

УДК 621.382.2

Член-корреспондент АН Армянской ССР Г. М. Авакьянц, Ю. А. Абрамян,
В. И. СерагоСтатистические исследования вольт-амперных характеристик
диодов с примесью цинка

(Представлено 14/XII 1967)

В последние годы заметно возросло исследование полупроводниковых приборов с S-образной ВАХ, в базе которых имеются примесные центры с глубоколежащими уровнями (¹⁻³). Интерес к таким приборам связан с перспективной возможностью их применения.

При изготовлении таких приборов немаловажную роль играет выбор компенсирующей примеси, поскольку механизм формирования и поведение ВАХ определяется положением уровня и параметрами примесного центра.

В данной работе проводятся исследования кремния и диодов компенсированных кадмием с примесью цинка ($Zn \sim 10^{-2}\%$). Для исследования использовали кремний *n*-типа с исходным удельным сопротивлением $\rho_{исх} \sim 10, 19, 30, 50$ и 200 ом см. Разброс по $\rho_{исх}$ не превосходил 2.

Пластины кремния после соответствующей обработки (травления, промывки и сушки) вместе с навеской кадмия запаивались в кварцевые ампулы при вакууме 10^{-4} мм Hg.

Отжиг пластин производился при температуре $1100-1200^\circ\text{C}$ в течение 2—3 часов.

После диффузии пластины кремния шлифовались с обеих сторон (по 50 микрон), поскольку концентрация легирующего элемента по поверхности была больше (меньше), чем в глубине, в зависимости от скорости охлаждения кристаллов. Удельное сопротивление компенсированного материала измерялось четырехзондовым методом и составляло $10-80$ ком см.

С целью выявления положения уровней, ответственных за компенсацию, измерялись температурные зависимости ρ_k , соответственно для компенсированного *n* и *p*-типов материалов. При условии, если примесные уровни таковы, что $E_{\lambda_1} - E_{\lambda_2} \gg kT$ (E_{λ_1} и E_{λ_2} — положения примесных уровней в запрещенной зоне) и уровень Ферми F лежит на несколько kT выше нижнего уровня, то:

$$n = N_g - N_a - \frac{N_a}{e^{-\frac{E_\lambda - F}{kT}} + 1}, \quad (1)$$

где N_g — концентрация мелких доноров;
 N_a — концентрация акцепторов.

Из (1) можно получить, что:

$$\frac{dn}{dT} = \frac{\left[\frac{dF}{dT} \cdot \frac{1}{kT} - \frac{F - E_\lambda}{kT^2} \right] e^{-\frac{E_\lambda - F}{kT}}}{\left(e^{-\frac{E_\lambda - F}{kT}} + 1 \right)^2} N_a. \quad (2)$$

Взяв отношение $\frac{dn}{dT}$ для двух температур, получим:

$$\frac{dn_1}{dT_1} \bigg| \frac{dn_2}{dT_2} = \frac{\left(\frac{dF_1}{dT_1} \cdot \frac{1}{kT_1} - \frac{F_1 - E_\lambda}{kT_1^2} \right) e^{-\frac{E_\lambda - F_1}{kT_1}} \cdot \left(e^{-\frac{E_\lambda - F_2}{kT_2}} + 1 \right)^2}{\left(\frac{dF_2}{dT_2} \cdot \frac{1}{kT_2} - \frac{F_2 - E_\lambda}{kT_2^2} \right) e^{-\frac{E_\lambda - F_2}{kT_2}} \left(e^{-\frac{E_\lambda - F_1}{kT_1}} + 1 \right)^2}. \quad (3)$$

Из (3), зная $\frac{dn_1}{dT_1} \bigg| \frac{dn_2}{dT_2}$, $\frac{dF_2}{dT_2}$, $\frac{dF_1}{dT_1}$, F_1 и F_2 можно найти E_λ .

По измеренным данным $\rho_k(T)$ нами были найдены вышперечисленные величины и определены E_λ для n и p -типов материалов. Для p -типа материалов, в которых F варьировало в диапазоне 0,1 эв, аналогичный расчет дал хорошо повторяющиеся значения нижнего акцепторного уровня (подтверждение его природы мы усматриваем в том факте, что p -тип материала данной примесью скомпенсировать не удалось) 0,31–0,34 эв от потолка валентной зоны.

