

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

8-85-788

В.М.Дробин, П.Лоботка, В.Н.Трофимов

БЛОК РЕГИСТРАЦИИ
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО
КВАНТОВОГО МАГНИТОМЕТРА

Направлено в журнал "Приборы и техника
эксперимента"

1985

Ввиду уникальной энергетической чувствительности, почти достигшей в настоящее время предела - постоянной Планка $h = 4 \cdot 10^{-16}$ эВ Гц⁻¹, сверхпроводящие магнитометры со СКВИДами всё более широко используются для самых различных измерений, требующих предельных разрешения и чувствительности^[1]. Обычно такой прибор состоит из двух узлов: криогенной вставки и электронного блока регистрации. Если конструкция криогенной вставки полностью определяется характером решаемой задачи, то блок регистрации является универсальным узлом, пригодным для совместного использования с разными вставками. В этой работе приводятся принципиальные схемы, характеристики и описание конструкции блока регистрации, входящего в состав установки для изучения воздействия различных факторов на магнитную восприимчивость слабомагнитных образцов при гелиевых температурах. Детальное описание других частей установки дано в работе [2]. Физика работы СКВИДов и принципы построения измерительных систем на их основе подробно рассмотрены в многочисленных оригинальных работах и монографиях, например, [3-6], и здесь не обсуждаются.

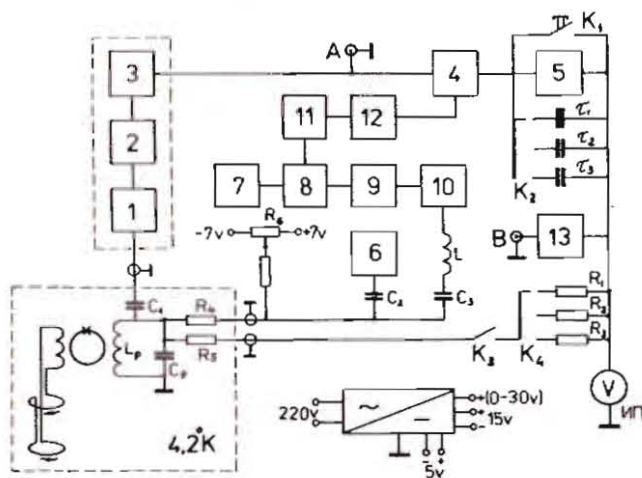


Рис. I Блок-схема магнитометра.

Блок-схема нашего магнитометра с ниобиевым ВЧ СКВИДом циммермановского типа и отрицательной обратной связью /ООС/ по магнитному потоку приведена на рис.1. Часть схемы в пунктирной рамке относится к криогенной вставке. Канал прямого преобразования поток $\Phi \rightarrow$ выходное напряжение U образован резонансным колебательным контуром $L_p C_p$, индуктивно связан-

ным со СВЧДом, блоками: 1 - усилителем высокой частоты /УВЧ/, 2 - амплитудным детектором /АД/, 3 - усилителем низкой частоты /УНЧ/, 4 - синхронным детектором /СД/ и 5 - активным фильтром низких частот - интегратором /И/. Канал обратного преобразования $U \rightarrow \Phi$ образован сопротивлением обратной связи $R_{1-3} + R_5$ и катушкой L_p . Контур $L_p C_p$ возбуждается вблизи резонансной частоты 20 МГц источником тока $i_p / \text{генератор накачки } 6 + R_4 /$, так, что напряжение на нем $U_p = i_p Z_p$, где Z_p - импеданс контура. СВЧД работает как параметрический преобразователь, модулирующий $\text{Re } Z_p$ и $\text{Im } Z_p$, причем обе функции являются периодическими по Φ с периодом, равным кванту магнитного потока $\Phi_0 = 2 \cdot 10^{-15}$ Вб. Приведенная схема реагирует на результирующую амплитудную модуляцию U_p . Чтобы улучшить отношение сигнал/шум при малых изменениях $\delta \Phi$, используется вспомогательная модуляция потока на частоте 75 кГц с последующим синхронным детектированием. Модуляция осуществляется генератором 7, формирователями 8-10 и катушкой L_p . Канал опорного сигнала для СД образован фазовращателем 11 и формирователем 12. Конструктивно блок регистрации выполнен в виде двух диалевых корпусов, в одном из которых /ВЧ головка/ размещаются УВЧ, АД, УНЧ, а в другом /блок управления/ - низкочастотная часть схемы, регулировки и источник питания. Прямоугольный корпус ВЧ головки с размерами 105*75*40 мм жестко закреплен на верхнем конце криогенной вставки. Внешний вид блока управления приведен на фотографии. Единственным стандартным прибором является генератор ВЧ накачки Г4-116.

