

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 53.08

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ АМПЛИТУДОЙ ДО 35 Тл ДЛЯ МАГНИТОТРАНСПОРТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

©2025 г. М. О. Сафончик^{а,*}, М. А. Шахов^а

^аФизико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

*e-mail: safon@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 27.01.2025 г.

После доработки 20.02.2025 г.

Принята к публикации 03.03.2025 г.

Созданная в ФТИ им. А.Ф. Иоффе установка импульсного магнитного поля позволяет измерять транспортные явления (эффект Холла, магнитосопротивление) материалов в импульсном магнитном поле с многократно получаемыми импульсами амплитудой до 35 Тл и длительностью импульса 10 мс. Приведено обоснование оптимального выбора структуры установки, схемотехники и алгоритмов обработки. Удобство в эксплуатации при небольших затратах в эксплуатации делает установку хорошим выбором для научной лаборатории.

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение эффектов в сильных магнитных полях играет важную роль в современной экспериментальной физике [1–9]. Обычно сильные магнитные поля (величиной более 20 Тл) в лабораторных условиях получают при помощи импульсных соленоидов.

В импульсных соленоидах накопление энергии происходит в конденсаторах, а магнитное поле создается импульсным током при разряде конденсаторов на многovitковый соленоид. Максимальное поле ограничивается достижением такой механической нагрузки на провод соленоида, когда магнитное давление $B^2/2\mu$ превышает предел текучести материала провода, что для медного провода составляет около 40 Тл независимо от способа намотки соленоида [10, 11].

Возможности увеличения максимального магнитного поля связаны с применением специальных сплавов или медного провода в стальной оболочке. Применение проводов с повышенной механической прочностью, например микрокомпозиционного провода Cu–Nb, [12] позволяет получать поля 40 Тл и более.

Однако применение дорогостоящих проводов с повышенной механической прочностью требует использования специального оборудования для намотки, приводит к увеличению радиуса изгиба провода и значительному увеличению сопротивления обмотки соленоида по сравнению с чисто медной, особенно при азотных температурах. Такие комплексы используются как установки международного коллективного пользования [13]. В условиях оптимизации затрат лучшим выбором для измерений в сильных магнитных полях является установка с простым импульсным соленоидом с медной обмоткой [14].

Наш опыт практической работы по созданию установок с сильными магнитными полями с 80-х гг. основывался на широко известных монографиях [15–17]. Наши первые версии установки с авторской аппаратной и программной частями были созданы первоначально в нашей лаборатории ФТИ, а позднее в лаборатории университета г. Турку [18] и в Технологическом университете г. Лаппеенранты [19]. В настоящей статье рассматривается третья версия установки, собранная в лаборатории кинетических явлений в твердых телах при низких температурах Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе.

При создании установки был сделан акцент на доступность изготовления, минимальные затраты в эксплуатации и скорость обработки получаемых экспериментальных данных.

2. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ

Упрощенная блок-схема установки приведена на рис. 1. Параметры установки и требования к образцам приведены в табл. 1.

Рис. 1. Блок-схема установки импульсного магнитного поля (ИМП).

Таблица 1. Параметры установки импульсного магнитного поля

Магнитное поле	0.5–35 Тл
Температура	1.6–310 К
Ток образца	1 мкА–200 мА
Сопротивление образца	0.1 Ом–100 кОм
Макс. размер образца	$5.5 \times 2 \times 1$ мм ³ ; $4 \times 3 \times 1$ мм ³
Число независимых каналов измерения	5
Максимальное аналоговое усиление	40000
Разрядность/скорость АЦП	16/1 мкс

Измерения магнитотранспорта проводятся на постоянном токе (DC) для широкого класса проводящих материалов с сопротивлениями ориентировочно в диапазоне 0.1 Ом–100 кОм. Нижняя граница связана с появлением экстратоков в материале в импульсном поле, ограничение сверху связано с паразитными емкостями держателя образца.

На рис. 2 приведены фотографии установки, они отображают ее состав, компоновку и размеры. В установку входят: рабочее место оператора и отдельная отгороженная часть с высоковольтными цепями (рис. 2), которая имеет соответствующую электрическую и механическую защиту. Установка питается от сети 220 В, 50 Гц, 16 А.

Рис. 2. Фотография и составные части установки ИМП.

Рассмотрим части установки.

2.1. Соленоид

Соленоид намотан на токарном станке серийно выпускаемым в России медным проводом ПСДК прямоугольного сечения в стеклотканевой изоляции вместе с эпоксидным компаундом Stycast 2850FT и отвердителем горячего отверждения Catalyst (рис. 3). Внешний бандаж для механической поддержки обмотки выполнен из немагнитного материала (как и все материалы соленоида) – стекловолокна Hyperten 2000HP, импрегнированного эпоксидной смолой горячего отверждения. Стальной бандаж, как показали наши исследования [20], приводит к артефактам в измеряемых сигналах.

Для понижения сопротивления и упрочнения обмотки соленоид помещается в пластиковый контейнер с жидким азотом объемом около 20 л, термоизолированный пенопластом.

Параметры соленоида были получены в авторской программе, позволяющей рассчитать геометрию намотки, механические нагрузки, максимальное поле и его неоднородность в центре при заданных параметрах (энергии конденсаторов и длительности импульса).

В качестве примера приведем результаты расчета параметров соленоида для батареи конденсаторов емкостью 6000 мкФ / 5 кВ. Внутренний диаметр обмотки соленоида равен 1.2 см, внешний диаметр составляет 6.5 см, длина – 6 см. Соленоид имеет ступенчатую конструкцию (рис. 3), что позволяет уменьшить общую длину провода и снизить индуктивность соленоида при сохранении величины и однородности магнитного поля в центре. Обмотка соленоида содержит 20 слоев медного провода ПСДК прямоугольного сечения, размеры по изоляции $3.05 \times 1.32 \text{ мм}^2$. Расчетная индуктивность соленоида равна 1.54 мГн, сопротивление составляет 0.06 Ом, полупериод разряда – примерно 10 мс. Радиальная нелинейность магнитного поля при отклонении от центра на 6 мм составляет 0.25%, аксиальная нелинейность при отклонении на 5 мм – 0.26%, а при отклонении на 10 мм – 1%. Константа соленоида равна 6.4 Тл/кА.

Рис. 3. Эскиз соленоида с сохранением пропорций...

Процесс изготовления соленоида не требует специального оборудования. На стальной стержень $D=11 \text{ мм}$ надевается капроновая втулка $D=12 \text{ мм}$ и две малые стеклотекстолитовые

щеки толщиной 10мм с верхним скошенным под углом 45° краем. Для создания ступенчатой конструкции обмотки на стержень помещаются стеклотекстолитовые шайбы, которые создают уступы при намотке. Одна из щек имеет отверстие и проточку на скошенной части для вывода проводов. Намотка провода на токарном станке производится с натягом с промазкой эпоксидным компаундом. Поверх провода также с натягом и нагревом строительным феном наматывается стекловолокно Нурпертен 2000НР, импрегнированное эпоксидной смолой горячего отверждения до заполнения малых щек, что дополнительно сильно обжимает медную обмотку. Вся конструкция помещается в печь для горячего отверждения. После этого на стержень устанавливаются большие щеки, и продолжается намотка стеклонити. Большие щеки стягиваются латунными шпильками, и вся конструкция окончательно отверждается в печи. После охлаждения стальной стержень удаляется.

Эксплуатация ранее созданных соленоидов показала, что выход соленоидов из строя связан либо с разрушением провода на внутренних слоях, либо с обрывом провода в щеке из-за термического расширения. Для предотвращения повреждения провода в малой и большой щеках на входе и выходе провод обматывается лентой ФУМ, что обеспечивает его небольшую подвижность.

Подводящие провода к соленоиду рассчитаны на импульсный ток до 20 кА и напряжение до 5 кВ во влажных от конденсата условиях. Они сложены вместе и обмотаны скотчем для устранения механических колебаний в момент импульса.

Ввод соленоида в эксплуатацию осуществляется постепенным увеличением магнитного поля от импульса к импульсу для увеличения прочности медной обмотки путем постепенной нагартовки меди (наклеп). Поле величиной 35 Тл достигается при заряде конденсаторов около 3.5 кВ, при этом ток составлял 8 кА.

По нашей статистике для трех созданных и ныне продолжающих работу соленоидов такого типа количество импульсов поля (выстрелов) до разрушения соленоида составляет более тысячи импульсов до поля 30 Тл и более 300 до поля 35 Тл. При импульсе величиной 45 Тл по нашим расчетам будет превзойден предел прочности соленоида. Контроль текущего состояния соленоида осуществляется в процессе каждого выстрела: по форме, по длительности импульса и по изменению добротности соленоида. Добротность оценивается по отрицательному остаточному напряжению на конденсаторах после переколебания, т.е. по возврату энергии соленоида в энергию конденсаторов.

2.2. Силовой блок

Силовая часть установки, созданная на базе старой элементной базы, эксплуатируется более 40 лет и сохраняет работоспособность.

