

Методическая погрешность измерения нелинейной емкости

В. А. СЕРГЕЕВ*, И. В. ФРОЛОВ**

* Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Ульяновск, Россия, e-mail: sva@ulstu.ru

** Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

Получены зависимости методической погрешности измерений нелинейной емкости от амплитуды тестового гармонического сигнала при использовании различных типов преобразователей переменного напряжения в постоянное. На примере полупроводникового диода показано, что наименьшая методическая погрешность при измерении диффузионной емкости достигается для преобразователей средневывраженного значения, а погрешность измерения барьерной емкости одинакова для всех типов преобразователей.

Ключевые слова: нелинейная емкость, преобразователь напряжения, полупроводниковый диод, диффузионная и барьерная емкости.

The dependences of methodical error of nonlinear capacitance measurement from the test harmonic signal level at using the different types of AC/DC converters were obtained. In is shown on an example of semiconductor diode that the least methodical error at measurement of the diffusion capacity is achieved for half-period average value converters and the error of the barrier capacitance measurement is equal for all types of converters.

Key words: nonlinear capacity, voltage converter, semiconductor diode, barrier capacity, diffusion capacity.

Емкости многих элементов электрических цепей, в частности эквивалентные емкости полупроводниковых приборов (ПП), оказываются существенно нелинейными, т. е. сильно зависят от приложенного напряжения. Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) являются важными характеристиками ПП, позволяющими определять различные свойства и параметры приборов, такие как профиль распределения легирующей примеси, контактная разность потенциалов, время жизни неосновных носителей заряда и др. [1—4]. Использование ВФХ для указанных целей и диагностики качества ПП требует высокой точности измерений этих характеристик.

Нелинейность емкости контролируемых элементов приводит к появлению методической погрешности измерения, зависящей от уровня тестового сигнала. При этом очевидно, что точность измерений повышается с уменьшением тестового воздействия. Ведущие производители аппаратуры для измерений параметров ПП стремятся снизить амплитуду тестового сигнала. Так, комплекс 4200-SCS фирмы Keithley для измерений характеристик ПП позволяет устанавливать минимальное действующее значение тестового сигнала 10 мВ, а прецизионный измеритель RLC E4980A фирмы Agilent — 100 мкВ. Однако зависимостей, устанавливающих связь между погрешностью измерения, обусловленной нелинейностью емкости, и амплитудой тестового сигнала при использовании различных видов преобразования переменного напряжения в постоянное, в литературе не приводится.

Анализ методической погрешности при измерении нелинейной емкости рассмотрим на примере эквивалентной емкости полупроводникового диода методом емкостно-омического делителя по [5]. Согласно требованиям [5] дифференциальное сопротивление диода при заданном напряжении смещения на частоте измерения должно более чем в десять раз превышать емкостное сопротивление. Это усло-

вие выполняется для обратносмещенных диодов и при прямом смещении диода на малых токах и высоких частотах тестового сигнала [6]. В этом случае влияние параллельно включенного дифференциального сопротивления можно не учитывать и считать, что проводимость диода носит чисто емкостный характер.

Анализ методической погрешности измерения емкости диода с использованием детекторов различного типа. Барьерная и диффузионная емкости диода — малосигнальные параметры, характеризующие изменение заряда dq при изменении приложенного напряжения [4]. В пределе малых приращений напряжения dU они определяются как дифференциальные емкости $C(U) = dq/dU$. Для измерения дифференциальной емкости на диод подается напряжение смещения $U_C(t)$, содержащее постоянную составляющую U_0 , задающую рабочую точку, и тестовый сигнал в форме гармонического напряжения частотой ω и амплитудой U_m :

$$U_C(t) = U_0 + U_m \sin \omega t. \quad (1)$$

Переменный ток $I_C(t)$, протекающий через диод, создает падение напряжения $U_R(t)$ на образцовом резисторе сопротивлением $R_{обр}$, включенным последовательно с диодом:

$$U_R(t) = R_{обр} I_C(t).$$

Для упрощения дальнейшего анализа будем полагать $R_{обр} \ll [\omega C(U_0)]^{-1}$. Переменное напряжение $U_R(t)$ преобразуется в постоянное и измеряется вольтметром постоянного напряжения. Примем также, что период $T = 2\pi/\omega$ тестового сигнала много больше характерного времени релаксации заряда в диоде как при прямом, так и при обратном смещении, т. е. будем считать диод безынерционным элементом. В этом случае заряд q безынерционно следует за перемен-

ным напряжением $U_C(t)$ и для тока, протекающего через емкость, справедливо выражение

$$I_C(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{\partial q}{\partial U} \frac{\partial U_C(t)}{\partial t} = C(U) \frac{\partial U_C(t)}{\partial t}. \quad (2)$$

Заметим, что условие безынерционности не является обязательным, а лишь несколько упрощает математические выкладки, поскольку учет переходных электрических процессов в диоде приводит лишь к сдвигу фазы между переменным током через диод и тестовым сигналом.

