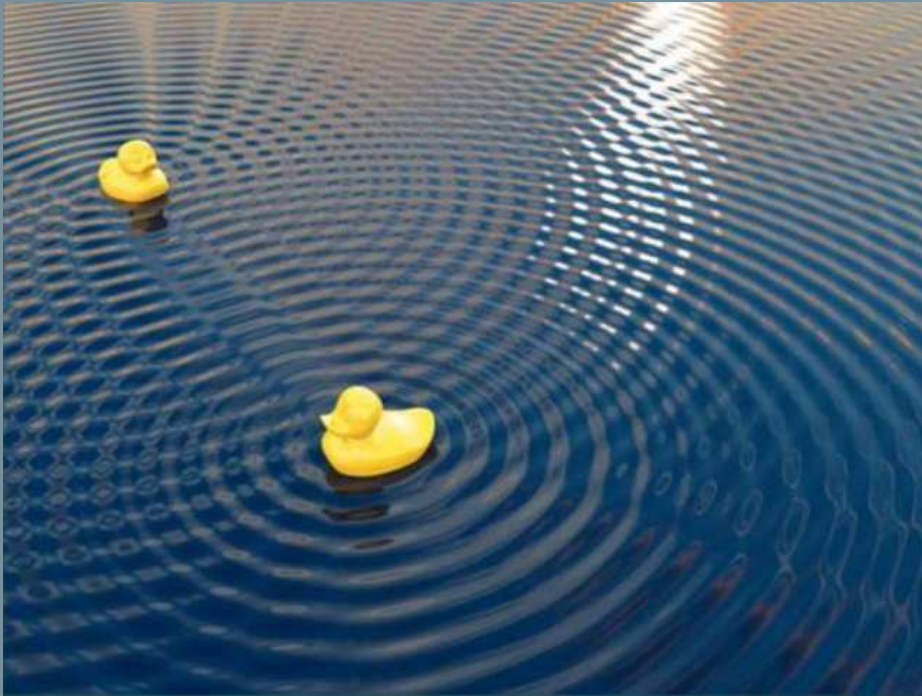


Тонкопленочные интерферометрические структуры
для сверхпроводящей
электроники

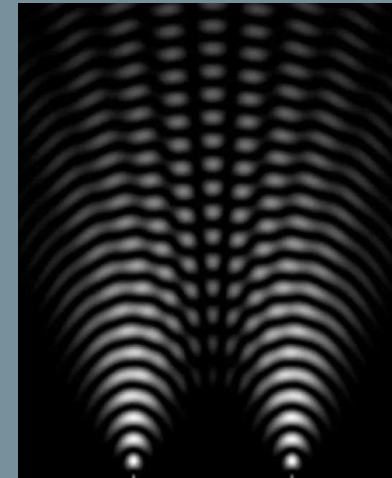
Ионин Александр Сергеевич

Интерференция волн



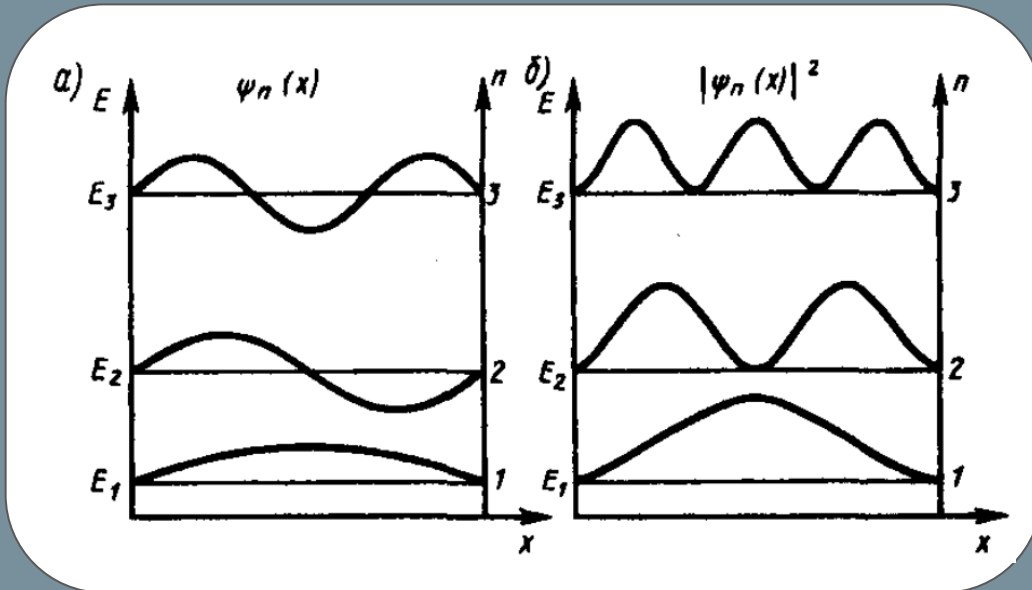
$$\sqrt{(A_1 e^{i\varphi_1} + A_2 e^{i\varphi_2})(A_1 e^{-i\varphi_1} + A_2 e^{-i\varphi_2})}$$
$$\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}$$

где $\varphi = \omega t + kr + \alpha$, отсюда max при $k\Delta r = 2\pi n$



Электрон - это волна

Стоячие волны в квантовой яме.



