

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ РЕЛАКСАЦИИ ФОТОПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКА

**Цель работы:** ознакомление с явлением фотопроводимости полупроводников, освоение экспериментального метода определения эффективного времени жизни носителей заряда по релаксационным кривым фототока.

**Приборы и принадлежности:** источник света (лампа накаливания), набор светофильтров, объективы, регулируемый источник переменного тока типа ЛАТР, источник питания постоянного тока Б5 – 50 или Б5 – 49, электродвигатель с дисковым прерывателем света, осциллограф типа С1 – 73, образцы полупроводниковых кристаллов (CdS, CdSe).

## Фотопроводимость

В полупроводниках, в отличие от других веществ, под влиянием внешних воздействий концентрации свободных электронов и дырок могут изменяться на несколько порядков. Это приводит к ряду специфических явлений, которые лежат в основе действия многих полупроводниковых приборов.

При освещении полупроводника светом из спектральной области высокого поглощения полупроводника наблюдается генерация избыточных носителей заряда вблизи поверхности вещества. Избыточные электроны  $\Delta n$  и дырки  $\Delta p$ , созданные оптической генерацией, могут иметь энергии значительно большие, чем средняя энергия равновесных носителей заряда. Однако в результате взаимодействия с фононами и дефектами кристаллической решетки энергия избыточных (неравновесных) носителей заряда за время около  $10^{-10} - 10^{-12}$  с приобретает такое же распределение по энергиям и квазиимпульсам, как и у равновесных носителей. Поэтому подвижность неравновесных носителей заряда не будет отличаться от подвижности равновесных но-

сителей. Следовательно, полная проводимость полупроводника, определяемая равновесными носителями заряда  $n_0$ ,  $p_0$  и фотоносителями  $\Delta n$ ,  $\Delta p$ , равна

$$\sigma = e [(n_0 + \Delta n)\mu_n + (p_0 + \Delta p)\mu_p], \quad (1)$$

где  $\mu_n$  и  $\mu_p$  – подвижности электронов и дырок, соответственно.

Так как темновая проводимость  $\sigma_T = \sigma_0 = e (n_0\mu_n + p_0\mu_p)$ , то фотопроводимость полупроводника, обусловленная непосредственным действием излучения, определяется как

$$\sigma_\Phi = \sigma - \sigma_0 = e (\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p). \quad (2)$$

При этом, концентрации избыточных носителей заряда  $\Delta n$  и  $\Delta p$  зависят от интенсивности и длины волны поглощаемого света.

Пусть на слой вещества толщиной  $dx$ , имеющего коэффициент поглощения  $\alpha$ , падает свет интенсивности  $I$ . Тогда количество световой энергии, поглощаемой в единицу времени в единице объема этого вещества

$$\frac{dI}{dx} = \alpha I \quad (3)$$

Следовательно, при поглощении квантов света с энергией  $h\nu$ , соответствующей области собственного поглощения полупроводника, в единице объема и в единицу времени образуются избыточные электроны и дырки в количестве

$$G = \frac{\alpha\beta I}{h\nu} \quad (4)$$

Коэффициент пропорциональности  $\beta$  называется квантовым выходом фотоионизации, который определяет число пар носителей заряда (или число носителей заряда при примесной фотопроводимости), образуемых одним поглощенным фотоном, если интенсивность света измерять числом квантов света падающих на единицу площади поверхности в секунду. Коэффициент  $\beta$  является одним из важнейших параметров, определяющих фотопроводимость полупроводника. Этот коэффициент может изменяться в зависимости от

спектральной области, где происходит измерение. Для примера на рис. 1 приведена спектральная характеристика квантового выхода для кристалла германия. Видно, что вплоть до  $2,7 \text{ эВ}$   $\beta = 1$ . При дальнейшем росте энергии фотона квантовый выход резко увеличивается. Это происходит потому, что поглощение фотона столь большой энергии сопровождается возникновением так называемых «горячих» носителей заряда, обладающих энергией, достаточной для образования вторичных электронно-дырочных пар путем ударной ионизации.

