

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЙ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИЙ ДИОД С  $S$  - ОБРАЗНОЙ  
 ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

С.И. Коняев, А.И. Мишин

Изготовленные методом вакуумного осаждения двухэлектродные приборы на основе  $Me-Se-Me$  имеют переключающую характеристику  $S$  - типа для прямой и обратной ветви вольт-амперной характеристики.

Конструкция прибора представлена на рис. 1, где 1 - изолирующая подложка, 2 - металлическая плёнка, 3 - слой селена, 4 - верхний металлический электрод.



Рис. 1.

Статическая вольт-амперная характеристика снималась по схеме рис. 2, где  $E_1$  - источник постоянного тока,  $R_1$  - потенциометр,  $K_1$  - ключ для смены полярности источника постоянного напряжения,  $K_2$  - ключ коммутации переменного и постоянного напряжения и  $K_3$  с диодом  $A$  - для подачи синусоидального или полусинусоидального напряжения на схему мос-

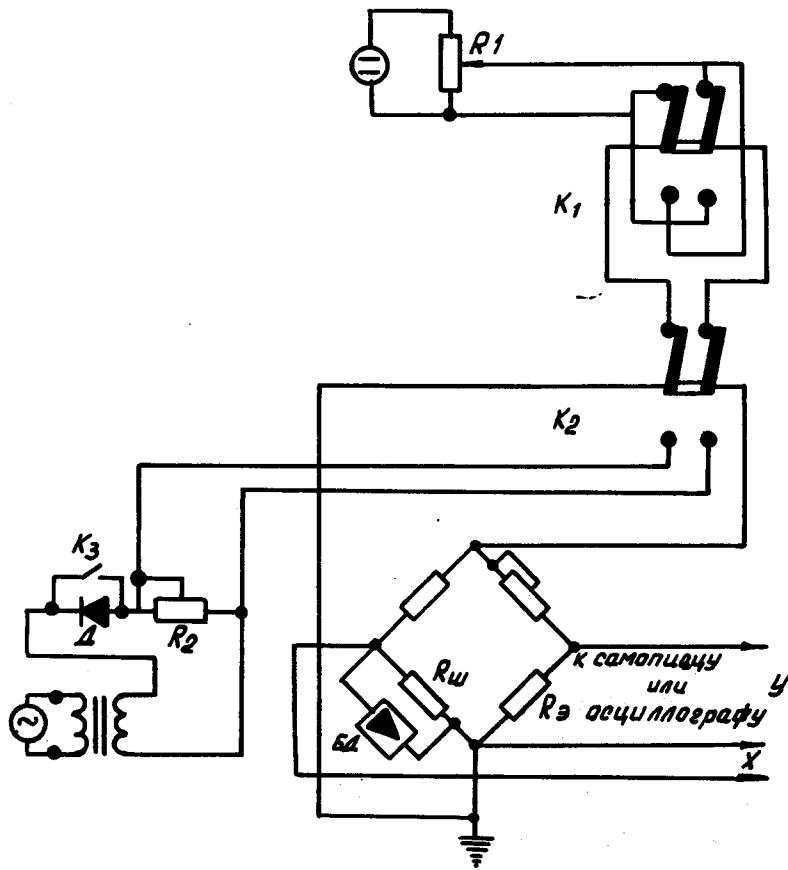


Рис.2.

та. Схема моста обеспечивала режим генератора тока для переключающего элемента. Сопротивление  $R_{ш}$  калибровано по току и определяет начальный ток включения элемента.

При снятии статической вольт-амперной характеристики на вход моста подключался 2-координатный самописец. Медленным перемещением движка потенциометра  $R_1$  ток через прибор в прямом

смещении изменялся от нуля до  $\mathcal{U}^*$  (рис. 1), и обратно, затем переключателем  $K_1$  менялась полярность  $E$ , . Аналогично снималась обратная ветвь вольт-амперной характеристики.

Статическая вольт-амперная характеристика приведена на рис. 3а. Вся характеристику можно разбить на следующие участки:

- I и II - участки низкой проводимости,
- III и IV - участки пробоя,
- V и VI - участки отрицательного дифференциального сопротивления,
- VII и VIII - участки малых положительных дифференциальных сопротивлений.

Характеристика может быть описана следующими выражениями:

на участке I  $\mathcal{I} = U \operatorname{ctg} \varphi_1$  ;

на участке II  $\mathcal{I} = U \operatorname{ctg} \varphi_2$  ;

на участке III  $U = \operatorname{const} = U_{\text{вкл}}^+$  ,

на участке IV  $U = \operatorname{const} = U_{\text{акл}}^-$  ;

на участке V  $\frac{U - U_{\text{вкл}}^+}{U_{\text{выкл}}^+ - U_{\text{вкл}}^+} = \frac{\mathcal{I} - \mathcal{I}_{\text{вкл}}^+}{\mathcal{I}_{\text{выкл}}^+ - \mathcal{I}_{\text{вкл}}^+}$  ;