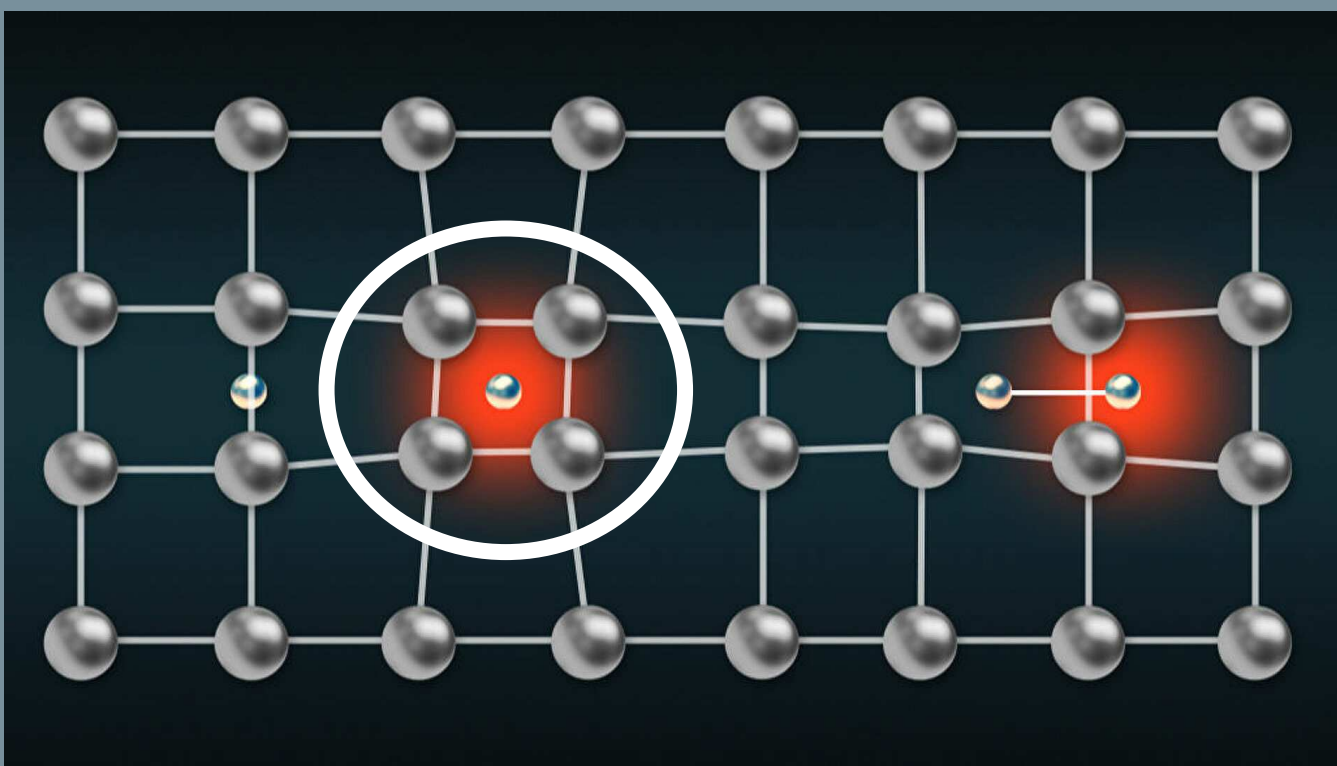
Волновая функция
свободного электрона

$$\Psi = |\Psi| \exp\left(\frac{i}{\hbar} pr\right)$$

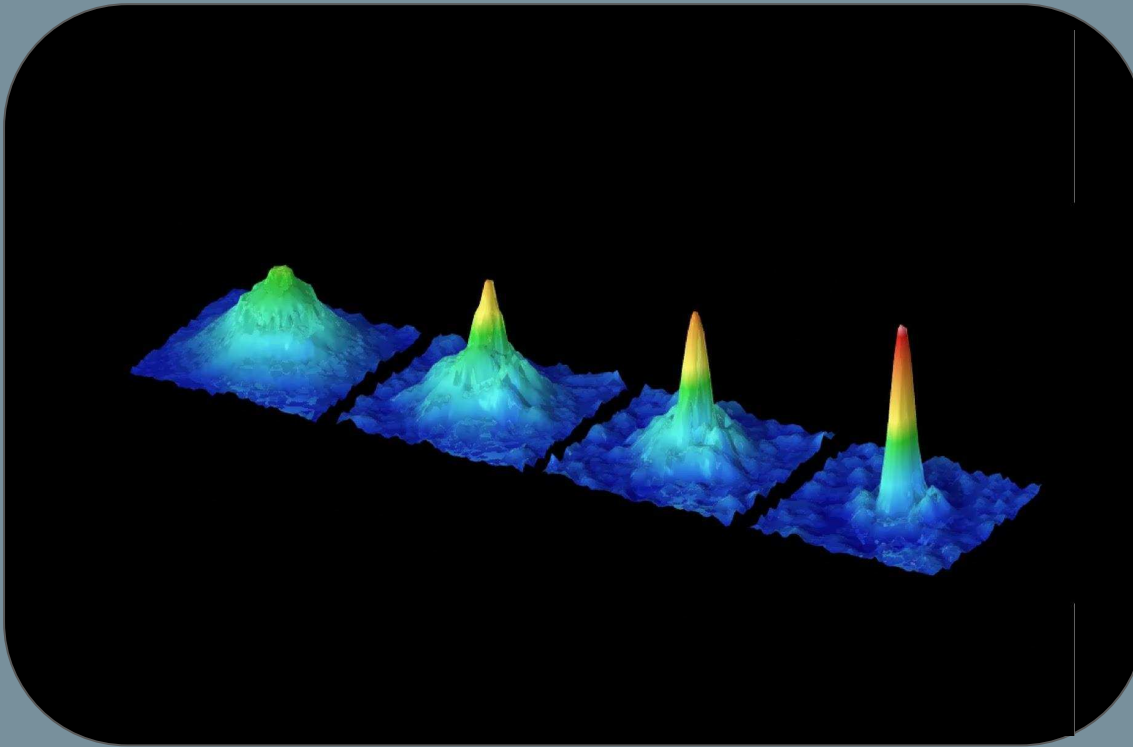
$$\frac{1}{\sqrt{N!}} \begin{vmatrix} \psi_1(\mathbf{r}_1) & \psi_2(\mathbf{r}_1) & \dots & \psi_i(\mathbf{r}_1) & \dots & \psi_N(\mathbf{r}_1) \\ \psi_1(\mathbf{r}_2) & \psi_2(\mathbf{r}_2) & \dots & \psi_i(\mathbf{r}_2) & \dots & \psi_N(\mathbf{r}_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \psi_1(\mathbf{r}_i) & \psi_2(\mathbf{r}_i) & \dots & \psi_i(\mathbf{r}_i) & \dots & \psi_N(\mathbf{r}_i) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \psi_1(\mathbf{r}_N) & \psi_2(\mathbf{r}_N) & \dots & \psi_i(\mathbf{r}_N) & \dots & \psi_N(\mathbf{r}_N) \end{vmatrix}$$

Детерминант Слэтера

Механизм образования Куперовских пар



Конденсат Бозе - Эйнштейна



Сверхпроводящие состояние описывается одной фазой

$$|\Psi|e^{i\varphi}$$

Критерий Ландау

Рассмотрим жидкость, движущуюся по капилляру со скоростью $v = \text{const}$. При наличии вязкости будет происходить диссипация кинетической энергии внутри самой жидкости и в месте её соприкосновения с капилляром и, как следствие, замедление скорости потока. Диссипация происходит за счёт возникновения элементарных возмущений.