Характерной чертой оптической генерации носителей заряда в полупроводниках является то, что сразу после начала освещения фотопроводимость полупроводника не достигает максимального значения, так как по мере увеличения концентрации неравновесных носителей заряда нарастает и процесс рекомбинации. Поскольку скорость генерации  $G$  неравновесных носителей остается постоянной при неизменной интенсивности света, то через некоторый промежуток времени интенсивность рекомбинации достигнет интенсивности генерации и установится стационарное состояние, характеризующееся постоянным значением концентрации фотоносителей заряда  $\Delta n_{cm}$  и  $\Delta p_{cm}$  (рис. 2).

Стационарные концентрации избыточных носителей заряда  $\Delta n$  и  $\Delta p$  можно определить, если воспользоваться уравнением непрерывности, в котором генерационный член записан в виде (4). При этом предполагается однородная генерация. Поэтому

$$\Delta n_{cm} = G_n \tau_n = \frac{\beta \alpha I \tau_n}{h \nu}, \quad (5)$$

$$\Delta p_{cm} = G_p \tau_p = \frac{\beta \alpha I \tau_p}{h \nu}, \quad (6)$$

где  $\tau_n$ ,  $\tau_p$  – время жизни свободного электрона и дырки, соответственно.

С учетом (2) стационарная фотопроводимость равна

$$\sigma_{\Phi, cm} = e \beta \alpha (\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p) I / h \nu \quad (7)$$

Если один из членов в скобках соотношения (7) значительно больше другого (за счет разницы в значениях подвижности или времени жизни электронов и дырок), то фотопроводимость определяется носителями заряда одного знака и ее называют монополярной. В случае монополярного полупроводника  $n$ -типа

$$\sigma_{\phi,cm} = e\beta\alpha\mu_n\tau_n I / h\nu. \quad (8)$$

В общем случае выражение для стационарного значения плотности фототока будет иметь вид

$$j_{\phi} = \sigma_{\phi,cm} E = e\beta\alpha (\mu_n\tau_n + \mu_p\tau_p) I E / h\nu \quad (9)$$

Обозначим  $v_n = \mu_n E$ ,  $v_p = \mu_p E$ ,  $t_n = l/v_n$ ,  $t_p = l/v_p$ , где  $l$  – размер полупроводника в направлении поля,  $t_n$ ,  $t_p$  – время дрейфа электронов и дырок, соответственно. С учетом этого выражение (9) запишется в виде

$$j_{\phi} = e\beta\alpha (\tau_n/t_n + \tau_p/t_p) I l / h\nu, \quad (10)$$

где отношения  $\tau_n/t_n$  и  $\tau_p/t_p$  носят название коэффициентов усиления фототока.

### Релаксация фотопроводимости

Если бы кроме генерации носителей при освещении полупроводника в нем не протекал и процесс рекомбинации, то наблюдалось бы только возрастание фототока (рис. 2, кривая 1). Однако, экспериментально установлено, что изменения концентрации неравновесных носителей заряда со временем представляется кривой с экспоненциальным нарастанием и спадом (рис. 2, кривая 2). Поэтому изменения со временем проводимости облучаемого светом полупроводника будет иметь такой же вид.

Экспоненциальный характер изменения избыточной концентрации носителей обусловлен протеканием одновременно двух противоположных процессов - процесса генерации и обратного ему процесса исчезновения носите-

лей - рекомбинации. Очевидно, что интенсивность рекомбинации прямо связана с концентрацией неравновесных носителей: в начале освещения, пока мала концентрация неравновесных носителей, мала интенсивность рекомбинации; по мере увеличения концентрации неравновесных носителей заряда нарастает процесс рекомбинации. Поскольку скорость генерации неравновесных носителей остается постоянной при неизменной интенсивности света, то через какой-то промежуток времени интенсивность рекомбинации достигнет интенсивности генерации, и установится стационарное состояние, характеризующееся постоянным значением концентрации фотоносителей заряда  $\Delta n_{cm}$  и  $\Delta p_{cm}$  (рис. 2).

Пусть полупроводник освещается импульсом света прямоугольной формы, как это изображено на рис. 3, а. Стационарное значение фотопроводимости достигается не мгновенно, а лишь через некоторое время после начала освещения (рис. 5, б, кривая 1). При выключении света неравновесная проводимость исчезнет также через некоторое время после прекращения освещения (рис. 3, б, кривая 2). Кривые нарастания и спада неравновесной проводимости называются кривыми релаксации фотопроводимости. Рассмотрим монополярный полупроводник  $n$ -типа в случае малого уровня возбуждения ( $\Delta n \ll (n_0 + p_0)$ ).

Изменение концентрации избыточных носителей заряда в единицу времени есть разность между скоростями генерации и рекомбинации носителей заряда. Принимая во внимание (4) и учитывая, что скорость рекомбинации  $R = \Delta n / \tau$ , получим уравнение, описывающее изменение со временем концентрации неравновесных электронов

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = G - R = \frac{\beta \alpha I}{h \nu} - \frac{\Delta n}{\tau_n}. \quad (11)$$

Разделяя переменные и интегрируя с учетом начального условия  $\Delta n = 0$  при  $t = 0$ , найдем выражения, характеризующие изменения концентрации избыточных электронов во времени:

$$\Delta n = \beta \alpha \tau_n \frac{I}{h \nu} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right) = \Delta n_{cm} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right) \quad (12)$$

$$\Delta n = \beta \alpha \tau_n \frac{I}{h \nu} e^{-\frac{t}{\tau_n}} = \Delta n_{cm} e^{-\frac{t}{\tau_n}} \quad (13)$$

Выражения (12) и (13) характеризуют соответственно процессы нарастания и спада фототока. Из этих выражений следует, что релаксация фотопроводимости при малом уровне освещенности определяется экспоненциальным законом с постоянной времени, соответствующей времени жизни неравновесных электронов:

$$i = i_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right) \quad (\text{для процесса нарастания фототока}) \quad (14)$$

$$i = i_0 e^{-\frac{t}{\tau_n}} \quad (\text{для процесса спада фототока}) \quad (15)$$

где  $i$  – фототок, изменяющийся со временем  $t$ ,  $i_0$  – стационарное значение фототока,  $\tau_n$  - эффективное время жизни неравновесных электронов.

Если в полупроводнике имеются центры захвата (прилипания), то они оказывают влияние на кинетику фотопроводимости. Свободные электроны будут не только рекомбинировать с дырками, но будут также захватываться центрами прилипания (ловушками). Это приводит к уменьшению скорости нарастания стационарной концентрации носителей заряда. При выключении возбуждающего света опустошение ловушек будет затягивать временной спад концентрации носителей. В результате этого будет иметь место замедление процесса нарастания и спада фотопроводимости (рис.4).

При изучении процессов рекомбинации необходимо также учитывать то, что одновременно с рекомбинацией носителей в объеме полупроводника идет рекомбинация на поверхности. Рекомбинационные процессы в объеме характеризуются объемным временем жизни  $\tau_v$ , в то время как поверхностная рекомбинация характеризуется скоростью поверхностной рекомбинации  $S$ , которая определяет количество актов рекомбинации в единицу времени на

единице площади поверхности полупроводника. Эффективное время  $\tau_{эф}$  определяется объемным временем жизни  $\tau_v$  и скоростью поверхностной рекомбинации  $S$  следующим образом:

$$\frac{1}{\tau_{эф}} = \frac{1}{\tau_v} + \frac{2S}{d}, \quad (16)$$

где  $d$  – толщина образца.

При определенных условиях скорость рекомбинации на поверхности может намного превысить скорость рекомбинации в объеме исследуемого образца. В этом случае  $2S/d \gg 1/\tau_v$  и  $\tau_{эф}$  определяется лишь скоростью поверхностной рекомбинации  $S$ . Однако при большой толщине образца ( $2S/d \ll 1/\tau_v$ ) эффективное время жизни практически совпадает с объемным (поверхность не влияет на измеряемое время жизни), т.е.  $\tau_{эф} = \tau_v$ . Экспериментально установлено, что это имеет место, когда толщина образца в 2-3 раза превышает диффузионную длину. Таким образом, исследуя релаксацию неравновесной проводимости можно определить эффективное время жизни носителей заряда. Существует несколько методов определения времени жизни носителей. В данной работе это время будет определяться по релаксационному спаду фототока.

