

## ИЗМЕРЕНИЕ ПРЯМЫХ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫПРЯМЛЯЮЩИХ КОНТАКТОВ

**Цель работы:** ознакомление с методами расчета и измерения прямых вольт-амперных характеристик выпрямляющих контактов (*p-n*-переходы, контакт металл-полупроводник).

**Приборы и принадлежности:** полупроводниковые диоды (*p-n*-переходы), вольтметр В7-26, миллиамперметр типа Ц 4311, магазин сопротивлений типа Р 33, источник питания постоянного тока УНИП – 5.

### ПРЯМЫЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТОВ

Вольт-амперной характеристикой контакта (ВАХ) называется зависимость тока  $I$ , текущего через контакт, от напряжения  $U$ , приложенного к контакту. Эта зависимость для идеального контакта описывается выражением:

$$I = I_0 \left[ \exp \left( \frac{eU}{kT} \right) - 1 \right], \quad (1)$$

где  $I_0$  – ток термоэлектронной эмиссии при  $U = 0$ ,  $e$  – элементарный заряд,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура. При этом предполагается чисто термоэлектронный механизм переноса электронов через потенциальный барьер.

График этой зависимости представлен на рис. 1, а.

Условно различают прямое и обратное направление тока и напряжение на контакте. Они соответствуют положительному и отрицательному знакам напряжения  $U$  в формуле (1). Вид прямой и обратной ветви ВАХ существенно различаются.

Обычно измерения проводят при таких напряжениях, когда  $U \gg kT/e$ . Например, при  $T \approx 300$  К,  $kT/e \approx 0,025$  В. Тогда при положительной полярности ток через контакт экспоненциально растет с увеличением напряжения и

$\exp(eU/kT) \gg 1$ . Поэтому в выражении (1) можно пренебречь единицей в квадратных скобках и прямую ветвь ВАХ записать в виде:

$$I \approx I_0 \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) \quad (2)$$

Это выражение для прямой ВАХ является «классическим» и очень удобно для расчетов и анализов вследствие своей простоты. С ним обычно сравнивают экспериментально измеренные зависимости. Для упрощения анализа измеренные ВАХ строят в полулогарифмических координатах, где они имеют вид прямых (рис. 1, б). Из полученных графиков легко определяется такой важный параметр контакта как  $I_0$  и проверяется справедливость формулы (2). Если в измеряемом контакте действительно преобладает механизм термоэлектронной эмиссии и контакт близок к идеальному, то наклон прямой на графике  $\ln I(U)$  будет равен

$$\frac{d \ln I}{dU} = \frac{e}{kT} \approx 40 \text{ В}^{-1} \quad (3)$$

При других механизмах переноса электронов через обедненную область контакта прямые ВАХ отклоняются от идеальной зависимости, описываемые выражением (2) и наклон прямой в полулогарифмических координатах меняется. При туннельном механизме прямая идет круче, и наклон зависит от приложенного напряжения. Таким образом, экспериментальные измерения прямых ВАХ контактов позволяют судить о механизме переноса электронов и определить «нулевой ток»  $I_0$ .

Если преобладает термоэлектронный механизм переноса электронов, то из измеренной величины тока  $I_0$  для контактов металл-полупроводник можно рассчитать высоту  $\Phi_B$  потенциального барьера для электронов на контакте (т.е. контактную разность потенциалов  $U_0 = e\Phi_B$ ). Они связаны следующим соотношением:

$$I_0 = A * T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_B}{kT}\right), \quad (4)$$

где  $A^*$  – эффективная постоянная Ричардсона ( $A^* = 8,2 \text{ A} \times \text{K}^{-2} \times \text{cm}^{-2}$  для GaAs и Si), остальные обозначения те же, что и выше. Тогда

$$\Phi_B = \frac{kT}{e} (\ln(A^* \cdot T^2) - \ln I_0) . \quad (5)$$

Как было указано в уравнении (2) прямая ветвь ВАХ описывается экспоненциальной зависимостью. Это следует из того, что вероятность преодоления потенциального барьера описывается экспонентой вида  $W \sim \exp(-\Delta E / kT)$ , где  $\Delta E$  — высота потенциального барьера. Поскольку при прямом смещении  $\Delta E$  уменьшается, то вероятность преодоления барьера экспоненциально возрастает, что и приводит к такой зависимости.

## МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПРЯМЫХ ВАХ КОНТАКТОВ

Существуют несколько методов измерения прямых вольт-амперных характеристик контактов, которые различаются точностью, удобством, способом записи, степенью автоматизации и т.д.

### **1. Метод измерения ВАХ контактов по точкам на постоянном токе.**

Данный метод является одним из наиболее простейших. Схема этого метода приведена на рис. 2, а. Измерения проводятся по методу амперметра и вольтметра. Измерительная установка включает в себя высокостабилизированный источник постоянного напряжения, магазины сопротивлений для регулировки тока через контакт, измеритель тока, измеритель напряжения и вспомогательные приспособления (держатель контактов и др.). В качестве измерителей тока могут использоваться зеркальные, стрелочные или цифровые амперметры, миллиамперметры, микроамперметры или мультиметры. Измерителями напряжения обычно служат стрелочные, цифровые вольтметры или высокоточные мосты постоянного тока. Этот способ измерения обеспечивает обычно достаточно высокую точность, но требует больших затрат ручного труда и времени, малопроизводителен.

### **2. Измерение ВАХ с использованием двухкоординатного самописца.**

Существенное сокращение времени измерения, и уменьшение ручного труда достигается при автоматизации процесса измерения прямых ВАХ с последующей их записью на самописце или ввода данных в ЭВМ с последующей их автоматической обработкой. Общая схема несложной лабораторной установки для автоматической записи прямых ВАХ на двухкоординатном самописце представлена на рис. 2, б. Она также включает источник постоянного напряжения, автоматический регулятор тока через контакт (генератор линейно изменяющегося тока), схему измерения тока и напряжения, двухкоординатный самописец. Использование двухкоординатного самописца представляет большие удобства, поскольку позволяет сразу получать графики ВАХ в необходимых координатах (линейные и полулогарифмические) и в заданном масштабе на обыкновенном листе белой бумаги или миллиметровой. Этот метод имеет более низкую точность измерения и требует ручного труда при дальнейшей математической обработке результатов измерения.

### **3. Измерения ВАХ контактов на коротких импульсах тока.**

При измерениях на постоянном токе возможно заметное нагревание контактов при больших токах, что искажает результаты и не позволяет пропускать большие плотности тока. Чтобы устранить эти ограничения, проводят измерения ВАХ на коротких импульсах тока. Схема измерения по данному методу представлена на рис. 2, в. В качестве источника тока здесь используется генератор импульсов с заданной величиной и длительностью импульсов тока, а в качестве измерителей тока и напряжения используются импульсные вольтметры или осциллографы. Этот метод имеет низкую точность и применяется весьма редко, только в совершенно необходимых случаях.

### **4. Измерение ВАХ на переменном токе.**

Для экспрессного наблюдения ВАХ контактов применяется осциллографический метод с использованием специальных приспособлений (характериографов) или приставок. На исследуемый контакт подается переменное напряжение генератора или трансформатора переменного тока и переменные напряжения от контакта подаются через усилители постоянного тока на вертикальные и гори-

зонтальные пластины осциллографической трубки, вызывая многократные периодические отклонения луча, пропорциональные току (по вертикали) и напряжению (по горизонтали). В результате на экране осциллографа наблюдается ВАХ контакта в линейных или полулогарифмических координатах. Этот метод имеет низкую точность, но требует достаточно малое время для определения вида всей ВАХ контакта.

### **5. Метод автоматического измерения ВАХ контактов.**

Наибольшей точностью и производительностью при максимуме удобств в процессе измерения и обработки результатов имеет метод автоматического измерения ВАХ контактов с использованием ЭВМ. Установка включает источник изменяющегося тока через контакт (генератор тока), цифровые измерители тока и напряжения на контакте, интерфейс ввода данных в ЭВМ, саму ЭВМ, интерфейс вывода данных из ЭВМ, устройство вывода (самописец, перфолента, магнитофон, дисплей и др.), устройство управления процессором измерения по заданной программе. Этот метод наиболее сложен технически, требует большого количества сложного оборудования и эффективен лишь при больших объемах измерений и последующих вычислений.