Модель одного акцепторного уровня не могла объяснить наблюдаемого характера $\rho_k(T)$ для n -типа материала. Это заставило предположить о наличии второго уровня, для которого $E_{\lambda_1} - E_{\lambda_2} > kT$, исходя из данных по p -типу материалов. Для n -типа материалов $E_\lambda \sim 0,45 \div 0,51$ эв от дна зоны проводимости.

Оценки времени жизни (по измерению стационарной фотопроводимости) для материала p -типа дало $\tau_n \sim 3 \div 8$ мксек. Знание τ_n позволило оценить $\sigma_n^0 \sim 10^{-15}$ см² для уровня 0,31 эв и $\frac{\beta}{\beta'} \gg 1$ (β — коэффициент захвата дырки на уровень 0,31, β' — коэффициент захвата электрона на тот же уровень).

Положение уровней и сечения захвата соответствует цинку (4).

Из компенсированного кремния с заранее измеренными $\rho_{исх}$, ρ_k нарезались прямоугольные пластиночки с размерами 2×2 мм. После травления в 30-процентном растворе NaOH или KOH пластины промывались и сушились. Затем при температуре 610–620°C в вакууме 10⁻⁵ мм Hg

с одной стороны пластин вплавлялась алюминиевая проволока диаметром 500 микрон, а с другой стороны — сплав $\text{Au} + 0,1\% \text{Sb}$. Вплавление проводилось в специальной графитовой кассете, подвергнутой длительной термовакуумной обработке при температуре 900°C .

Структуры полученных элементов — $p-n-n^+$ или $p^+ - p - n^+$.

Диоды из материалов, для которых $N_g > 2,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ имели базу в основном n -типа, а диоды из материала с $N_g \leq 1 \div 1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ имели базу p -типа.

ВАХ исследуемых диодов изучались в интервале температур $20 \div 100^\circ\text{C}$.

Статистическое изучение поведения ВАХ от N_g должно было выявить температурное поведение параметров поворотных точек характеристики (V_{max} , V_{min} , J_{cp}). Изучение ВАХ осуществлялось при постоянном токе, в качестве источника температуры использовался масляный термостат.

Типичные ВАХ диодов и их температурные зависимости представлены на рис. 1 а, б, в.