В окрестности рабочей точки U_0 функцию $C(U)$ можно разложить в ряд Тейлора. Ограничившись квадратичными членами, получим

$$C(U) = C_0 + a\Delta U + b\Delta U^2 + \dots, \quad (3)$$

где C_0 — емкость в рабочей точке U_0 , т. е. $C(U_0) = C_0$; $a = dC(U)/dU|_{U_0}$, $b = 0,5d^2C(U)/dU^2|_{U_0}$.

Согласно (1) полагая $\Delta U = U_m \sin \omega t$, из (3) находим

$$C(U) = C_0 + aU_m \sin \omega t + bU_m^2 \sin^2 \omega t. \quad (4)$$

После подстановки (4) в (2) имеем

$$I_C(t) = U_m \omega (C_0 + aU_m \sin \omega t + bU_m^2 \sin^2 \omega t) \cos \omega t;$$

$$U_R(t) = R_{обр} U_m \omega (C_0 + aU_m \sin \omega t + bU_m^2 \sin^2 \omega t) \cos \omega t. \quad (5)$$

Рассмотрим преобразование переменного напряжения, снимаемого с образцового резистора детекторами различных типов.

Пиковый детектор для положительной полуволны. Экстремумы напряжения $U_R(t)$ достигаются в моменты времени, соответствующие нулям производной $dU_R(t)/dt$.

Пренебрегая членом $bU_m^2 \sin^2 \omega t$ в (5) и дифференцируя $U_R(t)$ с учетом условия $aU_m \ll C_0$, получаем уравнение $R_{обр} U_m \omega^2 (-C_0 \sin \omega t + aU_m \cos 2\omega t) = 0$ для нахождения нулей производной функции $U_R(t)$, откуда

$$\sin \omega t = \left(-C_0 + \sqrt{C_0^2 + 8a^2 U_m^2} \right) / (4aU_m). \quad (6)$$

Для решения (6) воспользуемся приближенной формулой $\sqrt{x + \Delta x} \approx \sqrt{x} + \Delta x / (2\sqrt{x})$, справедливой при малых Δx , в соответствии с которой $\sin \omega t \approx aU_m / C_0$. Таким образом, функция (5) имеет два экстремума в точках $t_1 = \arcsin(aU_m / C_0)$, $t_2 = \pi - \arcsin(aU_m / C_0)$. Подставив t_1 в (5), получим максимальное напряжение на образцовом резисторе

$$U_{п+} \approx R_{обр} U_m \omega C_0 \left[1 + a^2 U_m^2 / (2C_0^2) \right]$$

и относительную погрешность измерения емкости диода для этого типа преобразователя

$$\Theta_{п+} = a^2 U_m^2 / (2C_0^2). \quad (7)$$

Пиковый детектор для отрицательной полуволны. Подставив t_2 в (5), найдем минимальное напряжение на образцовом резисторе

$$U_{п-} \approx -R_{обр} U_m \omega C_0 \left[1 + a^2 U_m^2 / (2C_0^2) \right]$$

и относительную погрешность измерения емкости

$$\Theta_{п-} = \Theta_{п+} = a^2 U_m^2 / (2C_0^2). \quad (8)$$

Детектор размаха. Постоянное напряжение на выходе детектора размаха определяется как разность между максимальным и минимальным значениями переменного напряжения:

$$U_p = U_{п+} - U_{п-} = 2R_{обр} U_m \omega C_0 \left[1 + a^2 U_m^2 / (2C_0^2) \right].$$

Относительная погрешность измерения емкости при использовании этого детектора

$$\Theta_p = a^2 U_m^2 / (2C_0^2). \quad (9)$$

Детектор средневывпрямленного значения (СВЗ). Согласно определению СВЗ переменного напряжения

$$U_{СВЗ} = \frac{1}{T} \int_0^T |\tilde{U}(t)| dt.$$

Чтобы вычислить СВЗ напряжения $U_R(t)$, необходимо найти нули этой функции на интервале $[0, T]$ и провести интегрирование на интервалах между нулями.