## **ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ**

Для измерения прямых ВАХ выпрямляющих контактов используется лабораторная установка, собранная по схеме, изображенной на рис. 3. Постоянное напряжение от регулируемого источника питания типа УНИП – 5 (1) прикладывается к исследуемым контактам (5) через ограничительный магазин сопротивлений Р 33 (2). Для измерения токов в схеме используется стрелочный прибор типа Ц 4311 (3), который способен измерять токи начиная со значений в несколько микроампер, а для измерения напряжения на диоде – стрелочный вольтметр В7 – 26 (4) с высоким входным сопротивлением или мультиметр.

Данная установка позволяет проводить измерения ВАХ контактов на постоянном токе с достаточной точностью. Точность измерения определяется, во-

первых, точностью поддержания постоянного напряжения источником питания, во-вторых, точностью измерения тока и напряжения миллиамперметром и вольтметром, и в третьих, стабильностью характеристик самого измеряемого контакта.

В связи с этим для получения надежных и точных экспериментальных результатов необходимо использовать высокостабилизированный источник питания. Чтобы избежать колебаний тока за счет плохих контактов, все электрические соединения в установке должны быть выполнены тщательно.

В качестве измерителя тока можно применять миллиамперметр или микроамперметр любого типа, обеспечивающего необходимую точность измерений, например в интервале 0,1 – 0,5 %. Более высокая точность требуется при измерении напряжения на контакте. Дело в том, что в выпрямляющем контакте прямой ток экспоненциально зависит от приложенного напряжения (см. (2)). Незначительное изменение напряжения может привести к достаточно сильному изменению тока. Вследствие этого напряжение на контакте необходимо поддерживать и измерять со значительно более высокой точностью, чем ток.

### **ЗАДАНИЕ**

1. Ознакомиться с теорией переноса тока в выпрямляющих контактах.
2. Изучить электрическую схему для измерения прямых ВАХ контактов и порядок работы на ней.
3. Измерить прямые ВАХ контактов и определить их основные параметры.

### **ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.**

1. Собрать лабораторную установку согласно схеме, приведенной на рис. 3.
2. С помощью регулируемых декад магазина сопротивлений (2) установить значение сопротивления не менее 20 кОм.
3. Включить приборы и дать им прогреться в течении 5 – 10 минут.

4. Переключателем (7) включить в электрическую цепь один из диодов, например, диод (5).
5. Измерить прямую ВАХ характеристику контакта по точкам, изменяя каждый раз ток  $I$  через контакт и регистрируя соответствующее ему напряжение  $U$ . Изменение тока можно осуществлять изменением сопротивления на магазине (2) с помощью регулируемых декад, или если необходимо изменением напряжения на источнике питания (1). Токи через контакт задавать согласно приведенной ниже таблице исходных данных.
6. После измерения прямой ВАХ первого диода, переключателем (7) включить в электрическую цепь следующий диод, например, диод (6), и повторить измерения согласно пункту 5.

**Таблица исходных экспериментальных данных:**

$i$ , мкА	10	20	50	100	300	1000	2000	4000	7000	10000
$U$ , В										
$\Delta U$ , В										
$\lg i$										
$\Delta \lg i$										
$\beta$										
$\Phi_B$ , эВ										

7. Построить на миллиметровой бумаге графики измеренных ВАХ в линейных координатах  $i(U)$ , и в полулогарифмических координатах  $\lg i(U)$ . По последнему графику определить  $\lg i_0$ , путем экстраполяции прямой на ось токов.
8. Из полученных значений  $\lg i_0$  оценить величину потенциального барьера  $\Phi_B$  на контакте, используя следующую формулу:

$$\Phi_B = 2,3 kT (\lg A^* T^2 - \lg i_0).$$

При этом, если  $\Phi_B$  и  $kT$  измерять в электронвольтах, то  $k = 8,6 \times 10^{-5}$  эВ·К<sup>-1</sup>. Постоянная Ричардсона  $A^* = 8,2 \text{ А} \times \text{К}^{-2} \times \text{см}^{-2}$ . Для  $T = 300 \text{ К}$   $kT = 25,8 \times 10^{-3}$  эВ и  $\lg A^* T^2 = 5,868$ .

