

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



СЗУSeУ  
В-191

14/11-73

P13 - 6942

Б.В.Васильев, В.Г.Гребинник, В.Г.Симкин

144/2-73

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ  
КВАНТОВЫЙ МАГНИТОМЕТР

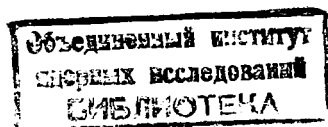
**1973**

**ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ**

P13 - 6942

Б.В.Васильев, В.Г.Гребинник, В.Г.Симкин

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ  
КВАНТОВЫЙ МАГНИТОМЕТР



Разработанный и описанный в работе /1/ сверхпроводящий двухконтактный интерферометрический магнитометр позволял получать относительно высокую чувствительность к магнитному полю:  $4 \cdot 10^{-7}$  эрстеда при постоянной времени прибора, близкой к 1 секунде.

Однако необходимость настройки контактов так, чтобы их критические токи и сопротивления в смешанном состоянии были приблизительно одинаковыми /2/, представляла значительную трудность. Этот недостаток усугублялся необходимостью настройки контактов при каждом охлаждении до гелиевой температуры. Авторы работы /3/ показали, что если заменить постоянный транспортный ток в интерферометре радиочастотным, то для наблюдения квантового эффекта, возникающего при изменении магнитного потока, достаточно наличия одного контакта в сверхпроводящем кольце.

Принцип работы такого устройства можно понять, рассмотрев схему, показанную на рис. 1, где  $L$  и  $C$  - индуктивность и емкость радиочастотного колебательного контура, возбуждаемого внешним генератором  $\Gamma$ ,  $L_0$  - индуктивность сверхпроводящего кольца,  $J$  - точечный контакт.

Полный магнитный поток, связанный с кольцом, есть сумма потока  $\phi_L$  создаваемого сверхпроводящим током  $I$ , текущим по кольцу, и потока  $\phi_K$ , создаваемого колебательным контуром и пронизывающего кольцо:

$$\phi_{\Sigma} = \phi_L + \phi_K = J L_0 + \phi_K \quad /1/$$

Так как сверхпроводящий ток протекает по контакту, то его величина определяется равенством Джозефсона:

$$J = J_{\text{кр.}} \sin 2\pi \frac{\phi_{\Sigma}}{\phi_0} \quad /2/$$

Здесь  $J_{\text{кр.}}$  - критический ток контакта,  $\phi_0$  - квант магнитного потока.

Подставляя /2/ в /1/, получим:

$$\phi_{\Sigma} - J_{кр.} L_0 \sin 2\pi \frac{\phi_{\Sigma}}{\phi_0} = \phi_K \quad /3/$$

График этой функции показан на рис. 2 в предположении  $2\pi L_0 J_{кр.} > \phi_0$ . Если поток

$$\phi_K = \phi_{K1} + \phi_{K2} \sin \omega t, \quad /4/$$

где  $\phi_{K1}$  - измеряемый магнитный поток,  $\phi_{K2}$  - поток, создаваемый радиочастотным током, тогда, как видно из рис. 2, амплитуда колебаний  $\phi_{\Sigma}$  будет различна в зависимости от того, равно  $\phi_{K1}$  целому или полцелому значению кванта магнитного потока  $\phi_0$ .

Разница в э.д.с., индуцируемой в контуре за счет изменения потока  $\phi_{\Sigma}$  в кольце для этих двух крайних случаев, составит /4/

$$\Delta V = \frac{L_0 \omega \phi_0}{2M} \quad /5/$$

Здесь  $\omega$  - частота, на которой возбуждается контур, совпадающая с его резонансной частотой;  $M$  - взаимная индукция контура и кольца. Дополнительная радиочастотная э.д.с., даваемая уравнением /5/, измеряется и служит мерой приложенного магнитного потока  $\phi_{K1}$ .

