

06;12

## ЧАСТОТНО-ЕМКОСТНОЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР С ПОТЕНЦИАЛЬНЫМ БАРЬЕРОМ

© Ю.А.Гольдберг

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
(Поступило в Редакцию 22 ноября 1994 г.)

Критический анализ методики измерения импеданса структур с потенциальным барьером позволил объяснить причины отличий многих экспериментальных данных по зависимости емкости  $C$  от напряжения  $U$  от классических теорий. Разработан частотно-емкостной метод определения истинных электростатических параметров поверхностно-барьерных структур, заключающийся в измерении семейства  $C-U$ -характеристик при разных частотах, определении истинного значения диффузионной разности потенциалов из зависимости напряжения отсечки от частоты и восстановления истинной  $C-U$ -характеристики в координатах  $C^{-2}-U$ .

1. Теория электростатических свойств полупроводниковых структур с потенциальным барьером, созданная Шоттки [1] и Шокли [2], дала емкостной метод определения электростатических параметров структур. Зависимость дифференциальной барьерной емкости структур  $C_b$  от напряжения  $U$

$$C_b = C_{b0}(U_D/U_D - U)^{1/\gamma} \quad (1)$$

представляется прямой линией в координатах  $C^{-\gamma}-U$  и из нее определяются параметр  $\gamma$ , характеризующий распределение концентраций примесных атомов в барьере; контактная (диффузионная) разность потенциалов  $U_D$ ; ширина слоя объемного заряда  $w = \epsilon_s \epsilon_0 S / C_b$ , разность концентраций ионизованных доноров и акцепторов  $N_D$  на границе слоя объемного заряда с квазинейтральной областью, что необходимо для построения энергетической и полевой диаграмм структур ( $S$  — площадь барьера,  $C_{b0}$  — барьерная емкость при  $U = 0$ ,  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\epsilon_s$  — статическая диэлектрическая проницаемость полупроводника).

Эта теория исходит из полной ионизации примесных центров в структуре, и поэтому барьерная емкость  $C_b$  не должна зависеть от

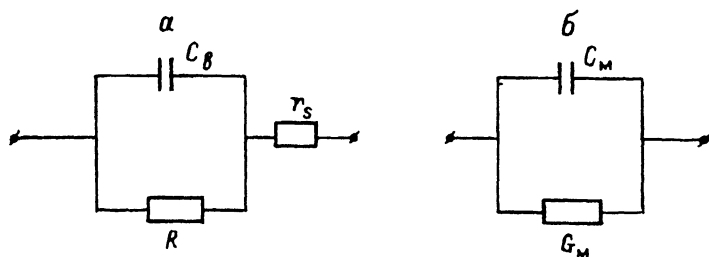


Рис. 1. Эквивалентная схема структуры с потенциальным барьером (а) и ее эквивалентная схема замещения при мостовом методе измерения (б).

частоты измерительного сигнала  $\omega$ . Когда же не все центры ионизованы, то  $C_b$  должна зависеть от  $\omega$ , и для этого случая развиты теории Саа-Редди [3], Переля-Эфроса [4], Кроувелла [5].

Экспериментальные исследования показали, что зависимость емкости от напряжения для многих, особенно для низкоомных структур с потенциальным барьером, соответствовала теории:  $C-U$ -характеристики были линейными в координатах  $C^{-\gamma}-U$  ( $\gamma = 2$  для однородного и  $\gamma = 3$  для линейного распределения примесных центров в слое объемного заряда, значения электростатических параметров, определенные из этих характеристик, соответствовали теоретически ожидаемым. В результате емкостной метод стал одним из главных инструментов при разработке и исследовании  $p-n$  и поверхностно-барьерных структур [6].

2. Однако за несколько десятилетий использования емкостного метода у разных исследователей накопился экспериментальный материал, не укладывающийся в рамки теории. Определились два типа отличий, не связанных ни с диффузионной емкостью, ни с наличием в структурах глубокоуровневых центров [6-8]: значения электростатических параметров, полученные из  $C-U$ -характеристик, отличались от теоретически ожидаемых, тогда как функциональная связь  $C$  и  $U$  по-прежнему соответствовала теории; функциональная связь  $C$  и  $U$  не соответствовала теории настолько, что иногда  $C$  вообще не зависела от  $U$ .