9. Вычислить параметр неидеальности  $\beta$  для всех измеренных токов по формуле:

$$\beta = 0,43 \frac{e}{kT} \frac{\Delta U}{\Delta \lg i}$$

Для  $T = 300 \text{ К}$   $e / kT = 38,64 \text{ Кл/Дж}$ .

10. Определить значение исправленной высоты потенциального барьера  $\Phi_B^*$  на исследуемом контакте с учетом его неидеальности. Для этого величину  $\Phi_B$  умножить на среднее значение параметра неидеальности  $\beta$ , т.е.

$$\Phi_B^* = \beta \Phi_B.$$

### Контрольные вопросы.

1. Записать и объяснить уравнение, описывающее ВАХ выпрямляющего контакта.
2. Что называется током насыщения контакта? Чем обусловлен этот ток?
3. Какие методы измерения прямых ВАХ вам известны?
4. Почему точность измерения напряжения должна быть выше, нежели точность измерения тока протекающего через контакт?
5. Опишите электрическую схему установки для измерения ВАХ контактов.
6. Изложите порядок выполнения измерений.
7. Какие основные параметры контакта необходимо измерить и рассчитать в данной работе?

### Литература

1. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. М., 1973.
2. Стриха В.И., Бузанева Е.В., Радзиевский И.А. Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки. М., 1974.



