

Квантовые рэчеты (выпрямители)

Новый сверхпроводящий двухконтурный интерферометр

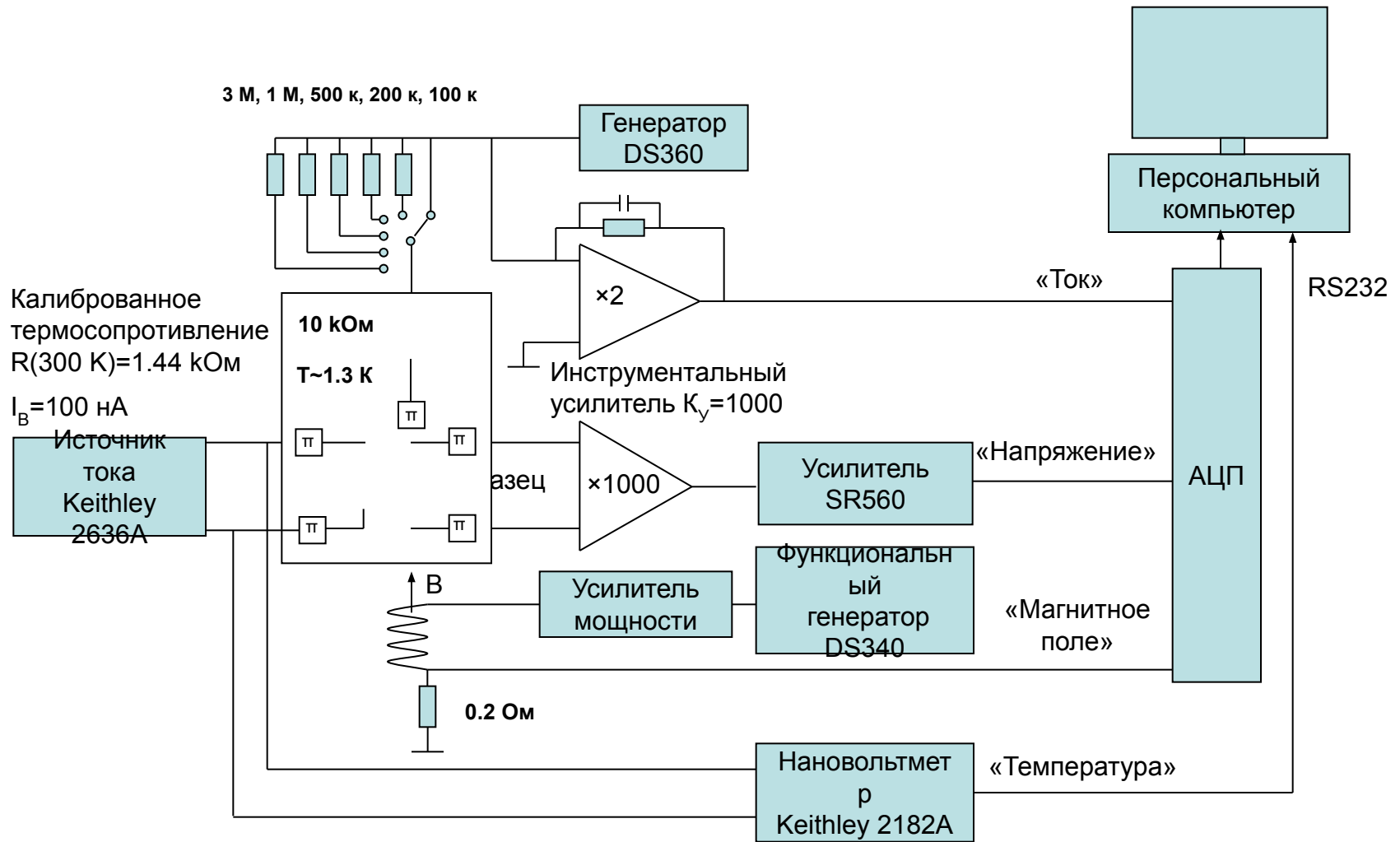
В.Л. Гуртовой

Лаб ИКС, МФТИ

Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых
материалов РАН, 142432 Черноголовка, Московской обл.

e-mail: gurtovoi@ipmt-hpm.ac.ru

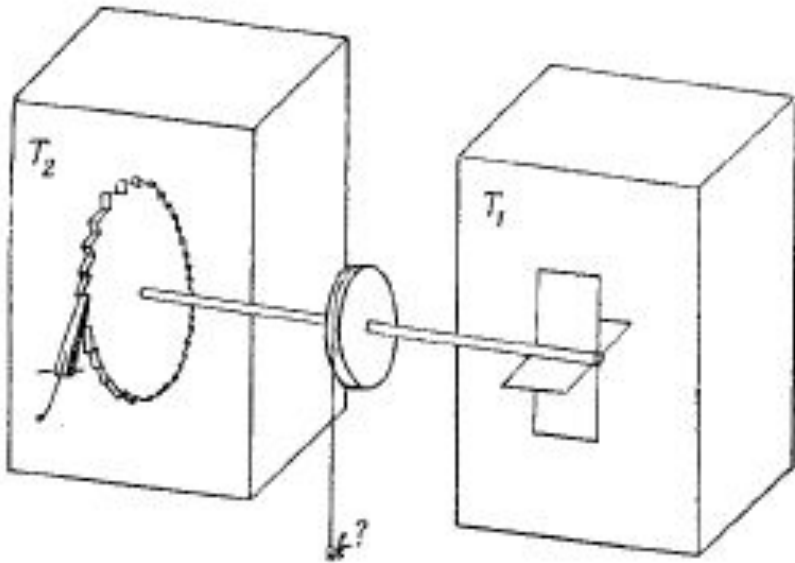
Схематическое представление измерительной установки.



Многоуровневая шумовая фильтрация всех проводов в криостате.

По четырем каналам измеряются ток, напряжение, магнитное поле, температура – что позволяет проводить измерение следующих зависимостей – $R(T)$, $R(B)$, $V(B)$, $V(I)$, $I_C(B)$, $I_C(T)$ итд

R. Feynman`s Pawl and Ratchet Device (Marian Smoluchowski, 1912)



- Directed motion is forbidden at equilibrium ($T_1 = T_2$)
- Directed motion is possible when $T_1 > T_2$
- Contrary to classical ratchet, in quantum system like superconducting ring there is already directed motion at equilibrium – **persistent current**
- Unsolved problem yet – either it is possible or not to produce useful work from **persistent current**

Все периодические явления в сверхпроводящих кольцах – результат боровского квантования

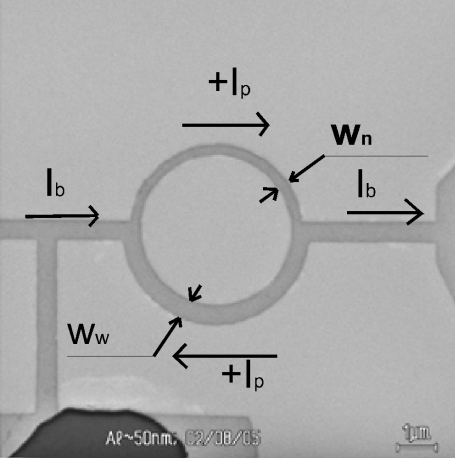
$$\oint_l \hbar p dl = \oint_l (m\hbar v + qA) dl = m \oint_l \hbar v dl + q\Phi = n2\pi\hbar$$

Спектр разрешенных скоростей квантован

$$\oint_l \hbar v dl = \frac{2\pi\hbar}{m} (n - \frac{\Phi}{\Phi_0}) \quad \text{and} \quad v = \frac{\hbar}{mr} (n - \frac{\Phi}{\Phi_0})$$

В результате устойчивый ток равен

$$I_P = 2en v s = 2en s \frac{\hbar}{mr} (n - \frac{\Phi}{\Phi_0})$$



Слабое экранирование

$$I_P L \approx 10 \mu A \times 7 p H \approx 0.03 \Phi_0$$

$$I_{c+} = (s_n + s_w)(j_c - I_P/s_n)$$

$$I_{c-} = (s_n + s_w)(j_c - I_P/s_w)$$

$$I_{c,an} = I_{c+} - I_{c-} = I_P (s_w/s_n - s_n/s_w)$$

Измеряемые эффекты:

Литтл-Паркс $R_{LP} \sim \langle v^2 \rangle$

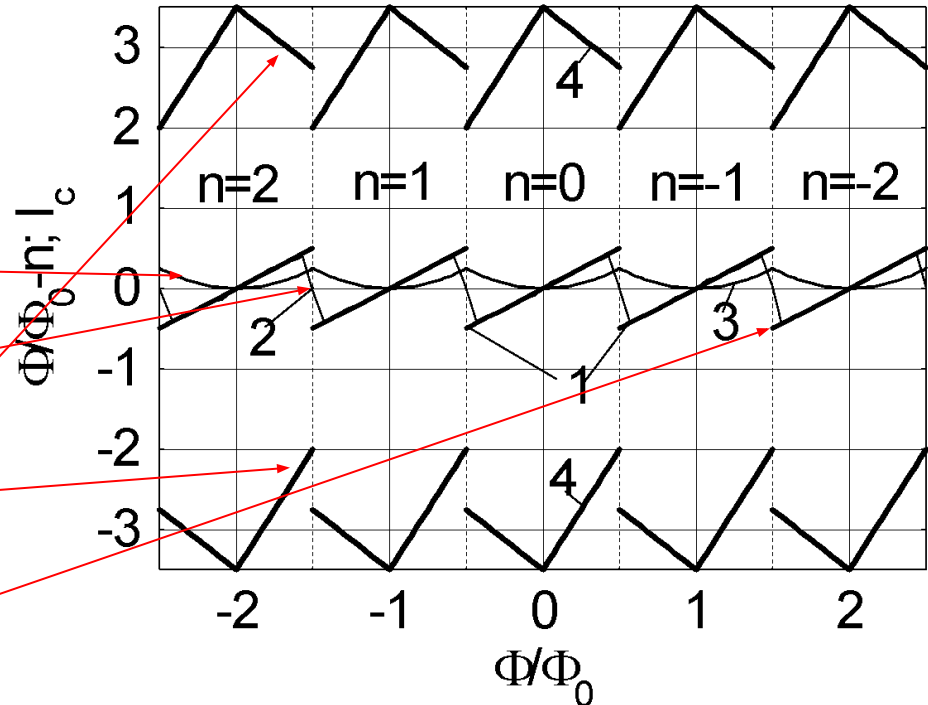
Выпрямление $\sim \langle v \rangle$

I_{c+}, I_{c-}

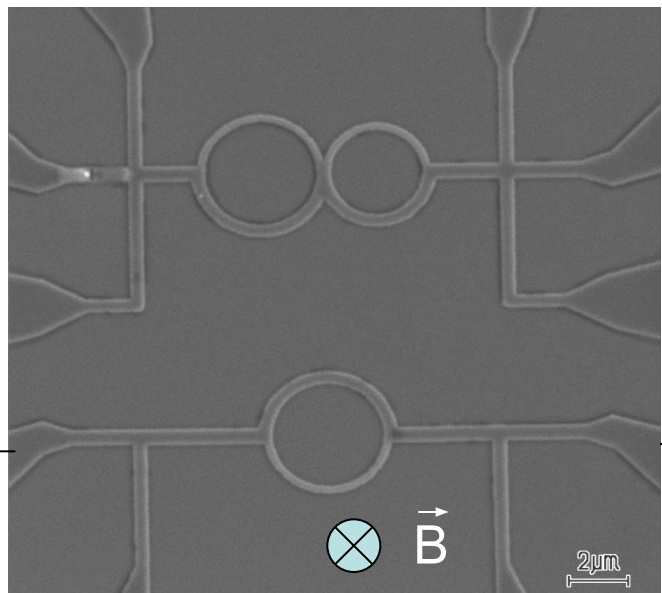
$$\sim j_c - kv$$

$I_{c,an}$

$$\sim v$$

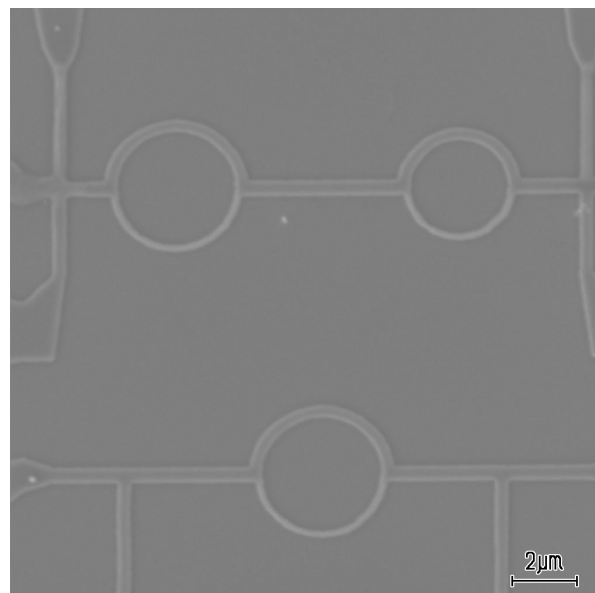


Исследуемые асимметричные AI структуры

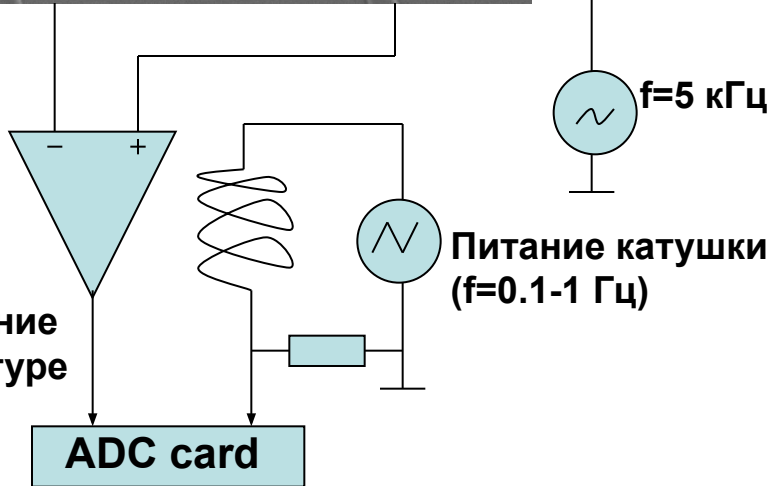


Связанная пара колец (DRs)

Одно кольцо (SR)



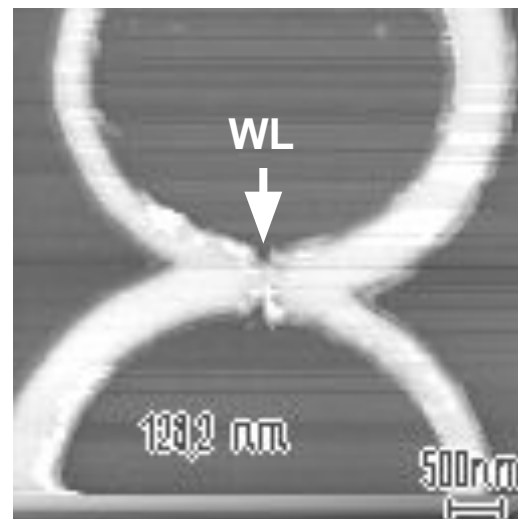
Раздельная DRs структ.



