

Кафедра общей физики МФТИ, 2013

Дополнение к работе 11.3 «Измерение контактной разности потенциалов в полупроводниках»

Экспериментальная установка.....	2
Общее описание.....	2
Выбор напряжения на измерительном мосту.....	4
Калибровочная кривая термопары.....	4
Используемое электронно-измерительное оборудование.....	6
Вольтметр INSTEK GDM-8145.....	6
Генератор Г5-63.....	7
Осциллограф INSTEK GDS-620.....	8
Регулятор нагрева «ТЕРМОТЕСТ-М».....	9
Магазин сопротивления Р517-М.....	9
Задание.....	10
Основное задание.....	10
Дополнительные задания.....	10
Д1. Измерение температурной зависимости на охлаждении.....	10
Д2. Измерение вольт-амперной характеристики диода.....	11
Д3. Определение контактной разности потенциалов по температурной зависимости обратного тока через диод.....	11
Д4. Определение ёмкости р-п перехода.....	12

Экспериментальная установка.

Общее описание.

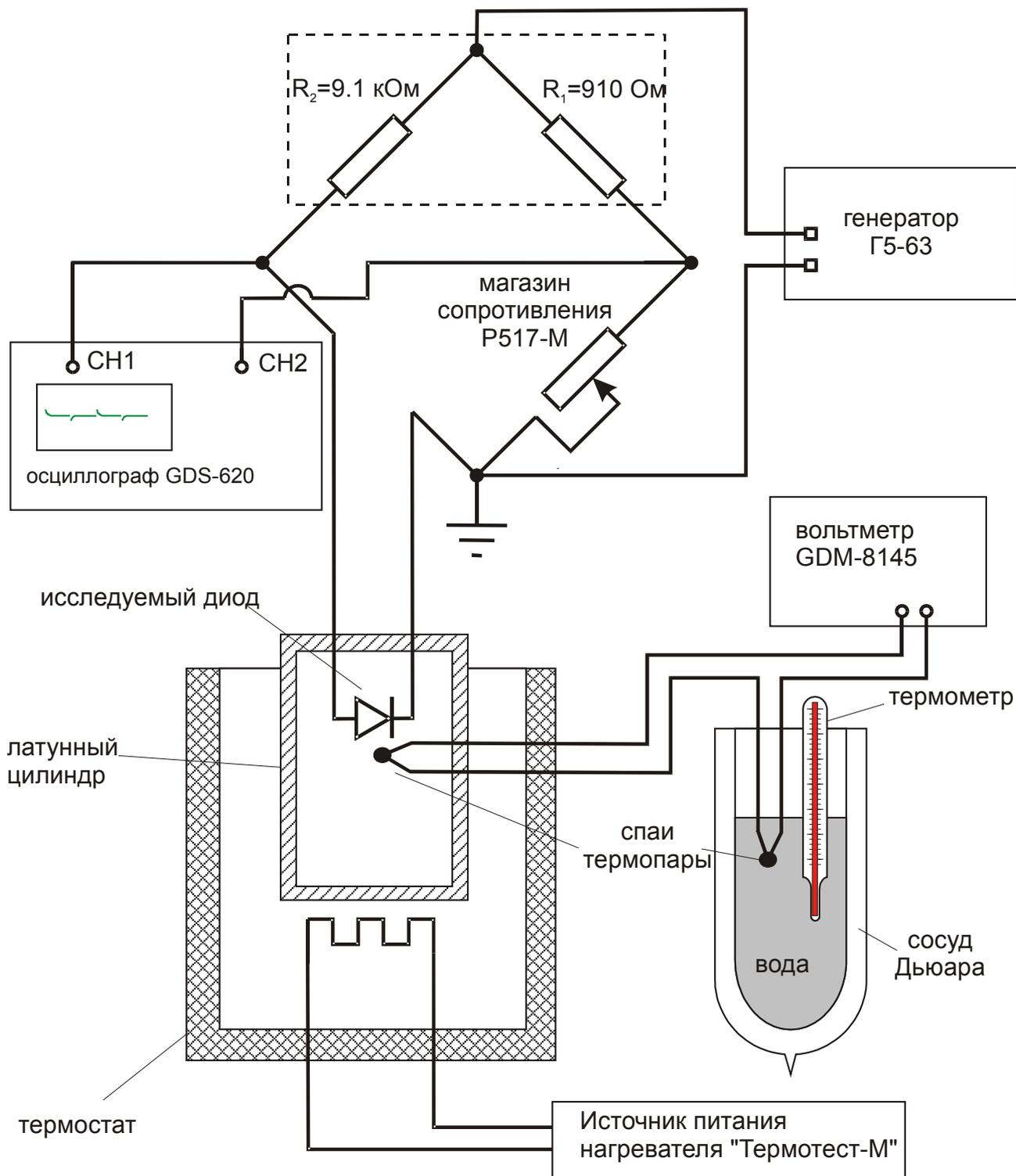


Рисунок 1: Схема экспериментальной установки для определения контактной разности потенциалов.