В работе [9] было высказано предположение, что емкость поверхностно-барьерной структуры, измеренная емкостным методом, может быть не равна истинной емкости из-за зависимости измеряемой емкости от последовательного сопротивления структуры, и была дана теория этой зависимости.

В настоящей работе объясняется причина отмеченных аномалий и предлагается модифицированный (частотно-емкостной) метод определения истинных значений электростатических параметров полупроводниковых структур с потенциальным барьером.

3. В основе емкостного метода измерений лежит малосигнальная эквивалентная схема структуры (рис. 1,а). Она состоит из истинной дифференциальной барьерной емкости структуры  $C_b$ , активного дифференциального сопротивления структуры  $R$ , равного

$$R = \partial U / \partial I = \frac{kT}{qI_0} \exp(qU/kT), \quad (2)$$

и остаточного сопротивления структуры  $r_s$ , представляющего сумму омического сопротивления толщи полупроводника и контактов ( $I$  — постоянный ток при напряжении  $U$ ,  $I_0$  — предэкспоненциальный множитель в зависимости  $I$  от  $U$ ,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура,  $q$  — заряд электрона).

Дифференциальную емкость структуры, как правило, измеряют мостовым методом по параллельной схеме замещения, когда производится отдельно компенсация по емкостной и активной составляющих полной проводимости структуры. Поэтому истинная параллельно-последовательная схема структуры преобразуется в новую, чисто параллельную, схему замещения (рис. 1, б), состоящую из измеряемых мостом емкости  $C_m$  и активной проводимости  $G_m$ . Вследствие этого измеряемые емкость и проводимость оказываются функцией четырех параметров:  $C_b$ ,  $R$ ,  $r_s$  и  $\omega$ .

Очевидно, что если бы реализовался случай  $r_s = 0$ , то  $C_m = C_b$  и  $G_m = 1/R$ .

Однако реально  $r_s$  никогда не равно нулю и, следовательно,  $C_m$  и  $G_m$  должны отличаться от  $C_b$  и  $1/R$ . Проанализируем это более детально.

Вначале рассмотрим случай, когда  $R \gg r_s$  (область малых значений постоянного тока). Тогда обычно считают, что  $R \rightarrow \infty$  и переход от последовательно соединенных  $C_b$  и  $r_s$  к параллельной схеме замещения приводит к следующим соотношениям

$$C_m = C_b \frac{1}{1 + (\omega C_b r_s)^2}, \quad (3)$$

$$G_m = \frac{r_s \omega^2 C_b^2}{1 + (\omega C_b r_s)^2}. \quad (4)$$

Теперь представим зависимость  $C_m$  от  $U$  в координатах  $C_m^{-\gamma} - U$

$$C_m^{-\gamma} = C_b^{-\gamma} (1 + \omega^2 C_b^2 r_s^2)^\gamma$$

и, подставляя (1) в (3),

$$C_m^{-\gamma} = C_{b0}^{-\gamma} \left[ 1 + \omega^2 C_{b0}^2 r_s (U_D/U_D - U) \right]^\gamma \left[ (U_D - U)/U_D \right]. \quad (5)$$

Если  $r_s \omega C_b \ll 1$  (область низких частот), то

$$C_m^{-\gamma} = C_b^{-\gamma} (1 + \gamma \omega^2 C_b^2 r_s^2) \quad (6)$$

и

$$C_m^{-\gamma} = C_{b0}^{-\gamma} \left[ (U_D - U)/U_D \right] + \gamma \omega^2 C_{b0}^{2-\gamma} r_s^2 \left[ (U_D - U)/U_D \right]^{\gamma-2}. \quad (7)$$

Из (7) видно, что зависимость  $C_m^{-\gamma}$  от  $U$  при любом  $\gamma$  сдвинута относительно истинной зависимости  $C_b^{-\gamma}$  от  $U$ . Поэтому в тех случаях, когда зависимость  $C_m^{-\gamma}$  от  $U$  принимается за истинную зависимость  $C_b^{-\gamma}$  от  $U$ , возможны серьезные ошибки как в трактовке физических свойств структуры с потенциальным барьером, так и в определении электростатических параметров структуры.

