

Г. М. Авакьянц, чл.-корр. АН Армянской ССР, И. Р. Альман, Л. С. Хавни
и А. В. Юровский

Переходные характеристики кремниевых диодов с отрицательным сопротивлением

(Представлено 20/IV 1966)

Переходные характеристики полупроводниковых диодов широко изучались в ряде экспериментальных и теоретических работ (¹). Переходные характеристики позволяют оценить такие параметры диода, как время жизни, отношение диффузионной длины к ширине базы и т. д.

Характеристика обычного полупроводникового диода при подаче импульса напряжения показывает медленный рост тока со временем и, наоборот, при подаче импульса тока — всплеск напряжения на переднем фронте импульса.

Переходные процессы в диодах, чьи вольтамперные характеристики определяются наличием нескомпенсированного объемного заряда, имеют иной вид: при подаче импульса напряжения наблюдается всплеск тока (²).

Нами изучались переходные процессы в кремниевых диодах, легированных золотом и кобальтом. Удельное сопротивление материала базы *p*-типа составляло десятки *ком см*.

Диоды изготавливались сплавлением алюминиевой проволоочки, тыловой контакт создавался сплавлением золота с 1% сурьмы. Структуры обладали участком отрицательного дифференциального сопротивления.

Интересно отметить, что кинетика переходных процессов изучалась в диодах, в базе которых выполнялось условие

$$\tau_p/\tau_n \ll 1. \quad (1)$$

Параллельно с диодами на основе высокоомного материала изучались переходные процессы в диодах из кремния с $\rho = 15 \text{ ом см}$, при $\tau_p/\tau_n \leq 0,1$.

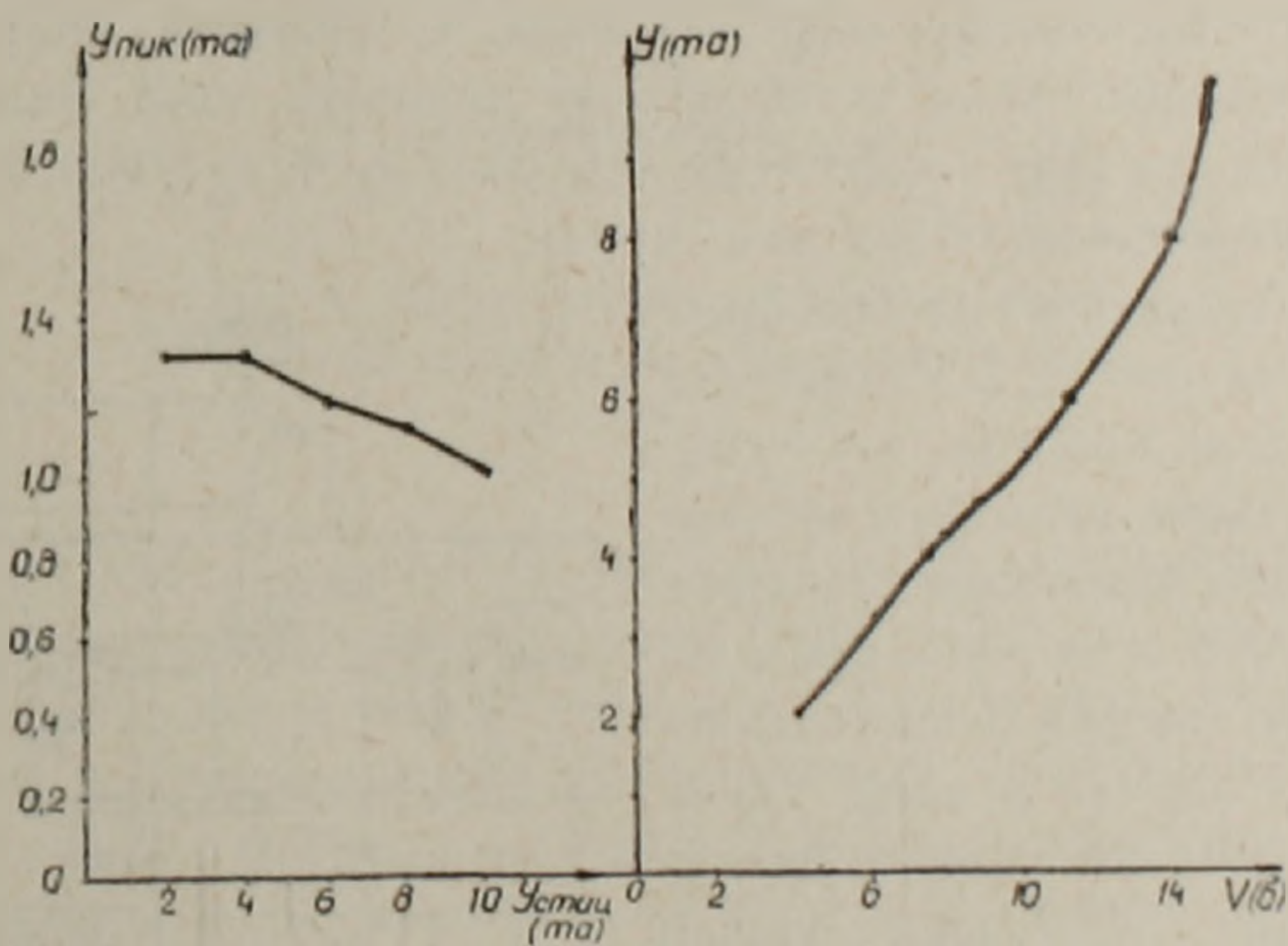
Переходные характеристики имели существенно разный вид. На диодах из высокоомного материала до участка отрицательного сопротивления наблюдался всплеск напряжения. На диодах с низкоомной базой — всплеск напряжения при подаче ступеньки тока.