### Экспериментальная установка для измерения кинетики фотопроводимости

В данной работе предлагается измерить величину эффективного времени жизни носителей заряда в образцах полупроводниковых кристаллов с помощью кривых релаксации фототока.

В качестве образцов для измерений используются кристаллы монопольных полупроводников CdS и CdSe.

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 5. Излучение от источника света (2), пройдя через набор светофильтров (3), фокусируется объективами (4), (7) на образец, помещенный в держатель (8).

Модуляция светового потока осуществляется с помощью механического прерывателя (диска с вырезами) (6), который вращается электродвигателем (5). Фотопроводник включен последовательно с источником напряжения (9) и сопротивлением  $R_n = 10^6$  Ом (10). Вследствие изменения проводимости полупроводника в цепи возникает переменный ток, а на сопротивлении нагрузки  $R_n$  переменное напряжение, которое регистрируется осциллографом (11).

Фотопроводимость полупроводника возбуждается собственным светом, выделяемым светофильтрами (3) из сплошного спектра галогенной лампы накаливания (2), питаемой от источника напряжения (1). В случае кристаллов CdS используются светофильтры СС5 и СЗС24, в случае кристаллов CdSe – светофильтры ЗС8 и СЗС24.

## ЗАДАНИЕ

Определить эффективное время жизни носителей заряда по кривым релаксации фотопроводимости.

### Порядок выполнения работы

1. Включить в сеть источник питания электродвигателя (5).
2. Включить осциллограф (11) и подготовить его к работе.
3. Включить источник питания (1), предварительно подключив к нему лампу накаливания (2).
4. С помощью объективов (4), (5) сфокусировать световой пучок на исследуемый образец, помещенный в держатель (8). При этом необходимо до-



биться того, чтобы пучок света не попадал на токоподводящие электроды образца.

5. Подключить образец к источнику постоянного напряжения (9) и установить требуемое напряжение питания измерительной цепи (указывается преподавателем).
6. Плавно увеличивая напряжение питания электродвигателя прерывателя, установить длительность светового импульса в интервале 10 – 50 мс.
7. Вращая ручкой «Стабильность», расположенной на панели осциллографа (11), получить на его экране неподвижное изображение измеряемого сигнала.
8. Установить переключатель «V/дел» так, чтобы амплитуда сигнала занимала не менее половины измерительной шкалы экрана осциллографа.
9. Получить на экране осциллографа релаксационную кривую и зарисовать ее на кальку.
10. Построить зависимость  $\ln ( i / i_0 )$  от времени  $t$  и определить тангенс угла наклона ( $\text{tg } \varphi$ ) для участка спада. Оценить эффективное время жизни  $\tau_{\text{эф}}$ , используя связь между  $\text{tg } \varphi$  и  $\tau_{\text{эф}}$  на участке спада  $\tau_{\text{эф}} = 1 / \text{tg } \varphi$ .

### Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление фотопроводимости?
2. Какие характеристики полупроводника определяют его фотопроводимость?
3. Объясните зависимость квантового выхода фотоионизации от энергии фотонов.
4. С какими процессами связана релаксация фототока, какова роль в нем ловушек?
5. Что такое поверхностная рекомбинация? Какую роль она играет в фотопроводимости полупроводника?
6. Какие полупроводники называются монополярными?

7. Объясните методику определения эффективного времени жизни носителя заряда по релаксации фототока.

### Литература

1. Рывкин С.М. «Фотоэлектрические явления в полупроводниках». Физматгизд., 1963.
2. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Т., «Физика полупроводников». Издательство «Наука», 1997.
3. Шалимова К.В., «Физика полупроводников». Учебник для вузов. - 3-е изд., перераб. и доп. М., «Энергоатомиздат», 1985.
4. Фистуль В.И. «Введение в физику полупроводников». Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Полупроводники и диэлектрики» - 2-е изд., перераб. и доп. М., «Высшая школа», 1984.
5. Соболева И.А., Меламид А.Е. «Фотоэлектронные приборы». Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электронные приборы» М., «Высшая школа», 1974.