Проанализируем случай однородного распределения ионизованных примесей в потенциальном барьере ( $\gamma = 2$ ), поскольку это наиболее простой и часто встречающийся случай.

Из формулы (5) следует, что

$$C_m^{-2} = C_{b0}^{-2} \left[ 1 + 2\omega^2 C_{b0}^2 r_s^2 \frac{U_D}{U_D - U} + \omega^4 C_{b0}^4 r_s^4 \frac{U_D^2}{(U_D - U)^2} \right] \frac{U_D - U}{U_D}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что  $C_m^{-2}$  с ростом  $U$  уменьшается, достигает минимума при напряжении

$$U_{\min} = U_D \left( 1 - \omega^2 C_{b0}^2 r_s^2 \right), \quad (9)$$

а затем возрастает.

В области низких частот ( $\omega C_b r_s \ll 1$ ) и при  $U < U_{\min}$  формула (8) переходит в приближенное соотношение

$$C_m^{-2} \simeq C_{b0}^{-2} \frac{U_D - U}{U_D} + 2\omega^2 r_s^2. \quad (10)$$

Из (10) видно, что зависимость  $C_m^{-2}$  от  $U$  линейна и сдвинута параллельно относительно истинной зависимости  $C_b^{-2}$  от  $U$  на величину, пропорциональную  $\omega^2$  и  $r_s^2$ ; экстраполяция линейной зависимости  $C_m^{-2}$  от  $U$  к  $C_m^{-2} = 0$  дает напряжение отсечки, равное

$$U_s = U_D + 2C_{b0}^2 r_s^2 U_D \omega^2; \quad (11)$$

зависимость  $U_s$  от  $\omega^2$  линейная, а ее экстраполяция к значению  $\omega^2 = 0$  дает истинное значение диффузионной разности потенциалов  $U_D$ .

Случай  $R \neq \infty$  для  $\gamma = 2$  рассмотрен в теоретической работе [9], и из анализа эквивалентных схем (рис. 1) следует

$$C_m = C_b \frac{R^2}{(R + r_s)^2} \frac{1}{1 + [\omega^2 C_b^2 r_s^2 R^2 / (R + r_s)^2]}, \quad (12)$$

$$R_m = \frac{R + r_s + \omega^2 C_b^2 r_s^2 (R + r_s)}{1 + \omega^2 r_s R C_b^2}. \quad (13)$$

Зависимость  $C_m^{-2}$  от  $U$  в этом случае, как и в случае  $R \rightarrow \infty$ , линейна при малых  $U$ , с ростом  $U$  отклоняется от линейности, проходит через минимум, а затем возрастает. Однако минимум должен наблюдаться при напряжениях, меньших, чем в случае  $R \rightarrow \infty$ . С ростом частоты  $\omega$  минимум сдвигается в сторону отрицательных напряжений, протяженность линейного участка уменьшается, а при высоких частотах ( $\omega C_b r_s \gg 1$ ) емкость практически перестает зависеть от напряжений.

Экспериментальная проверка теории производилась в [10,11] на примере GaAs и GaP поверхностно-барьерных структур ( $\gamma = 2$ ).

При низких частотах  $\omega$  ( $\omega C_b r_s \ll 1$ ) характеристика  $C_m^{-2}-U$  в области обратных и малых прямых напряжений функционально совпадает с характеристикой  $C_b^{-2}-U$ , но сдвинута параллельно ей в сторону больших значений  $C_m^{-2}$ , и напряжение отсечки превосходит значение контактной разности потенциалов.

С ростом прямого напряжения величина  $C_m^{-2}$  достигает минимума, а затем возрастает; напряжение минимума тем меньше, чем больше  $\omega$ .

В области средних частот ( $\omega C_b r_s \sim 1$ ) протяженность линейного участка характеристики  $C_m^{-2}-U$  уменьшается и минимум смещается в сторону отрицательных напряжений.