Напряжение на структуре

ADC card

Питание катушки (f=0.1-1 Гц)



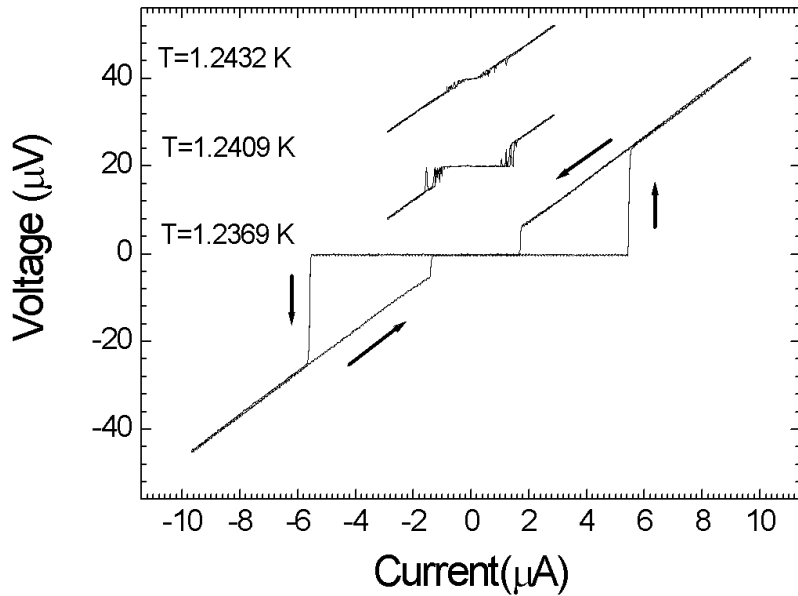
Связанная DRs структура со слабым местом

- Ширина широкой и узкой частей колец ~ 0.4 and $0.2 \mu\text{m}$, соответственно.
- Диаметр одиночного и большого колец $4 \mu\text{m}$, диаметр малого кольца $3.36 \mu\text{m}$

Приготовление образцов и их свойства

- Исследуемые структуры изготавливались из алюминиевой пленки толщиной 40-60 nm, термически напыленной на окисленную кремниевую подложку с ширинами полукольца 200 and 250, 300, 350, and 400 nm для узкой и широкой частей соответственно.
- Диаметр одиночных колец (SR) и больших колец в паре (DRs). Отношение площадей большого и малого колец 1.42. Структуры были сформированы электронно-лучевой литографией с использованием «lift-off» процесса.
- Электросопротивление используемых пленок составляло 0.2-0.5 Ω/\square при 4.2 K, отношение сопротивлений $R(300\text{ K})/R(4.2\text{ K})=2.5-3.5$, температура сверхпроводящего перехода $\sim 1.24-1.35\text{ K}$.
- Оценка длины когерентности $\xi(T=0\text{ K})$ составляет 170 nm, глубины проникновения ($T=0\text{ K}$) 80 nm.

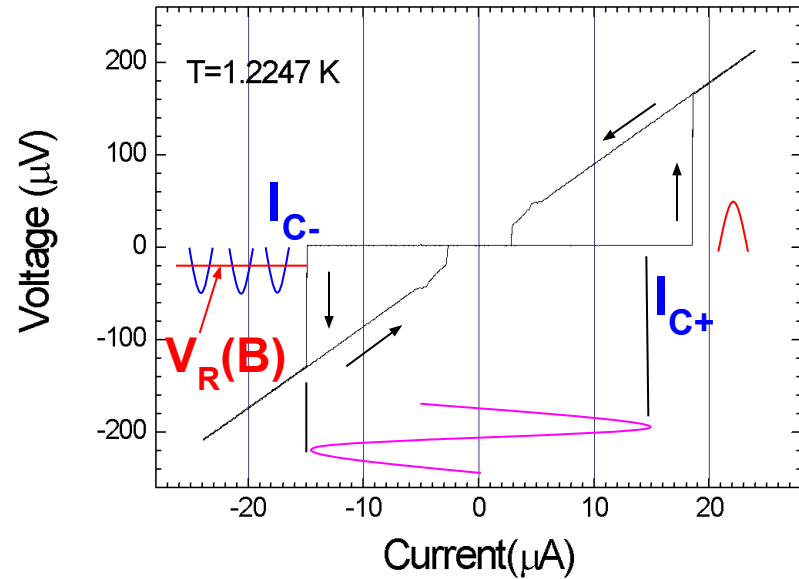
Качественное объяснение формирования сигнала выпрямленного напряжения.



$$\Phi = n\Phi_0, n=0, \pm 1, \dots (I_p=0)$$

ВАХ симметричны: $I_{C+} = I_{C-}$

Выпрямленное напряжение = 0

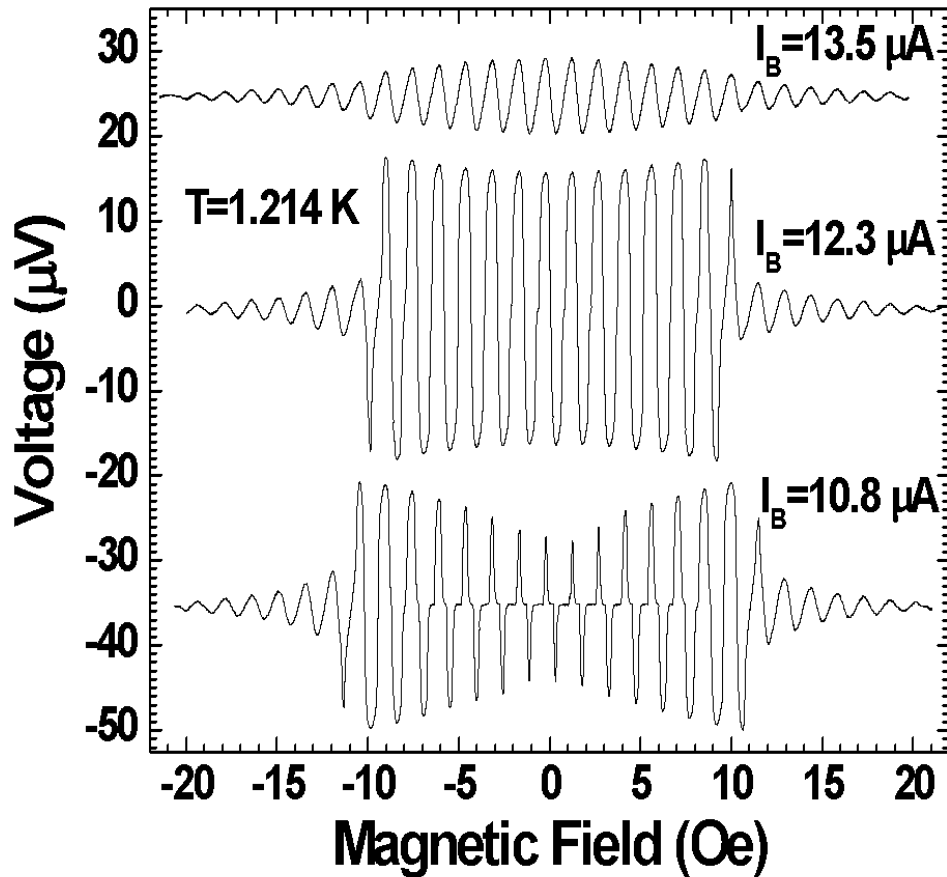


$$\Phi \neq n\Phi_0 (I_p \neq 0)$$

ВАХ асимметричны: $I_{C+} \neq I_{C-}$

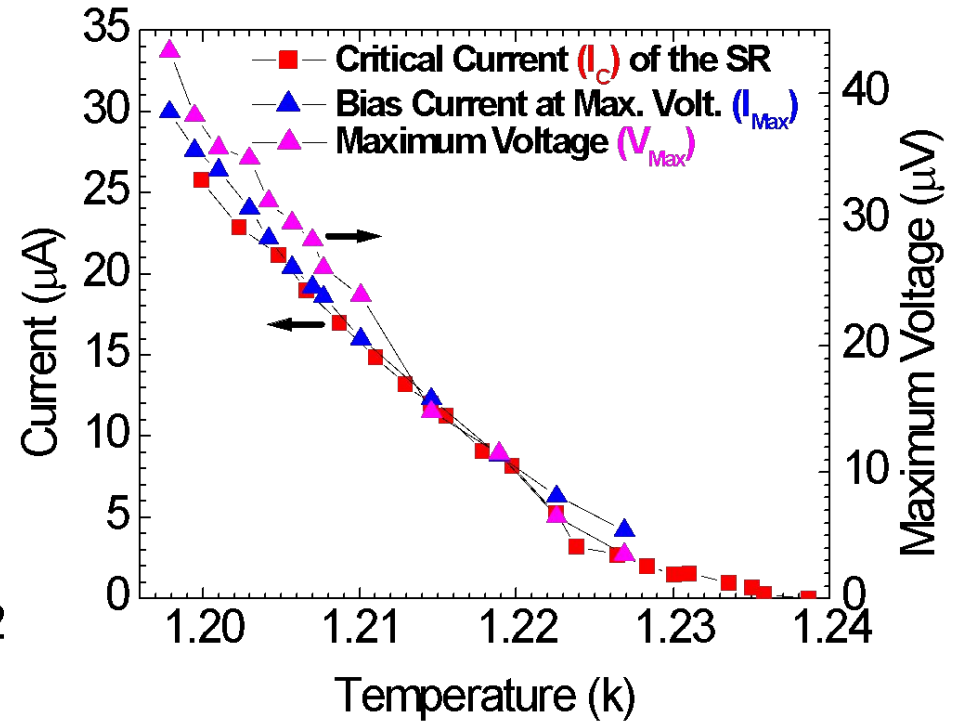
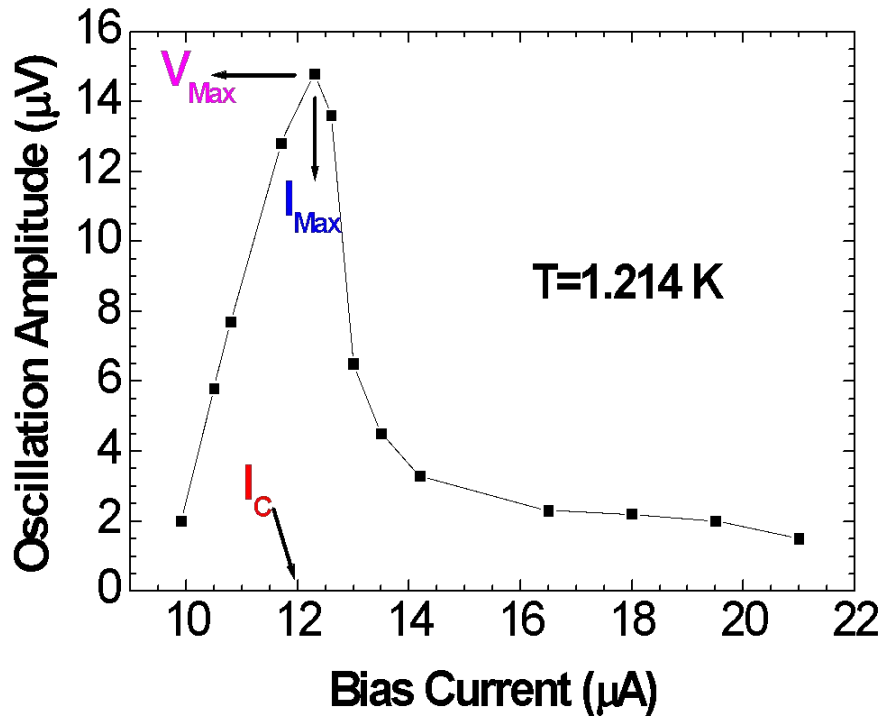
Выпрямленное напряжение $\neq 0$

Выпрямленное напряжение для SR структуры в магнитном поле.



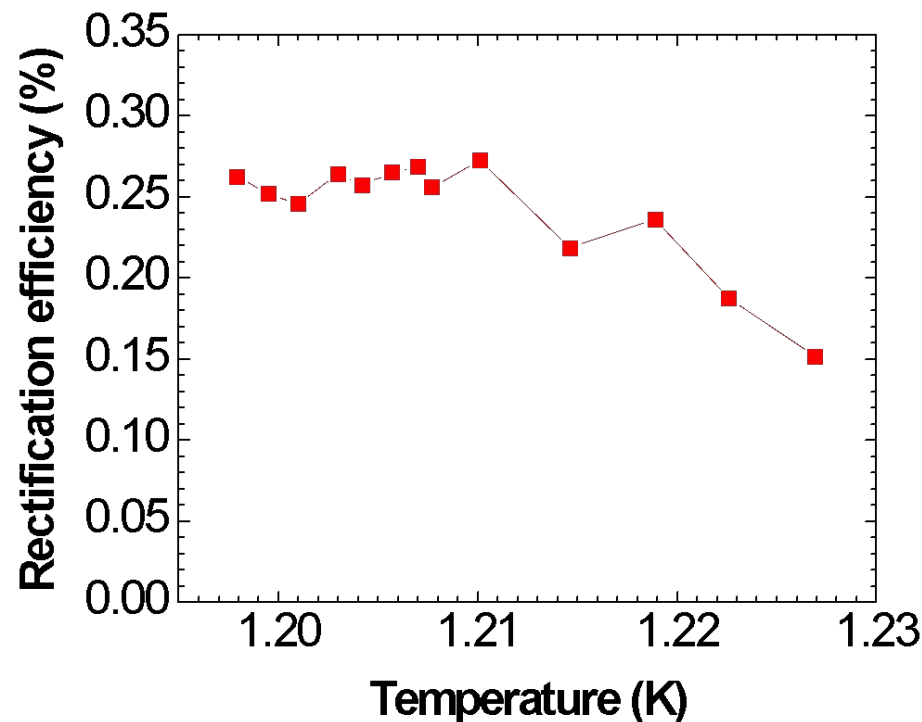
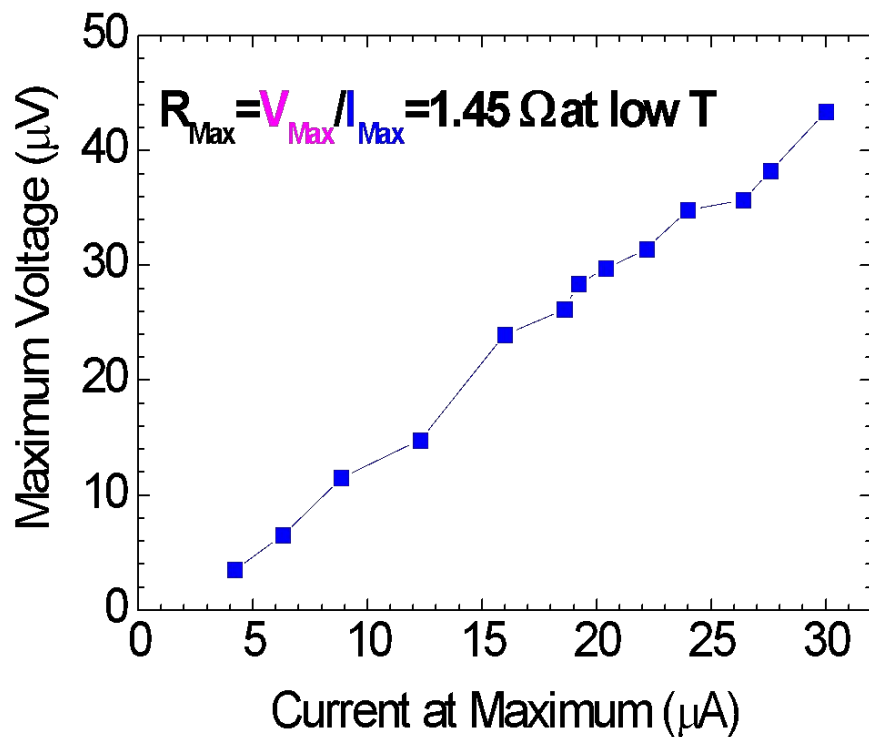
- Выпрямленное напряжение - периодическая функция магнитного поля с периодом, отвечающим кванту потока $\Phi_0 = h/2e$
- «нули» выпрямленного напряжения в $\Phi = n\Phi_0$ и $\Phi = \Phi_0 (n+1/2)$
- Максимумы и минимумы наблюдаются при $\Phi \approx \Phi_0 (n \pm 1/4)$, ($n=0, \pm 1, \dots$).
- Амплитуда выпрямленного напряжения немонотонно зависит от амплитуды переменного тока, протекающего через структуру.