На интервале $[0, T]$ при условии $aU_m \ll C_0$ функция $U_R(t)$ имеет два нуля: $t_1 = \pi/(2\omega)$, $t_2 = 3\pi/(2\omega)$. Интегрируя $U_R(t)$ на интервалах $[\pi/(2\omega); 3\pi/(2\omega)]$ и $[3\pi/(2\omega); 5\pi/(2\omega)]$, получаем

$$U_{СВЗ} = 2R_{обр} U_m \omega C_0 \pi^{-1} \left[1 + bU_m^2 / (3C_0) \right]$$

и относительную погрешность измерения емкости диода

$$\Theta_{СВЗ} = bU_m^2 / (3C_0). \quad (10)$$

Детектор среднеквадратического значения (СКЗ).

Подставив (5) в формулу $U_{СКЗ} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_R^2(t) dt}$ и применив

разложение квадратного корня в ряд, найдем выражение для напряжения на выходе детектора СКЗ:

$$U_{СКЗ} \approx \frac{R_{обр} U_m \omega C_0}{\sqrt{2}} \left(1 + \frac{a^2 U_m^2}{8C_0^2} + \frac{bU_m^2}{4C_0} \right)$$

и относительную погрешность измерения емкости диода

$$\Theta_{СКЗ} = a^2 U_m^2 / (8C_0^2) + bU_m^2 / (4C_0). \quad (11)$$

Общие выражения для погрешностей измерений емкости диода при использовании детекторов различного типа сведен в табл. 1 и используем для расчета погрешности измерения диффузионной и барьерной емкости диода с резким p — n -переходом. Для такого диода барьерная емкость определяется выражением [8]:

$$C(U) = S \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 q N_a N_d}{2(N_a + N_d)(U + \varphi_k)}} = \frac{A}{\sqrt{U + \varphi_k}}, \quad (12)$$

где S — площадь перехода; ε — диэлектрическая проницаемость полупроводника; ε_0 — электрическая постоянная; q — элементарный заряд; N_a , N_d — концентрации соответственно акцепторной и донорной примесей; φ_k — контактная разность потенциалов.

В (4) коэффициенты a , b для барьерной емкости будут

$$a_6 = -C_0 / [2(U_0 + \varphi_k)] b_6 = 3C_0 / [8(U_0 + \varphi_k)^2].$$

Зависимость диффузионной емкости диода от напряжения независимо от характера p — n -перехода имеет вид [4]:

$$C_{\text{диф}}(U) = \frac{\tau}{m\varphi_T} I_{\text{об}} \exp\left(\frac{U}{m\varphi_T}\right), \quad (13)$$

где τ — время жизни неосновных носителей в области базы; $I_{\text{об}}$ — обратный тепловой ток диода; m — коэффициент неидеальности ВАХ; $\varphi_T = kT/q$ — тепловой потенциал; k — постоянная Больцмана; q — элементарный заряд; T — абсолютная температура.

Коэффициенты a , b в (4) для диффузионной емкости принимают вид $a_{\text{диф}} = C_0/(m\varphi_T)$, $b_{\text{диф}} = 0,5C_0/(m\varphi_T)^2$.

Подставляя коэффициенты a_6 , b_6 , $a_{\text{диф}}$, $b_{\text{диф}}$ в (7)–(11), получаем выражения для относительных систематических погрешностей измерений барьерной и диффузионной емкости диода с резким p — n -переходом, обусловленных нелинейностью, при использовании различных типов преобразователей напряжения (см. табл. 1). Для барьерной емкости погрешность в табл. 1 не приведена; она не зависит от типа детектора напряжения и составляет

$$\Theta_6 = U_m^2 / [8(U_0 + \varphi_k)^2].$$

Важно отметить, что погрешность измерения диффузионной емкости диода с резким переходом не зависит от выбора рабочей точки U_0 и остается постоянной на любом участке ВФХ диода, тогда как погрешность измерения барьерной емкости возрастает обратно пропорционально квадрату напряжения U_0 и достигает максимального значения $\Theta_{6\text{max}} = U_m^2 / (8\varphi_k^2)$ при $U_0 = 0$.