Принципиальная схема ВЧ головки изображена на рис.2. Широкополосный УВЧ из двух секций с гальваническими связями имеет АЧХ, показанную на рис.3. Для исключения перегрузки следующих за УВЧ каскадов

шумом и получения возможности визуального наблюдения 1-й и 2-й гармоник модуляции потока по осциллографу между секциями включен узкополосный фильтр из LC-контура и истокового повторителя T_4 . Центральная частота фильтра перестраивается ва-

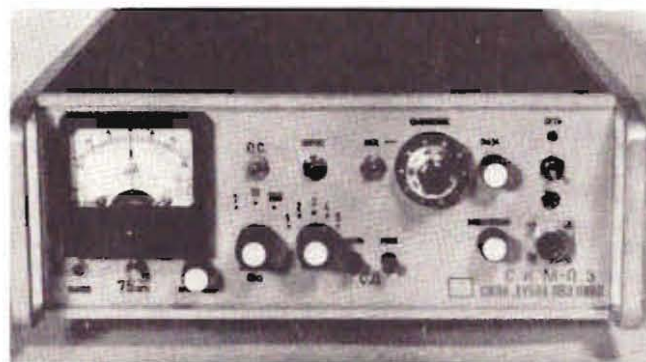


Фото. Внешний вид блока управления.

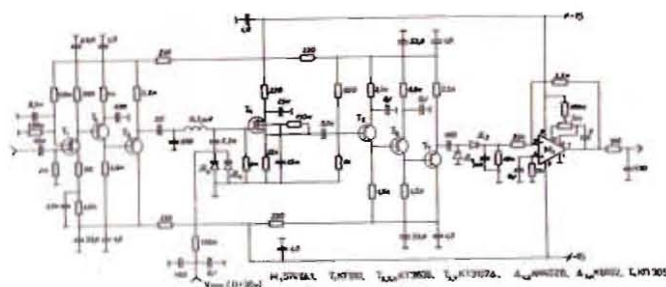


Рис.2 Принципиальная схема высокочастотной головки.

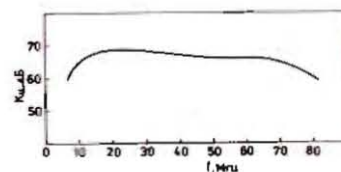


Рис.3 Амплитудно-частотная характеристика УВЧ.

риками и для двух параллельно включенных варикапов КВ102А, диапазон перестройки составляет 11-21 МГц. Полоса пропускания фильтра по уровню -3дБ равна 200 кГц, коэффициент передачи 0,3. Шумовые характеристики УВЧ решающим образом влияют на устойчивость в режиме с ООС и разрешение по потоку. В свою очередь шумы определяются в основном входным каскадом, где использован малошумящий двухзатворный кремниевый МОП-транзистор с встроенным каналом n-типа КР910 /TESLA/. Помимо высокого входного импеданса, такой транзистор обеспечивает возможность введения АРУ по 2-му затвору, и управления автодинамическим режимом магнитометра с регенерацией усилителя. Была проверена также возможность использования

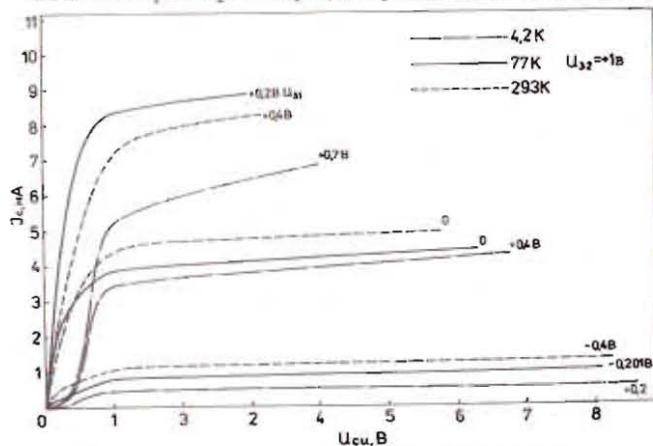


Рис.4 Вольтамперные характеристики КР910.

использования КР910 в охлаждаемом предусилителе. При охлаждении от 300 до 4,2 К /температура канала при этом, конечно, выше за счет рассеиваемой мощности/ крутизна возрастает от 10 до 30 мА/В. Минимум шумов наблюдается, однако, выше гелиевой, вероятно

