

ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОВЫХ СВОЙСТВ И НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ КРЕМНИЯ ЛЕГИРОВАННОГО КАДМИЕМ ($Zn\ 10^{-2}\%$).

Г. М. АВАКЬЯНЦ, Э. Н. АДАМЯН, Р. С. БАРСЕГЯН, С. А. ТАРУМЯН

Экспериментально исследовалось влияние температуры на токи срыва диодов, а также их ВАХ от температуры до срыва. Исследовались также шумовые свойства диодов.

Установлены законы изменения амплитуды и полосы частот колебаний от тока при разных температурах. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с теорией [1, 2].

Известно, что S -диоды, изготовленные из компенсированных полупроводников, обладают рядом особенностей. К числу их относятся наличие шумовых и релаксационных колебаний в прямой ветви статической вольт-амперной характеристики (ВАХ). Изучение этих колебаний несомненно представляет большой практический интерес.

Нами приводятся результаты исследований шумовых свойств и некоторых особенностей температурных ВАХ S -диодов из кремния с примесью кадмия ($Zn\ 10^{-2}\%$), а также сопоставление теоретических данных с экспериментами.

Исследовались два типа диодов: для первого соблюдалось условие $N_A < N_D$ (n -тип), а для второго — $N_A > N_D$ (p -тип). Удельное сопротивление материала после компенсации для обоих типов варьировалось в пределах от 30 до 40 $ком \cdot см$. Технология изготовления диодов подробнее изложена в [3].

1. Статическая ВАХ диодов от температуры

Проводилось измерение ВАХ в достаточно широком интервале температур $-70^\circ - +100^\circ C$ обоих типов диодов.

У диодов с базой p -типа наблюдался минимум в зависимости напряжения срыва (V_{cr}) от температуры [3]. Ход температурной зависимости V_{cr} — обычный для относительно низких температур, т. е. с увеличением температуры V_{cr} падает. С дальнейшим ростом температуры тепловой заброс электронов с валентной зоны на глубокий уровень усиливается, что приводит к изменению кинетики уровня и, соответственно, хода температурной зависимости V_{cr} [2]. Определялись законы изменения ВАХ до срыва во всей области температур по наклонам характеристик, построенных в логарифмическом масштабе. На рис. 1 кривая 1 изображает ход зависимости $n(T)$, где n — показатель степени в законе $J \sim V^n$, рассчитанный для области, лежащей между

точкой срыва и точкой на ВАХ, лежащей на порядок ниже точки срыва по току. Кривая 2 из того же рисунка показывает изменение n для точек, лежащих в области ВАХ от 0 и на порядок выше по току.

На рис. 2 представлены зависимости тока срыва от температуры согласно опытным данным и теории (кривая 2). Значительный интерес представляет уменьшение тока срыва с понижением температуры. Согласно развитой теории [4] это связано с уменьшением тепловых за-

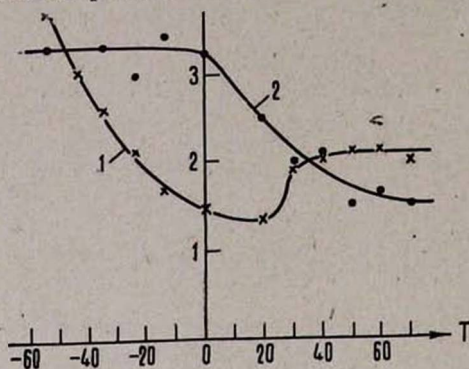


Рис. 1.

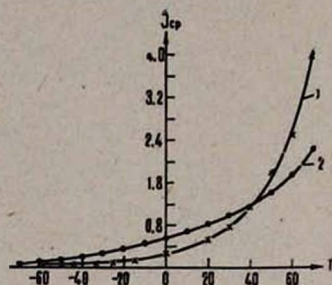


Рис. 2.

бросов с валентной зоны на глубокий уровень, что облегчает появление срыва и снижает порог по току.

Из расчета [4] $J_{cr} \sim e^{-\frac{E_L}{2kT}}$, где E_L — положение уровня, отсчитанное от потолка валентной зоны.

