

ИМПУЛЬСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ $p-n-p^+$ -ДИОДОВ ИЗ КРЕМНИЯ, КОМПЕНСИРОВАННОГО ЦИНКОМ

Г. М. АВАКЬЯНЦ, З. Н. АДАМЯН, В. М. АРУТЮНЯН

Исследуются параметры вольт-амперных характеристик $p-n-p^+$ -структур из кремния, компенсированного цинком, в импульсном режиме. Проведены измерения напряжений и токов срыва в зависимости от длительности подаваемых прямоугольных импульсов, от температуры и светового воздействия. При подаче импульсов напряжения, меньших напряжения срыва, наблюдался длинновременной спад импульсного тока (1,5 мсек и более), который связывается с захватом носителей на глубокие уровни. Приводится качественное истолкование наблюдаемых процессов.

Ранее в [1, 2] сообщалось о высокой чувствительности к свету $p-n-p^+$ -структур, изготовленных из кремния компенсированного цинком, и перспективах использования данных элементов в оптоэлектронике и в качестве приемников слабых световых сигналов.

В данной работе исследуются изменения параметров вольт-амперных характеристик при работе диодов в импульсном режиме, а также некоторые характерные особенности их. Прежде, чем приступить к снятию импульсных характеристик, необходимо было установить инерционность диодов. В режиме большого синусоидального сигнала, достаточного для переключения диодов из состояния с низкой проводимостью в высокопроводящее, вольт-амперные характеристики почти не претерпевали изменений до частот ~ 150 гц. Затем с ростом частоты напряжение срыва падало, и при частоте следования синусоидального сигнала, равной 600 гц, участок отрицательного сопротивления исчезал вообще. На некоторых образцах путем подбора величины нагрузочного сопротивления и частоты подаваемого синусоидального сигнала можно было наблюдать участок с N -образной проводимостью до срыва. На диоды с генератора Г5-7А подавалось импульсное напряжение и изучалась зависимость напряжений срыва диодов от частоты следования импульсов при разных длительностях их. Как и следовало ожидать, максимальная инерционность диодов имеет место при подаче длинных импульсов (2000 мсек). Изменение амплитуды и формы импульсов наблюдалось уже при частоте следования, равной 17—20 гц.

При воздействии на диод короткими импульсами (3 мсек) напряжение срыва начинало уменьшаться с ~ 3 кгц. В дальнейшем, для того, чтобы обеспечивалось восстановление первоначального состояния диодов при любых длительностях импульсов, частота следования во всех последующих измерениях поддерживалась постоянной, равной 10 гц. Времена восстановления, измеренные методом сдвоенных импульсов, — порядка 30—35 мсек [2]. Заметим, что всюду в работе изменения, которые претерпевают токи и напряжения, на несколько порядков больше, чем ошибки эксперимента,

связанные с погрешностями измерений на осциллографе С1-18 и с неидеальной прямоугольностью импульсов генератора Г5-7А.

Из рис. 1 видно, что с увеличением длительности подаваемых импульсов напряжения срыва диодов резко падают. Для сравнения приводится аналогичная зависимость, снятая для кремниевых S -диодов с примесью кадмия (рис. 1, кривая 3). В темноте (кривая 1) напряжения срыва диодов

