

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)



# Изучение характернографа и методов визуального наблюдения и измерения статических характеристик полупроводниковых приборов

Работу выполнили:

Нечаева Дарья

Салтыкова Дарья

Ульянова Мария

Долгопрудный, 2024

**Цель работы:** ознакомиться с методами измерения статических характеристик полупроводниковых приборов и элементов ЭВМ с помощью характериографа. Измерить ВАХ полупроводниковых диодов Д814 и Д310.

## 1. Теоретическое введение

*Полупроводники* – это материалы, которые при комнатной температуре имеют удельную проводимость в интервале от  $10^{-10}$  до  $10^4 \cdot \text{см}^{-1}$ , зависящую в сильной степени от структуры вещества, вида и количества примеси и от внешних условий.

*Диод* – двухэлектродный электронный прибор, обладает различной проводимостью в зависимости от направления электрического тока. Электрод диода, подключённый к положительному полюсу источника тока, когда диод открыт (то есть имеет маленькое сопротивление), называют анодом, подключённый к отрицательному полюсу — катодом.

### 1.1. Механизмы электропроводности примесных полупроводников

Рассмотрим механизм электропроводности полупроводника с решеткой типа алмаза, в котором один из атомов замещен атомом элемента V группы, например мышьяка в решетке кремния. У атома As пять валентных электронов расположены в 4s- и 4p- состояниях. В решетке кремния четыре валентных электрона атома мышьяка вместе с четырьмя электронами ближайших атомов кремния участвуют в образовании ковалентной связи (рис. 1, а). При низких температурах пятый электрон локализован около атома мышьяка, но при повышенных – может быть отщеплен от примеси и будет свободно передвигаться по кристаллу.

Наряду с ионизацией примеси может происходить и ионизация атомов основного вещества. Но в области температур ниже той, при которой имеет место значительная собственная электропроводность, количество электронов, оторванных от примеси, будет значительно больше количества электронов и дырок, образовавшихся в результате разрыва ковалентных связей. В силу этого доминирующую роль в проводимости полупроводника будут играть электроны, будем называть *основными носителями заряда*, а дырки – *неосновными носителями заряда*. Такой полупроводник называют *электронным или n-типа*, а примесь, дающую электроны, *донорной или примесью n-типа*.

Примеси же, захватывающие электроны, называют *акцепторными*. Для образования свободной дырки за счет перехода электрона от атома кремния к атому акцепторной примеси требуется значительно меньше энергии, чем для разрыва ковалентной связи кремния. В силу этого количество дырок значительно больше количества свободных электронов и поэтому в таком полупроводнике *основными носителями заряда будут дырки*. Полупроводник с акцепторной примесью носит название *дырочного или p-типа*.

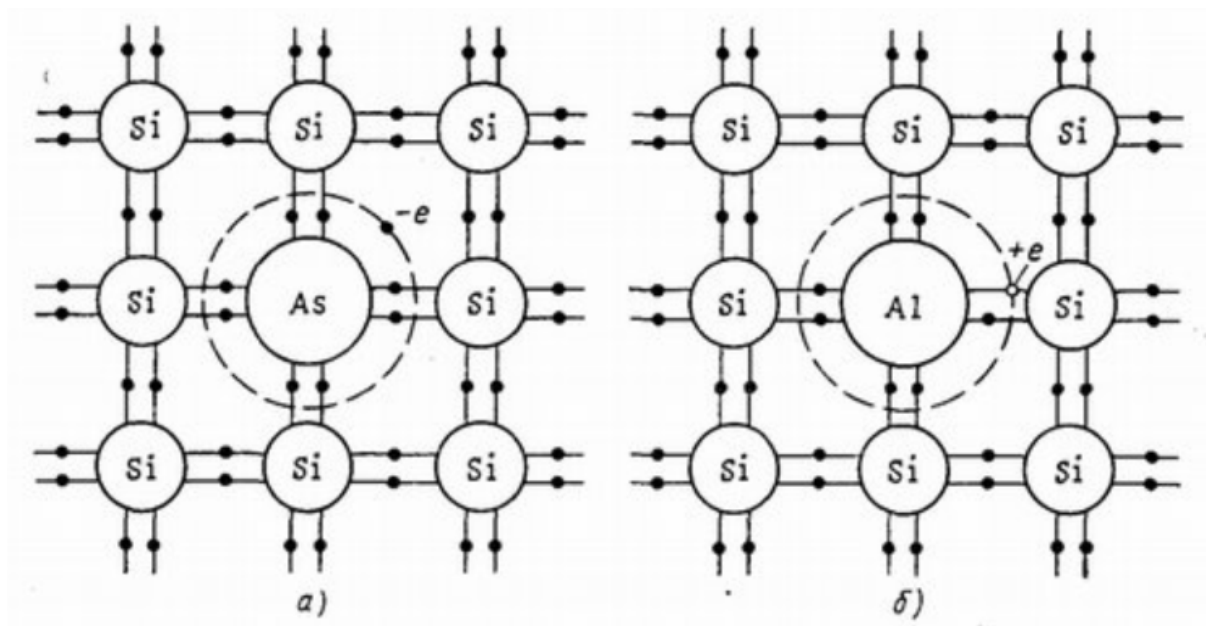


Рис. 1. Двумерное представление расположения связей в решетке донорного (а) и акцепторного (б) полупроводников