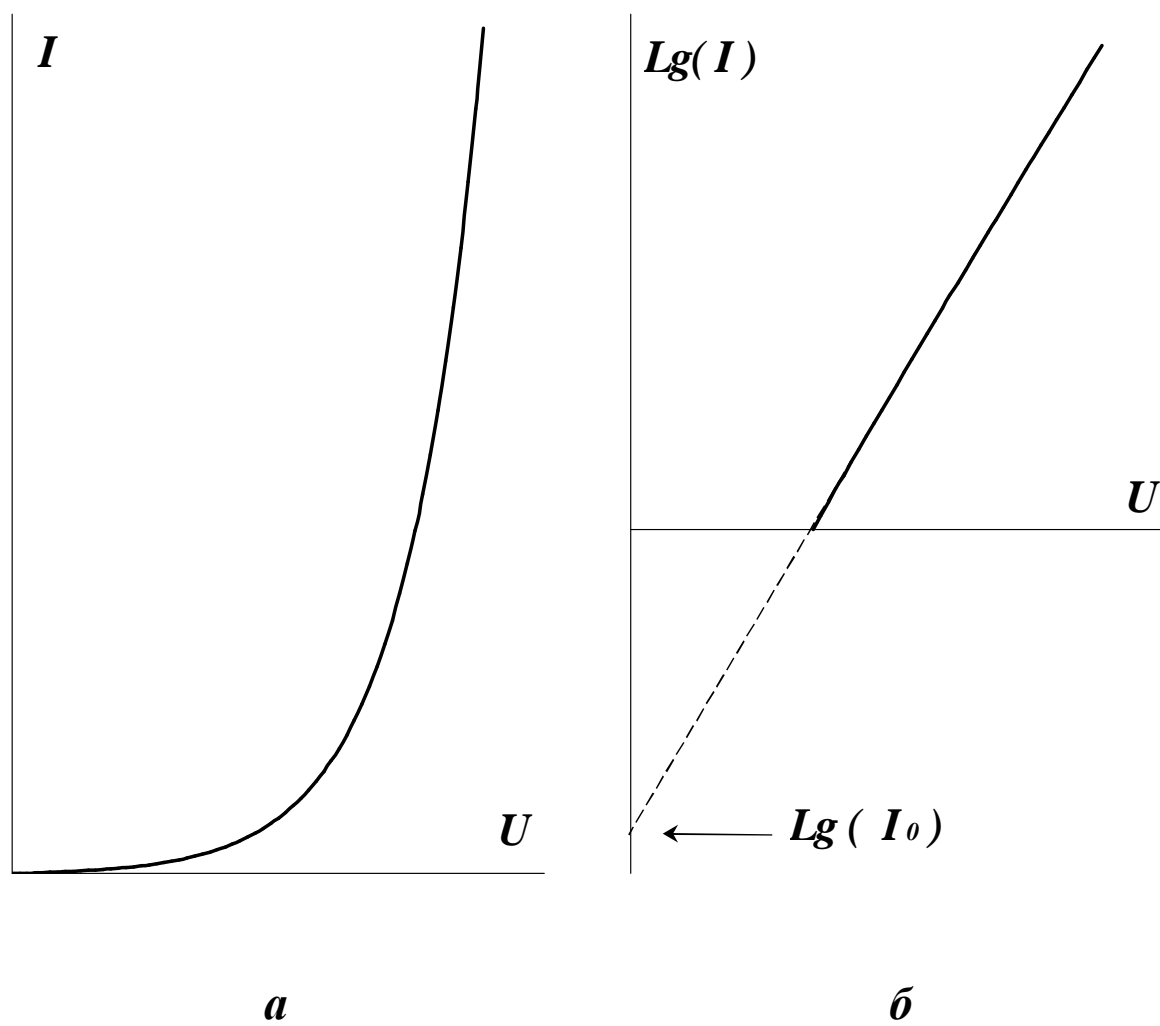


Рис. 1. Прямая вольт-амперная характеристика идеального выпрямляющего контакта, построенная в линейных (а) и полулогарифмических координатах (б).