2. Исследование амплитуды и спектра НЧ шумов от температуры

У данных диодов до участка отрицательного сопротивления (ОС) наблюдаются колебания тока как релаксационного, так и шумового характера. На участке ОС шумовые колебания исчезают и начинаются релаксационные. С выходом же диода на участок „вертикали“ исчезают и эти колебания. Переход релаксационных колебаний в шумовые наблюдался на анализаторе спектра С4-8. При комнатной температуре, с ростом уровня инжекции сначала возникают релаксационные колебания одной определенной частоты. Затем появляется вторая гармоника этих колебаний, третья и т. д. При некотором определенном уровне инжекции эти релаксационные колебания превращаются в шумовые. Проводились измерения среднего значения амплитуды и спектра шумов. Величина средней амплитуды шумов измерялась с помощью осциллографа СИ-13А. На рис. 3 представлена зависимость амплитуды шумов от тока смещения при разных температурах. Начиная с комнатных температур и выше, амплитуда с ростом тока возрастает. При низких температурах этот рост носит более резкий характер. Зависимость $A(J)$ носит линейный характер для токов, близких к J_{cr} .

Величина средней амплитуды шумов достигает трех вольт. При температурах $+80^\circ - +90^\circ\text{C}$ участок ОС исчезает, но шумы имеют

место на всей ВАХ, начиная с первоначальной точки возникновения колебания. При отрицательных температурах шумовые колебания переходят в релаксационные с большой амплитудой, достигающей 15 вольт. Этот переход для разных диодов наблюдается при разных температурах, но все эти температуры лежат в области от 0 до -20°C .

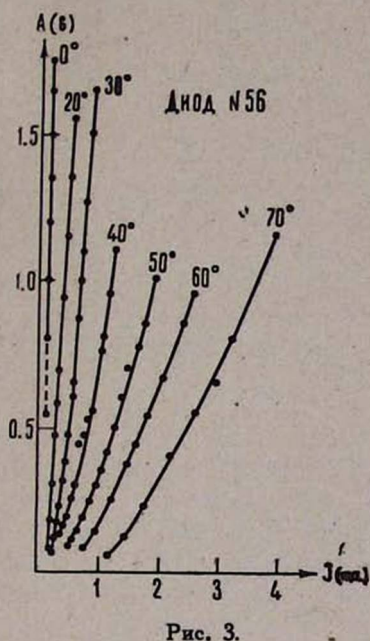


Рис. 3.

Исследовалось также влияние параллельно присоединенной к диоду емкости на амплитуду шумов при разных токах. Как видно из рис. 4а, с увеличением емкости амплитуда шумов падает приблизительно на порядок и кривая $A(C)$ выходит на участок насыщения при $C = (6-8) \cdot 10^3$ пф.

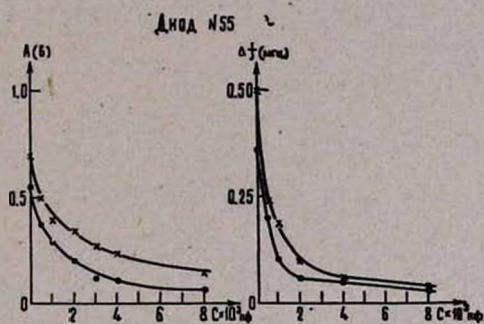


Рис. 4.

Далее исследовался частотный спектр шумов в зависимости от смещения на диоде и температуры (рис. 5а). С ростом тока наблюдается расширение полосы частот, которая достигает какого-то максимального значения, и с последующим увеличением тока — сужается. Это происходит за счет появления и исчезновения высших частот полосы, причем, такое изменение полосы частот сопровождается изменением средней амплитуды шумов на всем частотном диапазоне. При температурах выше 50°C такой пик в зависимости $\Delta f(J)$ исчезает. Сначала с повышением тока смещения происходит резкое расширение полосы частот, которая затем переходит в насыщение, т. е. с дальнейшим увеличением тока ширина полосы частот остается постоянной. С повышением температуры спектр колебаний заметно расширяется. Следует отметить, что максимум в зависимости $\Delta f(J)$ исчезает и при отрицательных температурах, где полоса частот сужается и шумовые колебания переходят в релаксационные (рис. 5б, пунктирная линия), амплитуда нижних частот возрастает.

Подключение параллельной емкости уменьшает ширину полосы частот (рис. 4б).

