

Л. А. ДРИТОВ, А. П. ПРОТАСОВ,  
Н. М. САПРУНОВА

## К ВОПРОСУ ИЗМЕНЕНИЯ ЕМКОСТИ ОДИНОЧНОГО ПЕРЕХОДА

Как показали исследования авторов, даже неуправляемые полупроводниковые диоды нельзя рассматривать элементами односто-ронней проводимости или точнее, как рассматривается это в современной теории преобразования электромагнитной энергии, своеобразными электрическими ключами с пренебрежимо малым прямым падением напряжения, значительным током в проводящую часть периода и значительным обратным напряжением, пренебрежимо малым обратным током в непроводящую часть периода.

Тщательные исследования, проведенные по колебательным режимам преобразовательных систем на базе ионных и полупроводниковых приборов показали, что как ионные, так и  $p-n$  переходы обладают кроме активных сопротивлений значительными реактивными (емкостными). Нелинейный характер изменения емкости  $p-n$  перехода в полупроводниковых средах, а также плазменного промежутка анод-катод в ионных средах неопровержимо подтверждает общность процессов в полупроводниковой и ионной средах энергообмена. Наличие значительно изменяющейся емкости  $p-n$  перехода, а также других реактивных элементов преобразовательной схемы обуславливает в них колебательные процессы с широким спектром частот.

В работе показано наличие определенной емкости  $p-n$  перехода и характер ее изменения как у одиночного силового диода, так и при групповом их соединении. Таким образом, основное внимание в данной работе уделено динамике изменения электрических параметров одиночного  $p-n$  перехода. При исследовании за основу были взяты вольтамперные характеристики неуправляемых диодов, предлагаемая авторами их аналитическая аппроксимация и характер изменения емкости, а также проанализировано несколько

приемлемых методик измерения емкости  $p-n$  перехода силовых диодов и экспериментально подтверждены некоторые из них.

Результаты работы подтверждают то положение, что специально изготовленные  $p-n$  переходы (неуправляемые диоды) могут обладать достаточной емкостью (десятки тысяч пикофард), и быть использованы в высокоэффективных параметрических преобразовательных системах. Кроме того, даже в серийно выпускаемых неуправляемых диодах при анализе работы преобразовательных установок на их основе необходимо учитывать сопротивления диодов не только активные, но и емкостные.

### Вольтамперные характеристики неуправляемых $p-n$ переходов

Были исследованы  $p-n$  переходы диодов типа ВК-50, ВК-25 и ВГ-50-100.

На рис. 1 приведены экспериментально и теоретически полученные вольтамперные характеристики исследуемых диодов.

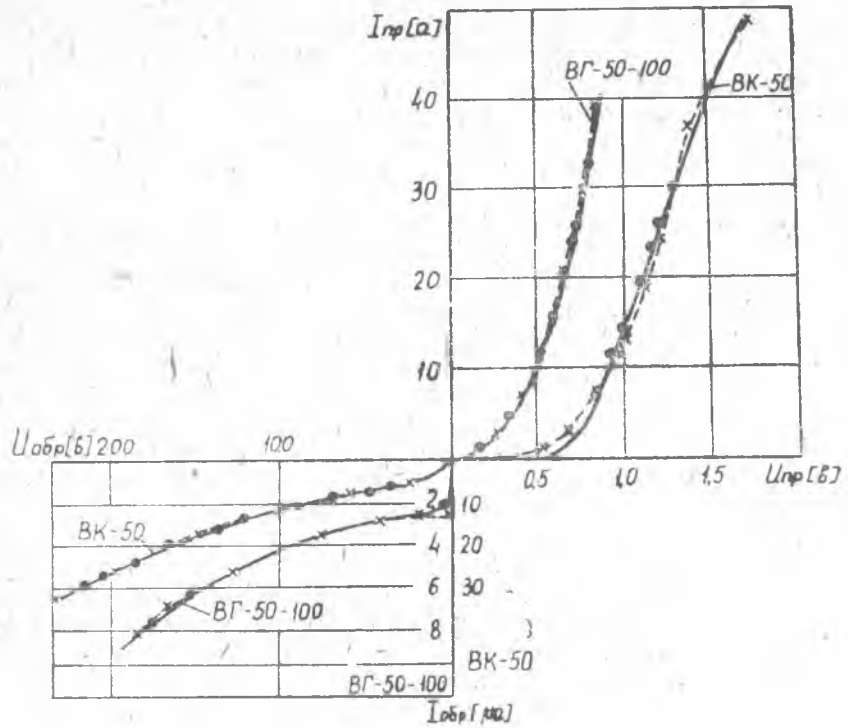


Рис. 1.

На рис. 2 приведены экспериментально и теоретически полученные зависимости прямых и обратных сопротивлений в функции напряжений.