Перейдём в систему координат, в которой жидкость покоится, а капилляр движется со скоростью $-v$. Рассмотрим одно элементарное возмущение с импульсом \mathbf{p} и энергией $\varepsilon(\mathbf{p})$. Тогда энергия E_0 жидкости (в системе координат, в которой она изначально покоилась), станет равна энергии этого возмущения ε , а её импульс \mathbf{P}_0 — импульсу \mathbf{p} . Перейдём теперь обратно в систему координат, в которой покоится капилляр. Согласно законам преобразования энергии и импульса при переходе от одной инерциальной системы отсчёта в другую (в нерелятивистском случае), новые значения энергии и импульса имеют вид:

$$E = E_0 + \mathbf{P}_0 \mathbf{v} + \frac{Mv^2}{2},$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_0 + M\mathbf{v},$$

где M — масса жидкости. Подставляем сюда известные значения E_0 и \mathbf{P}_0 , получаем:

$$E = \varepsilon + \mathbf{p} \mathbf{v} + \frac{Mv^2}{2}.$$

Выражение $\varepsilon + \mathbf{p} \mathbf{v}$ есть изменение энергии жидкости благодаря появлению возмущения. Это изменение должно быть отрицательным, поскольку действуют диссипативные силы. Отсюда получаем выражение для скорости потока при наличии трения

$$v > \frac{\varepsilon}{p}.$$

Это неравенство должно выполняться хотя бы для некоторых значений импульса p элементарного возмущения. Соответственно, при отсутствии трения, т. е. при наблюдении сверхтекучести, при любых значениях импульса элементарных возмущений p , должно выполняться неравенство

$$v \leq \frac{\varepsilon}{p}.$$

Это условие соответствует невозможности образования квазичастицы и, следовательно, невозможности диссипации. Таким образом, для возможности наблюдения сверхтекучести в такой системе достаточно, чтобы минимальное значение отношения $\varepsilon(p)/p$ было больше нуля.

Спектр сверхпроводника

Спектр электронных возбуждений в сверхпроводнике. Роль щели в спектре возбуждений сверхпроводника.

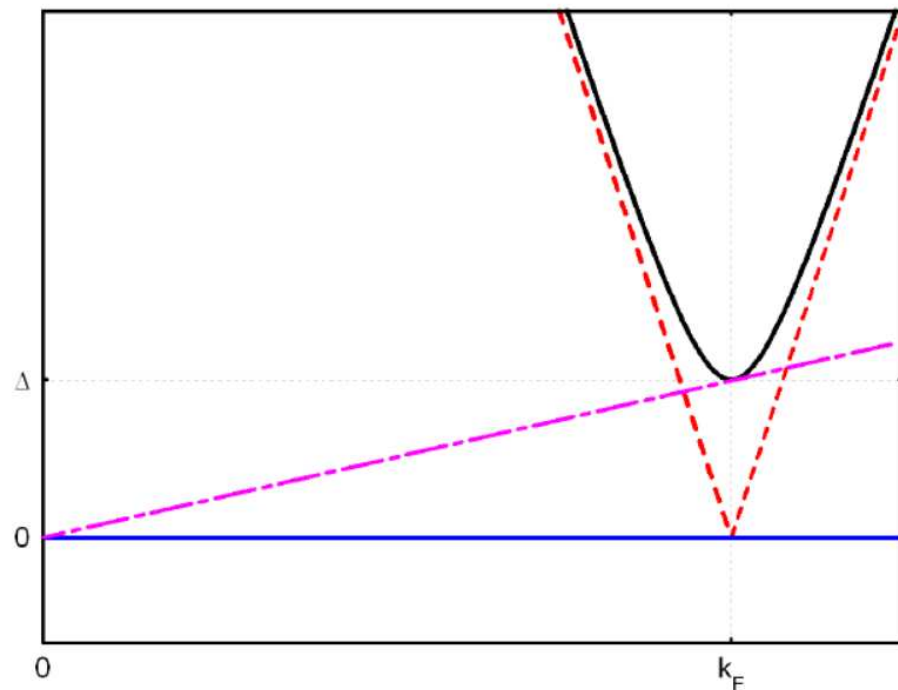
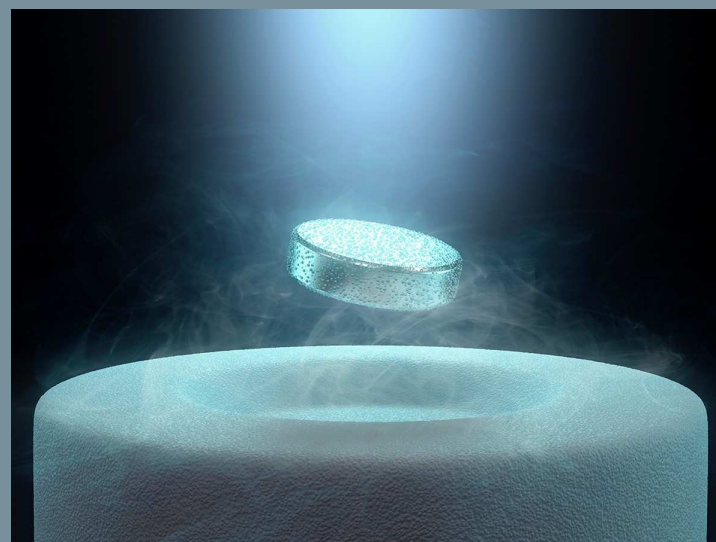


Рисунок 9: Спектр возбуждений в нормальном металле (пунктир) и сверхпроводнике (сплошная линия). Штрих-пунктирная линия показывает построение критической скорости Ландау. Нулевой уровень соответствует энергии основного состояния.