В эксперименте подобно тому, как это было сделано в /4/, точечный контакт создавался с помощью остро заточенного ниобиевого винта, касающегося плоского полированного торца другого ниобиевого винта. Оба винта были размещены, как показано на рис. 3, в ниобиевом цилиндре длиной 20 мм и диаметром 10 мм. Два отверстия диаметром 2 мм, просверленные в цилиндре и соединенные прорезью шириной 0,2 мм, образовывали индуктивность, шунтирующую джозефсоновский контакт. Настройка контакта производилась при гелиевой температуре подводом заточенного винта, осуществляемым с помощью червячного редуктора, который управлялся снаружи криостата.

Настройка контролировалась по высокочастотной вольт-амперной характеристике контакта /4/. После однократной настройки датчики выдерживали по несколько десятков циклов охлаждения - нагрева без заметного изменения своих параметров. Датчик был

индуктивно связан с колебательным контуром, питаемым высокочастотным током постоянной величины от внешнего генератора. Сверхпроводящая катушка индуктивности колебательного контура, величиной  $\approx 3.10^{-7}$  гн, размещалась в одном из отверстий датчика. В качестве емкости контура использовался конденсатор типа КСО - 390 пф. Добротность контура получилась близкой к 1000, частота - около 16 Мгц. Величина связи датчика с контуром подбиралась для получения максимальной чувствительности /5/. Высокочастотное напряжение на контуре усиливалось усилителем, первый каскад которого, собранный на германиевом полевом транзисторе, работал при гелиевой температуре /рис. 4/. Дальнейшее усиление по высокой частоте, детектирование и усиление по низкой частоте позволяли выделить сигналы на уровне десятых долей микровольта /приведенные ко входу/. Принципиальные схемы усиления и преобразования сигнала показаны на рис. 5 и 6.

Измеряемое магнитное поле создавалось с помощью катушки /аналогичной катушке индуктивности контура/, которая размещалась в другом отверстии датчика. От низкочастотного генератора через эту катушку пропусклся модулирующий ток различной формы. Так, если магнитное поле изменялось по пилообразному закону, то на выходе магнитометра наблюдался характерный сигнал /рис. 7/, по которому было удобно вести тонкую настройку.

Для того, чтобы избежать воздействия внешних переменных магнитных полей, датчик окружался сверхпроводящим экраном. Использование экрана, изготовленного из свинцовой фольги, позволяло снизить это воздействие примерно на три порядка. Чувствительность магнитометра была приблизительно равна  $10^{-8}$  э/сек<sup>1/2</sup> и ограничивалась не шумами радиосхемы, а флуктуациями внешнего магнитного поля, проникающего через экран.

Авторы благодарны Е.М.Русакову и Н.И.Володенкову за помощь в изготовлении датчиков.

#### Литература

1. Б.В.Васильев, В.Г.Симкин. Сообщение ОИЯИ, 13-5894, Дубна, 1971.
2. J.E.Zimmerman and A.H.Silver. Phys.Rev., v. 141, 1, p. 141 (1966).
3. A.H.Silver and J.E.Zimmerman. Phys.Rev., v. 157, p. 317 (1967).

4. J.E.Zimmerman, Z.Thiene and J.T.Harding. *Journal of Applied Physics*, v. 41, 4, 1572 (1970).  
 5. M.B.Simmonds and W.H.Parker. *Journal of Applied Physics*, 42, 38 (1971).

Рукопись поступила в издательский отдел  
9 февраля 1973 года.

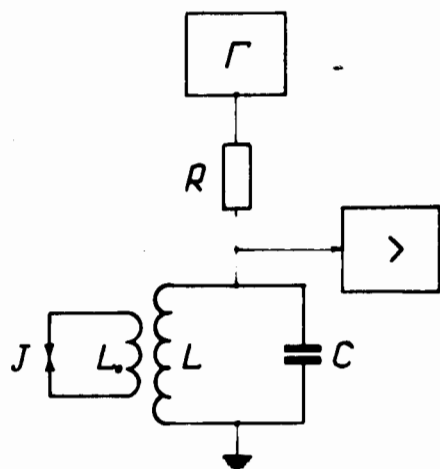


Рис. 1. Г - ВЧ-генератор, R - ограничительное сопротивление, L и C - индуктивность и емкость колебательного контура, L<sub>0</sub> - индуктивность сверхпроводящего кольца, шунтирующая джозефсоновский переход J, > - усилитель.

