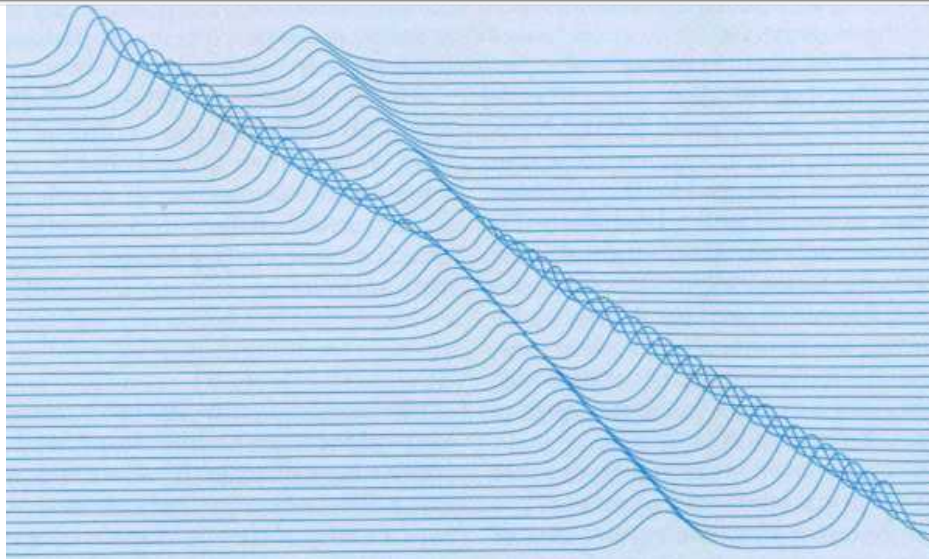


Невзаимное прохождение микроволнового излучения через длинный Джозефсоновский переход

Kirill Fedorov, Hannes Rotzinger and Alexey Ustinov

Physikalisches Institut, AG Ustinov

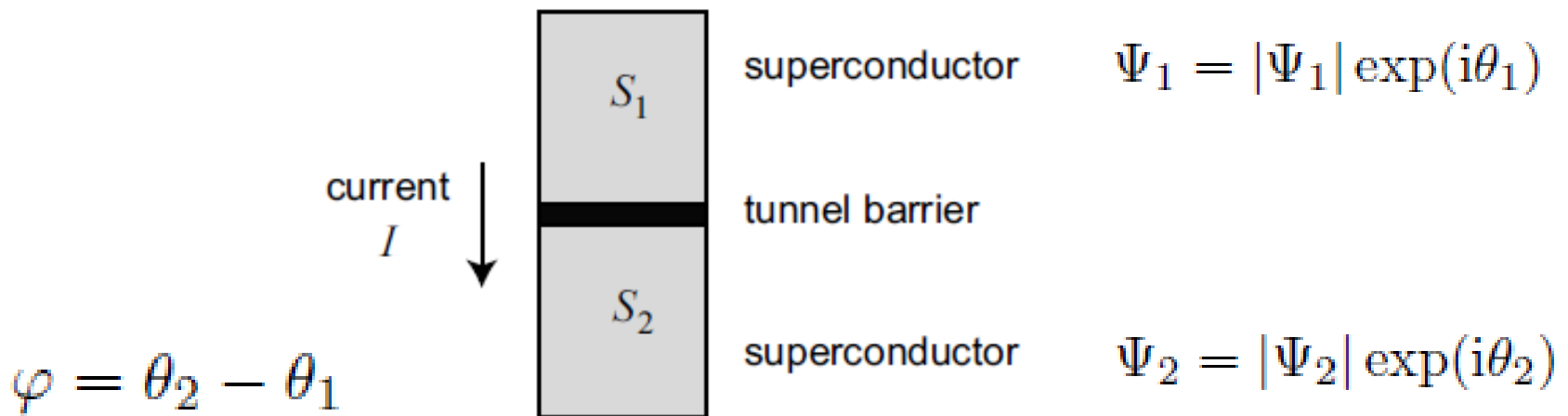


Содержание

- Эффект Джозефсона. Флаксон в длинном Джозефсоновском переходе
- Солитоны!
- «Flux-flow» осциллятор как невзаимная система
- Экспериментальные результаты
- Выводы и вызовы

Эффект Джозефсона

В слабых электрических контактах сверхпроводников возникают принципиально новые явления протекания так называемого сверхтока через контакт – данный эффект носит название эффекта Джозефсона.

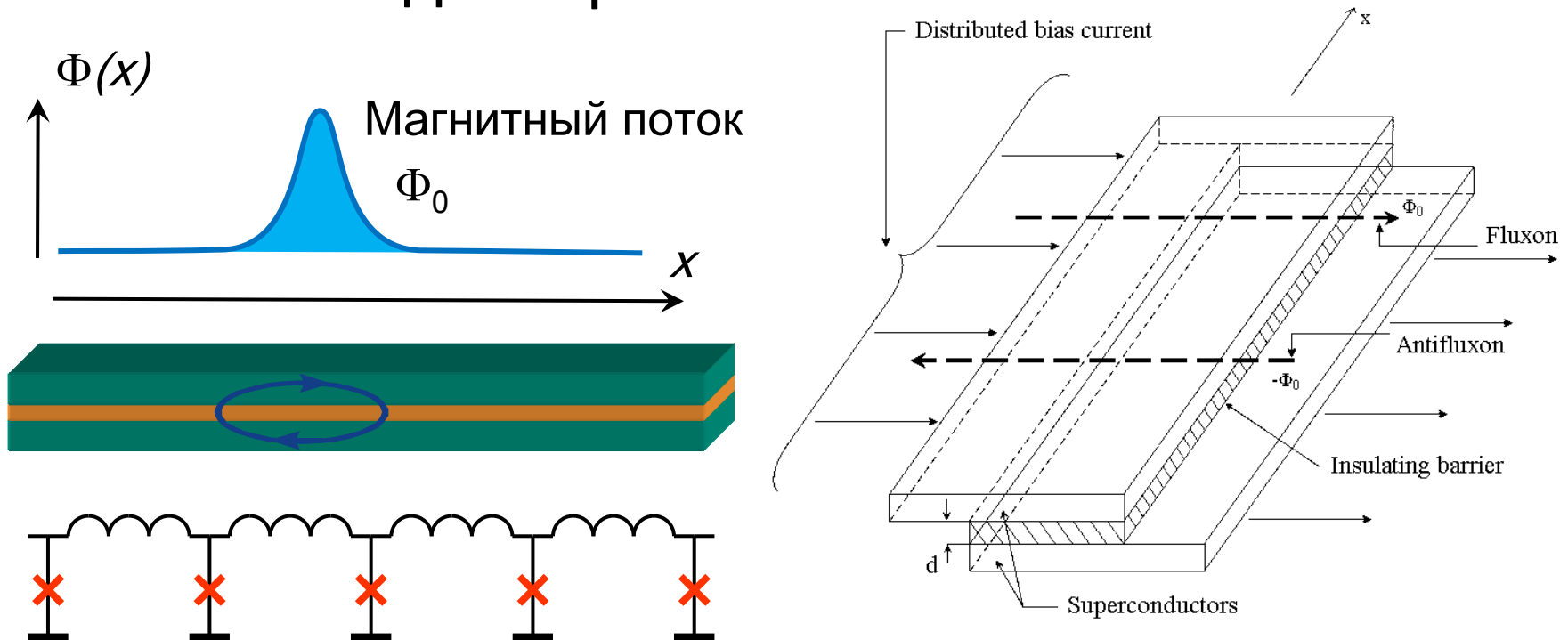


Для слабого электрического контакта сверхпроводников (расстояние между сверхпроводниками $d \leq 10^{-5}$ см) выполняются соотношения :

$$(1) \quad I_s(\varphi) = I_c \sin \varphi$$

$$(2) \quad \frac{d\varphi}{dt} = \frac{2e}{\hbar} V$$

Флаксон в длинном Джозефсоновском переходе



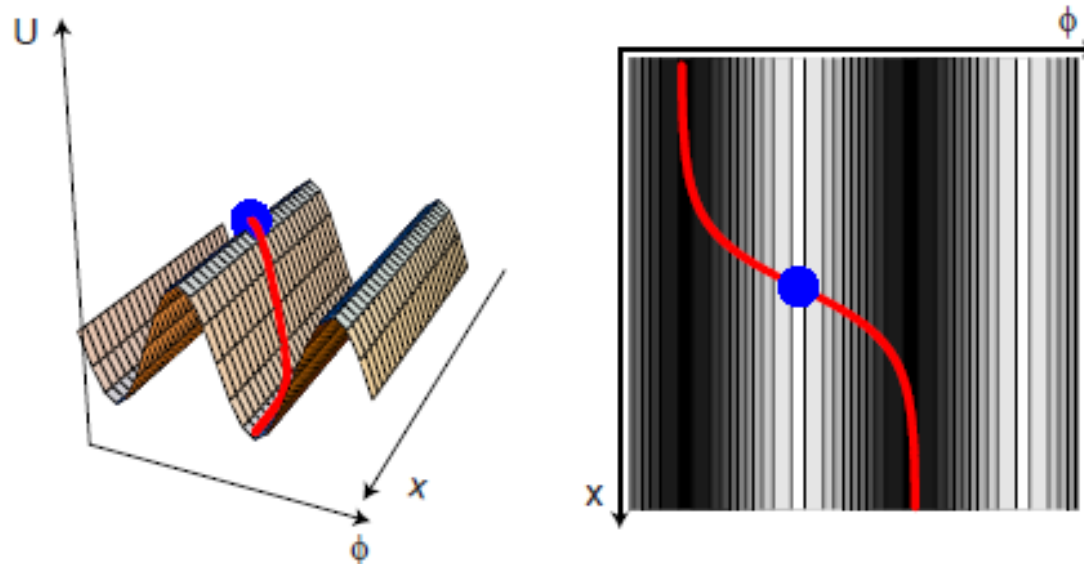
Распределенное уравнение синус-Гордона:

$$\varphi_{xx} - \varphi_{tt} = \sin \varphi + \alpha \varphi_t - \beta \varphi_{xxt} - \gamma$$

