых в них чувствительных элементов. Основная информация об этом может быть получена из вольт-амперных характеристик (ВАХ), изучение которых является основной задачей настоящей работы.

Номер ЦТДП	$R$ , Ом	$I_c$ , мкА	$\beta$	$\beta^*$	Номер ЦТДП	$R$ , Ом	$I_c$ , мкА	$\beta$	$\beta^*$
1	23	1400	0.18	—	5	235	40	0.61	0.56
2	30	680	0.15	—	6	250	27	0.55	0.50
3	38	350	0.13	—	7	407	12	0.64	0.52
4	107	115	0.32	—					

Для проведения исследований использовалась установка, позволяющая произвести регистрацию ВАХ при  $T=4.2$  К как в режиме задания тока, так и в режиме задания напряжения. Исследуемые цепочки представляли собой [3] 11 последовательно соединенных структур Nb—Si\*—Nb на подложке из кремния или сапфира. Их основные параметры приведены в таблице.

В отличие от [2] в нашем случае критические токи  $I_c$  и сопротивления  $R$  отдельных переходов, составляющих ЦТДП, несколько отличались друг от друга, что сказалось на вид

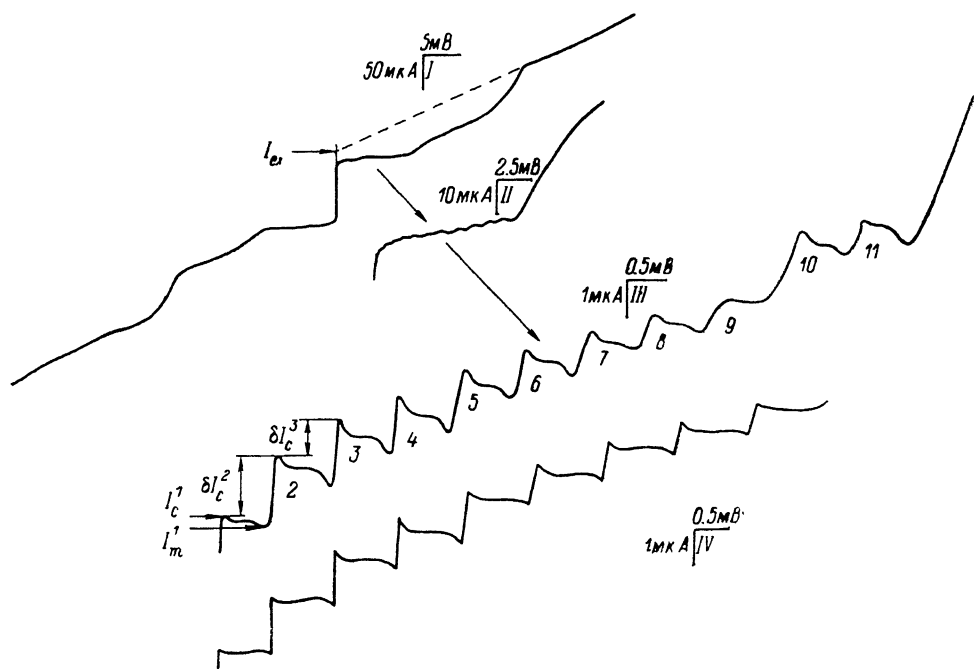


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика ЦТДП 5.

ВАХ. На рис. 1 показана в разных масштабах вольт-амперная характеристика ЦТДП 5 (см. таблицу), снятая в режиме задания напряжения (кривые I—III). Здесь же приведена расчетная ВАХ (кривая IV). Обсудим их особенности.

Анализ кривой  $I$  на рис. 1 показывает, что на ВАХ данной ЦТДП наблюдается значительный избыточный ток  $I_{ex}$  [8]. Это свидетельствует о том, что ЦТДП, составляющие цепочку, являются джозефсоновскими элементами с непосредственной проводимостью.

Показанную на рис. 1 ВАХ можно разбить на 11 характерных участков (см. кривые II, III), наличие которых обусловлено разницей в величинах критических токов звеньев цепочки. Так как ЦТДП в ней не синхронизированы между собой, то их переход из сверхпроводящего в резистивное состояние происходит последовательно в порядке возрастания критического тока. На каждом из указанных участков ВАХ видна особенность — отрицательное дифференциальное сопротивление (ОДС), которое наблюдалось также в ЦТДП 6 и 7, а в ЦТДП 1—4 отсутствовало.

ОДС возникает, по нашему мнению, из-за значительной емкости переходов, которая, будучи рассчитана по формуле для плоского конденсатора, составляет  $C \approx 10^{-14}$  Ф. Если предположить, что  $C$  и  $R$  для всех переходов ЦТДП одинаковы, то параметр Маккамбера—Стюарта [7], определяющий влияние емкости на электрофизические свойства джозефсоновских переходов,  $\beta \approx 0.6$  для каждого ЦТДП в цепочках 5—7.