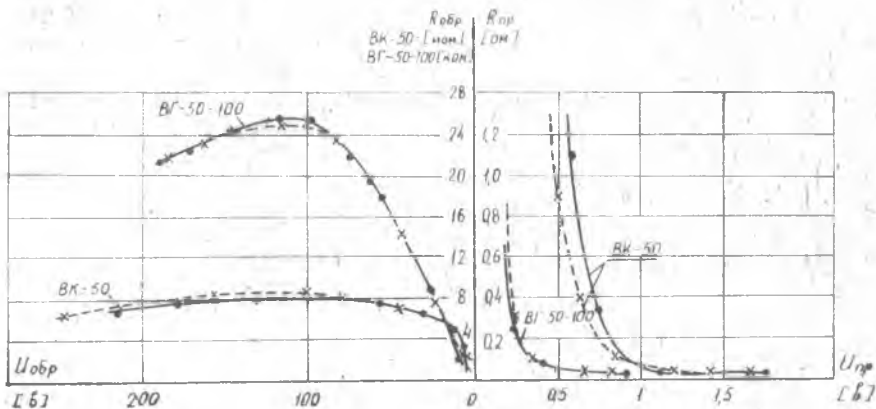


Рис. 2.

### Аналитическая аппроксимация вольтамперных характеристик для проводящего и непроводящего полупериодов

Анализируя кривые вольтамперных характеристик для различных типов диодов, можно выразить прямую и обратную ветви характеристик с некоторым приближением аналитически:

$$I = a \cdot U^b \cdot e^{cU}, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — постоянные величины, обусловленные конструктивными данными и параметрами окружающей среды при работе данного типа  $p$ — $n$  перехода.

Для прямой ветви вольтамперной характеристики значения постоянных равны

$$c > 0, b > 1$$

$$c < 0, b < 0,$$

а касательной в начале координат является ось абсцисс.

Для обратной ветви вольтамперной характеристики значения постоянных  $c > 0$ ;  $0 < b < 1$ , а касательной является ось ординат.

Кроме того, обратная характеристика имеет точку перегиба с абсциссой  $U_{обр} = \frac{-b - \sqrt{b}}{c}$ .

Определение постоянных координат  $a$ ,  $b$ ,  $c$  ведется следующим образом. По экспериментальным вольтамперным характеристикам берутся три точки с координатами  $I_1, U_1$ ;  $I_2, U_2$ ;  $I_3, U_3$ , значения которых подставляются в уравнение (1). При этом получим

систему трех уравнений с тремя неизвестными, которые затем решаются с применением методов подстановки и логарифмирования. Для более точного совпадения экспериментальной и расчетной характеристик одну из точек следует выбирать на колене характеристики (прямая характеристика) или точку перегиба (обратная характеристика), две остальные точки — с большими абсциссами.

Для характеристик с резко выраженными начальными значениями (рис. 1 обратная характеристика) аналитическому выражению может быть придан вид

$$I = d + aU^b \cdot e^{cu}, \quad (2)$$

где  $d$  — постоянная, характеризующая начальные условия.

При аналитическом выражении характеристик зависимости прямого и обратного сопротивления принимают вид:

$$R = \frac{1}{a} u^{1-b} \cdot e^{-cu} \quad (3)$$

$$R = \frac{1}{dU^{-1} + aU^{b-1} \cdot e^{cu}} \quad (4)$$

В результате расчета были получены следующие значения для вольтамперных характеристик диодов. Так, в таблице 1 приведены расчетные значения прямых и обратных сопротивлений диодов ВК — 50 и ВК — 50 — 100.

### Экспериментальное определение динамической емкости $p-n$ перехода

Под динамической емкостью понимается зависимость емкости  $p-n$  перехода от приложенного к нему напряжения:  $C = f(U_{p-n})$ . Как показали исследования авторов, для измерения динамической емкости  $p-n$  перехода с малой погрешностью необходимы следующие условия:

1) напряжение, приложенное к  $p-n$  переходу, должно иметь стабильный характер (не иметь переменной составляющей).

2) при известном реактансе питающей цепи его можно учесть расчетом, но, поскольку при изменении подводимого напряжения в реальной цепи его реактанс нелинейно изменяется последовательно с  $p-n$  переходом, должна быть включена значительная индуктивность; величину индуктивности в значительной мере будет определять погрешность измеряемой емкости, которую приближенно (в большую сторону) можно считать равной отношению

$$\frac{\omega_{п} \cdot L}{1} = \omega_{п}^2 \cdot L \cdot C_x, \quad (5)$$

где  $\omega_{п}$  — угловая частота измерительной цепи;  
 $L$  — индуктивность питающей сети;  
 $C_x$  — измеряемая емкость.

3) величина частоты измерительной цепи определяется величиной измеряемой емкости  $p-n$  перехода и его активным сопротивлением так, чтобы реактивное сопротивление  $p-n$  перехода было одного порядка с его активным сопротивлением или на порядок ниже, то есть

$$\frac{1}{\omega \cdot C_x} \leq R_v. \quad (6)$$

Таким образом, при приложении прямого напряжения с условием, что активное сопротивление  $p-n$  перехода порядка  $10^{-1}$  ом, частота измерительного напряжения при  $C_x$  порядка  $10^{-9}$  фд должна быть

$$\omega \geq \frac{1}{R_v \cdot C_x} = \frac{1}{10^{-1} \cdot 10^{-9}} = 10^{10} \frac{1}{\text{сек}} \text{ или } f \geq 501. \quad (7)$$

При приложении обратного напряжения — величина активного сопротивления  $R_v$  перехода  $p-n$  порядка  $10^{-9}$  ом для исследуемых диодов — частота измерительного напряжения должна быть следующей:

$$\omega \geq \frac{1}{10^9 \cdot 10^{-9}} = 10^5 \frac{1}{\text{сек}} \text{ или } f \geq \omega. \quad (8)$$

На рис. 3 приведена схема измерения емкости  $p-n$  перехода с помощью измерителя добротности, а на рис. 4 — эквивалентная схема замещения измерительной цепи.