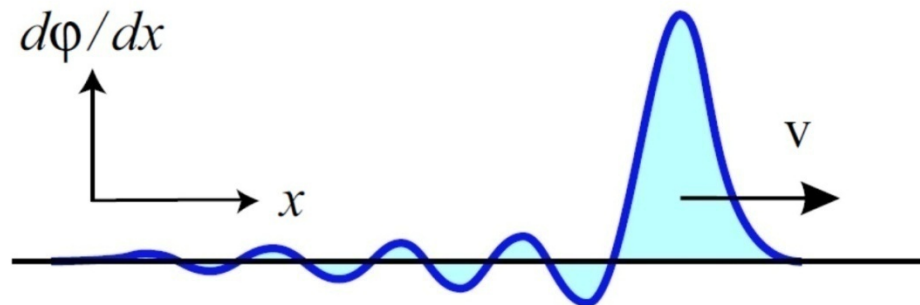
Решение уравнение синус-Гордона в форме топологического солитона:

$$\varphi(x, t) = \varphi_F \equiv 4 \arctan \left[\exp \left(\frac{x - vt - x_0}{\sqrt{1 - v^2}} \right) \right]$$

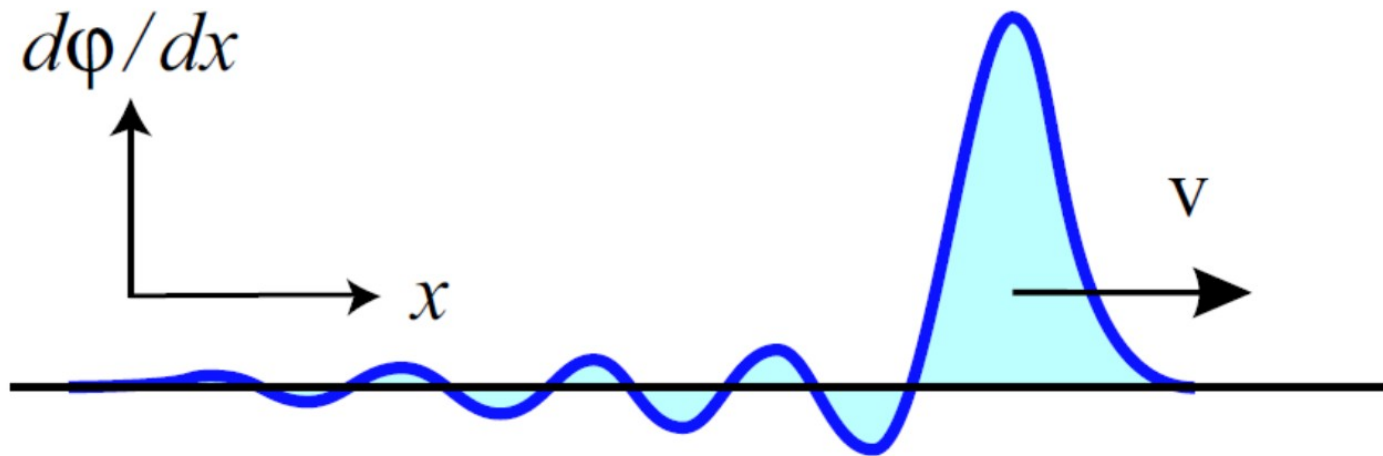
Флаксон



Флаксон на фазовой поверхности выглядит как кинк (антикинк). Производная фазы по координате (что есть магнитное поле внутри перехода) дает нам колоколообразную форму с хвостом плазменных осцилляций.



Флаксон есть солитон!



Солитон – уединенная волна (волновой пакет или импульс) которая сохраняет свою скорость и форму постоянными.

Солитоны образуются за счет компенсации нелинейных и диссипативных эффектов в среде.

1-d
классический
солитон в
канале,
открытый в
1834
Д.С.Расселом:

Описывается
уравнением
Кортвега-де-
Фриза (КдФ).



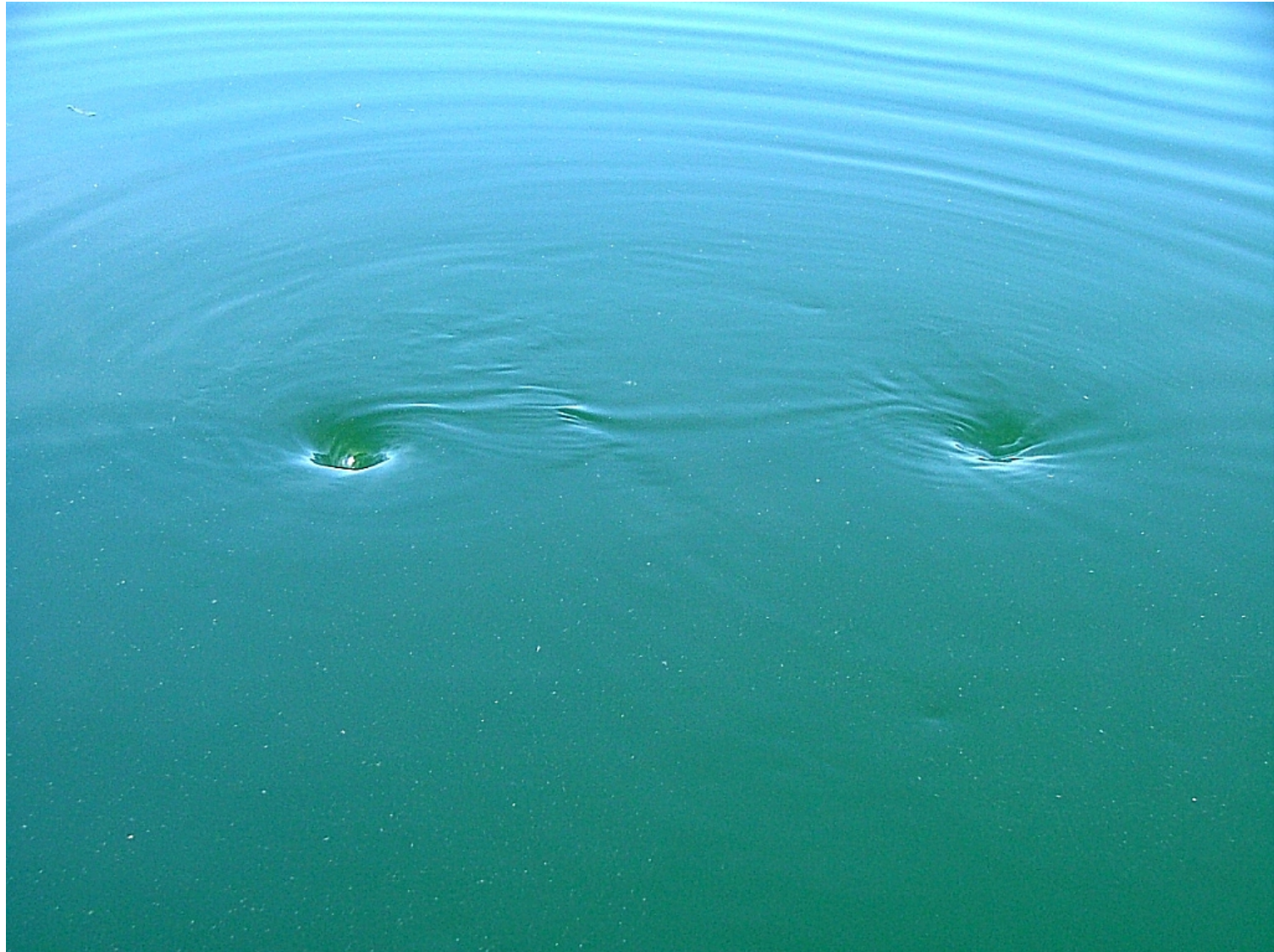
2-d солитоны
на поверхности
мелкой воды:

Обычно
описывается
кноидальным
решением
уравнения КдФ.