вблизи азотной температуры термостата. Характеристики транзистора отличаются хорошей воспроизводимостью и отсутствием участков нестабильности /рис.4/. Отметим, что при гелиевой температуре характер канала меняется со встроенного на индуцированный. Проведенные нами предварительные исследования показывают, что МОП-транзисторы КР907 и КР910 являются весьма перспективными для использования в криогенной электронике и, в частности, в системах со СКВИДами. Спектральные плотности напряжения и тока шумов, приведенные ко входу УВЧ и измеренные в полосе 10-30МГц, составляют $1,7 \text{ нВ} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ и $0,95 \text{ пА} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ соответственно. Модуль входного сопротивления $|Z_{ax}/20 \text{ МГц}| = 2 \pm 0,5 \text{ кОм}$. В качестве входных с успехом использовались также биполярные транзисторы ГТ329А. В этом случае требуется изменение режима транзисторов входной секции по постоянному току. Как видно из рис.1, за счет неполного включения колебательного контура /емкость связи С и емкость выходного кабеля образуют делитель/, компенсирующее действие входного сопротивления УВЧ с ГТ329А на входе незначительно. При монтаже УВЧ соблюдались обычные требования к монтажу ВЧ схем с большим усилением. АД выполнен по схеме удвоения на обращенных диодах АИ402Б. Линейный участок детектора соответствует амплитудам ВЧ напряжения 100-400мВ. УНЧ на быстродействующем СВ К574УД1В позволяет получить значительное усиление в полосе частот от 0 до частоты модуляции 75кГц.

Принципиальная схема блока управления /кроме источника питания/ приведена на рис.5. Генератор-модулятор собран на микросхеме М₁₀

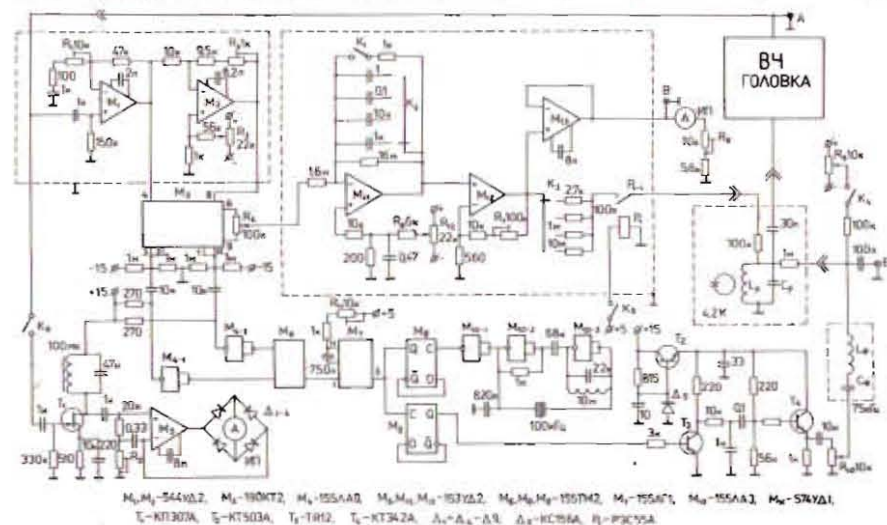


Рис.5 Принципиальная схема блока управления /без источника питания/.

и кварцевом резонаторе на 100кГц. Кварц возбуждается на 3-й гармонике. Частота выходного напряжения модулятора делится на два Д-триггером М₆, и сигнал поступает далее на фазовращатель М₇ с одной стороны, и на второй делитель на два М₉ с другой. После второго делителя прямоугольный сигнал 75кГц поступает на формирователь Т₂ стабильного по амплитуде и близкого к треугольной по форме напряжения модуляции. Регулировка амплитуды модуляции в пределах 0-1В осуществляется резистором R₁₀. Фильтр L_φC_φ настроен на 75кГц. Фаза опорного напряжения СД регулируется резистором R₁₁, задающим длительность импульсов одновибратора М₇. Задние фронты этих импульсов управляет триггером М₈, на выходах которого получают различающиеся по фазе на π рад сигналы прямоугольного напряжения со скважностью 50% и частотой 75кГц, фаза которых может сдвигаться на 0-80град. Инверторы М₄ увеличивают амплитуду до 15В для надежной работы ключей синхронного детектора М₁-М₃. На сигнальные входы ключевой схемы М₃ с выходов усилителя М₁ и единичного инвертора М₂ поступают равные по амплитуде и сдвинутые по фазе на π рад напряжения сигнала. Нуль СД настраивается резисторами R₃ и R₄. Фазовая чувствительность СД равна 1В/град при входном сигнале 10мВ. Выходной фильтр нижних частот выполнен по схеме интегратора на СВ М₁₁. Четыре емкости С_н в цепи обратной связи М₁₁ задают 4 режима магнитометра по быстродействию. Кнопка К₁ служит для сброса напряжения интегратора. Нуль интегратора настраивается резистором R₆. Дальнейшее усиление сигнала в 30 раз осуществляется микросхемой М₁₂, выходное напряжение которой подается в цепь ООС, и через повторитель М₁₃ на регистрирующие приборы. Четыре сопротивления обратной связи R_{0с}, выбираемые переключателем К₃, определяют четыре режима по диапазону потока, приведенному к СКВИДу: ±130Φ₀; ±35Φ₀; ±12Φ₀; ±1,2Φ₀. Подстройка рабочей точки СКВИДа осуществляется 10-оборотным гелиотом R₉. Тумблер К₆ подключает к стрелочному индикатору селективный милливольтметр Т₄-М₅, настроенный на 75кГц, который используется при калибровке и настройке магнитометра.