Блок конденсаторов 6000 мкФ / 5кВ рассчитан на работу в импульсном режиме со сменой полярности. Тиристорный разрядник, схема которого приведена в работе [21], состоит из двух ветвей тиристоров Т630 и рассчитан на рабочее напряжение до 6 кВ и ток до 20 кА. Разрядник сделан с большим запасом для использования с разными соленоидами. Для работы тиристоров в режиме больших импульсных токов в тысячи ампер необходим длительный и мощный управляющий импульс тока 5 А. Для предотвращения выхода из строя тиристоров по скорости нарастания напряжения при перезаряде паразитных емкостей в цепях тока применяются дополнительные индуктивности примерно по 40 мкГн (реакторы) в токовых цепях [21], расположенные рядом с тиристорами.

После каждого выстрела последующий заряд конденсаторов блокируется до полного остывания соленоида. Зависимость времени остывания от напряжения заряда предварительно градуируется путем измерения зависимости сопротивления конкретного соленоида от времени после серии импульсов до разных максимальных магнитных полей. Например, после импульса амплитудой до 35 Тл необходимо охлаждение в течение 30 минут.

Смена знака магнитного поля осуществляется ручным перекидным переключателем ножевого типа до начала заряда. Изменение полярности поля позволяет выделить четную и нечетную по магнитному полю компоненты измеряемых сигналов, что совершенно необходимо в реальном эксперименте.

Заряд конденсаторов для получения требуемого значения поля происходит автоматически по градуировке, полученной по предыдущим результатам. Начало заряда инициируется оператором, а его окончание определяется аналоговым компаратором, который сравнивает напряжение, выставленное программой через ЦАП, с напряжением на конденсаторах после делителя и оптической развязки.

2.3. Криостат и держатель образца

Криостат, изготовленный по нашим чертежам, состоит из заполненной гелием области объемом 1.6 л, окруженной вакуумной полостью и азотной рубашкой объемом около 2 л. Внешний палец криостата диаметром 10 мм охлаждается жидким азотом, в который погружен соленоид. Диаметр трубки внутреннего пальца криостата равен 8 мм, рабочая область для держателя образца – 6 мм. Внутренний и внешний пальцы криостата установлены на оловянно-свинцовый припой для возможности быстрой замены при необходимости. Вакуумная часть содержит активированный уголь, который при охлаждении гелием через стенку заполненной гелием полости дополнительно откачивает вакуумную область криостата, что позволяет использовать для предварительной откачки форвакуумный насос. Для электрической изоляции внешний палец криостата покрывается скотчем в один

слой, что достаточно для напряжения до 5 кВ, дополнительной изоляцией служит капроновая втулка, которая остается внутри соленоида после его намотки. Соленоид подвешен к нижнему фланцу криостата, что снижает вибрационные помехи от вскипания жидкого азота при больших импульсах магнитного поля.

При работе с жидким гелием или жидким азотом для дополнительного понижения температуры ниже температуры кипения при нормальном давлении осуществляется откачка насыщенных паров этих жидкостей. Таким образом достигается диапазон температур для гелия 4.2–1.6 К, а для азота 77.3–54 К. Температура криогенных жидкостей (гелия или азота) в откачке контролируется с помощью датчика давления насыщенных паров – Piezo Transducer Series 902.

Выше температуры кипения криогенных жидкостей охлаждение образца происходит за счет теплопередачи через вакуумную часть пальца криостата, погруженного в жидкий азот, а сама температура регулируется с помощью печки и термоконтроллера LakeShore с рабочим бескорпусным датчиком температуры CERNOX CX-1050. При включении печки держателя образца гелий интенсивно испаряется и образует газовую пробку внутри пальца криостата, что позволяет термоконтроллеру изменять температуру уже в газовой среде, регулируя мощность печки. Другие способы регулировки температуры в небольшом рабочем пространстве пальца (например, при продувке газа) приводят к сильному усложнению конструкции и к повышенному расходу жидкого гелия.

Кроме печки и датчиков температуры, на держателе также находятся катушка измерения магнитного поля и по витку компенсации для каждого из четырех каналов измерения. Держатель образца имеет форму цилиндра из алунда, материала с хорошей теплопроводностью, в полость которого введены провода (рис. 4). Внешний диаметр держателя составляет 6 мм, внутренний – 3 мм, у держателя есть вырез в средней части для образца. Печка держателя представляет собой две катушки бифилярного провода из манганина в лаковой изоляции с $R \approx 16$ Ом, соединенные последовательно и расположенные с двух сторон от образца на алундовом стержне. Сверху провода печки заклеены тонкой фольгой из константана для защиты изоляции провода печи и обеспечения хорошего теплового контакта с внешним экраном образца. Экран вокруг держателя в месте монтажа образца представляет собой трубочку из константана с продольной прорезью для предотвращения круговых экстратоков.

Рис. 4. Фотография держателя образца, образца с шестью контактами и дифференциальной термопары...

Дополнительная дифференциальная термопара AuFe-Chromel позволяет оценить разность температур на экране держателя и образце. Она состоит из двух длинных проводов

из Chromel вдоль всего держателя и короткого отрезка AuFe в области образца, эти провода образуют дифференциальную термопару. Градиент температуры вычисляется по градуировке AuFe-Chromel, для которой точкой отсчета является температура по основному датчику CERNOX.

2.4. Предусилитель

Предусилитель сигналов расположен на верхнем фланце на разъеме штанги держателя образца (рис. 2), что обеспечивает низкий уровень наводок и небольшую емкость подводющих проводов. Используются инструментальные усилители AD620 с низким уровнем шумов типа $1/f$ (по напряжению 9 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$, по току 0.1 пА/ $\sqrt{\text{Гц}}$) с программируемыми коэффициентами усиления (1, 10, 100) и шириной полосы пропускания от нуля (без переходных конденсаторов) примерно до 100 кГц.

Для каждого из измерительных каналов предусмотрена раздельная грубая и точная компенсации сигнала, пропорционального dH/dt , с помощью переменных резисторов на передней панели блока, при которой к измеряемому сигналу добавляется сигнал с катушек компенсации. Величина компенсации зависит от геометрии образца и подводющих проводов и слабо зависит от температуры, что позволяет настроить ее вручную при пробном выстреле с нулевым током образца для увеличения чувствительности. Дополнительно с помощью вычисления коэффициента корреляции сигналов образца после каждого выстрела и сигнала dH/dT с катушки измерения поля осуществляется программная компенсация (см. ниже).

Блок содержит также ручной штырьковый коммутатор контактов образца для предварительной установки схемы измерения. Переключатели на передней панели блока позволяют быстро коммутировать контакты образца и выбрать общую точку измерительной схемы.

2.5. Базовый блок

В базовом блоке содержится основная часть электроники установки. В тракте усиления использованы операционные усилители AD OP27. Программно обеспечивается установка коэффициентов усиления (1, 10, 100). Начало каждого импульса синхронизировано с частотой сети 50 Гц. Есть возможность плавного выбора значения фазы сети, при которой запускается импульс. Длительность импульса поля примерно равна половине периода сетевого питания, и можно визуальным образом выбрать на осциллограмме измеряемых сигналов участок, максимально свободный от различного вида помех в силовой сети.

2.6. Цифровой блок MD200

Операционная система Windows не предназначена для управления быстротекущими процессами, поэтому для прецизионного управления аппаратурой и измерения был использован блок MD200 с интерфейсом USB, разработанный и реализованный под индивидуальный заказ в СПбГЭТУ “ЛЭТИ”. В его состав входят:

- 5 независимых 16-битовых 1-мкс-АЦП с программируемым коэффициентом усиления (1, 2, 4, 8) по входам; диапазон входных напряжений ± 10 В; данные каждого канала записываются в буферную память размером 256 килослов;
- входной и выходной регистры цифровых сигналов TTL-уровня служат для контроля состояния (переключателей/ручек) аппаратуры и управления разного рода состоянием ключей, например для установки коэффициентов усиления аналогового тракта;
- 16 разрядный ЦАП используется для управления процессом заряда конденсаторов и сквозной калибровки при поверке каналов усиления;
- во время выстрела происходит динамическое управление электроникой с точностью 1 мкс: для запуска и остановки АЦП, запуска тиристорного разрядника, включения и выключения тока через образец. Программируемый 8-канальный таймерный блок с шагом в микросекунду задает состояние 8 независимых цифровых каналов; основная управляющая программа запускает управляющую циклограмму по команде оператора в момент времени, синхронизированный с сетью, дальнейшее управление экспериментом передается циклограмме.

2.7. Автономный источник тока

Все измерения проводятся на постоянном токе в случае температурных зависимостей без поля или на постоянном токе, который включается только на время действия магнитного поля. В условиях быстрого однократного процесса (10 мс) использование измерений на переменном токе представляется нецелесообразным. За многолетний срок эксплуатации установки задач для измерений на переменном токе не возникло.

Источник тока образца имеет автономное питание от аккумуляторов, высокий импеданс в рабочем диапазоне частот до 100 кГц и стабилизирует ток образца в диапазоне 1 мкА–200 мА. Функции источника тока для импульсного поля описаны нами ранее в работе [22]. Значение тока задается переключателями на передней панели, положение которых считывается программой с помощью входного регистра MD200. В импульсном режиме включение и выключение тока управляется одним из каналов циклограммы через импульсный трансформатор с низкой проходной емкостью. Для измерения температурных зависимостей без магнитного поля источник тока переключается в постоянный режим.

Используются следующие микросхемы: стабилизатор напряжения с индикатором разряда батарей AMD666A, операционный усилитель AD820, четыре аналоговых ключа ADG513, цифровая TTL-логика. Использование питания от аккумуляторов позволяет уменьшить собственную емкость источника по отношению к общим цепям, уменьшить уровень внешней наводки, что особенно важно при малых токах и больших сопротивлениях образца.

3. ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦА

Быстроизменяющееся магнитное поле (с длительностью импульса около 10 мс) накладывает ограничения на параметры измеряемых образцов. Сопротивление образца может находиться в диапазоне 0.1 Ом–100 кОм. При меньших сопротивлениях в образце появляются большие экстрапоки от быстроизменяющегося магнитного поля, а при больших сопротивлениях увеличивается время переходных процессов.

Максимальные размеры образца при поперечной ориентации к магнитному полю определяются держателем и составляют 5.5×2 мм² или 4×3 мм². Для измерений по 4-зондовой схеме монтируются шесть контактов: два токовых и по две пары потенциальных (рис. 4). Это позволяет измерять магнитосопротивление и эффект Холла в одном выстреле. Помеха от dH/dt может быть много больше полезного сигнала, поэтому для подводящих проводов используются только витые пары и минимизируются петли в измерительных цепях. Кроме этого, используется аппаратная, а затем точная программная компенсация помехи dH/dt , подробно описанная ниже.

4. ГРАДУИРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЧАСТИ УСТАНОВКИ

Для достижения высокой точности измерений применяется сквозная градуировка измерительного тракта. В процессе калибровки результаты записываются в память и сравниваются с результатами предыдущих тестов.

Все возможные значения тока от источника тока при всех положениях переключателей предварительно измеряются и запоминаются. Во время эксперимента программа считывает положение переключателей и определяет точное значение тока.

Для измерения магнитного поля используется измерительная катушка на держателе из нескольких витков с заранее измеренной эффективной площадью. Эффективная площадь определяется из сравнения напряжений от измерительной катушки и пробной катушки с известной геометрией в длинном соленоиде на частоте 1–3 кГц. Отношение этих напряжений равно отношению эффективных площадей катушек.

Экспериментатор задает требуемое максимальное магнитное поле $H_{\max}$, по этому значению программа вычисляет напряжение U_c , до которого нужно зарядить конденсаторы. В каждом выстреле при включенном режиме калибровки $U_c(H_{\max})$ измеряется пара значений

$(U_c, H_{\max})$ и затем она добавляется в специальный файл, где уже содержатся предыдущие результаты. Перед каждым выстрелом по всем точкам этого файла проводится сглаженная кривая $U_c(H_{\max})$, которая позволяет определять нужное значение напряжения на конденсаторах U_c для получения заданного магнитного поля $H_{\max}$.

Процедура калибровки общего коэффициента усиления всех измерительных каналов для всех возможных комбинаций коэффициентов усиления происходит с применением специальной вставки на входе предварительного усилителя. Напряжение в двух полярностях с ЦАП MD200 ослабляется делителем на входе тракта в (1, 10, 100, 1000) раз в зависимости от диапазона общего усиления, измеряется мультиметром Keithley, подается вместо сигналов образца на измерительный тракт, результат усредняется по 10000 точкам. Все полученные коэффициенты передачи сохраняются. Имеется возможность сравнения результатов со сделанными ранее калибровками измерительного тракта. Результаты представляются в численном и графическом видах, отсортированные по убыванию в процентах дрейфа коэффициентов.

5. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ КАНАЛЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Кроме основных пяти каналов (магнитного поля и сигналов с образца), измеряемых во время выстрела, установка в отдельном окне регистрирует дополнительные восемь каналов с помощью мультиметра Keithley и аналогового дифференциального мультиплексора ADG407, управляемого выходным регистром MD200. Измеряются напряжение на конденсаторах до и после импульса, температура образца и ее градиент, уровень гелия и другие служебные каналы. Сигналы дополнительных каналов измеряются и записываются перед и сразу после импульса поля вместе с другими параметрами импульса.

Динамику изменения температуры образца и его градиента от времени можно посмотреть в отдельном окне.

Управление параметрами термоконтроллера LakeShore осуществляется авторской программой, которую удобно использовать вместо кнопок на его передней панели.

Отдельная программа позволяет измерять температурные зависимости сопротивления образца на постоянном токе при одной или двух полярностях тока $\pm I$ (рис. 5).

Рис. 5. Измерение температурных зависимостей образца без магнитного поля.

6. ИЗМЕРЕНИЯ В РЕЖИМЕ ОСЦИЛЛОГРАФА

В режиме осциллографа в окне программы отображаются непрерывные измерения напряжений с контактов образца без запуска магнитного поля, которые позволяют выбрать

контакты для измерения, подходящий ток через образец и коэффициенты усиления (рис. 6). В том же программном окне показываются результаты измерений после каждого выстрела.

Рис. 6. Временные зависимости всех каналов в масштабе границ АЦП...

Все коэффициенты усиления предварительно выставляются вручную в режиме осциллографа. Коэффициенты усиления канала магнитного поля табулированы и определяются автоматически. Серия выстрелов в каждом рабочем каталоге начинается с пар выстрелов до небольших значений полей (обычно менее 1 Тл) в обеих полярностях поля. При этом нагрев соленоида пренебрежимо мал, и можно серией выстрелов подобрать все коэффициенты усиления и режим автокомпенсации dB/dT . Далее поле $H_{\max}$ можно последовательно увеличивать в 2–5 раз и дойти до максимальных значений. Данные каждого выстрела наиболее достоверны вблизи максимального поля (где dB/dT минимально), а при $|H| < H_{\max}/10$ данные отбрасываются из-за помех от тиристорного разрядника.

7. ОСНОВНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Для каждого выбранного максимального магнитного поля $H_{\max}$ возможны следующие варианты импульсов: четыре импульса $\pm H$ и $\pm I$ (при наличии диодных эффектов) или два импульса $\pm H$ (если нет зависимости от тока).

На передней панели основной программы эксперимента (рис. 7) отображаются результаты всех импульсов для всех $H_{\max}$ текущего каталога отдельно по каналам измерения в вольтах. По общему обзорному рисунку удобно оценивать полноту результатов измерений и выбирать дальнейшие действия.

Рис. 7. Главное окно программы – отображает результаты всех импульсов в текущем рабочем каталоге...

Измеряемый сигнал может содержать суперпозицию холловского сигнала и сигнала магнитосопротивления, что может приводить к сложным зависимостям от магнитного поля. В качестве примера на рис. 7 приведены результаты реального эксперимента, где холловское напряжение Hall56 для нескольких импульсов поля (синяя кривая на графике) не симметрично по магнитному полю, что показывает необходимость дальнейшего разделения сигналов на четную и нечетную компоненты. Красная кривая на графике отображает результаты дополнительных выстрелов с противоположным направлением тока через образец.

Обработка полученных результатов описывается ниже.

8. ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

Абсолютная погрешность измерения магнитного поля складывается из нелинейности поля в рабочей области образца (менее 1%), точности определения эффективной площади измерительной катушки (менее 1% с учетом температуры) и погрешности временного ухода сквозной калибровки измерительного тракта (менее 0.1%). Относительная погрешность поля при последовательном проведении ряда одинаковых измерений составляет менее 0.01%, она определяется разрядностью АЦП (16 битов) до цифрового интегрирования.

Погрешность тока образца складывается из калибровки тока, нестабильности тока при изменении сопротивления образца при изменении поля; оценка показывает, что она составляет менее 1% в худшем случае.

Погрешность измерительного тракта образца определяется погрешностью временного ухода сквозной калибровки (менее 0.1%) в сумме с погрешностью от шумов и наводок, которая на максимальном усилении и при максимальном уровне наводки не превышает 5%.

Температурная погрешность складывается из погрешности градуировки датчика температуры CERNOX CX-1050, температурного контроллера (LS340) и особенностей конструкции держателя образца. Абсолютная точность определяется в основном калибровками датчика по фиксированным температурным точкам, она указывается производителем датчика в зависимости от диапазона температур. В жидком гелии (1.6–4.2 K) погрешность определения температуры по давлению насыщенных паров составляет около 0.01 K.

9. ПОЛНОЕ ПРОГРАММНОЕ УСТРАНЕНИЕ ПОМЕХИ dH/dt

Измерения в импульсном магнитном поле H сопровождаются сильным сигналом помехи $P(t) = dH(t)/dt$, который наводится на любом измерительном контуре. Для выделения полезного сигнала $R(t)$ из измеряемого смешанного сигнала $S(t) = R(t) + k P(t)$ разработан и используется авторский метод. На рис. 8 показаны зависимости от магнитного поля смешанного сигнала $S(H)$ (синяя петля) и полезного сигнала $R(H)$ (средняя красная кривая), при этом для нахождения коэффициента корреляции k используются зависимости от времени $S(t)$ и $R(t)$. Петля смешанного сигнала $S(H)$ состоит из ветвей нарастания и спада поля, в которых знак помехи $P(H)$ меняется на противоположный. После коррекции количество точек в полученной кривой $R(H)$ такое же, как в $S(H)$, а кривая $R(H)$ одинакова при нарастании и спаде поля. Кривая $R(H)$ не лежит посередине петли $S(H)$, поскольку в соленоиде есть потери, и поэтому форма импульса поля отличается от синусоидальной.

Рис. 8. Автоматическое программное устранение сигнала помехи dH/dt ...

Для устранения помехи $kP(t)$ во временной области мы выделяем среднюю часть импульса, на границах которой поле равно половине максимального, и по этой временной области находится коэффициент корреляции $k = \int S(t)P(t)dt / \int P^2(t)dt$. Далее для нахождения $R(t)$ паразитная добавка $kP(t)$ вычитается из каждого канала измерения $S(t)$.

При измерении на установке находится зависимость полезного сигнала от магнитного поля $R(H)$. В обычном случае, когда полезный сигнал R однозначно зависит от магнитного поля H , метод устранения помехи dH/dt является математически точным, он справедлив для произвольной зависимости полезного сигнала от магнитного поля $R(H)$ и для любой формы импульса поля $H(t)$, как доказано в Приложении 1.

Рассмотренный метод неприменим при наличии гистерезиса сопротивления образца $R(H)$ в магнитном поле, связанного с измерением магнитных материалов, перегревом образца во время выстрела и сильными экстратоками при малом сопротивлении образца. В этом случае программную коррекцию нужно отключить и полагаться на аппаратную коррекцию в блоке регулировок предварительного усилителя.

10. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ВО ВРЕМЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Результаты измерений записываются в файл после выполнения следующих действий:

- с учетом коэффициентов усиления всех каскадов все сигналы приводятся к напряжениям в вольтах на контактах образца;
- проводится коррекция нуля измерений по каналам; для этого выделяются две временные области до и после выстрела, в которых ток через образец отсутствует; усредненное значение по этим областям считается приборным нулем и вычитается из всех значений отдельно по каждому каналу измерения;
- проводится полное программное устранение паразитного сигнала dH/dt из измеряемого сигнала по каждому каналу (кроме некоторых случаев, рассмотренных выше)

11. ПАКЕТ ОБРАБОТКИ SafLab

После цикла измерений в импульсном поле получается набор более ста файлов данных, для систематизации и ручной обработки которых в программе Origin требуется несколько дней. Для пакетной обработки данных были разработаны авторский пакет SafLab и скрипты на языке Python, использующие SafLab, – Mixer и ShowChans, вся обработка с их помощью занимает меньше минуты.

Пакет SafLab создавался как альтернатива Origin для обработки любых экспериментальных данных и построения графиков, при этом его преимущества раскрываются именно при обработке структурированных однотипных данных, как на

установке импульсного поля. В настоящее время SafLab включает как большинство из алгоритмов обработки, существующих в Origin, так и дополнительные уникальные алгоритмы для обработки научных данных.

Например, одним из необходимых алгоритмов, отсутствующих в Origin, является сглаживающая аппроксимация из библиотеки ALGLIB [23], который позволяет провести единую плавную кривую с непрерывными первой и второй производными максимально близко к данным даже при наличии больших разрывов в данных и при отсутствии аналитической формулы аппроксимации. Этот алгоритм используется в скрипте Mixer для сглаживания и одновременного сшивания импульсов с разной полярностью поля.

В качестве примера рассмотрим скрипт, демонстрирующий характерную обработку холловского сигнала от двух импульсов при разных полярностях магнитного поля. На рис. 9 коричневыми точками отображаются экспериментальные данные для двух импульсов поля разной полярности, каждый из которых состоит из нарастания и спада поля. Для демонстрации был выбран пример с большим шумом и сильными искажениями, поэтому, несмотря на коррекцию помехи dH/dt , ветви нарастания и спада поля начинают расходиться в слабых полях.

Рис. 9. Пример характерной обработки экспериментальных данных по холловскому измерительному каналу...

Результат сглаживания упомянутым выше алгоритмом отображается на рис. 9 крупными синими точками, которые лежат максимально близко к исходным точкам, а выпадающая область в малых полях заполнена плавной интерполяцией. Красная кривая на рисунке получена как нечетная по магнитному полю часть сглаженной кривой. Для сигнала магнитосопротивления (не показан на рисунке) при обработке выбирается, наоборот, четная часть по магнитному полю.

В Приложении 2 приведен демонстрационный скрипт SafLab, который, несмотря на небольшой размер, позволяет провести необходимую обработку данных и построить рис. 9.

12. СКРИПТЫ ОБРАБОТКИ Mixer, ShowChans

С помощью пакета SafLab были написаны скрипты пакетной обработки результатов измерений в импульсном магнитном поле. Скрипт Mixer выполняет следующие задачи для каждого рабочего каталога:

- измеренные значения в вольтах переводятся в единицы удельного сопротивления;
- усредняются данные измерений по нарастанию и спаду магнитного поля выстрела;
- из всех выстрелов текущего каталога выбираются только парные выстрелы с одинаковым максимальным полем $H_{\max}$ с противоположной полярностью (или набор четырех выстрелов с изменением направления тока через образец);

- для каждого $H_{\max}$ формируется выходная равномерная шкала от $-H_{\max}$ до $H_{\max}$ со сглаживанием и заполнением выпавшей области малых полей. Для сглаживания с одновременной интерполяцией используется оригинальный алгоритм библиотеки ALGLIB [23], описанный выше;
- сигнал разделяется на четную и нечетную компоненты по магнитному полю; для сигнала магнитосопротивления оставляется четная компонента, для холловского сигнала остается нечетная, а в общем случае сохраняются обе части сигнала;
- суммарный обзорный график создается при объединении всех результатов импульсов поля с разными максимальными полями, самый низкополевой график включается без изменений, из каждого последующего по возрастанию поля графика удаляются результаты ниже предыдущего $H_{\max}$, а оставшаяся часть сдвигается по вертикали так, чтобы общий график не имел разрывов.

Скрипт ShowChans позволяет интегрировать результаты по всем рабочим каталогам для данного образца отдельно по всем каналам, собирая на одном графике обработанные полевые зависимости в виде серии кривых по всем температурам. На рис. 10 приведен пример такой обработки для образца $\text{Bi}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}\text{Te}_{0.001}$.

Рис. 10. Пример работы скрипта ShowChans

13. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описана установка импульсного магнитного поля, позволяющая проводить измерения магнитосопротивления и эффекта Холла образцов с сопротивлением в примерном диапазоне 0.1 Ом–100 кОм в многократно получаемых полях амплитудой до 35 Тл. Результаты, полученные на этой и предыдущих версиях установки импульсного магнитного поля, опубликованы в десятках работ, например в работах [2–9]. Описан ряд оригинальных технических и программных решений, обеспечивающих высокую точность измерений и скорость обработки результатов. Авторское программное обеспечение позволяет следить за состоянием аппаратуры, а также проводить быструю пакетную обработку результатов. Из программных решений следует отметить возможность программного удаления наводки dH/dt , сшиваение результатов измерений для разных полей, разделение смешанных сигналов магнитосопротивления и эффекта Холла.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Д.В. Машовцу как основателю группы импульсного поля в ФТИ им. А.Ф.Иоффе, Р.В. Парфеньеву за многолетнюю научную поддержку, М.П. Волкову за

поддержку и обсуждение результатов, В.О. Молодцову (СПбГТУ) за разработку и изготовление цифровых блоков, Ю.В. Цуканову за информационную поддержку.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Доказательство применимости программного метода удаления помехи dH/dt из полезного сигнала

Пусть во временной области имеется смешанный измеряемый сигнал $S(t)=R(t)+kP(t)$, состоящий из полезного сигнала $R(t)$ и помехи $P(t)=dH(t)/dt$. Обязательное условие применимости метода: полезный сигнал R должен однозначно зависеть от магнитного поля H , тогда значения $R_H(H)$ при нарастании и спаде поля совпадают.

Докажем, что при выполнении этого условия метод позволяет математически точно выделить сигнал $R(t)$ из смешанного сигнала $S(t)$ во временной области для произвольной зависимости полезного сигнала от магнитного поля $R_H(H)$ и для любой формы импульса поля $H(t)$.

Для устранения сигнала помехи $P(t)$ вычисляется коэффициент корреляции $k' = \int S(t)P(t)dt / \int P^2(t)dt$ и затем паразитная добавка $k'P(t)$ вычитается из смешанного сигнала $S(t)$.

Найдем условие, при котором вычисленный коэффициент корреляции k' будет совпадать с долей помехи k в смешанном сигнале $S(t)=R(t)+kP(t)$, при этом метод не будет вносить искажения в полезный сигнал $R(t)$. Для этого подставим $S(t)=R(t)+kP(t)$ в формулу для коэффициента корреляции. Очевидно, что равенство $k' = k$ будет выполняться тогда и только тогда, когда $I = \int R(t)P(t)dt = 0$ по временной области интегрирования A , т.е. когда сигналы $R(t)$ и $P(t)$ будут ортогональны по области A :

$$k' = \frac{\int SPdt}{\int P^2dt} = \frac{\int (R+kP)Pdt}{\int P^2dt} = \frac{\int RPdt}{\int P^2dt} + k \frac{\int PPdt}{\int P^2dt} = k.$$

Докажем, что если выбрать временную область $A=[t_1...t_2]$ так, чтобы магнитное поле на границах области совпадало, $H(t_1)=H_1=H_2=H(t_2)$, то функции $R(t)$ и $P(t)$ будут ортогональны по области A , т.е. $I = \int_A R(t)P(t)dt = 0$.