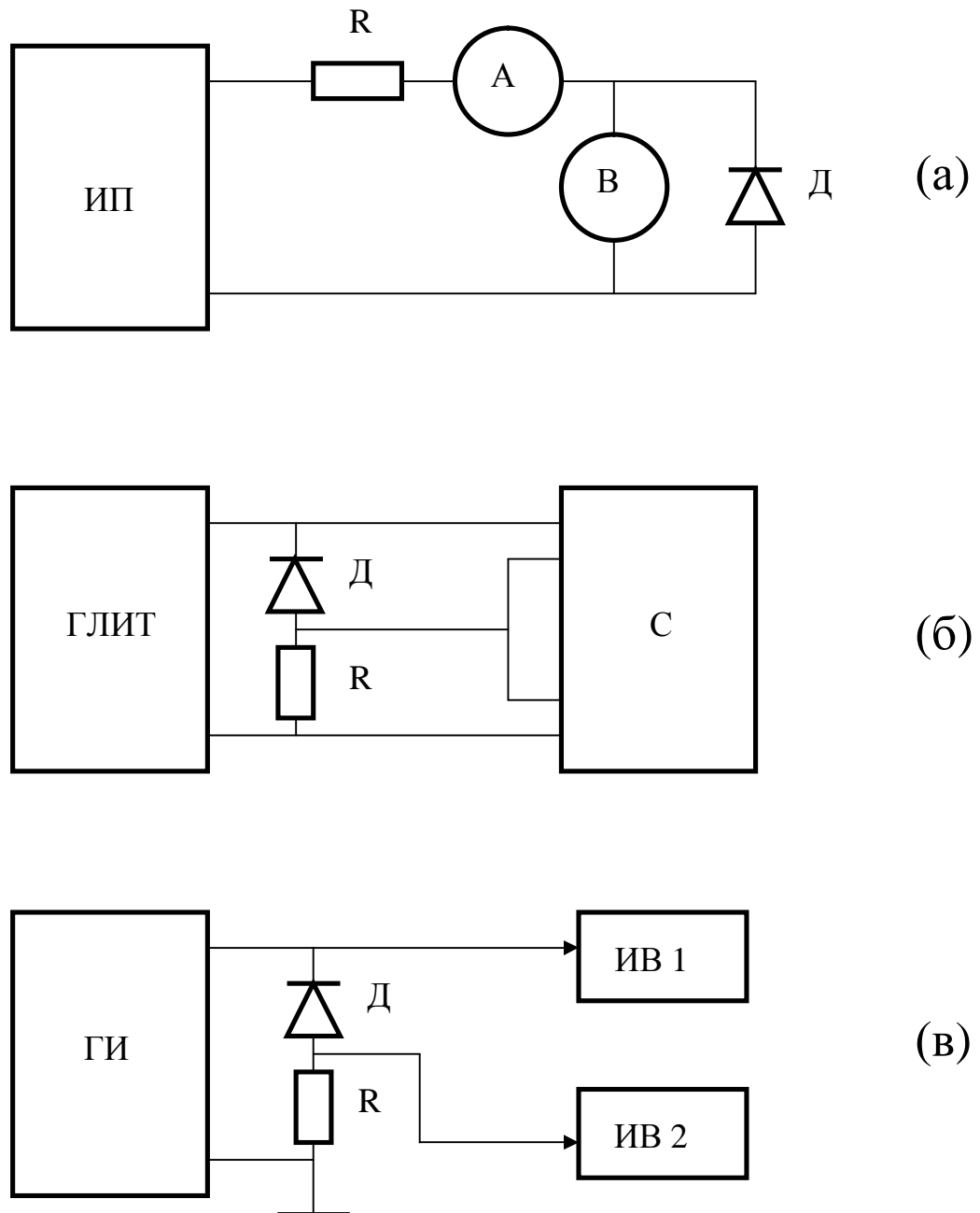


Рис. 2. Схемы методов измерения прямых ВАХ контактов.

(а) - по точкам на постоянном токе; (б) - на постоянном токе с автоматической записью на двухкоординатном самописце; (в) - по точкам, на коротких импульсах тока.

Д – исследуемый контакт; R – магазин сопротивлений; А – измеритель тока; В – измеритель напряжения; ИП – источник питания; ГЛИТ – генератор линейно изменяющегося тока; С – самописец; ГИ – генератор им-

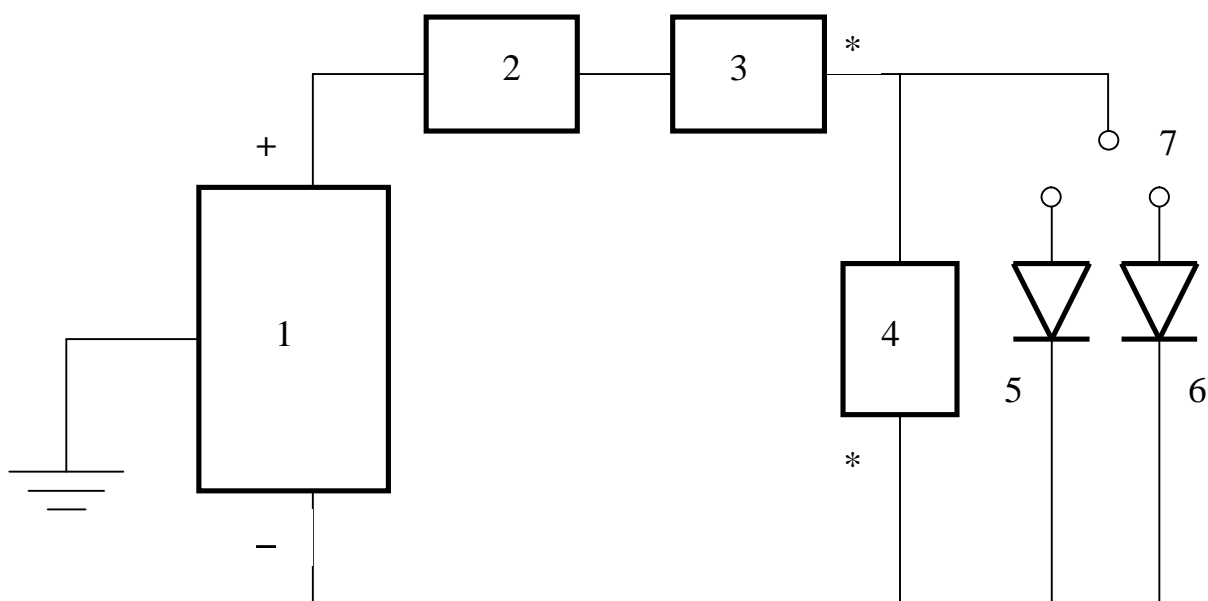


Рис. 3. Электрическая схема лабораторной установки для измерения прямых ВАХ выпрямляющих контактов.

1 – источник питания постоянного тока УНИП – 5; 2 – магазин сопротивлений Р 33; 3 – миллиамперметр типа Ц 4311; 4 – вольтметр В7 – 26; 5, 6 – полупроводниковые выпрямляющие контакты (р - п - переходы); 7 – переключатель.