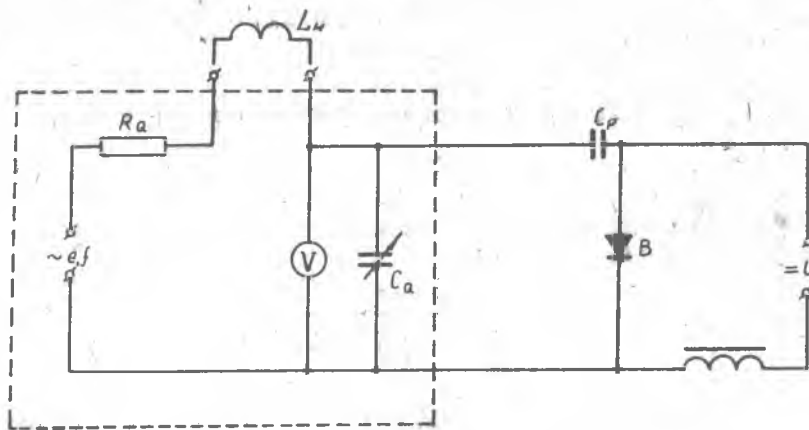


Рис. 3.

При соблюдении условия пункта 3, то есть при  $\frac{1}{\omega c} \ll R_v$ , влиянием активного сопротивления  $p-n$  перехода можно пренебречь. Тогда емкость  $p-n$  перехода определится, как

$$C_v = \frac{(c_0 - c_Q)}{c_p + c_Q - c_0} \cdot c_p. \quad (9)$$

где  $C_0$  — резонансная емкость без измеряемой емкости;  
 $C_a$  — емкость измерителя добротности, подобранная для резонанса измерительной цепи при измерении емкости перехода;  
 $C_p$  — разделительная емкость.

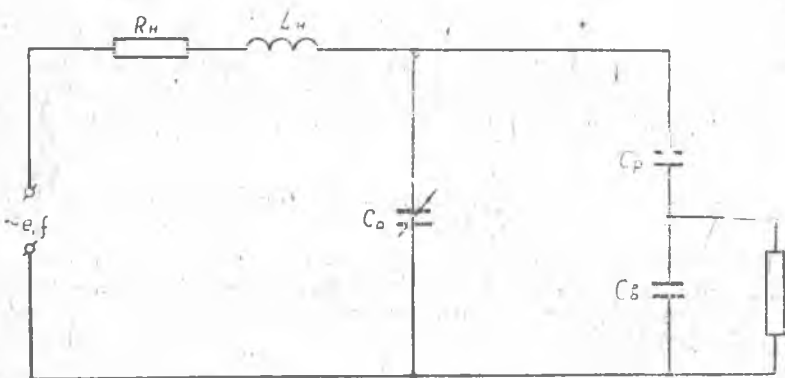


Рис. 4.

Если отношение предлагаемой величины измеряемой емкости к полной емкости измерителя добротности  $C_{an}$  обозначить

$$\frac{c_x}{c_{Qn}} \approx n, \quad (10)$$

то целесообразно выбирать величину разделительной емкости

$$c_p = \frac{c_{Qn}}{n-1} \cdot n. \quad (11)$$

Тогда при равенстве  $C_{an} = C$  величина измеряемой емкости определится следующим образом:

$$c_n = \frac{c_0 - c_Q}{\frac{c_Q}{c_0} \left(1 - \frac{1}{n}\right) - \frac{1}{n}}. \quad (12)$$

На рис. 5 приведена схема измерения динамической емкости  $p-n$  перехода с помощью емкостного измерительного моста.

Активные сопротивления плеч измерительного моста выбираются исходя из мощности источника измерительной цепи (ЗГ). Для уменьшения погрешности разделительные конденсаторы  $C_p$  должны быть достаточно велики, чтобы их сопротивления были на один-два порядка ниже, чем реактивное сопротивление  $p-n$  перехода. Измерительное активное сопротивление  $R_s$  и емкость  $C_s$  должны иметь диапазон регулирования, достаточный для измерения емкости  $p-n$  перехода, при этом  $R_s$  устанавливается