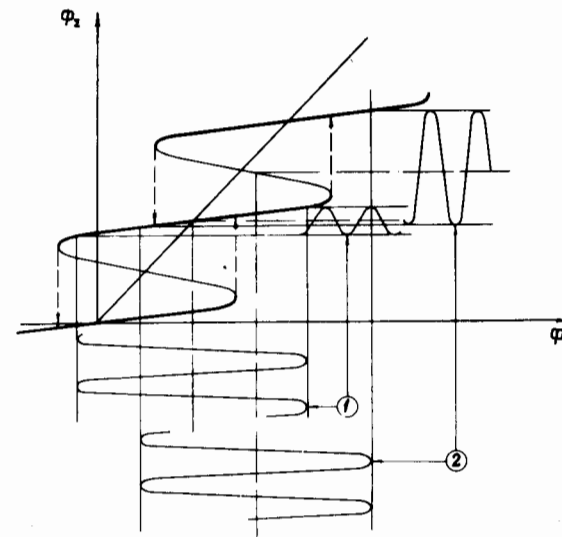


Рис. 2. Иллюстрация принципа действия радиочастотного квантового магнитометра.  $\phi_K$  - магнитный поток, наводимый колебательным контуром в сверхпроводящем кольце.  $\phi_\Sigma$  - полный магнитный поток, пронизывающий кольцо. Жирными линиями обозначены устойчивые участки амплитудной характеристики устройства, штриховыми стрелками - значения потоков, соответствующие переходам из одного устойчивого состояния в другое при увеличении и уменьшении потока  $\phi_K$ . Цифрами 1 и 2 обозначены значения радиочастотных потоков контура и откликов сверхпроводящего кольца на них при средних значениях магнитного потока, равных целому и полуцелому числу квантов  $hc/2e$ .

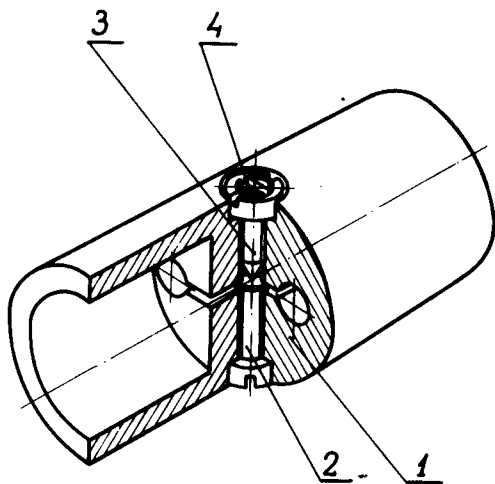


Рис. 3. 1 - ниобиевый цилиндр, 2 - ниобиевый винт с полированной торцевой поверхностью, 3 - острозаточенный ниобиевый винт, 4 - контргайка.

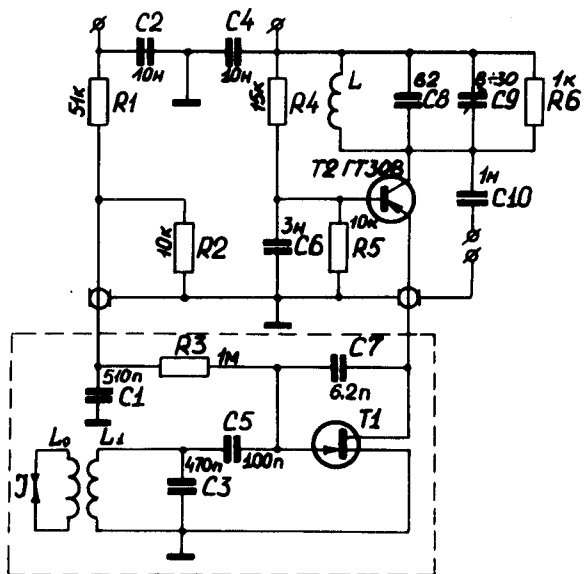


Рис. 4. Схема предусилителя. Прямоугольником выделена часть схемы, которая работает при гелиевой температуре.