Наличие примеси в кристалле полупроводника будет характеризоваться появлением локальных уровней, лежащих в запрещенной зоне. Так при ионизации атома мышьяка образуется свободный электрон и для его возникновения требуется меньшая энергия чем для разрыва ковалентной связи кремния, энергетический уровень донорной примеси  $E_d$  должен располагаться в запрещенной зоне близко к краю зоны проводимости. Акцепторная примесь имеет в запрещенной зоне уровень  $E_a$ , расположенный на небольшом расстоянии над потолком валентной зоны.

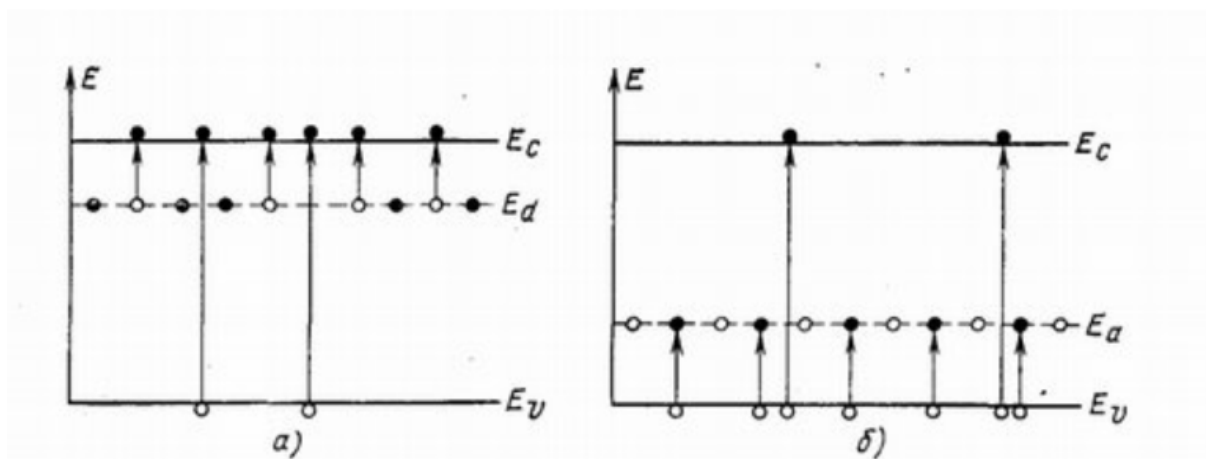


Рис. 2. Энергетическая диаграмма донорного (а) и акцепторного (б) полупроводников

## 1.2. Теория электропроводности полупроводников

Суммарная собственная проводимость полупроводников может быть выражена через концентрации и подвижность электронов и дырок:

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p) \quad (1)$$

Проводимость примесных полупроводников, естественно тоже зависит от произведения подвижности носителей на их концентрацию. Концентрация в данной случае складывается из концентрации собственных носителей и концентрации примесных носителей, однако при обычных температурах, в силу очень малой величины энергии донорных и акцепторных уровней, все определяется примесной проводимостью и лишь в области высоких температур, когда истощаются примесные уровни, в игру вступает собственная проводимость.

### 1.3. $p - n$ переход

Для создания контакта электронного и дырочного полупроводников в образец вводятся как донорная, так и акцепторная примеси. При этом концентрации доноров и акцепторов меняются так, что в одной части образец содержит доноры и обладает электронной электропроводностью, а в другой части содержит акцепторы и обладает дырочной электропроводностью, а следовательно, в некоторой области кристалла происходит смена электропроводности с электронной на дырочную. *Такой переход между материалами с электропроводностью  $n$ - и  $p$ - типа носит название  $p - n$  перехода.*

Приконтактный слой полупроводника с пониженной удельной проводимостью (обогащенный неосновными носителями заряда) называют *запорным*.

### 1.4. Выпрямление тока в $p - n$ переходе

Рассмотрим  $p - n$  переход, к которому приложена разность потенциалов  $U$  такая, что  $p$ -область заряжается положительно (прямое смещение). Сопротивление слоя объемного заряда перехода высокое, поэтому падение напряжения будет в основном в этой области. Поэтому при прямом смещении высота потенциального барьера понижается на  $eU$  по сравнению с равновесным состоянием, соответственно изменится и толщина запорного слоя. Понижение потенциального барьера приведет к увеличению потока основных носителей заряда. В результате этого во внешней цепи будет протекать "прямой" ток.

В  $n$ -области появившиеся избыточные носители заряда – дырки  $\Delta p$  создадут вблизи контакта объемный положительный заряд. Однако через очень короткое время этот заряд будет скомпенсирован объемным зарядом основных носителей заряда – электронов, которые под действием электрического поля, созданного избыточными дырками, будут подтянуты в количестве  $\Delta n$  из  $n$ -области (а туда из внешней цепи).