Зависимость выпрямленного напряжения от тока накачки и температуры для SR



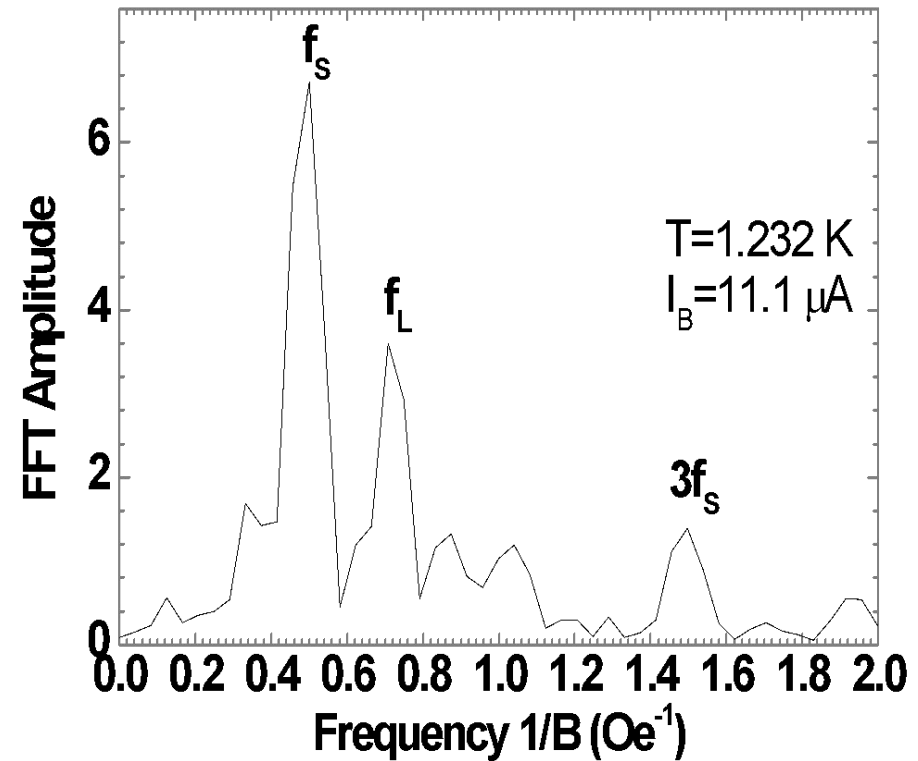
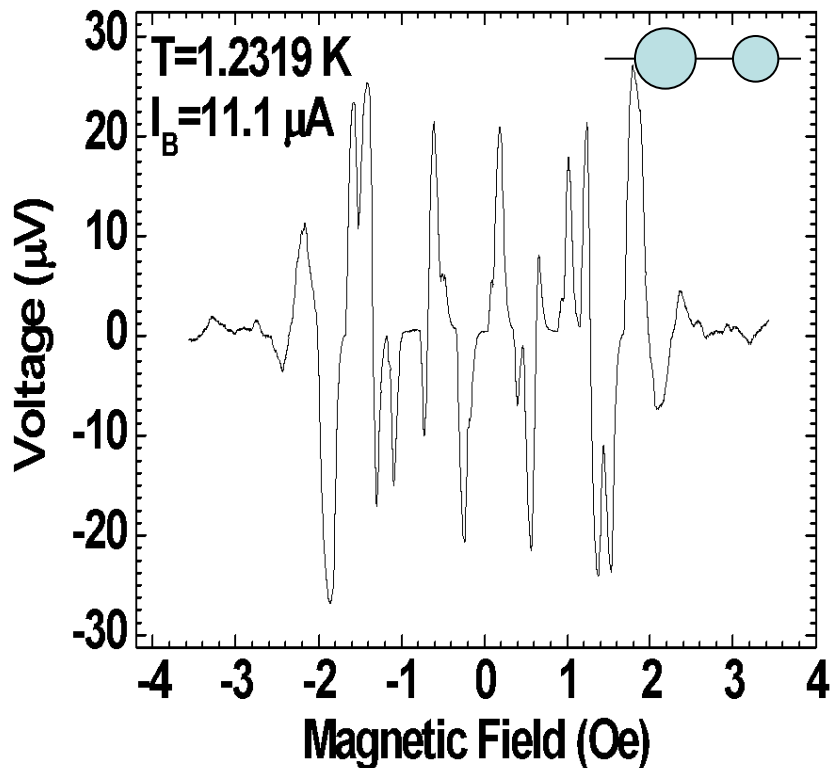
- Амплитуда осцилляций выпрямленного напряжения имеет резкий максимум в зависимости от амплитуды тока накачки.
- Максимум наблюдается при амплитуде тока немного выше критического тока структуры I_C и демонстрирует подобную температурную зависимость ($I_{\text{Max}} \approx I_C(T)$).

Эффективность выпрямления для одного кольца



- Асимметричное кольцо эффективный детектор переменного тока. Эффективность выпрямления = $R_{\text{Max}} / R_{\text{N}} \approx 26\%$ при низкой температуре, где $R_{\text{Max}} = V_{\text{Max}} / I_{\text{Max}}$ и R_{N} — сопротивление в нормальном состоянии.
- Эффективность выпрямления уменьшается при приближении к T_{C}

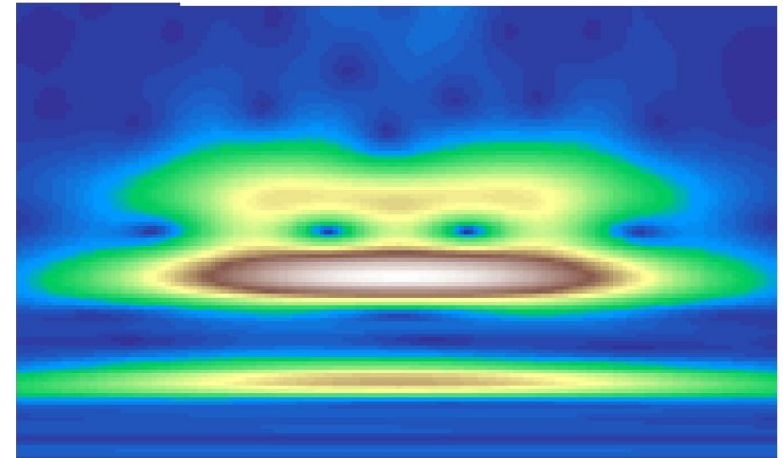
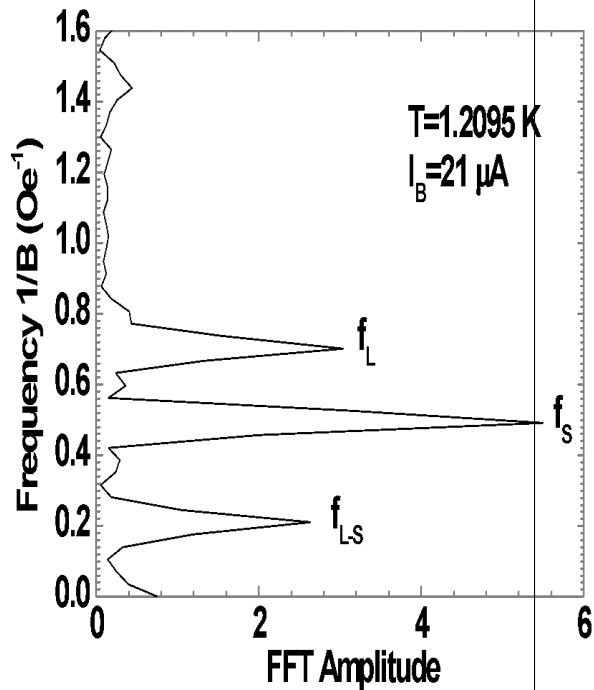
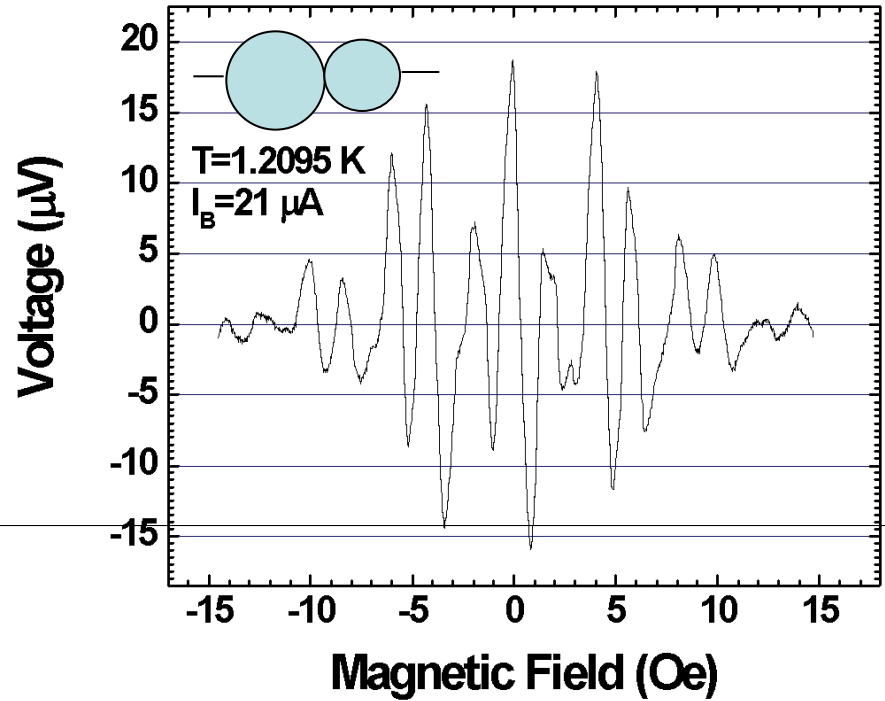
Разнесенная пара колец (DRs)



- В Фурье-спектре основной вклад определяется осцилляциями от большого и малого колец.
- Разнесенная DRs структура выпрямляет как два практически независимых кольца.

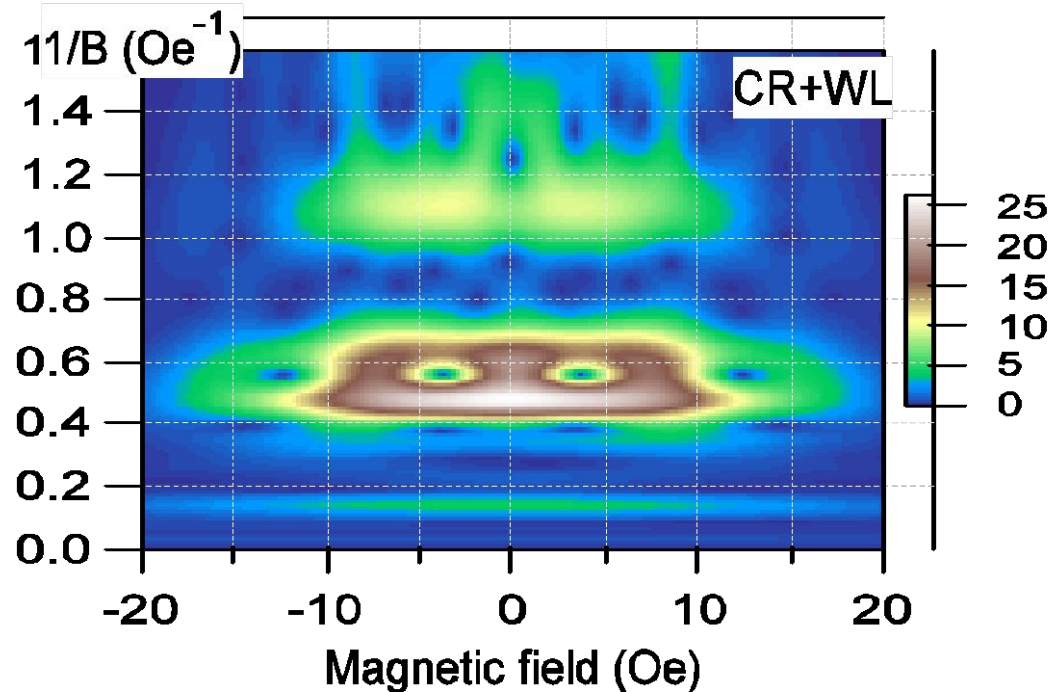
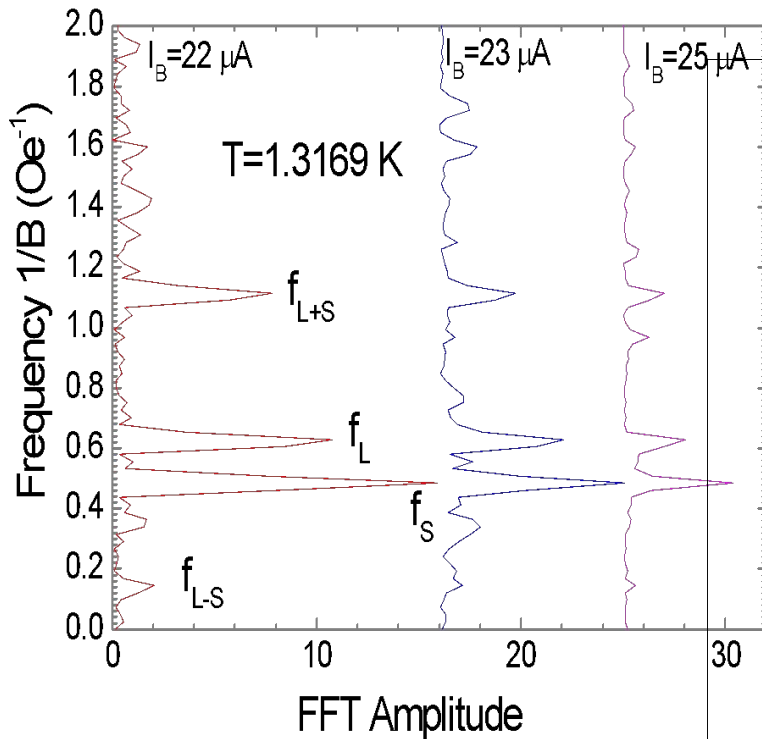
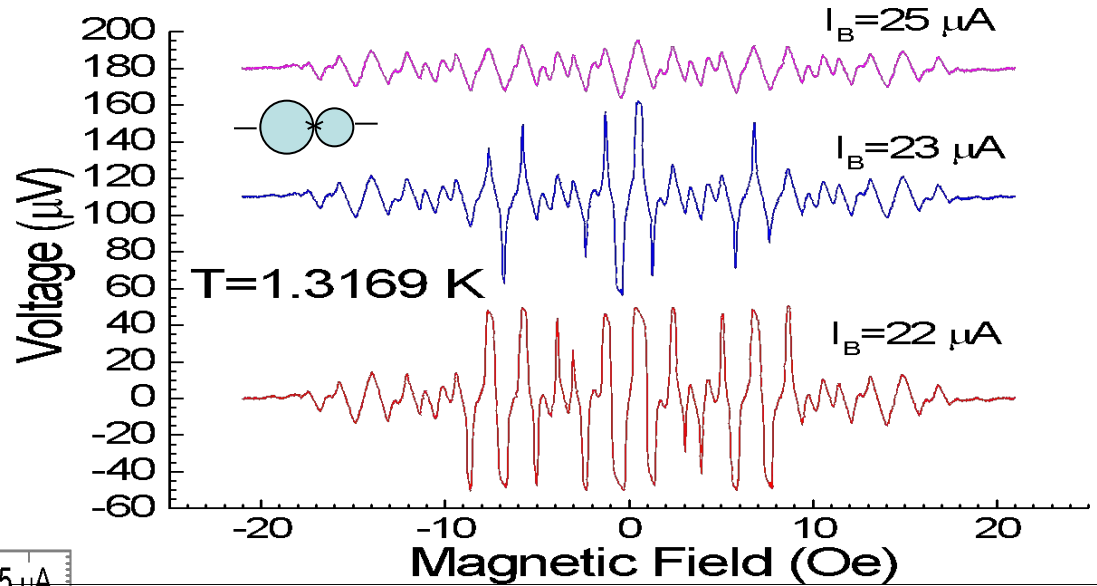
Пара связанных колец

- Связь пары колец приводит к появлению дополнительных осцилляций с периодом, отвечающим разности площадей колец ($S_L - S_S$).

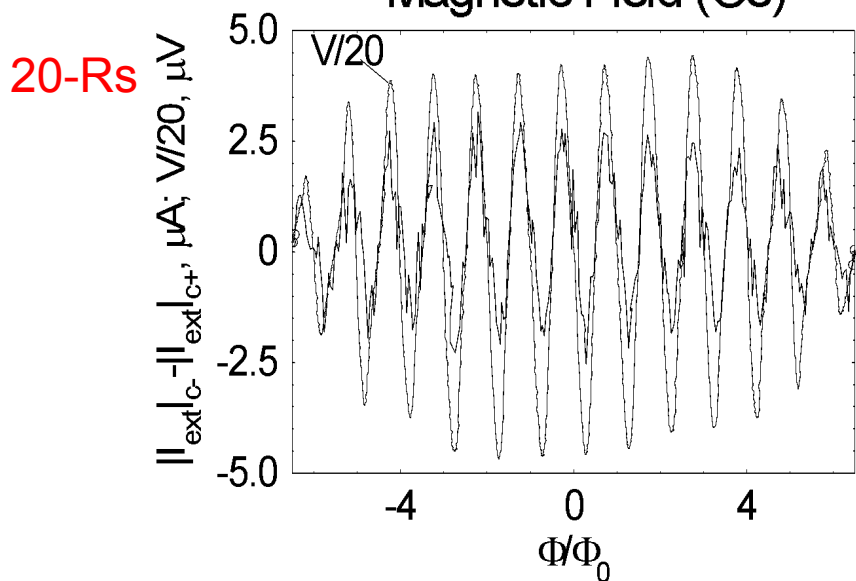
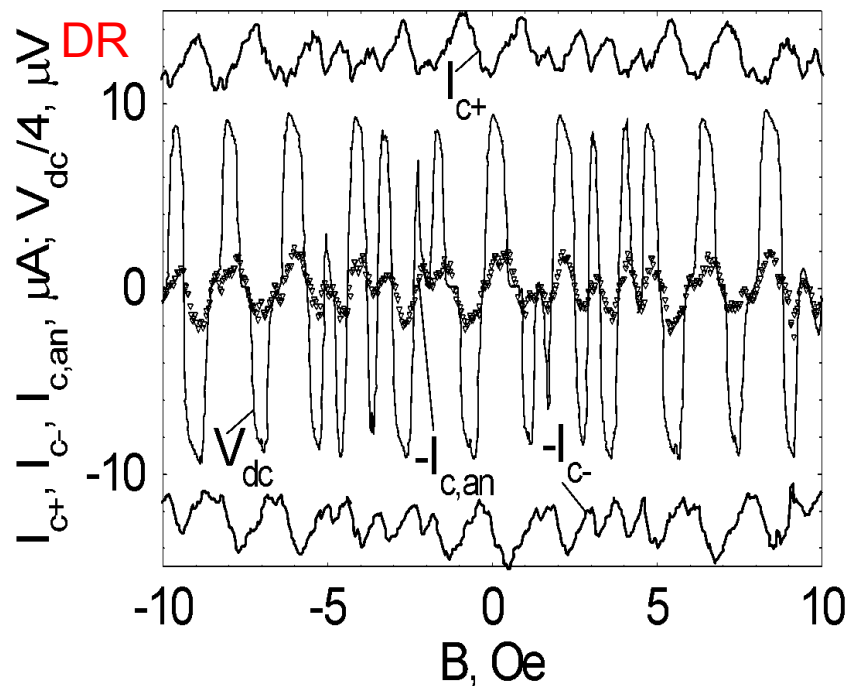
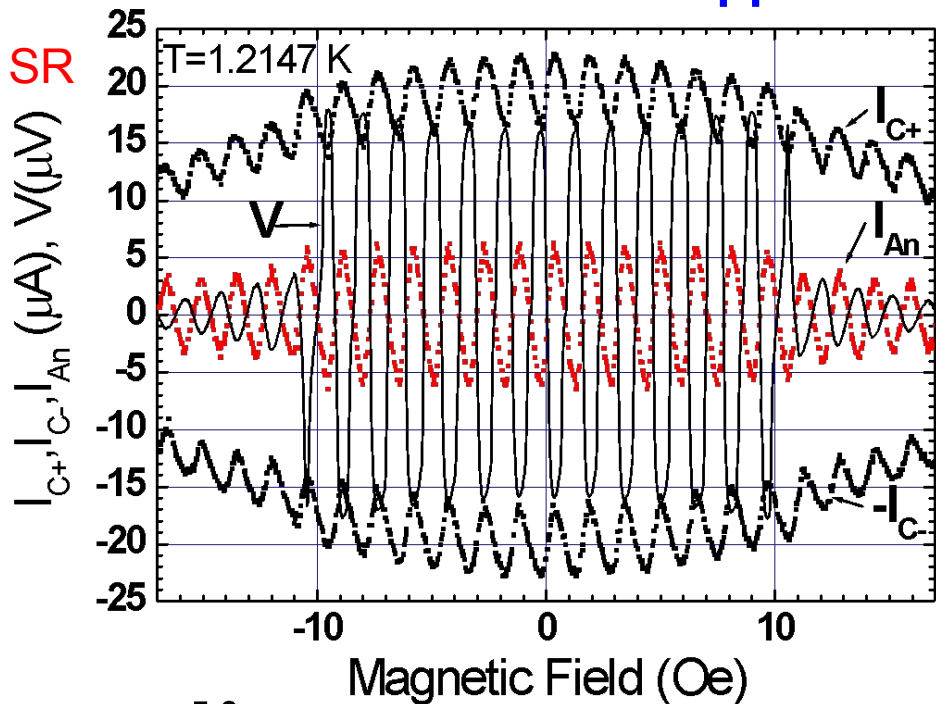


Связанные кольца со слабым местом

- Внедрение слабого места в общий участок связанных колец приводит к подавлению разностной гармоник и появлению осцилляций, отвечающих суммарной площади колец.

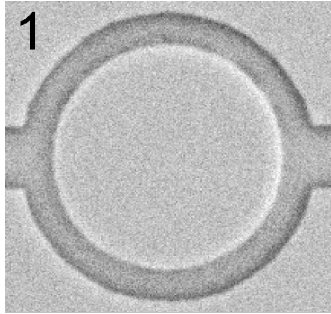


Выпрямленное напряжение и $I_{c,an} = I_{c+} - I_{c-} \sim I_p$ от магнитного поля для SR, DRs и 20-Rs структур

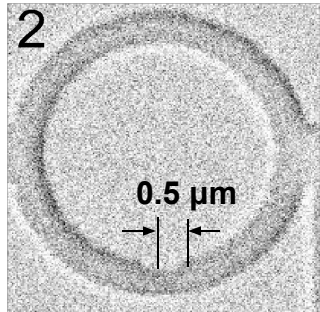


Для асимметричных SR, 20-R и даже DRs структур с кольцами разного диаметра выпрямленное напряжение пропорционально разнице критических токов противоположных направлений (анизотропии), которые $\sim \langle v \rangle$, а не v .

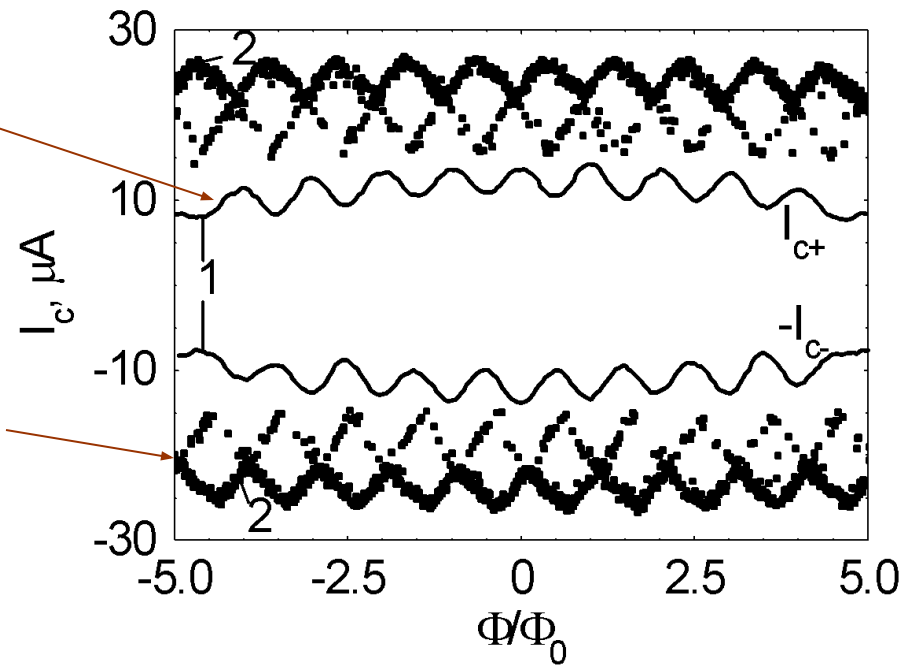
Наблюдение двух состояний с близкими энергиями в одиночном кольце с вырезом



Симметричное кольцо



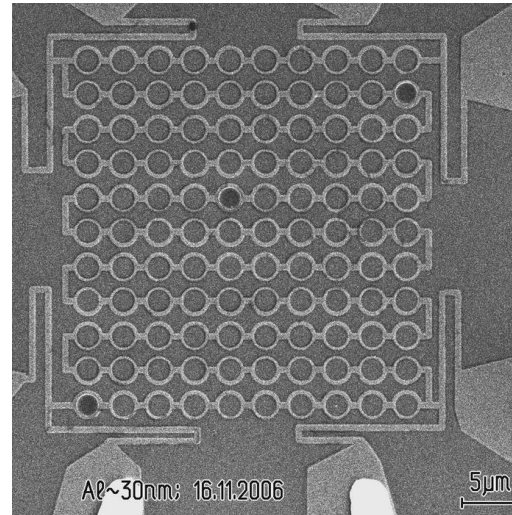
Кольцо с вырезом



Выводы

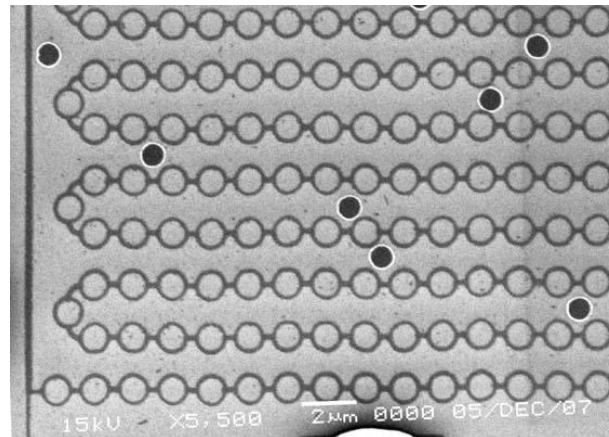
- Выпрямленное напряжение одиночного кольца - периодическая функция магнитного поля с периодом, отвечающим кванту потока $\Phi_0 = h/2e$.
- Амплитуда выпрямленного напряжения одиночного кольца демонстрирует пико подобное поведение в зависимости от тока. Пик расположен вблизи амплитуды переменного тока, равной критическому току.
- Эффективность выпрямления одиночного кольца составляет 26 % при низкой температуре и уменьшается при приближении к T_c .
- Выпрямление переменного тока парой разнесенных колец демонстрирует независимый, адитивный характер.
- Фурье- спектр осцилляций выпрямленного парой связанных колец напряжения показывает компоненты, связанные с большим и малым кольцами (как в предыдущем пункте), и также компоненту соответствующую разности площадей большого и малого колец.
- Для связанной пары колец со слабым местом в месте соприкосновения осцилляции, соответствующие разности площадей, подавлены, в то же время появляются осцилляции, соответствующие сумме площадей колец.
- Осцилляции выпрямленного напряжения пропорциональны анизотропии критического тока $(I_{c+} - I_{c-})(\Phi/\Phi_0)$, которая возникает в результате сдвига фазы, равной по потоку $\Phi_0/2$, для токов противоположного направления.
- Фазовый сдвиг ($\Delta\Phi = \Phi_0/2$) не зависит от температуры (0.94-0.99 T_c), тока (3-50 μA) и степени асимметрии колец.
- Осцилляции Литтла-Паркса для симметричного и асимметричного колец подобны. Минимум наблюдается при $n\Phi_0$ и максимумы при $(n+1/2)\Phi_0$.
- Измерения критического тока асимметричных колец противоречат наблюдающемуся на этих же образцах эффекту Литтла-Паркса.

Множественные последовательно соединенные асимметричные кольца



2 μm diameter
110 ring
structure

Arm width 200
and 400 nm



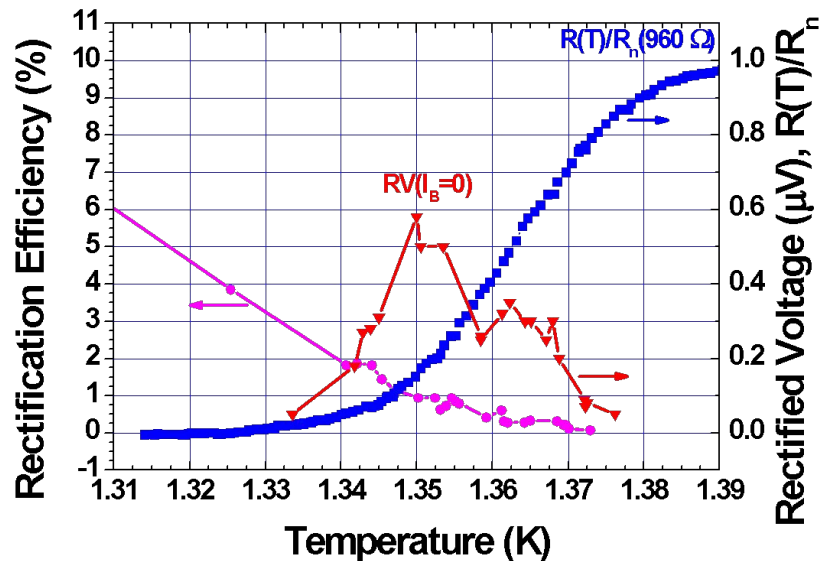
1 μm diameter
667 ring
Structure

Arm width 100
and 150 nm

- Low operation temperature ~1 K – very low intrinsic noise level
- Operation from DC up to 10 GHz
- Structures were fabricated by e-beam lithography using NanoMaker

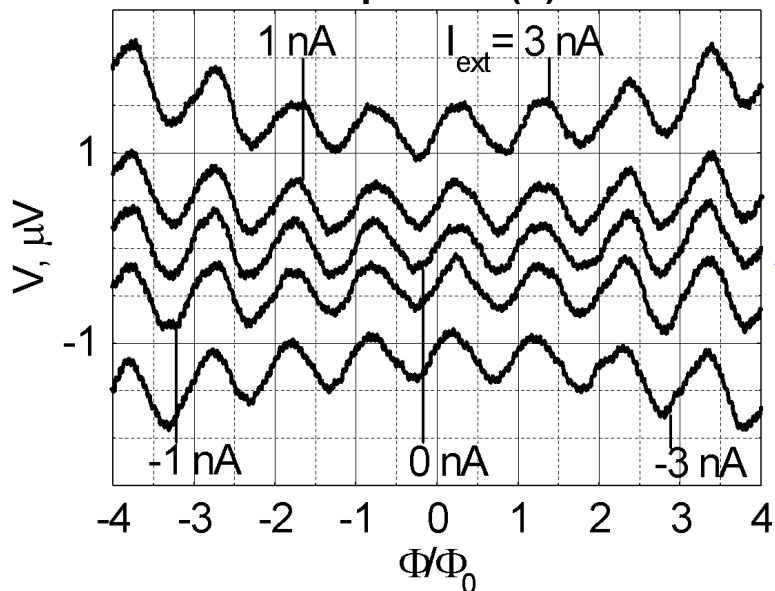
Operation of asymmetric ring structure as noise detector.

Temperature dependence of rectification efficiency and rectified voltage ($I_B=0$) in near T_C region for 110 ring structure



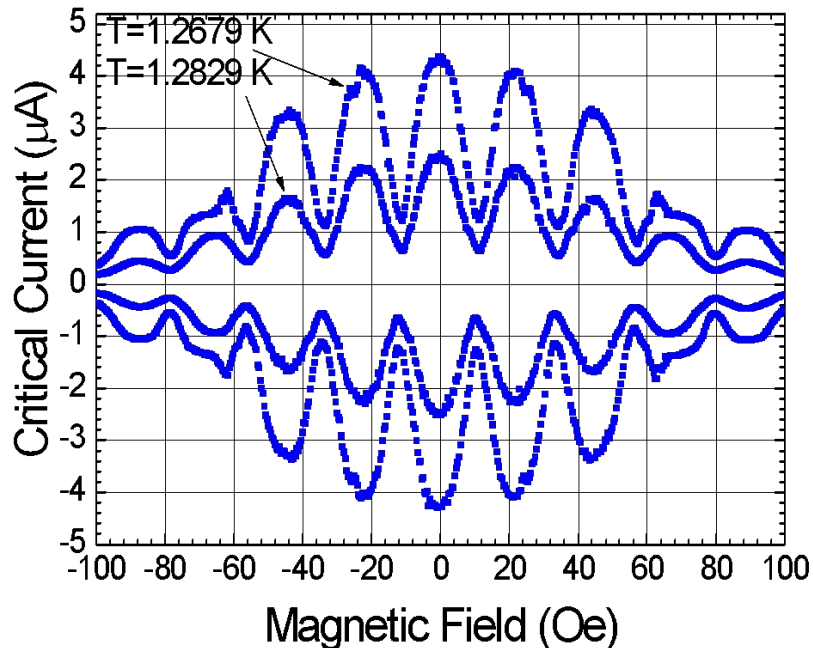
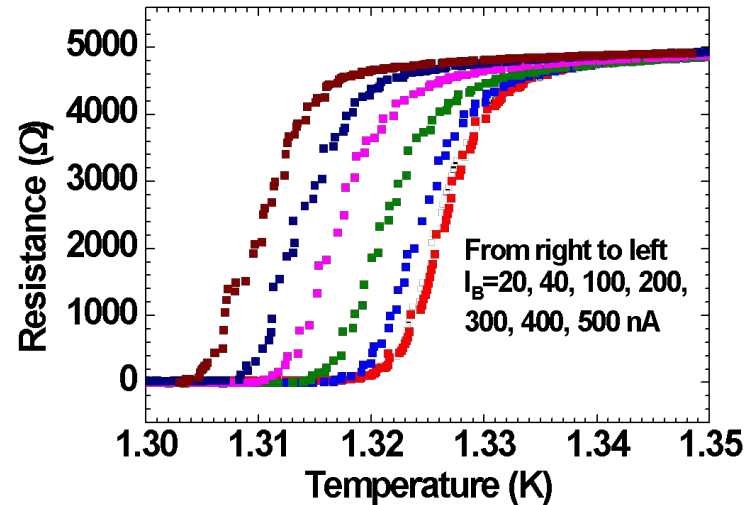
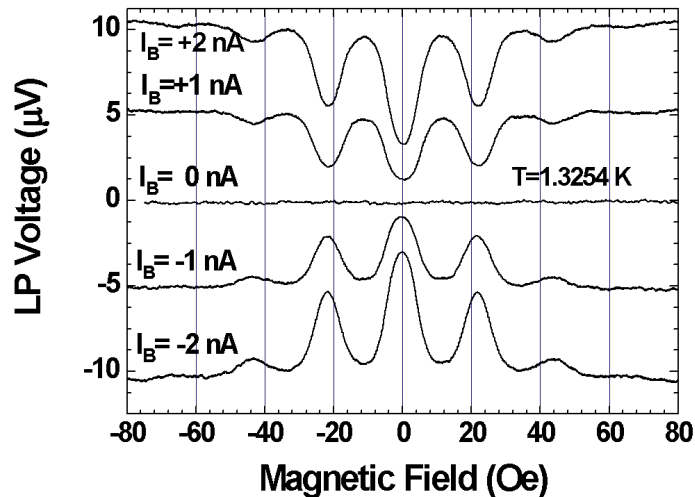
- Rectification efficiency was measured in fluctuation region of resistive transition. It was non zero at $T > T_C$. Thus, the structure was calibrated as noise detector
- Temperature dependence of rectified voltage at $I_B=0$ (noise) consists of two peaks of unknown origin at $0.15 R_n$ and $0.5 R_n$
- For $0.5 R_n$ peak, rectification efficiency is 0.3%, which corresponds to $0.003 R_n = 3 \Omega$