Обозначим зависимость полезного сигнала от поля как $R_H(H) \equiv R(t(H))$, эта зависимость однозначно определяет R при любом значении H на обеих ветвях как при нарастании, так убывании поля. Пусть $U(H)$ – первообразная от $R_H(H)$, так что $dU(H)/dH=R_H(H)$. Тогда, подставляя $P(t)=dH(t)/dt$, проводя замену переменной интегрирования t на H и учитывая, что $H_2=H_1$, получим

$$I = \int_A R(t)P(t)dt = \int_{t_1}^{t_2} R(t) \frac{dH(t)}{dt} dt = \int_{H_1}^{H_2} R_H(H)dH = U(H_2) - U(H_1) = 0,$$

что и требовалось доказать.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Демонстрационный скрипт SafLab для рис. 9

```
from saflab import *
U = DAT('Холл.dat'); S = DAT()
S['B'] = linspace(U[0].min(), U[0].max(), 32)
Smooth = spline_fit(U[0], U[1], 3.0)
S['Сглаживание'] = Smooth
S['Холл'] = lambda h: (Smooth(h)-Smooth(-h))/2

U.plot(ls=" ", ms=2, color='goldenrod')
S.plot_in(U)
U.style(2, ms=10, color='blue')
U.style(3, ms=0, lw=2, color='red')
U.legend()
U.xlabel = 'B, T'
U.ylabel = 'U, mV'
U.title = 'GaMnAs$ _8$'
plt.show()
```

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Song F., Lv Y., Sun Y. et al. // Nat. Commun. 2024. V. 15. P. 7841. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-52220-w>
2. Фадеев Е., Шахов М., Лахдеранта Е. и др. // ЖЭТФ. 2021. Т. 160. № 6. <https://doi.org/10.31857/S0044451021120129>
3. Lähderanta E., Lebedev A., Shakhov M. et al. // J. Phys. Condens. Matter. 2020. V. 32. № 11. <http://dx.doi.org/10.1088/1361-648X/ab5bb6>
4. Agrinskaya N., Lebedev A., Lebedev S., Shakhov M., Lähderanta E. // Mater. Res. Express. 2019. V. 6. № 3. P. 035603. <http://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/aaf7bd>
5. Blinov M., Shakhov M., Rylkov V. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2019. V. 469. P. 155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.08.023>
6. Михайлова М., Березовец В., Парфеньев Р. и др. // ФТП. 2017. Т. 51. № 10. С. 1393. <https://doi.org/10.21883/ftp.2017.10.45019.8598>
7. Pugach N., Safonchik M., Champel T. et al. // Appl. Phys. Lett. 2017. V. 111. № 16. P. 162601. <http://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1702.08828>
8. Safonchik M., Traito K., Tuominen S. et al. // Sci. Technol. 2009. V. 22. № 6. P. 065006. <http://dx.doi.org/10.1088/0953-2048/22/6/065006>

9. *Traito K., Safonchik M., Peurla M. et al.* // *Physica C*. 2008. V. 468. P. 11.
<https://doi.org/10.1016/j.physc.2008.02.007>
10. Физика и техника сильных магнитных полей, <http://lsmf.sarfti.ru/technic.html>
11. Установка по исследованию физических свойств твердых тел в сильных импульсных магнитных полях, http://kirensky.ru/ru/institute/sci_equipment/impuls
12. *Кудасов Ю., Макаров И., Маслов Д. и др.* // *ПТЭ*. 2015. № 6. С. 78.
<https://doi.org/10.7868/S0032816215050092>
13. 100 Tesla Multi-Shot Magnet,
<https://nationalmaglab.org/user-facilities/pulsed-field/magnets/100-tesla-magnet/>
14. *Ikeda A., Noda K., Shimbori K.* // *J. Appl. Phys.* 2024. V. 136. P. 175902.
<http://dx.doi.org/10.1063/5.0231640>
15. *Кнопфель Г.* Сверхсильные импульсные магнитные поля. Методы генерации и физические эффекты. Москва: Мир, 1972.
16. *Монтгомери Д.* Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. Магнитные и механические свойства конструкций из обычных и сверхпроводящих материалов. Москва: Мир, 1971.
17. *Херлах Ф.* Сильные и сверхсильные магнитные поля и их применения. Москва: Мир, 1988.
18. University of Turku; <https://www.utu.fi/en>
19. LUT University; <https://www.lut.fi/en>
20. *Shakhov M., Safonchik M., Parfeniev R.* // *Cryogenics 2000. Proc. 6th Cryogenics Conference.* Praha, 2000. P. 96.
21. *Шахов М., Машовец Д., Шамиур Д.* // *ПТЭ*. 1980. № 5. С. 130.
22. *Шахов М., Машовец Д.* // *ПТЭ*. 1983. № 3. С. 94.
23. ALGLIB, <https://alglib.net>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Блок-схема установки импульсного магнитного поля (ИМП).

Рис. 2. Фотографии и составные части установки ИМП: 1 – цифровой блок MD200, 2 – термоконтроллер LakeShore, 3 – мультиметр Keithley, 4 – источник тока образца, 5 – высоковольтный блок, 6 – базовый блок, 7 – силовой блок, 8 – компьютер, 9 – банк конденсаторов и тиристорный разрядник, 10 – переключатель полярности магнитного поля, 11 – держатель образца, 12 – блок предусилителей, 13 – измеритель давления Series 902, 14 – криостат, 15 – соленоид.

Рис. 3. Эскиз соленоида с сохранением пропорций: 1 – стальной стержень Ø11мм и капроновая втулка, 2 – медный прямоугольный провод 3×1.3 мм² (20 слоев) и эпоксидный компаунд (Stycast 2850ST + Catalyst), 3 – стеклотекстолитовые щеки и шайбы, 4 – стекловолокно, импрегнированное эпоксидным компаундом (Hyperten 2000HP), 5 – латунные стяжки.

Рис. 4. Фотография держателя образца, образца с шестью контактами и дифференциальной термопарой.

Рис. 5. Измерение температурных зависимостей образца без магнитного поля.

Рис. 6. Временные зависимости всех каналов в масштабе границ АЦП, по которым устанавливаются коэффициенты усиления по всем каналам.

Рис. 7. Главное окно программы – отображает результаты всех импульсов в текущем рабочем каталоге по одному выбранному каналу измерения.

Рис. 8. Автоматическое программное устранение сигнала помехи $P(t)=dH(t)/dt$ из смешанного измеряемого сигнала $S(t)=R(t)+kP(t)$ для произвольной зависимости полезного сигнала от поля $R(H)$ и для произвольной формы импульса поля от времени $H(t)$, где коэффициент корреляции $k = \int S(t)P(t)dt / \int P^2(t)dt$.

Рис. 9. Пример характерной обработки экспериментальных данных по холловскому измерительному каналу. Сглаженная кривая с плавным заполнением разрыва возле нулевого поля показана синими точками. Итоговая красная кривая получена выделением нечетной по магнитному полю части.

Рис. 10. Пример работы скрипта ShowChans, выводящего графики зависимостей сопротивления и холловского сигнала от поля, при всех измеренных температурах.

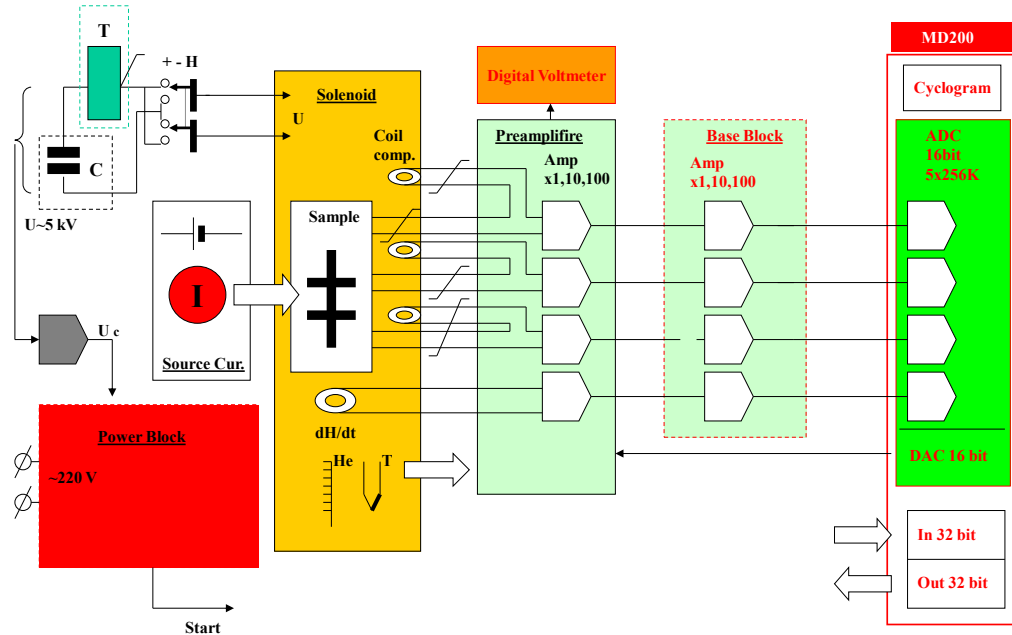


Рис. 1.