3-d Фалько
солитон в
бассейне:

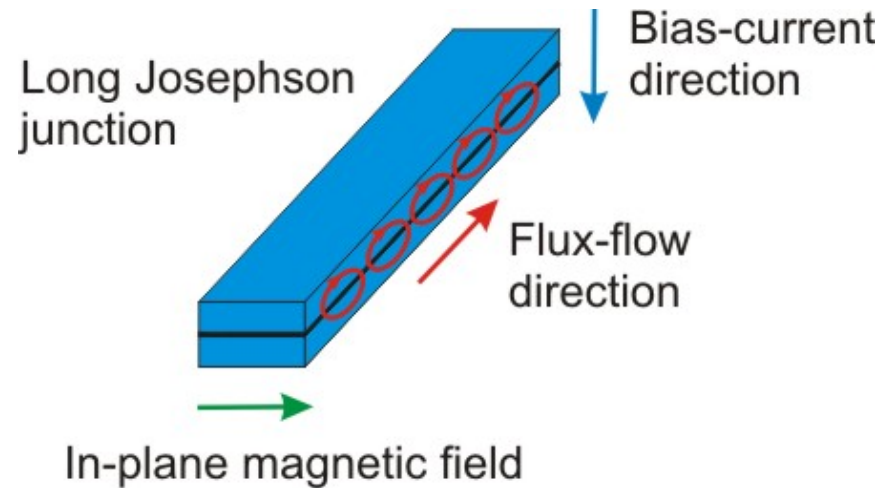
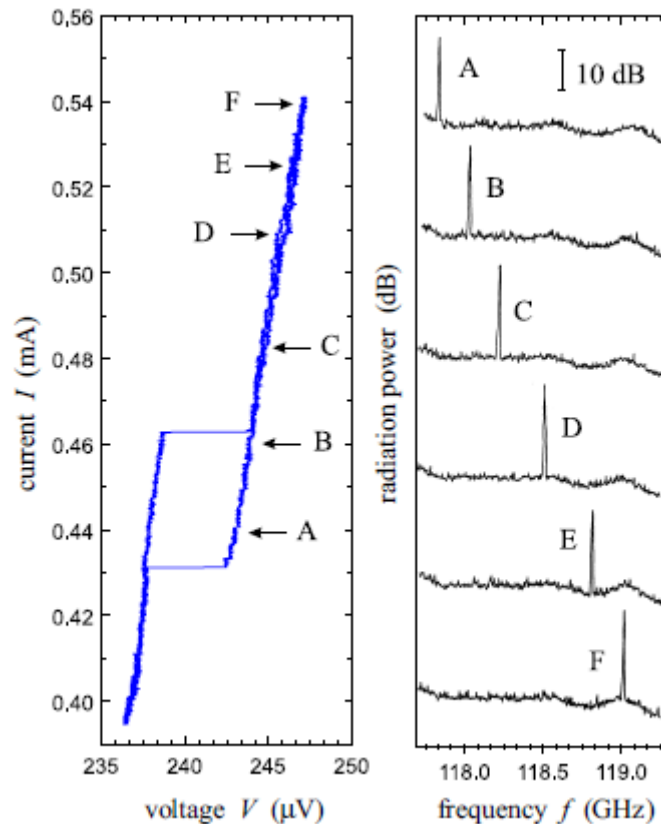
Два вихря
связаны друг
с другом
турбулентны
м каналом
под водой и
двигаются
как единое
целое.



“Morning Glory
Clouds”,
Австралия,
побережье:

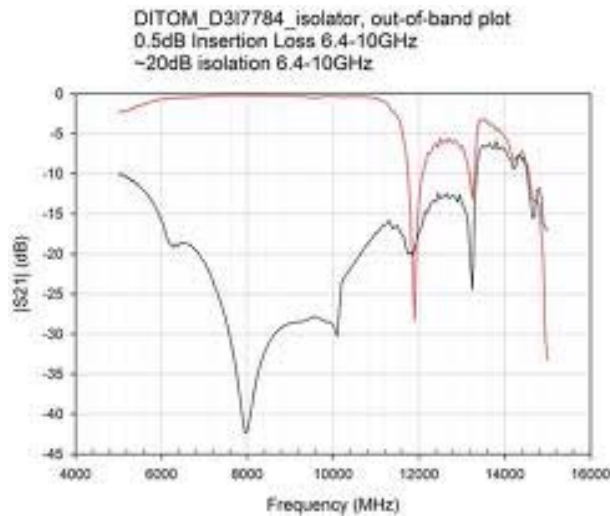


«Flux-flow» режим в длинном Джозефсоновском переходе



«Flux-flow» частота излучения чрезвычайно высока – от 100 ГГц до 1.4 ТГц в зависимости от материала сверхпроводника

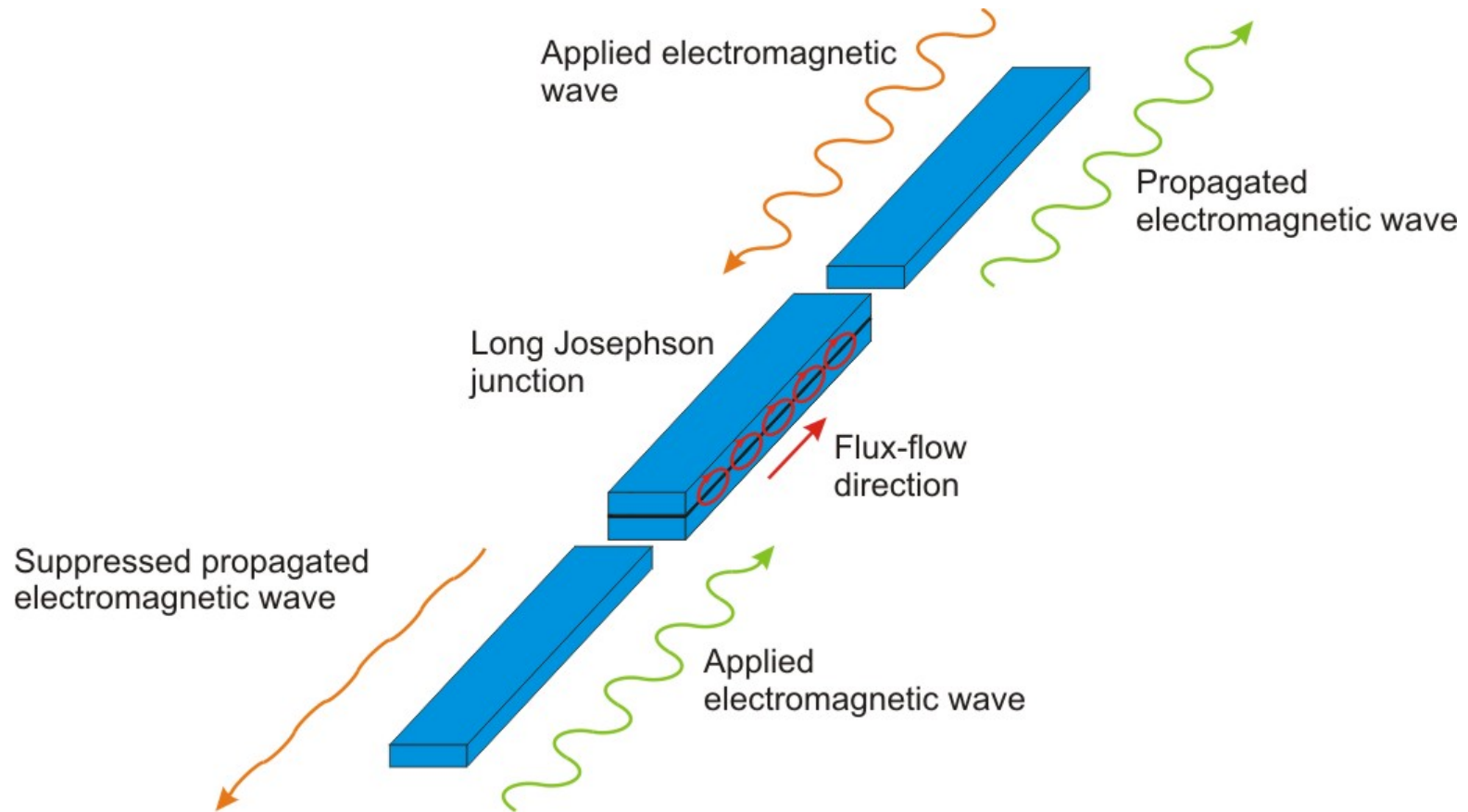
Микроволновые изоляторы



Изолятор – невзаимное устройство, с несимметричной матрицей рассеяния. Идеальный изолятор передает всю мощность с порта 1 на порт 2, но поглощает всю мощность входящую с порта 2.

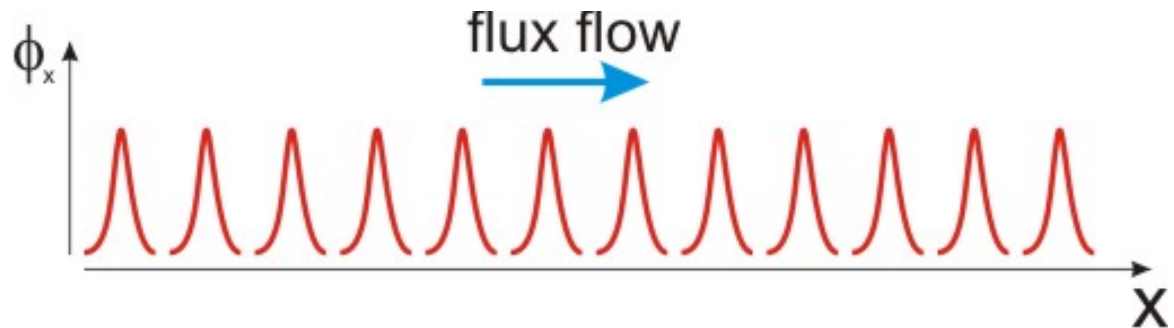
Громоздкие. Дорогие. Особенно экранированные. Возможно «on-chip»?