Таким образом, во всех частях электронного полупроводника будет соблюдаться электронейтральность, но в приконтактной области к  $p - n$  переходу концентрация электронов и дырок будет повышена на  $\Delta n = \Delta p$  по сравнению с равновесным состоянием. Такое введение в полупроводник носителей заряда с помощью  $p - n$  перехода при подаче на него прямого смещения в область, где эти носители заряда являются неосновными, называют *инжекцией*.

Аналогичные явления происходят и в  $p$ -области: сюда из  $n$ -области инжектируются электроны. Концентрация избыточных дырок и электронов в  $n$ - и  $p$ - областях:

$$\Delta p = p_n(eU/kT - 1)$$

$$\Delta n = n_p(eU/kT - 1)$$

*Т.е. с увеличением прямого смещения на  $p - n$  переходе концентрация инжектируемых неосновных носителей заряда резко возрастает, что приводит к сильному росту тока через контакт в прямом направлении.*

Если к  $p - n$  переходу приложено обратное смещение,  $p$ -область заряжена отрицательно, потенциальный барьер увеличивается на величину  $eU$  и увеличивается толщина запирающего слоя объемного заряда. Меньшее количество основных носителей заряда способно преодолеть потенциальный барьер, а значит количество неосновных носителей заряда в приконтактной области уменьшается по сравнению с равновесным состоянием. Вследствие соблюдения электронейтральности уменьшается и количество основных носителей (*экстракция носителей заряда*).

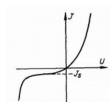


Рис. 3. ВАХ  $p - n$  перехода

*Таким образом, при обратном смещении  $p - n$  перехода ток основных носителей заряда будет меньше, чем при равновесном состоянии, а ток неосновных носителей практически не изменится. Суммарный ток будет направлен от  $n$ -области к  $p$ -области и с увеличением обратного напряжения вначале будет незначительно расти, а затем стремиться к некоторой величине, называемой током насыщения.*

## 1.5. Типы пробоя

Существует три вида пробоя:

- 1) туннельный пробой (эффект Зенера);
- 2) лавинный пробой;
- 3) тепловой пробой;

Туннельный пробой можно заметить, когда напряженность электрического поля принимает такие значения, что может происходить туннельный переход из валентной зоны полупроводника с электропроводностью одного типа в зону полупроводника с электропроводностью другого типа. Можно наблюдать при напряжениях ниже 6 В.

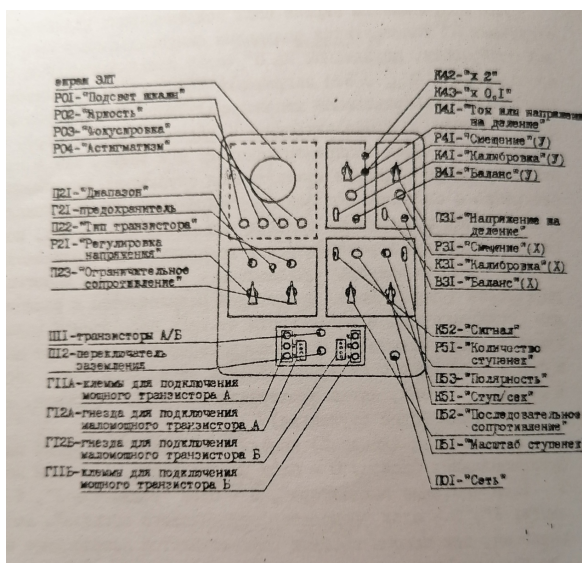
Лавинный пробой происходит из-за образования носителей заряда ввиду ударной ионизации атомов полупроводника. Если напряженность электрического поля достаточно велика, то электроны начинают иметь энергию, достаточную для того, чтобы выбивать другие электроны из атомов кристаллической решетки. Из-за этого процесса происходит быстрое нарастание обратного тока.

Тепловой пробой обусловлен нагревом перехода. За счет тепловой энергии происходит генерация пар электрон – дырка. Благодаря этому происходит увеличение обратного тока и дальнейшее увеличение температуры. Благодаря этому изменяется структура кристалла и он выводится из строя.