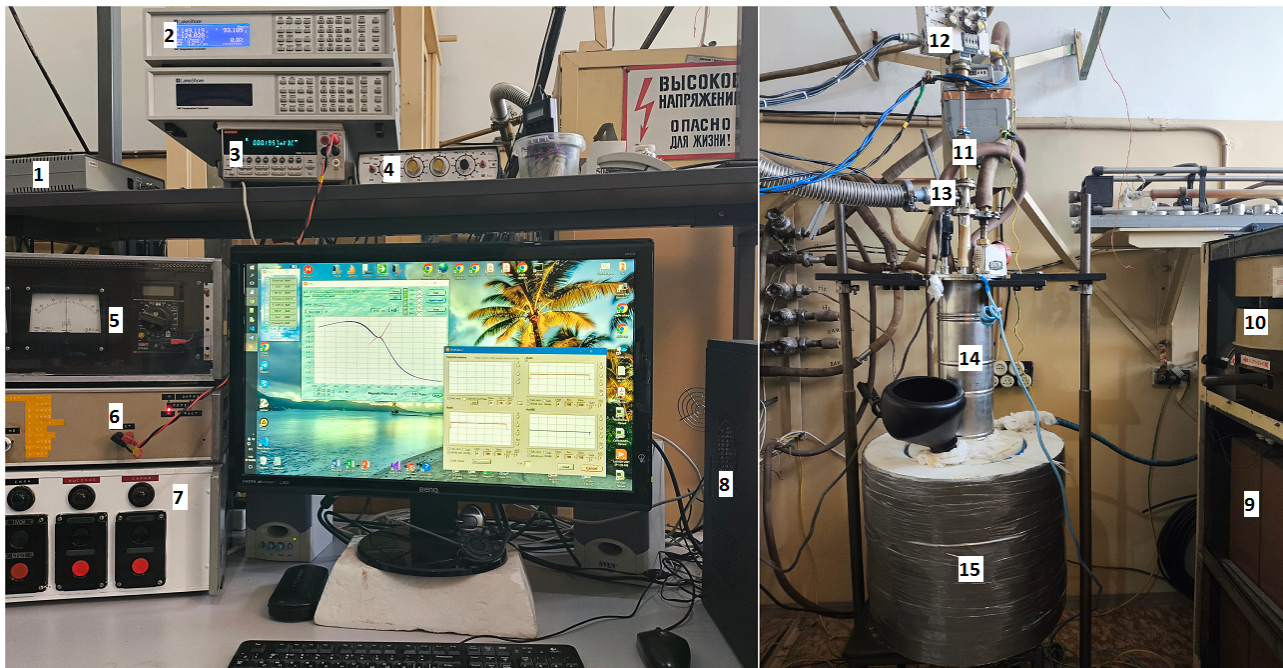


Рис. 2.

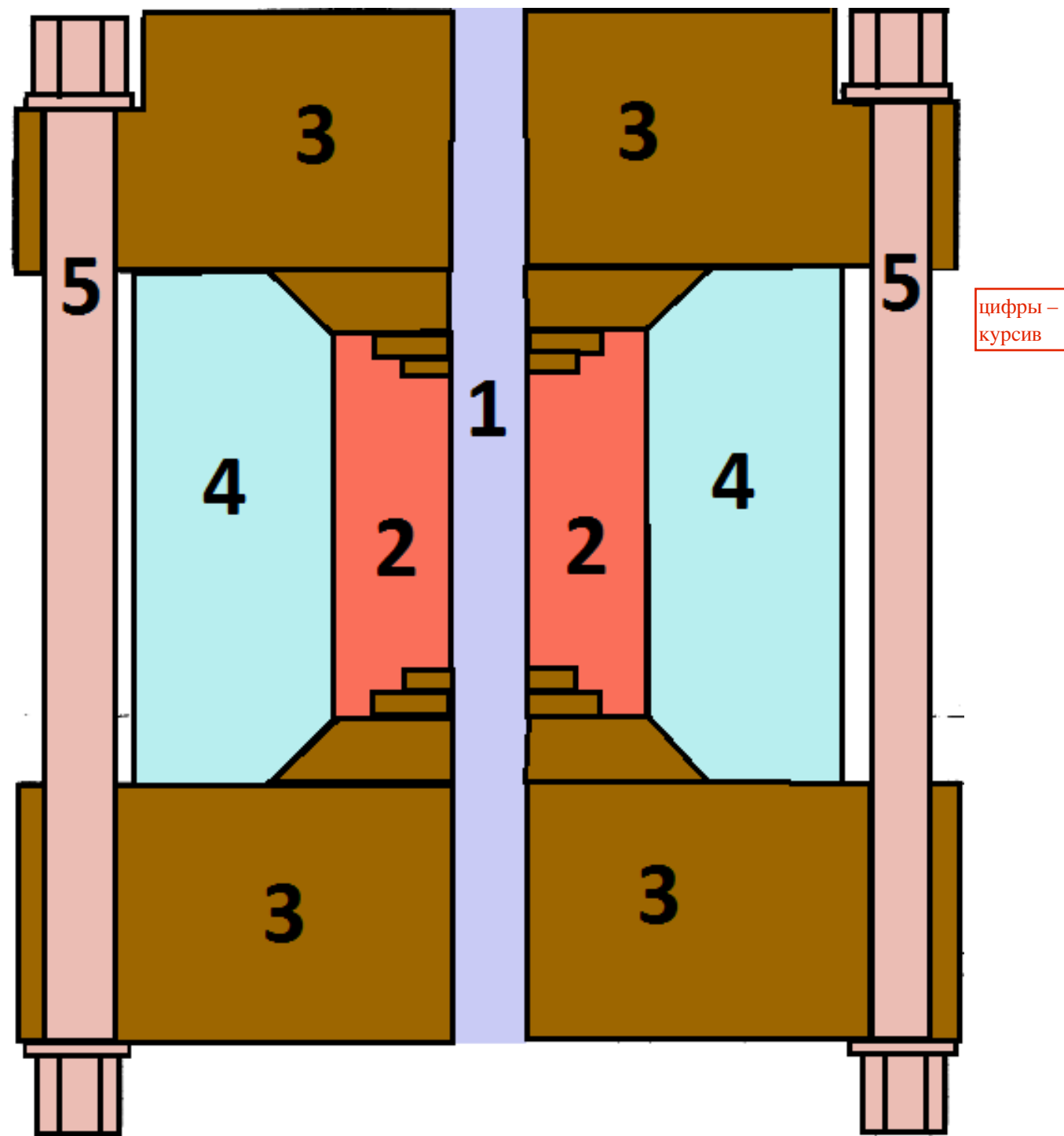


Рис. 3.

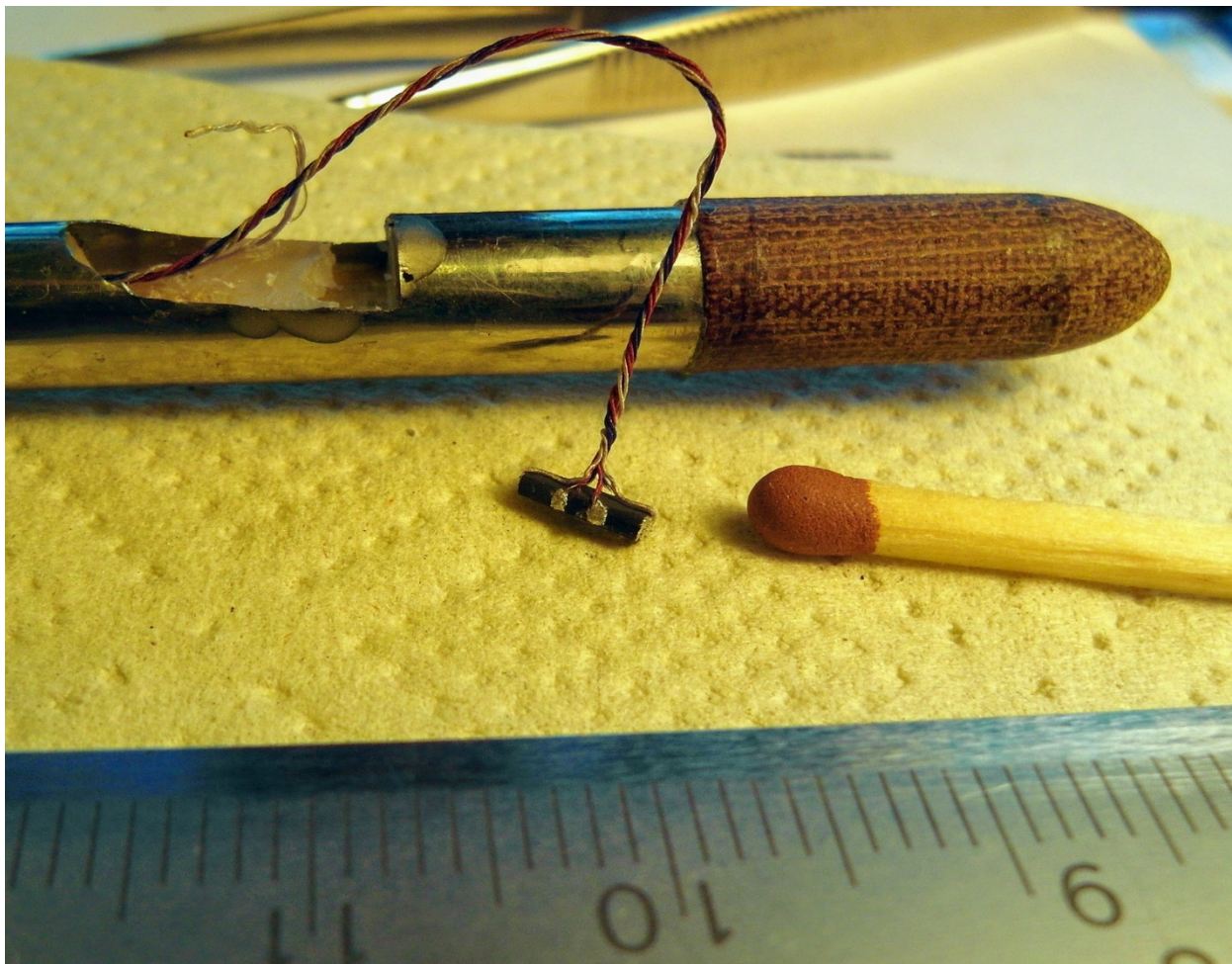


Рис. 4.