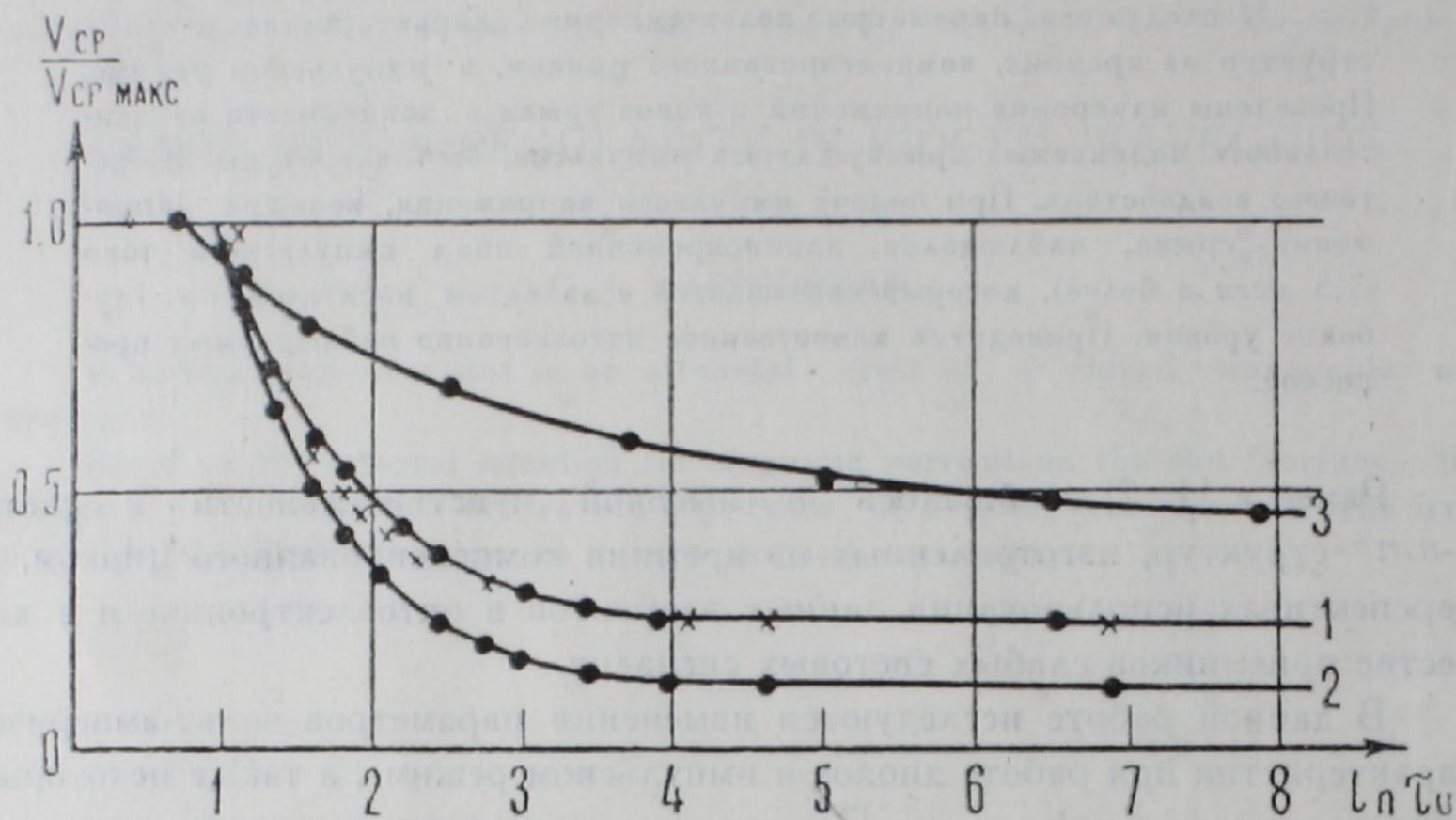


Рис. 1. Полулогарифмическая зависимость напряжения срыва (в относительных единицах) от длительности подаваемых импульсов. Кривые: 1 — темновая, 2 — при 0,3 мкм, 3 — для диодов из $Si < Cd >$.

с примесью цинка падают медленнее, чем при свете (кривая 2). Так, темновое напряжение срыва, соответствующее режиму коротких импульсов, с увеличением длительности импульсов уменьшается в 3,5 раза, в то время, как при освещении диодов световым потоком в 0,6 мкм напряжение срыва уменьшается в 7,6 раза. Аналогичная падающая зависимость имеет место и для токов срыва. Диоды с примесью кадмия практически нечувствительны к свету. Темновой спад напряжения срыва при комнатной температуре описывается эмпирической формулой

$$V_{ср.} = V_0 \frac{\ln \left(\frac{t}{\tau_0} + \frac{\tau}{\tau_0} \right)}{\ln \frac{\tau}{\tau_0}},$$

где V_0 — установившееся значение напряжения срыва, τ — длительность импульсов, τ_0 и t — нормировочные постоянные.

Крестиками на рис. 1 отмечены рассчитанные по формуле точки. Здесь следует оговориться, что указанная выше формула справедлива только для диапазона длительностей импульсов, начинаемого с трех и более мксек. Импульсы длительностью меньше трех мксек не приводят к полному срыву диодов.

Известно [3, 4], что на прямой ветви вольт-амперной характеристики S-диодов из кремния, компенсированного цинком, наблюдаются колебания тока. Такие синусоидальные и близкие к ним колебания присущи и изготовленным нами диодам. Они начинаются со смещений, равных $(0,5—0,8) V_{ср.}$. При слабых световых потоках $(0,3—0,6 \text{ мЛМ})$ колебания начинаются позже $(0,8—0,9) V_{ср.}$, а при световом потоке $\sim 0,9 \text{ мЛМ}$ колебания вовсе исчезают. В режиме генератора тока включение света приводит к исчезновению колебаний. В действительности же при малых световых потоках колебания существуют, только они находятся выше по токам. Частота колебаний у разных диодов разная и находится в пределах $20 \text{ Гц}—10 \text{ кГц}$.

Стационарное значение напряжения срыва не всегда совпадает с установившимся при подаче длинных импульсов (V_0) . Установлено, что стационарное напряжение срыва больше, чем импульсное при длительности импульсов, равной 2 мсек , у тех диодов, у которых частоты вышеуказанных колебаний низкие $(20—40 \text{ Гц})$. В остальных случаях стационарное значение напряжения срыва либо меньше, либо равно установившемуся импульсному значению.

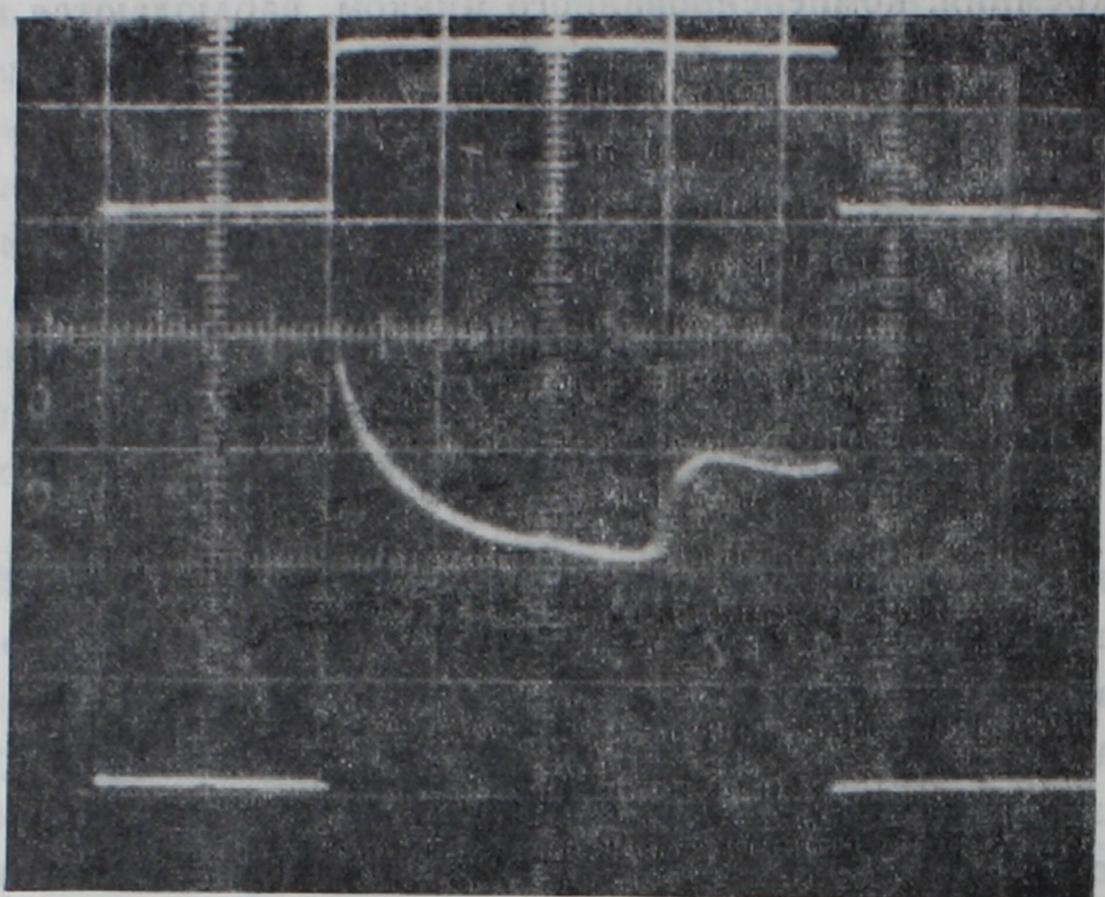
Измерения зависимостей напряжений и токов срыва от длительности импульсов проводились в диапазоне температур $173—300^\circ\text{К}$. Выяснилось, что при работе в режиме коротких импульсов $(\tau_{и} = 3 \text{ мкс})$ диоды гораздо более термостабильны, чем в стационарном режиме. Изменение напряжения срыва в импульсном режиме в указанном диапазоне температур относительно значения $V_{ср.}$ при 300°К составляет 26% , в то время, как в стационарном режиме это изменение достигает $77—80\%$. Этот факт представляется важным, так как в стационарном режиме токи срыва слабо изменяются, а остаточные токи и напряжения диодов не зависят от температуры. Изменения претерпевают только напряжения срыва [1, 5].

В режиме генератора напряжения, как и в [6, 7], наблюдается рост и спад тока (рис. 2, 3, нижние кривые). С увеличением смещения спад растет по времени и току, а сам пик сдвигается вправо. Начиная со смещений $\sim 0,4 V_{ср.}$ спустя $1,5 \text{ мсек}$ после начала импульса наблюдается рост тока с дальнейшим медленным спадом его (рис. 2а).

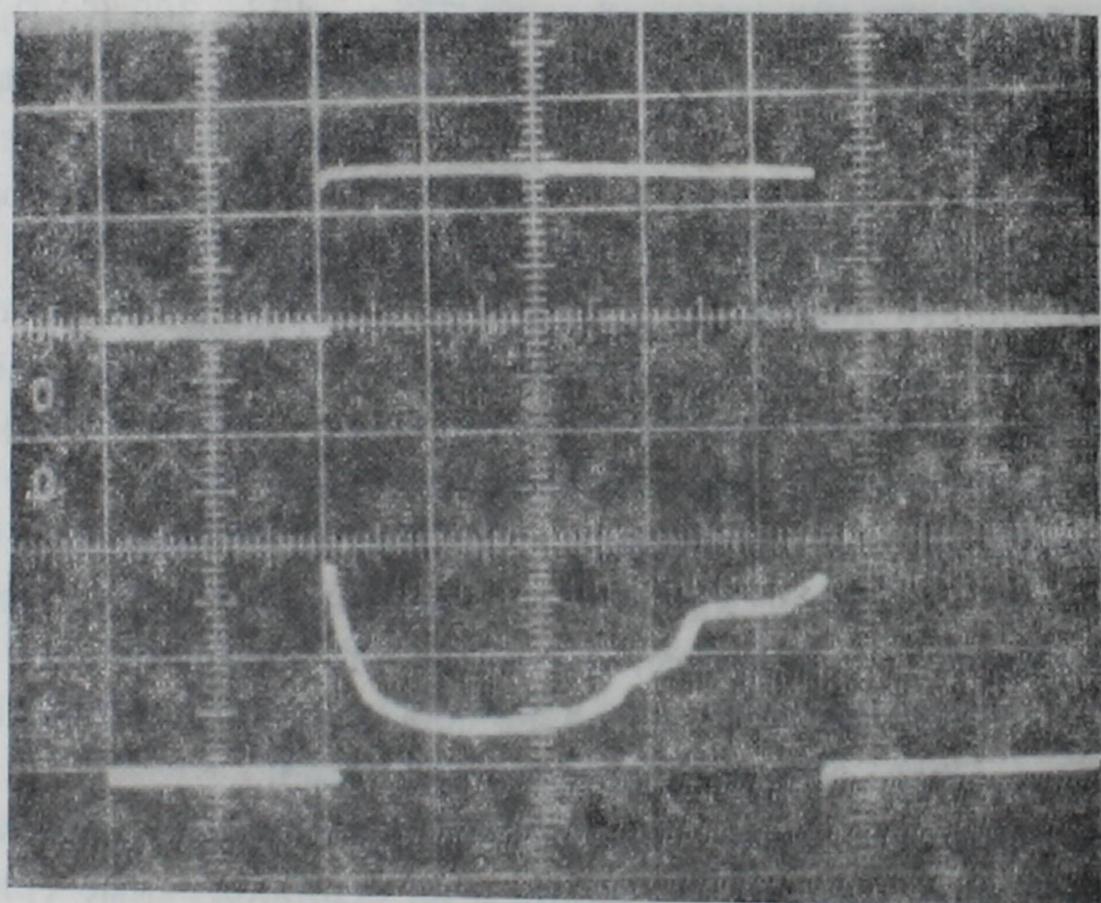
С ростом смещения точка, соответствующая началу увеличения тока, сдвигается влево (рис. 2б, г). Это видно и на осциллограмме (рис. 3а), где представлены токи и напряжения после срыва. С включением слабого светового потока $\sim 0,3 \text{ мЛМ}$ излом в кривой импульса тока исчезает, пик смещается вправо, а средний уровень токов растет (рис. 3б, средняя кривая).

Форма импульса тока от диода к диоду может несколько отличаться. Разнообразие кривых тока объясняется различными длинами баз и качеством тылового контакта. Но для всех диодов характерны большие времена спада от 200 мксек до 2 мсек и более.

Разность между установившимся и максимальным токами с понижением температуры растет и достигает $1—1,5 \text{ ма}$. Время спада тока с понижением температуры также растет. Действие параллельно подключенной емкости начинает проявляться со значений порядка единиц микрофард.



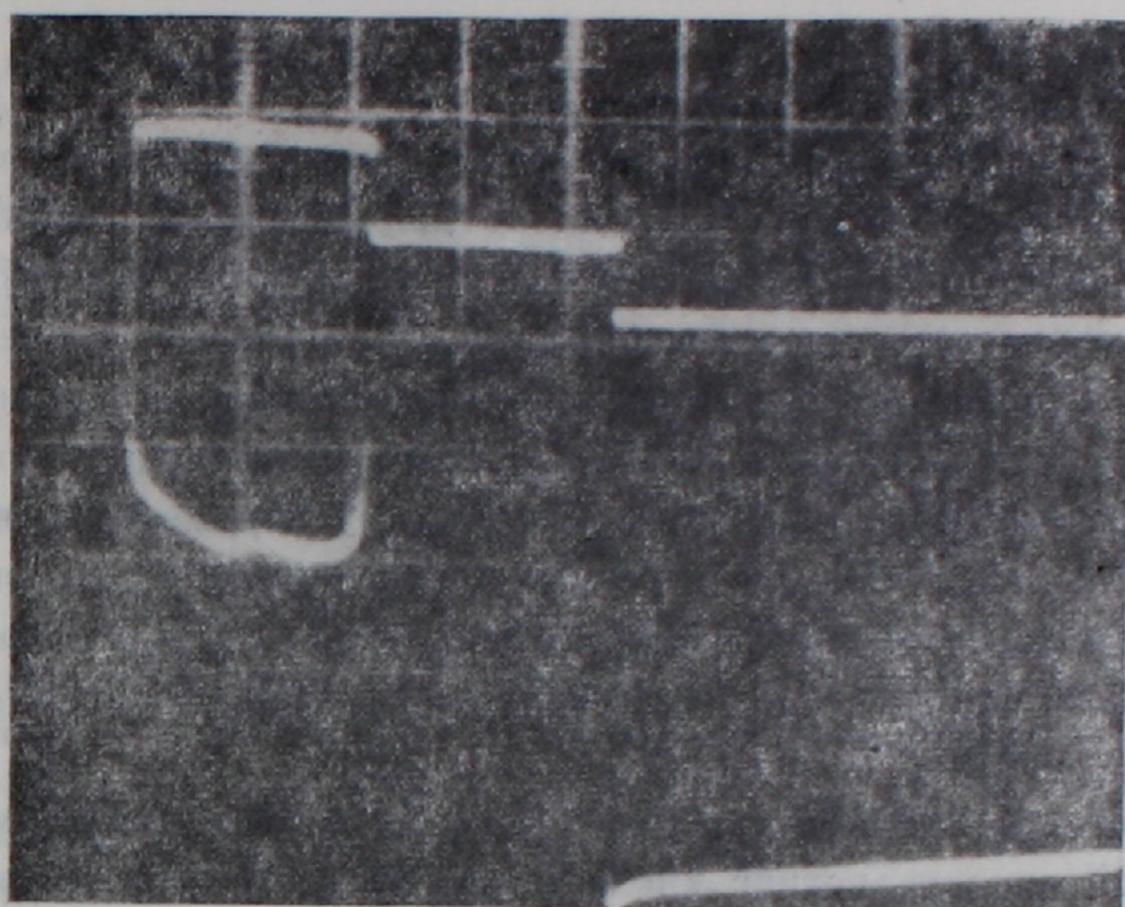
а



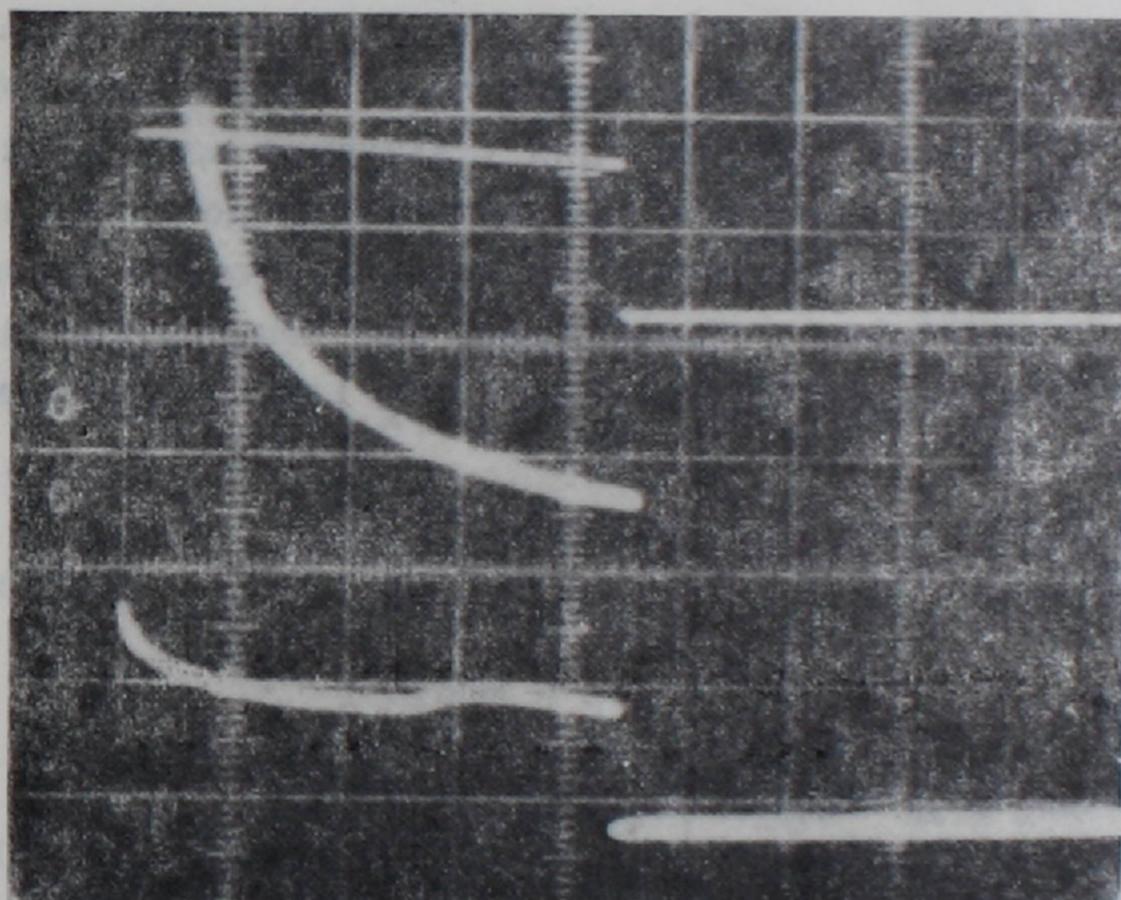
б

Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения (верхние кривые) и токов (нижние). Масштаб по горизонтали: 1 дел. — 0,5 мсек; а) масштаб по V : 1 дел. — 5 в, по J : 1 дел. — 0,04 ма; б) масштаб по V : 1 дел. — 12 в, по J : 1 дел. — 0,2 ма.

В работе [7] утверждается, что время спада тока диодов, изготовленных из кремния, компенсированного Ag , Au , Ni , Co и Cd (из материалов, время жизни в которых отличается друг от друга более чем на порядок), примерно одинаково (10 мсек) и появление максимума тока объясняется уменьшением биполярной дрейфовой подвижности во времени по мере установления стационарного заполнения глубоких уровней. Результаты на-



а



б

Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения (верхние кривые) и токов (нижние и средняя на б). Масштаб по горизонтали: 1 дел. — 0,5 ма; а) масштаб по V : 1 дел. — 12 в, по J : 1 дел. — 0,12 ма; б) масштаб по V : 1 дел. — 5 в, по J : 1 дел. — 0,12 ма.

ших измерений свидетельствуют о том, что для диодов из кремния с примесью цинка спад тока со временем существенно длиннее (на три порядка), чем спад тока у диодов из кремния с другими примесями.

Мы считаем, что спад тока в нашем случае связан с захватом носителей на уровни [6], а большие времена — следствие малых сечений захвата электронов на однократно ионизированный атом цинка ($10^{-18} - 10^{-20}$ см² [8, 9]).

В рамках развитой в [10] теории становится понятным поведение импульсного тока со временем (рис. 2). Вначале, при умеренном уровне ин-

жекции $p < p_3 \equiv \frac{p_1 \theta_2}{a \theta_1}$ и время жизни дырок в базе постоянно. Спад тока в этом случае — экспоненциальный. В течение последующего времени в базе накапливается достаточное количество дырок, чтобы в большей части последней выполнялось бы условие $p > p_3$. Тогда в этой части времени жизни τ_p и τ_n не являются уже постоянными величинами, более того, они уменьшаются с ростом накопления дырок и электронов, что приводит к изменению зависимости спада тока со временем (экспоненциальная зависимость сменяется на обратно пропорциональную). Кроме того, в изменение закономерности спада тока со временем определенный вклад вносят зависимости сечения захвата электронов на однократно отрицательно заряженные акцепторные центры [8] и подвижности электронов от напряженности электрического поля.