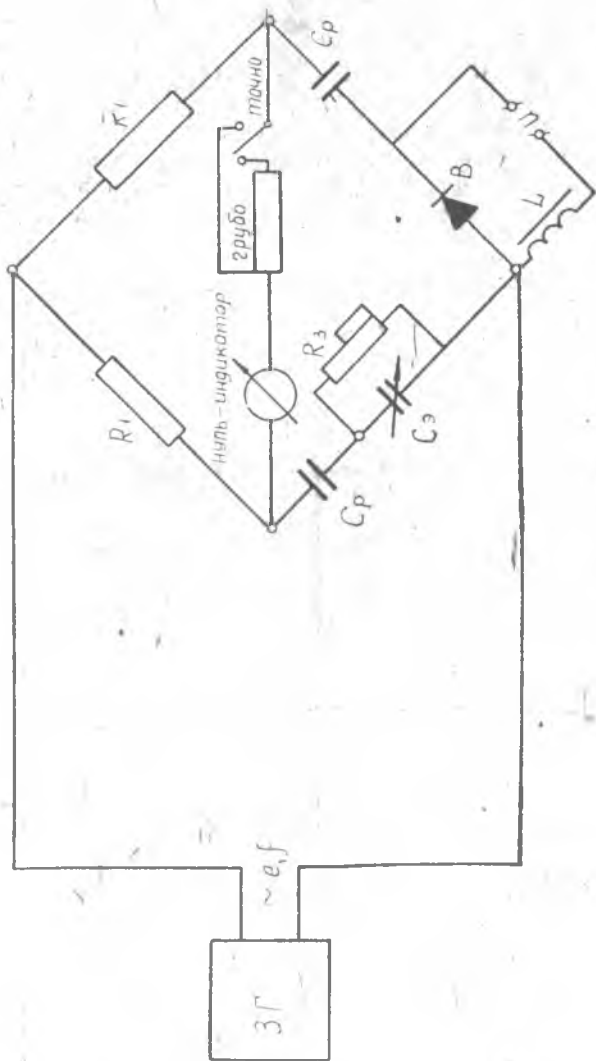


Рис. 5.

равным активному сопротивлению  $p-n$  перехода, взятому по его вольтамперной характеристике. В качестве нуля-индикатора может быть использован любой осциллограф, например, типа ЭО-7.

На рис. 6 приведена схема измерения динамической емкости  $p-n$  перехода методом замера сдвига фаз тока и напряжения, а на рис. 7 — эквивалентная схема замещения измерительной цепи.

Последовательным активным сопротивлением измерительной цепи  $R$  может являться непосредственно сопротивление входа осциллографа (рис. 6). В качестве измерительного прибора используется двухлучевой осциллограф. При измерении динамической емкости  $p-n$  перехода в направлении проводимости диода необходимо иметь в виду, чтобы либо осциллограф имел большую чувствительность (порядка 100 мм отклонения луча при напряже-

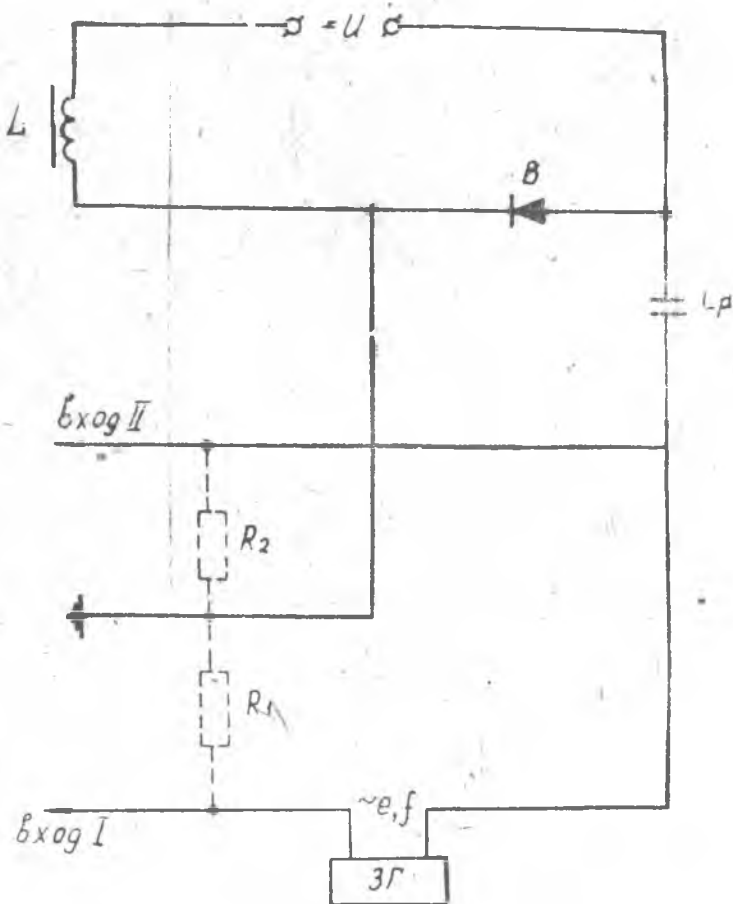
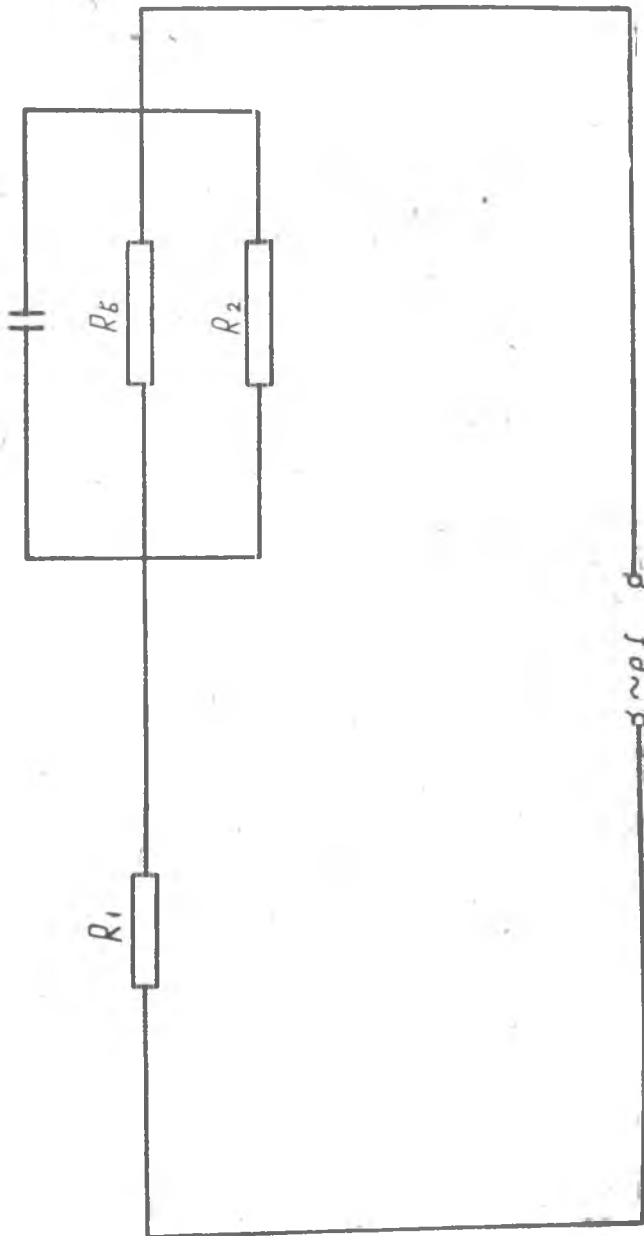