## 2. Экспериментальная установка



(а)



(б)

Рис. 4. (а) — характериограф, (б) — схема характериографа

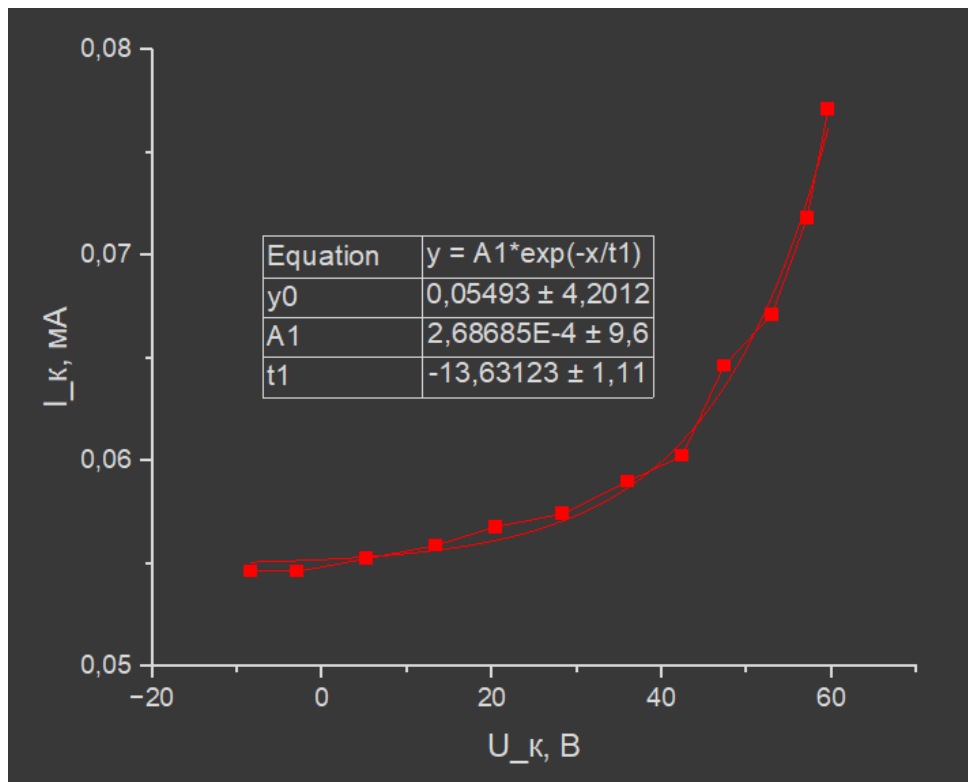
ПНХТ (прибор для наблюдения характеристик транзисторов) предназначен для визуального наблюдения и измерения статических характеристик полупроводниковых приборов. На передней панели ПНХТ можно выделить 6 функциональных блоков: 0 – блок визуализации, 1 – блок коммутации, 2 – блок "питание коллектора", 3 – блок "усилитель X", 4 – блок "усилитель Y", 5 – блок "генератор ступенчатого сигнала" (не используется в работе).

Для получения на экране ПНХТ вольтамперных характеристик исследуемых приборов, используются полуволны синусоидального напряжения требуемой полярности, подаваемые на полупроводниковый прибор через последовательный резистор с сопротивлением  $r$ . Это напряжение используется в качестве сигнала аргумента (развертывающее напряжение).

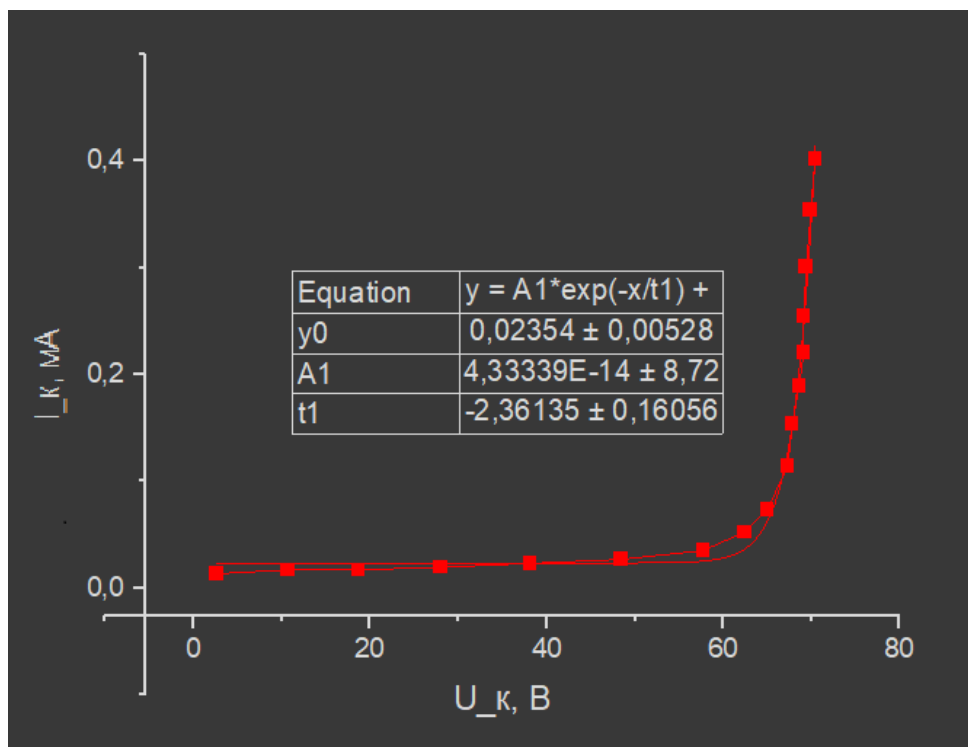
## 3. Выполнение работы

Снимем ВАХ диодов с помощью характериографа. По сути тот же осциллограф, картинка выводится электронно-лучевой пушкой на экран. Оцифруем наши ВАХи.