«Flux-flow» осциллятор как невзаимное микроволновое устройство

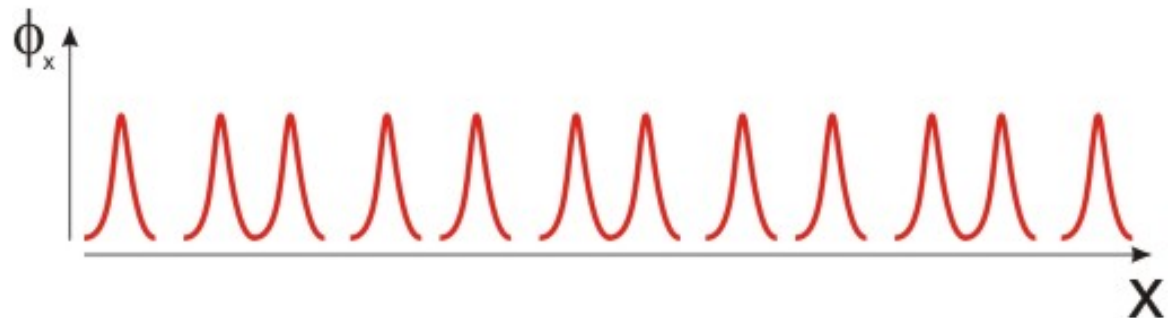


Хорошо различимые флаксоны

Однородная цепочка вихрей в отсутствие внешнего сигнала:

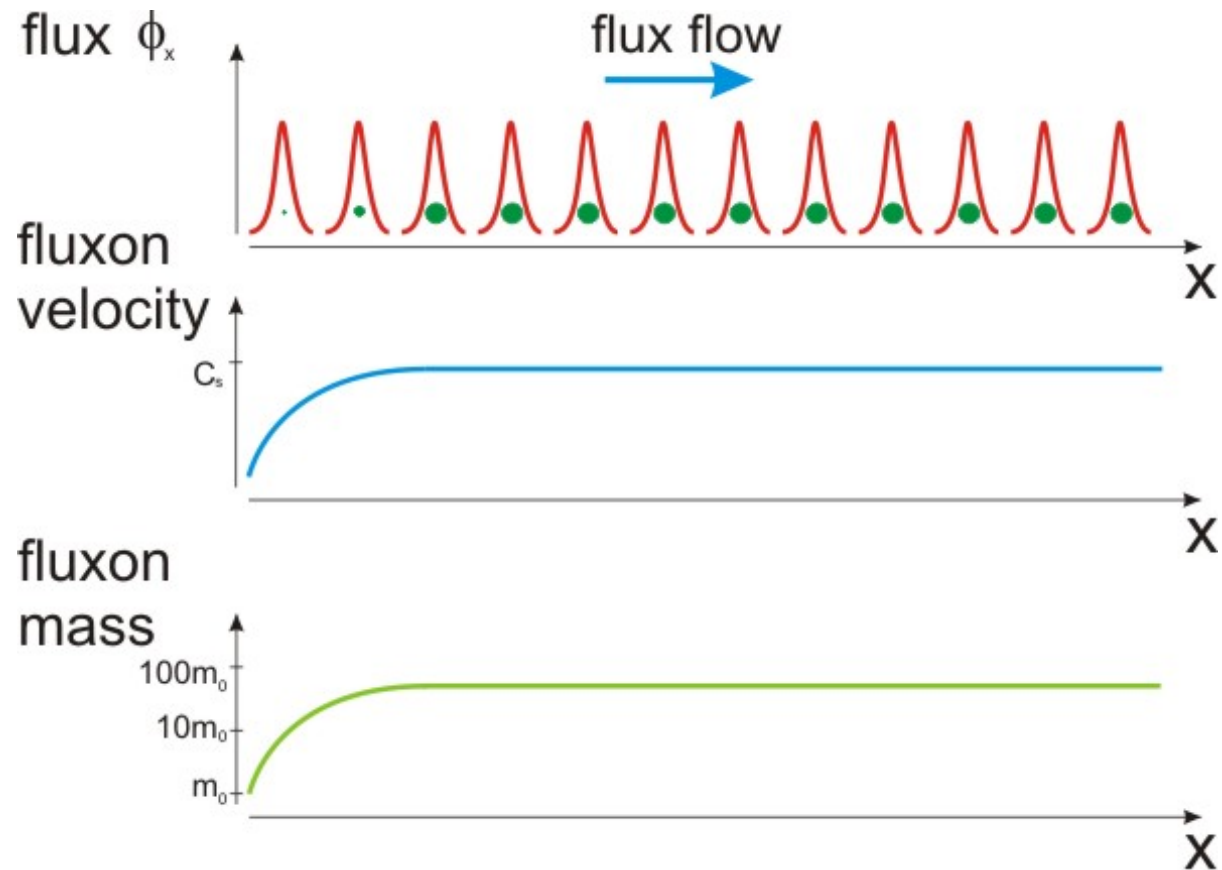


Модулированная внешним сигналом цепочка вихрей:



Полезный сигнал переносится модуляцией плотности вихрей

Невзаимная физика «flux-flow» режима

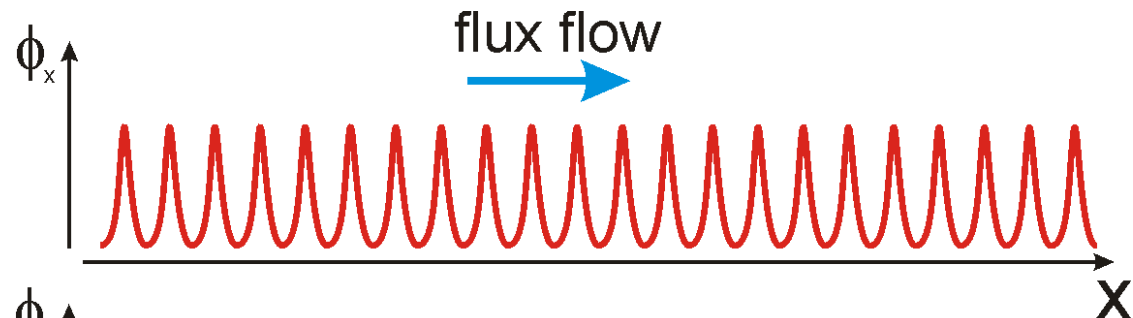


Быстрее флуксон
– тяжелее.

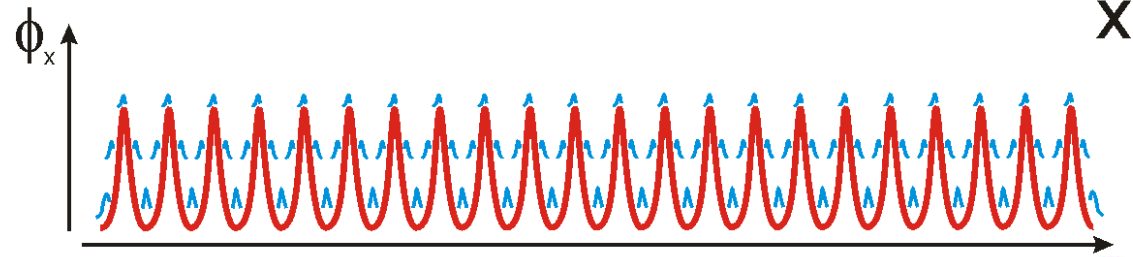
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_{fluxon}}{c_s} \right)^2}}$$

Кноидальная волна

Однородная волна в
отсутствие внешнего
сигнала:



Внешний сигнал
переносится малыми
осцилляциями фазы по
верху кноидальной
волны (идея Марио
Салерно):