В дальнейшем, начиная с $V = 0,4 V_{\text{ср}}$ (согласно опытным данным), на импульсной характеристике диода появляется новый участок с весьма слабым наклоном. Переход к этому участку сопровождается небольшим возрастанием тока, что, по всей вероятности, связано с перезарядкой верхнего акцепторного уровня и забросом электронов из него в зону проводимости. Далее с ростом приложенного импульса напряжения в базе, согласно модели [10], создаются условия для увеличения времени жизни дырок вблизи p - n -перехода и область с увеличенным временем жизни входит в базу, что приводит к полной раскомпенсации акцепторных уровней и формированию отрицательного сопротивления. На импульсной характеристике свидетельством этого является резкий рост импульсного тока в момент срыва (рис. 2б, 3а).

Институт радиофизики и электроники
АН АрмССР

Поступила 10.II.1974

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Г. М. Авакьянц и др. Микроэлектроника, 3, 49 (1974).
2. A. T. Maher, B. G. Streetman, N. Holonyak, Jr. IEEE Trans., ED-16, 963 (1969).
3. M. M. Blouke et al. Sol. St. Electronics, 13, 337 (1970).
4. Л. М. Капитонова и др. ФТП, 6, 1779 (1972).
5. Г. М. Авакьянц и др. ДАН АрмССР, 52, 76 (1971).
6. И. Р. Альтман. Автореферат канд. диссертации, ЕГУ, Ереван, 1968.
7. В. К. Григорьев и др. ФТП, 4, 973 (1970).
8. Б. В. Корнилов. Сб. Физика электронно-дырочных переходов и полупроводниковых приборов, Изд. Наука, 1969, стр. 319.
9. A. F. Sklensky, R. H. Bube. Phys. Rev., 6, 1328 (1972).
10. З. Н. Адамян, В. М. Арутюнян. Изв. АН АрмССР, Физика, 9, 484 (1974).

ՅԻՆԿՈՎ ԿՈՄՊԵՆՍԱՑՎԱԾ ՍԻՆՏԻՈՒՄԱՅԻՆ S-ԵՐԿԷԼԵԿՏՐՈՆԵՐԻ
ԻՄՊՈՒԼՍԱՅԻՆ ԲՆՈՒԹԱԳԾԵՐԸ

Գ. Մ. ԱՎԱԳՅԱՆՑ, Զ. Ն. ԱԳԱՄՅԱՆ, Վ. Մ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

Հետազոտված են ջինկով կոմպենսացված սիլիցիումային p - n - n^+ ստրուկտուրաների վառ-
ամպերային բնութագրերի սլարամետրերը իմպուլսային սեծիմում: Ուղղանկյուն իմպուլսների

տևողությունից, ջերմաստիճանից և լույսի ազդեցությունից կախված կատարված են խզման լարման և հոսանքի շափումներ: Երբ իմպուլսի լարումը փոքր է խզման լարումից, դիտվում է իմպուլսային հոսանքի երկարատև անկում (1,5 և ավելի միկրովարկյան), որը բացատրվում է հոսանքակիրների գրավումով խորը մակարդակների վրա, ընդ որում հոսանքի ժամանակային էքսպոնենցիալ անկումը փոխարինվում է հակադարձ համեմատականի: Բերվում է դիտվող երկվույթների որակական մեկնաբանությունը:

PULSE RESPONSE OF ZINC COMPENSATED SILICON S-DIODES

G. M. AVAKYANTS, Z. N. ADAMYAN, V. M. HARUTUNYAN

The parameters of VC characteristics of $p-n-n^+$ -zinc compensated silicon-structures are studied in pulsed conditions. The breakdown voltage and current were measured as functions of the duration of rectangular pulses applied, the temperature and the illumination effects as well. The slow fall-off of pulsed current at the application of voltage pulses lesser than the breakdown voltage was observed. The qualitative interpretation of observed phenomena is proposed.