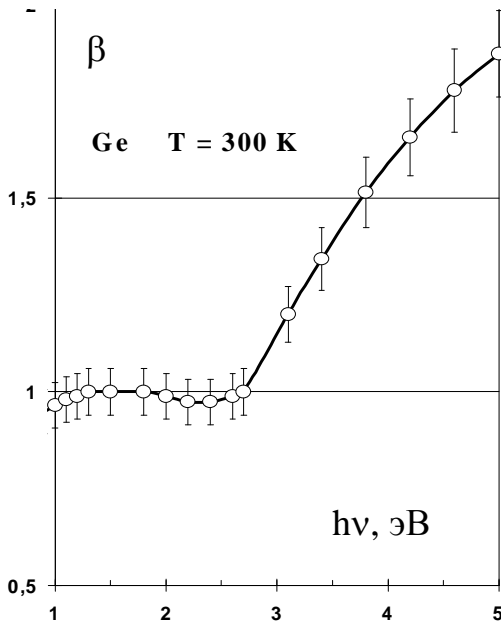


Рис.1. Зависимость квантового выхода  $\beta$  от энергии фотона в германии.

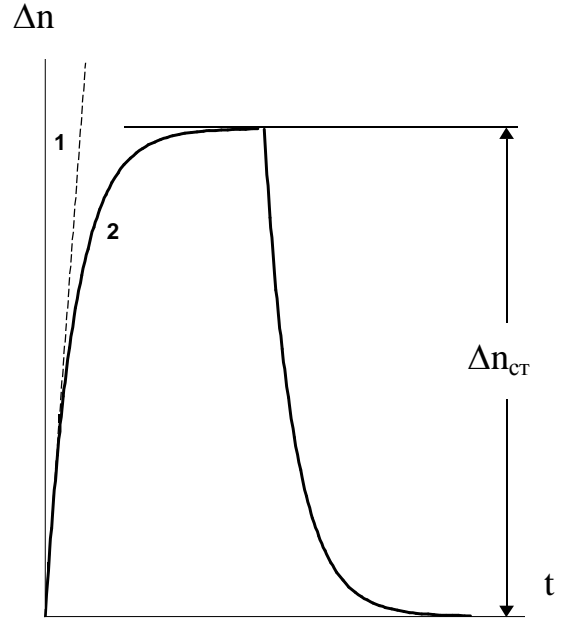


Рис.2. Изменение во времени концентрации носителей заряда, возбуждаемых светом.

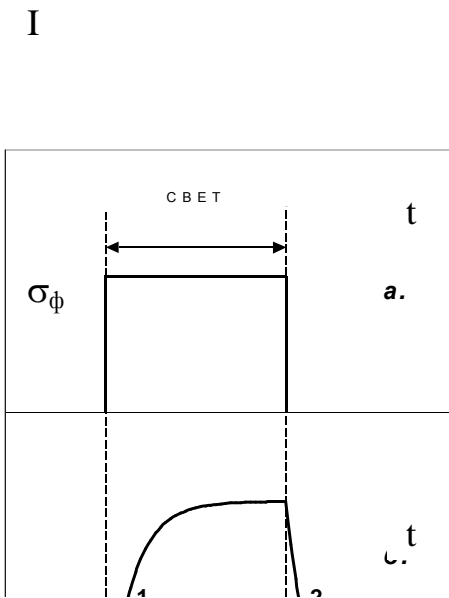


Рис.3. Релаксация фотопроводимости ( $\sigma$ ) при возбуждении ее импульсом света прямоугольной формы (а).

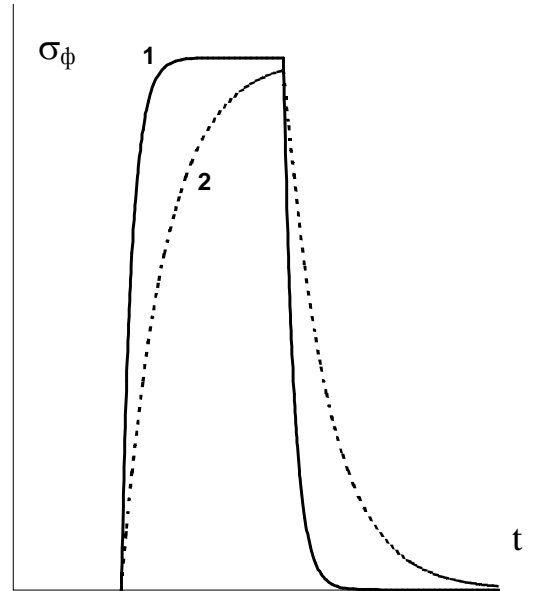


Рис.4. Кривые релаксации фотопроводимости при отсутствии (1) и при наличии (2) центров захвата.