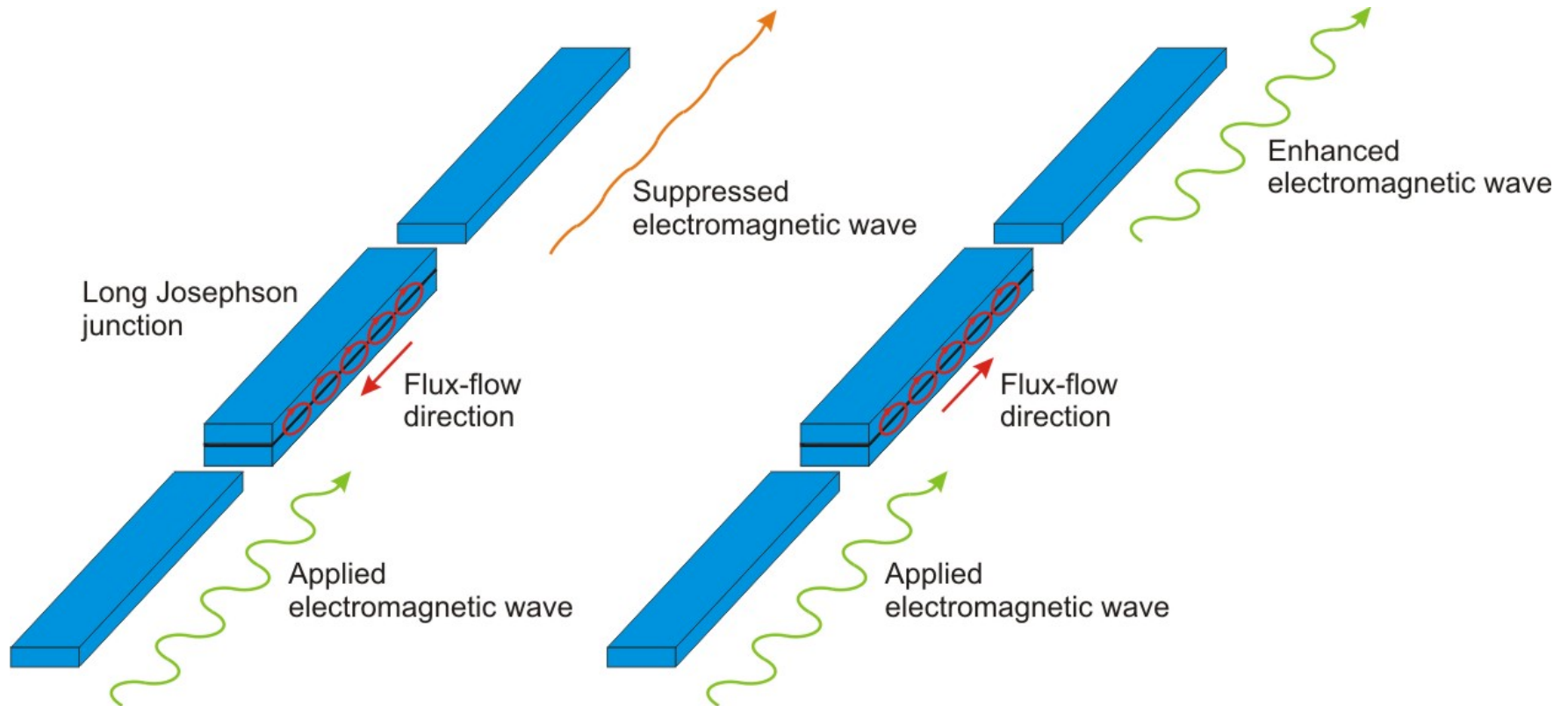


Интуитивное описание – очередь людей движущаяся в
одном направлении:

- Легко двигаться в направлении общего движения
 - Тяжело двигаться в противоположном направлении.
- Люди выталкивают вас!



Альтернативный эксперимент



Дизайн образца

Ширина перехода, $W = 2 \mu\text{m}$

Длина перехода, $L = 200 \mu\text{m}$

Нормальное сопротивление, $R_N \approx 0.2 \text{ Ohm}$

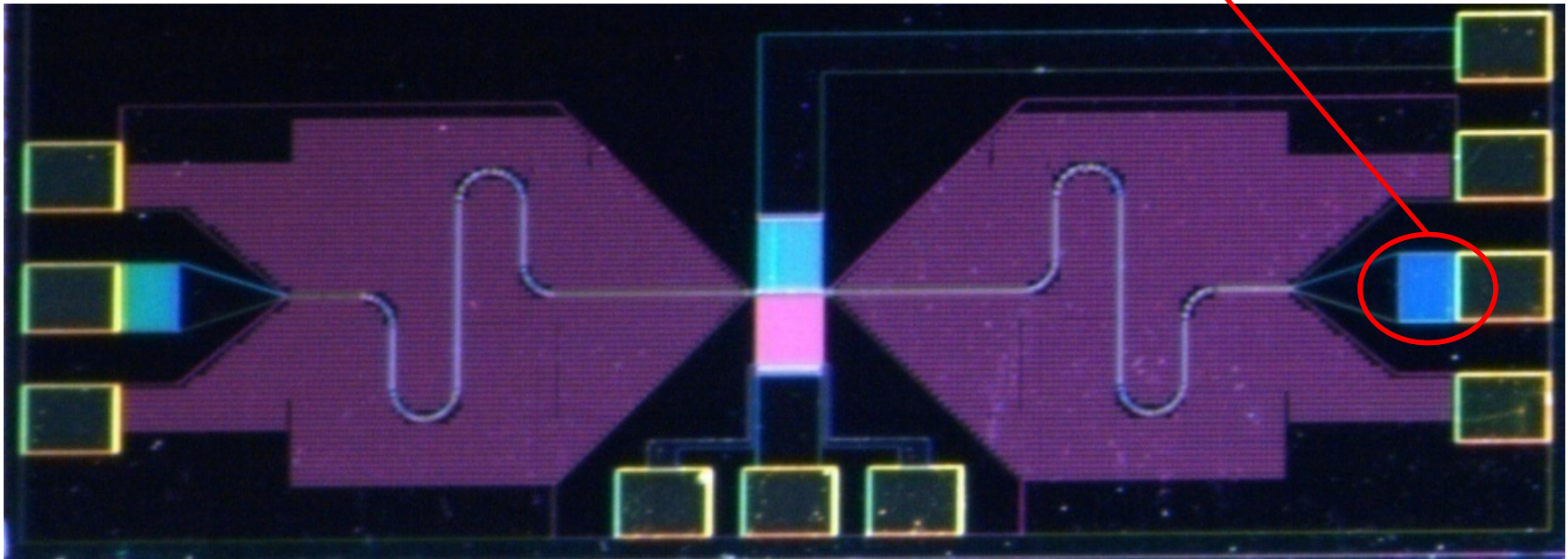
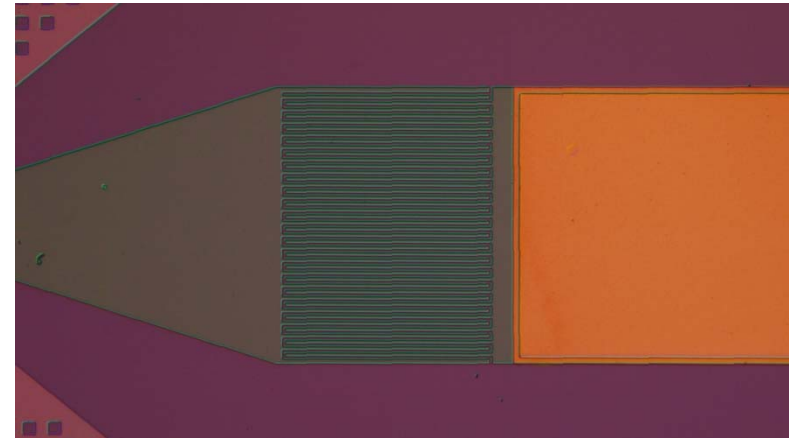
Оценочная плотность крит. тока, $j_c \approx 1 \text{ kA/cm}^2$

Оценочная плазменная частота, $\nu_p \approx 124 \text{ GHz}$

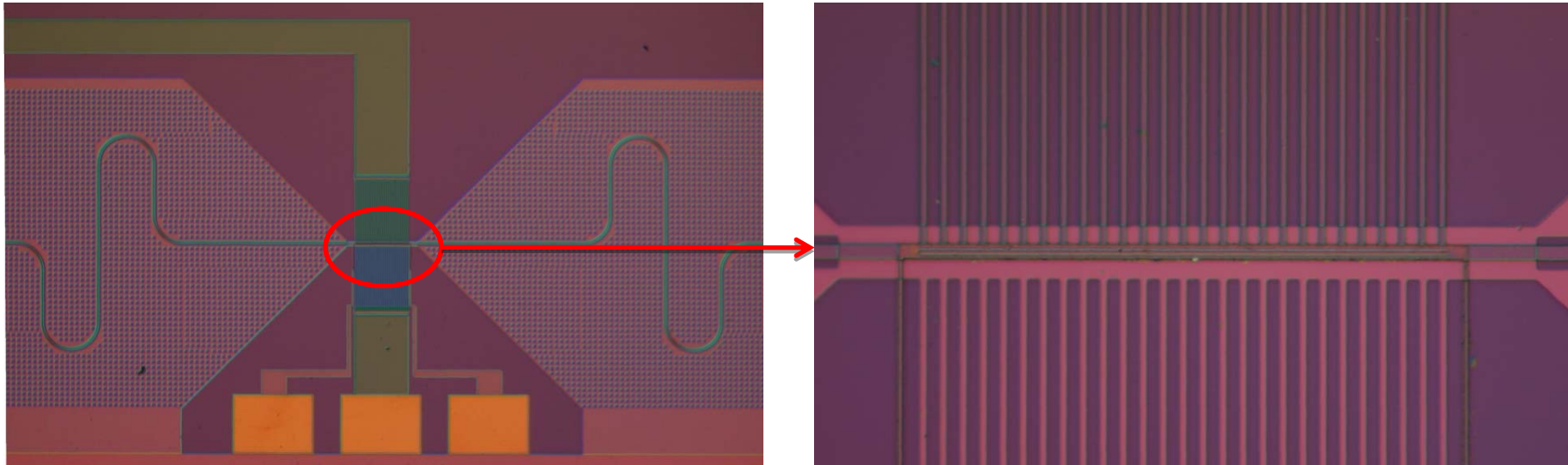
Джозефсоновская глубина проникновения, $\lambda_J \approx 11 \mu\text{m}$

