

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)

В.Ф. Агафонников

**Изучение переходные процессов в  
полупроводниковом диоде**

Руководство к лабораторной работе  
по курсу "Физика полупроводниковых структур"  
для студентов радиоконструкторского факультета

Томск 2012

## ИЗУЧЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ДИОДЕ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ИМПУЛЬСА ПРЯМОГО ТОКА

Если через р-п-переход пропускать ток в прямом направлении, то при этом в р-область перехода будут инжектироваться дырки. В результате инжекции в непосредственной близости к переходу создается избыточная концентрация неосновных носителей заряда, которая может во много раз превышать концентрацию равновесных неосновных носителей. Падение напряжения на р-п-переходе и концентрация избыточных неосновных носителей, накопленных в базе диода (для индий-германиевых переходов это п-полупроводник) имеет однозначную связь. Если начало координат поместить на границе между областью объемного заряда и п- областью, и ось X направить вдоль п-области, то для диода с полуограниченной базой можно записать

$$p|_{x=0} = p_n \exp\left(\frac{qV_{p-n}}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $p_n$  — равновесная концентрация дырок в базе;

$V_{p-n}$  — падение напряжения р-п-переходе.

Из (1) имеем

$$V_{p-n} = \frac{kT}{q} \ln \frac{p|_{x=0}}{p_n}, \quad (2)$$

В начальный момент пропускания тока через р-п-переход  $p|_{x=0}$ , будет увеличиваться, что приведет к постепенному нарастанию  $V_{p-n}$ . таким образом, при мгновенной подаче тока через р-п-переход падение напряжения на нем будет нарастать в течение некоторого времени за счет накопления дырок в базе.

Эффект накопления неосновных носителей заряда проявляется не только при включении диода в прямом направлении, но и при снятии с диода прямого напряжения.

В этом случае эффект накопления носителей заряда проявляется в том, что после размыкания цепи на диоде появ-

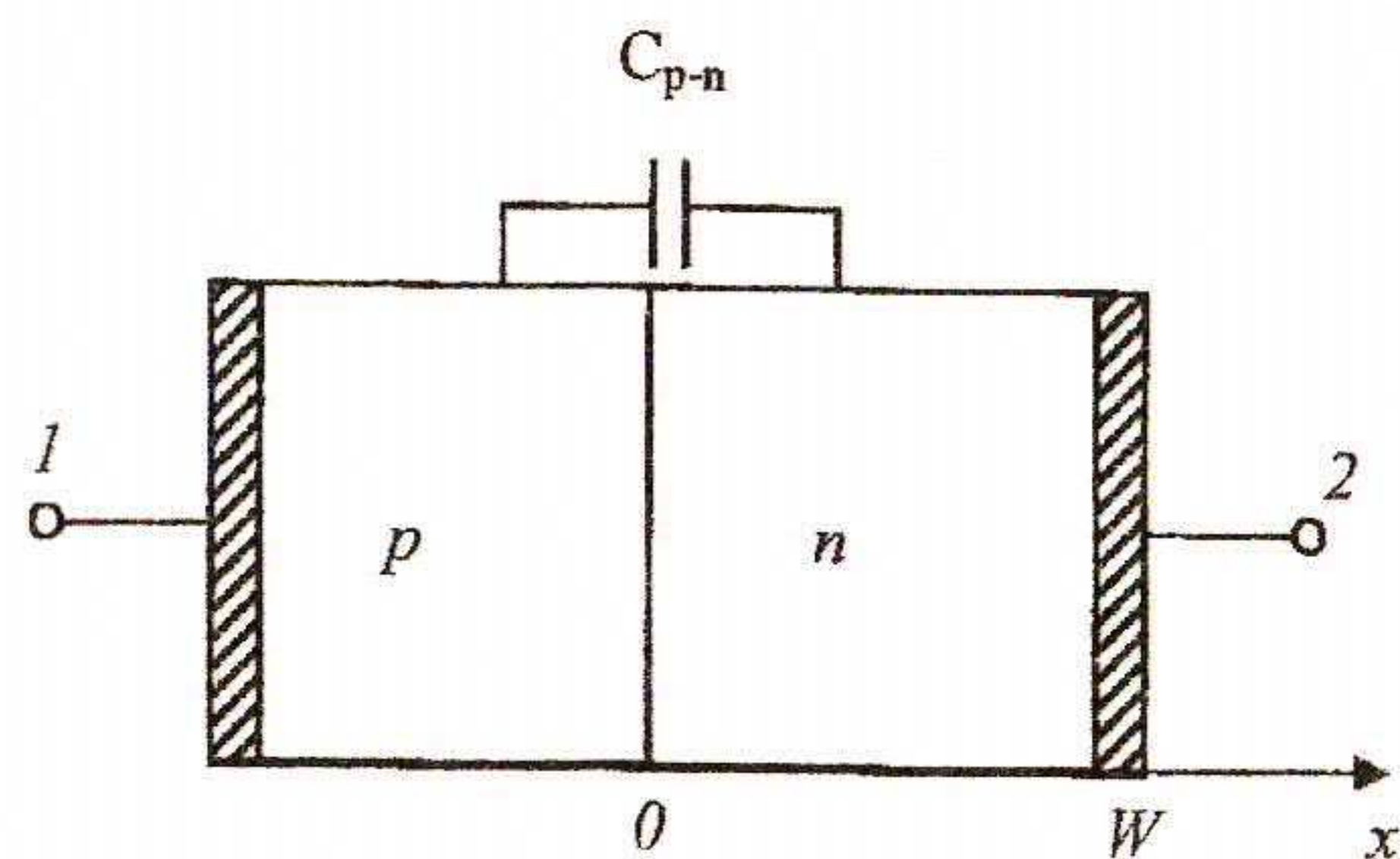


Рис. 1

ляется некоторое остаточное напряжение спадающее во времени. Процессы нарастания и спада напряжения на диоде при включении и выключении обычно называются переходными процессами.

Для количественной характеристики этих переходных процессов рассмотрим плоскостной диод с произвольной толщиной базы W (рис.1). Примем, что проводимость р-области значительно больше проводимости п-области ( $\sigma_p \gg \sigma_n$ ), то есть р-п-переход является резко асимметричным. Тогда прямой и обратный ток через р-п-переход будет обусловлен дырками. Математический анализ переходных процессов проведем для случая малого уровня инжекции, то есть для случая, когда концентрация избыточных дырок  $\Delta p$ , инжектированных в п-область, значительно меньше концентрации электронов в этой же области ( $\Delta p \ll \Delta n_n$ ).

Уравнение непрерывности для дырок, инжектированных в п-область, запишется в следующем виде:

$$q \frac{\partial(\Delta p)}{\partial t} = -\frac{\partial j_p}{\partial x} - q \frac{\Delta p}{\tau_p}, \quad (3)$$

где  $\Delta p(x,t) = p(x,t) - p_n$ ,  $p(x,t)$  — концентрация дырок;

$p_n$  — равновесная концентрация дырок,  $\tau_p$  — время жизни дырок;

$$j_p = q\mu_p p \varepsilon - qD_p \frac{\partial p}{\partial x}$$

Умножив левую и правую части равенства (3) на площадь перехода и проинтегрировав по области  $0 \leq X \leq W$ , получим

$$\frac{dQ}{dt} = I_p(0,t) - I_p(W,t) - \frac{Q}{\tau_p}, \quad (4)$$

где  $Q = qS \int_0^W \Delta p(x,t) dx$  — полный заряд избыточных дырок в базе диода;

$I_p(0,t)$  — дырочный ток через р-п-переход ( $X=0$ );

$I_p(W,t)$  — ток при  $X=W$ .

Учитывая, что ток  $I_p(W, t)$  может быть представлен как заряд, деленный на временную константу, характеризующую скорость рекомбинации на границе  $X=W$ , определим константу полной рекомбинации (объемной и граничной) так, чтобы

$$I_p(W, t) + \frac{Q(t)}{\tau_p} = \frac{Q(t)}{\tau_g} \quad (5)$$

Величину  $\tau_g$  можно назвать эффективным временем жизни дырок в базе диода. При учете зарядной емкости р-п-перехода полный ток, входящий в контакт 1, можно представить следующим образом:

$$I(t) = I_p(0, t) + \frac{d(C_{p-n} V_{p-n})}{dt} = I_p(0, t) + \bar{C}_{p-n} \frac{dV_{p-n}}{dt} \quad (6)$$

$\bar{C}_{p-n} = \frac{1}{\Delta V} \int_V^{V+\Delta V} C_{p-n}(V) dV$  - среднее значение емкости перехода, в рассматриваемом интервале напряжений. Из формул (4) и (5) имеем

$$I_p(0, t) = \frac{dQ}{dt} + I_p(W, t) + \frac{Q}{\tau_p} = \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{\tau_g} \quad (7)$$

Подставляя (7) в (6), получим

$$I(t) = \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{\tau_g} + \bar{C}_{p-n} \frac{dV_{p-n}}{dt} \quad (8)$$

В стационарном случае ( $t \rightarrow \infty$ )  $\frac{dQ}{dt} = 0$ ,  $\frac{dV_{p-n}}{dt} = 0$  и  $Q = I\tau_g$ .

Используя уравнение (8), рассмотрим два процесса: процесс переключения диода из нейтрального в пропускное состояние при мгновенном скачке силы тока в цепи и переходной процесс при размыкании цепи.

В течение процесса переключения диода из нейтрального в пропускное состояние при скачке тока в цепи ток через р-п-переход не зависит от времени и определяется достаточно большим омическим сопротивлением, включенным последовательно с ним, то есть

$$I(t) = I_R = \frac{V}{R} \quad (9)$$

где  $V$  - общее падение напряжения в цепи.

В первоначальный момент времени ( $t=0$ ) заряд избыточных дырок в базе диода и падение напряжения на р-п-переходе равны нулю

$$q(0) = 0, \quad V_{p-n}(0) = 0 \quad (10)$$

Для того, чтобы из уравнения (8) найти  $V_{p-n}$  как функцию времени, предполагаем, что спустя некоторое время после начала переходного процесса между зарядом избыточных дырок в базе и падением напряжения на р-п-переходе существует такая же связь, как и в стационарном случае, то есть

$$Q(t) = B \left( e^{\frac{qV_{p-n}}{kT}} - 1 \right) \quad (11)$$

где  $B$  - константа, зависящая от толщины базы и площади перехода.

Соотношение (11) может быть доказано при непосредственном нахождении заряда избыточных дырок в базе по формуле

$$Q(t) = qS \int_0^W \Delta p(x, t) dx,$$

так как  $\Delta p(x, t) = p_n \left( e^{\frac{qV_{p-n}}{kT}} - 1 \right) \cdot \varphi(x)$ ,

где  $\varphi(x)$  - некоторая функция от координаты.

При малых напряжениях ( $V \ll \frac{kT}{q}$ ) из (11) получается

$$Q(t) = \frac{qB}{kT} V_{p-n}(t) = C_{\partial} V_{p-n}(t) \quad (12)$$

где  $C_{\partial}$  - диффузионная ёмкость диода. В этом случае уравнение (8) преобразуется к виду

$$\frac{dV_{p-n}}{dt} + \frac{C_{\partial}}{(C_{\partial} + \bar{C}_{p-n})\tau_{\partial}} (V_{p-n} - \frac{I_R \tau_{\partial}}{C_{\partial}}) = 0. \quad (13)$$

Решая это уравнение с учетом начального условия (10), получим

$$V_{p-n}(t) = V_{p-n,c} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{C_{\partial}}{C_{\partial} + \bar{C}_{p-n}} \cdot \frac{t}{\tau_{\partial}}\right) \right], \quad (14)$$

где  $V_{p-n,c}$  - падение напряжения на р-п- переходе в стационарном случае ( $t \rightarrow \infty$ ). Так как заряд избыточных дырок в базе диода в стационарном случае

$$Q_c = C_{\partial} V_{p-n,c} = C_{\partial} I_R R_{p-n} = I_R \tau_{\partial}, \text{ то}$$

$$C_{\partial} = \frac{\tau_{\partial}}{R_{p-n}}, \quad (15)$$

где  $R_{p-n}$  - стационарное значение сопротивления р-п-перехода.

Подставляя (15) в (14), получим

$$V_{p-n}(t) = V_{p-n,c} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\partial} + \bar{C}_{p-n} R_{p-n}}\right) \right]. \quad (16)$$

Если диффузионная емкость диода значительно больше зарядной или

$$\tau_{\partial} \gg \bar{C}_{p-n} R_{p-n}, \text{ то}$$

$$V_{p-n}(t) = V_{p-n,c} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\partial}}\right) \right], \quad (17)$$

Наоборот, при  $\bar{C}_{p-n} R_{p-n} \gg \tau_{\partial}$

$$V_{p-n}(t) = V_{p-n,c} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\bar{C}_{p-n} R_{p-n}}\right) \right]. \quad (18)$$

При  $V \gg \frac{kT}{q}$  из (11) получим

$$Q(t) = B \cdot \exp\left(\frac{qV_{p-n}(t)}{kT}\right). \quad (19)$$

Диффузионная емкость

$$C_{\partial} = \frac{dQ}{dV_{p-n}} = \frac{qB}{kT} \exp\left(\frac{qV_{p-n}}{kT}\right) \quad (20)$$

в этом случае, как правило, становится значительно больше зарядной. При этом условии изменением заряда на зарядной емкости можно пренебречь, и уравнение (8) записать в следующем виде:

$$I(t) = I_R = \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{\tau_{\partial}}. \quad (21)$$

Отсюда с учетом начального условия (10) получим

$$Q(t) = I_R \tau_{\partial} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\partial}}\right) \right]. \quad (22)$$

Из (19) и (22) имеем

$$V_{p-n}(t) = \frac{kT}{q} \ln \left[ \frac{I_R \tau_{\partial}}{B} \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\partial}}\right) \right) \right]. \quad (23)$$

Так как  $Q(t) = B \cdot \exp\left(\frac{qV_{p-n,c}}{kT}\right) = I_R \tau_{\partial}$ , то

$$\ln \frac{I_R \tau_{\partial}}{B} = \frac{qV_{p-n,c}}{kT} \quad (24)$$

и

$$V_{p-n}(t) = V_{p-n,c} + \frac{kT}{q} \ln \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\partial}}\right) \right]. \quad (25)$$

Таким образом, время установления стационарного напряжения и форма осциллограммы напряжения на р-п-переходе зависят от величины падения напряжения на нём.

При малом сигнале ( $V_{p-n} \ll \frac{kT}{q}$ ) напряжение на p-n-переходе меняется в соответствии с формулой (16) (рис.2, кривая 1). При большом сигнале ( $V_{p-n} \gg \frac{kT}{q}$ ) напряжение на p-n-переходе возрастает соответственно формуле (25) (рис.2, кривая 2). При дальнейшем увеличении уровня инжекции наступает модуляция сопротивления базы и в связи с этим наблюдается уменьшение падения напряжения на диоде со временем (рис.2, кривая 3).

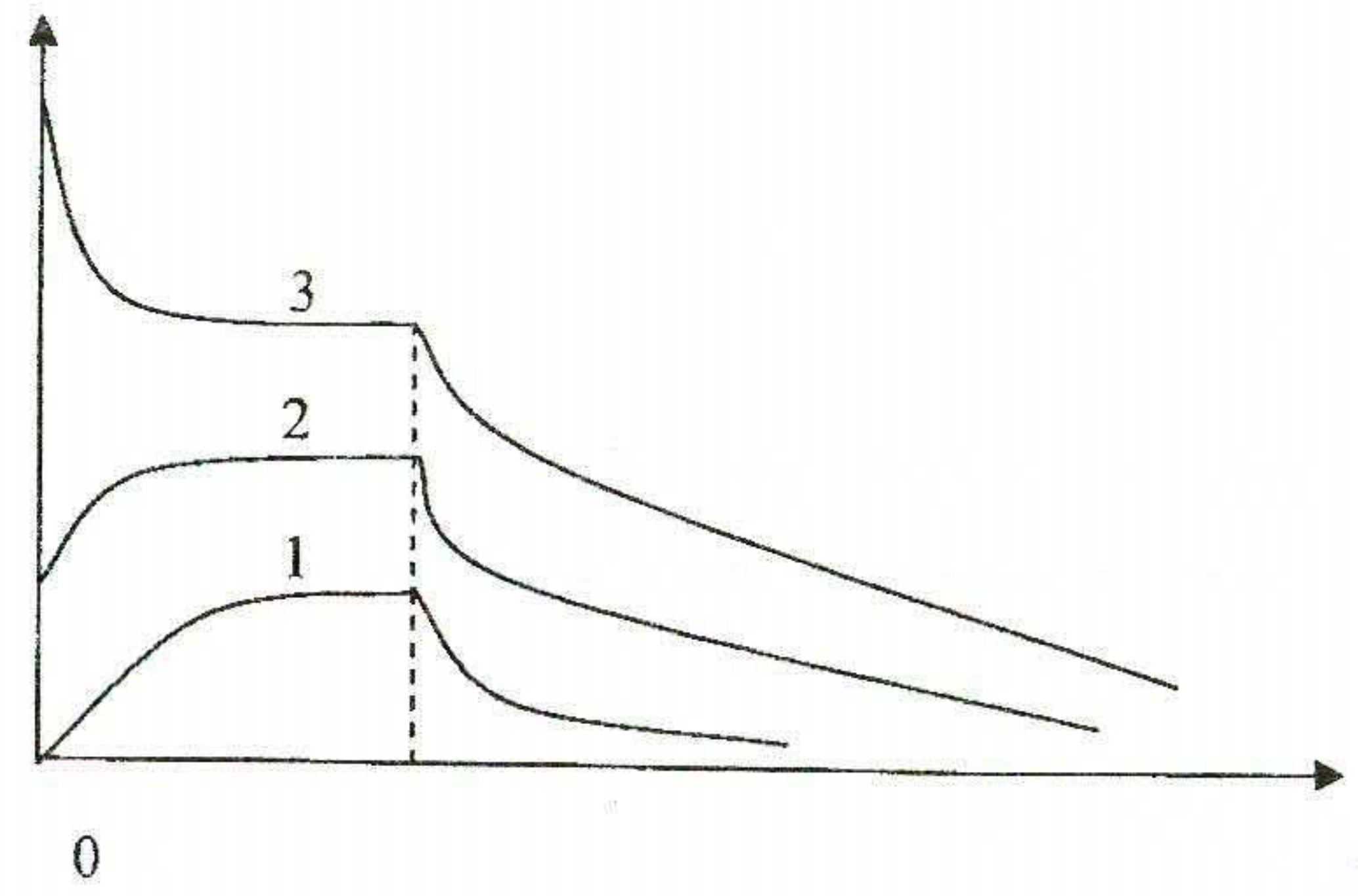


Рис.2

Действительно, при малом уровне инжекции ( $\frac{\Delta p}{n_n} \ll 1$ ) сопротивление базы диода

$$R_b \sim \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(\mu_n n_n + \mu_p p_p)}$$

с течением времени не меняется. Причем при малой силе

тока в цепи падением напряжения на базе можно пренебречь. Тогда падение напряжения на диоде будет равно падению напряжения на p-n-переходе

$$V(t) = V_{p-n}(t) + V_b \cong V_{p-n}(t). \text{ При высоком уровне инжекции } \left(\frac{\Delta p}{n_n} \gg 1\right) \text{ сопротивление базы диода } R_b \sim \frac{1}{q[\mu_n(n_n + \Delta n) + \mu_p(p_n + \Delta p)]}$$

является функцией времени. В момент времени  $t=0$   $\Delta n = \Delta p = 0$  и  $R_b$  велико. Затем, по мере увеличения  $\Delta n$  и  $\Delta p$  за счет протекания тока  $R_b$ , а следовательно и  $V_b$  будут уменьшаться. Это обстоятельство и ведет к спаду общего падения напряжения на диоде при  $t > 0$ .

Теперь рассмотрим процесс переключения диода из пропускного в нейтральное состояние при размыкании цепи. В этом случае  $I(t) = 0$ , а заряд в момент начала процесса

$$Q(t_0) = I_R \tau_s. \quad (26)$$

Падение напряжения на p-n-переходе в момент размыкания цепи

$$V_{p-n}(t_0) = V_{p-n,0}.$$

В области малых напряжений ( $V_{p-n} \ll \frac{kT}{q}$ ) уравнение (8) принимает вид

$$\frac{dV_{p-n}}{dt} + \frac{C_\partial V_{p-n}}{(C_\partial + \bar{C}_{p-n})\tau_s} = 0. \quad (27)$$

Если начало отсчета времени перенести в точку  $t=t_0$ , то отсюда

$$V_{p-n}(t) = V_{p-n,0} \exp\left(-\frac{C_\partial}{C_\partial + \bar{C}_{p-n}} \frac{t}{\tau_s}\right), \quad (28)$$

или с учетом (15)

$$V_{p-n}(t) = V_{p-n,0} \exp\left(-\frac{t}{\tau_s + \bar{C}_{p-n} R_{p-n}}\right). \quad (29)$$

При  $\tau_s \ll \bar{C}_{p-n} R_{p-n}$

$$V_{p-n}(t) = V_{p-n,0} \exp\left(-\frac{t}{\bar{C}_{p-n} R_{p-n}}\right). \quad (30)$$

А при  $\tau_s \gg \bar{C}_{p-n} R_{p-n}$

$$V_{p-n}(t) = V_{p-n,0} \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right). \quad (31)$$

Если  $V_{p-n} \gg \frac{kT}{q}$ , то из (8) при условии, что  $C_\partial \gg \bar{C}_{p-n}$

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{\tau_9} = 0. \quad (32)$$

Откуда

$$Q(t) = I_R \tau_9 \exp\left(-\frac{t}{\tau_9}\right). \quad (33)$$

Учитывая (19) и (24), окончательно получим

$$V_{p-n}(t) = V_{p-n,0} - \frac{kT}{q} \frac{t}{\tau_9}. \quad (34)$$

Выражение (34) в координатах  $V_{p-n}$  от  $t$  есть уравнение прямой с тангенсом угла наклона

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{kT}{q \tau_9} \quad (\text{рис. 2, кривая 2}).$$

По наклону этой прямой можно определить эффективное время жизни

$$\tau_9 = \frac{kT}{q \cdot \operatorname{tg} \alpha} = \frac{kt \Delta t}{q \Delta V}. \quad (35)$$

Если брать  $\Delta V$  в вольтах, то  $\frac{q}{kT} = 39 \text{ В}^{-1}$  и (35) примет вид

$$\tau_9 = \frac{\Delta t}{39 \cdot \Delta V}. \quad (36)$$

Резкий спад напряжения на диоде, наблюдаемый сразу после окончания импульса прямого тока, обусловлен исчезновением падения напряжения на базе диода  $V_b = I_R R_b$

В данной работе для изучения переходных процессов предлагается установка, схема которой представлена на рис. 3. Прямоугольный импульс от блока генератора, через большое ограничивающее сопротивление  $R$  подается на исследуемый германиевый диод D226 в прямом направлении. Сила тока в цепи определяется величиной ограничивающего сопротивления, включенного последовательно с генератором прямоугольных импульсов. Изменение падения напряжения со временем на полупроводниковом диоде можно наблюдать с помощью осциллографа GDS-806S.



Рис. 3

### З а д а н и е

1. Зафиксировать на кальке переходные процессы, возникающие при прохождении через полупроводниковый диод импульса прямого тока, для трех уровней инжекции ( $V \ll \frac{kT}{q}$ ,  $V \gg \frac{kT}{q}$ , но  $\frac{\Delta p}{n_n} \ll 1$  и высокий уровень инжекции).
2. Определить эффективное время жизни неосновных носителей заряда на базе полупроводникового диода.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой измерительной установки.
2. Включить осциллограф GDS-206S ( в правом верхнем углу тумблер сеть) и блок генератора с исследуемым диодом (тумблер «вкл»). При этом на осциллографе и блоке генератора должны загореться индикаторы сетевого напряжения.
3. В соответствии с руководством по эксплуатации на осциллограф GDS-206S на табло справа от экрана соответствующими кнопками установить:

кнопкой F1 – «фронт»;

кнопкой F2 – «внешняя»;

кнопкой F3 – «режим авто»;

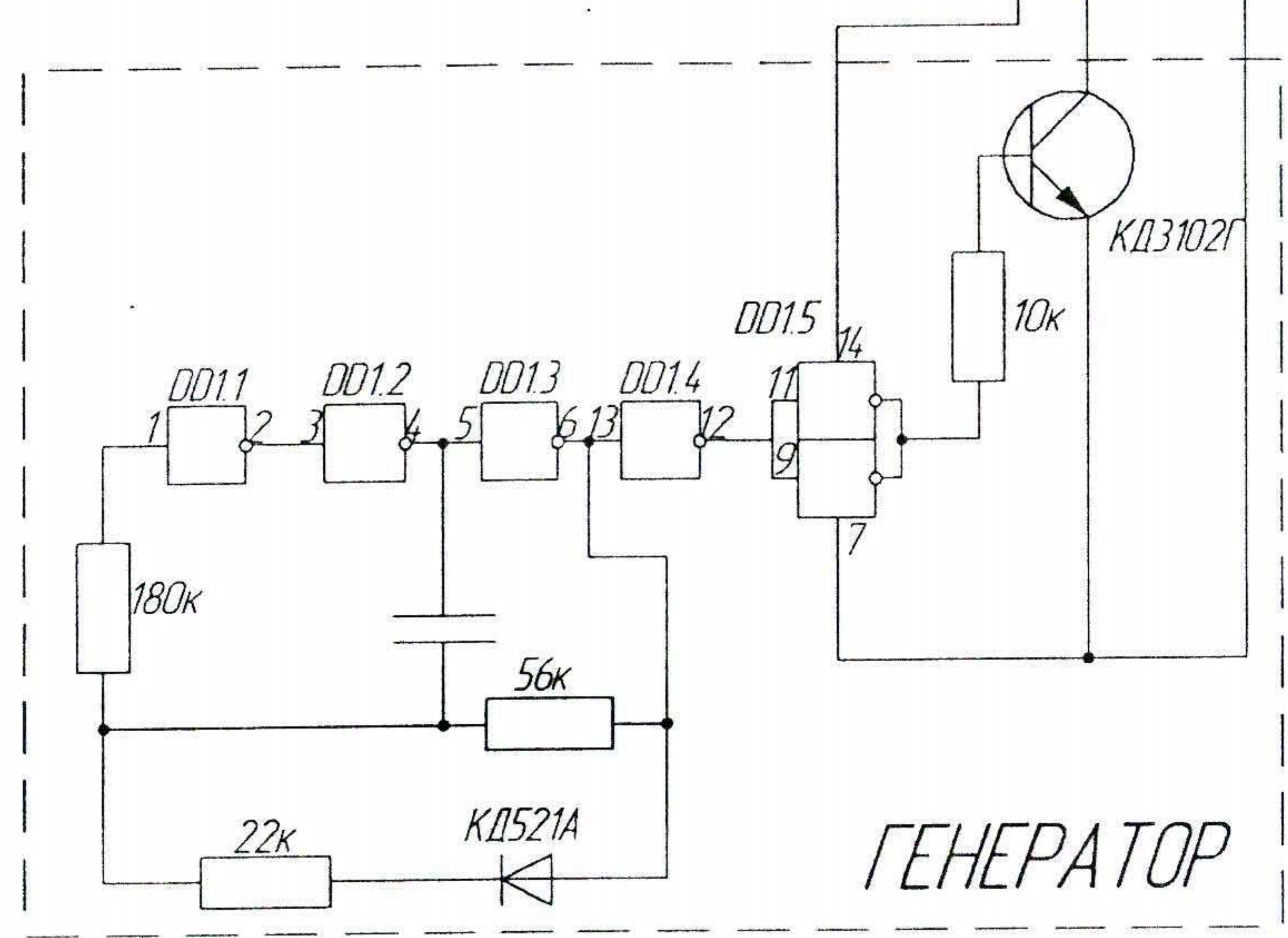
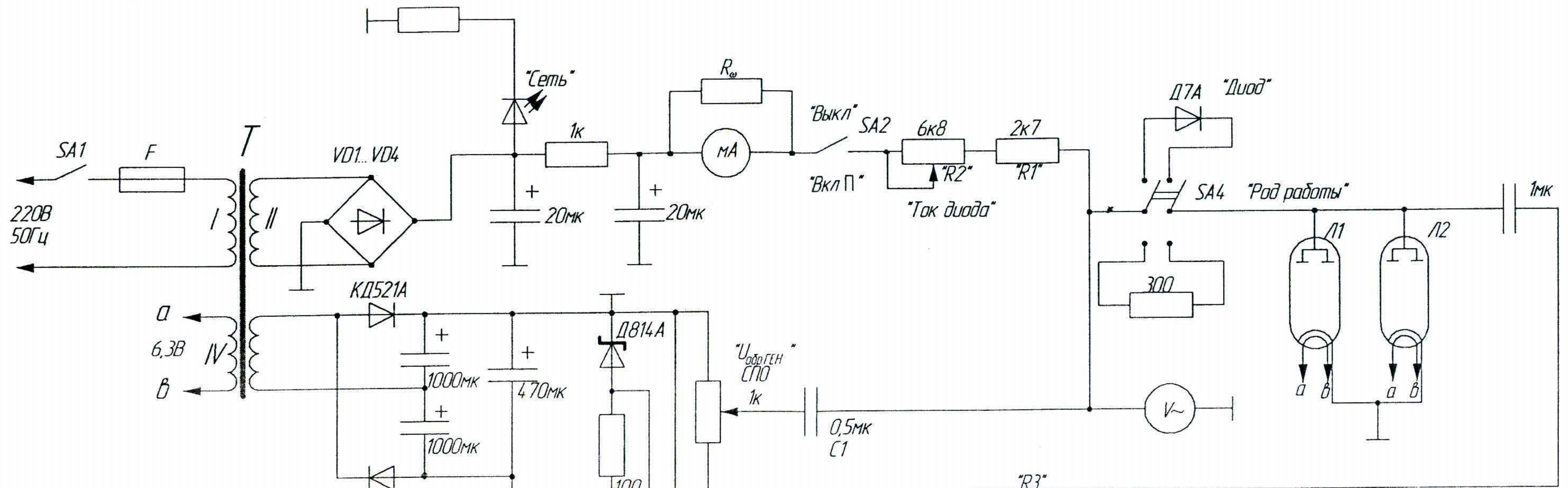
Переключателем канала «вольт/дел» по табло снизу экрана установить усиление 100 мв. Переключателем развертки «время/дел» по табло снизу экрана установить 2,5  $\mu\text{s}$ .

4. Вращая ручку потенциометра блока генератора фиксируем на осциллограмме переходные процессы для низкого уровня инжекции, но при  $V \ll \frac{kT}{q}$ ,  $V \gg \frac{kT}{q}$ , а также на высоком уровне инжекции.
5. Определить эффективное время жизни неосновных носителей заряда в базе диода. Для этого найти на кривой спада напряжения (при  $V \gg \frac{kT}{q}$ ) прямолинейный участок и определить величину  $\frac{\Delta I}{\Delta V}$ , а затем по формуле (36) определить  $\tau_e$  - эффективное время жизни неосновных носителей заряда в базе диода.
6. После окончания измерений выключить напряжение сети с осциллографа и измерительной установки.

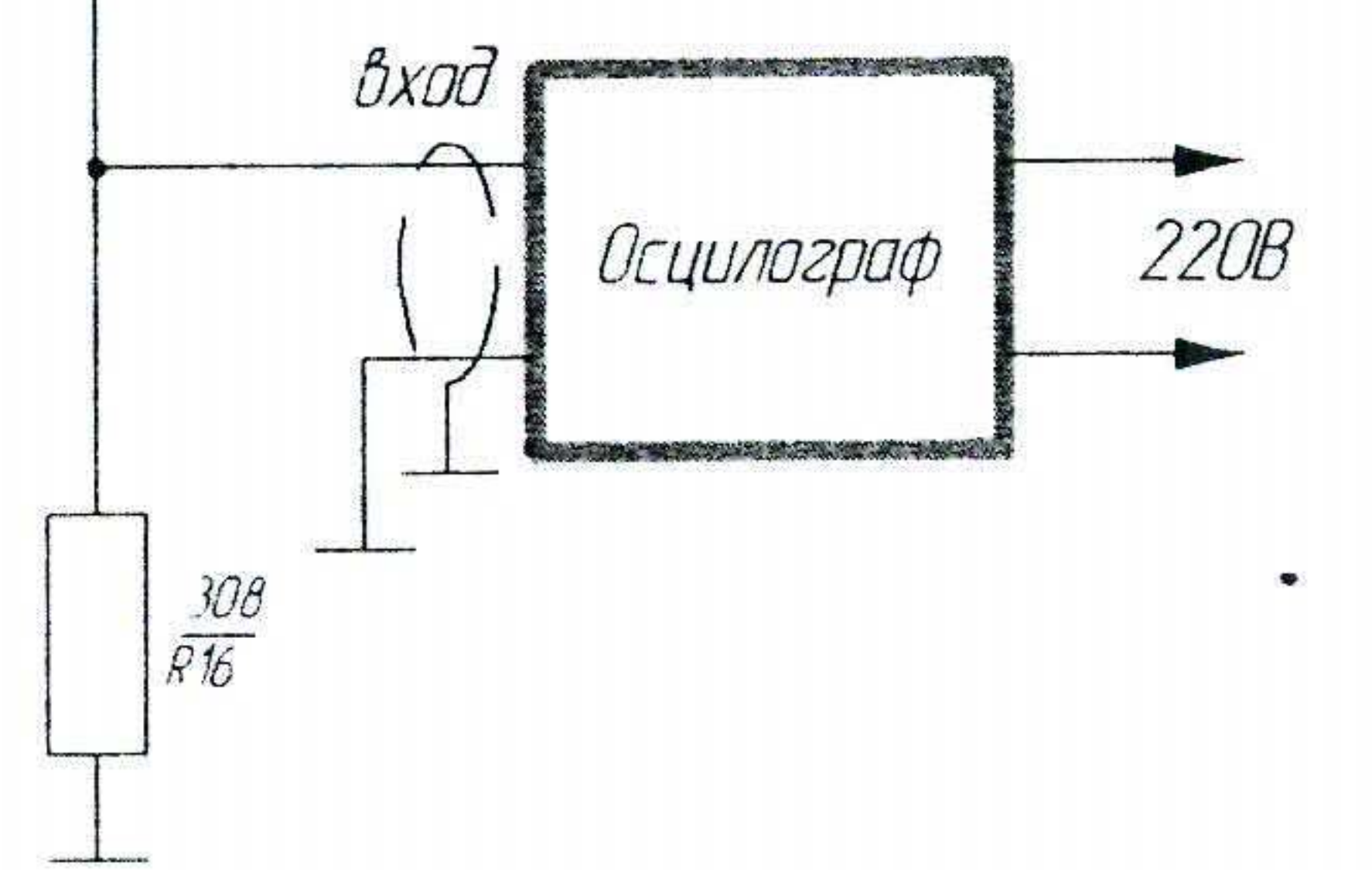
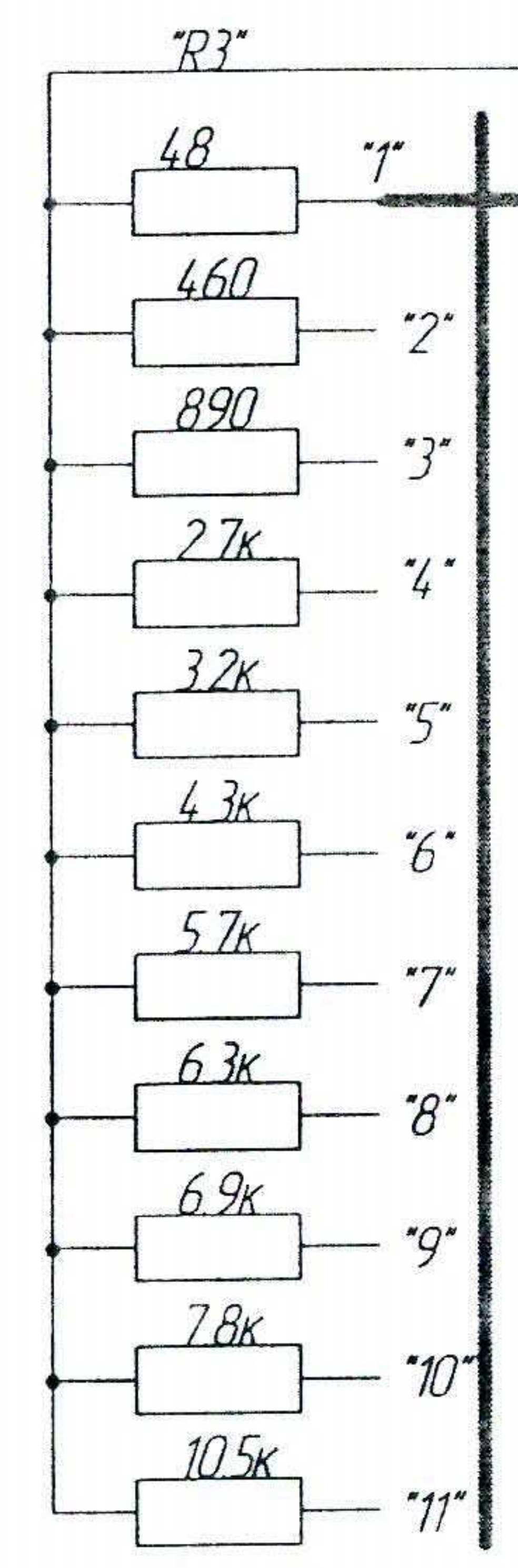
#### Л и т е р а т у р а

1. S.R.Lederhandler, L.J. Giacoletto. Proc.IRE., 43,4,477,1955.
2. H.J.Kuno. IEE. Trans. On Electron Devices., ЕД-11, № 1,8,1964.
3. В.И.Гаман. Физика полупроводниковых приборов.Изд.НТЛ. 2000.-426 с.

Схема электрическая принципиальная к лабораторной работе "Переходные процессы в полупроводниковых диодах"



$$\tau = \frac{t_1 (\text{мкс}) \cdot U_{\text{обр}} (\text{МВ})}{0.2 \cdot I_{\text{пр}} (\text{МА}) \cdot (R_3 + 308) / 10 \text{М}}$$



ПРИМЕЧАНИЕ:  
 При положениях переключателя SA3 "1" ... "11" показаны действительные сопротивления, измеренные электронным комбинированным прибором 4323А