$$\Delta_0 = 2\hbar\omega_D e^{-1/N(0)V}.$$

Отсюда сразу находим

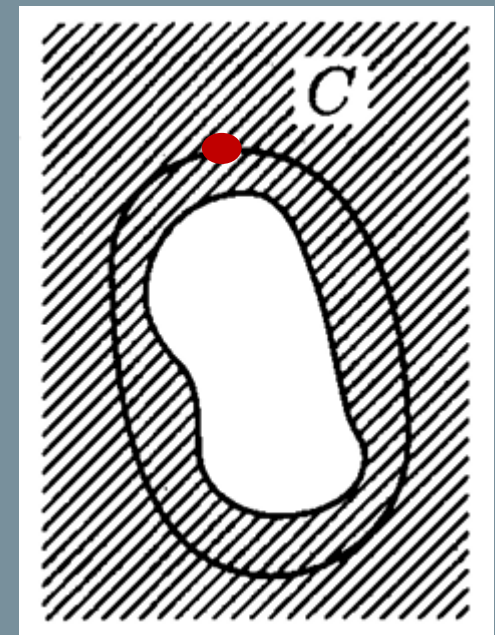
$$2\Delta_0 = 3.52k_B T_c.$$



Эффект Джозефсона и квантование магнитного потока



$$\varphi = \Theta_2 - \Theta_1$$



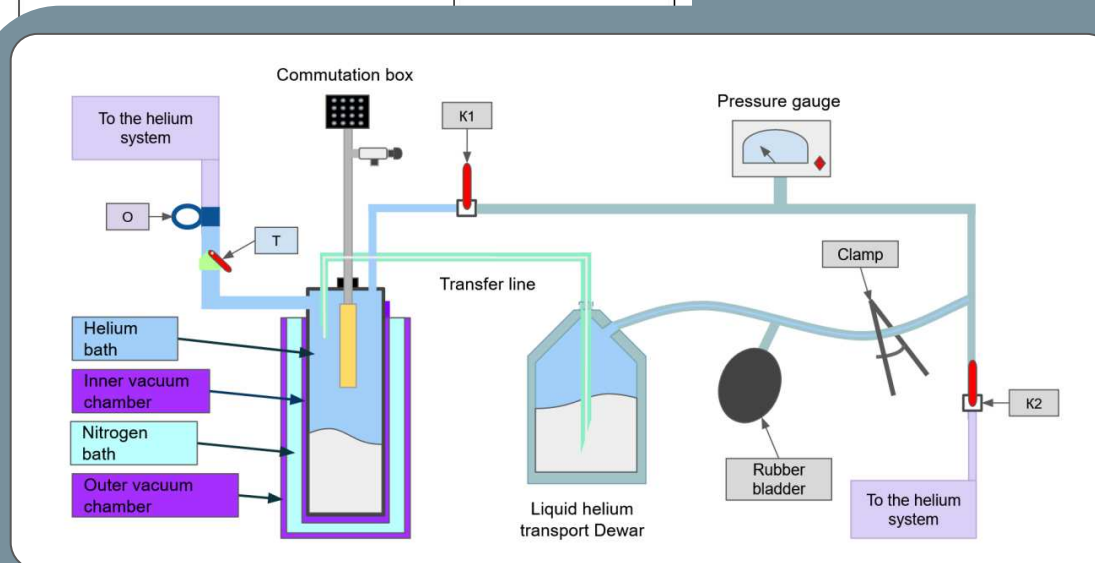
- 1) Если ток через переход отсутствует, $I_s = 0$, то и разность фаз $\varphi = 0$.
- 2) В силу того что изменение фазы θ одного из берегов на 2π ничего физически не изменяет, ясно, что функция $I_s(\varphi)$ — периодическая с периодом 2π , т. е. $I_s(\varphi) = I_s(\varphi + 2\pi)$.
- 3) Изменение знака тока должно изменить и знак разности фаз, поэтому $I_s(\varphi) = -I_s(-\varphi)$.

$$\Phi = n\Phi_0$$
$$\Phi_0 = \frac{hc}{2e} \approx 2 \cdot 10^{-15} \text{ Wb}$$

Сверхпроводимость низкотемпературный эффект

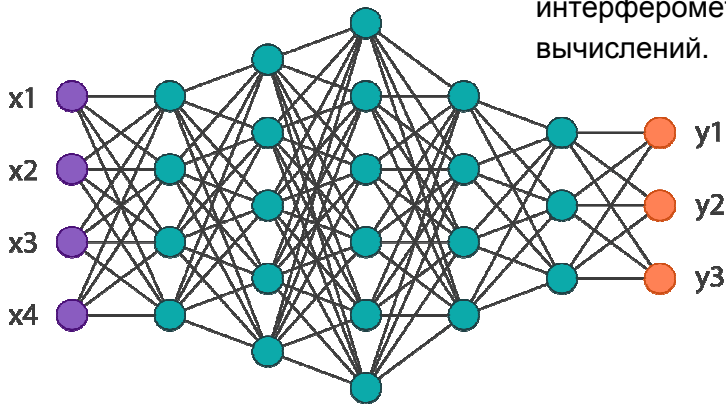
| Металлы | Критическая Температура (К) |
|-----------------------|-----------------------------|
| Nb | 9,25 |
| Tc | 7,8 |
| V | 5,4 |
| NbTi | 9,8 |
| | |
| | |
| | |
| | |
| Интерметаллиды | |
| Nb3Ge | 23,2 |
| Nb3Si | 19 |
| Nb3Sn | 18,1 |
| Nb3Al | 18 |
| V3Si | 17,1 |
| Ta3Pb | 17 |
| V3G | 16,8 |
| Nb3Ga | 14,5 |
| V3In | 13,9 |

| Купраты | Критическая Температура (К) |
|--|-----------------------------|
| $\text{Yb}_{0,9}\text{Ca}_{0,1}\text{Ba}_{1,8}\text{Sr}_{0,2}\text{Cu}_4\text{O}_8$ | 86 |
| $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ | 93 |
| $\text{Y}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_{15}$ | 93 |
| $\text{Bi}_{1,6}\text{Pb}_{0,6}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Sb}_{0,1}\text{Cu}_3\text{O}_x$ | 115 |
| $\text{Tl}_{1,6}\text{Hg}_{0,4}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+d}$ | 130 |
| $\text{Hg}_{0,8}\text{Tl}_{0,2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8,33}$ (record) | 138 |



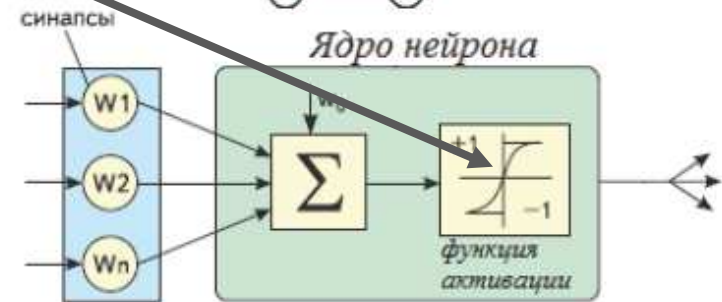
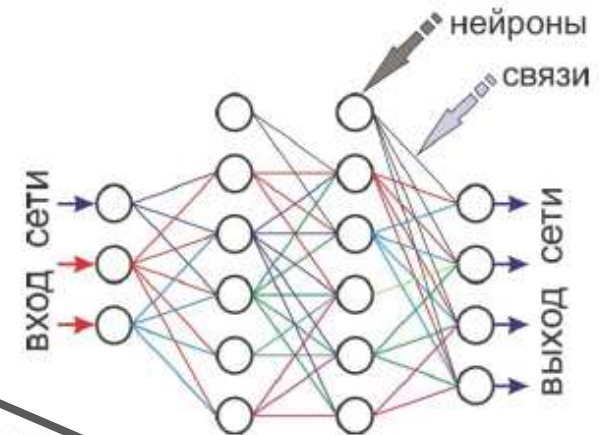
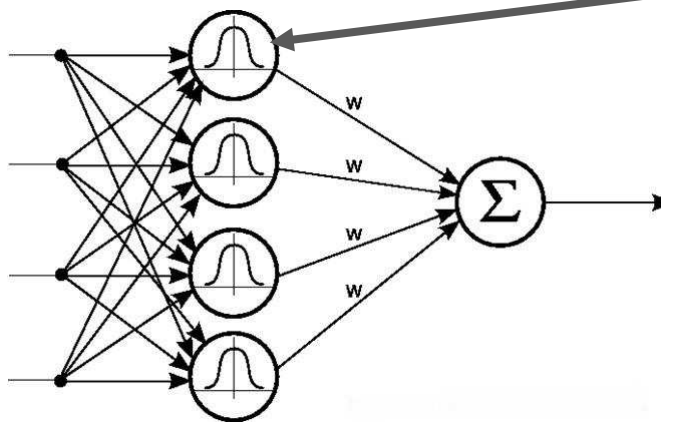
Что такое нейросети и их составные части