Из анализа данных табл. 1 также следует, что при измерении диффузионной емкости прямосмещенного диода наименьшая погрешность, обусловленная нелиней-

ностью, обеспечивается использованием преобразователя СВЗ при детектировании напряжения, снимаемого с $R_{\text{обр}}$. В то же время сигнал на выходе детектора размаха больше, чем на выходе какого-либо другого детектора, т. е. чувствительность измерительной схемы этим типом преобразователя выше. Следовательно, при измерении барьерной емкости, поскольку погрешность ее измерения не зависит от типа детектора, целесообразно использовать детектор размаха. При измерении диффузионной емкости выбор типа детектора должен определяться соотношением между погрешностью и чувствительностью.

Как уже отмечалось, для уменьшения погрешности нелинейности необходимо уменьшать амплитуду тестового сигнала, однако снизу она ограничена аддитивными шумами измерительных цепей. Уровень шума на выходе современных аналоговых измерительных преобразователей АС/DC составляет единицы нановольта на корень из герц и в полосе до 1 МГц не превышает нескольких микровольта. Гораздо большее влияние оказывает шум квантования, возникающий при преобразовании напряжения на выходе аналогового детектора в код с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП) [7]. Шум квантования является случайным знакопеременным дискретным сигналом с равномерным распределением и амплитудой, равной единице младшего разряда АЦП. Предельное значение уровня шума можно оценить по формуле $U_{\text{ш}} = U_{\text{max}}/2^N$, где U_{max} — верхний предел рабочего диапазона напряжений АЦП, N — число его разрядов. В качестве оценки предельной погрешности измерения при наличии систематической и случайной составляющих примем их сумму, и при использовании детектора размаха запишем результат измерения в виде [8]:

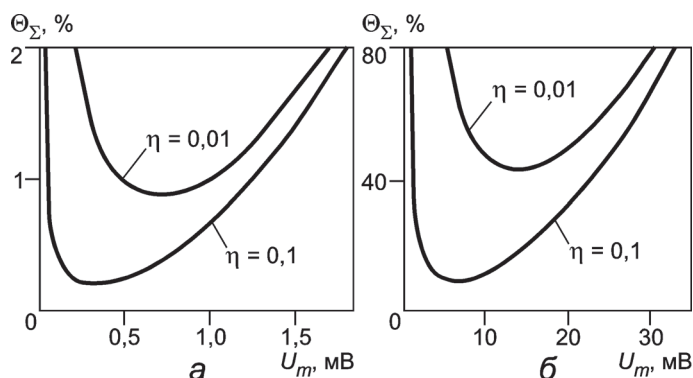
$$A_{\text{АЦП}} = 2R_{\text{обр}} U_m \omega C_0 + \left[2R_{\text{обр}} U_m \omega C_0 a^2 U_m^2 / (2C_0^2) + U_{\text{ш}} \right], \quad (14)$$

где первое слагаемое в правой части — полезный сигнал, а второе слагаемое — предельная суммарная абсолютная погрешность измерения.

Таблица 1

Выражения для различных типов детекторов

Детектор	Сигнал на выходе детектора	Θ	$\Theta_{\text{диф}}$
Пиковый для положительной полуолны	$R_{\text{обр}} U_m \omega C_0 \left(1 + \frac{a^2 U_m^2}{2C_0^2} \right)$	$\Theta_{\text{п+}} = \frac{a^2 U_m^2}{2C_0^2}$	$\frac{U_m^2}{2(m\varphi_T)^2}$
Пиковый для отрицательной полуолны	$-R_{\text{обр}} U_m \omega C_0 \left(1 + \frac{a^2 U_m^2}{2C_0^2} \right)$	$\Theta_{\text{п-}} = \frac{a^2 U_m^2}{2C_0^2}$	$\frac{U_m^2}{2(m\varphi_T)^2}$
Размаха	$2R_{\text{обр}} U_m \omega C_0 \left(1 + \frac{a^2 U_m^2}{2C_0^2} \right)$	$\Theta_{\text{р}} = \frac{a^2 U_m^2}{2C_0^2}$	$\frac{U_m^2}{2(m\varphi_T)^2}$
СВЗ	$\frac{2R_{\text{обр}} U_m \omega C_0}{\pi} \left(1 + \frac{b U_m^2}{3C_0} \right)$	$\Theta_{\text{СВЗ}} = \frac{b U_m^2}{3C_0}$	$\frac{U_m^2}{6(m\varphi_T)^2}$
СКЗ	$\frac{R_{\text{обр}} U_m \omega C_0}{\sqrt{2}} \left(1 + \frac{a^2 U_m^2}{8C_0^2} + \frac{b U_m^2}{4C_0} \right)$	$\Theta_{\text{СКЗ}} = \frac{a^2 U_m^2}{8C_0^2} + \frac{b U_m^2}{4C_0}$	$\frac{U_m^2}{4(m\varphi_T)^2}$