Нормированная длина = 18.2

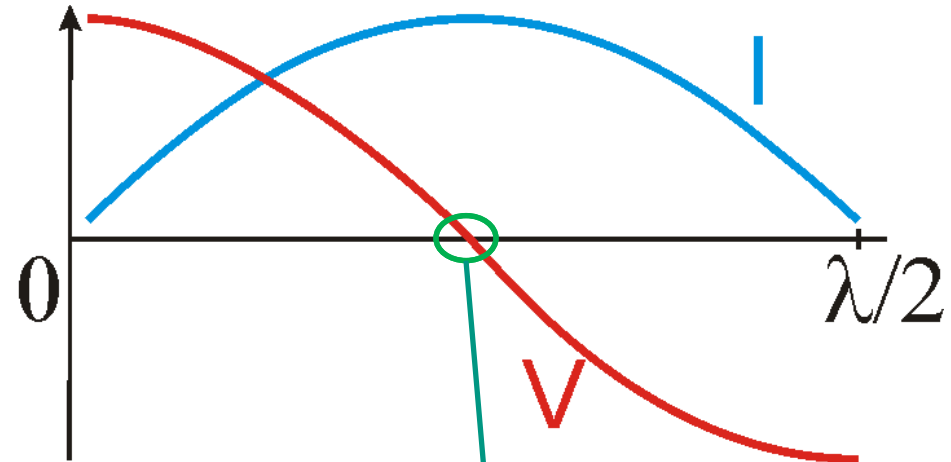
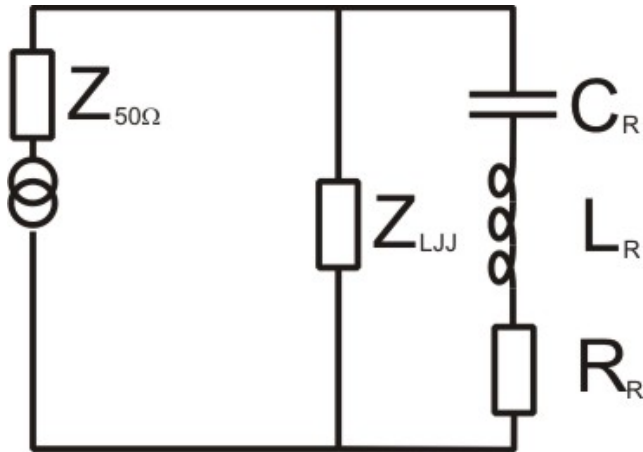
Оценочная величина затухания, $\alpha = 0.1$



Область длинного Джозефсоновского перехода:

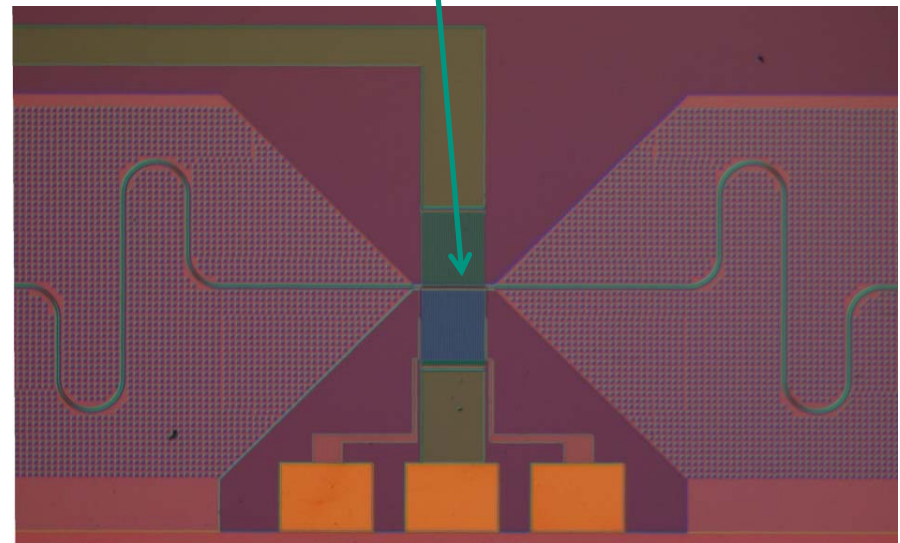


Токовые электроды выполнены в виде тонких «пальцев» чтобы обеспечить изоляцию от микроволнового излучения и создать равномерное распределение тока через переход.



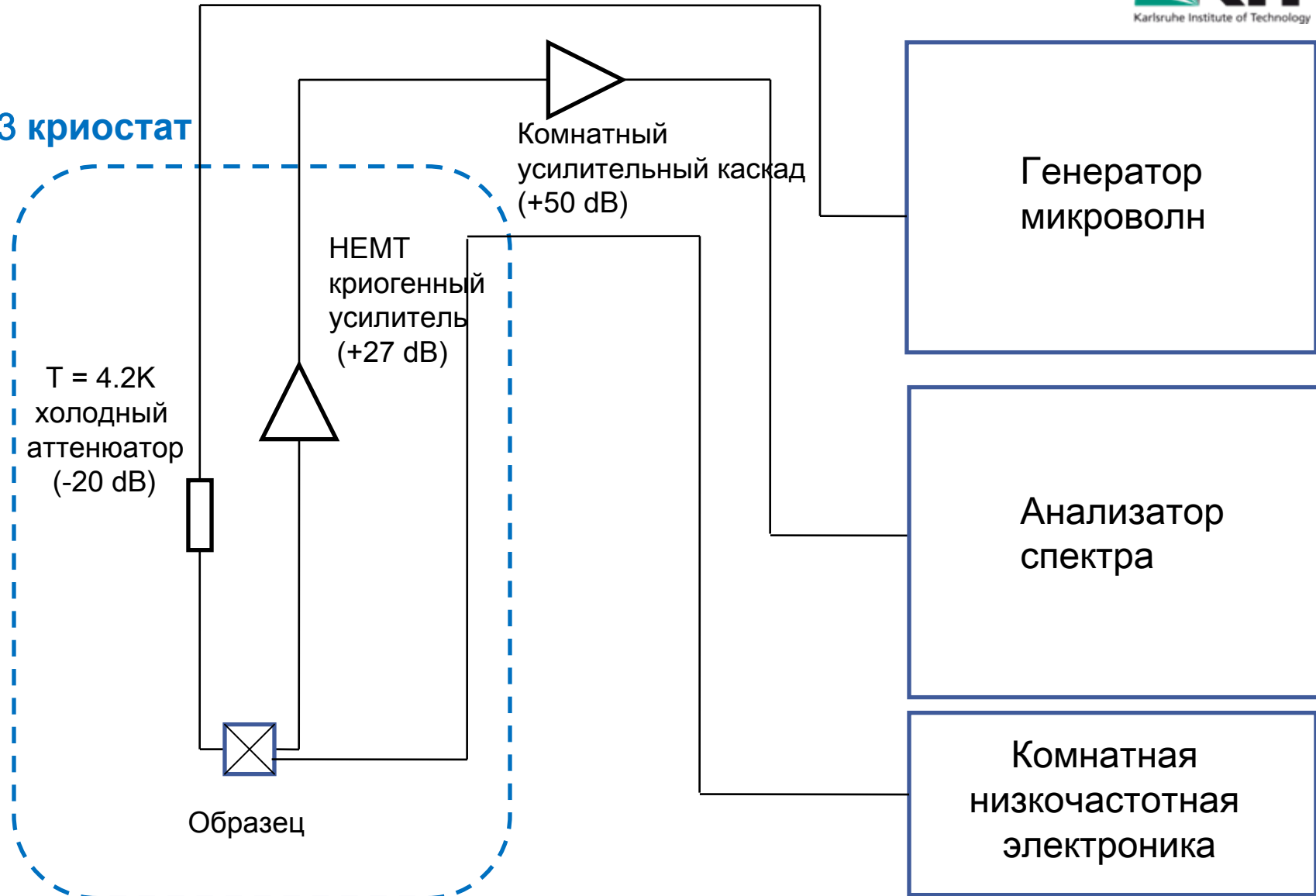
Чтобы согласовать планарный резонатор со встроенным длинным Джозефсоновским переходом с $50\ \Omega$ внешней линией необходимо выполнить следующее условие на добротность резонатора Q_R и сам импеданс переход.