Прямые ветви диодов:

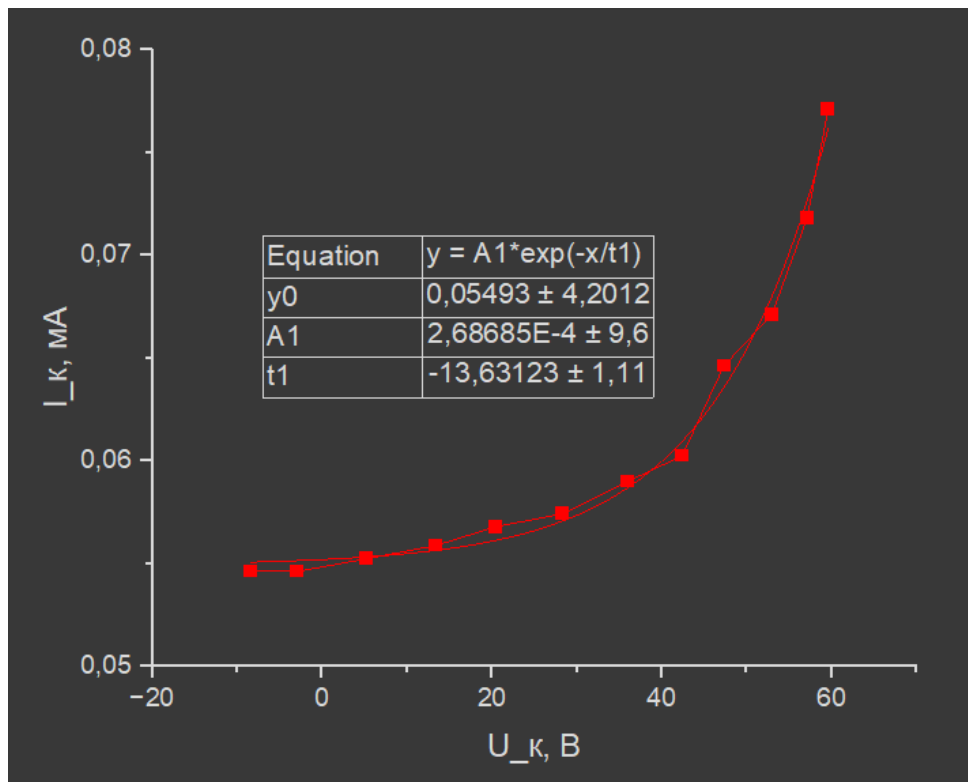


(a)

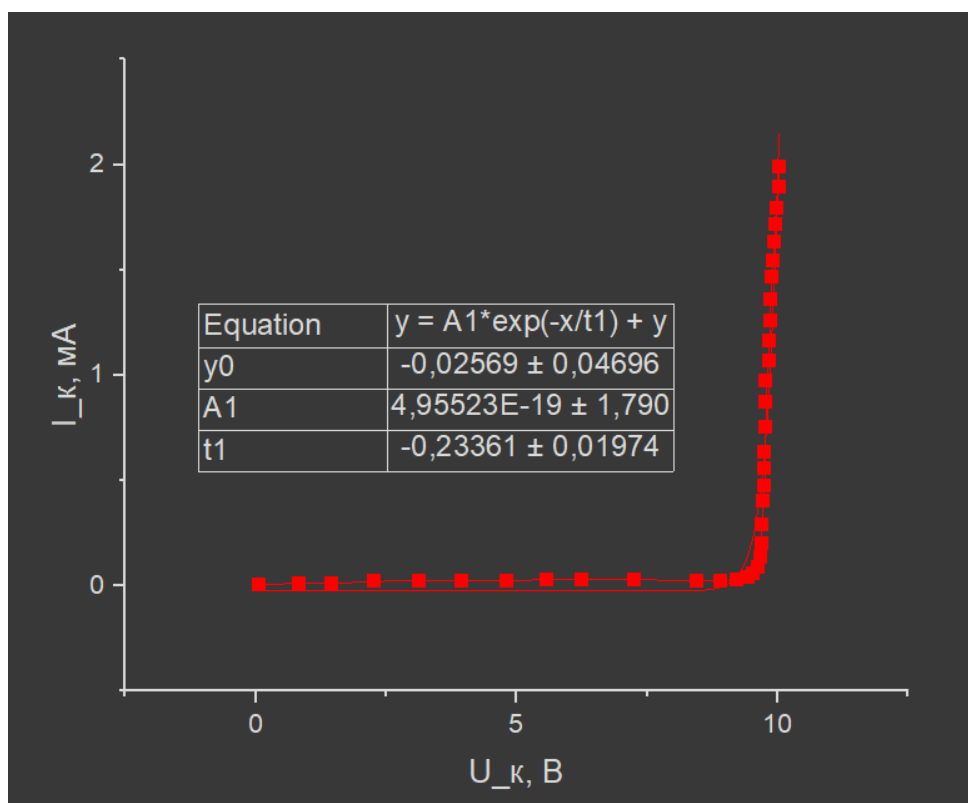


(б)