На рис. 1а, представлены ВАХ для диода, у которого V_{max} , V_{min}

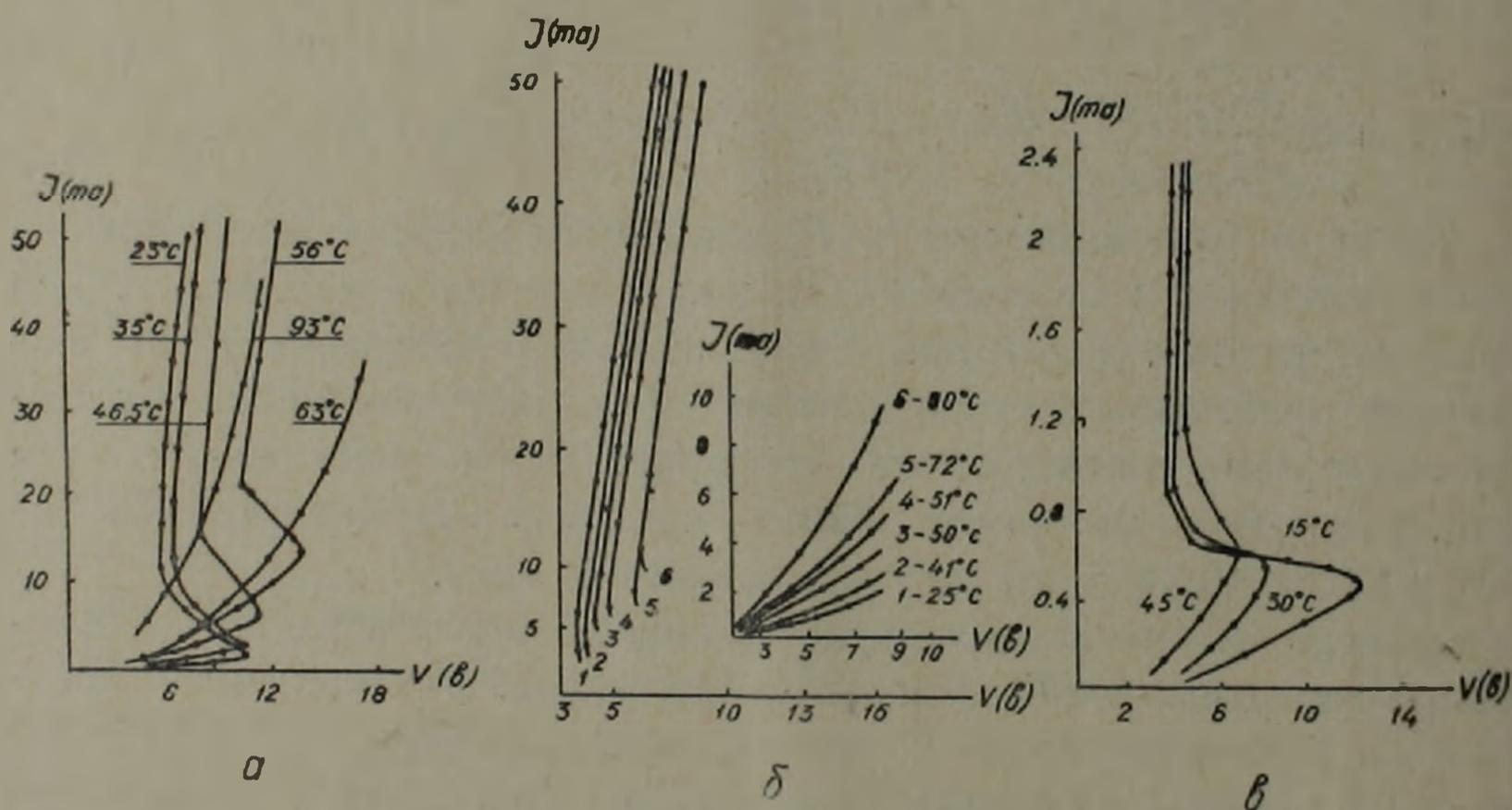


Рис. 1.

и J_{cp} растут с температурой примерно до 65°C . Затем отрицательное сопротивление на ВАХ не наблюдается ($\rho_{\text{нск}} \sim 50 \text{ ом см}$). На рис. 1 б показаны ВАХ диода, в котором в интервале $20 \div 80^\circ\text{C}$ V_{max} почти не зависит от температуры, а V_{min} и J_{cp} растут. На рис. 1 в представлены характеристики диодов, для которых V_{max} уменьшается с температурой ($\rho_{\text{нск}} \sim 19 \text{ ом. см}$).

Статистика показывает, что для материалов p -типа проводимости наблюдаются растущие и падающие по V_{max} ВАХ (J_{cp} и V_{min} растут с температурой), для n -типа V_{max} уменьшается.

Для диодов с $N_g > 2,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ V_{max} с температурой падает (p -тип). Для $N_g \sim 1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ получаются диоды с относительно стабильным V_{max} .

Для диодов с $N_g \leq 10^{14} \text{ см}^{-3}$ V_{max} растет с температурой.

Интересным оказались зависимости предельной температуры наблюдения ВАХ с ОС по партиям с разным N_g . Рис. 2 а, б показывает статистические зависимости $V_{\text{max}}(T)$. Из графиков видно, что с ростом N_g предельная температура наблюдения ВАХ с ОС растет. Это положение подтверждается такими данными: для диодов с $N_g \approx 2,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ предельная температура порядка $90-100^\circ\text{C}$, для $N_g \approx 1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ 80°C , для $N_g \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$ -60°C .