Схема установки, используемой для измерения температурной зависимости сопротивления исследуемого диода, изображена на Рисунке 1. Измерительная часть установки основана на мостовой схеме. В одно из плеч моста включён исследуемый диод¹, в другое — магазин сопротивлений. Постоянные сопротивления моста $R_1=910$ Ом и $R_2=9.1$ кОм смонтированы в делителе напряжения.² Напряжение на мост подаётся с генератора прямоугольных импульсов Г5-63. В измерительную диагональ моста включается осциллограф GDS-620, на один канал которого (CH1) подаётся напряжение с диода, на второй (CH2) — напряжение с магазина сопротивлений. Соединение генератора и осциллографа с мостом осуществляется коаксиальными кабелями, центральные жилы которых подключены к измерительной диагонали моста (для осциллографа) и к верхней по рисунку точке моста (для генератора), а оплётки коаксиального кабеля («земли» осциллографа и генератора) к нижней по рисунку точке моста.



Рисунок 2: Исследуемый диод (один из вариантов, на разных установках могут быть разные диоды) и подсоединённый к его корпусу измерительный спай термопары.

сопротивление магазина сопротивлений.

Температура диода контролируется медно-константановой термопарой, один из спаев которой находится в тепловом контакте с корпусом диода, а другой погружен в дьюар с водой при комнатной температуре. Температура воды контролируется спиртовым термометром. Термо-ЭДС контролируется вольтметром GDM-8145. Диод помещён в массивный латунный цилиндр, обеспечивающий равномерность нагрева. Цилиндр помещается в термостат, снабжённый нагревателем, подключённым к блоку «Термотест-М».

Осциллограф включается в режиме измерения разности подаваемых сигналов. Если измерительный мост сбалансирован, то потенциалы точек измерительной диагонали моста совпадают и при вычитании компенсируют друг друга. При этом на экране осциллографа наблюдается прямая линия с разрывами и небольшими искажениями на фронтах.

В сбалансированном состоянии моста сопротивление диода определяется по формуле

$$R_d = \frac{R_2}{R_1} R_M, \quad \text{где } R_M -$$

1 Используется выпрямительный диод, для которого в любой полярности не представляют опасности напряжения до 60В, доступные с генератора импульсов.

2 Используются обычные резисторы с точностью номинала 10%. Отклонение реального сопротивления резисторов от номинала даёт систематическую ошибку в определении сопротивления перехода, однако не влияет на определение контактной разности потенциалов, так как после логарифмирования это различие даёт лишь общий сдвиг кривой $\ln R(1/T)$.

Выбор напряжения на измерительном мосту.

Для выполнения работы необходимо, чтобы диод находился на линейном участке вольт-амперной характеристики. Это условие тем лучше выполнено, чем меньше напряжение на диоде. В то же время, из-за ограниченной чувствительности каналов осциллографа условие балансировки моста определяется тем чувствительнее, чем больше падение напряжения на диоде, то есть чем большее напряжение приложено к мосту.

Оптимальное напряжение на мосту (амплитуду сигнала генератора) можно подобрать следующим образом: необходимо сбалансировать мост при некотором выбранном напряжении и убедиться, что балансировка моста не нарушается при изменении (например, уменьшении вдвое) прикладываемого напряжения либо при изменении полярности прикладываемого напряжения.

Так как при нагреве сопротивление $p-n$ перехода понижается, то даже при неизменном напряжении на мосту с повышением температуры напряжение на диоде будет падать. Это может привести к потере точности при высоких температурах, если не увеличивать напряжение на мосту (контролируя каждый раз, что линейность вольт-амперной характеристики не нарушается).

Калибровочная кривая термопары.

Термопара откалибрована при условии, что её «холодный» спай находится при 0 °С. Калибровочная кривая представлена на Рисунке 3. В условиях опыта холодный спай термопары находится в воде при комнатной температуре. Линейная аппроксимация связи термоЭДС с температурой даёт систематическую ошибку в несколько градусов при разности температур спаев более 50-60 °С. Для исключения этой систематической ошибки можно пользоваться либо непосредственно калибровочной кривой, либо нелинейной аппроксимацией, представленной там же. При учёте нелинейности измеряемое значение термоЭДС необходимо откладывать от напряжения, соответствующего измеренной температуре воды в дюаре.

термопара медь-константан,
холодный спай при $t=0^{\circ}\text{C}$

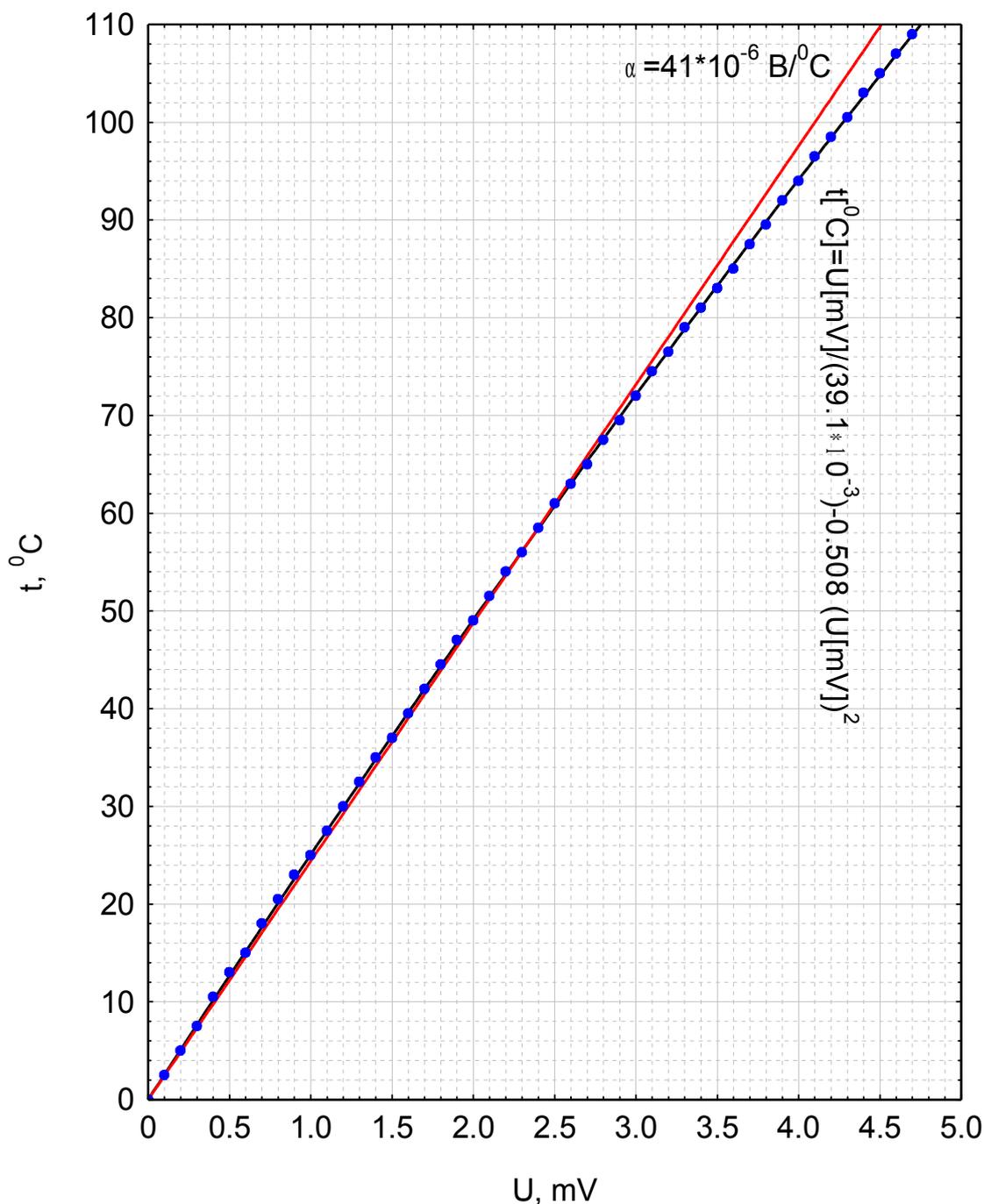


Рисунок 3: Калибровочная кривая термопары медь константан при нахождении холодного спаия в тающем льду. Точки - калибровочные точки, прямая - линейная аппроксимация с табличным значением постоянной термопары $41 \times 10^{-6} \text{ V}/^{\circ}\text{C}$, плавная кривая - квадратичная аппроксимация по закону

$t[^{\circ}\text{C}] = \frac{U[\text{мВ}]}{39.1 \times 10^{-3} \text{ мВ}/^{\circ}\text{C}} - (U[\text{мВ}])^2 \times 0.508 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мВ}^2}$, где напряжение задаётся в милливольтах.