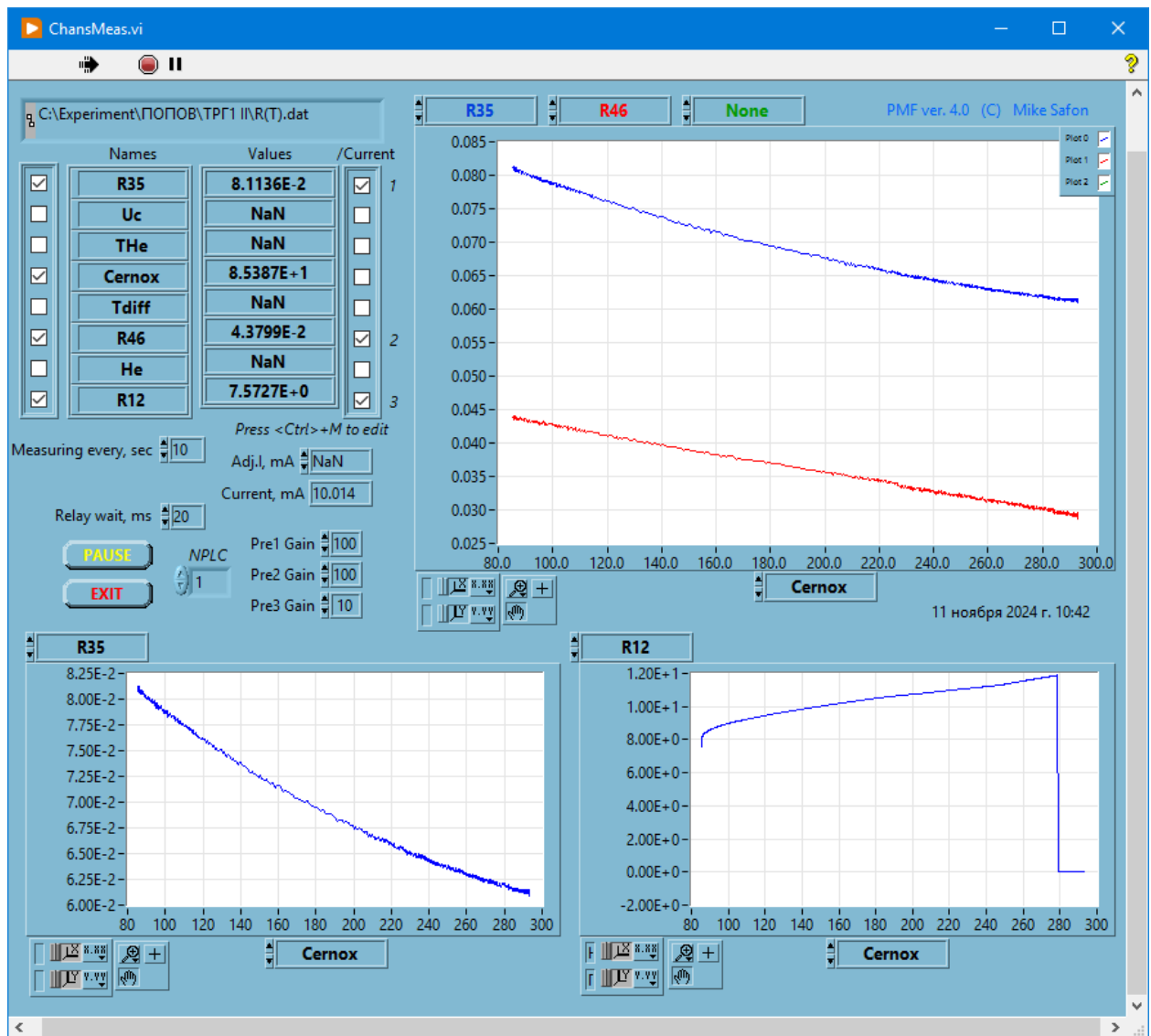


Рис. 5.

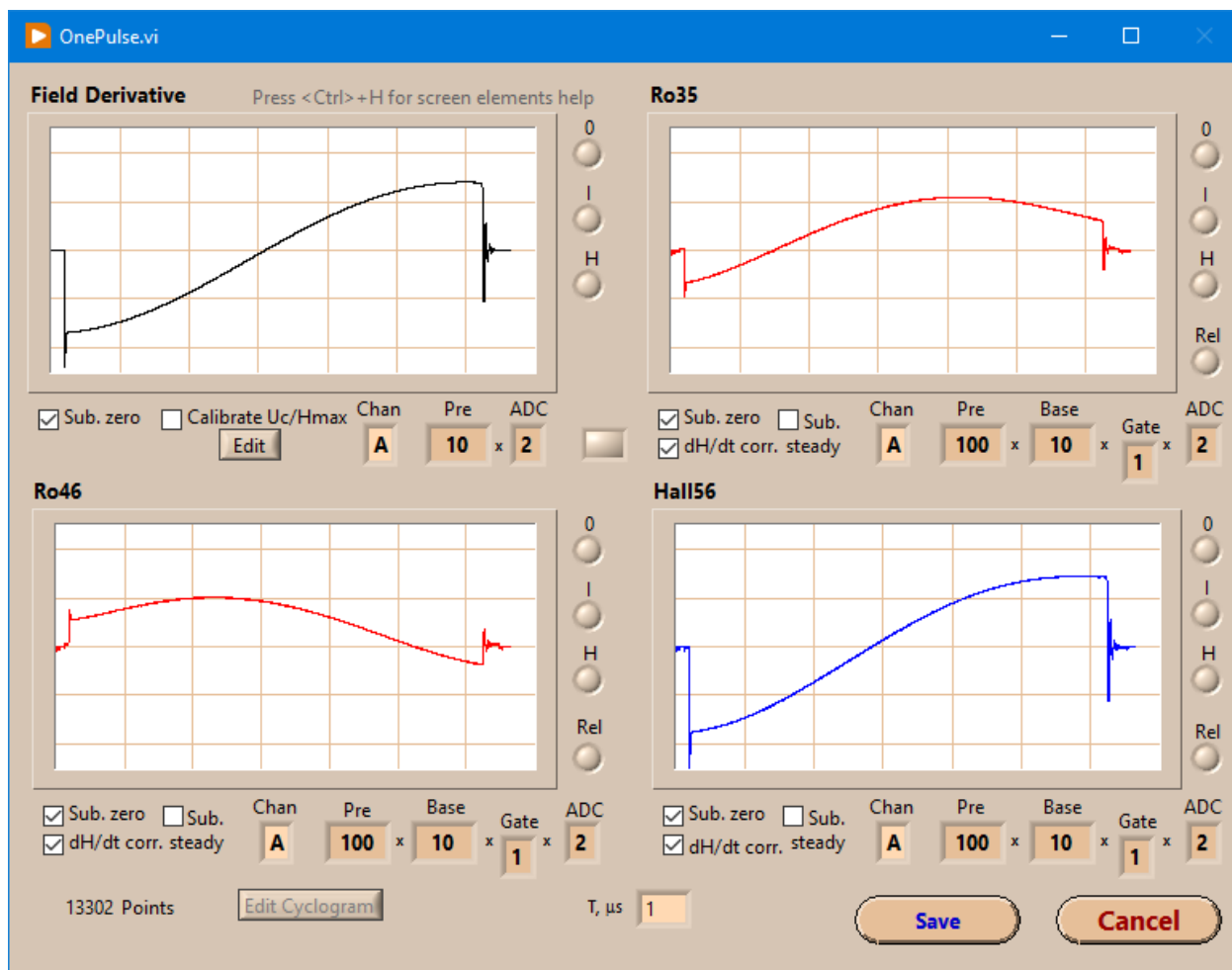


Рис. 6.