Данная работа посвящена практической реализации сверхпроводящих интерферометров для нейроморфных вычислений.

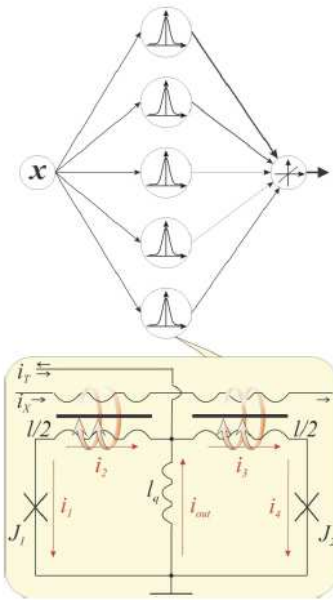


Сигма функция

Нормальное распределение

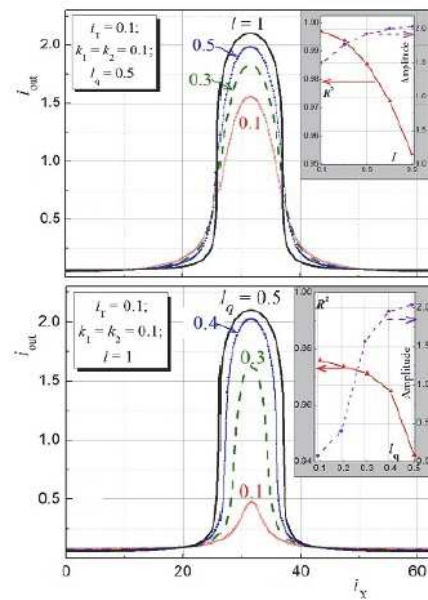


Анализ изображений, текстов, звуковых дорожек, а также выбора оптимальных логистических плеч и реализация беспилотного вождения.



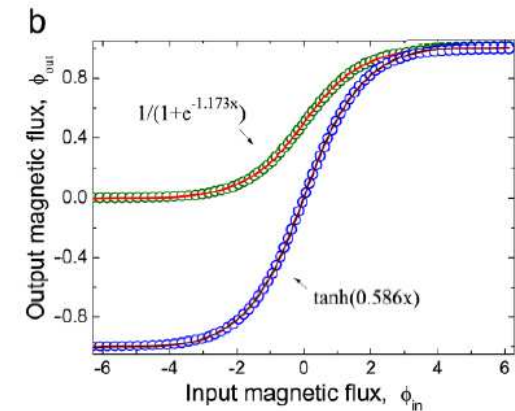
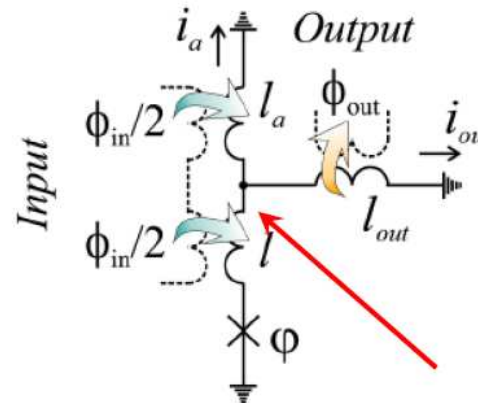
Гамма нейрон - реализует гауссово распределение

1. Кленов Н.В., "Принципы построения сверхпроводниковых искусственных нейросетей" Материалы Международной научно-технической конференции, 20 – 24 ноября 2017
2. Фельд А. Е., Кленов Н. В., Соловьев И. И., Терешонок М. В., "Адиабатические сверхпроводящие ячейки для энергоэффективных нейронных сетей" ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, ISSN 1684-1719, N9, 2016

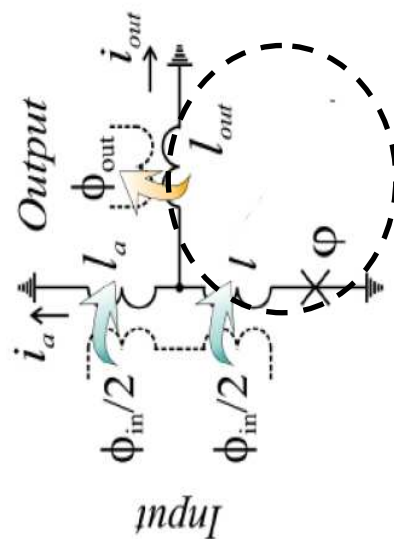
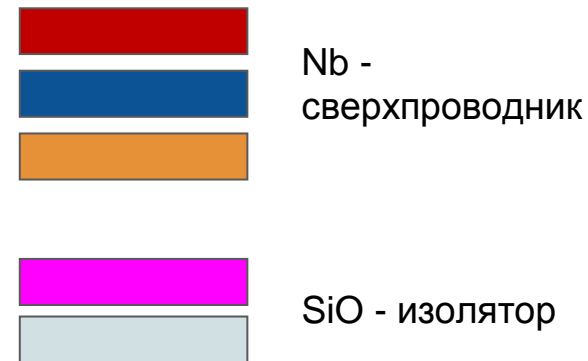