rectification resistance. $\langle I_{th}^2 \rangle^{1/2} \approx 0.3 \mu V / 3 \Omega = 100 \text{ nA}$. Noise power for one ring $W_N = (R_n / 110) \langle I_{th}^2 \rangle \approx 8.7 \times 10^{-14} \text{ W}$. This equivalent to the Nyquist noise at $T = 1.36 \text{ K}$ - $W_{NQ} = k_B T \Delta f$ with $\Delta f = 5 \times 10^9 \text{ Hz}$, which is 6 times lower than the quantum limit $k_B T / h = 3 \times 10^{10} \text{ Hz}$



Rectified voltage measured at $I_B=0$ and small DC bias – rectification of noise

Little-Parks and $I_c(B)$ oscillations, and resistive transitions at different bias currents for 667- ring structure (1 μm)

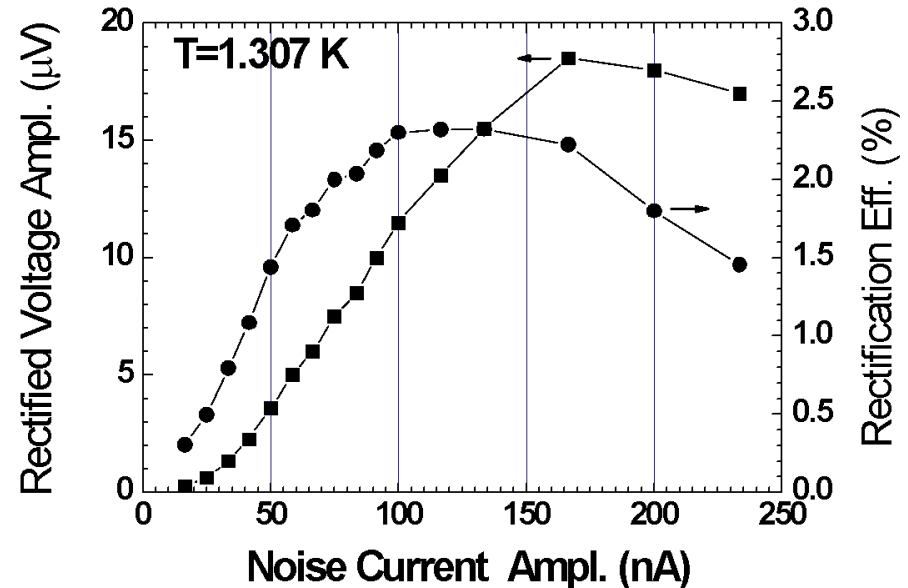
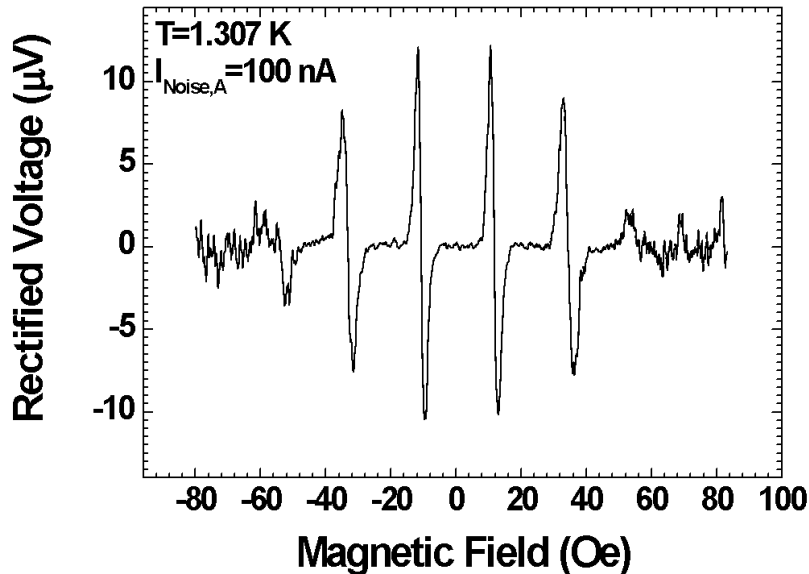


- Little-Parks effect was measured at $I_B=1\text{ nA} \ll I_p \approx 200\text{ nA}$, which means that in one of the ring arms, I_p direction is against the externally applied voltage
- Structure is homogeneous, $\Delta T_C=0.008\text{ K}$
- Opposite direction critical current oscillations are symmetric ($I_{c+}(B) = -I_{c-}(B)$) except for narrow regions near $(n+1/2)\Phi_0$ resulting in formation of sharp peaks of opposite sign rectified voltage near $(n+1/2)\Phi_0$, which are the points of magnetic field with maximum rectification efficiency.

Modulation amplitude reaches 70% which confirms increase of the persistent current amplitude

Due to better filtering of measurement leads in helium cryostat, rectified voltage was not observed at $I_B=0$ (was lower than 30 nV). To detect RV at $I_B=0$ larger number of rings is required

Typical rectified voltage and rectification efficiency for 667-ring structure



- **RV is easily measured even at external white noise amplitude (bandwidth 0-200 kHz) of $I_{\text{Noise,A}}=10 \text{ nA}$**

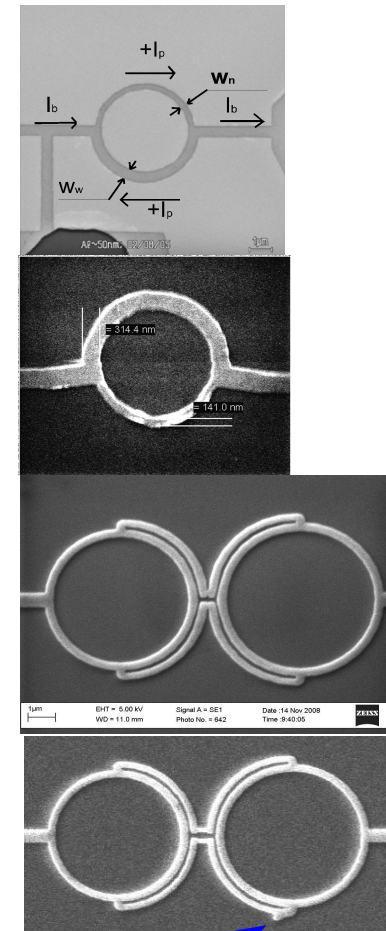
- **From calibration curves, we can estimate that nonequilibrium noise power in our system is lower than $2 \times 10^{-15} \text{ W}$, i.e. lower than 0.4% of equilibrium noise**

Исследование возможности самодетектирования квантовых состояний в сверхпроводящих кольцах

The simplest ring structure without JJs as a self-detector of quantum states

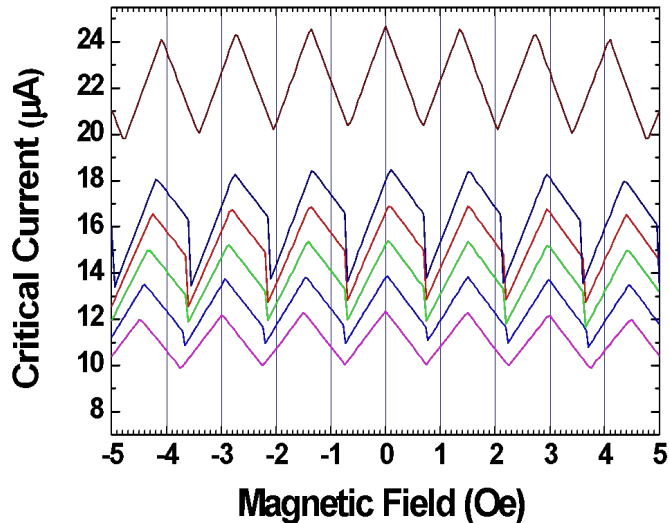
Outline

- Asymmetric ring with symmetric contacts
- Asymmetric ring with asymmetric contacts
- Symmetric double ring structure (without JJ)
- Asymmetric double ring structure



Fabrication defect

The simplest detector of states based on critical current measurements is asymmetric ring (?)



S - W = $0.4 \mu\text{m}$

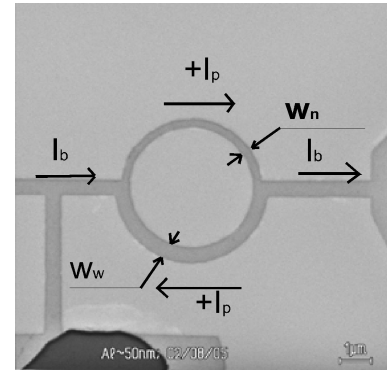
A - $W_W = 0.4 \mu\text{m}$, $W_N = 0.2 \mu\text{m}$

A - $W_W = 0.35 \mu\text{m}$, $W_N = 0.2 \mu\text{m}$

A - $W_W = 0.3 \mu\text{m}$, $W_N = 0.2 \mu\text{m}$

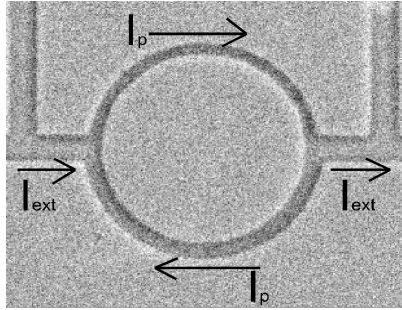
A - $W_W = 0.25 \mu\text{m}$, $W_N = 0.2 \mu\text{m}$

S - W = $0.2 \mu\text{m}$



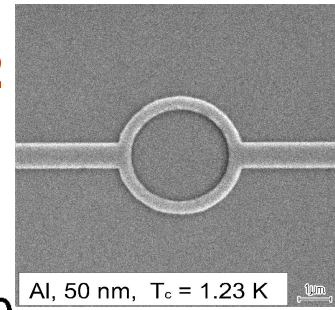
- Calculation of critical current for symmetric and asymmetric rings. All rings are $4 \mu\text{m}$ in diameter
- Maxima are at $\Phi = n\Phi_0$
- Minima are at $\Phi = (n+1/2)\Phi_0$
- Symmetric rings without current jumps at $\Phi = (n+1/2)\Phi_0$
- Asymmetric rings with current jumps at $\Phi = (n+1/2)\Phi_0$

Flux shift of opposite direction critical currents in asymmetric SRs compared to symmetric SRs



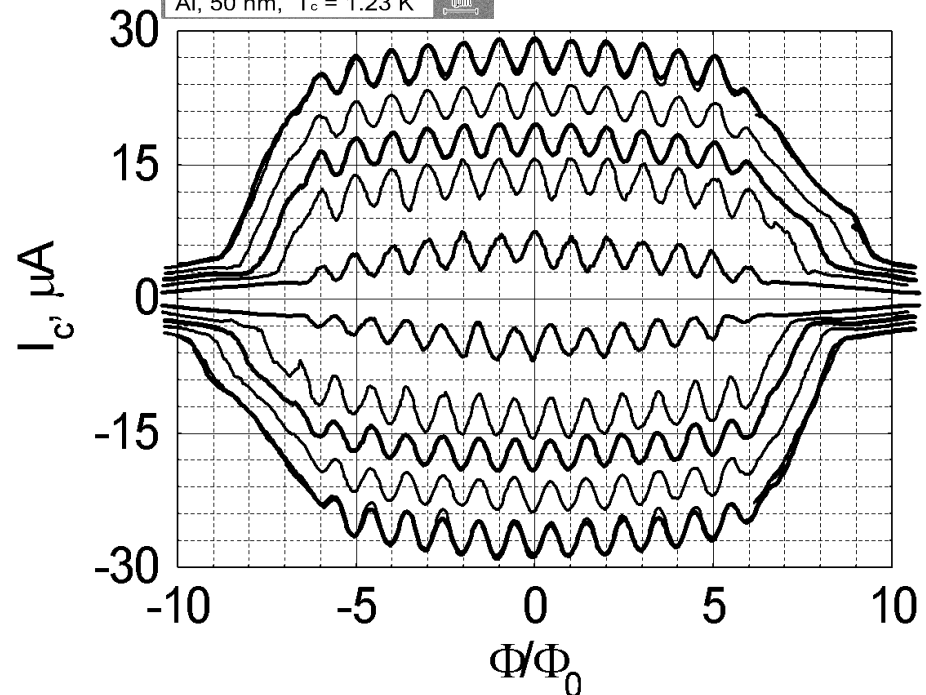
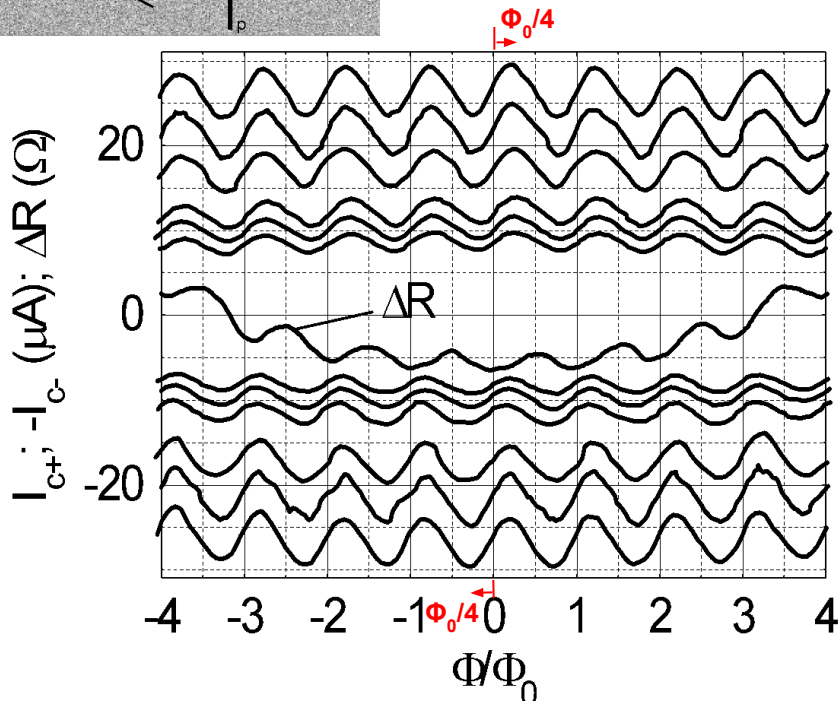
Asymmetric ring $W_W/W_N=2$

$$\Delta\Phi = \Phi_0/2$$



Symmetric ring

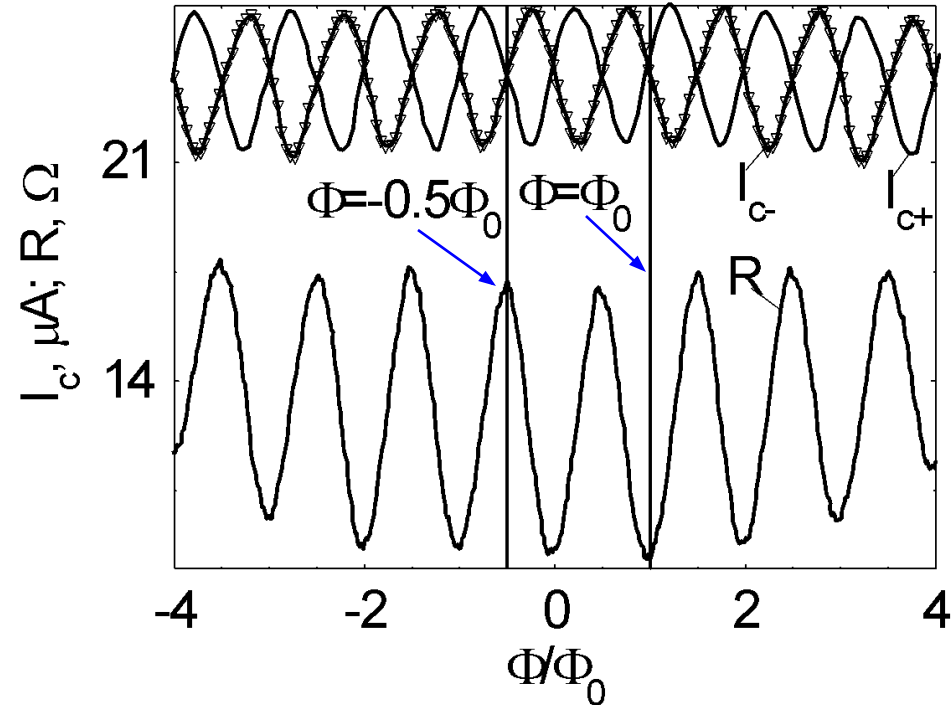
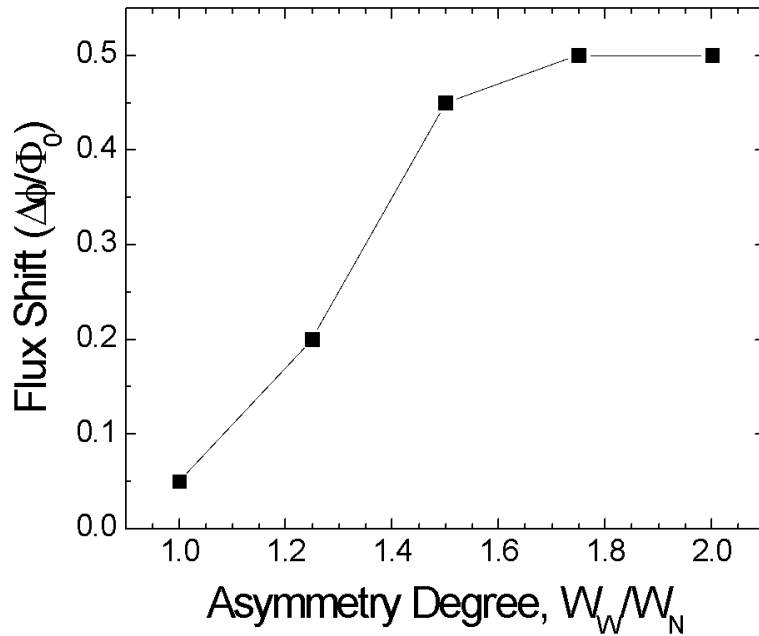
$$\Delta\Phi = (0.02-0.07)\Phi_0$$



• Flux shift ($\Delta\Phi$) is slightly temperature dependent ($0.94-0.99T_c$) and current (3-50 μA), showing that currents flowing through the ring and additional magnetic flux induced by currents are not responsible for this shift

• In symmetric rings, $\Delta\Phi = (0.02-0.07)\Phi_0$, which could be explained by non ideal form and inhomogeneous thickness of the rings

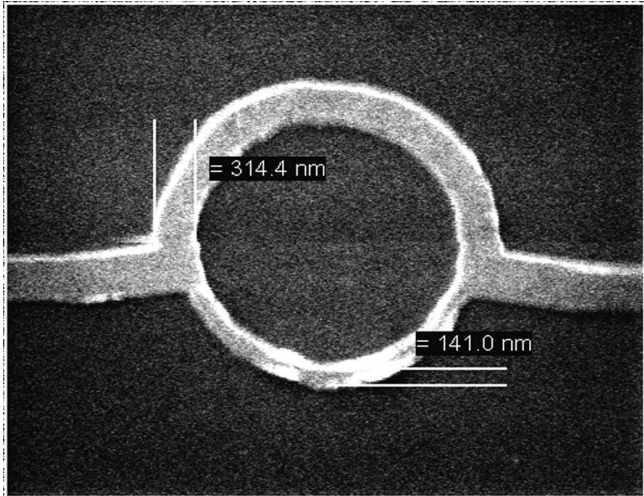
Shift as function of asymmetry degree.



Flux shift dependence on asymmetry degree at $T \approx 0.95T_c$ $I_{c+}(\phi/\phi_0) = I_{c-}(\phi/\phi_0 + 0.5)$

- Amplitude changes of critical current has been expected instead of argument changes.
- There is nothing in the Bohr's quantization rule that can explain flux shift.
- Little-Parks and rectified voltage measurements demonstrate existence of two degenerate states at $(n+1/2)\Phi_0$, whereas critical current measurements do not.
- Measurements of critical current are in contradiction with Little-Parks and rectified voltage measurements.

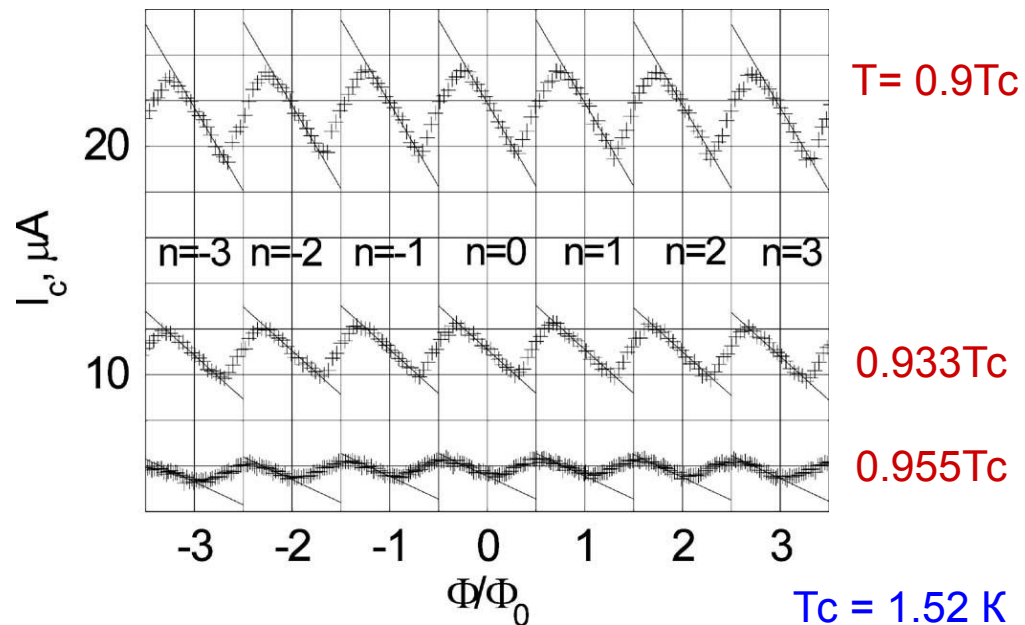
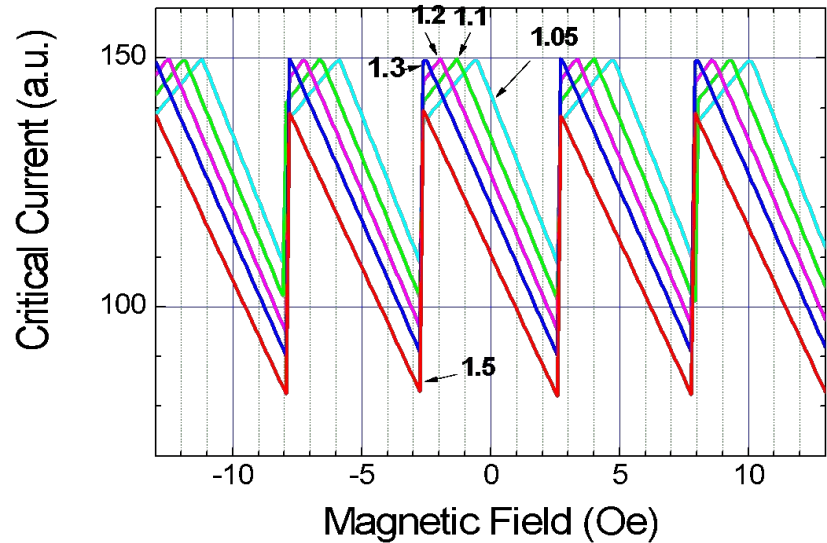
Asymmetric rings with asymmetric contacts



Diameter - 2 μm

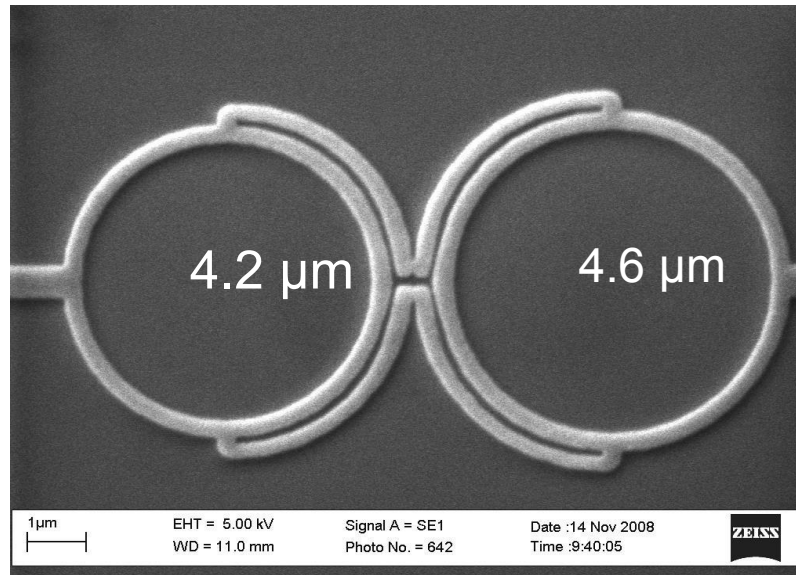
Ratio of ring segments – 1.3

- Зависимость критического тока от магнитного поля при разных температурах
- Неопределенность квантового числа n составляет около $\Phi_0/2$, что не соответствует теории
- Самодетектирование квантовых состояний в кольцах - **НЕВОЗМОЖНО**

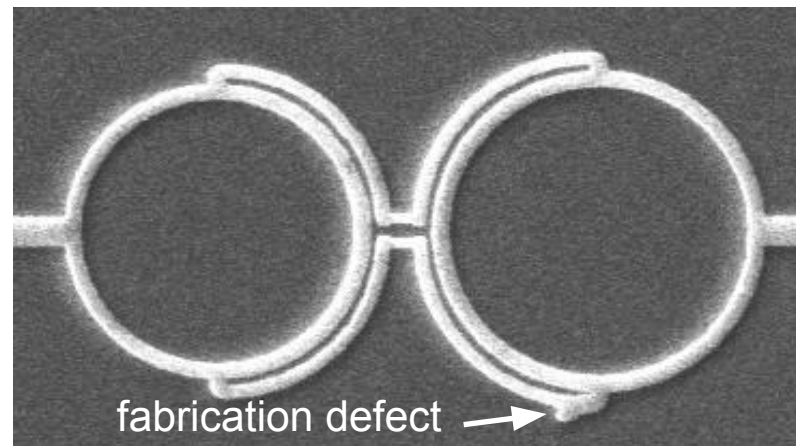


Investigated Al ring structures without JJs

Symmetric double ring structure

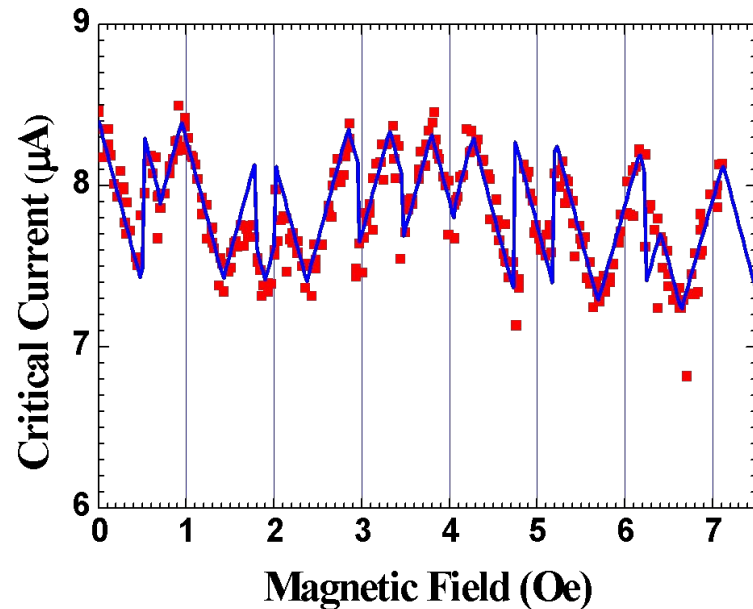
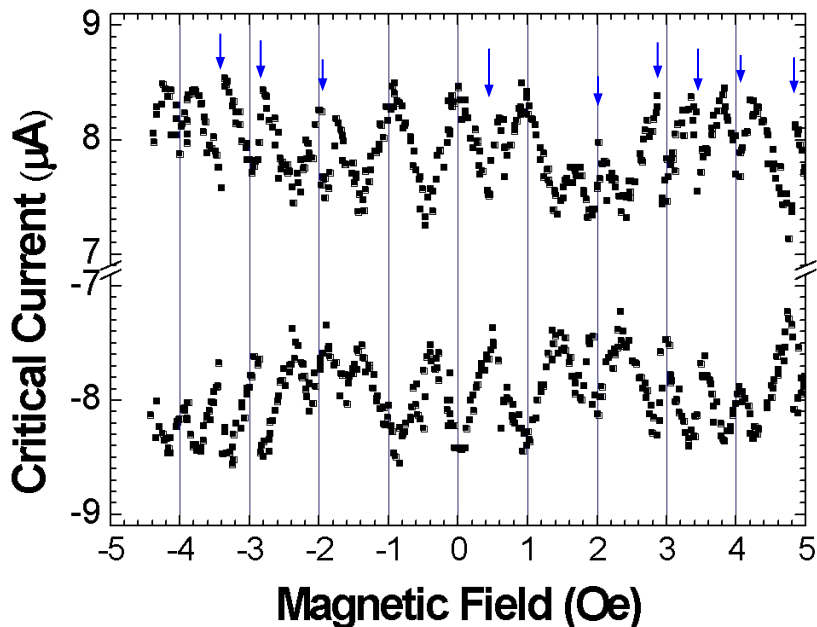


Asymmetric double ring structure

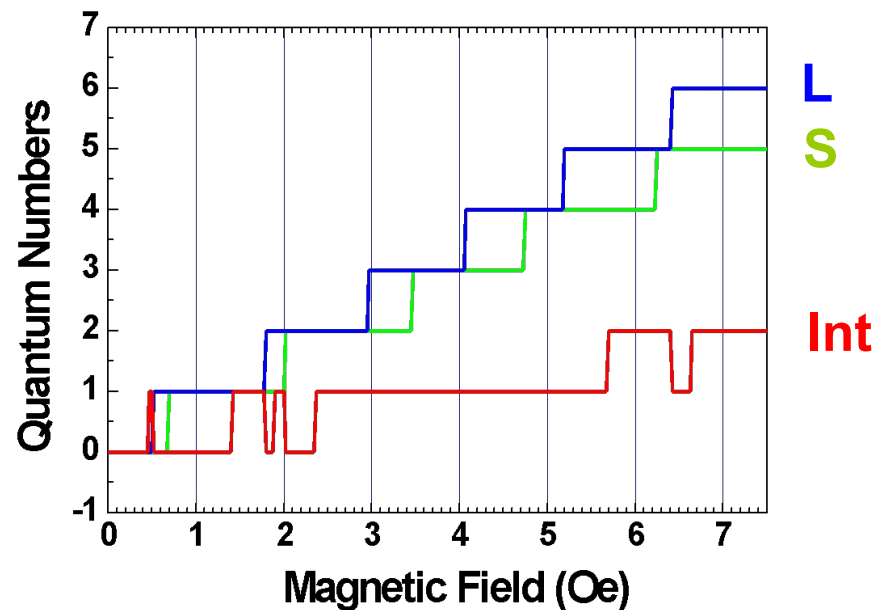


- Structures were fabricated by e-beam lithography using NanoMaker
- Fabrication defect resulted in drastic difference of $I_c(B)$ compared to symmetric structure