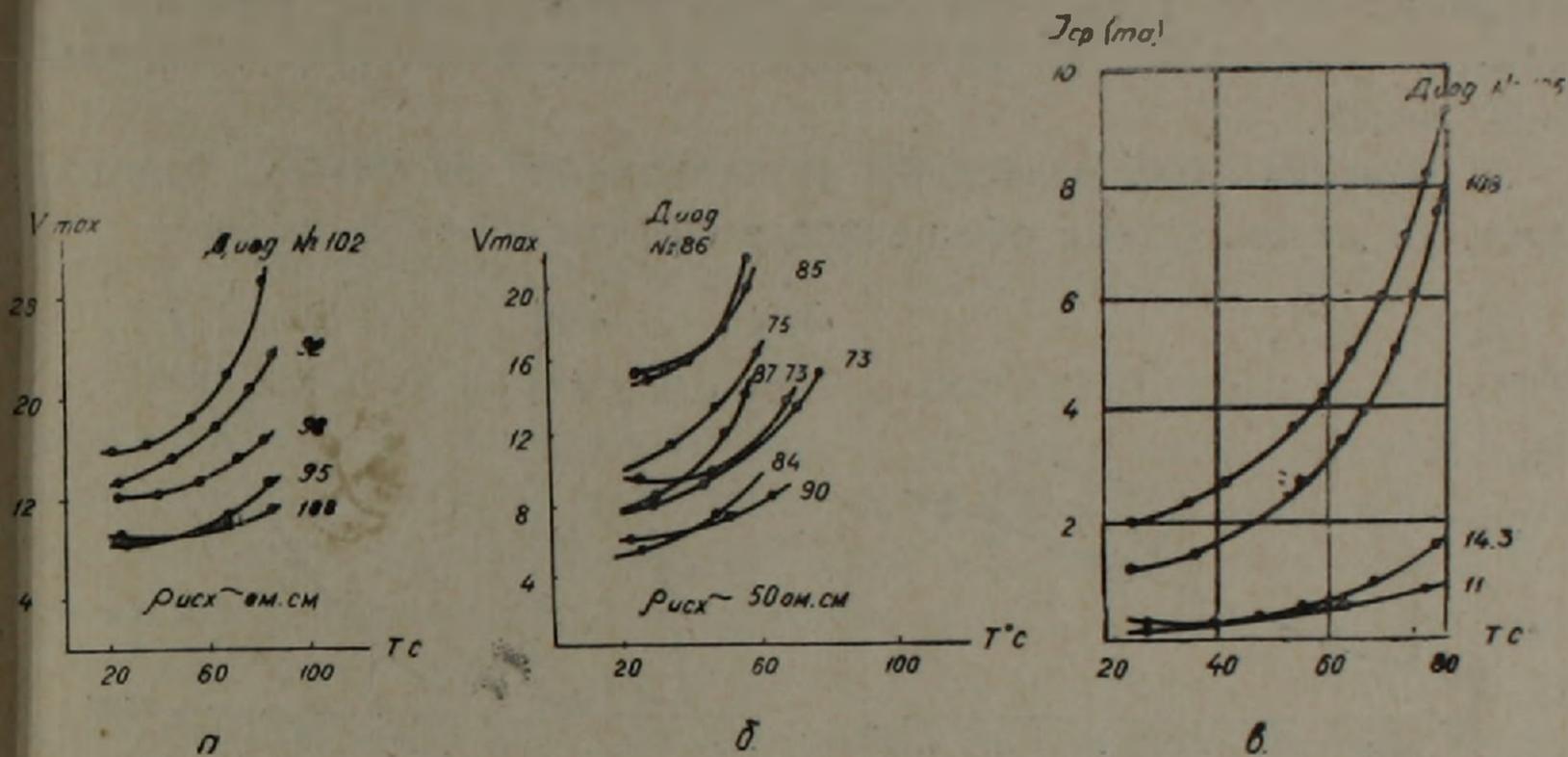


Рис. 2.