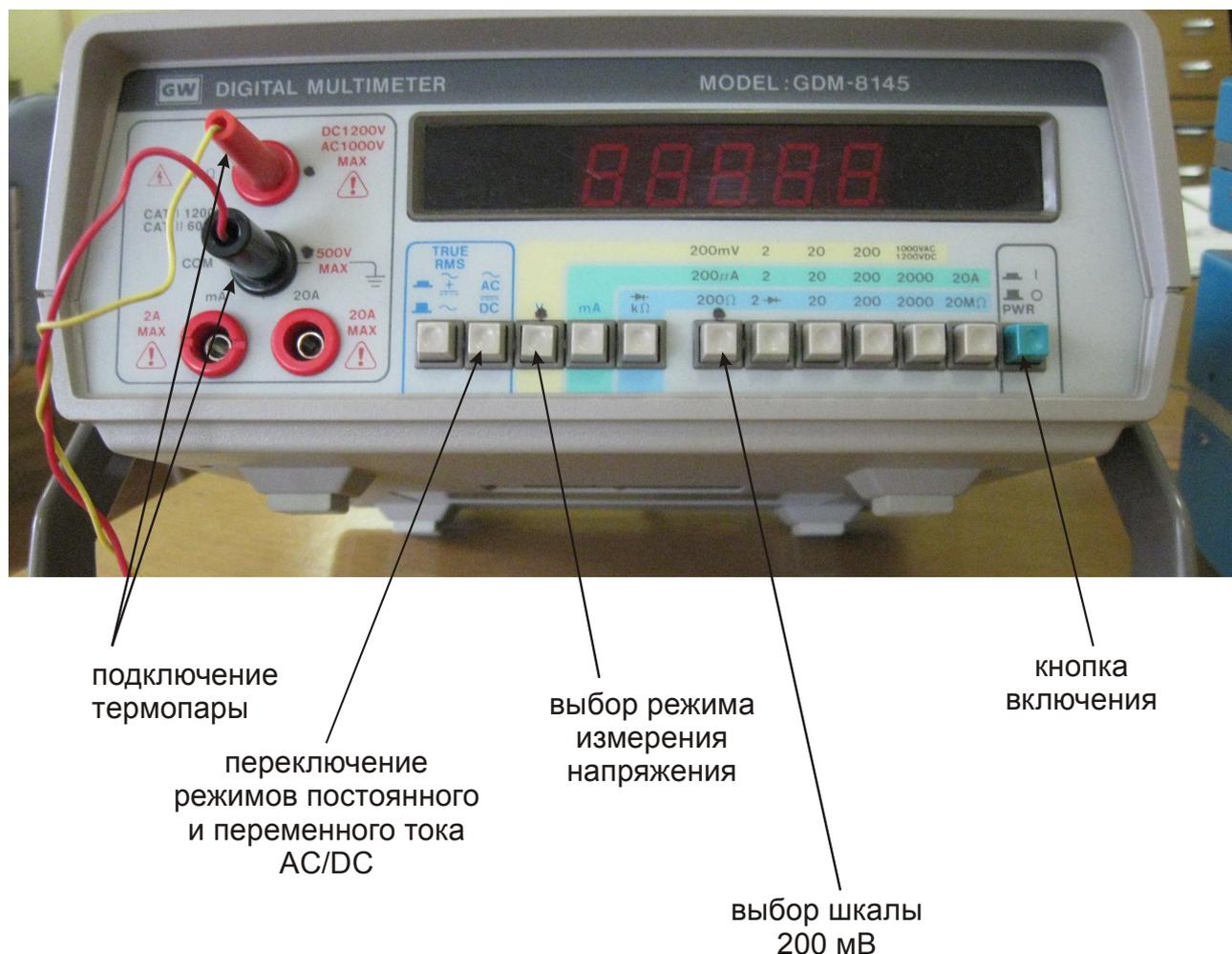
Используемое электронно-измерительное оборудование.**Вольтметр INSTEK GDM-8145.**

Рисунок 4: Вольтметр INSTEK GDM-8145.

При начале работы убедиться, что вольтметр находится в режиме измерения напряжения (нажата клавиша «V») по постоянному току (отжата клавиша «AC/DC») и выбран диапазон напряжений «200 mV».

Дать вольтметру прогреться 10-15 минут до начала измерений.

При измерении малых постоянных напряжений существенен сдвиг нуля вольтметра. Этот сдвиг необходимо определить до начала опыта либо закоротив вход вольтметра, либо усреднив показания вольтметра при переполюсовке подключения термопары.³

³ Сдвиг нуля может достигать 0.1мВ, что соответствует систематической ошибке (см. калибровочную кривую термопары) в 2 °С. Однако нужно иметь в виду, что температуры спаев термопары могут реально различаться в момент начала опыта: например, диод может не остыть до комнатной температуры после выполнения работы предыдущей группой.