на участке VI  $\frac{U - U_{\text{вкл}}^-}{U_{\text{выкл}}^- - U_{\text{вкл}}^-} = \frac{\mathcal{I} - \mathcal{I}_{\text{вкл}}^-}{\mathcal{I}_{\text{выкл}}^- - \mathcal{I}_{\text{вкл}}^-}$  ;

на участке VII  $\frac{U - U_{\text{выкл}}^+}{U^* - U_{\text{выкл}}^+} = \frac{\mathcal{I} - \mathcal{I}_{\text{выкл}}^+}{\mathcal{I}^* - \mathcal{I}_{\text{выкл}}^+}$  ;

на участке VIII  $\frac{U - U_{\text{выкл}}^-}{U^{**} - U_{\text{выкл}}^-} = \frac{\mathcal{I} - \mathcal{I}_{\text{выкл}}^-}{\mathcal{I}^{**} - \mathcal{I}_{\text{выкл}}^-}$  .

Для величин положительных и отрицательных дифференциальных сопротивлений имеем:

$\alpha_1 = \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{dU}{d\mathcal{I}}$  - сопротивление выключенного прибора при прямом смещении;

$\alpha_2 = \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{dU}{d\mathcal{I}}$  - сопротивление выключенного прибора при обратном смещении на участке II;

$\alpha_3 = \operatorname{tg} \varphi_3 = -\frac{dU}{d\mathcal{I}}$  - сопротивление на участке V;

$\alpha_4 = \operatorname{tg} \varphi_4 = -\frac{dU}{d\mathcal{I}}$  - сопротивление на участке VI;

$\alpha_5 = \operatorname{tg} \varphi_5 = \frac{dU}{d\mathcal{I}}$  - сопротивление включенного прибора при прямом смещении на участке VII;

$\alpha_6 = \operatorname{tg} \varphi_6 = \frac{dU}{d\mathcal{I}}$  - сопротивление включенного прибора при обратном смещении на участке VIII.

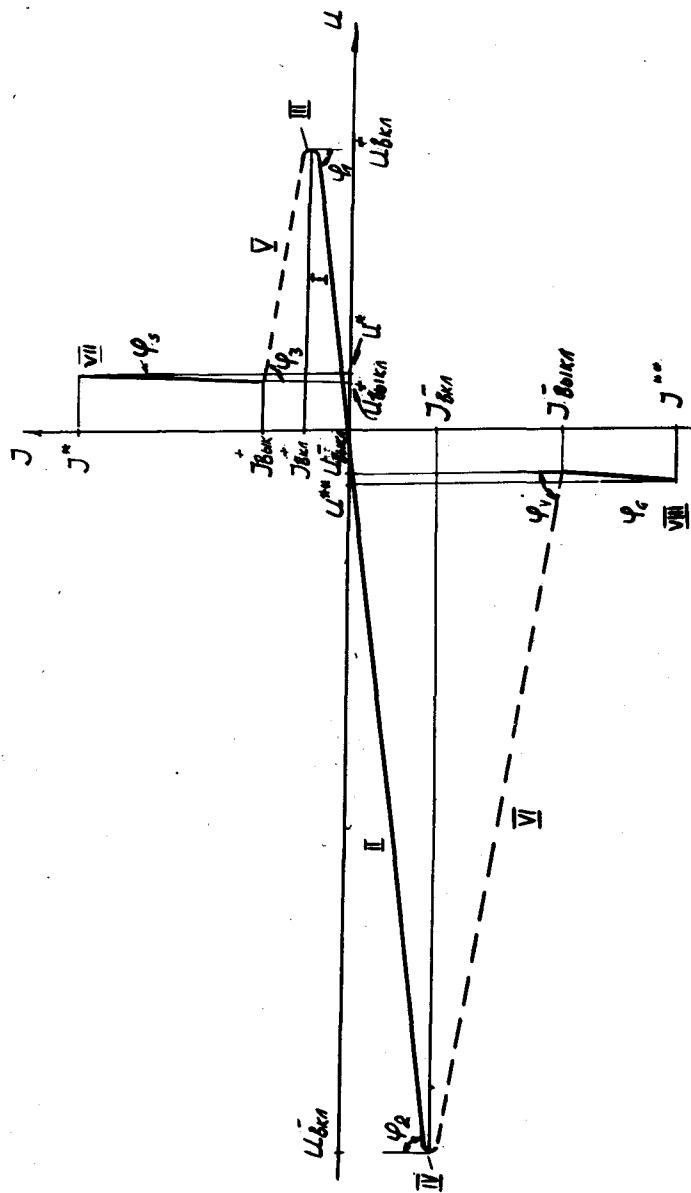


Рис. 3, а

Вольт-амперная характеристика может быть неоднозначной как по току, так и по напряжению и зависит от степени легирования селена серебром, толщины слоя селена, температуры и режима работы прибора. Например, величина тока удержания может мало отличаться от значения тока утечки (см. рис. 3б).

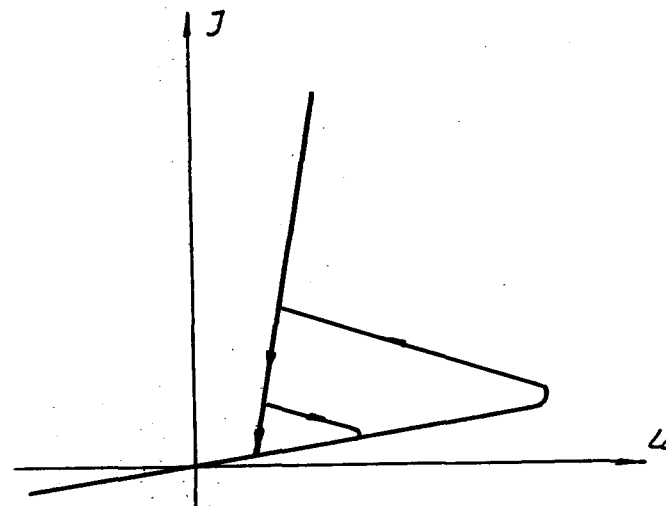


Рис. 3, б.

В дальнейшем двухэлектродный прибор на основе  $Me-Se-Me$  будем называть тонкопленочным переключающим диодом (сокращенно ТПД), или просто диодом.

Все величины электрических параметров статической вольт-амперной характеристики ТПД представлены в таблицах 1 и 2 соответственно для прямой и обратной ветви вольт-амперной характеристики.

При снятии осциллограмм вольт-амперной характеристики на выход моста подключался осциллограф, и переключателем  $K_2$  на схему моста подавалось синусоидальное или полусинусоидальное напряжение.

Таблица I

$\frac{U_{\text{вкл.}}}{\delta}$	$\frac{J_0}{a}$	$R^+$	$R^-$	$J_0^+$	$J_0^-$	$\frac{U_{\text{вкл.}}}{\delta}$	$\frac{U_{\text{вкл.}}}{\delta}$	$\frac{t_{\text{вкл.}}}{\text{сек}}$	$\frac{t_{\text{вкл.}}}{\text{сек}}$
$0,45-0,75$	$10^{-10}$	$200-500$	$\sim 2 \cdot 10^4$	$10^{-17-12}$	$10^{-18-12}$	$0,2-0,25$	$10^{-7-9}$	$10^{-14-9}$	$10^{-14-9}$

Таблица II

$\frac{U_{\text{вкл.}}}{\delta}$	$J_0^-$	$R^-$	$R^+$	$J_0^-$	$J_0^+$	$\frac{U_{\text{вкл.}}}{\delta}$	$\frac{U_{\text{вкл.}}}{\delta}$	$\frac{t_{\text{вкл.}}}{\text{сек}}$	$\frac{t_{\text{вкл.}}}{\text{сек}}$
$12-14$	$10^{-18-11}$	$\sim 5 \cdot 10^4$	$200-500$	$10^{-16-10}$	$10^{-17-12}$	$0,2-0,25$	$10^{-7}$	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^{-6}$

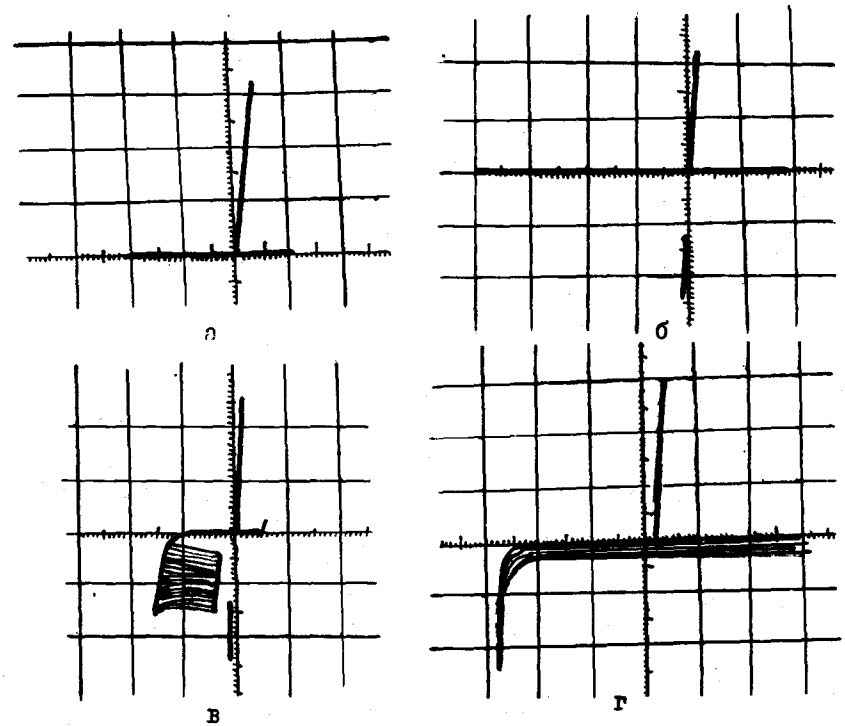


Рис. 4.

Осциллограммы характеристик для образцов с различной толщиной слоя селена приведены на рис. 4 а, б, в, г.

Осциллограммы показывают качественную сторону зависимости вольт-амперной характеристики от толщины слоя селена, так как при напылении верхнего металлического электрода, благодаря выделяющейся тепловой энергии при осаждении ионов металла, происходит испарение селена. Емкостный метод контроля также не дает удовлетворительных результатов из-за отсутствия данных диэлектрической проницаемости образующихся химических соединений и их количественного соотношения.

Осциллограмма (рис. 4а) иллюстрирует переключение ТПД на прямой ветви вольт-амперной характеристики. Осциллограмма (рис. 4б) всей вольт-амперной характеристики образца иллюстрирует переключение диода на прямой и обратной ветви. Толщина слоя селена для этого образца  $\sim 2$  микрона. После напыления верхнего металлического электрода диод подвергался термической обработке.

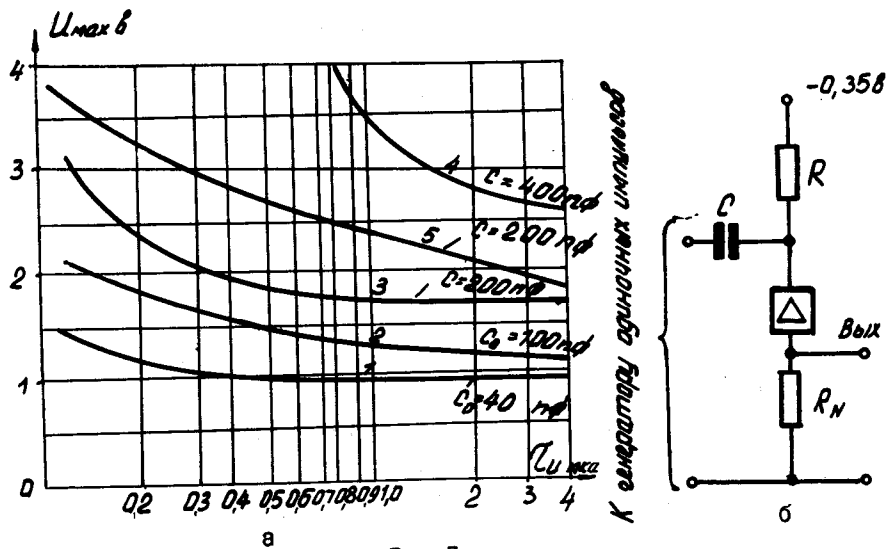


Рис. 5.

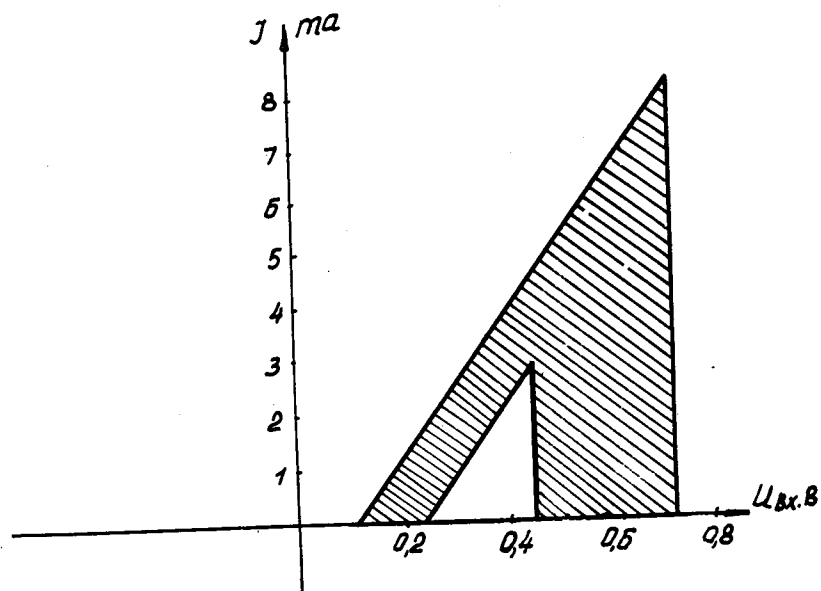


Рис. 6.

Для рис. 4а цена деления по оси  $X = 0,5 \frac{В}{дел}$ , по оси  $Y = 10^{-5} \frac{а}{дел}$ , а для рис. 4б цена деления по оси  $X = 3 \frac{В}{дел}$ , по оси  $Y = 10^{-5} \frac{а}{дел}$ . Увеличение  $U_{вкл}^+$  для рис. 4б связано с зависимостью этого параметра от амплитуды обратного напряжения.

При уменьшении толщины селена переключение диода становится неустойчивым на обратной ветви, что приводит к возникновению генерации с частотой  $\sim 300$  кГц (рис. 4в). Напряжение смещения, при котором возникает генерация, приблизительно  $-4,5$  вольт. Вольт-амперная характеристика для образцов с толщиной селена  $2500-3000 \text{ \AA}$  представлена на осциллограмме (рис. 4г). Из осциллограммы видно, что обратная ветвь вольт-амперной характеристики ТППД подобна характеристике полупроводниковых стабилитронов; напряжение пробоя  $\sim 2,5$  вольт. Для этих образцов в таком режиме работы переключающего диода напряжение включения мало отличается от напряжения пробоя. Осциллограмма также иллюстрирует разброс напряжения включения и напряжения пробоя.

Динамические характеристики диода в значительной степени определяются схемой и режимом работы, например, время выключения существенно зависит от величины тока, протекающего через диод.

На рис. 5а кривые 1, 2, 3, 4 показывают зависимость амплитуды включающего прямоугольного импульса от его длительности для диодов с различным  $C_0$ , где  $C_0$  — статическая ёмкость переключающего диода. Кривая 5 показывает зависимость амплитуды напряжения выключающего импульса от его длительности для диода с  $C_0 = 200$  пф.

Приведенные зависимости снимались по схеме рис. 5б при подаче на вход схемы разнополярных импульсов от генератора одиночных импульсов. Для каждой длительности входного импульса определялась его минимальная амплитуда, достаточная для устойчивого переключения диода.

Устойчивость рабочих точек на участках I и III для двух элементов контролировалась непрерывно в течение 150 часов. За это время самопроизвольных переключений не было; у элемента, находящегося в состоянии высокой проводимости, в первые часы работы (1-2 часа) наблюдался спад тока по экспоненциальному закону на 30% от первоначального значения. Область разброса по напряжению включения для 50 шт переключающих диодов представлена на рис. 6.

Переключающий диод по напряжению включения имеет положительный ТКН; зависимость  $U_{вкл}$  от температуры представлена на рис. 7. Каждая точка кривой характеризует усредненное значение  $U_{вкл}$  для десяти переключений образца при одной и той же температуре. Ток, протекающий через диод, находящийся в проводящем состоянии, в диапазоне температур от  $-100^{\circ}$  до  $+100^{\circ}$  С практически не изменяется.

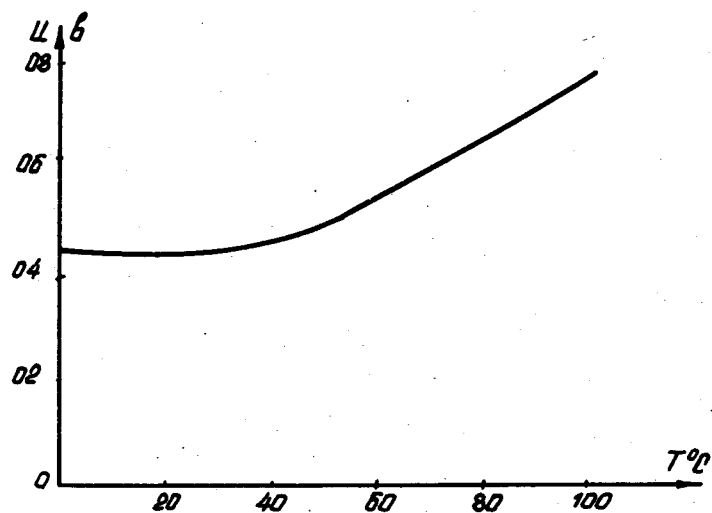


Рис.7.

При работе переключающего диода в импульсном режиме имеют место два переходных процесса, соответствующих переходу из состояния низкой проводимости в состояние высокой проводимости, и обратно.

Переходные характеристики ТППД снимались по схеме рис.8, где  $R_1 = 10$  ком,  $R_2 = 1$  ком,  $R_3 = 75$  ом;  $E_1$  и  $E_2$  - источники смещения ( $E_1 = -1,4$  в,  $E_2 = -2,8$  в.).

Осциллограммы, соответствующие работе диода в режиме переключения, представлены на рис. 9а, б, в, г, д, е. Рис. 9а соответствует переходному процессу ТППД при амплитуде напряжения прямоугольного импульса меньше порогового напряжения вклю-

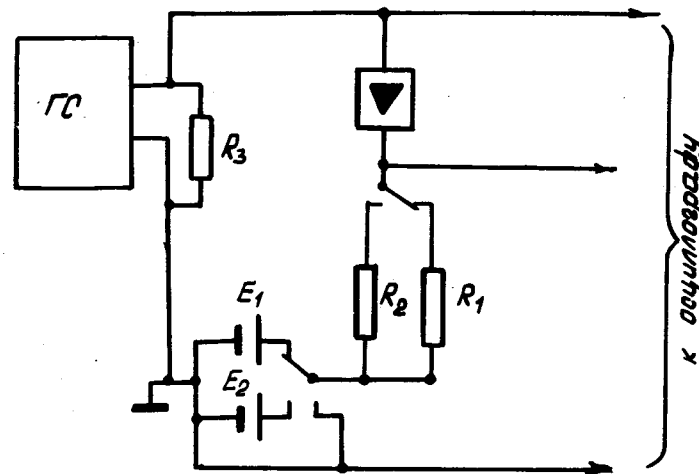


Рис.8.