Графики зависимостей суммарной погрешности Θ_{Σ} измерения емкости от амплитуды U_m тестового сигнала для барьерной (а) и диффузионной (б) емкостей полупроводникового диода при $\eta = \omega C_0 R_{обр}$, $U_{ш} = 80$ мкВ, $\varphi_k = 0,5$ В, $U_0 = -5$ В

В соответствии с (14) суммарная относительная погрешность

$$\Theta_{\Sigma}(U_m) = \Theta_p + \Theta_{ш} = \frac{a^2 U_m^2}{2C_0^2} + \frac{U_{ш}}{2R_{обр} U_m \omega C_0}.$$

Поскольку составляющие относительной погрешности зависят от амплитуды тестового сигнала противоположным образом, то Θ_{Σ} принимает минимальное значение при некоторой оптимальной амплитуде тестового сигнала $U_m^{опт}$, которую легко найти, приравняв нулю производную функции $\Theta_{\Sigma}(U_m)$:

$$U_m^{опт} = \sqrt[3]{C_0 U_{ш} / (2\omega a^2 R_{обр})}.$$

Графики зависимости Θ_{Σ} от амплитуды U_m тестового сигнала при измерении барьерной и диффузионной емкостей полупроводникового диода при различных значениях параметра $\eta = \omega C_0 R_{обр}$ приведены на рисунке. Соответственно при измерении барьерной емкости диода с резким $p-n$ -переходом с учетом (12) получим

$$U_{мб}^{опт} = \sqrt[3]{2U_{ш}(U_0 + \varphi_k)^2 / (\omega C_0 R_{обр})}, \quad (15)$$

а при измерении диффузионной емкости с учетом (13)

$$U_{мдиф}^{опт} = \sqrt[3]{U_{ш}(m\varphi_T)^2 / (2\omega C_0 R_{обр})}. \quad (16)$$

Расчетные значения по (15), (16), а также соответствующие им минимальные суммарные относительные погрешности измерений барьерной $\Theta_{\Sigmaб}^{мин}$ и диффузионной $\Theta_{\Sigmaдиф}^{мин}$ емкостей при $\eta = 10^{-2}$ и при использовании АЦП различных разрядности и рабочего диапазона приведены в табл. 2.

Для уменьшения относительной погрешности квантования необходимо работать в верхней части динамического диапазона АЦП. Для этого требуется усилить в $K_{ус}$ раз измерительный переменный сигнал до преобразования. При этом относительная погрешность измерения, обусловленная нелинейностью, не изменится, а относительная погрешность, вызванная шумом квантования, уменьшится во столько же раз, а оптимальная амплитуда зондирующего сигнала в $\sqrt[3]{K_{ус}}$ раз.

В результате усиления сигнала при использовании 16-разрядного АЦП с пределом 5 В и $K_{ус} = 100$ можно снизить минимальную погрешность измерения с 0,87 до 0,04 % для барьерной емкости и с 43,07 до 2 % для диффузионной емкости. При этом следует иметь ввиду, что нестабильность коэффициента усиления должна быть, по крайней мере, в 3—5 раз меньше, т. е. не превышать 0,008 %.

Выводы. Получены общие выражения, связывающие методическую погрешность измерения нелинейной емкости методом емкостно-омического делителя. Показано, что относительная методическая погрешность измерений барьерной и диффузионной емкостей полупроводникового диода прямо пропорциональна квадрату амплитуды тестового сигнала. При измерении диффузионной емкости наибольшая точность достигается при использовании преобразователя средневывпрямленного значения в качестве детектора напряжения, а погрешность измерения барьерной емкости диода с резким $p-n$ -переходом принимает одинаковые значения для всех типов детекторов. При измерении барьерной емкости в качестве детектора переменного напряжения целесообразно использовать детектор размаха, так как он обеспечивает большую чувствительность метода. При аддитивном шуме в измерительной схеме (например шуму квантования АЦП) существует оптимальное значение амплитуды тестового сигнала, при котором суммарная предельная погрешность измерений принимает минимальное значение. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ № 2014/232 Ульяновскому государственному техническому университету.