Времена установления стационарных токов в диодах с высокоомной базой составляли единицы микросекунд. Расчет, проведенный на

основе температурной зависимости постоянной времени установления стационарного тока, в согласии с выводами (²), дал энергетическое положение уровня, ответственного за рекомбинацию электронов—0,52 эв, что неплохо соответствует акцепторному уровню золота в кремнии (малосигнальное время жизни дырок в кремнии, оценивалось порядка 10 нсек.) Эти эксперименты позволяют думать, что на всем участке до отрицательного сопротивления определяющим в поведении вольт-амперной характеристики является некомпенсированный объемный заряд. Расчеты по измеренному на диодных шлифах распределению потенциала действительно указали на наличие некомпенсированного объемного заряда, положительного—за счет опустошения глубоких примесных центров и отрицательного—за счет их заполнения электронами с тылового контакта. Величина объемного заряда сравнима с концентрацией подвижных носителей (электронов) до участка отрицательного сопротивления (ОС).

Сравнивая результаты по кинетике переходной характеристики диодов, изготовленных из низкоомного (15 ом. см) и высокоомного материалов, для которых выполнено условие (1), можно указать, что разный вид их определяется отсутствием объемного заряда в первом случае и наличием его во втором.

Кроме этого, нами исследовалась кинетика установления стационарного тока при наличии постоянного прямого смещения диода в разных точках вольт-амперной характеристики до участка отрицательного сопротивления. Для этого на диод подавалось импульсное напряжение, создающее установившееся значение тока порядка 300 мкА.

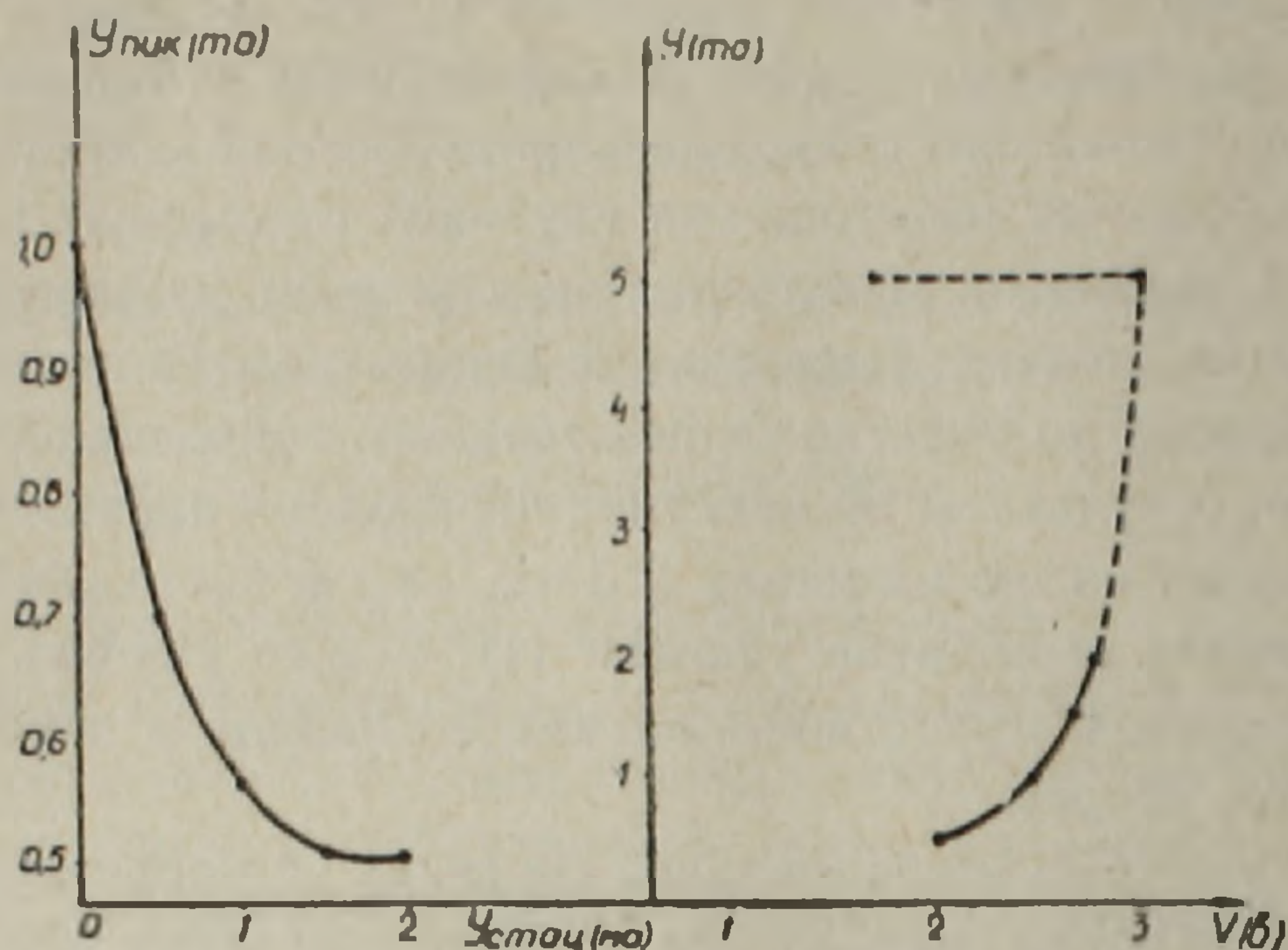


Фиг. 1. а — зависимость амплитудного значения тока диода № 1 от положения рабочей точки; б — исследуемый участок вольт-амперной характеристики того же диода.

Результаты представленные на фиг. 1, 2, показывают значения амплитудного тока стробирующего импульса в зависимости от точки вольт-амперной характеристики. Ясно, что с ростом стационарного тока форма стробирующего импульса приближается к П-образной.

Эти результаты, по-видимому, можно объяснить следующим образом.

Согласно (3) кинетика переходной характеристики, наблюдаемая нами, обязана перераспределению поля в базе диода по мере формирования объемного заряда. Наши эксперименты показывают, что формирования амплитудного значения тока происходит за время, меньшее или равное 10 нсек, в то время как пролетные времена, рассчитанные по из-

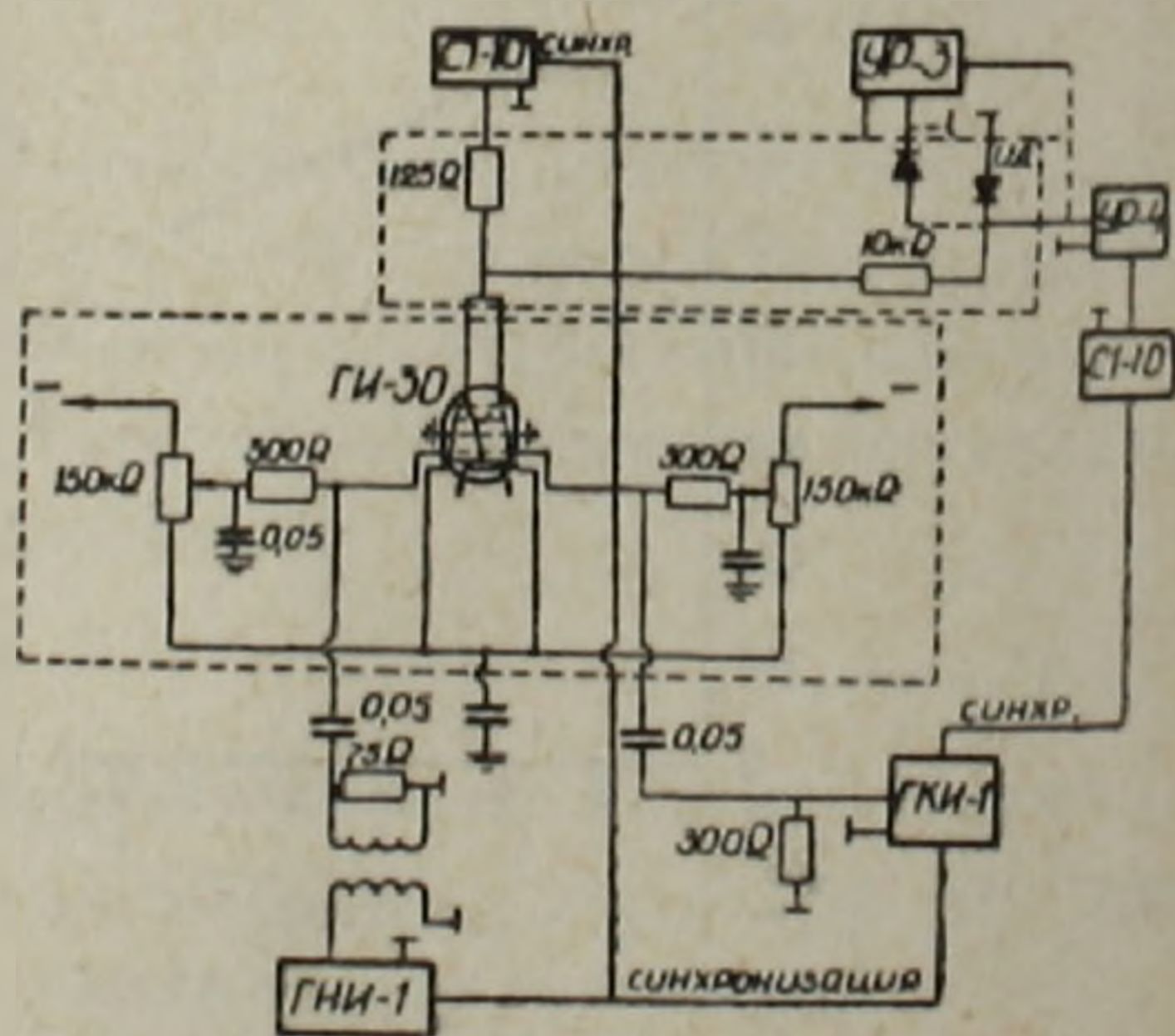


Фиг. 2. а — зависимость амплитудного значения тока диода № 2 от положения рабочей точки; б — исследуемый участок вольтамперной характеристики этого же диода.

меренному стационарному распределению потенциала, более чем в 3—5 раз превосходят время установления пикового тока. Значит, с течением времени средняя напряженность поля в базе уменьшается, благодаря формированию объемного заряда.

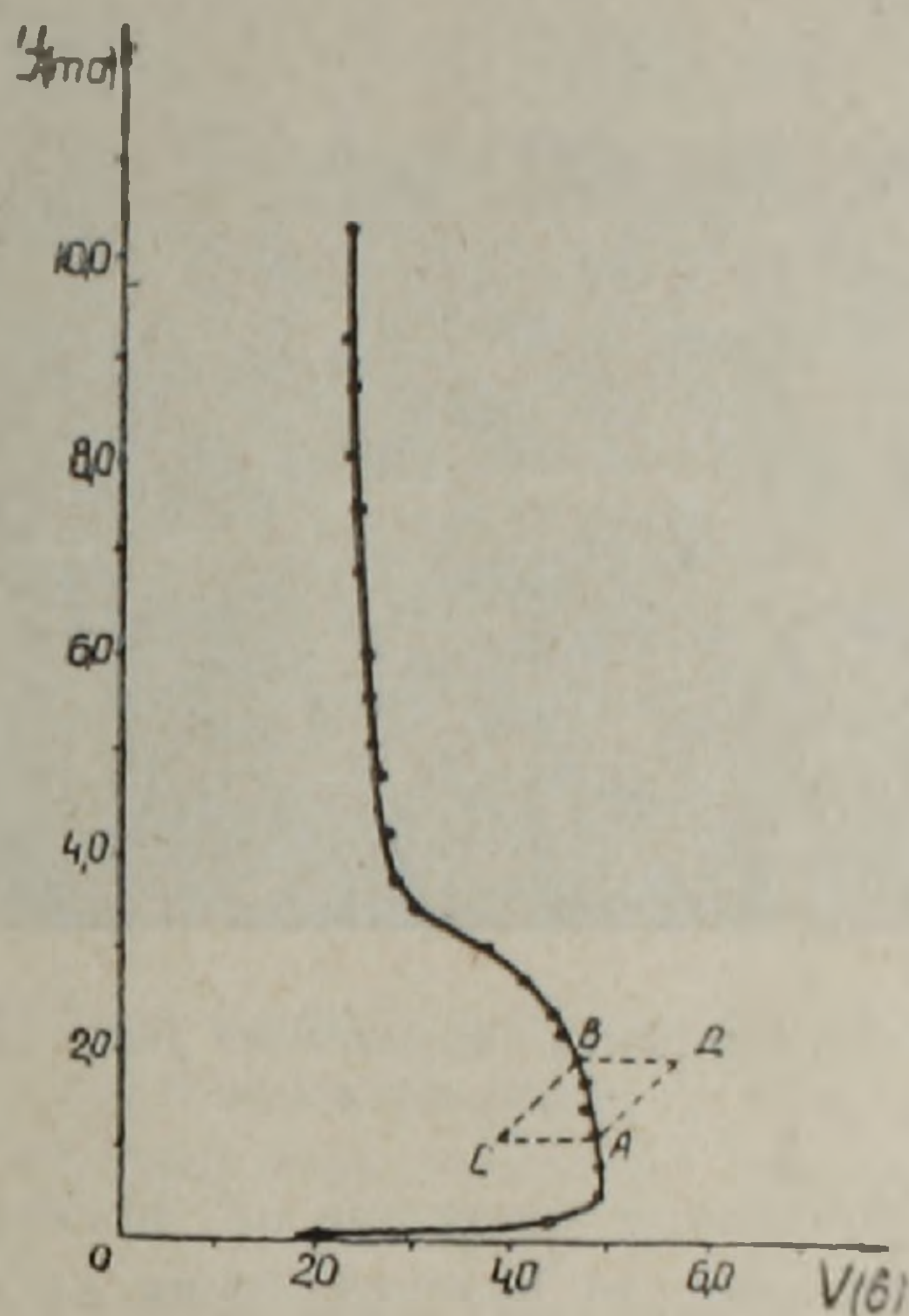
Результаты экспериментов, представленные на фиг. 1, 2, становятся понятными, если принять, что существует тенденция величины объемного нескомпенсированного заряда к насыщению, т. е. в наличии предельной величины нескомпенсированного объемного заряда и даже уменьшении его с ростом тока, приводящем к срыву на отрицательный участок (1).

Изучение переходной характеристики установления напряжения на участке отрицательного сопротивления производилось в режиме генератора тока в схеме, представленной на фиг. 3, следующим образом. Левым тетродом лампы задавалась точка А (фиг. 4) на стационарной вольт-



Фиг. 3. Принципиальная схема исследования переходных процессов.

амперной характеристике, правым тетродом путем увеличения тока через анодную нагрузку производилось смещение рабочей точки из A в B . При подаче запирающего импульса на сетку правого тетрода от генератора ГКИ-1 наблюдался переход рабочей точки из B в A . Аналогично можно было наблюдать кинетику перехода из A в B путем отпирания правого тетрода положительным импульсом напряжения от генератора ГКИ-1.



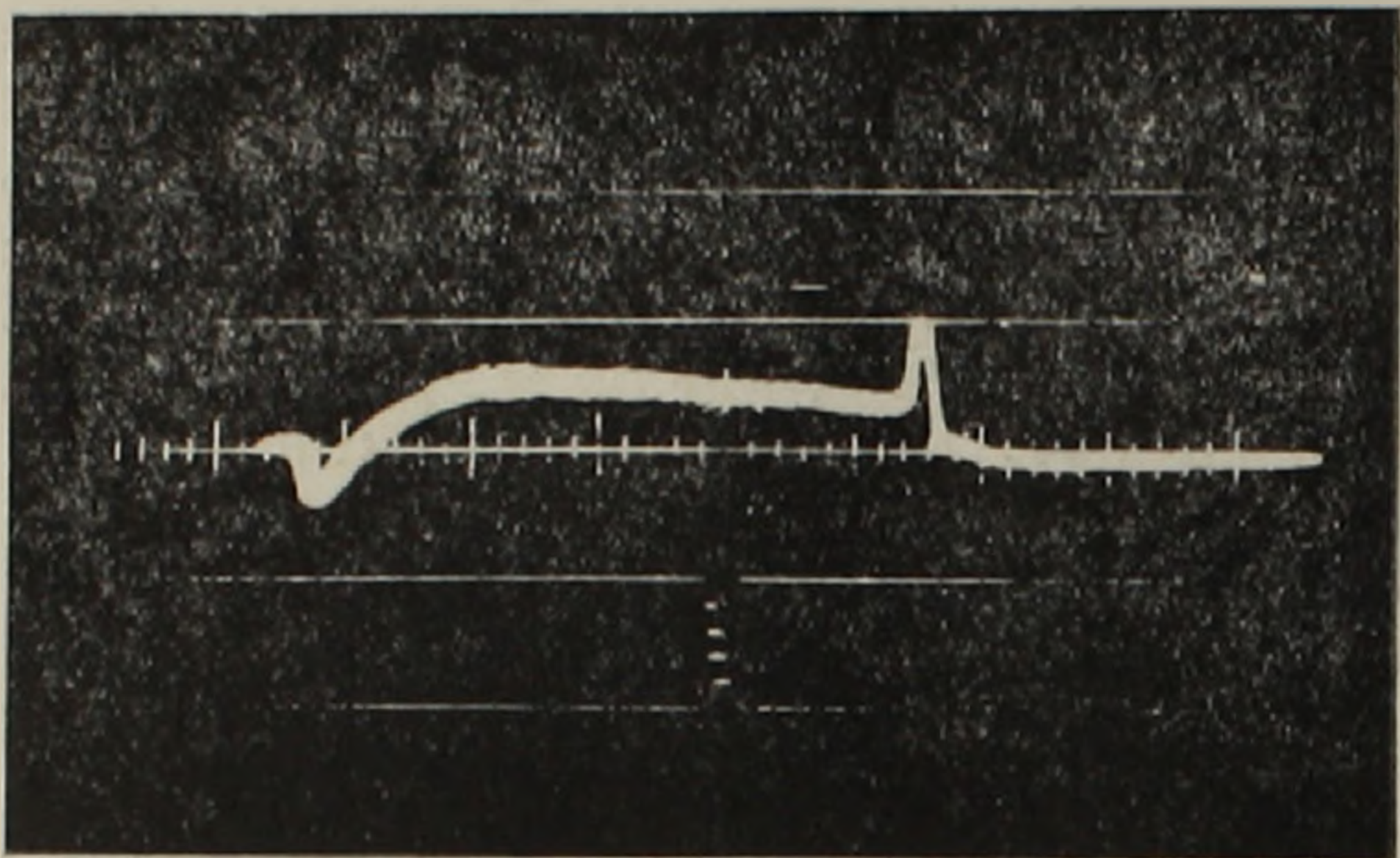
Фиг. 4. Иллюстрация хода рабочей точки при исследовании переходных процессов на участке ОС.

Известно, что на участке ОС по типу своей реактивности диод соответствует индуктивности. Любопытно было выяснить вопрос, обладает ли эта «индуктивность» кроме свойства сдвигать фазу свойством запасать энергию, т. е. развивать ЭДС индуктивного характера в опытах, аналогичных опытам с экстратоками замыкания и размыкания.

С этой целью мы исследовали наличие индуктивной ЭДС, используя шунтирование испытуемого диода низкоомными высокочастотными кремниевыми диодами (время включения 5 30 нсек) фиг. 3. Параллельно испытуемому диоду (ИД) в противоположном направлении включен диод последовательно с входным сопротивлением усилителя УР-3, равным 50 200 ом. Усиление напряжения, выделяемого на входном сопротивлении усилителя УР-3, составляло 70 дБ, так что можно было фиксировать импульсные токи с фронтами порядка 5 нсек. с минимальной амплитудой 10—15 μ а.

В этой же схеме изучалась кинетика спада напряжения на диоде при срыве его из любой точки отрицательного участка в нуль тока с параллельно подключенным диодом и без него. Выключение производилось генератором ГНН-1 за время порядка 6 нсек. Ожидалось, что при условии запаса энергии индуктивного характера, на диоде останется ЭДС при выключении, которая приведет к затягиванию фронта. Шунтирование испытуемого диода снимало бы этот эффект.

Осциллограммы на фиг. 5, 6, иллюстрируют наблюдаемые переходные процессы.