Источник питания вырабатывает стабилизированные напряжения ±15В, +5В, управляющее напряжение 0-30 В для перестройки фильтра УВЧ. Нестабильность напряжений не более 10⁻⁴ час⁻¹, величина пульсаций < 1мВ.

На рис.6 приведены спектры суммарных шумов на выходе магнитометра в различных режимах. Такие шумы соответствуют разрешению по потоку, приведенному к СКВИДу, $5 \cdot 10^{-4} \Phi_0 \cdot \text{Гц}^{-1/2}$. Это разрешение может быть улучшено в 4 раза при полном подключении контура к УВЧ, поскольку в основном шумы обусловлены его входными каскадами. Для всех приведенных кривых, кроме б, наклон близок к 20дБ/дек, что отражает хорошую устойчивость соответствующих режимов. Для кривой б наличие подъема в

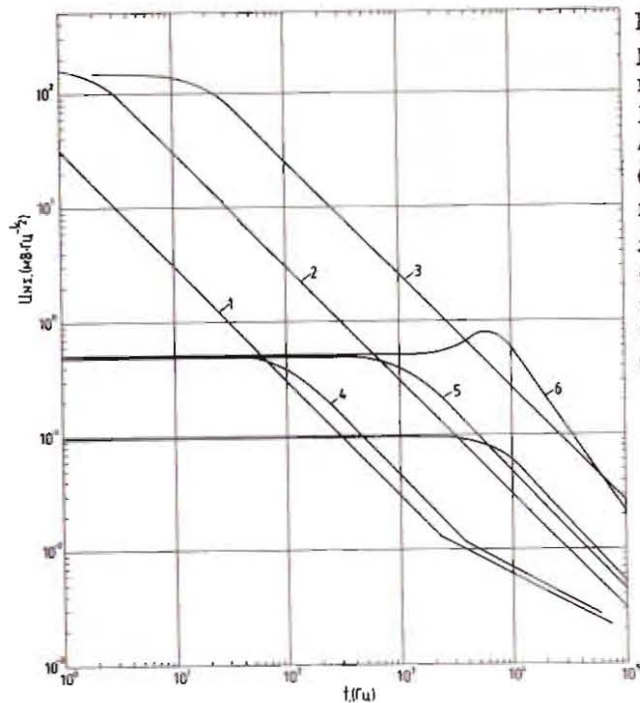


Рис.6 Шумовые спектры магнитометра в различных режимах: 1,2,3 - без ООС; 4,5,6,7 - с замкнутой ООС; 4,5,6 - при динамическом диапазоне $\pm 12\Phi_0$; 7 - при диапазоне $\pm 65\Phi_0$; 1, 4 - $C_{ш} = 0,1$; 2,5,7 - $C_{ш} = 0,01$; 3,6 - $C_{ш} = 0,001$.

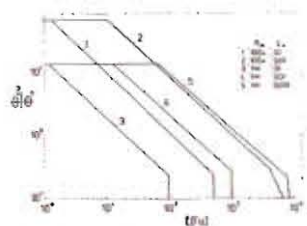


Рис.7 Рабочие диапазоны магнитометра для синусоидальных входных сигналов.

Черным кружком на рис.7 отмечены параметры, которых требуется достичь по оценкам для создания теплового детектора частиц с чувствительностью не хуже 10^3 эВ кг⁻¹ при рабочей температуре 0,01К.

Авторы глубоко признательны Е.И.Дьячкову, А.Г.Зельдовичу, Ю.М.Казаринову за длительную и последовательную поддержку разработки и использования измерительной техники со СКВИДами.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.Одегнал, Физика низких температур, II, №1, 1, 1985.
2. В.М.Дробин и др., ОИЯИ Р8-85-190, Дубна, 1985.
3. К.К.Лихарев, Б.Т.Ульрих, Системы с джозефсоновскими контактами, М., Изд. Моск. ун-та, 1978.
4. А.Ф.Волков, Н.В.Заварицкий, Ф.Я.Надь, Электронные устройства на основе слабосвязанных сверхпроводников, М., Сов.радио, 1978.
5. А.Бароне, Дж.Патерно, Эффект Джозефсона, М., "Мир", 1984.
6. R.P.Giffard a.o., J.Low Temp.Phys., 6, 533, 1972.
7. Г.В.Мицельмахер и др., ОИЯИ Р8-82-549, Дубна, 1982.

Рукопись поступила в издательский отдел
1 ноября 1985 года.