Предложенные варианты реализации нейронов

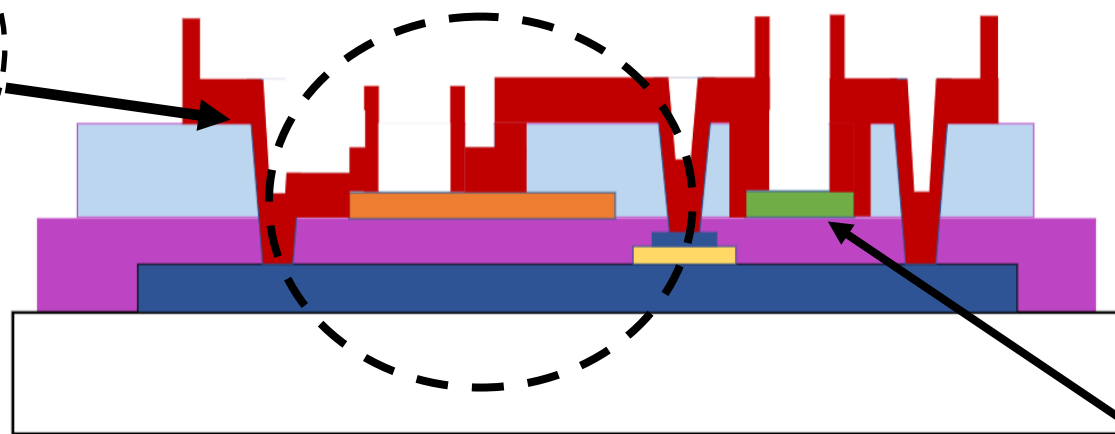
Сигма нейрон - реализует сигмоидальное поток-поток-поток преобразование



Поперечное сечение образца



Толщина верхнего слоя ниобия составляла 150 нм



SIS - Nb-AlOx-Nb

Нижний электрод имел толщину 300 нм

CuAl - резистивный шунт

Изготовленный сигма-нейрон

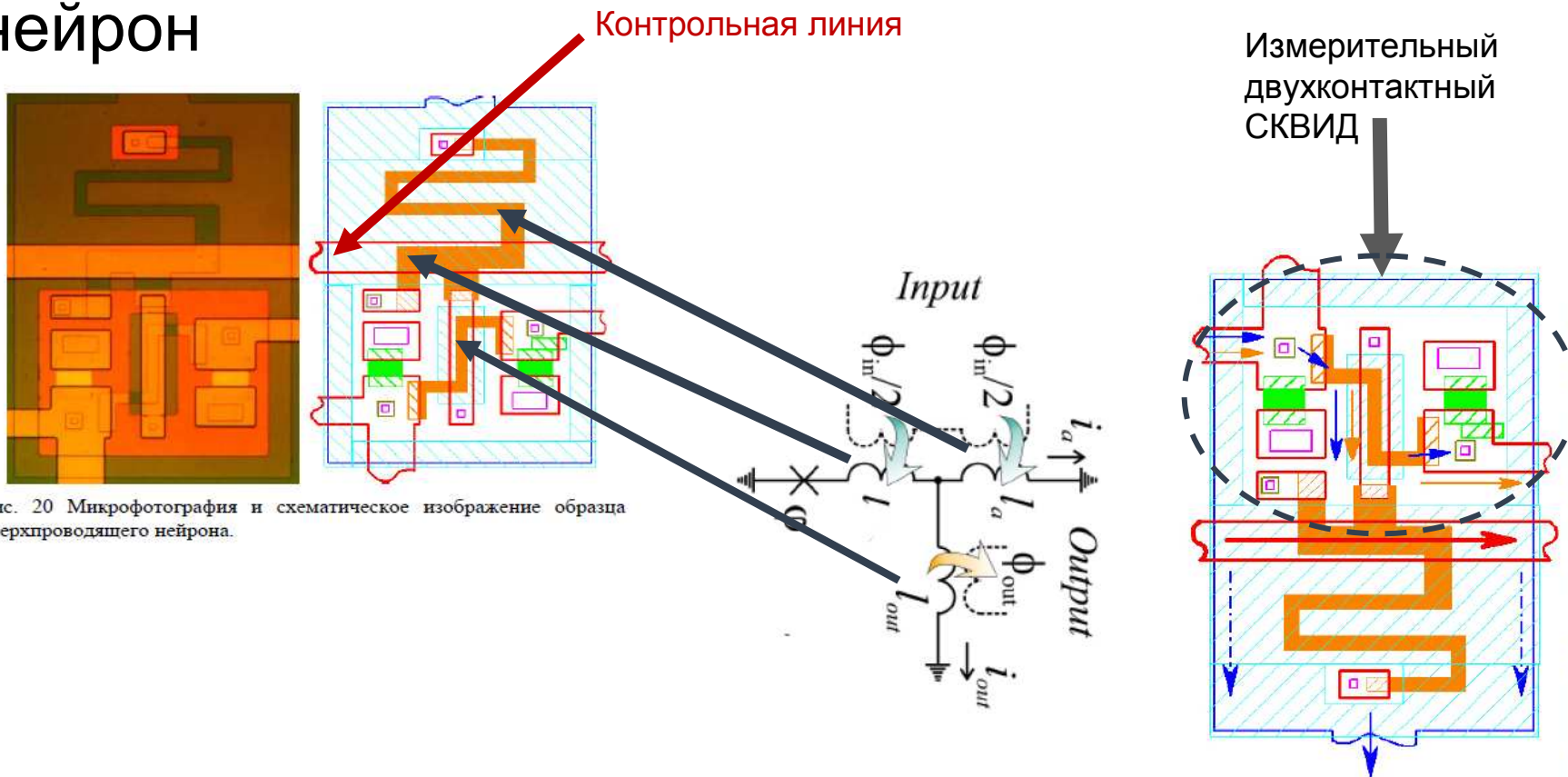
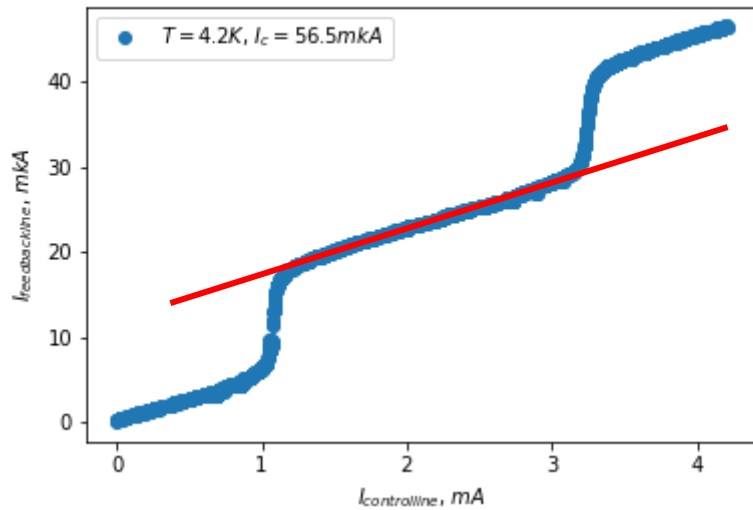