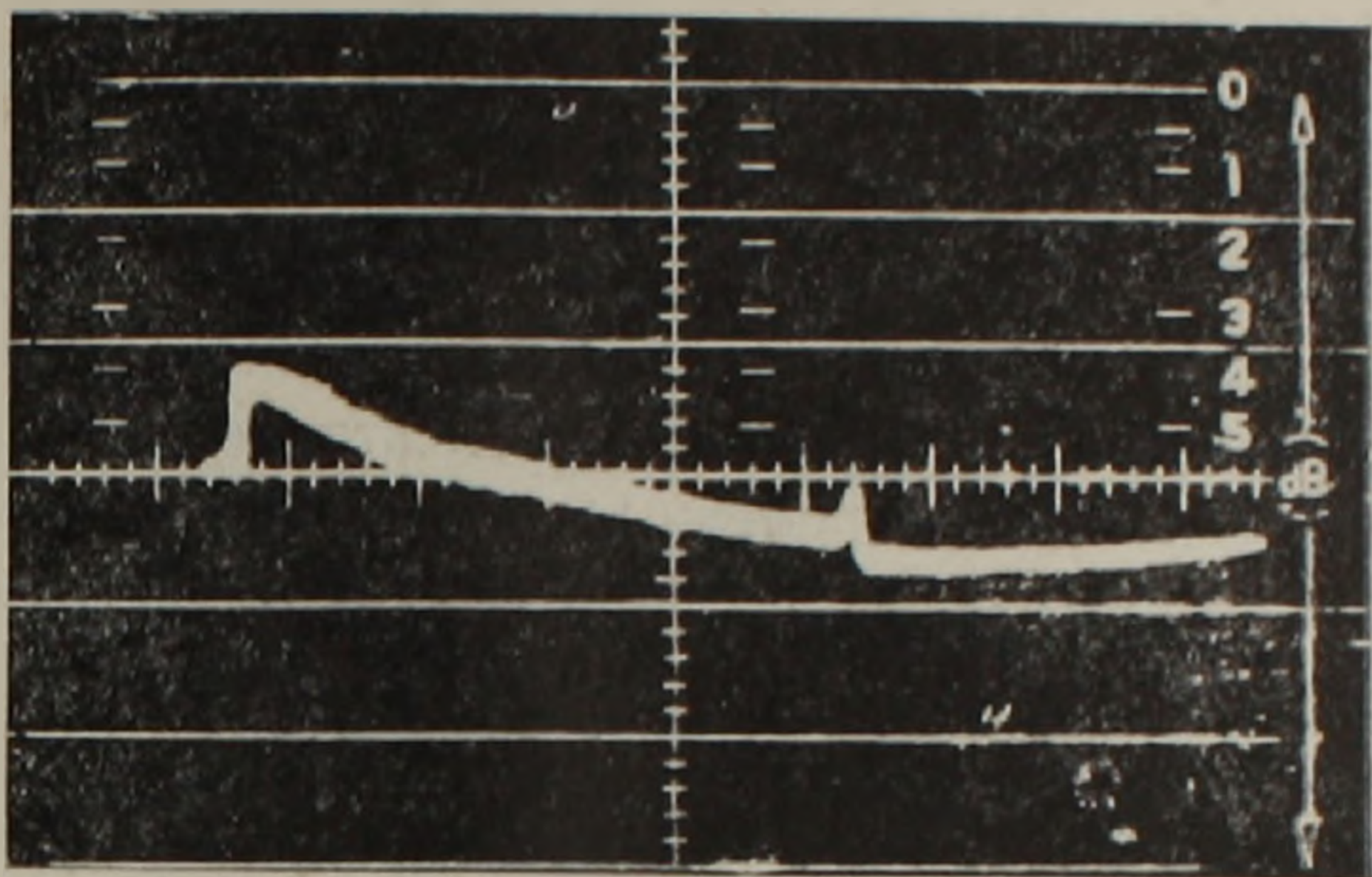
Фиг. 5. Осциллограмма переключения диода из точки *В* в точку *А*.

Поскольку измерительные усилители не пропускают постоянную составляющую напряжения, то нулевая линия на осциллограмме соответствует выбранной стационарной точке: *В*—в случае наблюдения перехода из *В* в *А*, *А*—в случае перехода из *А* в *В*.

Из осциллограммы на фиг. 5 видно, что при выключении диода из точки *В* в *А* процесс перехода происходит инерционно. Напряжение на диоде не растет мгновенно, что соответствовало бы точкам, лежащим правее точки *В* (подъем луча вверх от нулевой линии), а уменьшается, что соответствует переходу в точку, лежащую левее *В* (опускание луча вниз от нулевой линии). Длительность импульса составляла 500 нсек. При наблюдении переходной характеристики включения из *А* в *В* (осциллограмма на фиг. 6) виден всплеск напряжения и затем монотонный спад, оканчивающийся отрицательным выбросом напряжения при переходе из некоторой промежуточной точки между *В* и *Д* в *А*.

Из полученных осциллограмм ясно, что характер переходных процессов носит индуктивный характер: всплеск напряжения при подаче импульса тока и отрицательный выброс напряжения при переключении тока к меньшему значению. Данная «индуктивность» обладает свойством поддерживать ток. Действительно, при выключении из точки *В* диод переходит в нестационарные состояния, которым соответствуют точки, лежащие на кривой *ВСА*; до тех пор, пока диод находится в состоянии с

проводимостью, большей, чем соответствующая точке А, через него и последовательное сопротивление течет несколько больший ток, чем соответствующий установившемуся состоянию (напряжение на анодном сопротивлении устанавливается практически мгновенно при переключении—6 нсек). При импульсном переключении из А в В диод препятствует нарастанию тока.