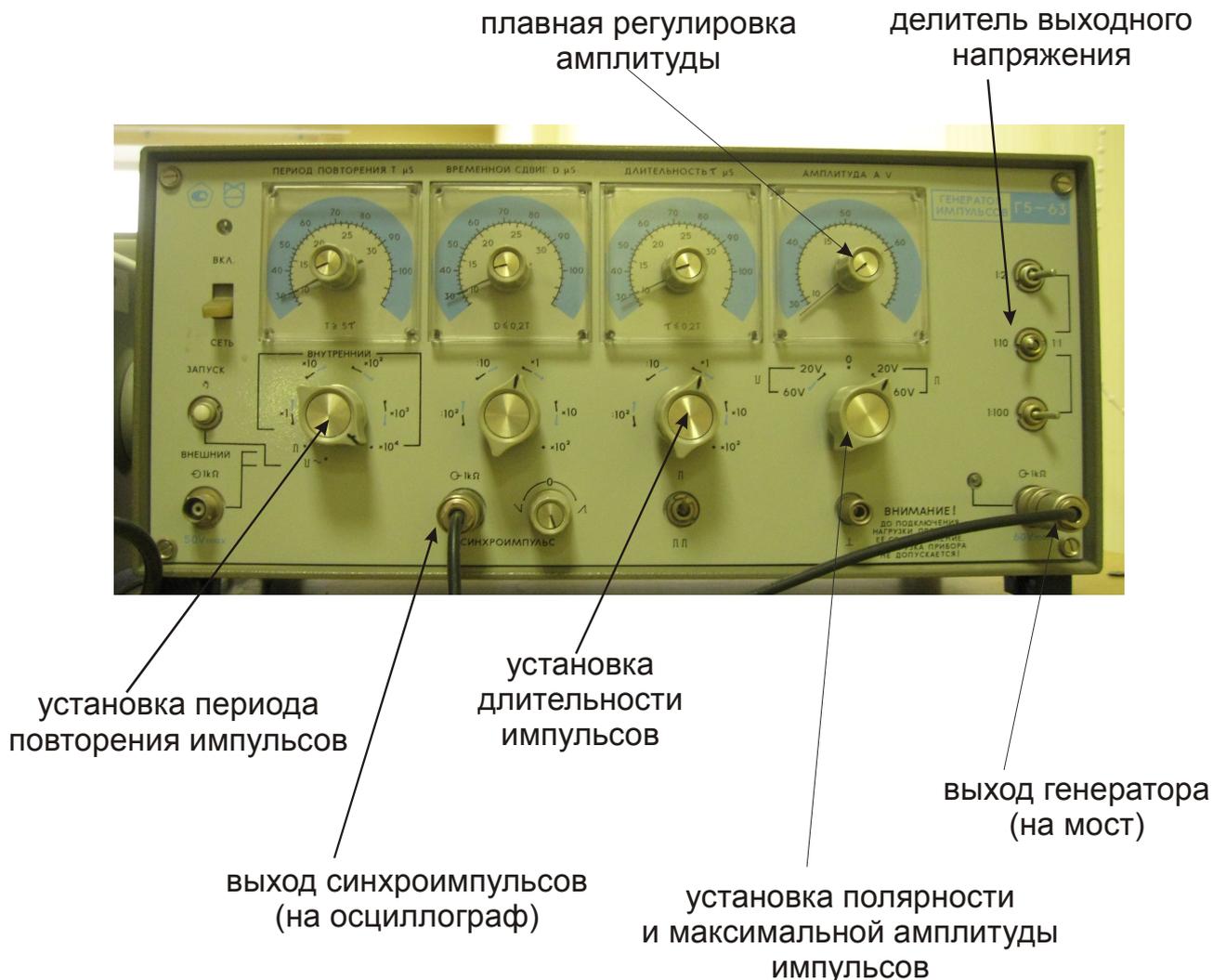
Генератор Г5-63.

Рисунок 5: Генератор Г5-63 и его ручки настройки. (Положение ручек настройки не соответствует оптимальным для данной работы).

Генератор Г5-53 позволяет получать прямоугольные импульсы периодом повторения от нескольких микросекунд до сотен миллисекунд с длительностью импульса напряжения от 0.1 мксек до 1 мсек. Полярность импульса может выбираться как положительной, так и отрицательной, амплитуда напряжения регулируется как плавно, так и дискретным делителем. Максимальная амплитуда выходного напряжения составляет 60В. Дополнительно с генератора снимается сигнал синхронизации для осциллографа.

Генератору необходимо прогреться 10-15 минут до начала измерений.

Для измерений выбирается период повторения около 1 кГц (период повторения около 1 мсек), скважность импульсов устанавливается около 2 (длительность импульса составляет около половины периода повторения)⁴.

⁴ На лицевой панели генератора отмечено, что длительность импульса должна быть менее 20% от периода повторения, но на частотах около 1кГц генератор стабильно работает и со скважностью около 2.

Осциллограф INSTEK GDS-620.