Рис. 6.





prej d

FIG. 7.

нии входа  $U_{вх}=100$  мв), либо источник измерительной цепи был достаточно мощным.

При достаточно большой разделительной емкости  $C_p \frac{1}{\omega p} \ll \frac{1}{\omega \cdot c_B}$  эквивалентная схема замещения будет иметь вид, изображенный на рис. 7. Осциллографируя напряжение и ток одного вентиля и группы параллельно включенных вентилях, можно определить емкость  $p-n$  перехода. Действительно, из эквивалентной схемы замещения (рис. 7) можно определить полное сопротивление цепи вентиля и входа, параллельного вентилею:

$$z_1 = R + jx = \frac{x_c \cdot \frac{R_2 + R_B}{R^2 + R_B}}{x_c + \frac{R_2 \cdot R_B}{R_2 + R_B}} = \frac{-j \cdot \frac{1}{\omega c_0} \cdot \frac{R^2 \cdot R_B}{R^2 + R_B}}{-j \cdot \frac{1}{\omega c_0} + \frac{R \cdot R_B}{R_2 + R_B}} =$$

$$= \frac{-j \cdot R_2 \cdot R_B}{\omega c_0 \cdot R^2 - j(R_2 + R_B)} =$$

$$= \frac{-j \cdot R_2 \cdot R_B [\omega \cdot c_0 \cdot R_1 \cdot R_B + j(R^2 + R_B)]}{[\omega c_0 \cdot R^2 \cdot R_B - j(R_2 + R_B)] \cdot [\omega c_0 \cdot R^2 \cdot R_B + j(R_2 + R_B)]} =$$

$$= \frac{R_2 \cdot R_B (R_2 + R_B)}{(\omega c_0 \cdot R^2 \cdot R_B)^2 + (R_2 + R_B)^2} - j \cdot \frac{R_2^2 \cdot R_B^2 \cdot \omega c_0}{(\omega c_0 \cdot R^2 \cdot R_B)^2 + (R_2 + R_B)^2} \quad (13)$$

при одном вентиле

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{X}{R} = \frac{R^2 \cdot R_B \cdot \omega c_0}{R_2 + R_B} \quad (14)$$

При параллельно включенных вентилях:

$$\operatorname{tg} \varphi_n = \frac{R_2 \cdot R_B \cdot \omega \cdot c_0}{R_2 + \frac{R_B}{n}} = \frac{R_2 \cdot R_B \cdot \omega \cdot c_0 \cdot n}{R^2 + \frac{R_B}{n}} \quad (15)$$

Из уравнений (14) и (15) можно определить  $R_B$  и  $C_0$ . Из уравнения (14) значение

$$c_0 = \frac{(R_2 + R_B) \cdot \operatorname{tg} \varphi_1}{R_2 \cdot R_B \cdot \omega} \quad (16)$$

С другой стороны, из уравнения (15) значение

$$c_0 = \frac{(n \cdot R_2) \cdot \operatorname{tg} \varphi_n}{R_2 \cdot R_B \cdot n \cdot \omega} \quad (17)$$

Приравниваем правые части последних равенств

$$\frac{(R_2 + R_B) \cdot \operatorname{tg} \varphi_1}{R_2 \cdot R_B \cdot \omega} = \frac{(n \cdot R_2 + R_B) \cdot \operatorname{tg} \varphi_n}{n \cdot R_2 \cdot R_B \cdot \omega}$$

или

$$R_B (\operatorname{tg} \varphi_1 \cdot n - \operatorname{tg} \varphi_n) = R_2 (n \cdot \operatorname{tg} \varphi_n - n \cdot \operatorname{tg} \varphi_1),$$