Следует отметить, что шумы наблюдаются как у диодов с базой p -типа, так и у диодов с базой n -типа, в отличие от [6], где „шумя-

шими" считались только диоды с базой p -типа. Амплитуда шумовых колебаний диодов с базой n -типа небольшая, порядка 15–20 mV .

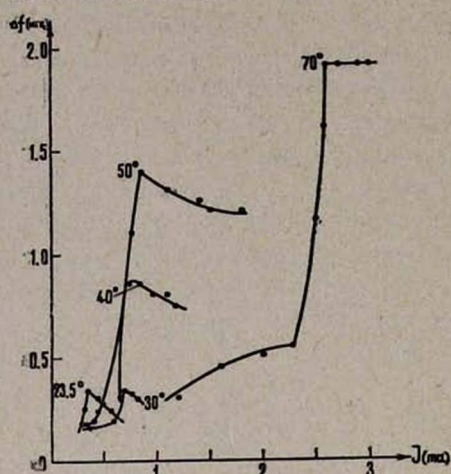


Рис. 5а.

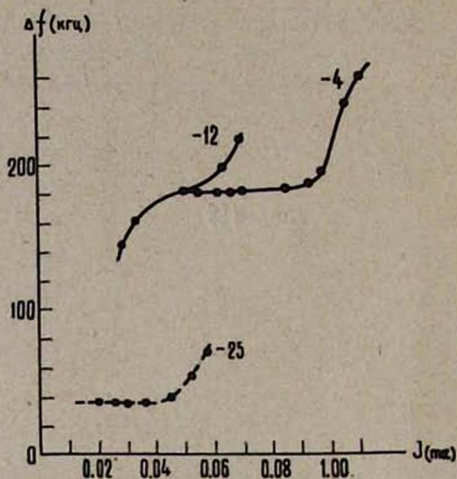


Рис. 5б.

3. Сопоставление теории с экспериментом

Изложенные результаты по шумам находятся в качественном согласии с теорией [1], согласно которой наблюдаемые шумы являются следствием возникновения генерационно-рекомбинационных волн в полупроводнике, содержащем глубокие уровни. Расчеты, проведенные специально для случая, когда глубокий, компенсирующий уровень лежит вблизи потолка валентной зоны, показывают, что шумы при росте тока должны начинаться с возникновения отдельных гармонических колебаний, имеющих циклическую частоту

$$\omega_c = \sqrt[4]{\theta \frac{p_1}{n_0}} \sqrt[4]{2 \frac{p_0^0 N - \frac{p_1}{N} n_0^2}{N^2}} \nu_p. \quad (1)$$

Здесь $\theta = \frac{\langle v_n \sigma_n \rangle}{\langle v_p \sigma_p \rangle}$, v_n и v_p — тепловые скорости электронов и дырок, σ_n и σ_p — их сечения захвата на глубокий уровень, p_1 — концентрация дырок в валентной зоне, когда уровень Ферми совпадает с глубоким уровнем, n_0 — стационарная концентрация электронов.

Далее, $p_0^0 = p_1 \frac{N - N_q}{N}$, где N — концентрация глубоких акцепторных уровней, N_q — концентрация мелких доноров.

$V_p = \frac{1}{\beta_p N}$, где β_p — коэффициент рекомбинации дырок, $\langle \rangle$ знак усреднения по скоростям.

В дальнейшем с ростом тока образуется целый спектр гармонических колебаний с беспорядочно распределенными фазами и ампли-

тудами. Максимальная и минимальная частоты этого спектра даются соотношениями:

$$\omega_{\max} = \sqrt{2 \frac{p_1}{n_0} \frac{p_0^0 N - \frac{p_1}{N} n_0^2}{N^2}} \gamma_p, \quad (2)$$

$$\omega_{\min} = \sqrt{2 \theta \frac{p_0^0 N - \frac{n_1}{N} n_0^2}{N^2}} \gamma_p. \quad (3)$$

Из (1, 2, 3) видно, что частота ω_c лежит между частотами $\omega_{\max}$ и $\omega_{\min}$, так как при выводе этих соотношений было принято, что $p_1 > \theta n_0$. Другими словами, согласно данной теории спектр шумов формируется за счет возникновения как новых низкочастотных, так и высокочастотных колебаний по сравнению с частотой первоначального колебания (1).

Из (2), (3) следует, что

$$\frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} = \sqrt{\frac{p_1}{\theta n_0}}. \quad (4)$$

Отсюда следует, что при постоянном токе ($n_0 \sim \text{const}$) с ростом температуры спектр расширяется. Это обстоятельство также отвечает опытным данным. За первоначальным расширением полосы шумов с ростом тока, следует, как видно из (1), ее сужение (с увеличением $n_0 \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}$ падает).

Находится в согласии с экспериментом и тот факт, следуемый из (1), (2) и (3), что с ростом тока колебания исчезают. Это происходит при

$$n_0^2 = \sigma_0 N q^2. \quad (5)$$

Расчет в [1] был проведен в приближении однородного распределения носителей, что отличается от опытных условий, однако, хорошо видно, что основные качественные закономерности правильно передаются теорией.

Остановимся еще на влиянии параллельно подключенной к диоду емкости на амплитуду и спектр шумов (рис. 4а, б). Действие емкости может быть понятно, если заметить, что наши диоды представляют из себя индуктивные элементы. Согласно [2], у них также имеется отрицательное динамическое сопротивление. Все это свидетельствует о том, что при параллельном присоединении к диоду емкости у нас образуется колебательный контур, который проявляет свое влияние на шумов в виде подавления их амплитуды.

В заключение авторы выражают благодарность Манукяну А. за оказание помощи при оформлении работы.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Г. М. Авакьянц, ДАН АрмССР, 48, 4 (1969).
2. Г. М. Авакьянц, Изв. АН АрмССР 4, 380 (1969).
3. Г. М. Авакьянц, Э. Н. Адамян, Р. С. Барсегиан, С. А. Тарумян, ДАН АрмССР, 49, 1, 24 (1969).
4. Г. М. Авакьянц, В. М. Арутюнян, Изв. АН АрмССР, 4, 5, 318 (1969).
5. Г. М. Авакьянц, В. М. Арутюнян, ДАН АрмССР, 46, 6, 228 (1968).
6. Ю. А. Абрамян, Автореферат канд. диссертации, Ереван (1969) ЕГУ.

**ԿԱԴՄԻՈՒՄՈՎ ($Zn\ 10^{-2}\%$) ՄԻԱԽԱՌՆՎԱԾ ՍԵԼԻՑԻՈՒՄԱՅԻՆ ԴԻՈԴՆԵՐԻ
ԱՂՄԿԱՅԻՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԵՎ ՎՈՒՏԱՄՊԵՐԱՅԻՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐԻ
ՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ԿԱԽՎԱԾՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇ ՅՈՒՐԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ**

Գ. Մ. ԱՎԱԳՅԱՆՑ, Զ. Ն. ԱԴԱՄՅԱՆ, Բ. Ս. ԲԱՐՍԵԳՅԱՆ, Ս. Ա. ԹԱՌՈՒՄՅԱՆ

Փորձականորեն հետազոտված են դիոդի խզման հոսանքի և լրտամպերային բնութագրի միջև խզումը ընկած մասի փոփոխման օրինաչափության շերմաստիճանային կախումը:

Հետազոտված են նաև դիոդների աղմկային հատկությունները: Որոշված են տառանումների ամպլիտուդայի և հաճախությունների շերտի փոփոխման օրենքները հոսանքից՝ տարբեր շերմաստիճանների դեպքում: Ստացված արդյունքները համապատասխանում են տեսական հաշվումներին [1, 2]:

NOISY PROPERTIES AND SOME PECULIARITIES OF TEMPERATURE DEPENDENCE OF VOLTAGE-CURRENT CHARACTERISTICS OF DIODES, MADE OF SILICON DOPPED WITH CADMIUM ($Zn\ 10^{-2}\%$)

G. M. AVAKIANTS, Z. N. ADAMIAN, R. S. BARSEGIAN,
S. A. TARUMIAN

Effect of temperature on the breakdown currents of diodes as well as their VA characteristics at temperatures prior to breakdown are experimentally studied. The noisy properties of diodes are also discussed. The laws of changes in the amplitude and the frequency range, depending on current at various temperatures, are found. The results obtained are in good agreement with the theory [1, 2]: