

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)

В.Ф. Агафонников

Исследование варикапа

Руководство к лабораторной работе
по курсу "Физика полупроводниковых структур"
для студентов радиоконструкторского факультета

Томск 2012

I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной электроники неразрывно связано с совершенствованием полупроводниковых приборов и поисками способов наиболее полного использования их характеристик. Основным компонентом большинства полупроводниковых приборов является р-п переход, проводимость которого имеет активную и реактивную составляющие. Емкость р-п перехода является основной частью практически всех эквивалентных схем полупроводниковых приборов.

Полупроводниковый диод широко используют как управляемую емкость. Приборы, специально изготовленные для этой цели, получили название варикап. Области применения варикапов самые различные: параметрическое усиление слабых сигналов, электронная настройка контуров, амплитудная и частотная модуляция сигналов, умножение частоты и др.

Целью настоящей работы является исследование вольтфарадной и вольтамперной характеристик диода и установления их связи с технологическими параметрами р-п перехода.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ И ВОЛЬТФАРАДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИК

Зарядные емкости р-п переходов обычно измеряют в режиме, когда на переход приложено постоянное отрицательное напряжение. При положительном смещении измерение емкости трудно осуществить, т.к. она зашунтирована большой активной проводимостью.

Все существующие методы измерения емкости р-п переходов основываются на предположении о том, что величина зарядной емкости не зависит от частоты вплоть до частот 100 ГГц, т.е. практически во всем диапазоне частот полупроводниковых приборов.

Таким образом, зарядная емкость в эквивалентной схеме замещения р-п перехода считается независимым от частоты элементом. Это позволяет измерять емкость на любой удобной для измерения частоте.

Для измерения емкостей р-п переходов используют три метода: метод замещения в резонансном контуре, мостовой метод, метод емкостно-омического делителя.

Метод замещения в резонансном контуре осуществляется следующим образом: перед измерением резонансный контур настраива-

ется в резонансе, затем к контуру подключают измеряемый конденсатор и путем уменьшения емкости калиброванного конденсатора, включенного в контур, вновь добиваются резонанса. Изменение емкости калиброванного конденсатора и будет равно измеряемой емкости. Метод применим для измерения конденсаторов с высокой добротностью. Недостатком метода является низкая производительность.

Мостовым методом измеряется полная проводимость образца. Измерения являются наиболее универсальными. Недостатком мостовых методов является низкая производительность, сложность измерений и дороговизна оборудования.

Широко применяемым на производстве является метод емкостно-омического делителя. Измерения осуществляются с помощью схемы (рис. 2.1). Основными элементами этой схемы является генератор напряжения высокой частоты, имеющий э.д.с. E и активное внутреннее сопротивление $R_{гн}$, чувствительный селективный вольтметр, подключенный к измерительному сопротивлению $R_{и}$, через разделительный конденсатор $C_{д}$. Перед измерениями схему калибруют с помощью эталонного конденсатора $C_{эт}$, подключенного к зажимам для измерения емкости. Постоянное напряжение к р-п переходу прикладывается от источника постоянного напряжения U .

Схема измерения емкости методом емкостно-омического

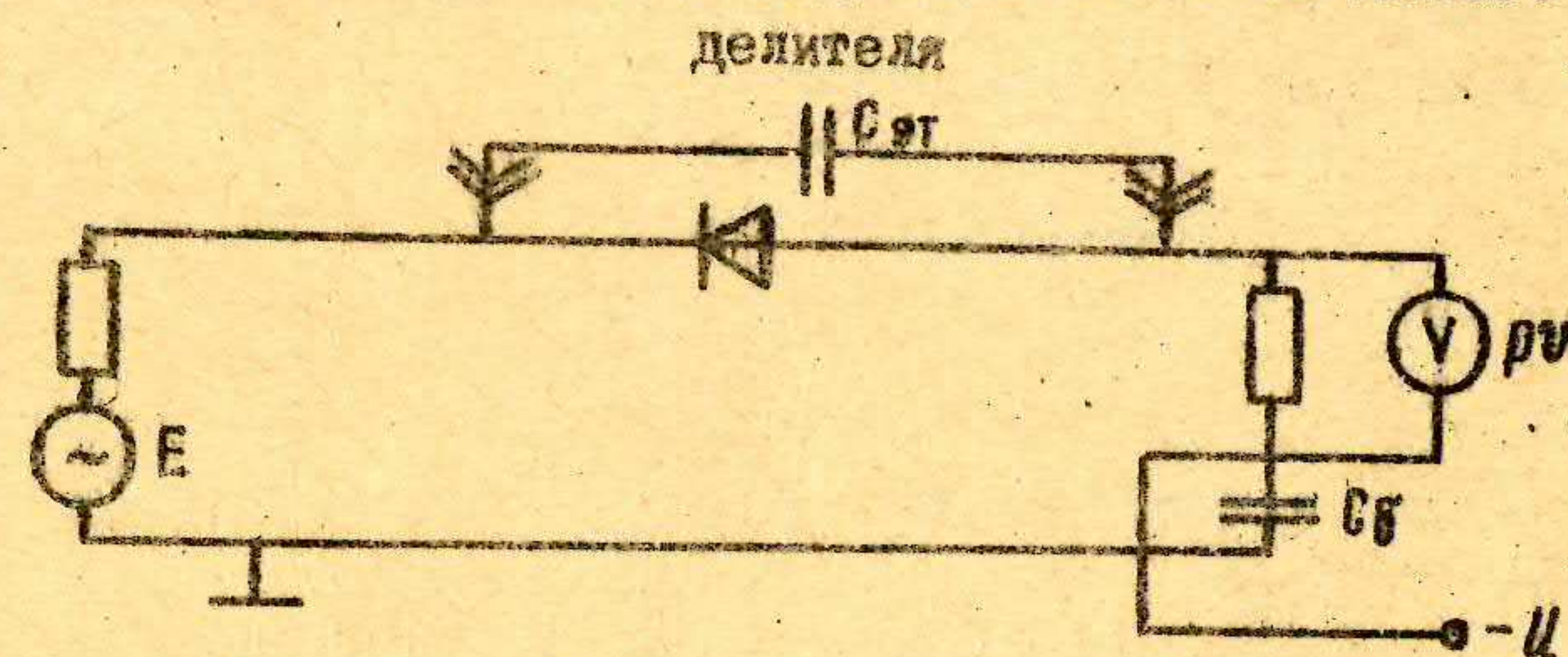


Рис. 2.1

Элементы и рабочую схему выбирают так, чтобы были выполнены определенные условия. Амплитуда переменного сигнала, приложенного к р-п переходу, не должна превышать 0,1 величины $(\varphi_K - U)$, где φ_K - контактная разность потенциалов, U - постоянное напряжение, приложенное к р-п переходу. Напряжение переменного сигнала почти полностью прикладывается к измеряемому диоду, т.е. должно выполняться условие:

$$R_{гн} + R_n \ll \frac{1}{\omega C_{max}}, \quad (2.1)$$

где C_{max} - максимальная измеряемая емкость.

При приложении высокочастотного напряжения к последовательной цепочке диод-измерительное сопротивление R_n , ток в цепи будет определяться емкостным сопротивлением диода и будет пропорционален емкости диода.

$$I = E \omega \cdot C, \quad (2.2)$$

где E - напряжение генератора высокой частоты.

Напряжение на активном сопротивлении U , измеряемое селективным вольтметром, будет пропорционально току, протекающему через диод, т.е. емкости диода

$$U = R_n \cdot E \cdot \omega \cdot C \quad (2.3)$$

Проградуировав шкалу вольтметра, мы можем по показаниям прибора непосредственно определить емкость р-п перехода. По существу измерительная установка, изображенная на рис.2.1, измеряет не емкость, а модуль полной проводимости. Используемая градуировка показаний прибора в значениях емкости будет справедлива до тех пор, пока активная проводимость р-п перехода g меньше, чем емкостная проводимость. Для обеспечения погрешности менее 5% достаточно выполнить условие:

$$g < \frac{1}{3} \omega C \quad (2.4)$$

Чтобы выполнить это условие, необходимо выбрать частоту измерений достаточно высокой. Верхний предел частоты определяется тем, чтобы выполнялось условие $1/\omega C > 3Z_s$, где Z_s - сопротивление базы диода, т.е. емкостное сопротивление должно быть больше сопротивления базы диода, включенного последовательно с емкостью диода (базой диода называют полупроводниковую пластину, в которой формируется р-п переход или слабо легированная область р-п перехода). Зависимость зарядной емкости от приложенного напряжения определяется распределением примесей. В связи с этим различают резкий и плавный р-п переходы. Если на границе раздела р- и п-областей градиент концентрации равен бесконечности (концентрация меняется от некоторой концентрации акцепторов в р-типе до некоторой концентрации доноров в п-типе), то такой переход называется резким (рис.2.2). Если концентрация меняется линейно, то такой переход называется плавным (рис.2.3). При при-

ложении напряжения к р-п переходу изменяется высота потенциального барьера р-п перехода и ширина области объемного заряда (d).

Распределение концентрации примесей, плотности объемного заряда, электрического поля, потенциала для резкого р-п перехода

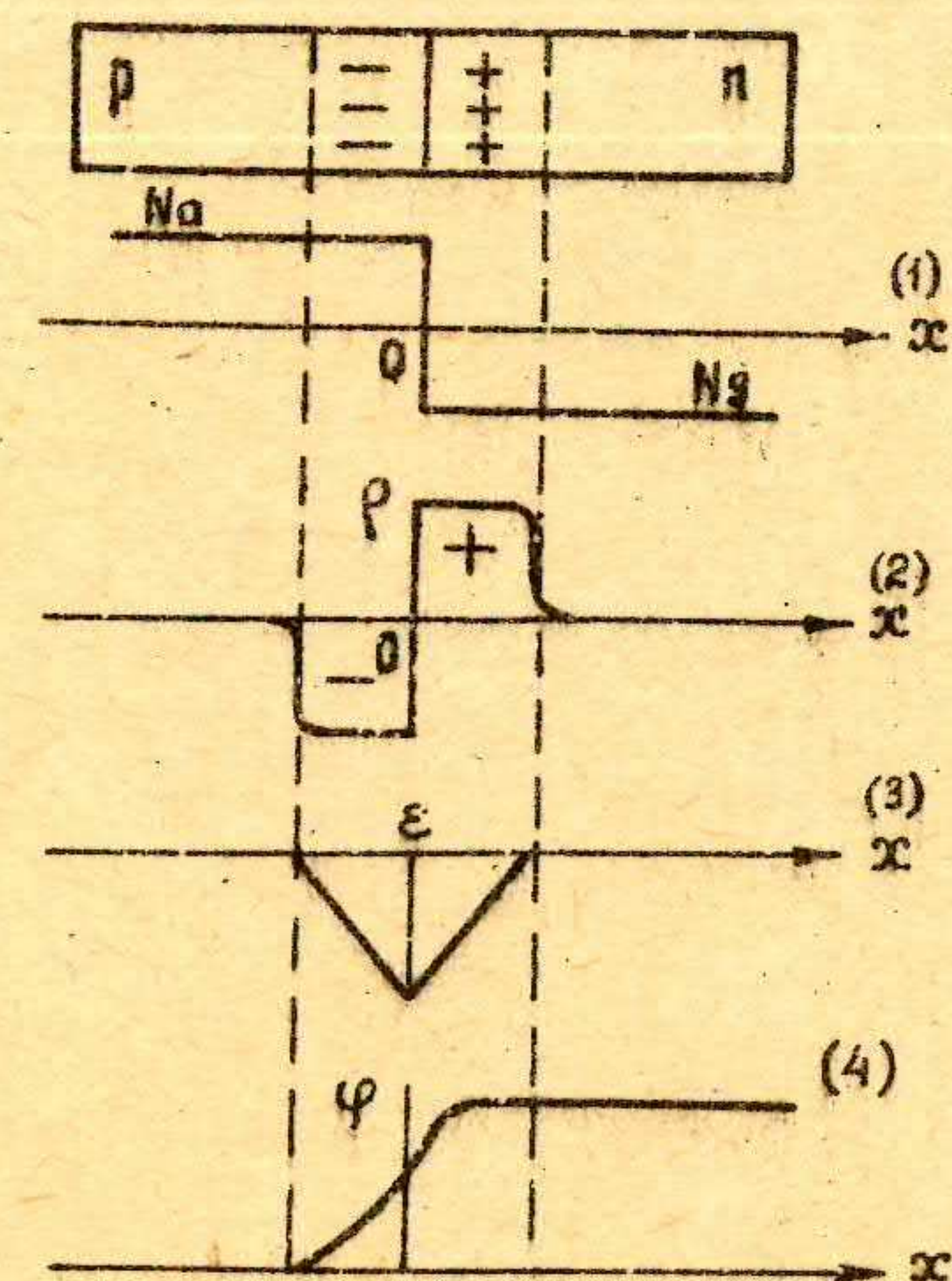


Рис. 2.2

Связь между шириной области объемного заряда и приложенным напряжением определяется следующими соотношениями для резкого р-п перехода

$$d = \left[\frac{2 \epsilon \epsilon_0 (\varphi_k - U) (N_a + N_g)}{e N_g N_a} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.5)$$

для плавного р-п перехода

$$d = \left[\frac{12 \epsilon \epsilon_0 (\varphi_k - U)}{e a} \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (2.6)$$

где ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;

ϵ_0 - абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума;

φ_k - контактная разность потенциалов;

e - заряд электронов;

N_a, N_g - концентрация акцепторов и доноров соответственно;

a - градиент концентрации примесей.

Распределение концентрации примесей, плотности объемного заряда, электрического поля, потенциала для плавного р-п перехода.

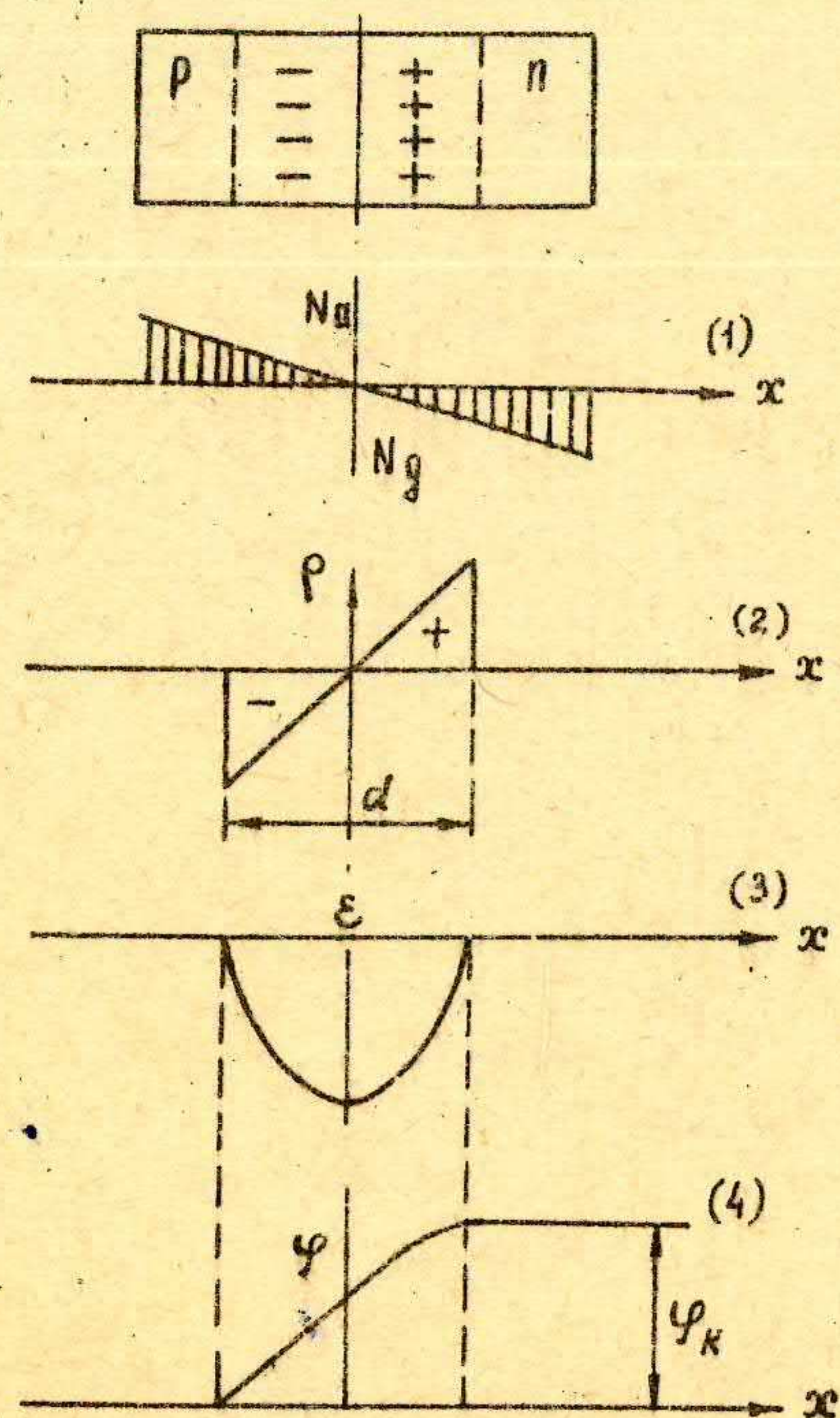


Рис. 2.3

Если постоянное напряжение, приложенное к р-п переходу, изменить на малую величину $dU \ll (\varphi_K - U)$, то ширина области объемного заряда изменится на величину $\delta \ll d$ (рис. 2.4). При этом на границах области объемного заряда будет накапливаться дополнительный объемный заряд $-dQ$ в р-типе и $+dQ$ в п-типе. Поскольку $\delta \ll d$, то можно считать, что дополнительный заряд накапливается на поверхностях, удаленных друг от друга на расстояние d . Зарядную емкость можно рассчитать как емкость плоского конденсатора

$$C_{зар} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}, \quad (2.7)$$

где S - площадь р-п перехода.

Изменение ширины области объемного заряда р-п перехода

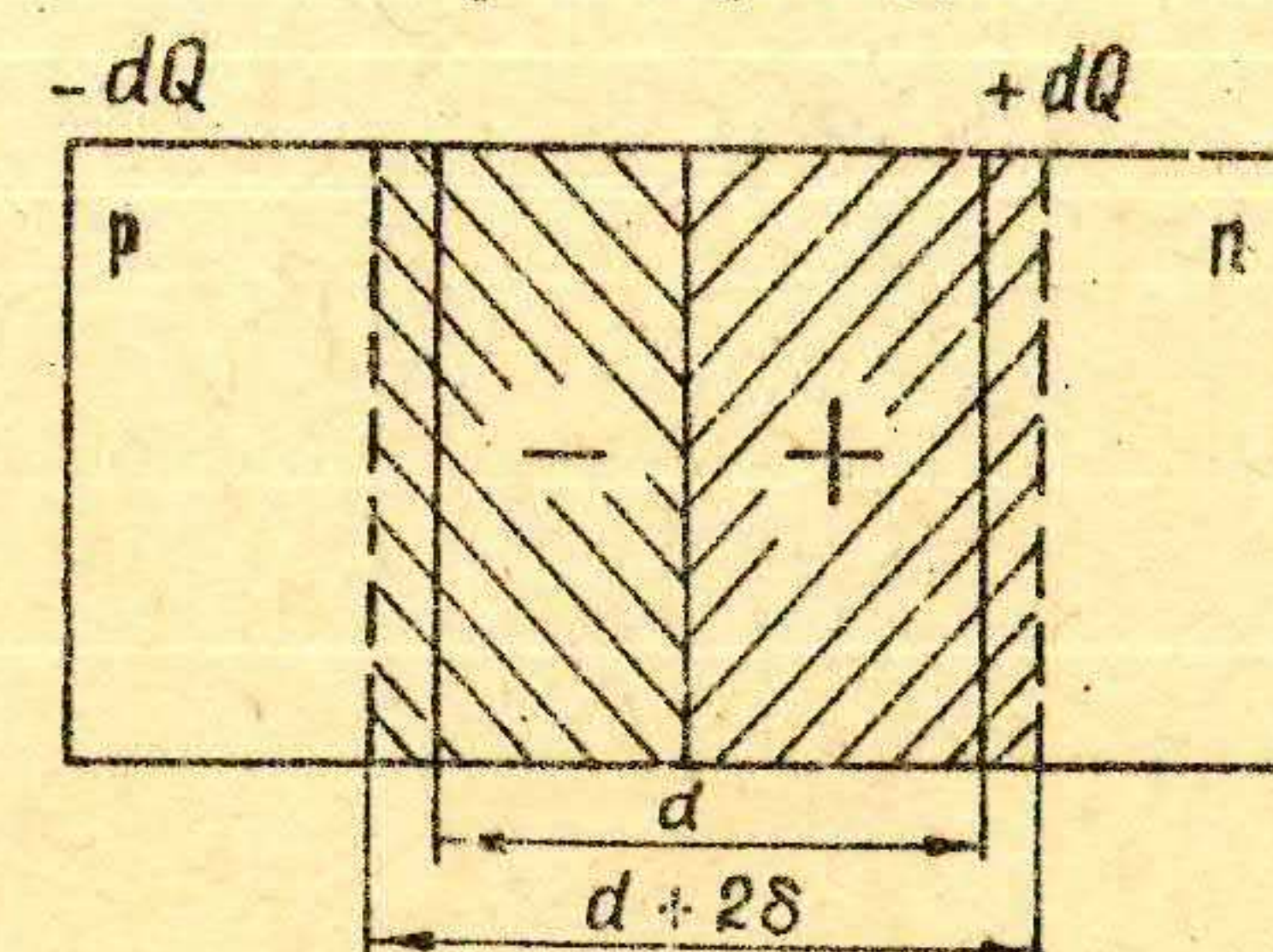


Рис. 2.4

Для большинства резких р-п переходов мы имеем $N_a \gg N_g$ или $N_g \gg N_a$. Учитывая это, зарядная емкость р-п перехода будет равна (для резкого)

$$C_{зар} = S \sqrt{\frac{e \epsilon \epsilon_0 N}{2(\varphi_K - U)}}, \quad (2.8)$$

где N - концентрация примесей в базе диода.

Зарядная емкость плавного р-п перехода имеет выражение

$$C_{зар} = S \sqrt{\frac{e(\epsilon \epsilon_0)^2 a}{12(\varphi_K - U)}} \quad (2.9)$$

Измерив вольтфарадную характеристику, можно определить некоторые конструктивные параметры диода. Если мы имеем резкий р-п переход, вольтфарадная характеристика которого описывается выражением (2.8), то, построив функцию $(S/C)^2$ в зависимости от напряжения (рис. 2.5), получим прямую линию вида

$$\left(\frac{S}{C}\right)^2 = \frac{2}{e \epsilon \epsilon_0 N} (\varphi_K - U) \quad (2.10)$$

Из выражения (2.10) видно, что при $U = \varphi_K$ величина $\left(\frac{S}{C}\right)^2 = 0$. Таким образом, по графику легко определить значение φ_K , а из наклона - концентрацию примесей.

$$N = \frac{2}{e \epsilon \epsilon_0} \cdot \frac{\Delta U}{\Delta (S/C)^2} \quad (2.11)$$

Для плавного р-п перехода, вольтфарадная характеристика которого описывается выражением (2.9), построив зависимость $(S/C)^3$ от напряжения, получим прямую линию вида

$$\left(\frac{S}{C}\right)^3 = \frac{12}{e(\epsilon\epsilon_0)a} (\varphi_K - U). \quad (2.12)$$

Зависимость $(S/C)^2$ от приложенного напряжения для резкого р-п перехода

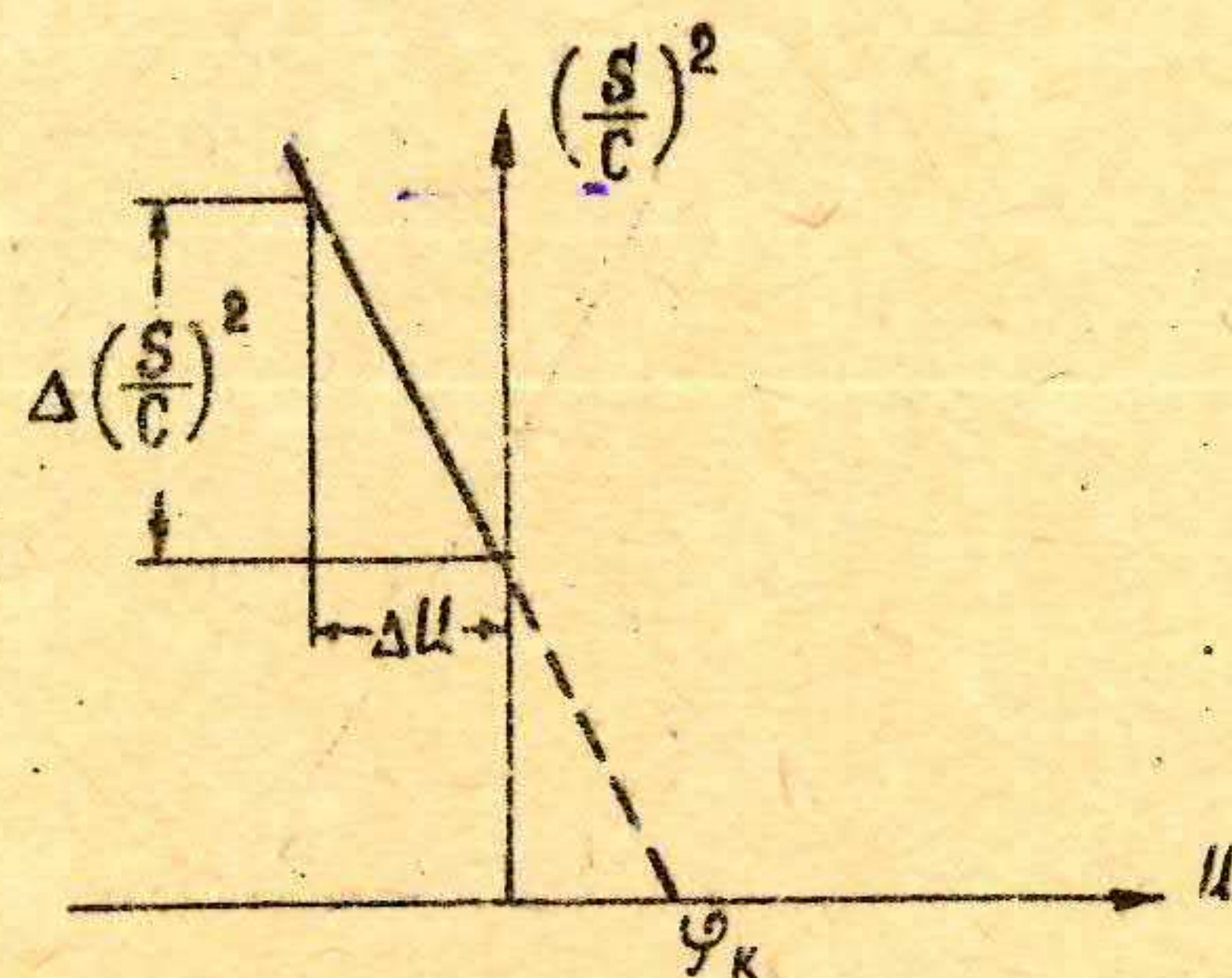


Рис. 2.5

Экстраполируя эту прямую до пересечения с осью напряжения, можно определить величину контактной разности потенциала. Действительно, если $(S/C)^3 = 0$, то $U = \varphi_K$. По наклону прямой (2.12) можно определить градиент концентрации

$$a = \frac{12}{e(\epsilon\epsilon_0)^2} \cdot \frac{\Delta U}{\Delta (S/C)^3} \quad (2.13)$$

Анализируя экспериментальную вольтфарадную характеристику р-п перехода, нетрудно убедиться, что барьерной емкостью р-п перехода можно управлять внешним напряжением. Такой класс приборов называется варикапами.

• Эквивалентная схема варикапа представлена на рис. 2.6.

Эквивалентная схема варикапа

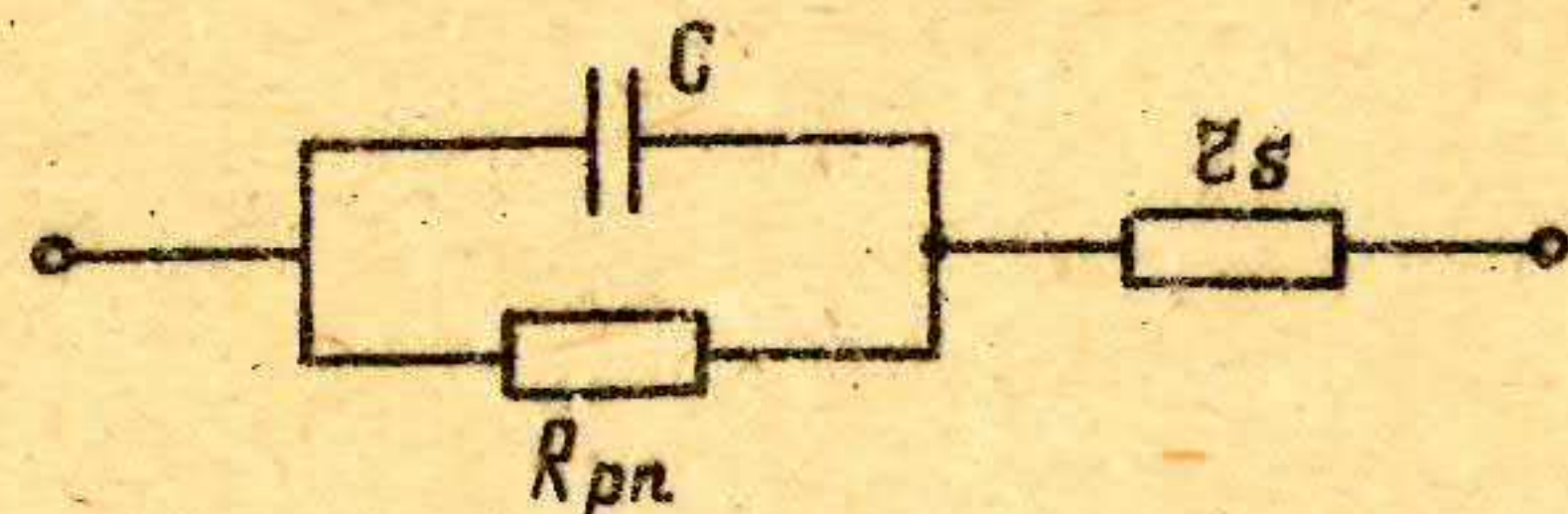


Рис. 2.6

Полное сопротивление (импеданс) варикапа имеет вид

$$Z = z_s + \frac{1}{1/R_{pn} + i\omega C}, \quad (2.14)$$

где z_s - сопротивление базы диода;

R_{pn} - сопротивление запертого р-п перехода;

ω - частота переменного сигнала.

Разделим полное сопротивление варикапа на активную и реактивную часть

$$Z = z_s + \frac{R_{pn}}{\omega^2 C^2 R_{pn}^2 + 1} - i \frac{\omega C R_{pn}^2}{\omega^2 C^2 R_{pn}^2 + 1} \quad (2.15)$$

Отсюда можно получить добротность варикапа Q_d , как отношение реактивного сопротивления к сопротивлению потерь или активному сопротивлению

$$Q_d = \frac{\omega C R_{pn}^2}{z_s + R_{pn}^2 z_s \omega^2 C^2 + R_{pn}} \quad (2.16)$$

Поскольку при обратном смещении $z_s \ll R_{pn}$, то обычно используют приближенное выражение

$$Q_d \approx \frac{\omega C R_{pn}}{1 + \omega^2 C^2 R_{pn} z_s} \quad (2.17)$$

Приравняв нулю производную Q_d по ω , найдем частоту ω_0 , при которой добротность имеет максимальное значение

$$\omega_0 = \frac{1}{C(R_{pn} z_s)^{1/2}} \quad (2.18)$$

Подставляя (2.18) в (2.17), получим выражение для максимальной добротности

$$Q_{d \max} = (R/4z_s)^{1/2} \quad (2.19)$$

В области низких частот, когда $\omega^2 C^2 R_{pn} z_s \ll 1$

$$Q_d \approx \omega C R_{pn} \quad (2.20)$$

то есть добротность увеличивается при фиксированном значении напряжения смещения на диоде пропорционально частоте переменного сигнала. В области высоких частот ($\omega^2 C^2 R_{pn} z_s \gg 1$)

$$Q_d \approx (\omega C z_s)^{-1}, \quad (2.21)$$

то есть добротность убывает обратно пропорционально частоте.

Максимальную рабочую частоту варикапа можно определить, задаваясь минимально возможным значением добротности. Например, при $Q_d = 1$ и $z_s \ll R_{pn}$ имеем

$$\omega_{max} = (\tau_s C)^{-1} \quad (2.22)$$

Другими важными параметрами варикапа являются коэффициент перекрытия по емкости (K_c) и коэффициент нелинейности (K_H)

$$K_c = \frac{C_1}{C_2}, \quad (2.23)$$

где C_1 , C_2 - значение барьерной емкости диода при напряжении смещения U_1 и U_2 соответственно;

$$K_H = \frac{\Delta C}{C \Delta U}, \quad (2.24)$$

где $\Delta C = C_1 - C_2$;

$$\Delta U = U_2 - U_1 .$$

Параметры варикапа существенно зависят от температуры из-за сильной температурной зависимости обратного тока диода. Эти зависимости параметров варикапа от температуры характеризуются температурным коэффициентом емкости варикапа

$$\alpha_c = \frac{\Delta C}{C \Delta T}, \quad \frac{\%}{\text{град}} \quad (2.25)$$

и температурным коэффициентом добротности варикапа

$$\alpha_D = \frac{\Delta Q_d}{Q_d \Delta T}, \quad \frac{\%}{\text{град}} \quad (2.26)$$

Остальные параметры варикапа такие же, как и у обычного диода.

Вольтамперная характеристика диода описывается уравнением

$$J = J_s \left[\exp \frac{e(U - Jz_s)}{kT} - 1 \right], \quad (2.27)$$

где J - ток, протекающий через диод;

J_s - ток насыщения;

U - приложенное напряжение к диоду;

z_s - объемное сопротивление базы диода;

k - постоянная Больцмана;

T - абсолютная температура.

Для измерения вольтамперной характеристики используется схема, представленная на рис.2.7.

При приложении к диоду напряжения в прямом направлении (на P+, на P-) высота потенциального барьера уменьшается и, как следствие, увеличивается диффузионная компонента тока через p-n переход, сопротивление p-n перехода уменьшается.

Электрическая схема для измерения вольтамперной характеристики

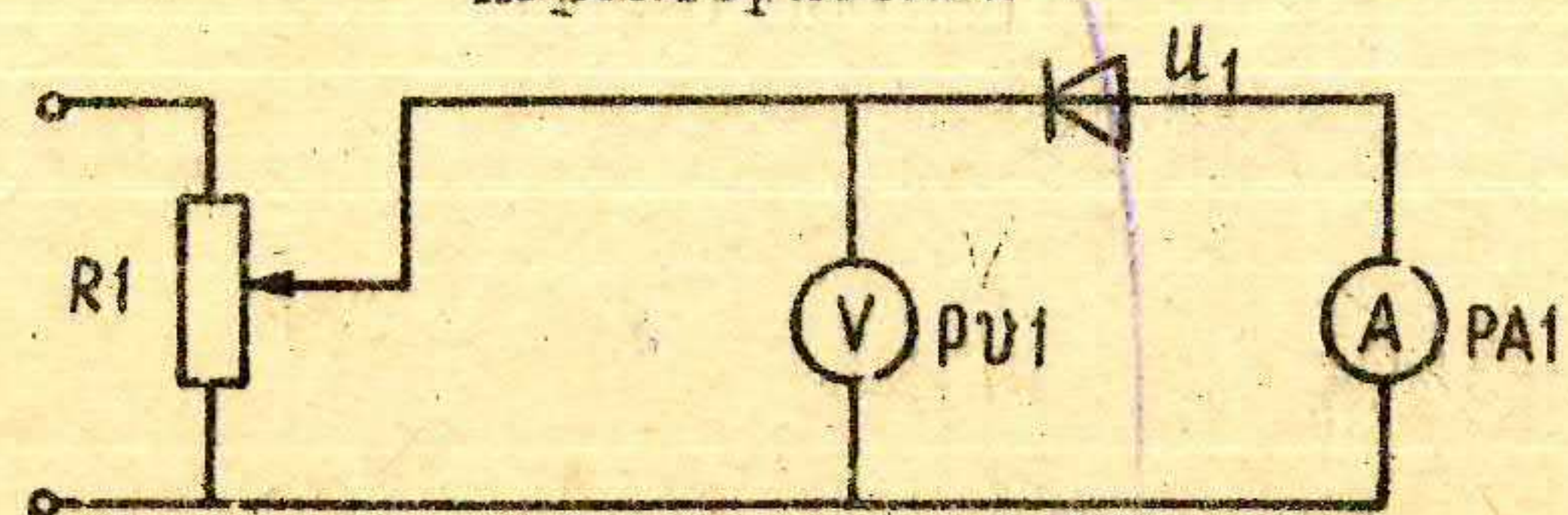


Рис. 2.7

В общем случае сопротивление диода в прямом направлении будет определяться суммой сопротивления p-n перехода и объемного сопротивления базы. При малых напряжениях, когда приложенное напряжение меньше контактной разности потенциалов φ_K , сопротивление p-n перехода R_{pn} много больше объемного сопротивления базы (z_s), ток экспоненциально зависит от приложенного напряжения. При напряжениях больше контактной разности потенциалов сопротивление p-n перехода становится много меньше, чем сопротивление базы, и ток линейно зависит от напряжения. Переход от экспоненциальной зависимости к линейной наблюдается на маломощных диодах при токах порядка 2-3 мА, для мощных - 20-30 мА. Экстраполируя линейный участок вольтамперной характеристики, как показано на рис.2.8, можно оценить контактную разность потенциалов, а по наклону линейного участка вольтамперной характеристики найти сопротивление базы $z_s = \Delta U / \Delta J$.

Вольтамперная характеристика диода

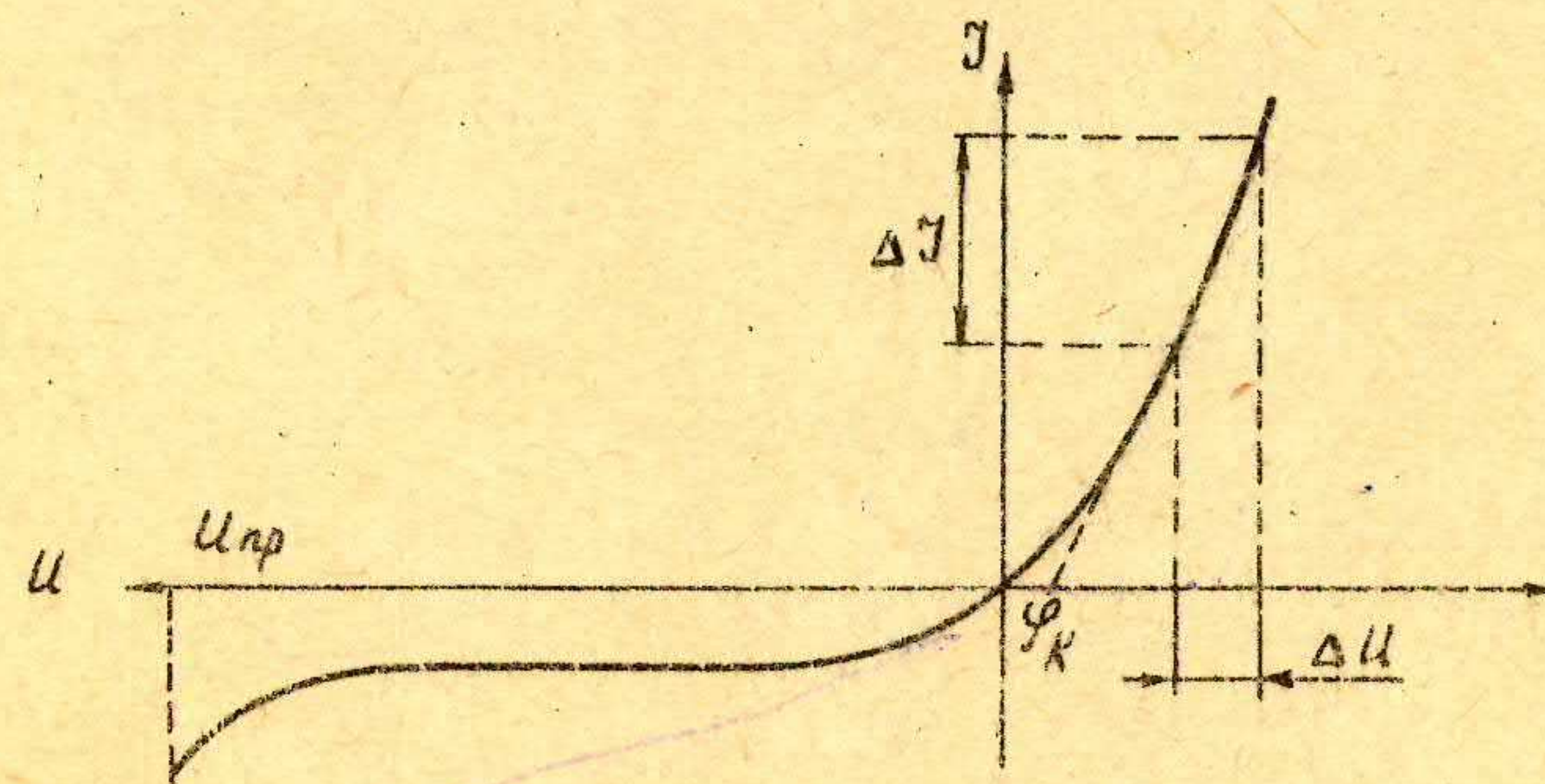


Рис. 2.8

Зная геометрические размеры базы, сопротивление Z_s , можно определить удельное сопротивление базы

$$\rho = Z_s \cdot \frac{S}{l}, \quad (2.28)$$

где ρ - удельное сопротивление базы диода;
 Z_s - сопротивление базы диода;
 S - площадь р-п перехода;
 l - ширина базы (толщина полупроводниковой пластины).

По величине удельного сопротивления полупроводника можно определить концентрацию примесей в базе диода

$$N = \frac{1}{e\mu\rho}, \quad (2.29)$$

где N - концентрация примесей в базе диода;
 e - заряд электрона;
 ρ - удельное сопротивление;
 μ - подвижность носителей заряда (не зависит от концентрации примесей).

При приложении обратного напряжения высота потенциального барьера возрастает и ток определяется дрейфовой компонентой тока, которая пропорциональна концентрации неосновных носителей заряда. При некотором напряжении наблюдается резкое увеличение обратного тока, т.е. наблюдается пробой р-п перехода. Под пробивным напряжением понимают такое напряжение, при котором обратный ток возрастает в 10 раз по сравнению с обратным током при рабочем напряжении. Максимальное обратное рабочее напряжение обычно составляет 0,7-0,8 от пробивного. Зная величину пробивного напряжения по эмпирическим соотношениям (см. ниже), можно оценить концентрацию примесей в базе резкого р-п перехода, а для плавного р-п перехода градиент концентрации примесей.

Для германия: резкий р⁺п переход $U_{проб} = 100\rho^{0,8}$
резкий рп⁺ переход $U_{проб} = 55\rho^{0,8}$
плавный р-п переход $U_{проб} = 4,46 \cdot 10^{10} \alpha^{-0,45}$

для кремния: резкий р⁺п переход $U_{проб} = 96 \cdot \rho^{0,78}$
резкий рп⁺ переход $U_{проб} = 48\rho^{0,78}$
плавный р-п переход $U_{проб} = 4,57 \cdot 10^6 \alpha^{-0,3}$

где ρ - удельное сопротивление базы диода, Ом·см;
 α - градиент концентраций примесей в р-п переходе, см⁻⁴.

Для исследования диода используется лабораторный макет, внешний вид которого и принципиальная схема показаны на рис. 2.9.

Внешний вид лабораторного макета

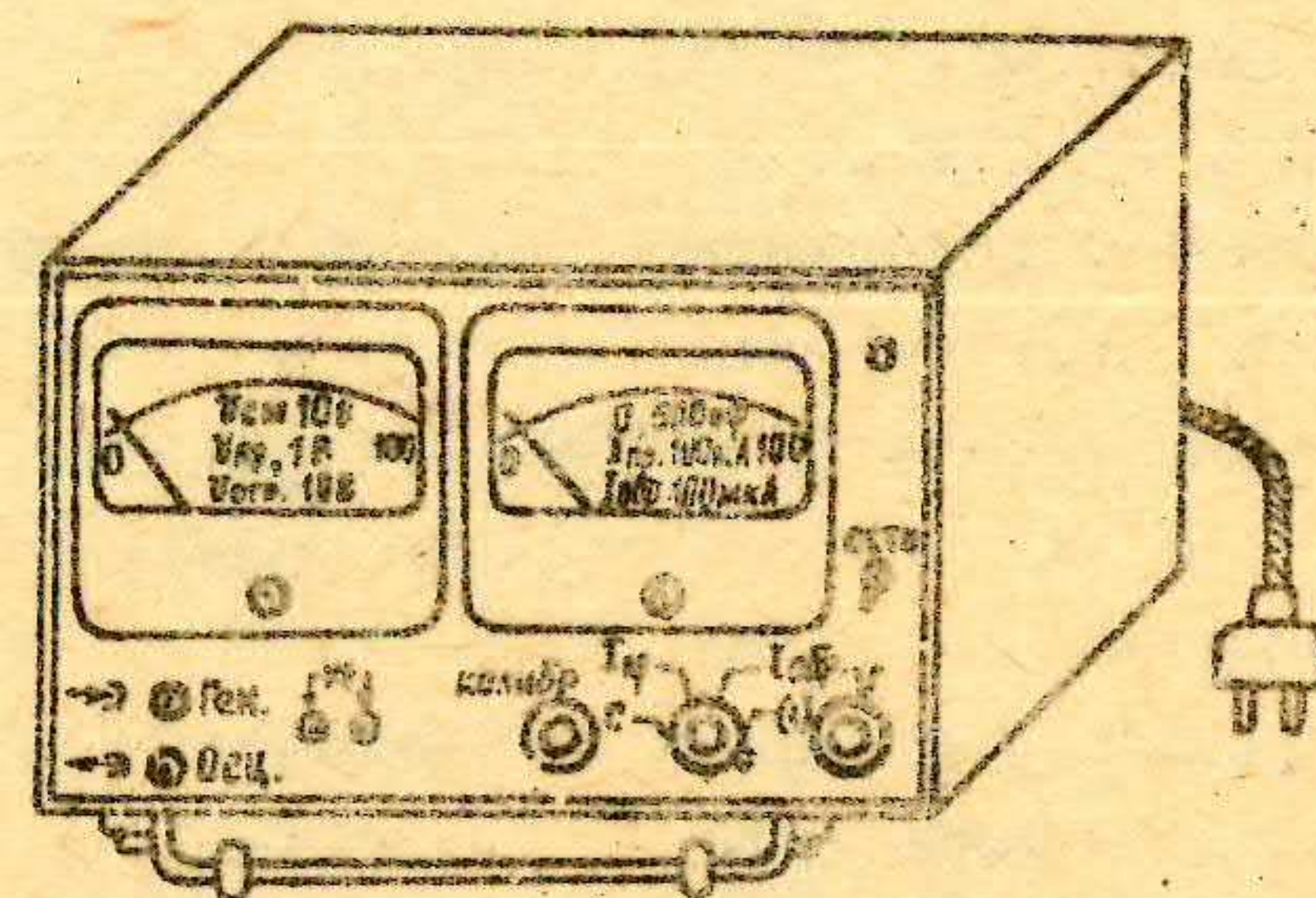


Рис. 2.9

Исследуемый диод подключается к гнездам. Полярность подключения обозначена на макете. Режим работы выбирается переключателем: "С" - исследование вольтфарадной характеристики, регулировка постоянного напряжения осуществляется ручкой "U"; "I_{пр}" - исследование прямой вольтамперной характеристики, регулировка напряжения осуществляется ручкой "U"; "I_{обр}" - исследование обратной вольтамперной характеристики, регулировка напряжения производится ручкой "U". Отсчет значений емкости, прямого тока, обратного тока осуществляется по прибору отсчета параметров.

Перед началом измерения вольтфарадной характеристики необходимо провести калибровку прибора. Для этого в режиме измерения вольтфарадной характеристики в гнезда для исследуемого образца вставляется эталонный конденсатор емкостью 500 пФ, ручкой КАЛИБРОВКА стрелку измерителя параметров устанавливают в положение 500 пФ. После этого прибор готов к измерениям.

3. ЗАДАНИЕ

- ✓ 3.1. Измерить вольтфарадную характеристику р-п перехода при обратных напряжениях.
- ✓ 3.2. Построить график зависимости $C = f(U)$. Рассчитать коэффициент перекрытия по емкости и коэффициент нелинейности.
- ✓ 3.3. Рассчитать добротность варикапа по формуле (2.16) в диапазоне частот от 1 до 10³ кГц. Учитывая, что $g_{pn} = \frac{dU}{dT} = \frac{KT}{eT_0}$

$I_{\text{обр}} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ А}$.

- 3.4. Определить максимальную рабочую частоту варикапа по формуле (2.22) или из графика $Q_c = f(\omega)$.
- 3.5. Измерить прямую вольтамперную характеристику диода.
- 3.6. Измерить обратную вольтамперную характеристику, изменяя напряжение от 0 до пробивного напряжения.
- 3.7. Построить функции $(I/C)^2$ и $(I/C)^3$ в зависимости от обратного напряжения и определить характер р-п перехода.
- 3.8. Построить вольтамперную характеристику.
- 3.9. Определить величину контактной разности потенциалов по вольтамперной и вольтфарадной характеристикам, сравнить полученные результаты.
- 3.10. Для резкого р-п перехода рассчитать концентрацию примесей в базе диода по вольтфарадной, вольтамперной характеристикам и пробивному напряжению.

Для плавного р-п перехода по вольтамперной характеристике рассчитать концентрацию примесей в базе, по вольтфарадной характеристике и пробивному напряжению рассчитать градиент концентрации примесей в р-п переходе. Полученные результаты сравнить и объяснить их расхождение.

4. ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

- 4.1. Площадь р-п перехода $S = 0,2 \text{ мм}^2$.
- 4.2. Ширина базы $\ell = 0,2 \text{ мм}$.
- 4.3. Относительная диэлектрическая проницаемость: германий - 16,3; кремний - 11,2.
- 4.4. Диэлектрическая проницаемость вакуума: $8,86 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
 $= 8,86 \cdot 10^{-14} \text{ Ф/см}$.
- 4.5. Постоянная Больцмана: $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ $= 0,86 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$
- 4.6. Заряд электрона - $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.
- 4.7. Подвижность носителей заряда в кремнии:
дырок - $470 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$; электронов - $1300 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ в германии:
дырок - $1020 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$; электронов - $3800 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 5.1. Объяснить природу зарядовой емкости.
- 5.2. Как на основании вольтфарадной характеристики определить величину контактной разности потенциалов?
- 5.3. Объясните влияние распределения примесей на вольтфарадную характеристику.
- 5.4. Как по вольтфарадной характеристике определить тип р-п перехода (резкий или плавный)?
- 5.5. Объясните, почему пробивное напряжение р-п перехода зависит от концентрации примесей для резкого р-п перехода, а для плавного - от градиента концентрации.

6. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 6.1. Федотов А.Я. Основы физики полупроводниковых приборов. -М.: Сов.радио, 1969. -591с.
- 6.2. Берман Л.С. Нелинейная полупроводниковая емкость. -М.: Физматгиз, 1963. -86с.
- 6.3. Аронзон В.Л., Федотов А.Я. Испытание и исследование полупроводниковых приборов. -М.: Высшая школа, 1975. -253с.
- 6.4. Гаман В.И. Физика полупроводниковых приборов. -Томск: Изд-во Томск. гос.ун-та, 1989. -337с.