В ЦТДП 1—4  $\beta \approx 0.3$ , ОДС отсутствует, а ВАХ, как и в [2], отличается от соответствующей характеристики одиночного перехода лишь масштабом. Вид ВАХ ЦТДП при напряжениях, близких к нулю, внешне напоминает хорошо известный флуктуационный загиб. Однако причиной его в отличие от [8] не может являться воздействие внешних и внутренних флуктуаций. Загиб на ВАХ одиночных ТДП составляет по нашим данным 0.5—1 мкА, в то время как на ВАХ ЦТДП с тем же сопротивлением и в тех же условиях он равен 50—70 мкА.

По нашему мнению, вид ВАХ ЦТДП 1—4 также связан с разбросом величин  $I_c$  отдельных звеньев. Однако в этом случае разброс не превышает величины размаха флуктуационного тока [8]. Переход ЦТДП в резистивное состояние происходит плавно, так как особенности ВАХ, обсуждавшиеся выше (рис. 1), в ЦТДП 1—4 сглажены флуктуациями.

Из кривой III на рис. 1 видно, что ВАХ имеет наклон на каждом из участков, соответствующем приращению критического тока  $\delta I_c^n$ , увеличивающийся с ростом номера участка  $n$ . Существование наклона свидетельствует о наличии в системе последовательного сопротивления, представляющего собой сумму нормальных сопротивлений ТДП, уже перешедших из сверхпроводящего состояния в резистивное. При этом участок с  $n=1$  выражен слабее, чем последующие. Это связано с тем, что при его записи последовательно с переходом включено лишь малое сопротивление источника напряжения.

ВАХ ЦТДП 5—7 типичны для систем, в которых наблюдаются релаксационные колебания. В [9] предложена модель и рассчитана форма ВАХ одиночного перехода. Используя подход, развитый в этой работе, мы провели расчет ВАХ ЦТДП 5, его результаты показаны на рис. 1 (кривая IV). При этом сопротивления ТДП, составляющих цепочку, считались одинаковыми и равными 21 Ом. В расчет входили также экспериментальные значения критических токов  $I_c^n$  и токов возврата  $I_m^n$ , а также сопротивление источника смещения. Из рис. 1 видно, что полученная таким образом ВАХ правильно описывает все особенности экспериментальной кривой.

Остановимся теперь более подробно на определении емкости звеньев ЦТДП. Как уже говорилось, она определялась по формуле для плоского конденсатора, что, однако, не всегда удобно, поскольку для этого необходимо с достаточной точностью знать площадь перехода. В то же время по виду ВАХ можно определить емкость джозефсоновского перехода независимым образом. Согласно [10], параметр Маккамбера—Стюарта

$$\beta^*(\alpha) = \frac{2(1 - \alpha^2)^{1/2}}{\alpha^2},$$

где  $\alpha = I_m/I_c$ .

Вычисленные таким образом величины  $\beta^*$  для разных ТДП, составляющих цепочку, не совпадают друг с другом, поэтому они были усреднены по всем звеньям ЦТДП. В таблице приведены средние величины  $\beta^*$ . Видно, что определенные различными способами  $\beta$  и  $\beta^*$  хорошо коррелируют друг с другом.

Обсудим теперь изменения, которые претерпевают ВАХ ЦТДП при воздействии на них СВЧ излучения. Для цепочек с различными  $\beta$  эти изменения существенно отличаются друг от друга. Так, при  $\beta \leq 0.3$  влияние СВЧ излучения на ВАХ ЦТДП аналогично влиянию, которое оно производит на одиночные ТДП. Разница здесь, как и ранее, только в масштабах.

Иной характер имеют изменения ВАХ под воздействием СВЧ излучения для цепочек с  $\beta \geq 0.6$ . Рассмотрим это на примере рис. 2, где показано семейство ВАХ ЦТДП 7, снятое в присутствии СВЧ излучения с частотой 76 ГГц. Исходная мощность последнего составляла  $\sim 10$  мкВт на фланце макета; цифры у кривых соответствуют ее ослаблению в децибеллах.

Из рис. 2 видно, что по характеру воздействия СВЧ излучения ВАХ можно разделить на две зоны. В первую из них входят участки с  $n=1-5$ , во вторую — с  $n=6-10$ . В первой зоне даже минимальная мощность СВЧ приводит к синхронизации переходов (кривая 14) и затем к появлению области ОДС, общей для всей зоны (кривая 13). Дальнейший рост мощности сначала увеличивает ОДС (кривые 12—10), а затем отрицательное сопротивление уменьшается по величине и при ослаблении (7 дБ) исчезает полностью. Рост мощности уменьшает также критический ток, который полностью отсутствует при ослаблении 0 дБ.

Изменения, происходящие во второй зоне ВАХ, слабее. Исчезновение участков с ОДС и синхронизация переходов здесь происходит лишь при относительно больших мощностях СВЧ (ослабление 6 дБ для  $n=9, 10$ ). В целом следует отметить, что воздействие излучения убывает с ростом номера звена цепочки. Обсудим возможные причины этого эффекта.

Наблюдаемая нами вольт-амперная характеристика является динамической, что связано с особенностями поглощения мощности СВЧ отдельными ТДП в цепочке. Излучение воздействует лишь на переходы, уже находящиеся в резистивном состоянии. Поэтому при появле-

нии тока нормальных электронов в еще одном звене цепочки мощность, поступающая на ЦТДП, делится между большим числом переходов. Следовательно, ее влияние на каждый из них уменьшается с ростом  $n$ .

Представляет интерес также механизм образования ОДС в первой зоне ВАХ под действием СВЧ излучения (рис. 2). Как уже говорилось, в этом случае ряд звеньев ЦТДП синхронизируется и они ведут себя как единый переход. При этом их суммарная емкость оказы-

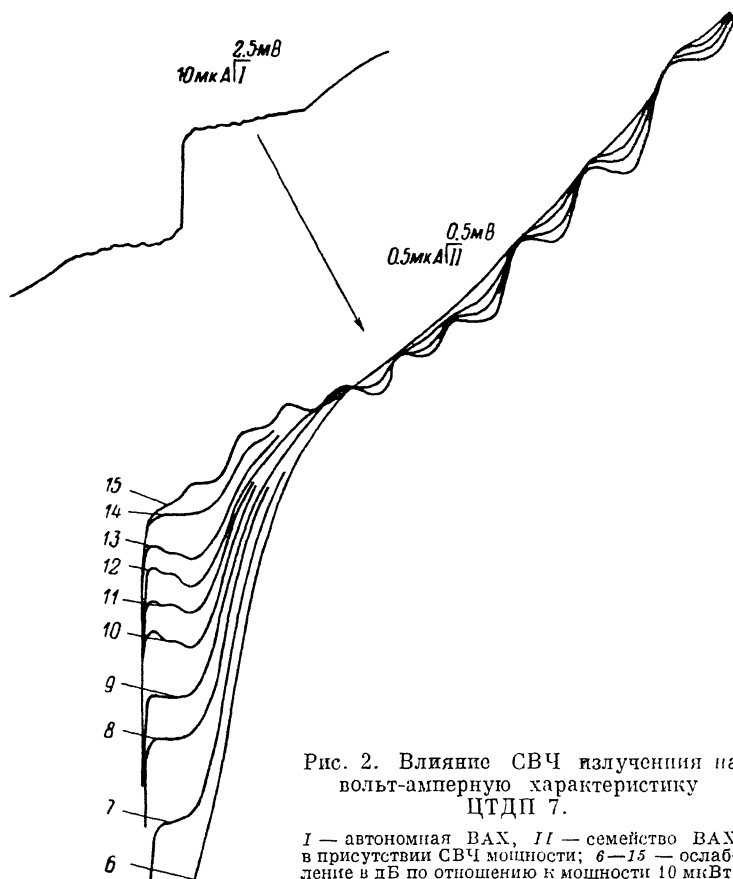


Рис. 2. Влияние СВЧ излучения на вольт-амперную характеристику ЦТДП 7.

$I$  — автономная ВАХ,  $II$  — семейство ВАХ в присутствии СВЧ мощности;  $6-15$  — ослабление в дБ по отношению к мощности 10 мВт.

вается в  $k$  раз меньше емкости каждого из переходов ( $k$  — число синхронизованных ТДП). В то же время сопротивление синхронизованных звеньев возрастает в  $k$  раз. Такая ситуация должна привести к возникновению ОДС, о чем свидетельствует возрастание в  $k$  раз параметра Маккамбера—Стюарта.

На основе проведенного исследования можно производить отбор ЦТДП с параметрами, оптимальными для применения в качестве нелинейных элементов джозефсоновских детекторов и смесителей.

Авторы выражают признательность В. И. Махову, А. Л. Гудкову и В. Н. Лаптеву за предоставление ЦТДП, Е. М. Гершензону и В. С. Эткину за полезные замечания.