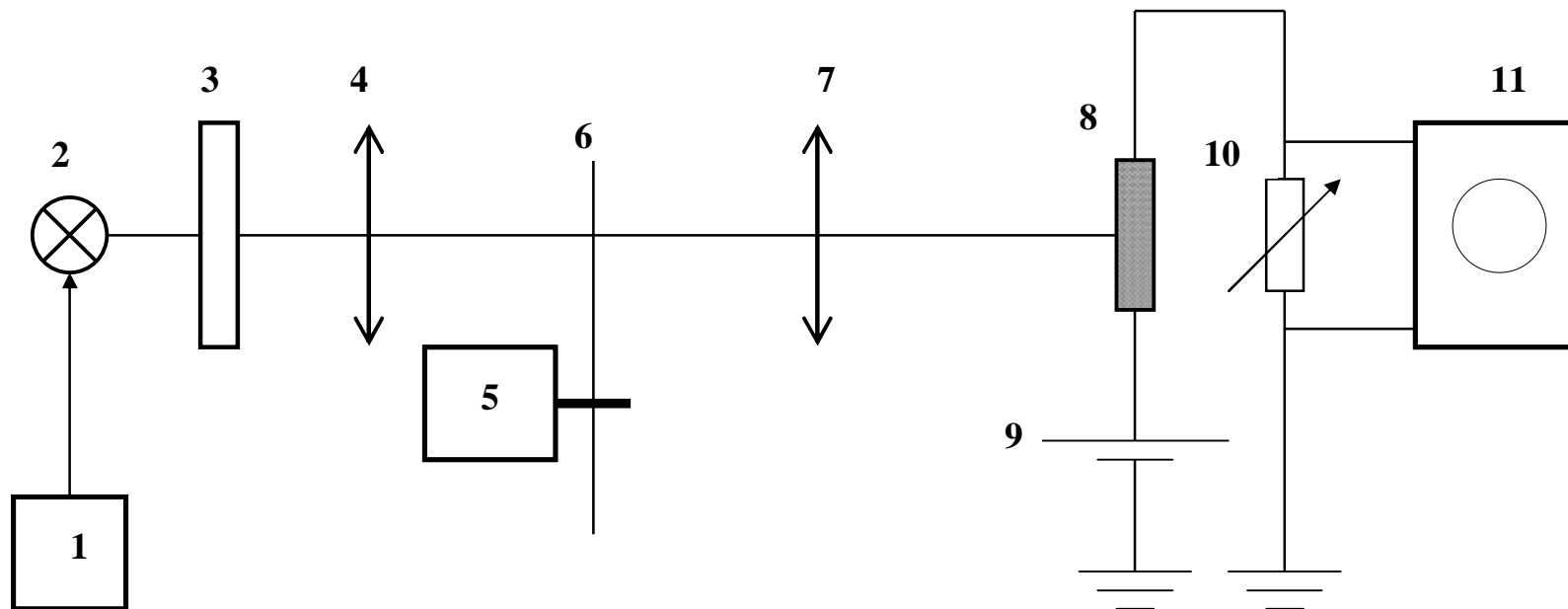


Рис.5. Блок-схема экспериментальной установки для измерения эффективного времени жизни носителей заряда по релаксационным кривым фотопроводимости.

- 1 – источник питания
- 2 – лампа накаливания
- 3 – светофильтры
- 4, 7 – объективы
- 5 – электродвигатель
- 6 – прерыватель ( диск с вырезами )
- 8 – держатель с образцом
- 9 – источник питания постоянного тока
- 10 – сопротивление нагрузки
- 11 – осциллограф