откуда

$$R_B = \frac{R_2 \cdot n (\operatorname{tg} \varphi_n - \operatorname{tg} \varphi_1)}{\operatorname{tg} \varphi_1 \cdot n - \operatorname{tg} \varphi_n} \quad (18)$$

$$I_{\max} = 0,13 \text{ ma}; \quad U_{\max} = 0,428$$

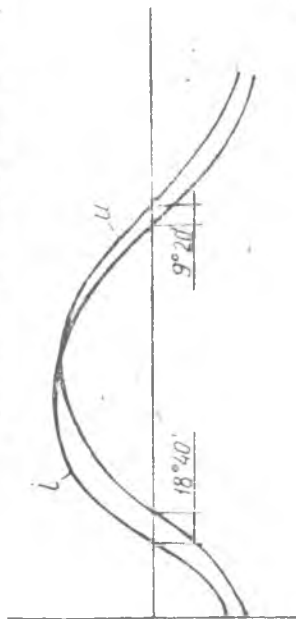
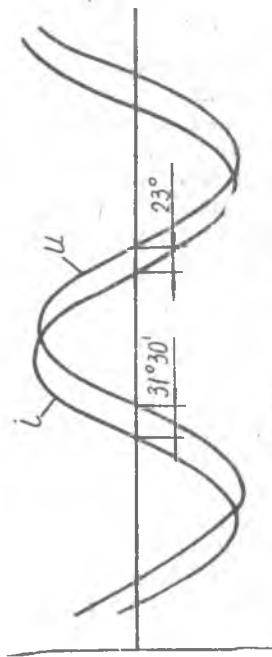


Рис. 8.

$$I_{\max} = 5,8 \text{ ma}; \quad U_{\max} = 0,438$$



$$I_{\min} = 5,16 \text{ ma}; \quad U_{\min} = 0,438$$

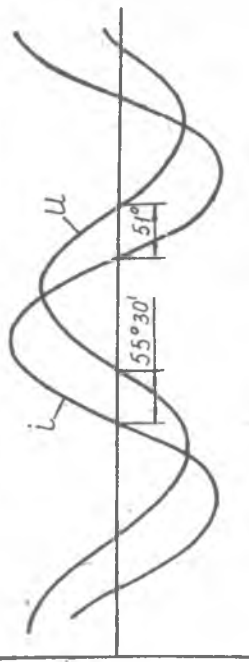
Рис. 9.

$$I_{\max} = 6,13 \text{ ma}; \quad U_{\max} = 0,4058$$



$$I_{\min} = 6,56 \text{ ma}; \quad U_{\min} = 0,318$$

$$I_{\max} = 6,15 \text{ ma}; \quad U_{\max} = 0,338$$



$$I_{\min} = 5,5 \text{ ma}; \quad U_{\min} = 0,298$$

Подставляя  $R_v$  в уравнение (16), решаем его относительно

$$C_0 = \frac{\operatorname{tg} \varphi_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 \left(1 - \frac{1}{n}\right)}{R_2 \cdot \omega (\operatorname{tg} \varphi_n - \operatorname{tg} \varphi_1)} \quad (19)$$

Таким образом, из уравнений (18) и (19) следует, что  $R_v$  не зависит от частоты, не зависит от  $R_2$ ,  $C_0$  же зависит как от  $R_2$ , так и от частоты.

Измерение емкости  $p$ — $n$  перехода методом замера сдвига фаз тока и напряжения проводилось для диодов типа ВК—50 и ВК—25 по схеме рис. 6.

На вентиль подавалось постоянное напряжение от аккумулятора 12 в. Измерительная цепь питалась от генератора частоты типа ГЗ-3. Напряжение и ток вентиля фиксировались импульсным осциллографом типа ОК-17 м. Сопротивления входов при этом равнялись  $R_2 = 100,5 \text{ ом}$ ;  $R_1 = 95,5 \text{ ом}$ . Величина разделительной емкости была выбрана равной  $C_p = 20 \text{ мкф}$ . При измерениях на частотах  $100 \div 200 \text{ кгц}$  реактивное сопротивление разделительной емкости изменялось в пределах

$$X_{cp} = \frac{1}{\omega \cdot c_p} \frac{1}{(100 \div 200) \cdot 2\pi \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} = 0,08 \div 0,04 \text{ ом.} \quad (20)$$

При  $X_p$  порядка  $10^{-8}$  эквивалентное реактивное сопротивление вентиля (рис. 7).

$$X_{вз} = \frac{\omega \cdot R_2^2 \cdot c_v}{(\omega R_1 \cdot c)^2 + 1} = \frac{2\pi \cdot 10^3 (100 \div 200) \cdot 10^3 \cdot 10^8}{[2\pi \cdot 10^3 (100 \div 200) \cdot 10^2 \cdot 10^{-8}]^2 + 1} = 38,5 \div 55,6 \text{ ом.} \quad (21)$$

(активное сопротивление вентиля не учтено, так как измерения проводились при обратном напряжении и напряжении, равном нулю). Таким образом,  $X_{cp}$  составляет 0,2% от  $X_{вз}$ , поэтому расчеты ведем по выражениям (18) и (19).

Опытные данные значений емкости и сопротивления  $P$ — $n$  перехода для диодов типа ВК-50 и ВК-25 без приложения к ним постоянного напряжения при различных измерительных частотах сведены в таблицу 2.

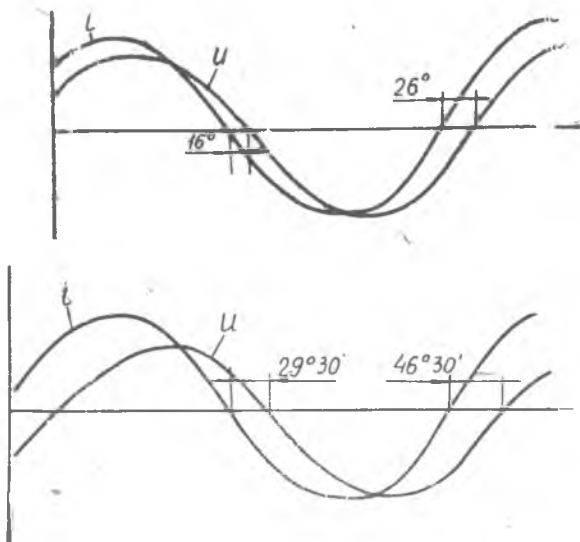


Рис. 10.