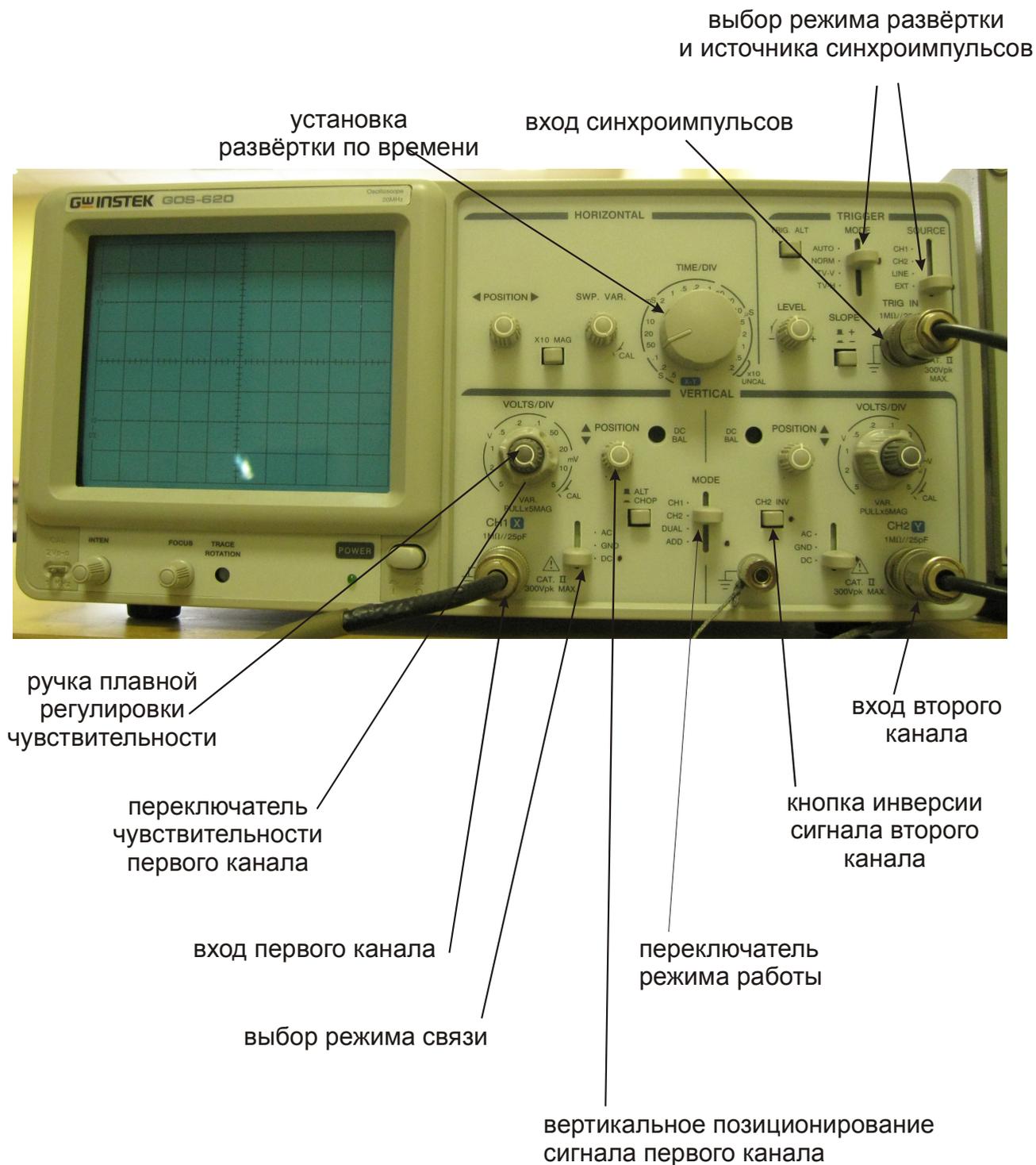


Рисунок 6: Осциллограф INSTEK GDS-620 и его ручки управления. (Положение ручек настройки может не соответствовать настройкам для выполнения работы.)

Двухканальный осциллограф GDS-620 используется в работе в качестве индикатора нуля напряжения на измерительной диагонали моста. Напряжение на диоде подаётся на первый канал (CH1), напряжение на магазине сопротивлений на второй канал (CH2). Для сравнения

этих напряжений производится их вычитание.

Осциллографу нужно дать прогреться 10-15 минут до начала опыта. При необходимости подстроить яркость (ручка «INTEN» под экраном) и фокусировку (ручка «FOCUS» под экраном) луча для обеспечения оптимальных условий наблюдения.

Для корректного вычитания сигналов необходимо проверить, что чувствительности по обоим каналам совпадают, а ручки плавной регулировки чувствительности находятся в крайнем по часовой стрелке положении (переход этих ручек в положение с фиксированной чувствительностью сопровождается лёгким щелчком). Чувствительность может быть увеличена в 5 раз, если выдвинуть ручки плавной регулировки «на себя».

Для вычитания сигналов переключатель режима работы «MODE» должен быть в положении «ADD», а кнопка инвертирования сигнала второго канала «CH2 INV» должна быть нажата.