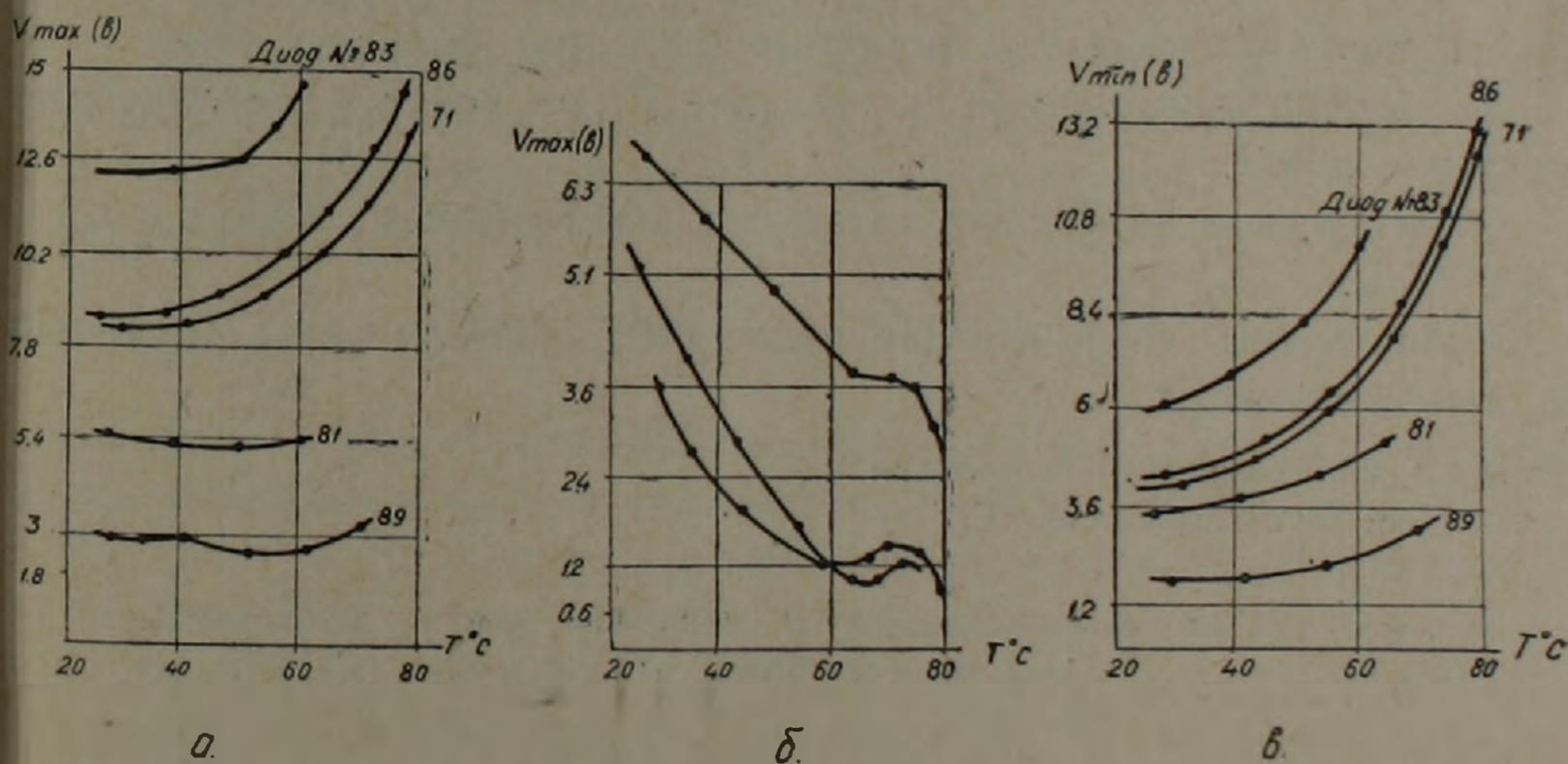


Рис. 3.

На рис. 3 а, в представлены типичные зависимости V_{max} от T для диодов с $N_g > 2,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (рис. 3 б) и $N_g \approx 1 \div 1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (рис. 3 а). Для диодов №№ 81, 89 наблюдается относительная стабильность V_{max} , тогда как для диодов №№ 71, 83, 86 — рост V_{max} . На рис. 3 в для этих же диодов показаны зависимости V_{min} от температуры.

Рисунок 2 в иллюстрирует ход зависимости J_{cp} от температуры.

Статистически удалось установить, что для большинства диодов до участка срыва наблюдаются законы $J \sim V^n$, где n — меняется от 1

до $2 \div 2,5$. ВАХ после срыва в пределах токов $50-70$ ма линейна, так что $J \sim V - V_{\min}$.

Аналогичные закономерности выполняются в интервале температур.

Изучение характера зависимости V_{\min} от d (ширина базы) показано на рис. 4 а.

С целью выяснения физических условий формирования ВАХ нами был продлен интервал исследований характеристик по току до нескольких ампер. Для этого была изготовлена схема импульсного токового усилителя на 10 ампер с длительностью импульса $10 \div 50$ мксек.

Измерения были проведены на одиночных импульсах, длительностью 10 мксек. Схема обеспечивала фронты $0,3 \div 0,5$ мксек.

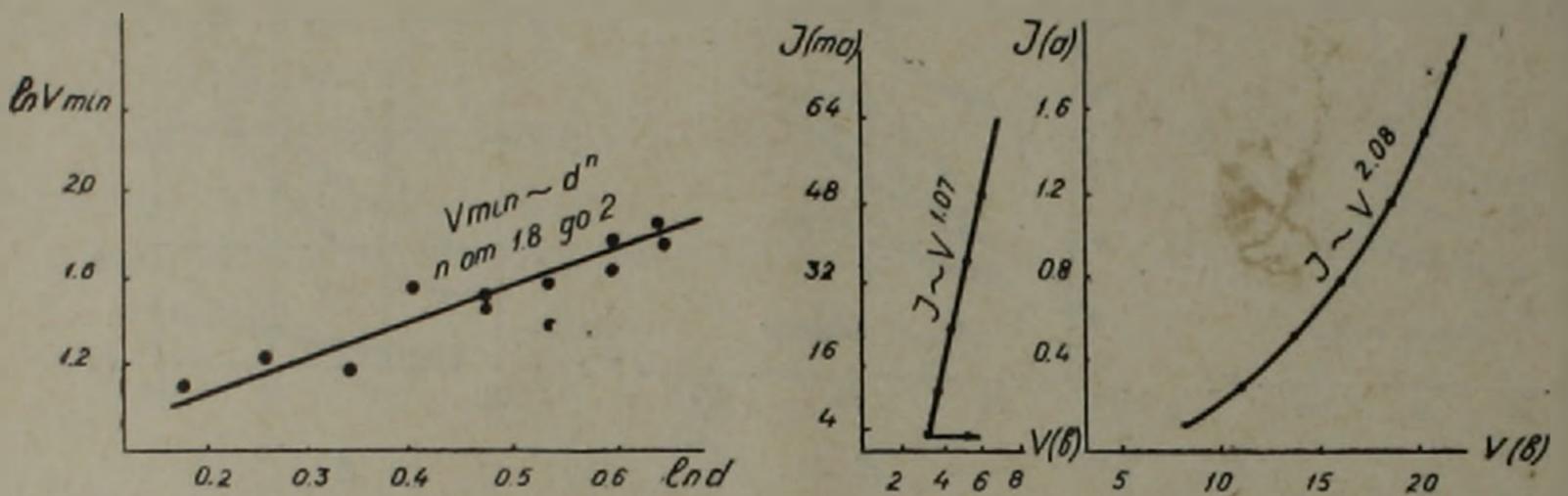


Рис. 4.

На рис. 4 б показаны типичные ВАХ при больших токах.

Характеристики, начиная с токов 120 ма носят суперлинейный характер с $n \approx 2$.

Отметим, что на некоторых диодах наблюдались ВАХ с $n < 2$ и ВАХ с $n > 2$.

Наблюдаемые ВАХ в своей массе (90%) имели выше отмеченные закономерности.

Институт радиофизики и электроники
Академии наук Армянской ССР

Հայկական ՍՍՀ ԳԱ թղթակից-անդամ Գ. Մ. ԱՎԱԳՅԱՆՅ, ՅՈՒ. Ա. ԱՐՐԱՀԱՄՅԱՆ,
Վ. Ի. ՍԵՐԱԴՈ

Ցիկլի խառնուրդով դիողների վոլտ-ամպերային բնութագրի ստատիստիկ
ուսումնասիրությունը

Աշխատանքում բերված են դիողների S տիպի վոլտ-ամպերային բնութագրի ստատիստիկ
ուսումնասիրությունը, որոնց մեջ ներմուծված է ցիկլ: Հայտնաբերված է, որ կան դիողներ, որոնց
 V_{\max} աճում է շերմաստիճանի հետ, և V_{\max} ընկնում է և մնում համարյա կայուն:

Մինչև խզման սահմանը վոլտ-ամպերային բնութագիրը ունեն հատված, որտեղ $I \sim V$,
 $I \cdot V^2$ խզումից հետո ընկած $40-50$ մա $I \sim V - V_{\min}$ և հետո հատված, որտեղ $I \sim V^2$.

Л И Т Е Р А Т У Р А — Գ Ր Ա Կ Ա Ն Ո Ւ Թ Յ Ո Ւ Ն

¹ Ламперт, Phys. Rev. 125, 126, 1962. ² В. И. Стафеев и В. П. Сондаевский, ФТТ, 1, 80, 1960. ³ Г. М. Авакьянц, „Радиотехника и электроника“, № 10, 1830, 1965
⁴ Корнилов, ФТТ, 6, 331, 1964.