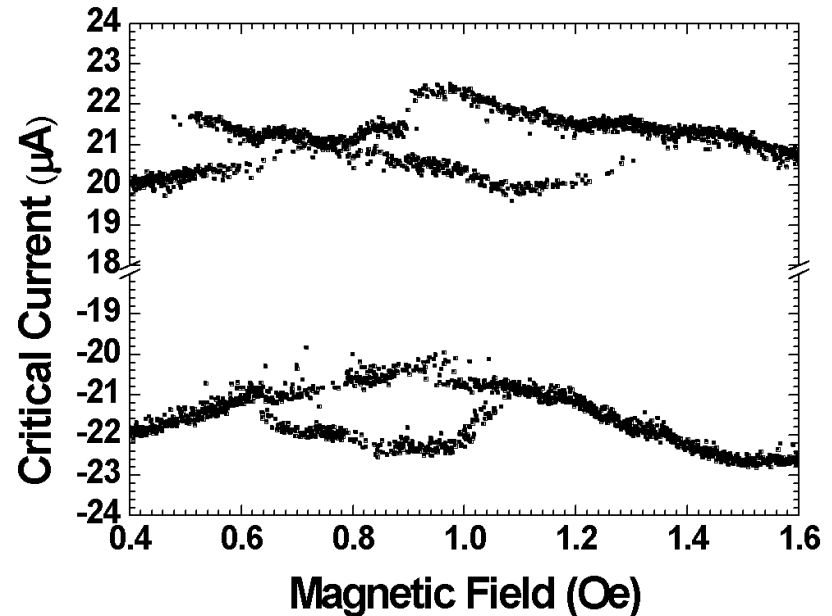
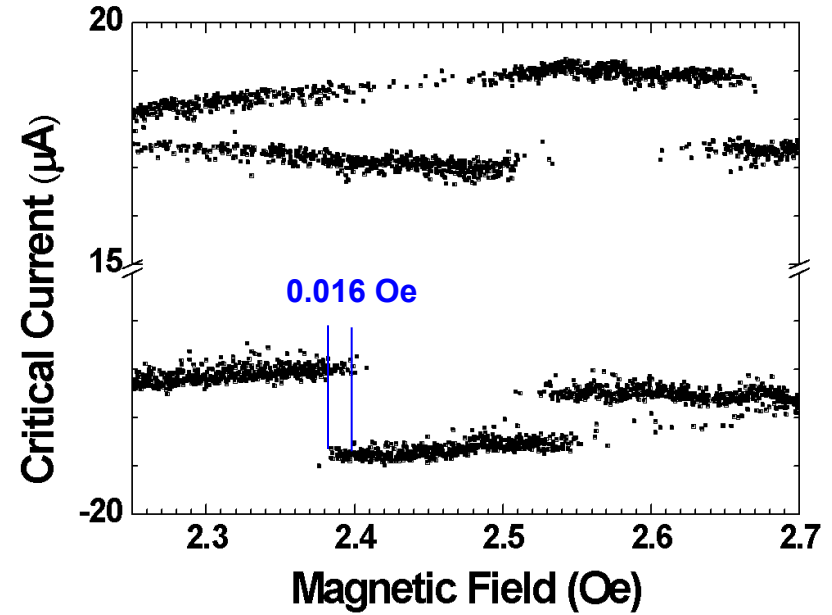
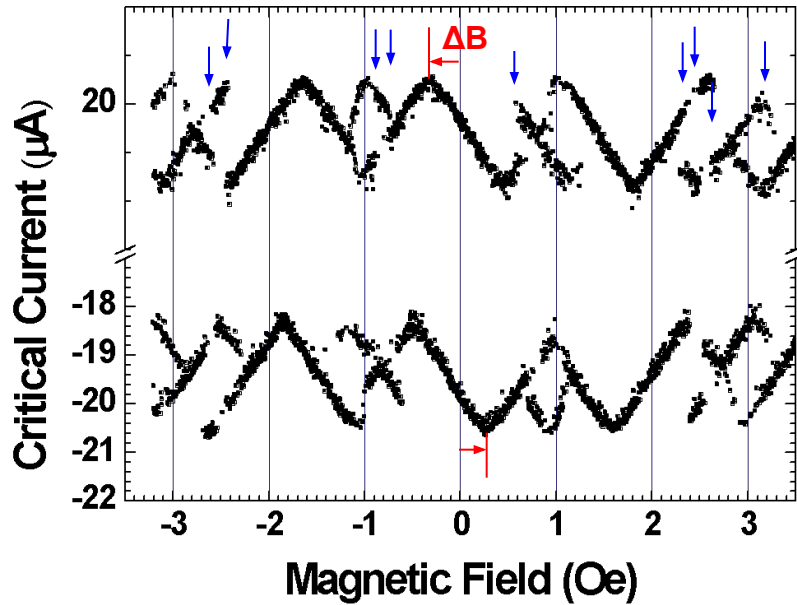
Critical current in symmetric double ring detector



- **Current jumps are observed**
- **Critical current behavior corresponds to that of symmetric type structure**
- **All details of critical current are in agreement with theory**
- **The only fitting parameter was the area of the rings**

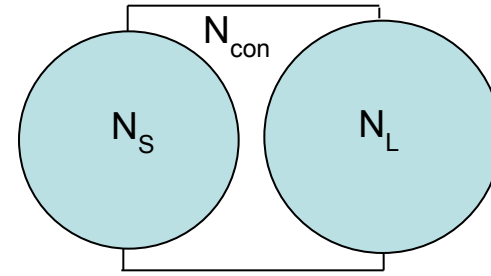
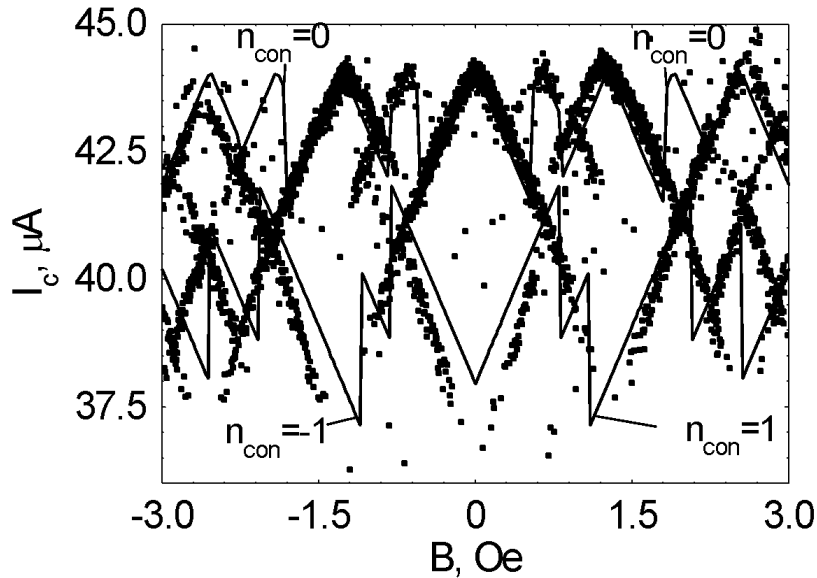


Critical current in asymmetric double ring detector

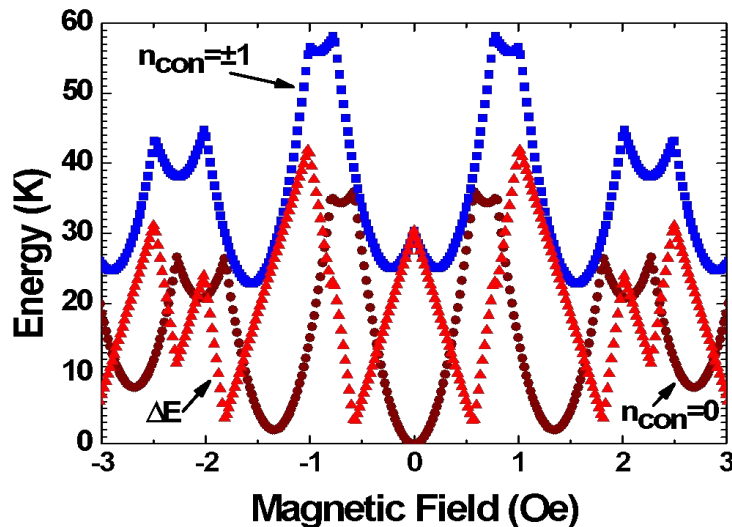


- Critical current behavior corresponds to that of asymmetric type structure
- Current jumps are observed
- Multiple current states are revealed
- The width of current jump $\sim 0.016 \text{ Oe} = 0.016 \Phi_0$
- Double and triple current states are detected

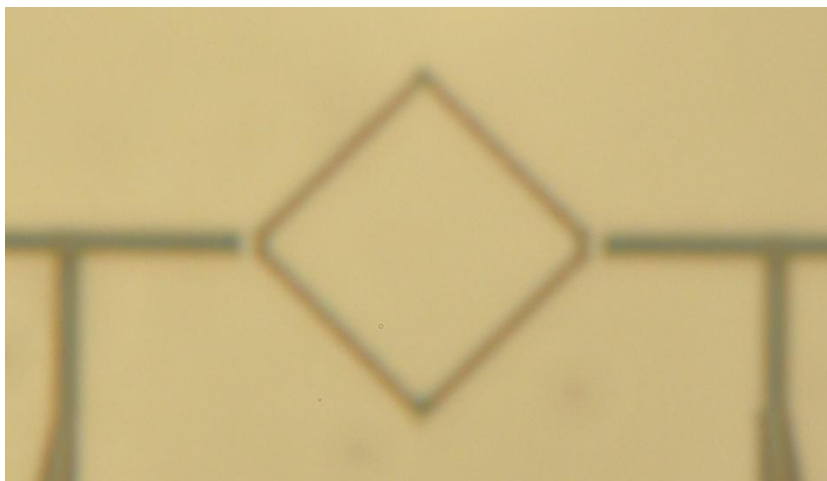
“Possible” explanation of critical current in asymmetric structures



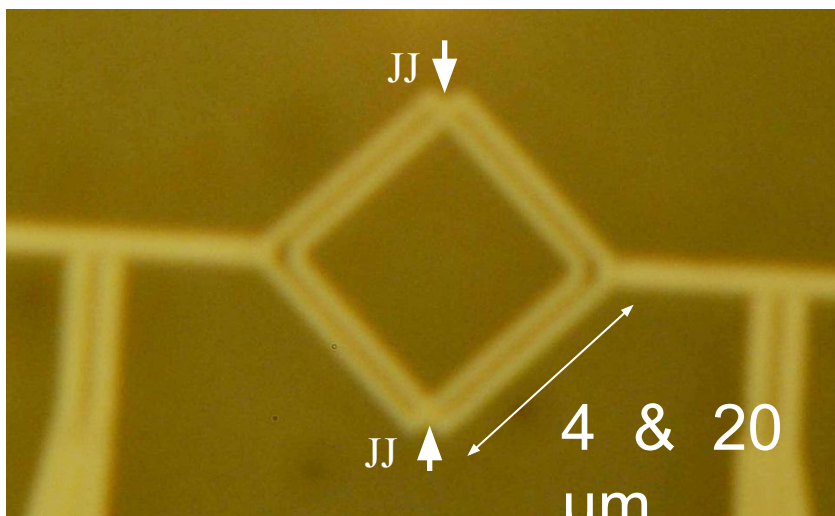
- Direct explanation of asymmetric structure critical current **is not possible**
- Critical current of asymmetric structure was “symmetrized”
- Minimum energy states correspond to $N_{\text{con}} = 0$
- Next energy level corresponds to $N_{\text{con}} = \pm 1$



Geometry and Fabrication of Superconducting DDCI as Detector of Quantum States

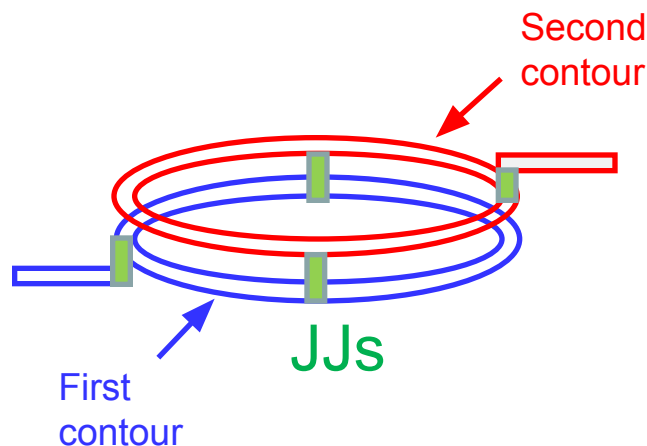


Suspended Resist Mask



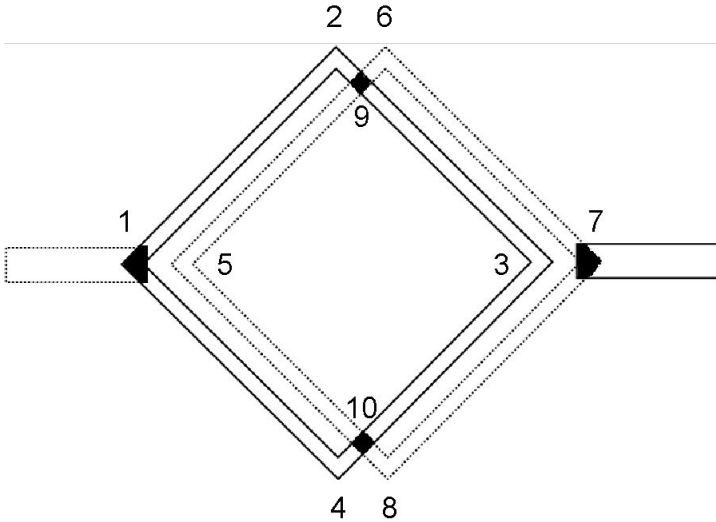
Optical image of DDCI

- Structure was fabricated by e-beam lithography to form suspended resist mask and two angle shadow evaporation of aluminum (30 nm and 35 nm) with intermediate first aluminum layer oxidation
- Square side – 4 and 20 μm, width – 0.3 μm
- $R(4.2\text{ K})=6\text{ k}\Omega$



The DDCI structure consists of two independent superconducting square contours connected by two Josephson junctions

Phase relation for Josephson Junctions



Critical current of structure is determined by areas of JJs S_9 and S_{10} since $(S_1, S_7) > (S_9 + S_{10})$

Phase difference for 3 contours :

$$\varphi_{412} = \pi n_1 \quad \text{a half of } 1-2-3-4-1 \text{ contour}$$

$$\varphi_{678} = \pi n_2 \quad \text{a half of } 5-6-7-8-5 \text{ contour}$$

For a contour $1-2-9-6-7-8-10-4-1$

$$\varphi_{412} + \Delta\varphi_9 + \varphi_{678} + \Delta\varphi_{10} = 2\pi n_3 \quad \text{or}$$

$$\pi n_1 + \Delta\varphi_9 + \pi n_2 + \Delta\varphi_{10} = 2\pi n_3$$

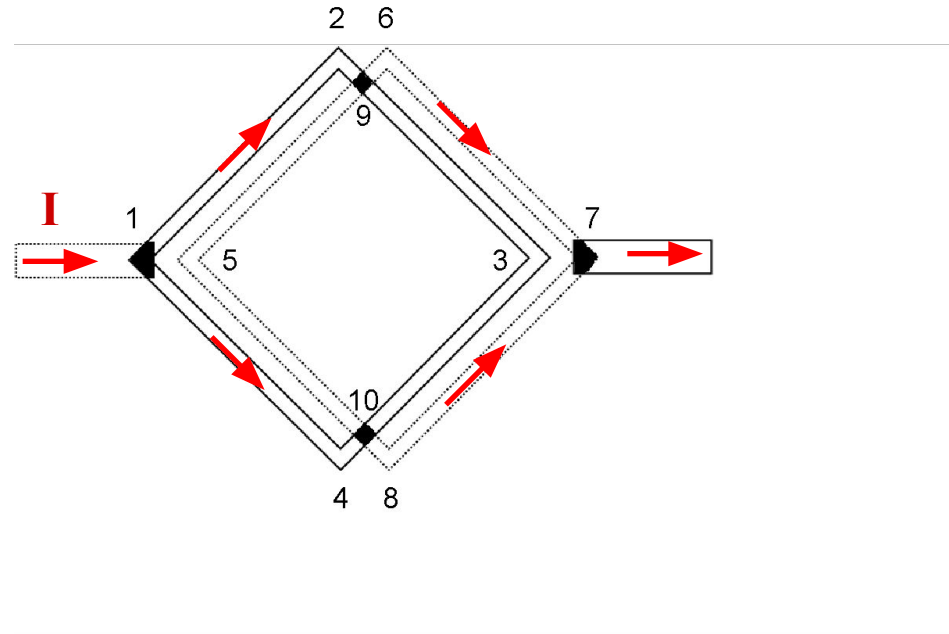
Where n_1, n_2, n_3 are integers and

$\Delta\varphi_9, \Delta\varphi_{10}$ phase difference on 9 and 10 JJs

We neglect phase difference on small segments

2-9, 9-6, 8-10, 10-4

Phase Dependence of Current through DDCl



$$I = I_{c9} \sin \Delta \varphi_9 + I_{c10} \sin(-\Delta \varphi_{10})$$

remembering that

$$\pi n_1 + \Delta \varphi_9 + \pi n_2 + \Delta \varphi_{10} = 2\pi n_3 \text{ and}$$

substituting $\Delta \varphi_{10}$ one can get

$$I = I_{c9} \sin \Delta \varphi_9 + I_{c10} \sin(-2\pi n_3 + \pi(n_1 + n_2) + \Delta \varphi_9)$$

Due to periodicity of $\sin(x)$, $2\pi n_3$ could be omitted. Finally

$$I = I_{c9} \sin \Delta \varphi_9 + I_{c10} \sin(\Delta \varphi_9 + \pi(n_1 + n_2)) \quad (1)$$

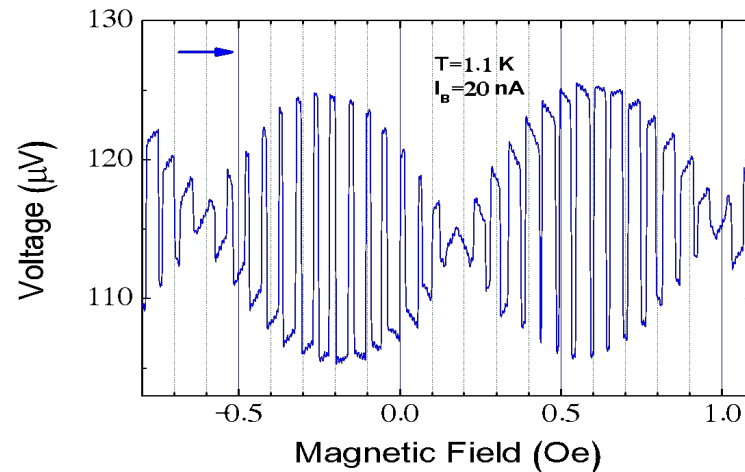
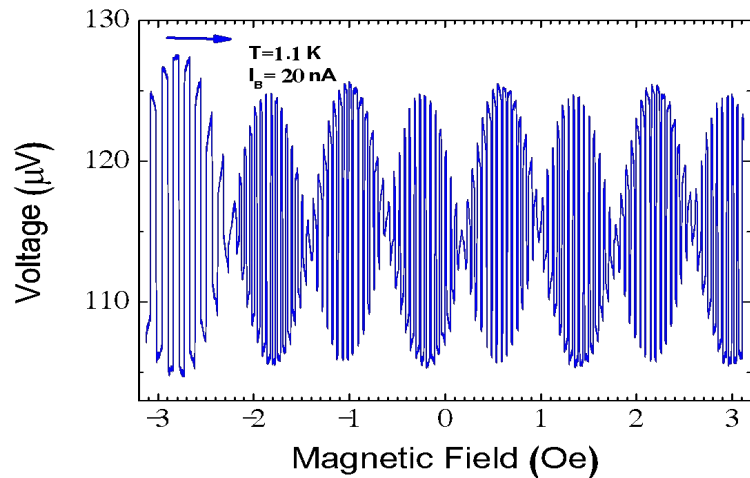
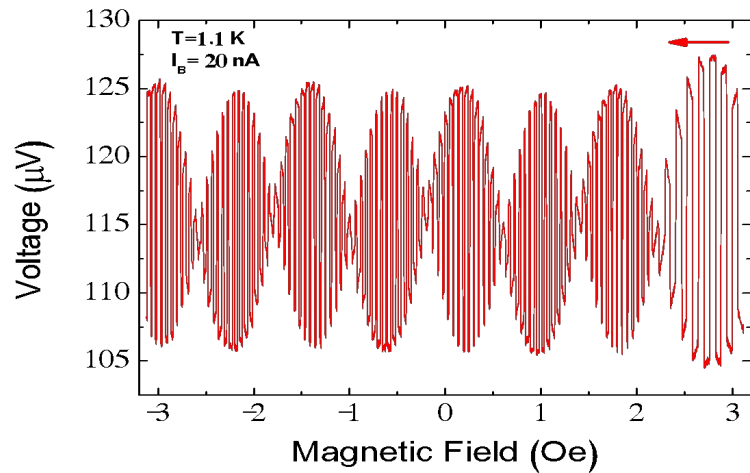
$$I_C = I_{\max} = \begin{cases} I_{c9} + I_{c10}, & \text{when } (n_1 + n_2) \text{ is even} \\ I_{c9} - I_{c10}, & \text{when } (n_1 + n_2) \text{ is odd} \end{cases}$$

In (1), current depends only on parity of quantum number sum and does not depend on contour areas and magnetic field !! - Ideal detector of quantum states

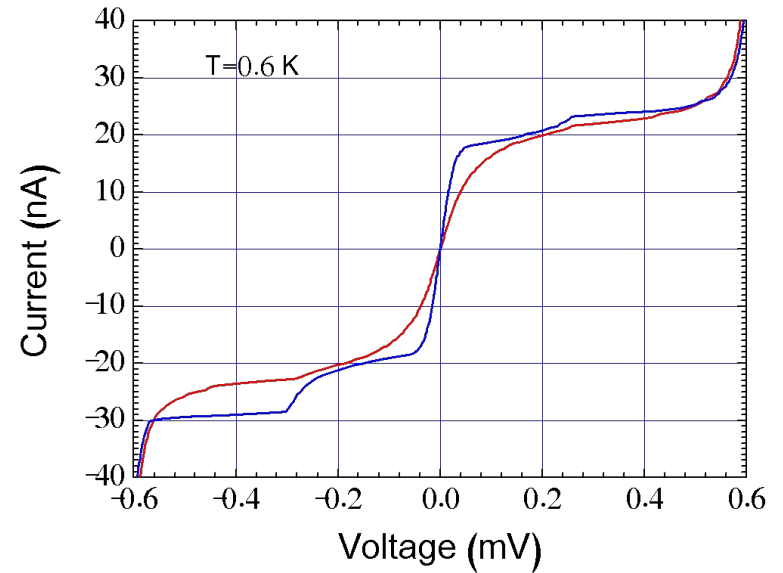
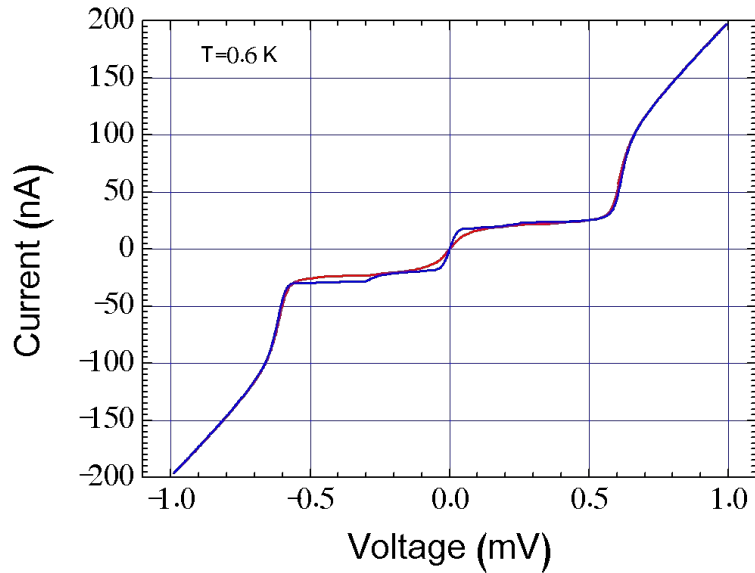
In case of $I_{c9} = I_{c10} = I_0$, there will be critical current jumps from zero to $2I_0$ and back to zero for sequential changes of n_1 and n_2

Экспериментальные скачки напряжения ($20 \mu\text{m}$) из-за изменений квантовых чисел в магнитном поле ($T=1.1 \text{ K}$)

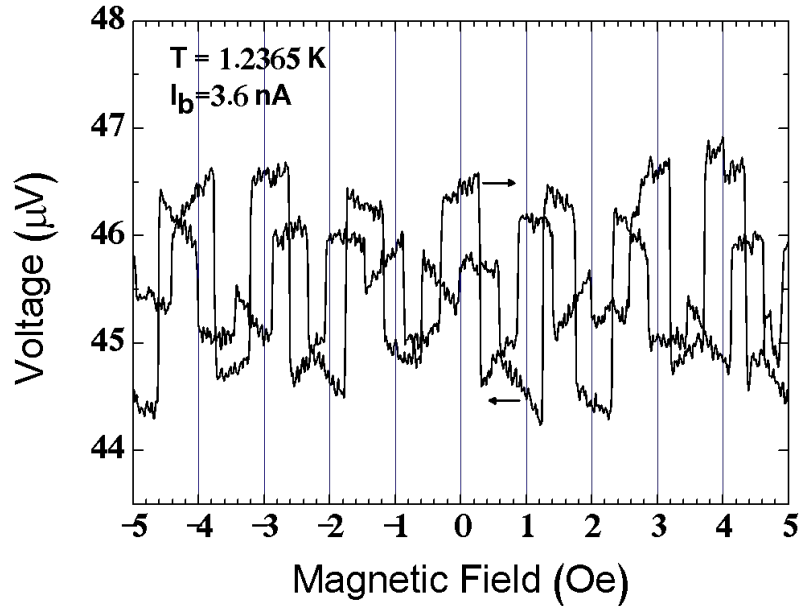
- Период осцилляций равен 0.052 Oe , что соответствует $20 \mu\text{m}$ контуру
- Наблюдается амплитудная модуляция с периодом $\sim 0.8 \text{ Oe}$, что объясняется пространственным сдвигом контуров из-за двухуглового напыления
- Отклик по напряжению следует температурной зависимости сверхпроводящей щели, достигая $200 \mu\text{V}$ при 0.6 K
- Чувствительность в области скачков напряжения $\sim 200 \mu\text{V}/\Phi_0$ ($T=1.1 \text{ K}$)



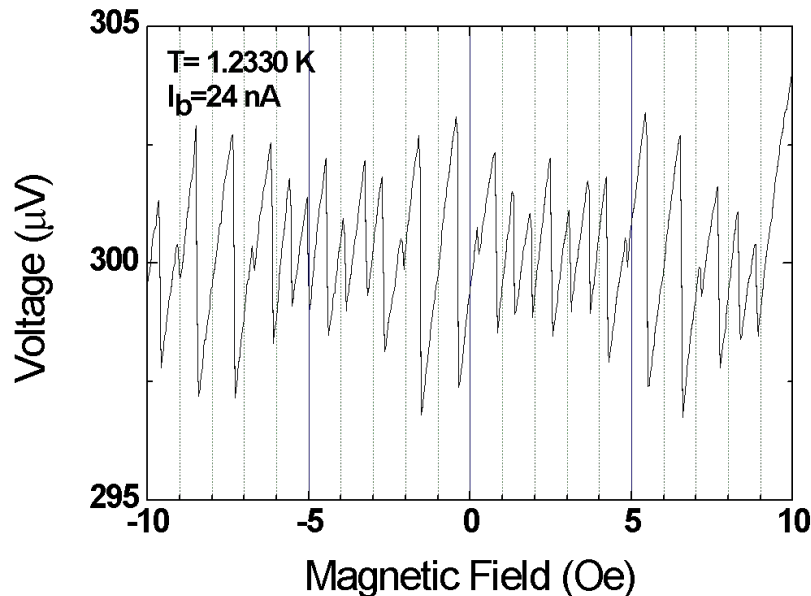
Current-Voltage characteristics (20 μm) at different magnetic fields corresponding to (n_1+n_2) changes by 1



Voltage jumps (4 μm) due to changes of quantum numbers in magnetic field in near T_c resistive transition region



- In case of $I_{c9} = I_{c10} = I_0$, any bias current $I_B \ll I_0 < I_P$ produces voltage jumps from 0 to $I_B R_N / 3$ and back (R_N – normal resistance of one of JJs)
- For typical $I_B = 1 \text{ nA}$ and $R_N = 13 \text{ k}\Omega$, there will be voltage jumps of $2 \mu\text{V}$
- At $I_B = 3.6 \text{ nA}$, periodic (Φ_0) voltage jumps with amplitude $\sim 2 \mu\text{V}$ are observed. There is also hysteretic behavior with changing direction of B



- At $I_B = 24 \text{ nA}$, instead of meander type saw-toothed voltage is detected

Future experiments (Ideas)

- Из-за пространственного сдвига контуров наблюдается амплитудная модуляция отклика ДДКИ. «Идеальный» ДДКИ (без сдвига) можно изготовить из трехслойных Nb-AlO_x-Nb структур
- Чувствительность любого детектора магнитного поля зависит от $dV/d\Phi$. Максимальная чувствительность сквмда $\sim 10 \mu V/\Phi_0$, Чувствительность улучшенных структур (Superconducting Quantum Interference Proximity Transistor) $\sim 60 \mu V/\Phi_0$. В случае ДДКИ, $dV/d\Phi \sim 200 \mu V/\Phi_0$. ДДКИ может использоваться для разработки детекторов магнитного поля с высокой чувствительности.

Выводы

Достоинства ДДКИ заключаются в том, что при изменении квантового числа на единицу, интерферометр дает максимально возможный отклик для сверхпроводящего устройства – скачки напряжения, равные величине сверхпроводящей щели. Ввиду, независимости скачков напряжения от площади контуров предлагается также использовать этот интерферометр как прецизионный измеритель магнитного поля с уникальной чувствительностью. Показано, что двухконтурные сверхпроводящие интерферометры с большой площадью могут быть использованы в качестве цифровых магнетометров.

Выводы

- Проведены измерения критического тока одиночных, двойных, множественных сверхпроводящих асимметричных колец и других асимметричных структур. Обнаружен сдвиг экстремумов тока и множественные токовые состояния в магнитном поле. Поведение сдвига исследовано как функция степени асимметрии колец и температуры. Сдвиг экстремумов критического тока противоречит измерениям осцилляций сопротивления Литтла-Паркса и выпрямленного напряжения.
- Эффект выпрямления асимметричных структур удалось объяснить анизотропией критических токов.
- Предложена структура из множественных последовательно соединенных асимметричных колец как детектор неравновесных шумов. Впервые проведена калибровка детектора шумов и измерен температурный спектр шумов в рабочем диапазоне температур с разным количеством асимметричных колец (до 1080), позволяющих измерять постоянные напряжения около 10^{-11} Вольт с одного асимметричного кольца. Минимальная измеренная мощность составила 2×10^{-15} Вт.
- Показано, что асимметричное кольцо не может быть простейшим детектором квантовых состояний. Предложена двухкольцевая структура с фазовой связью колец, где в симметричных структурах впервые наблюдались скачки критического тока, соответствующие изменению квантовых чисел в сверхпроводящих контурах. Эксперимент для симметричных структур хорошо описывается теорией. В случае асимметричных структур наблюдается одновременно сдвиг экстремумов тока и множественные состояния. Поведение асимметричных структур не описывается теорией.
- Предложен и реализован новый квантовый прибор – дифференциальный двухконтурный сверхпроводящий интерферометр, Проведен анализ работы интерферометра. Отклик интерферометра зависит от четности суммы квантовых чисел контуров. Изготовлены структуры интерферометров с размерами 4 и 20 мкм, проведены измерения в широком диапазоне температур (0.4-1)Тс. К достоинствам прибора относится тот факт, что при изменении квантового числа на единицу, интерферометр дает максимально возможный отклик для сверхпроводящего устройства – скачки напряжения, равные величине сверхпроводящей щели. Ввиду, независимости скачков напряжения от площади колец предлагается также использовать этот интерферометр как прецизионный измеритель магнитного поля с уникальной чувствительностью. Показано, что двухконтурные сверхпроводящие интерферометры с большой площадью могут быть использованы в качестве цифровых магнетометров.

Thank you
for
your attention