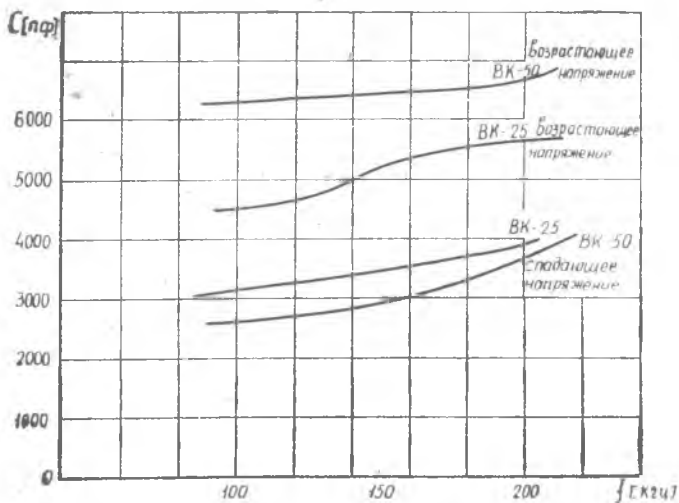


Рис. 11.

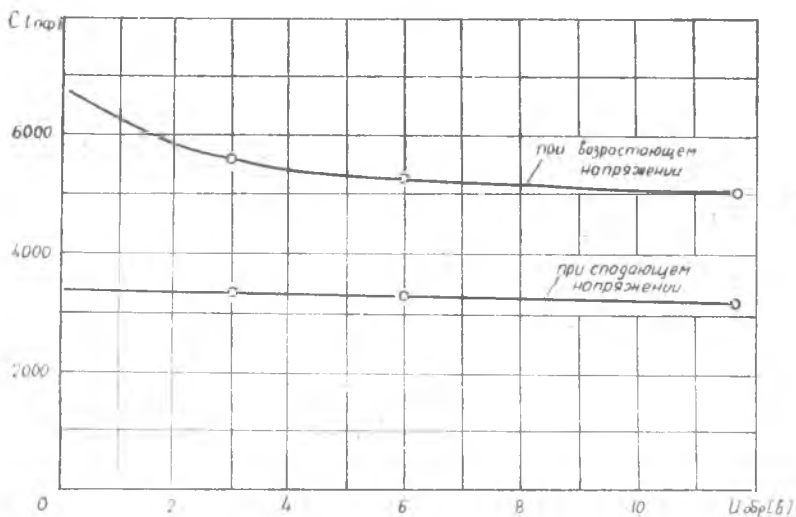


Рис. 12.

Сдвиг фазы между током и напряжением иллюстрируют осциллограммы рис. 8 (BK-50) и рис. 9 (BK-25) для одиночного и пяти параллельно включенных  $p-n$  переходов.

Данные опыта по определению зависимости  $C_B = f(U_{обр})$

ВК-50	$I = 718 \cdot U^{7,6} \cdot e^{-4U}; \quad R_{\text{пр.}} = 0,00139 U^{-6,6} \cdot e^{4U}; \quad \ln a = 6,67$								
	$U_{\text{пр.}} [\text{в}]$	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4	1,8
	$I_{\text{пр.}} [\text{а}]$	0,55	1,47	3,19	5,9	14,4	25,8	37,5	49,4
	$R_{\text{пр.}} [\text{ом}]$	0,91	0,408	0,219	0,135	0,0695	0,0465	0,0374	0,0344
ВК-50-100	$I = 854 \cdot U^{4,12} \cdot e^{-2,674}; \quad R_{\text{пр.}} = 0,00117 \cdot U^{-3,12} \cdot e^{2,674}; \quad \ln a = 6,75$								
	$U_{\text{пр.}} [\text{в}]$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
	$I_{\text{пр.}} [\text{а}]$	0,049	0,66	2,05	6,69	13	20,9	30,1	40,1
	$R_{\text{пр.}} [\text{ом}]$	2,04	0,303	0,113	0,06	0,038	0,028	0,023	0,020
ВК-50	$I = 0,8584 \cdot U^{0,4875} \cdot e^{0,00405U}; \quad R_{\text{обр.}} = 1,164 \cdot U^{0,512} \cdot e^{-0,004054};$ $\ln a = -0,153$								
	$U_{\text{обр.}} [\text{в}]$	5	10	26	50	100	150	200	250
	$I_{\text{обр.}} [\text{ма}]$	1,92	2,74	4,015	7,06	12	18,1	25,4	34,7
	$R_{\text{обр.}} [\text{ком}]$	2,6	3,65	4,98	7,09	8,33	8,27	7,87	7,2
ВК-50-100	$I = 2,6 + 0,0014 \cdot U^{1,4} \cdot e^{0,0054U}; \quad R = \frac{1}{2,64 U^{-1} + 0,014 \cdot U^{0,4} \cdot e^{0,0054}};$ $\ln a = -6,55$								
	$U_{\text{обр.}} [\text{в}]$	0	10	30	40	80	120	160	180
	$I_{\text{обр.}} [\text{ма}]$	2,6	2,64	2,71	2,93	3,67	4,93	6,9	8,24
	$R [\text{ком}]$	0	3,8	7,14	13,6	21,8	24,4	23,2	22,1

для диода типа ВК-50 при частоте измерительной цепи 200 кГц сведены в таблицу 3.