Рис. 5. ВАХ ч диода. (а) — начальный участок прямой ветви, (б) — прямая ветвь



(а)

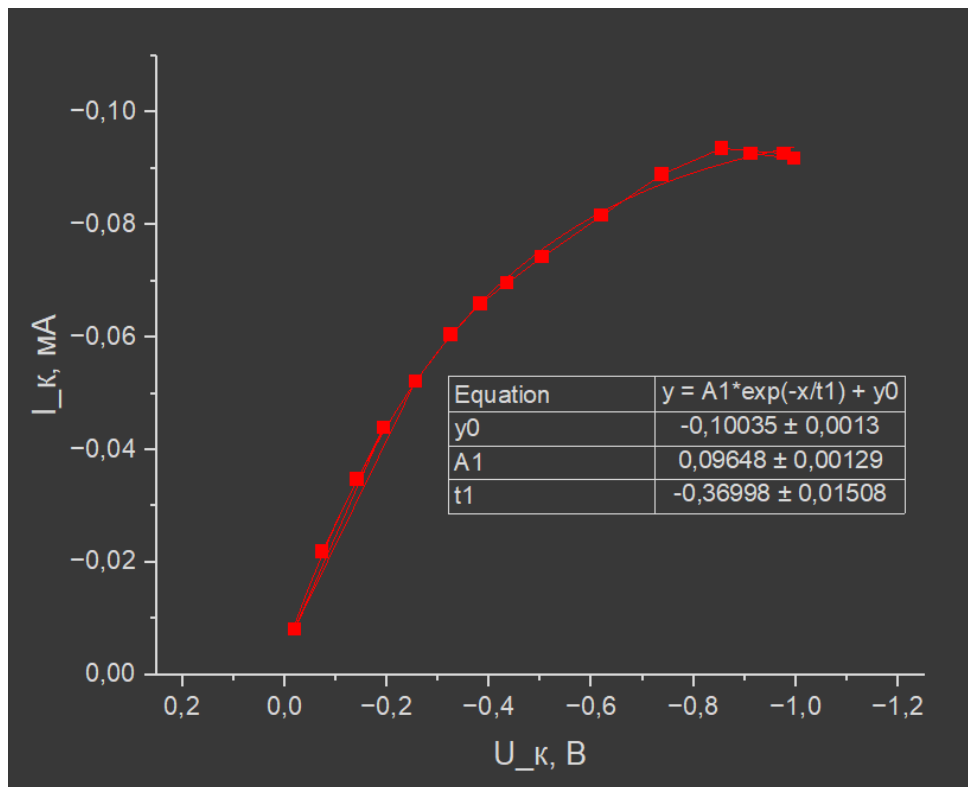


(б)

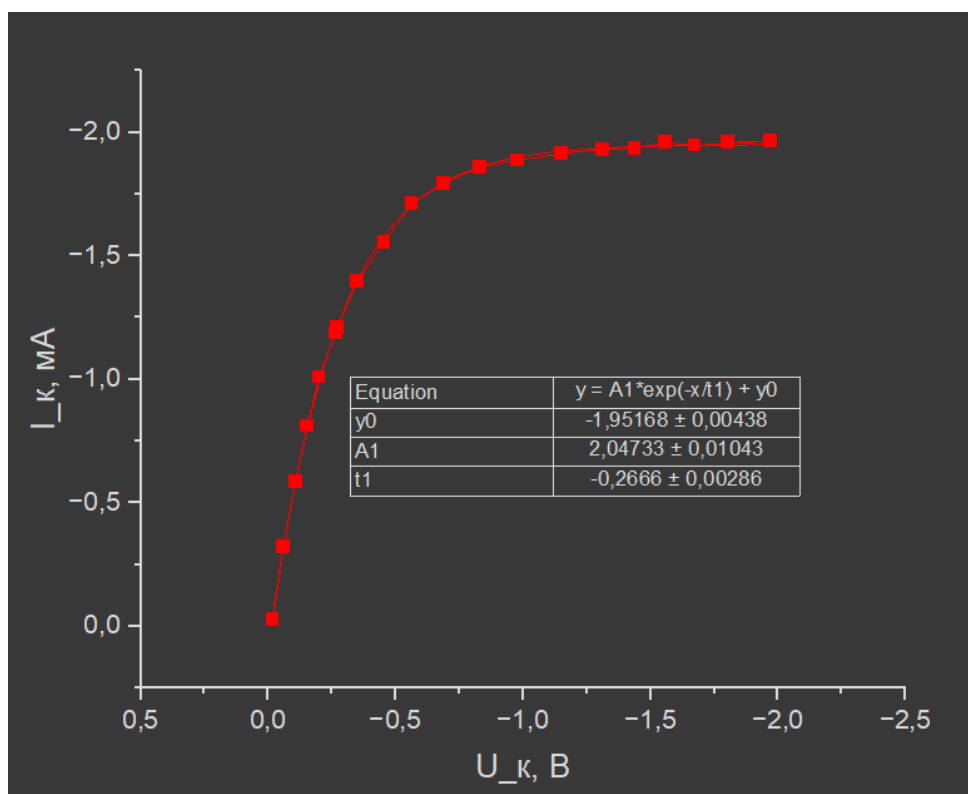
Рис. 6. ВАХ с диода. (а) — начальный участок прямой ветви, (б) — прямая ветвь