$$Q_R = \sqrt{\frac{Z_{50\Omega}}{Z_{LJJ}}}$$



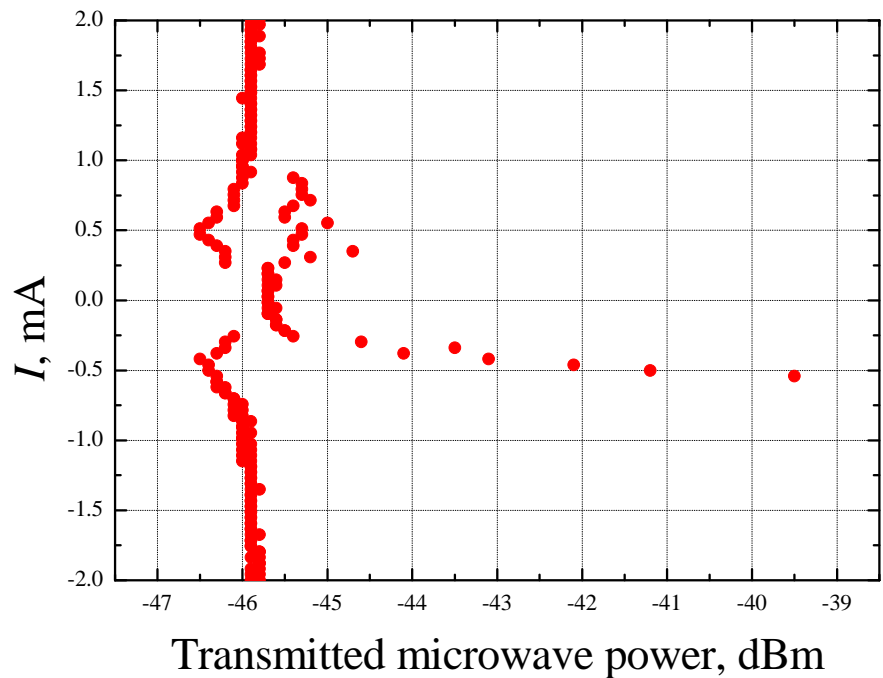
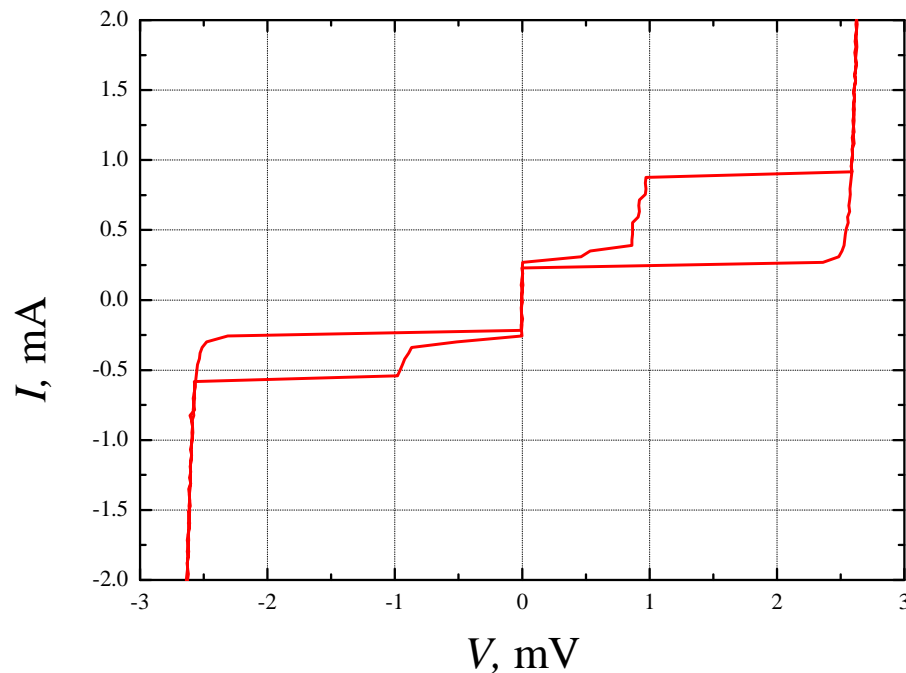
Экспериментальная схема

He-3 криостат



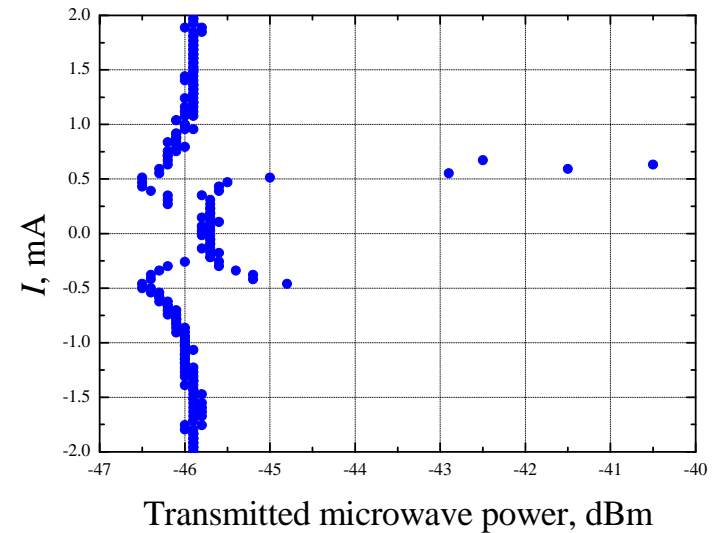
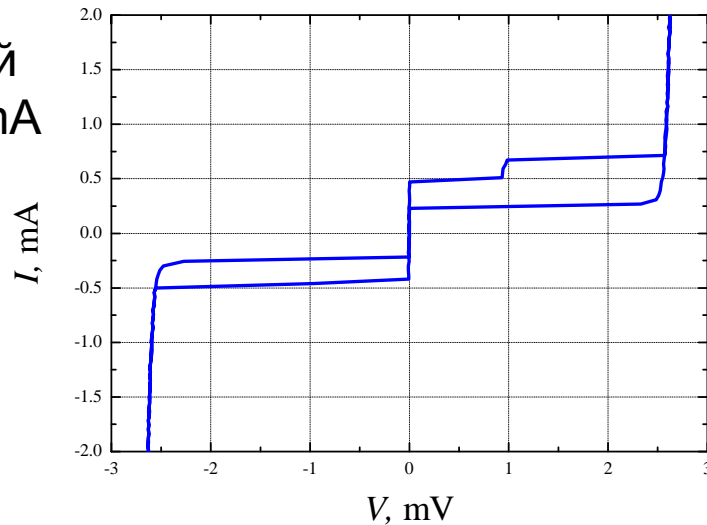
Экспериментальные результаты

Усиленное прохождение микроволн через Джозефсовский переход на частоте $\nu = 10$ GHz, $P \approx -50$ dBm, $T_{\text{ambient}} = 4.2$ K, ток контрольной линии = 2.54 mA.

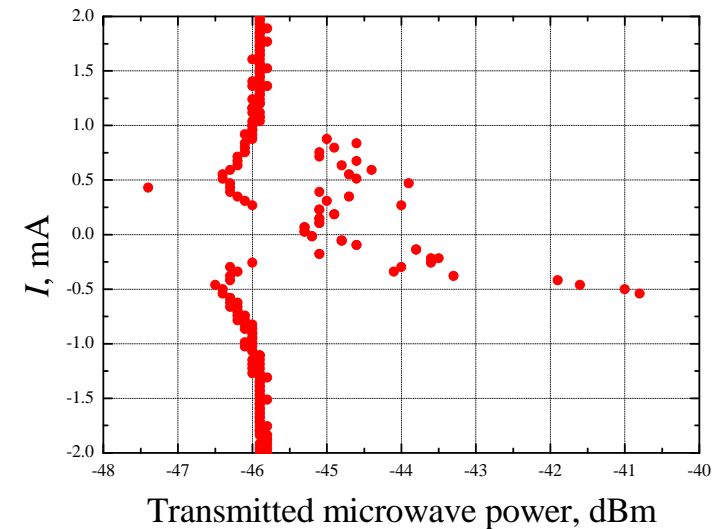
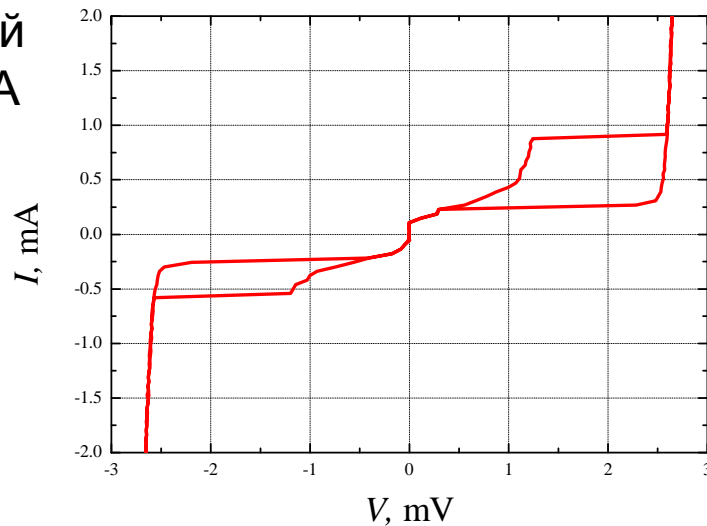


Сравнение точек симметрии

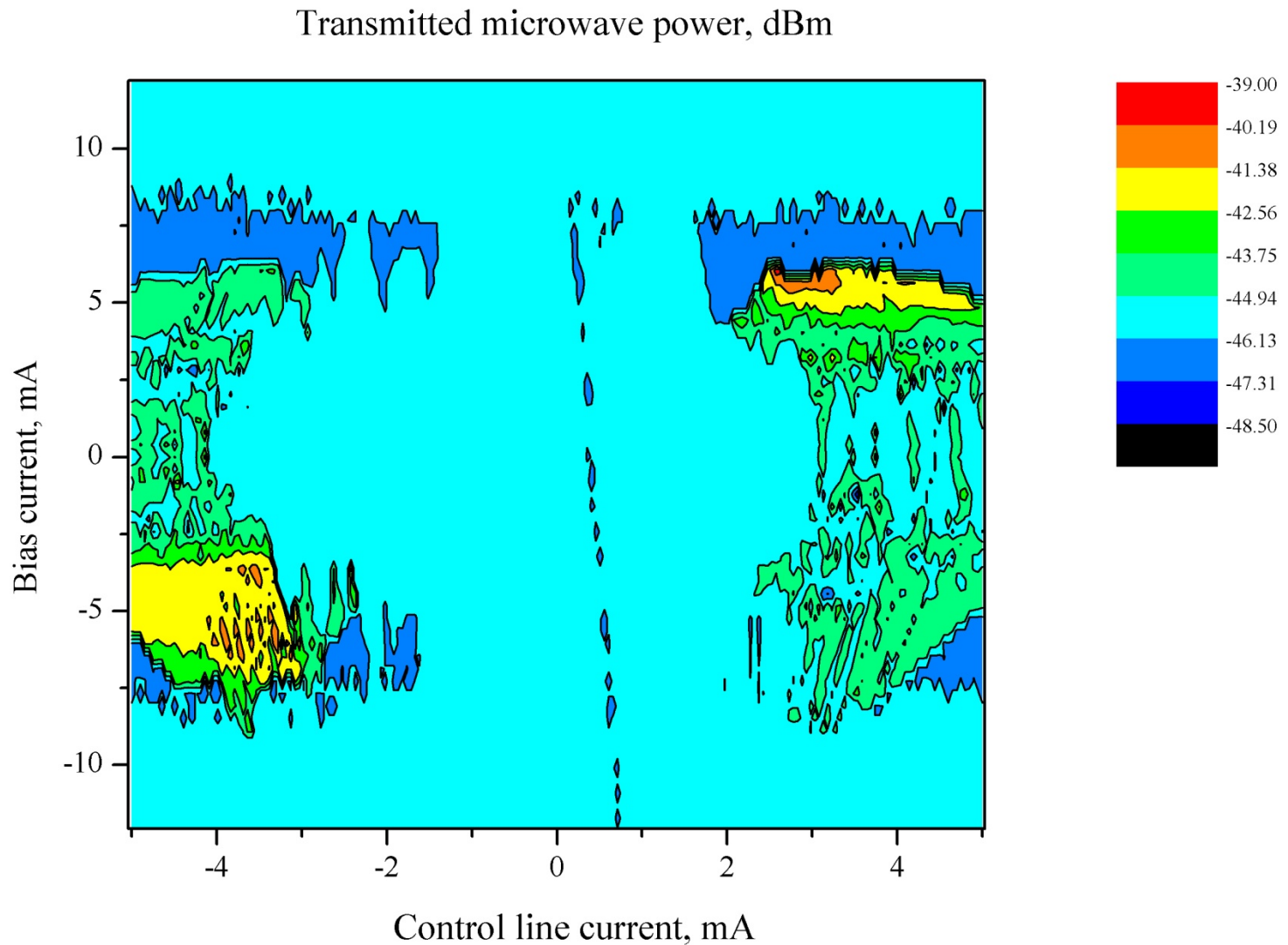
Ток контрольной
линии = - 3.14 mA



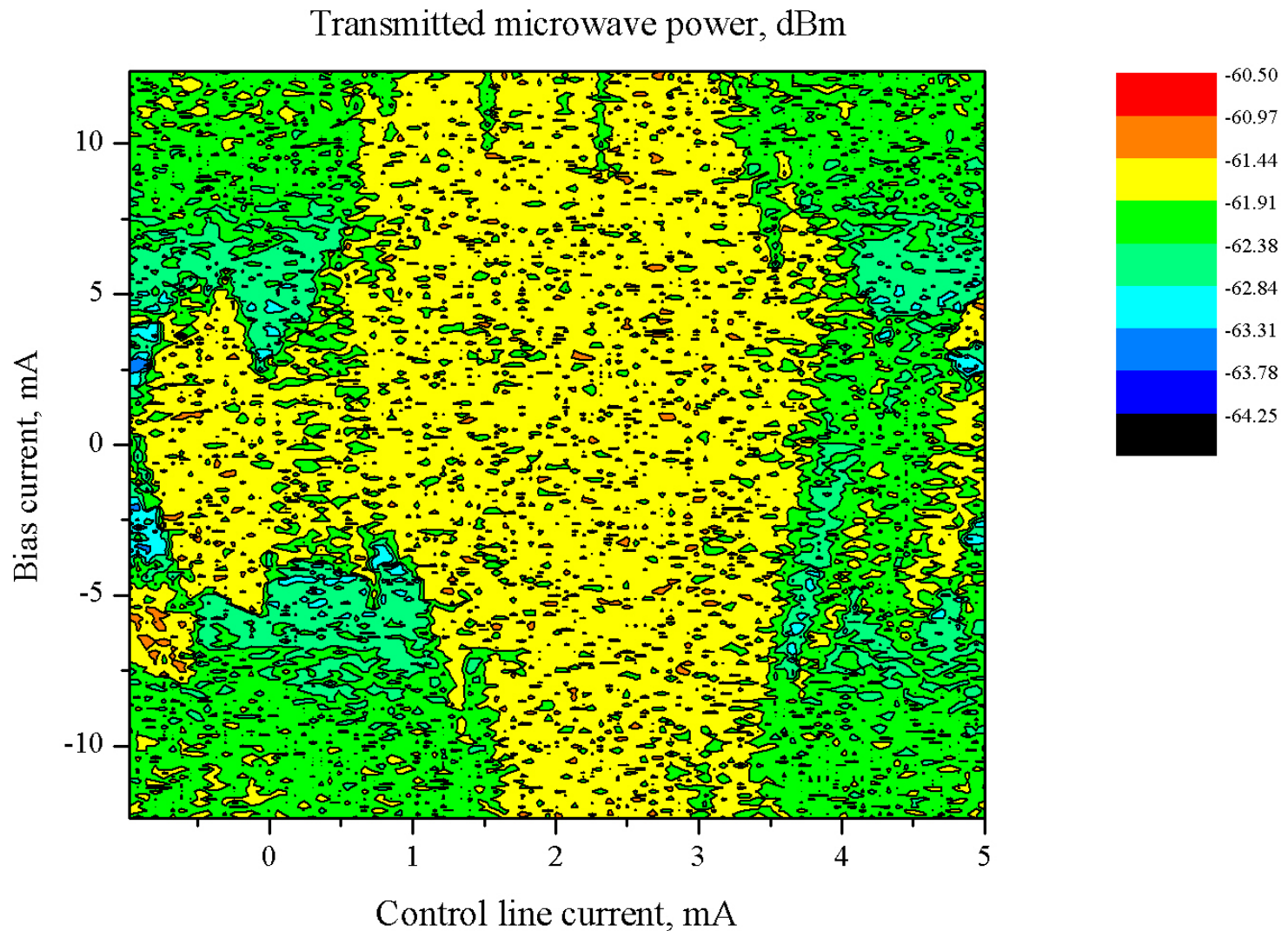
Ток контрольной
линии = 3.14 mA



3-D картина прохождения для 10 GHz сигнала, в резонансе



3-D картина прохождения для 9 GHz сигнала, не в резонансе



- Невзаимный эффект прохождения микроволн через длинный Джозефсоновский переход был успешно измерен.
- Максимальная изоляция на 10 ГГц частоте полученная в эксперимента составила примерно ≈ 5 dB.
- Лучшая изоляция?
- Широкополосный дизайн?
- Усиление?
- Однофотонный режим работы?

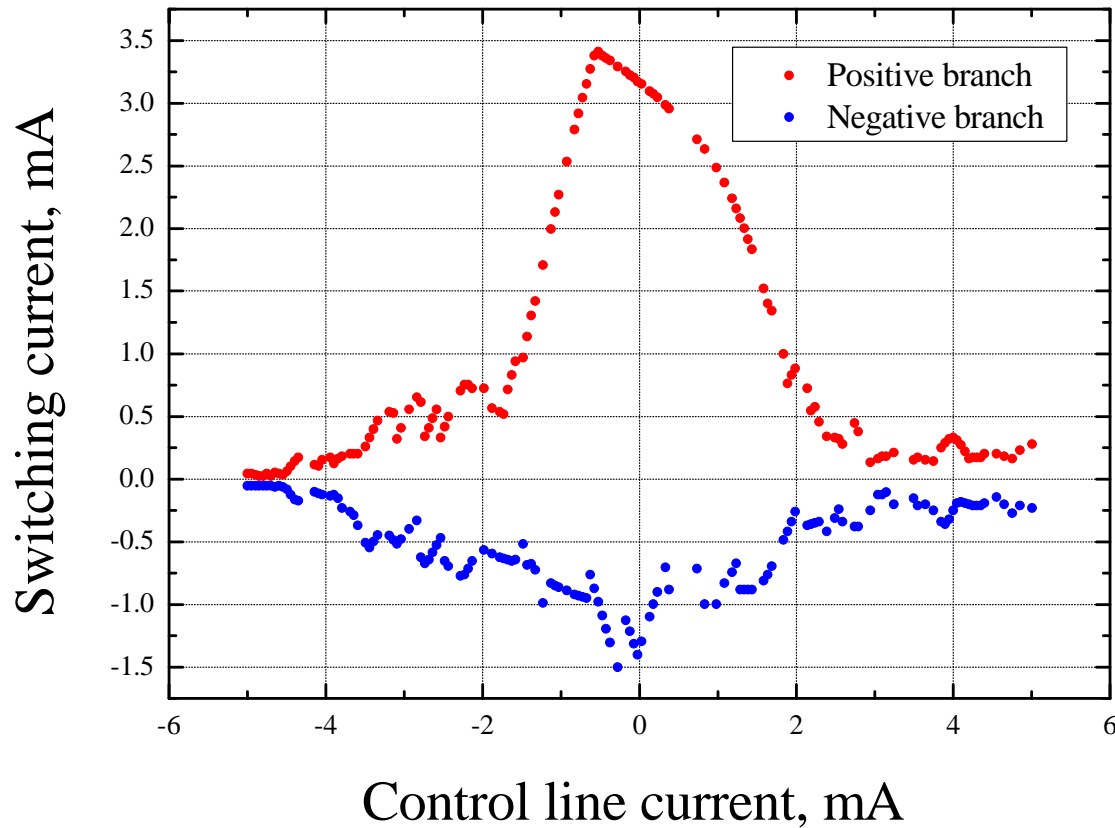
Спасибо!

Аналоговая «low-cost»
система для наблюдения
невзаимных эффектов:

«Cats-flow» branch!



Switching current measurements



Strong perpendicular magnetic field influence observed (no cryo-permalloy shield was used, due to the He-3 cryostat restrictions).