Фиг. 6. Осциллограмма переключения диода из точки А в точку В.

Наши измерения тока в цепи параллельно включенного испытуемому диода указали на отсутствие его (тока), в то время как измерения с обычными индуктивностями порядка единиц микрогенри показали значительный эффект.

По-видимому, эти результаты дают основание утверждать, что в рассматриваемых диодах накопления энергии, соответствующей индуктивному характеру реактивности, не наблюдается. Диод обладает только свойством индуктивного сдвига фазы. Природа этого явления, как нам кажется, заключается в наличии отрицательного сопротивления и инерционности процессов модуляции и восстановления проводимости после инжекции.

Все перечисленные измерения проводились в криостате при комнатной температуре и температуре сухого льда.

На одном из золотых диодов, время восстановления обратной проводимости которого в диапазоне токов до 5 ма, измеренное по методу определения времени затухания накопленного в базе дырочного заряда, составляло 15—20 нсек ($\tau_p \approx 7-10$ нсек), измерялось время восстановления прямой проводимости на участке ОС путем переключения диода из точки В в А (фиг. 4), лежащих близко друг от друга $\Delta I = I_B - I_A < I_B, I_A$. Данные измерений представлены в табл. 1. Малосигнальное время жизни электронов, для этого диода составляло 300 нсек.

Из таблицы видно, что по мере продвижения влево по участку ОС (рост I прямого) время восстановления уменьшается, достигая 120 нсек при токе ~ 5 ма. Поскольку прямая проводимость нами ассоциируется с

Таблица 1
Время восстановления напряжения
при переключении диода из точки В
в точку А

Ток в точке В (мА)	Ток в точке А (мА)	Время вос- становления (нсек)
1,7	1,4	200
4,1	3,3	150
5,4	4,3	120
9,0	7,0	100
18,0	14,0	70

электронной модуляцией, то данные по ее восстановлению однозначно характеризуют изменение времени жизни электронов с ростом прямого тока через диод. Постоянная времени восстановления прямой проводимости в исследуемом участке вольтамперной характеристики в несколько раз превосходит время жизни дырок. Это подтверждает предпосылку работы ⁽¹⁾ о квазимонополярной проводимости на участке ОС.

Аналогичные результаты были получены и на других диодах.

Выводы. 1. Показано, что до участка ОС в поведении диода существенную роль играет нескомпенсированный объемный заряд.

2. Исследованы переходные характеристики на участке ОС. Показано, что переходные процессы носят «индуктивный» характер. Отмечено отсутствие энергии, соответствующей индуктивному накоплению.

3. Измерено изменение времени жизни электронов с уровнем тока.

Институт радиофизики и электроники
Академии наук Армянской ССР

Ч. П. ՈՂՈՎՅՈՒՆ. Հայկական ՍՍՀ ԳԱ րդրակից-անդամ, Ի. Ռ. ՍԼՏՄԱՆ, Լ. Ս. ԽԱՎԻՆ և
Ս. Վ. ՅՈՒՐԲԱՎՍԿԻ

Բացասական դիմադրությամբ կրեմնիումի դիոդների անցումային բնութագրեր

Ուսումնասիրվում են սակիով ու կորալսով կոմպենսացված դիոդների անցումային բնութագրերը:

Ցույց է տրված, որ մինչև բացասական դիմադրությամբ տեղամասը դիոդի վարքում էական դերը պատկանում է ոչ կոմպենսացված տարածական լիցքին:

Անցողական պրոցեսները կրում են ինդուկտիվ բնույթ: Նշված է ինդուկտիվ կուտակման համապատասխանող էներգիայի բացակայությունը: Չափված են էլեկտրոնների կյանքի տևողությունը և նրա փոփոխումը կախված հոսանքի մակարդակից: Բացատրված է ուղիղ հոսանքի տևումով պայմանավորված սեղանանսային հաճախականության մեծացումը:

ЛИТЕРАТУРА — Գ Ր Ո Վ Յ Ո Ւ Ն Ո Ւ Ք Յ Ո Ւ Ն

¹ Ю. Р. Носов, Полупроводники в науке и технике, вып. 4. ² Мэни, Phys. Rev., 126.6.1980, 1962. ³ Бэр, „Известия АН СССР“, 1960, XXIV, вып. 1. ⁴ Г. М. Авалкьянц, „Радиотехника и электроника“, вып. 10, стр. 2037, 1965.