Обратные ветви диодов:



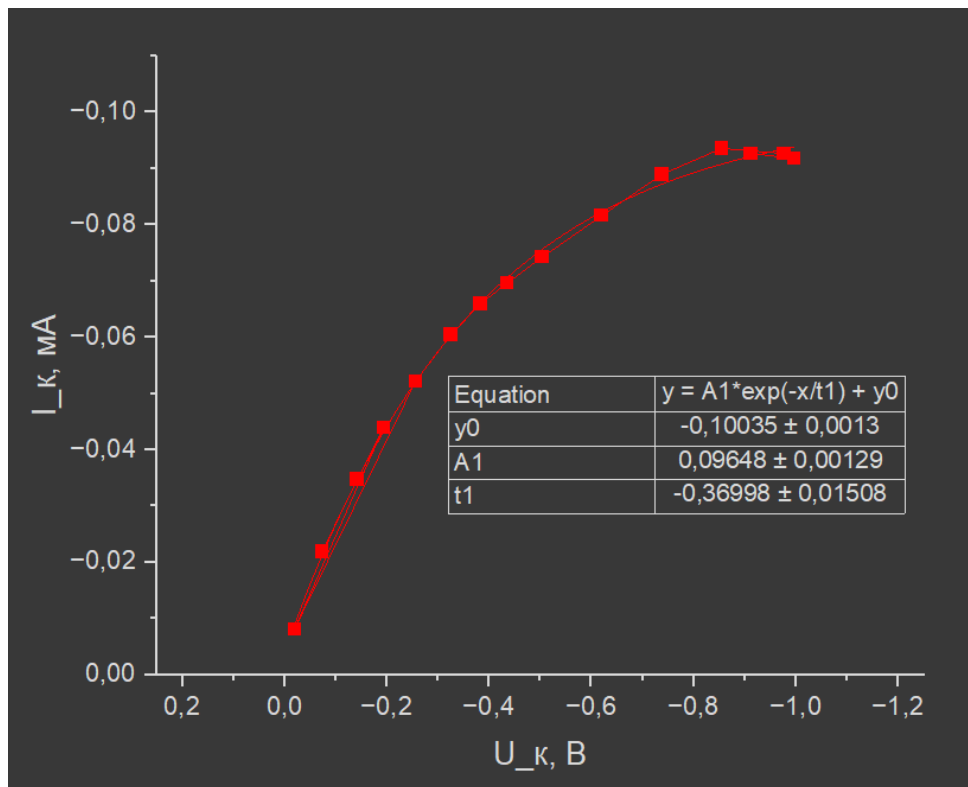


(a)

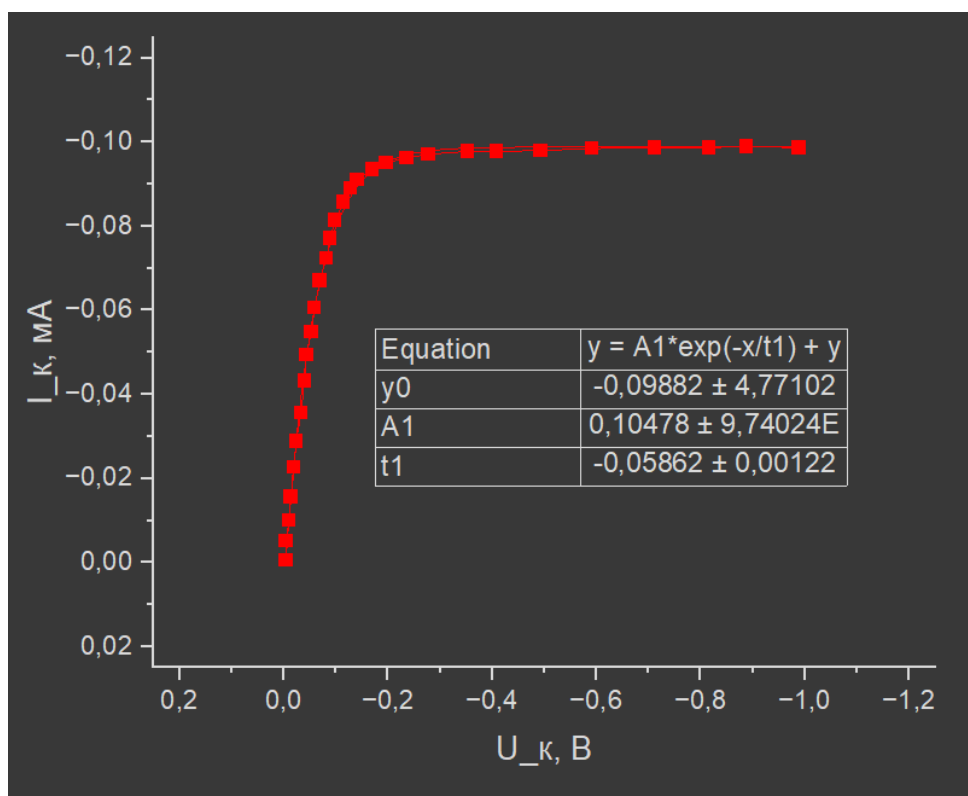


(б)

Рис. 7. ВАХ ч диода. (а) — начальный участок обратной ветви, (б) — обратная ветвь



(a)



(б)

Рис. 8. ВАХ с диода. (а) — начальный участок обратной ветви, (б) — обратная ветвь

Анализируя графики аппроксимируем их нашей аналитической зависимостью (12). Найденные параметры:

Германиевый диод, для малых напряжений:

$$I_{d0}^1 = (2.4 \pm 0, 2) \quad (2)$$

$$\theta^1 = (1.31 \pm 0, 02) \quad (3)$$

Германиевый диод, для больших напряжений:

$$I_{d0}^1 = (34 \pm 4) \quad (4)$$

$$\theta^1 = (1.6 \pm 0, 04) \quad (5)$$

Кремниевый диод, для малых напряжений:

$$I_{d0}^2 = (3 \pm 2) \quad (6)$$

$$\theta^2 = (1.90 \pm 0, 09) \quad (7)$$

Кремниевый диод, для больших напряжений:

$$I_{d0}^2 = (1, 3 \pm 1, 0) \quad (8)$$

$$\theta^2 = (1.76 \pm 0, 09) \quad (9)$$

Рассчитав токи насыщения  $I_{d0}$  по формуле (10), построим зависимость тока насыщения от тока через диод.

$$I = I_{d0} \left( \exp \frac{V}{\varphi_T} - 1 \right) \quad (10)$$

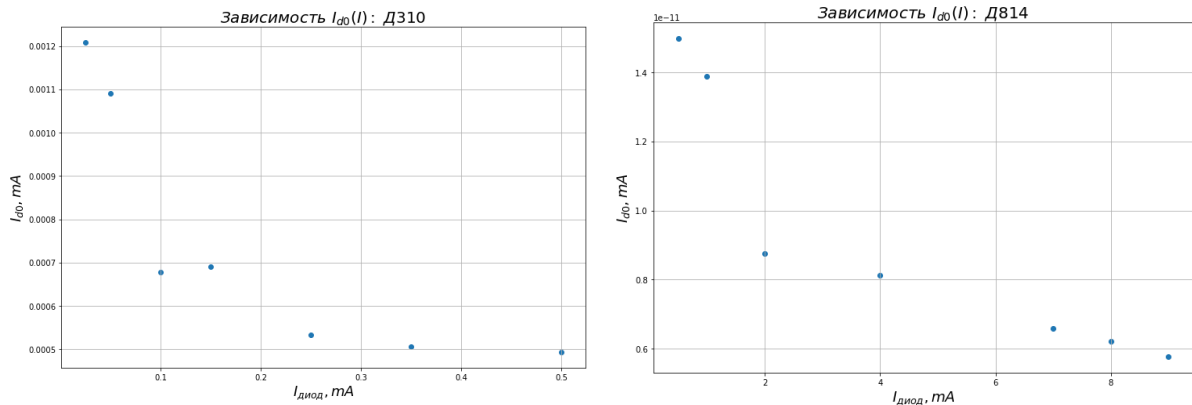


Рис. 9. Зависимость  $I_{d0}(I)$

## 4. Вывод

В ходе работы были измерены вольт-амперные характеристики полупроводниковых диодов Д814 (кремниевый) и Д310 (германиевый) с помощью характериографа. По графикам были определены токи насыщения и параметры неидеальности в каждом из диодов

Также были построены зависимости токов насыщения от токов через диод.

Найденные параметры:

Германиевый диод, для малых напряжений:

$$I_{d0}^1 = (2.4 \pm 0, 2) \quad (11)$$

$$\theta^1 = (1.31 \pm 0, 02) \quad (12)$$

Германиевый диод, для больших напряжений:

$$I_{d0}^1 = (34 \pm 4) \quad (13)$$

$$\theta^1 = (1.6 \pm 0, 04) \quad (14)$$

Кремниевый диод, для малых напряжений:

$$I_{d0}^2 = (3 \pm 2) \quad (15)$$

$$\theta^2 = (1.90 \pm 0, 09) \quad (16)$$

Кремниевый диод, для больших напряжений:

$$I_{d0}^2 = (1, 3 \pm 1, 0) \quad (17)$$

$$\theta^2 = (1.76 \pm 0, 09) \quad (18)$$