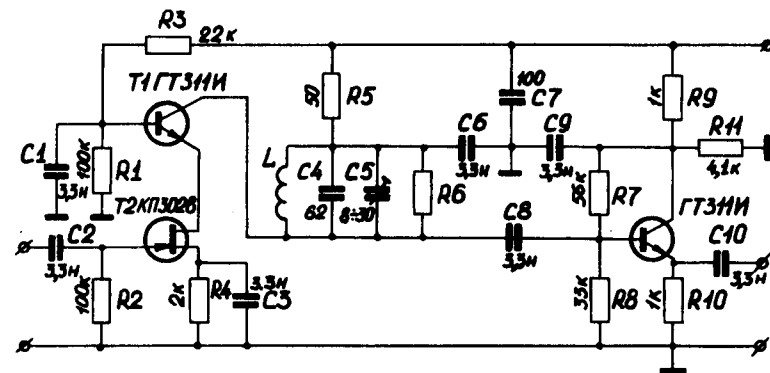


Рис. 5. Принципиальная схема усилителя высокой частоты.

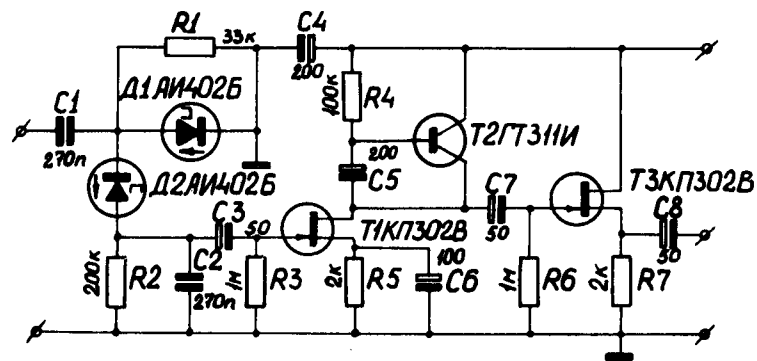


Рис. 6. Принципиальная схема детектора и усилителя низкой частоты.

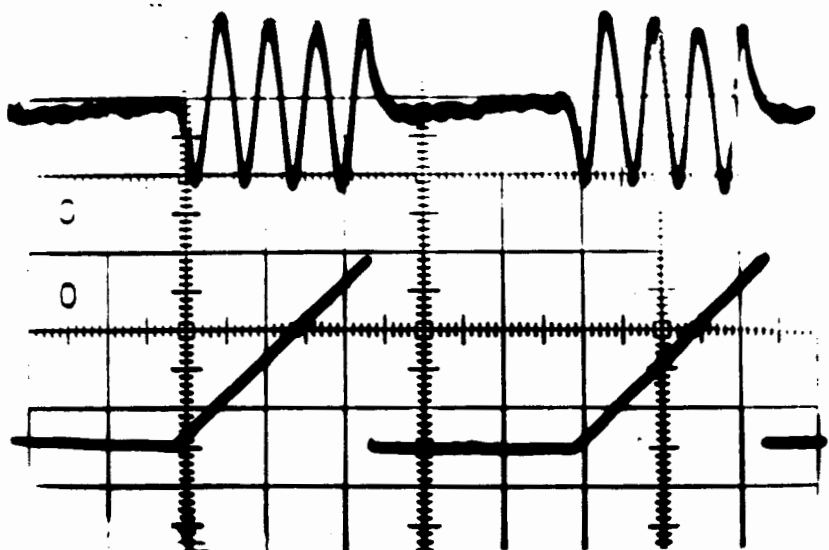


Рис. 7. Осциллограмма сигнала на выходе магнитометра /верхний трек/ при изменении магнитного поля по пилообразному закону /нижний трек/. Период выходного сигнала равен  $6 \cdot 10^{-6}$  гр/с.