Сдвиг фазы между током и напряжением при обратном включении  $p-n$  перехода иллюстрируют осциллограммы рис. 10 для одного и четырех параллельно включенных вентилях.

Тип диода	ВК-50					ВК-25				
	100	150	200	100	150	200	100	150	200	
$f$ [КГц]										
Число параллельно включенных диодов	1	5	1	5	1	5	1	3	1	3
	0,338	1,06	0,532	1,767	0,763	2,7	0,287	0,869	0,445	1,081
$tg \varphi$ при возрастающем напряжении										
	0,1644	0,674	0,268	1,15	0,404	1,327	0,185	0,488	0,33	0,939
Возрастающее напряжение	$R_B$ [ом]	577	694	874	7560	920	160			
	$C_B$ [пф]	6290	6420	6730	4600	5300	5600			
Спадающее напряжение	$R_B$ [ом]	1705	755	670	1350	3640	8150			
	$C_B$ [пф]	2760	2950	3680	3150	3580	3879			

Таблица 3

Обратное напряж. приложенное к диоду $U_{обр.} [\theta]$	0	3	6	9	11,8
Число параллельно включенных диодов $n$	4	4	4	4	4
Угол сдвига тока и напряж. при возрастан. напряж. $\varphi_c^\circ$	67 30	48 30	46 30	49	46 30
$I_g \psi_a$	0,781	0,51	0,487	0,506	0,466
Угол сдвига тока и напряж. спадающ. напряж. $\varphi_c^\circ$	42	39	29 30	26 30	25
$I_g \varphi_c$	0,364	0,306	0,287	0,268	0,25
$C_a [n\phi]$ при возрастающ. напряженни	6500	5520	5390	5370	4950
$C_a [n\phi]$ при спадающем напряженни	3520	3490	4440	4440	4070



По данным таблицы 2 на рис. 11 построены зависимости емкости  $p-n$  перехода вентиля типов ВК-50 и ВК-25 в функции частоты.

По данным таблицы 3 на рис. 12 — зависимости емкости вентиля ВК-50 от обратного напряжения, приложенного к вентилю.

### Выводы по результатам исследования

Результаты исследования показывают, что серийно выпускаемые промышленностью силовые полупроводниковые диоды обладают определенной емкостью, изменяющейся в зависимости от параметров схемы, в которой они работают. Для данного типа вентиля можно измерить зависимость емкости  $p-n$  перехода от приложенного напряжения, а также зависимость емкости от частоты данной преобразовательной схемы. При указании этих зависимостей в паспортных данных вентиля расчеты динамических режимов работы схем будут более точно соответствовать действительным процессам, что дает возможность более широкого применения полупроводниковых диодов не только в качестве электрических ключей, но и как элементов с переменными параметрами.

Наличие емкости  $p-n$  перехода указывает также на общность процессов, протекающих в ионных силовых приборах и полупроводниковых выпрямителях.

Анализ методов измерения емкости показывает, что наиболее точно емкость полупроводникового диода можно измерить с помощью емкостного измерительного моста (рис. 5). Но при этом требуется весьма точное исполнение переменного активного сопротивления (особенно при измерении емкости диода, работающего в направлении его проводимости) и емкости.

Метод измерения емкости  $p-n$  перехода с помощью измерителя добротности (рис. 4) дает удовлетворительные результаты лишь при высоких измерительных частотах, исключая тем самым возможность измерения зависимости емкости диода от частоты. Кроме того, при высоких частотах требуется весьма тщательный монтаж измерительной схемы, ее полная экранировка и учет емкостей монтажа.

Метод измерения емкости по сдвигу фаз между током и напряжением измерительной цепи является наиболее просто осуществимым и позволяет проводить измерения емкости с высокой точностью. Дополнительные погрешности при этом способе измерения возникают за счет визуального измерения сдвига фаз; с этой точки зрения целесообразно снимать лишь участок со сдвигом кривых тока и напряжения во всю ширину экрана электронного осциллографа с последующей калибровкой по времени. Данные измерений по этому методу показывают также, что емкость  $p-n$  перехода неоднозначно зависит от величины измерительного напряжения (рис. 8 — 10). Отсюда можно сделать предположение, что емкость  $p-n$  перехода зависит не только от величины напряжения, но и характера его измерения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Д. Райт, Полупроводники, Иностранная литература, 1958.
  2. Д. Райт, Полупроводники, Иностранная литература, 1957.
  3. И. Х. Леллер, С. С. Мескин, Полупроводниковые выпрямители изд. ЛДНТП, 1957.
  4. Методы измерения параметров полупроводниковых приборов, 1961.
  5. С. С.-Шалыг, Электрические свойства полупроводников, Изд. ЛДНТП, 1957.
  6. Данлэп. Введение в физику полупроводников, ИЛ, 1958.
  7. А. Ф. Иоффе. Физика полупроводников, Изд. АН СССР, 1957.
-