чения и при  $E_{см} = 0$ . Осциллограмма (рис. 9б) иллюстрирует переходный процесс при амплитуде входного импульса, мало превышающего  $U_{вкл}$  ( $E_{см} = 0$ ). Серия импульсов, просматриваемая в момент включения, показывает разброс по времени включения. При увеличении амплитуды входного импульса область разброса по времени включения уменьшается (рис. 9в). Длительность входного импульса  $5 \cdot 10^{-6}$  сек.

Осциллограмма (рис. 9г) иллюстрирует переходной процесс диода в режиме переключения с отрицательным смещением ( $E_{см} = -1,4$  в) при амплитуде включающего импульса, незначительно превышающего  $U_{вкл}$ .

Из осциллограммы хорошо виден разброс по времени включения и выключения, цена деления по оси X =  $2 \frac{\text{мксек}}{\text{дел}}$ . При увеличении амплитуды импульса разброс по времени включения резко уменьшается, но по времени выключения существенно не меняется (рис. 9д). Осциллограмма (рис. 9г) показывает, что время выключения ТППД может изменяться в 5-10 раз. Осциллограмма (рис. 9е) иллюстрирует переходной процесс при  $R_2 = 1$  к. Дли-

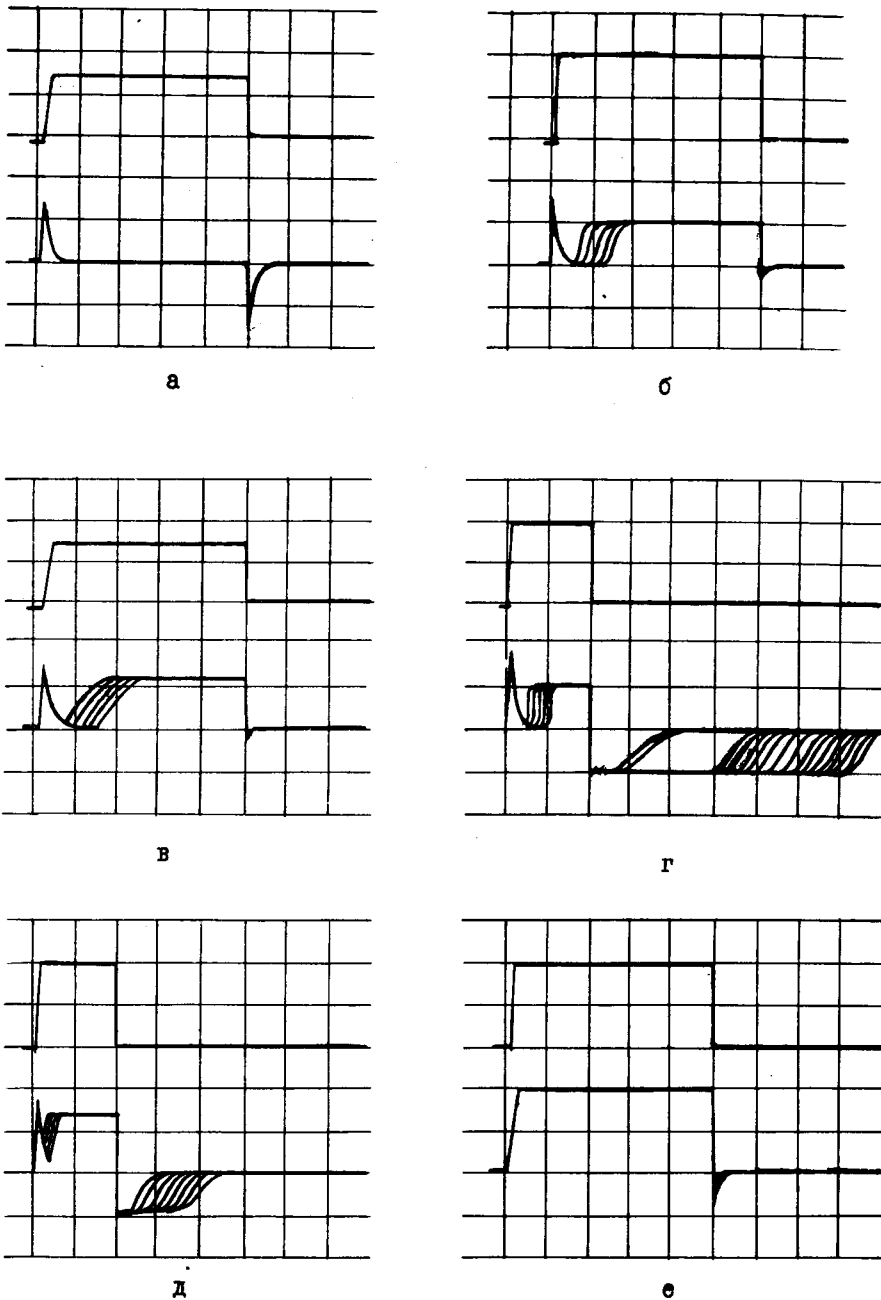


Рис.9.

тельность включающего импульса для этой осциллограммы  $5 \cdot 10^{-6}$  сек, напряжение смещения  $E_{см} = -1,4$  в.

При нагрузке 10 ком и напряжении смещения  $-2,8$  в переходной процесс практически не отличается от режима при  $R_2 = 1$  ком и  $E_{см} = -1,4$  в.

Все осциллограммы переходных характеристик сняты для прямой ветви вольт-амперной характеристики.

Следует отметить, что значение напряжения включения зависит от амплитуды обратного напряжения смещения. Эта зависимость иллюстрируется рис. 10.

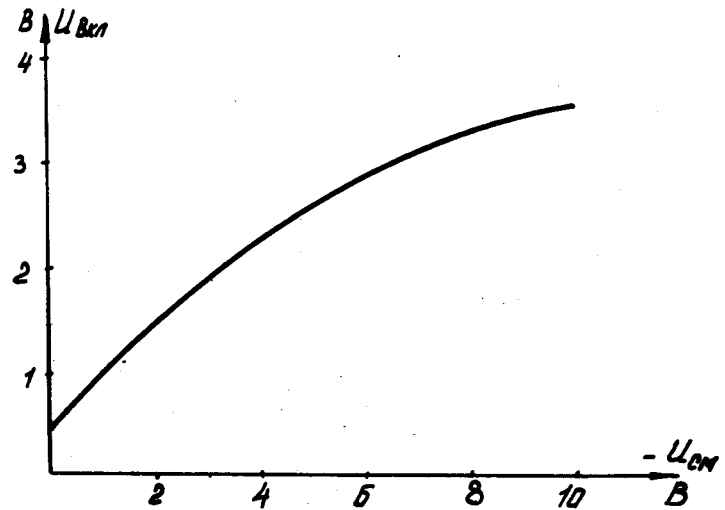


Рис.10.

Повышенный уровень напряжения включения после действия на ТППД отрицательного напряжения смещения может сохраняться длительное время и при отключённом источнике питания. После однократного включения ТППД напряжение включения вновь устанавливается равным первоначальному значению  $U_{вкл}^+$ .

Фотоэлектрические характеристики прибора представлены на рис. 11 и 12. На рис. 11 представлены кривые зависимости тока утечки при обратном смещении диода для различной освещенности, а на рис. 12 - кривая зависимости тока утечки для

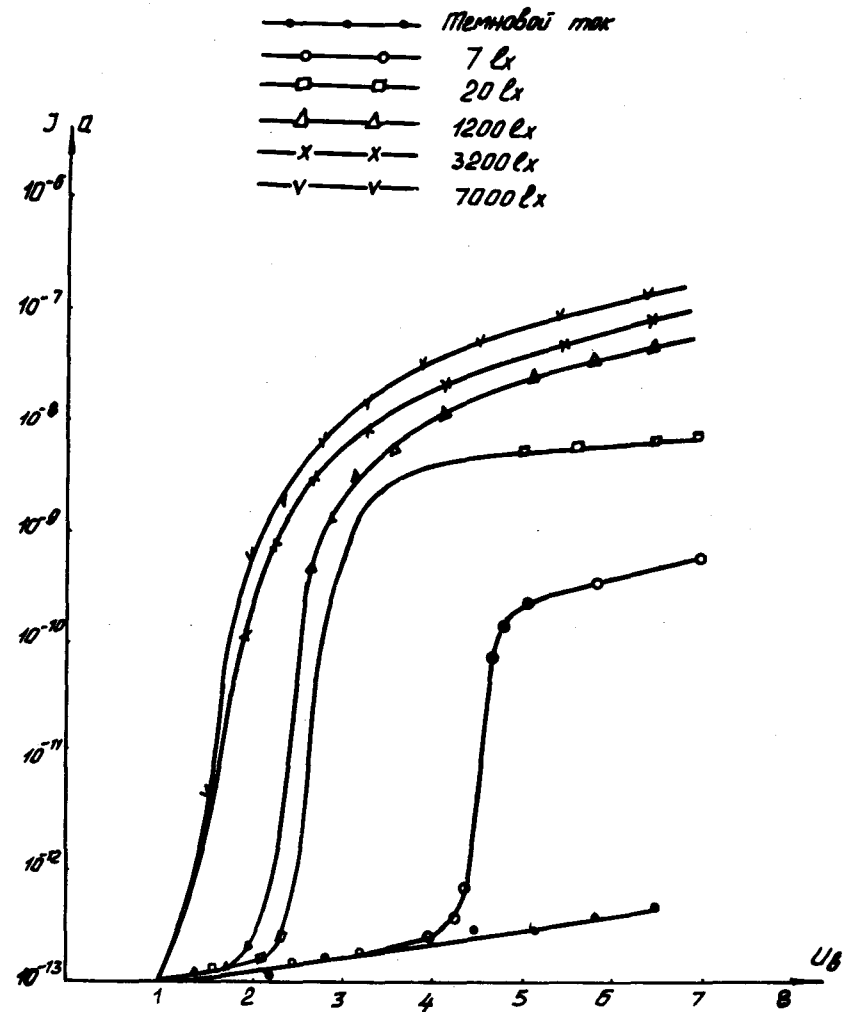


Рис. 11.

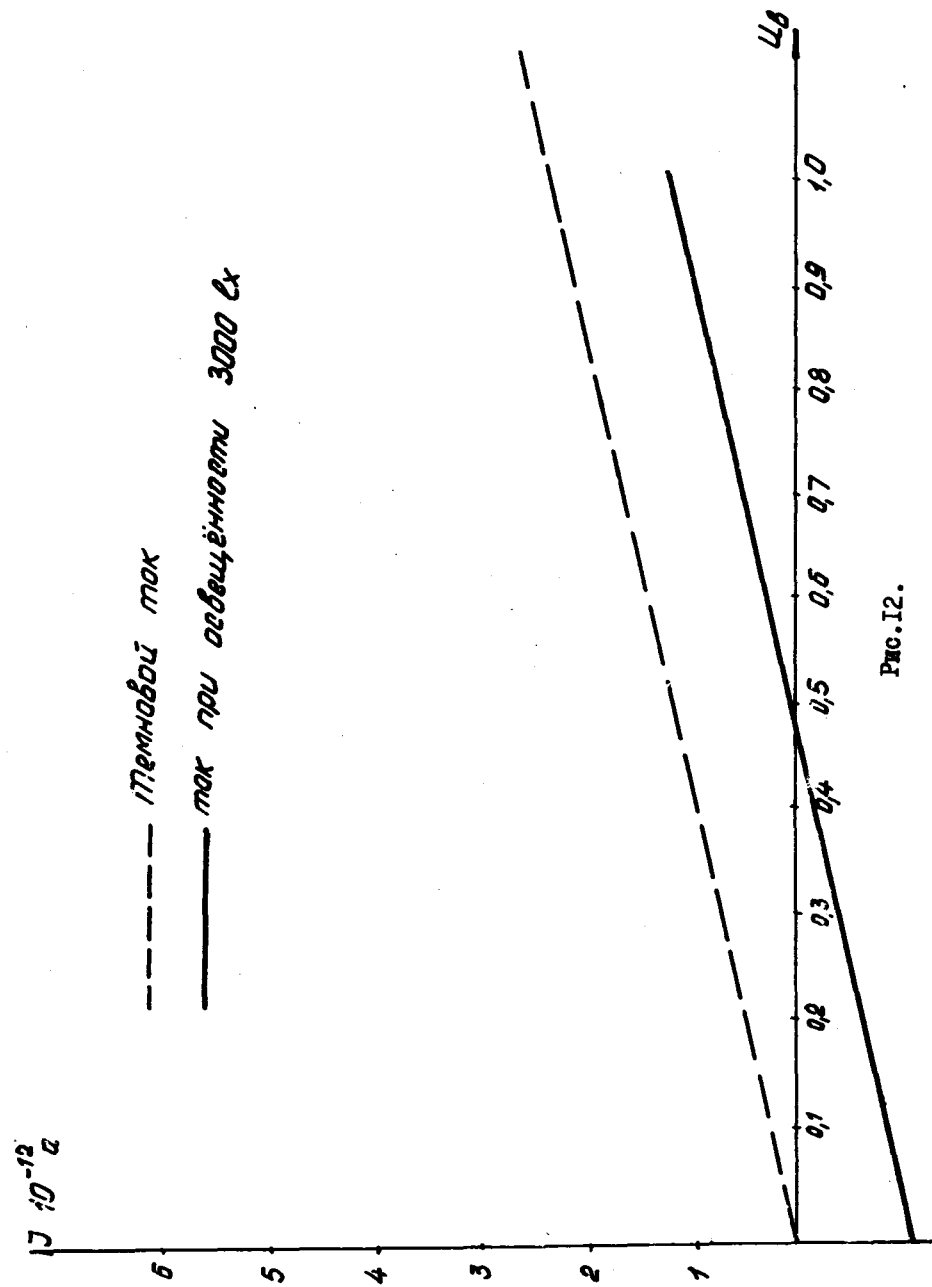


Рис. 12.



прямой ветви при постоянной освещенности. Из рис. 12 видно, что при напряжении смещения  $U_{см} = 0 + 0,45 \text{ В}$  ток утечки — отрицательный. Это объясняется действием фотоэдс: на этом участке ток, вызванный фотоэдс, больше темнового тока.

В заключение заметим, что воспроизводимость образцов с переключением на обратной ветви вольт-амперной характеристики значительно хуже, чем на прямой. Диоды чаще имеют неустойчивое переключение, т.е. генерацию, которая сохраняется длительное время при постоянном напряжении смещения. Стабильность вольт-амперной характеристики для прямой ветви существенно улучшается с уменьшением площади диода, а также при работе диода в режиме переключения микротоков.

Авторы выражают благодарность Х.И. Кляус за оказанную помощь в измерении фотоэлектрических характеристик.