Оба канала осциллографа находятся в режиме связи по постоянному току «DC». Синхронизация осциллографа осуществляется от внешнего источника (переключатель выбора режима развёртки «MODE» в положении «NORM», переключатель «SOURCE» в положении «EXT»).

Для контроля реальной формы сигналов по обоим каналам (одновременного наблюдения обоих сигналов) переключатель «MODE» переводится в положение «DUAL».

Цена деления развёртки по времени устанавливается около 1 мсек. Развёртка подбирается так, чтобы на экране наблюдалось 2-3 периода подаваемого напряжения.

При подаче больших напряжений на диод и установленной высокой чувствительности каналов осциллографа возможен выход усилителей каналов из линейного режима, что приведёт к искажению сигнала при вычитании. Эффект может быть проконтролирован, если при сбалансированном мосте одинаково изменить чувствительность обоих каналов, либо изменить вертикальное положение вращением регулятора «POSITION» - если входные усилители каналов осциллографа находятся в линейном режиме, то эти операции не приведут к искажению сигнала на экране осциллографа.

Регулятор нагрева «ТЕРМОТЕСТ-М».

Измерения производятся в режиме непрерывного нагрева. Для нагрева должен быть включён тумблер «ПЕЧЬ» (зажжён светодиод «ВКЛ» над тумблером). Переключатель «ТОК ПЕЧИ» должен быть в положении «1» для медленного нагрева и в положении «2» для более быстрого нагрева.

Магазин сопротивления Р517-М.

Магазин сопротивления используется для балансировки моста, он позволяет подобрать сопротивление до 10 кОм с точностью до 0.01 Ом.

Точность подбора сопротивления в эксперименте можно контролировать отстройкой моста от найденного значения сопротивления до возникновения на экране осциллографа заметной картины разбалансировки моста (расхождения сигнала при наличии и отсутствии напряжения более чем на половину ширины линии).

Задание.

Основное задание.

ВНИМАНИЕ: Некоторые из дополнительных заданий выполняются до начала нагрева диода.

1. Включите приборы (осциллограф, генератор импульсов, цифровой вольтметр) и дайте им прогреться 10-15 минут.
2. Зафиксируйте с помощью термометра температуру холодного спая термопары. Определите и запишите насколько сдвинут ноль вольтметра.
3. Установите на генераторе Г5-63 оптимальное значение амплитуды импульсов и удобные для регистрации значения периода повторения и длительности импульсов. Подбранная амплитуда должна соответствовать линейному участку вольт-амперной характеристики диода.
4. Установите на осциллографе одинаковые значения чувствительности для первого и второго каналов. Чувствительность должна быть максимально высокой, но при этом не должно быть насыщения предварительных усилителей каналов. Подберите подходящую частоту развёртки. При необходимости подстройте яркость луча и фокусировку.
5. Исследуйте температурную зависимость сопротивления p - n перехода от комнатной температуры до примерно $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Измерения выполняются при непрерывном медленном нагреве (регулятор тока печи в положении «1»). Периодически (каждые 15-20 $^{\circ}\text{C}$) проверяйте, что диод находится на линейном участке вольт-амперной характеристики и при необходимости изменяйте амплитуду подаваемого на мост напряжения.
6. Постройте зависимость $\ln R_d$ от $1/T$. По наклону полученной кривой определите контактную разность потенциалов и оцените достоверность полученного результата.

Дополнительные задания.

Приведённые ниже варианты дополнительных заданий выполняются по указанию преподавателя либо по желанию студента. Некоторые из перечисленных заданий должны выполняться до проведения основной работы (до начала нагрева диода).

Д1. Измерение температурной зависимости на охлаждении.

1. По достижении максимальной температуры извлеките латунный цилиндр с диодом из термостата (использовать имеющиеся в лаборатории «прихватки» во избежание ожога). Цилиндр и диод начнут остывать за счёт теплообмена с воздухом.
2. Проведите серию измерений сопротивления диода во время охлаждения.
3. Нанесите полученные данные на тот же график, что и основные результаты. Используйте их для более точного определения контактной разности потенциалов.

Д2. Измерение вольт-амперной характеристики диода.

ВНИМАНИЕ: Измерение вольт-амперной характеристики при комнатной температуре выполняется до нагрева. Задание может быть расширено измерением вольт-амперной характеристики при нескольких температурах.

1. При приложении произвольного напряжения к мосту балансировка моста соответствует тому, что падение напряжения на диоде равно падению напряжения на регулируемом сопротивлении, а ток через измерительную диагональ моста не течёт. Это позволяет выразить напряжение на диоде и ток через диод (в условиях балансировки моста) через приложенное к мосту напряжение U_0 , установленное на магазине сопротивлений значение R_M и параметры моста: напряжение $U_d = \frac{R_M}{910 \text{ Ом} + R_M} U_0$, ток $I_d = \frac{U_0 - U_d}{9100 \text{ Ом}}$.
2. Изменяя напряжение на мосту от +60В до максимального по амплитуде напряжения отрицательной полярности, при котором ещё удаётся сбалансировать мост, добейтесь балансировки моста при каждом значении напряжения. Напряжение определяется по шкале генератора. Обратите внимание, что при больших приложенных напряжениях возможен выход усилителей входных каналов осциллографа из линейного режима (см. описание осциллографа выше).
3. По измеренным значениям сопротивления R_M на магазине сопротивлений при разных значениях приложенного напряжения (напряжения на генераторе) U_0 рассчитайте напряжения на диоде и ток через диод и постройте вольт-амперную характеристику диода.
4. По вольт-амперной характеристике определите напряжение открытия диода и величину обратного тока. Объясните, как эти величины связаны с определяемой в основной части работы контактной разностью потенциалов.

Д3. Определение контактной разности потенциалов по температурной зависимости обратного тока через диод.

ВНИМАНИЕ: Задание выполняется параллельно с основным заданием при 3-5 температурах.

1. При приложении к диоду отрицательного напряжения большой амплитуды через диод протекает обратный ток $I_0 \propto n_n(p\text{-область}) = n_n(n\text{-область}) \exp(-e \Delta V / k_B T)$, где ΔV - контактная разность потенциалов (формула (8) в основном описании работы в «Лабораторном практикуме по общей физике»). Таким образом, если измерить обратный ток при нескольких температурах, то можно определить контактную разность потенциалов из наклона прямой $\ln I_0 \left(\frac{1}{T} \right)$.
2. Для измерения обратного тока необходимо при нескольких выбранных температурах приложить к мосту напряжение отрицательной полярности большой амплитуды и сбалансировать мост. Постоянство температуры в ходе измерения контролируется по напряжению на термопаре и регулируется включением и выключением нагревателя по необходимости. При каждой температуре измерение повторяется при нескольких значениях амплитуды напряжения, в том числе при максимально возможном значении

(определяемом пределом шкалы генератора либо максимальной амплитудой, при которой удаётся сбалансировать мост). Значение напряжения на мосту определяется по шкале генератора. Необходимо иметь в виду, что при отрицательной полярности напряжения эффективное сопротивление диода велико и почти всё приложенное напряжение падает на диоде, поэтому чувствительности входных каналов осциллографа должны быть выбраны так, чтобы обеспечивать корректное измерение (см. описание осциллографа выше).

- По измеренным для данной температуры нескольким значениям напряжения на мосту U_0 и сопротивления магазина сопротивлений R_M с использованием известных параметров моста восстанавливается фрагмент отрицательной ветви вольт-амперной характеристики (напряжение на диоде $U_d = \frac{R_M}{910 R_M + R_M} U_0$, ток через диод $I_d = \frac{U_0 - U_d}{9100 R_M}$). По этому фрагменту вольт-амперной характеристики определяется обратный ток диода I_0 , как значение к которому стремится вольт-амперная характеристика при экстраполяции в область больших амплитуд.
- Постройте зависимость $\ln I_0$ от $\frac{1}{T}$ и по её наклону определите контактную разность потенциалов. Сравните результат с результатом основной части работы.

Д4. Определение ёмкости р-п перехода.

ВНИМАНИЕ: Это задание при комнатной температуре выполняется до начала нагрева.

- Область перераспределённой зарядовой плотности на р-п переходе может быть рассмотрена как конденсатор некоторой ёмкости. Эта ёмкость является важной технической характеристикой диода, определяя в частности возможность использования диода в высокочастотных схемах. Ёмкость р-п перехода может быть оценена по отклику диода на включение/выключение напряжения на нём. Так как на мост подаётся напряжение в форме прямоугольных импульсов, кривые отклика в ходе выполнения работы можно непосредственно наблюдать на экране осциллографа.
- Подайте на мост напряжение небольшой амплитуды с генератора так, чтобы диод находился на линейном участке вольт-амперной характеристики. Определите сопротивление диода R_d .
- Переведите осциллограф из режима вычитания сигналов, используемого при балансировке моста, в режим одновременного наблюдения сигналов обоих каналов (переключатель режима «MODE» в режим «DUAL»). Определите какой из сигналов снимается с диода, а какой с магазина сопротивлений. Обратите внимание, что сигнал с магазина сопротивлений не имеет заметных искажений на фронтах, в то время как сигнал с диода демонстрирует сглаживание фронтов импульса, типичное для RC-цепочки.
- Подберите масштаб развёртки и усиления так, чтобы можно было определить характерную постоянную времени τ процесса зарядки или разрядки конденсатора. Измерив постоянную времени по измеренному ранее сопротивлению диода, определите ёмкость р-п перехода $C_d = \frac{\tau}{R_d}$.