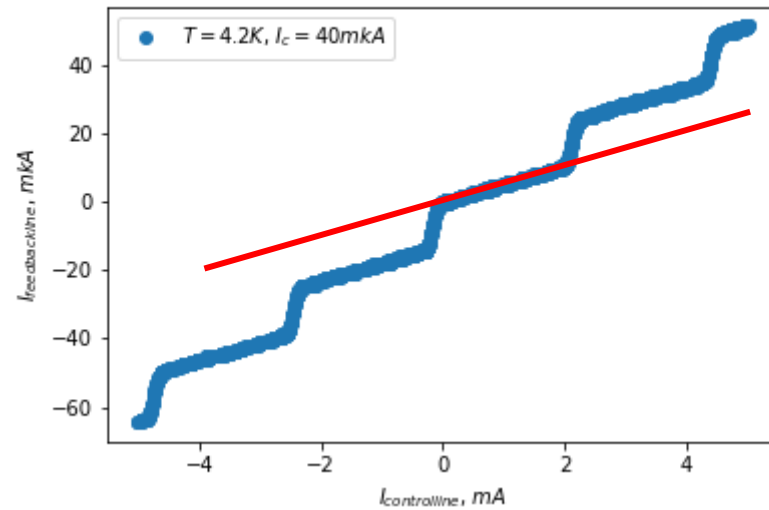
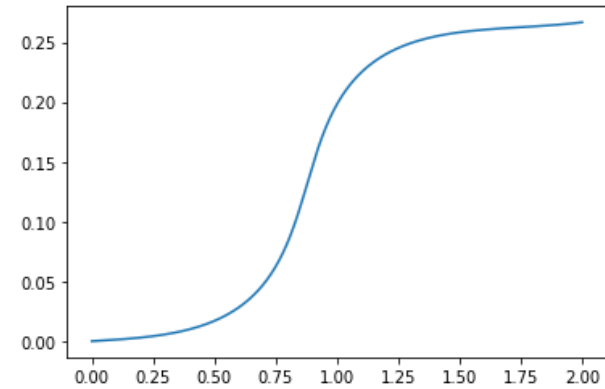
Рис. 20 Микрофотография и схематическое изображение образца сверхпроводящего нейрона.

Сигма интерферометр

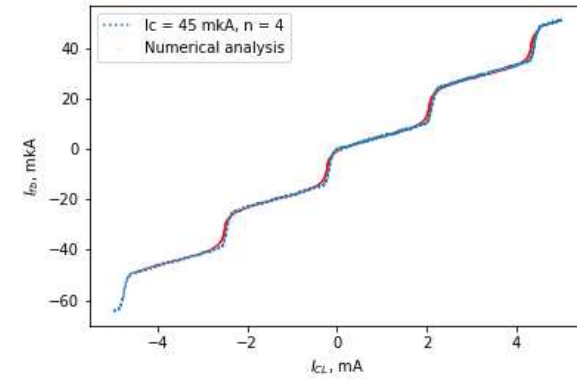
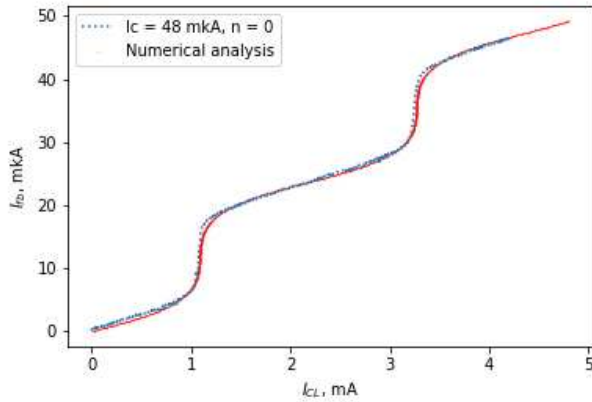
Представляют из себя искомую
передаточную функцию + линейна
зависимость



Полезный сигнал – сигма функция $1/(1 + \exp(-kx))$

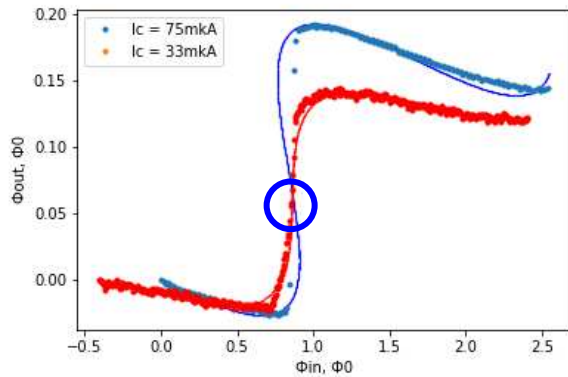


Сигма интерферометр



$$\Delta\phi_{in} = \pi[2l_{out} + l_a]/[l_a + l_{out}]$$

$$\Delta\phi_{out} = 2\pi l_{out}/[l_a + 2l_{out}]$$



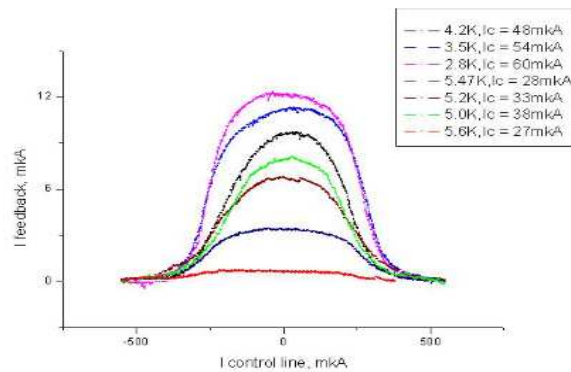
$$l_{out} \leq (1 - l^2)/2l$$

| L_{ik} , pH | 1. L_{sq} | 2. L_a | 3. L_{out} | 4. L | 5. L_c |
|---------------|-------------|----------|--------------|--------|----------|
| 1. L_{sq} | 7.02 | 0.1261 | 1.571 | 0.11 | 0.095 |
| 2. L_a | 0.1261 | 17.82 | 0.144 | 0.085 | 0.4225 |
| 3. L_{out} | 1.571 | 0.144 | 4.68 | 0.291 | 0.1738 |
| 4. L | 0.11 | 0.085 | 0.291 | 2.7 | 0.3555 |
| 5. L_c | 0.095 | 0.4225 | 0.1738 | 0.3555 | 5.98 |