Таблица 2

Расчетные значения параметров для случаев измерений барьерной и диффузионной емкостей

Параметр	Диапазон АЦП, В							
	5,0				3,3			
	Разрядность, бит							
	10	12	14	16	10	12	14	16
$U_{ш}$, мВ	4,88	1,22	0,31	0,08	3,22	0,81	0,20	0,05
Барьерная емкость								
$U_{мб}^{опт}$, В	2,70	1,70	1,08	0,69	2,35	1,49	0,93	0,59
$\Theta_{\Sigmaб}^{min}$, %	13,54	5,37	2,16	0,87	10,26	4,09	1,61	0,64
Диффузионная емкость								
$U_{мдиф}^{опт}$, мВ	54,84	35,55	21,88	13,93	47,75	30,14	18,91	11,91
$\Theta_{\Sigmaд}^{min}$, %	667,4	264,9	106,3	43,07	505,8	201,6	79,33	31,48

Л и т е р а т у р а

1. **Маняхин Ф. И.** Измерение распределения и температурной зависимости эффективной концентрации заряженных центров в базовой области диодных структур // Измерительная техника. 1996. № 11. С. 49—52; **Manyakhin F. I.** Measurement of the distribution and temperature dependence of the effective charge-center density in the base region of diode structures // Measurement Techniques. 1996. V. 39. N. 11. P. 1147—1152.
2. **Зубков В. И.** Диагностика гетероструктур с квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ методом вольт-фарадных характеристик: разрывы зон, уровни квантования, волновые функции // ФТП. 2007. Т. 41. Вып. 3. С. 331—337.

3. **Концевой Ю. А., Кудин В. Д.** Методы контроля технологии производства полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1973.
4. **Берман Л. С.** Нелинейная полупроводниковая емкость. М.: Физматгиз, 1963.
5. **ГОСТ 18986.4—73.** Диоды полупроводниковые. Методы измерения емкости.
6. **Полупроводниковые диоды.** Параметры, методы измерений / Под ред. Н. Н. Горюнова и Ю. Р. Носова. М.: Сов. радио, 1968.
7. **Мирский Г. Я.** Электронные измерения. М.: Радио и связь, 1986.
8. **Сергеев А. Г.** Метрология: Учеб. пособие. М.: Логос, 2005.

Дата принятия 21.10.2013 г.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

562.61

Возможности обеспечения правильности результатов измерений поверхностной энергии твердых тел

Р. Б. ШАЕВИЧ

Москва, Россия, e-mail: shaevich@mail.ru

Предложены решения, позволяющие обеспечить правильность результатов экспериментального определения удельной свободной поверхностной энергии твердых тел. Решения основаны на использовании относительных значений указанной энергии в разных средах для идентичных объектов.

Ключевые слова: удельная свободная поверхностная энергия, твердое тело.

The decisions allowing to secure the trueness of the results of experimental determination of specific free surface energy of solids are proposed. The decisions are based on using the relative values of this energy in different media for identical objects.

Key words: specific free surface energy, solid.

Достоверное знание поверхностной энергии твердых тел необходимо для развития теории прочности и совершенствования методов измерений прочностных характеристик твердых тел, изучения процессов, происходящих на их поверхности, управления процессами кристаллизации и т. д. Известно, что применяемые в настоящее время способы измерений абсолютных значений удельной свободной поверхностной энергии σ твердых тел имеют ряд недостатков и ограничений и не дают уверенности в правильности получаемых результатов. Еще в 1950-е гг. академик В. Д. Кузнецов отмечал: «Существующие косвенные методы экспериментального определения σ пока еще настолько несовершенны, что они дают значения σ , разнящиеся друг от друга иногда в несколько тысяч раз... Такое состояние учения о поверхностной энергии кристаллов следует считать просто нетерпимым» [1].

Аналогичная характеристика дана и для измерений удельной поверхностной энергии твердых хрупких тел вообще, включая аморфные [2]. С тех пор состояние дел в этой области не улучшилось [3—6].

Представляется, что продвижение на пути решения этой задачи возможно, если надлежащим образом использовать экспериментальные данные, полученные существующими способами измерений σ твердых тел. Для этого имеются следующие предпосылки.

Во-первых, известно уравнение Юнга, позволяющее определить разность поверхностных энергий для различных состояний поверхности, связывающее краевой угол смачивания θ с удельными поверхностными энергиями трех соприкасающихся фаз: