

## ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ПРЕДЕЛ В НЕСТАЦИОНАРНОМ ЭФФЕКТЕ ДЖОЗЕФСОНА

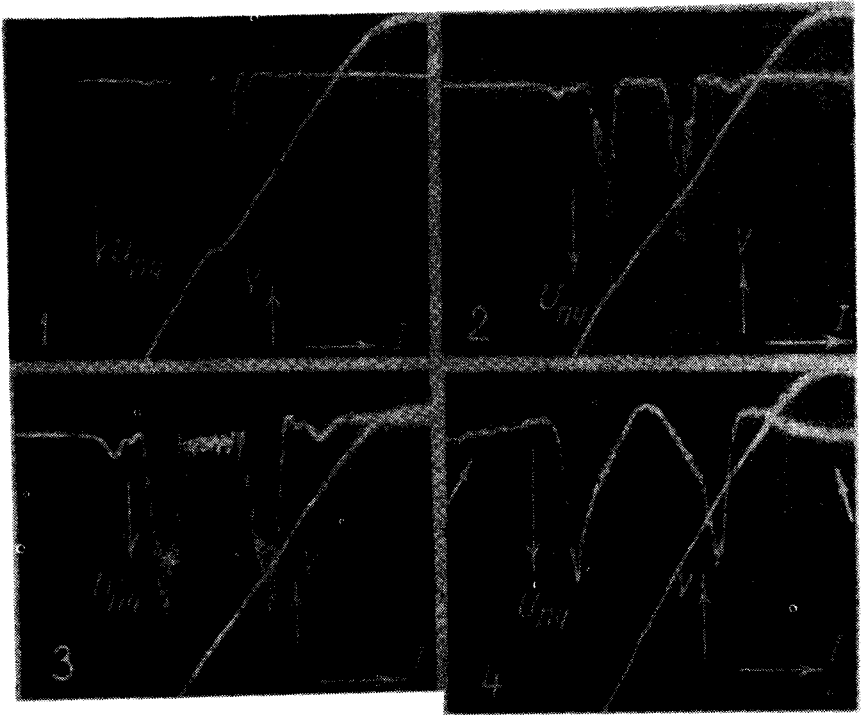
*А.И. Акименко, В.С. Соловьев, И.К. Янсон*

Методом смешения двух СВЧ сигналов в сверхпроводящих точечных контактах Nb–Nb исследуется высокочастотный предел в нестационарном эффекте Джозефсона. Найдено, что возможна генерация до 240 гармоник сигнала клистрона частотой 70 ГГц, что соответствует частоте  $\sim 17$  ТГц.

Один из наиболее важных вопросов в нестационарном эффекте Джозефсона — до каких максимальных частот возможно использование этого эффекта (высокочастотный предел, ВЧ предел).

До сих пор максимальные величины ВЧ предела были получены в работах [1;2] двумя методами. В [1] наблюдались ступеньки от гармоник 70 ГГц сигнала на вольт-амперной характеристике (ВАХ) сверхпроводящих точечных контактов. Достигалось до 117 ступенек (гармоник), что соответствовало  $\sim 8,2$  ТГц (по напряжению, используя известное соотношение  $f = 2e/hV$ , порядка 17 мс). Так как этим энергиям в Nb приблизительно соответствует конец фононного спектра, то авторы [1] указывают на необходимость более последовательного учета электрон-фононного взаимодействия при выводе зависимости амплитуды тока Джозефсона от напряжения. В [2] наблюдалась первая ступенька на ВАХ при облучении непосредственно высокочастотным сигналом (2,5 ТГц, 5,15 мс). В недавно появившейся работе [3] наблюдался сигнал биений при облучении сверхпроводящего точечного контакта двумя лазерами на частоте

те 31,6 Гц (65 мс), однако авторы не смогли сделать однозначного выбора между тепловым и джозефсоновским механизмами смешения.



$I_{кр} = 60$  мка;  $R_H = 23$  ом;  $P_\Gamma/P_C = 10$  дб: 1.— горизонтальная черта на ВАХ — критический ток; ослабление  $P_\Gamma - 27,3$  дб; цена деления для ВАХ — 2 мв/дел; 2 — ослабление  $P_\Gamma - 18$  дб; цена деления для ВАХ — 2 мв/дел; 3 — 12 дб; 5 мв/дел; 4.— 0 дб; 10 мв/дел; усиление на ПЧ увеличено на 10 дб

Мы использовали для определения ВЧ предела метод, основанный на смешении в сверхпроводящих точечных контактах двух близких по частоте СВЧ сигналов, существенно различающихся по величине (сильный гетеродина и слабый сигнальный). В этом случае два сигнала действуют на ВАХ как один сигнал гетеродина, амплитуда которого модулирована с разностной частотой [4]. Таким образом получаемые на ВАХ ступени будут модулированы с этой частотой по высоте. Даже если ступенька очень мала и размыта флуктуациями, в области ее расположения будет наблюдаться сигнал разностной частоты (промежуточной частоты, ПЧ). Кроме того ПЧ может лежать в МГц-диапазоне, где имеются высокочувствительные приемники. Таким образом, измеряя напряжение смешения, при котором наблюдается сигнал ПЧ, мы можем определить максимальную частоту при которой наблюдается взаимодействие СВЧ гармоники со сверхпроводящим джозефсоновским током.

В эксперименте использовались контакты Nb — Nb при 4,2К, которые были расположены в волноводе и облучались сигналами двух кластеров с частотой 70 Гц, ПЧ (30 МГц) через  $\lambda/4$  коаксиальную линию и

усилитель ПЧ подавалась на один из каналов двухлучевого осциллографа. Одновременно на второй канал с контакта подавалось напряжение смещения  $V$ . Развертка тока смещения осуществлялась с частотой 50  $\mu\text{ц}$  от сети. Таким образом, на экране осциллографа мы видели ВАХ контакта (несколько искаженную на краях) и соответствующий каждому напряжению смещения сигнал ПЧ (см. рисунок).

Контакты имели сопротивление в нормальном состоянии  $R_{\text{н}} \sim 5+40 \text{ ом}$  и характерное напряжение  $I_{\text{кр}} \cdot R_{\text{н}} \sim 0,5 + 2,5 \text{ мв}$  ( $I_{\text{кр}}$  — критический ток). Применение высокоомных контактов позволяет ограничиться невысокими СВЧ мощностями (несколько милливольт) ввиду лучшего согласования на СВЧ и уменьшить возможные эффекты нагрева [5].

На рисунке показано последовательное изменение ВАХ (нижний луч) и сигнала ПЧ с ростом мощности сигнала гетеродина  $P_{\text{Г}}$ . Отношение  $P_{\text{Г}}/P_{\text{с}}$  (где  $P_{\text{с}}$  — мощность сигнала) оставалось неизменным для постоянства глубины модуляции суммарного СВЧ сигнала. Из рисунка (1,2) видно, что при малых мощностях гетеродина различаются пики в отклике ПЧ, соответствующие ступенькам на ВАХ. При более подробном рассмотрении максимальная величина сигнала ПЧ наблюдается, как обычно, между ступенями и падает до нуля при напряжениях смещения соответствующим ступеням (на рисунке (1, 2, 3) сигнал ПЧ не падает до нуля между пиками ввиду инерционности приемника ПЧ при больших масштабах развертки). С увеличением СВЧ мощности пики сливаются, ввиду уменьшения высоты ступенек и размытые их флуктуациями. На рисунке (4) максимальное напряжение, при котором наблюдается сигнал ПЧ, порядка 30  $\text{мв}$ . Следует подчеркнуть, что экспериментально можно проследить за плавным изменением наблюдаемых характеристик во всем интервале изменения мощности СВЧ. При этом положение максимума сигнала ПЧ монотонно сдвигается в сторону больших  $V$  при увеличении мощности СВЧ. Это позволяет исключить тепловой механизм смещения.

При дальнейшем увеличении мощности гетеродина и больших напряжениях смещения появлялся отклик ПЧ другого характера (показан стрелками на рисунке (4)). Величина его была на несколько порядков величины больше и с увеличением напряжения смещения достигала максимума при  $V \sim 100 \text{ мв}$ . При увеличении  $T \rightarrow T_{\text{кр}}$  оба отклика уменьшались по величине и исчезали. Мы считаем, что этот отклик носит тепловой характер ввиду перегрева контакта при больших напряжениях смещения и мощностях СВЧ.

Кроме двух вышеуказанных откликов некоторые контакты давали узкие (по напряжению смещения) пики в ПЧ сигнале при определенных напряжениях смещения (напряжения смещения различны для разных контактов; у контакта на рисунке такого отклика нет). Причина появления этих пиков пока что неясна.

В заключение необходимо отметить, что максимальное напряжение смещения, при котором наблюдался сигнал ПЧ (нетеплового характера) составило  $\sim 35 \text{ мв}$ . Если до таких напряжений выполняется соотношение  $f = \frac{2e}{h}V$ , то это напряжение соответствует частоте  $\sim 240$ -й гармонике 70  $\text{Гц}$  сигнала ( $\sim 17 \text{ Гц}$ ). По энергии это более чем в два раза превышает максимальную энергию фотонов в  $\text{Nb}$ . Так что указанное

авторами [1] взаимодействие вряд ли существенно ослабляет амплитуду сверхпроводящего тока Джозефсона.

Авторы благодарят С.А.Песковацкого за помощь и содействие работе.

Харьковский  
государственный  
научно-исследовательский институт  
метрологии

Поступила в редакцию  
14 апреля 1975 г.

### Литература

- [1] D.G.McDonald, V.E.Köse, K.K.Evenson, I.S.Wells, I.D.Cupp. Appl. Phys. Lett., 11, 121, 1969.
  - [2] D.G.McDonald, K.M.Evenson, I.S.Wells, I.D.Dupp. J. Appl. Phys, 42, 179, 1971.
  - [3] D.G.McDonald, F.R.Perterson, I.D.Cupp, B.L.Danielson, E.G.Johnson. Appl. Phys. Lett., 24, 335, 1974.
  - [4] C.C.Grimes, S.Shapiro. Phys. Rev., 169, 397, 1968.
  - [5] И.К.Янсон. ЖЭТФ, 66, 1035, 1974.
-