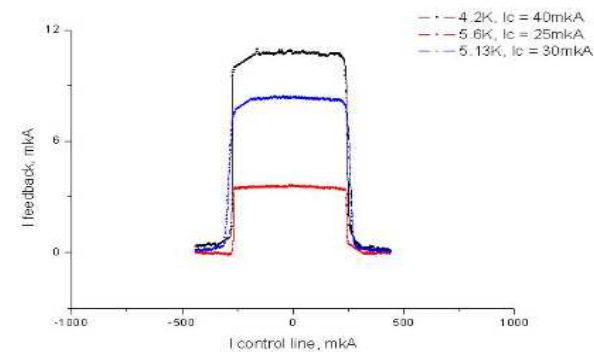
Таблица 1. Таблица индуктивностей σ - нейрона.

$$i_i(l_{ik} - \epsilon_{1k3}l_{i3})(1 - \delta_{k5})(1 - \delta_{k3}) = \varphi_k + 2\pi n_k$$

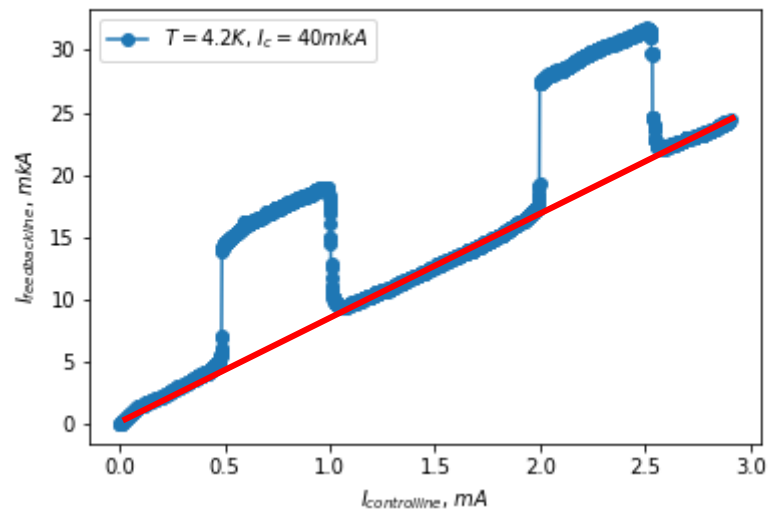
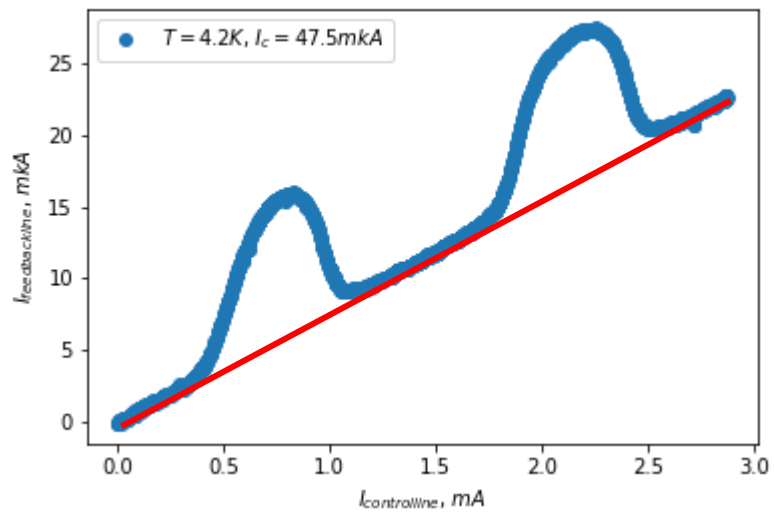
Гамма интерферометр



a)



б)



Гамма интерферометр

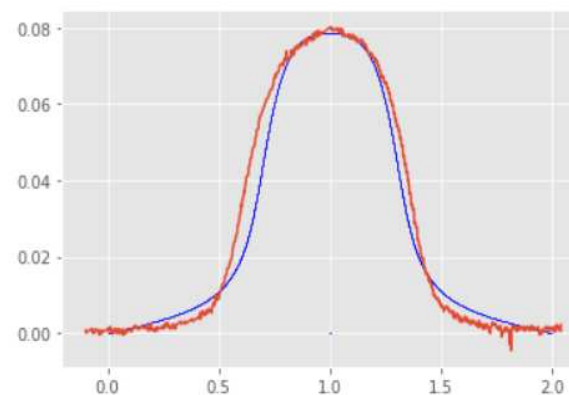
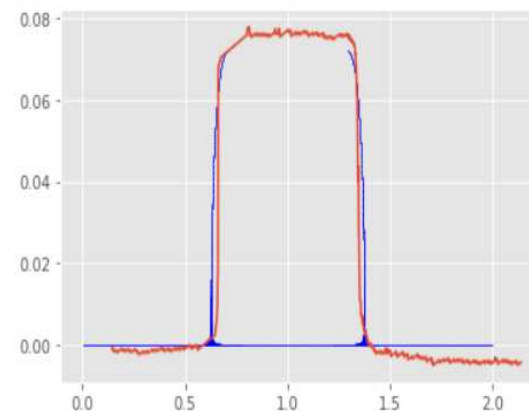
Было

$$\begin{cases} \phi_{in} = -2\Psi - l \sin(\Psi) \cos(\phi_{out}[1 + l/4l_{out}]) \\ \phi_{out} = -2l_{out} \sin(\phi_{out}[1 + l/4l_{out}]) \cos \Psi \end{cases}$$

Стало

$$\phi_{in} = -2\Psi - l \sin(\Psi) \cos(\phi_{out} \left[1 + \frac{l}{4l_{out}} \right] + \arcsin\left(\frac{\phi_{out}}{l_{out}i_{c+}}\right) + \phi_{squid}) + \alpha \frac{l}{2} \sin(\phi_{out} \left[1 + \frac{l}{4l_{out}} \right] + \arcsin\left(\frac{\phi_{out}}{l_{out}i_{c+}}\right) + \phi_{squid} + \Psi)$$

$$\phi_{out} = -2l_{out} \sin(\phi_{out} \left[1 + \frac{l}{4l_{out}} \right] + \arcsin\left(\frac{\phi_{out}}{l_{out}i_{c+}}\right) + \phi_{squid}) \cos \Psi - \alpha l_{out} \sin(\phi_{out} \left[1 + \frac{l}{4l_{out}} \right] + \arcsin\left(\frac{\phi_{out}}{l_{out}i_{c+}}\right) + \phi_{squid} + \Psi)$$



Спасибо за внимание



ВСЁ!