#### Список литературы

- [1] Гудков А. Л., Лихарев К. К., Махов В. И. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 23. С. 1423—1426.
- [2] Гудков А. Л., Куприянов М. Ю., Лихарев К. К. // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. Вып. 7. С. 319—332.
- [3] Гудков А. Л., Куликов В. А., Лаптев В. Н. и др. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. Вып. 18. С. 1109—1112.
- [4] Гудков А. Л., Ильин В. А., Лаптев В. Н. и др. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 11. С. 2261—2263.
- [5] Гудков А. Л., Лаптев В. Р., Розанов С. Б. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 11. С. 991—997.
- [6] Артеменко С. Н., Волков А. Ф., Зайцев А. В. // ЖЭТФ. 1979. Т. 76. Вып. 5. С. 1816—1833.

- [7] Лизарев К. К. Введение в динамику джоузефсоновских переходов. М.: Наука, 1985. 320 с.  
 [8] Лизарев К. К., Ульрих Б. Т. Системы с джоузефсоновскими контактами. М., 1978. 446 с.  
 [9] Taur Y., Richards P. L. // J. Appl. Phys. 1975. Vol. 46. N 4. P. 1793—1797.  
 [10] Zappe H. H. // J. Appl. Phys. 1973. Vol. 44. N 3. P. 1371.

Московский государственный педагогический институт им. В. И. Ленина

Поступило в Редакцию 26 мая 1989 г.  
 В окончательной редакции 27 ноября 1989 г.

10; 12

Журнал технической физики, т. 60, в. 4, 1990

© 1990 г.

## ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ С ЭНЕРГОУГЛОВЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

В. В. Зашквара, Б. М. Верменичев, А. Н. Ноеренчук

Анализатор (см. рисунок) построен из двух последовательно расположенных, автономно фокусирующих во втором порядке по углу расходимости пучка заряженных частиц  $\Delta\alpha$  электростатических зеркал — сферического (СЗ) и цилиндрического (ЦЗ). Из точечного источника  $O_1$ , находящегося на оси симметрии в области внутреннего электрода СЗ, в анализатор поступает веерообразный пучок заряженных частиц, средняя плоскость которого  $n\omega'$  перпендикулярна оси симметрии, угол раскрытия пучка в средней плоскости составляет

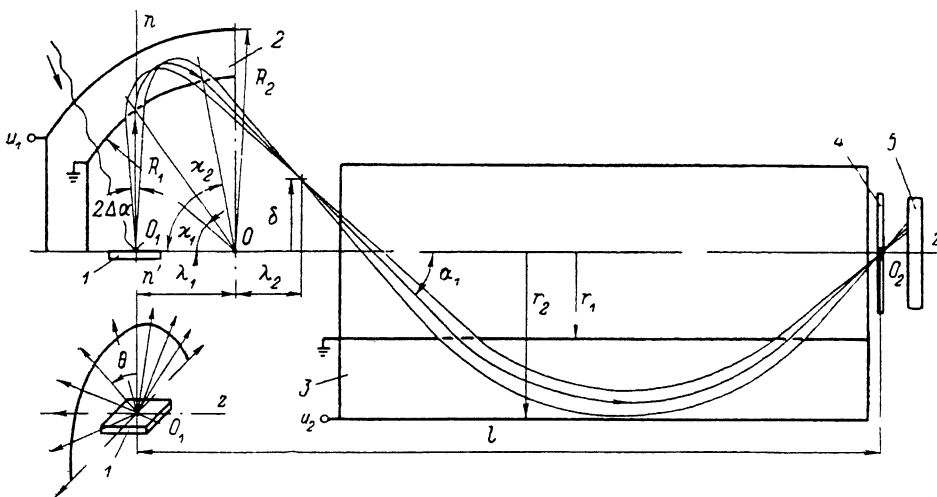


Схема анализатора.

1 — исследуемый образец, 2 — сферическое зеркало (СЗ), 3 — цилиндрическое зеркало (ЦЗ), 4 — приемная диафрагма, 5 — позиционно-чувствительный детектор.

180°. По данным работы [4] в этом случае СЗ осуществляет ахроматическое изображение точечного источника в полукольцо радиуса  $\delta = \mu \cos \alpha_1 \cos \chi_1$ ,  $\mu = R_1/r_1$  в условиях фокусировки второго порядка по углу расходимости  $\Delta\alpha$ . Во втором каскаде анализатора (ЦЗ) промежуточное кольцевое изображение трансформируется в точечное  $O_2$ . Если на входе в анализатор пучок находится в аксиальной плоскости, то при прохождении системы зеркал выполняется условие  $\theta = \text{const}$  вдоль всего тракта; это означает, что начальное распределение заряженных частиц по полярному углу  $\theta$  в системе не искажается и в любом участке спектрального интервала, выделяемого диспергирующим ЦЗ и приемной диафрагмой с круглым отверстием с центром в точке  $O_2$ , можно регистрировать это распределение частиц одновременно по всем  $\theta$  с помощью позиционно-чувствительного детектора и набора радиально к нему расположенных коллекторов. Из рисунка видно, что возбуждаемый лучом первичного