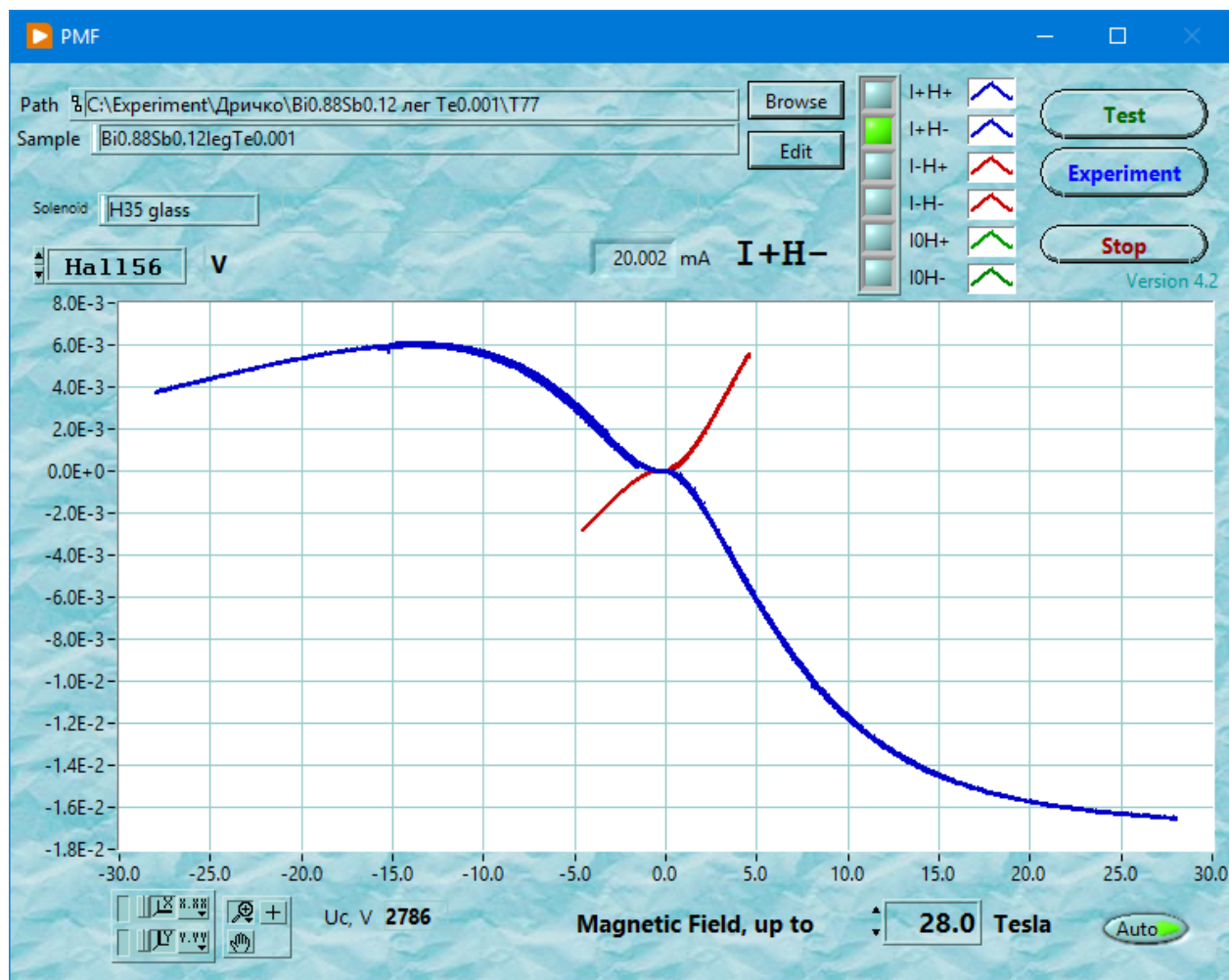


Рис. 7.

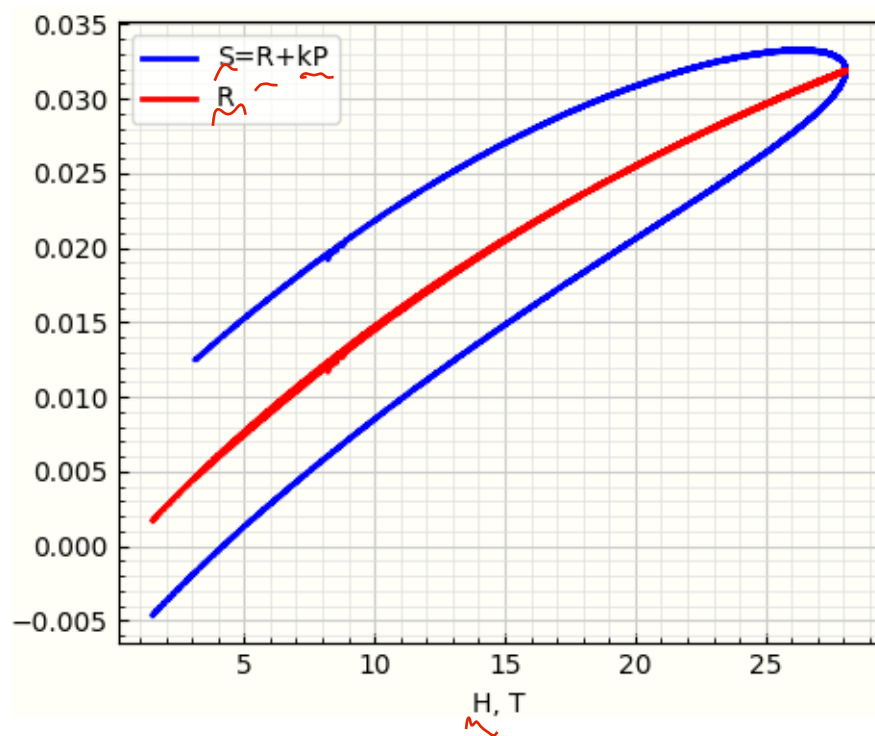


Рис. 8.

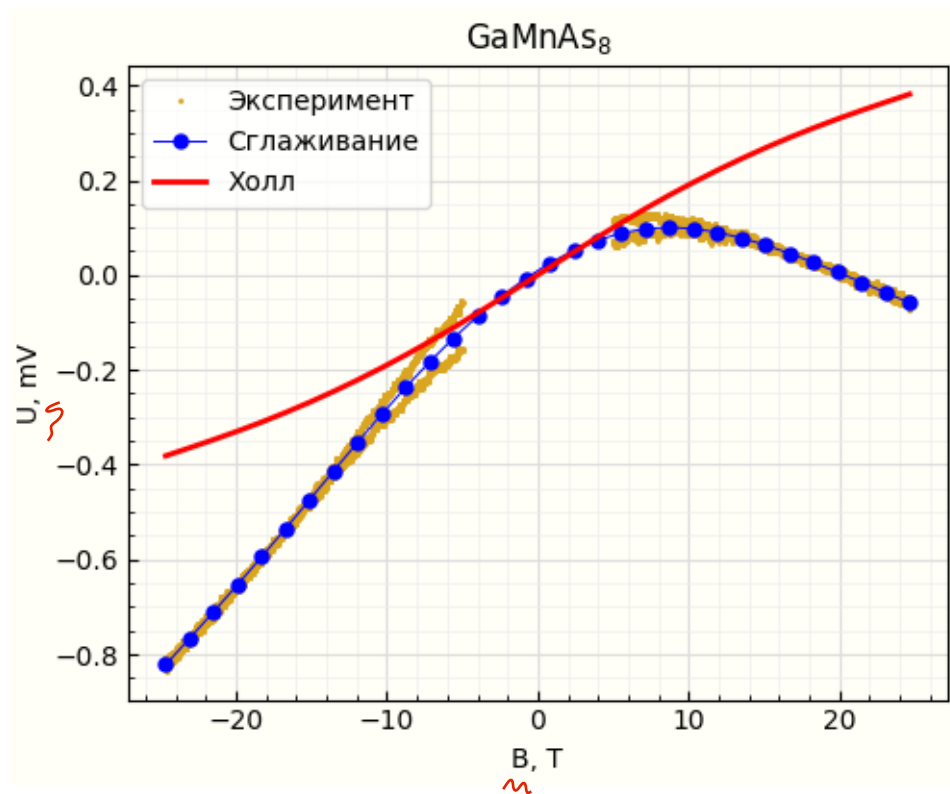


Рис. 9.

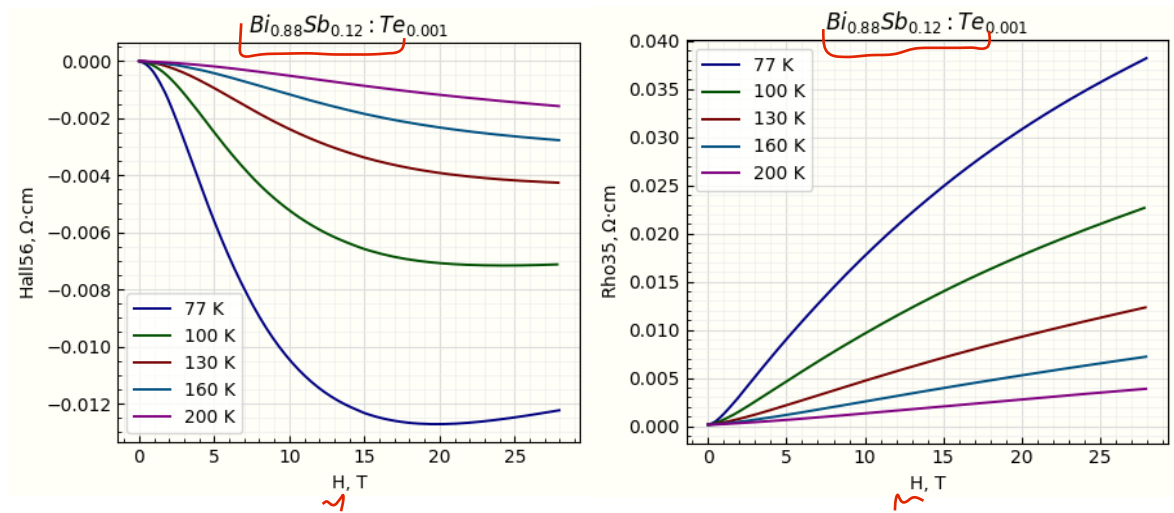


Рис. 10.