При высоких частотах измерительного сигнала ( $\omega C_b r_s \gg 1$ )  $C_m$  практически не зависит от  $U$ .

Из этих результатов стало понятно, что те экспериментальные данные, которые не укладывались в рамки теорий, обусловлены влиянием остаточного сопротивления на измеряемую емкость структур. Более того, для получения истинных значений электростатических параметров недостаточно, чтобы  $C_m^{-2}-U$ -характеристика была линейной, так как она может быть сдвинута относительно истинной зависимости  $C_b^{-2}$  от  $U$  и определенные из нее значения электростатических параметров будут неверными.

4. В результате совпадения результатов теории [9] и эксперимента [10,11] появилась возможность предложить модифицированный (частотно-емкостной) метод определения параметров структур с потенциальным барьером. Он заключается в следующем.

1. Измеряется семейство  $C_m-U$ -характеристик при разных  $\omega$ .

2. Из этого семейства выбираются те характеристики, которые в координатах  $C_m^{-2}-U$  имеют достаточно протяженные линейные участки, параллельные между собой. Для каждой из этих характеристик путем экстраполяции ее линейного участка к значению  $C_m^{-2} = 0$  находится  $U_s$ ; затем строится зависимость  $U_s$  от  $\omega^2$ , которая должна быть линейной, и путем экстраполяции этой зависимости к значению  $\omega^2 = 0$  определяется истинное значение диффузионной разности потенциалов  $U_D$ .

3. Восстанавливается истинная характеристика  $C_b-U$ . Для этого в системе координат  $C_m^{-2}-U$  на оси  $U$  откладывается значение  $U_D$ , через ту точку проводится прямая, параллельная линейным участкам семейства  $C_m^{-2}-U$ -характеристик. Это и есть  $C_b^{-2}-U$ -характеристика, из которой по известным формулам определяются все остальные электростатические параметры структуры с потенциальным барьером.

5. Частотно-емкостной метод был апробирован на примере GaAs и GaP поверхностно-барьерных ( $m-s$ ) структур ( $\gamma = 2$ ). Исходными материалами служили GaAs с концентрацией электронов  $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и GaP с концентрацией электронов  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (300 K);  $m-s$ -структуры создавались химическим методом [12].

Емкость измерялась с помощью моста Л-2-7 и генераторов ГК-3-40 и Г-4-106 на частотах 0.5-3 МГц и с помощью моста МПП-300 и генератора ЗГ-12 на частотах 5-100 кГц. Амплитуда синусоидального сигнала не превышала 1.5 мВ. Температура измерений комнатная. Значения  $U_D$ , определенные из  $C_m^{-2}-U$ -характеристик, сравнивались со значениями  $U_D$ , получаемыми посредством измерения высоты барьера  $\varphi_b$  по длинноволновому краю спектра фототока структур.

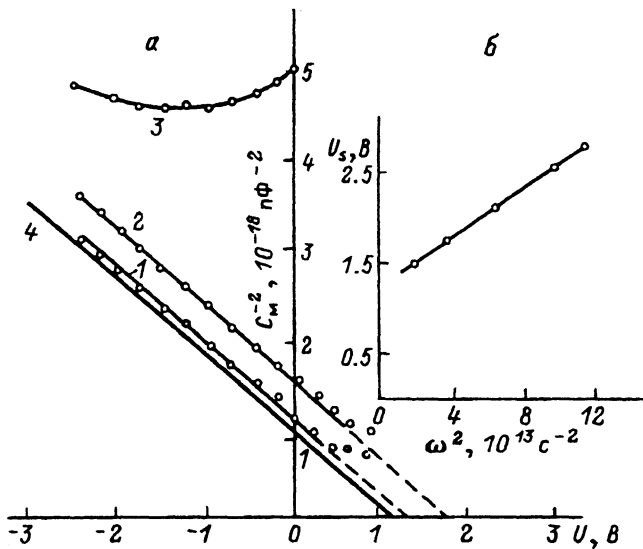


Рис. 2. Зависимость емкости  $C_m$  от напряжения  $U$  для Au-GaP структур при разных значениях частоты измерительного сигнала  $f$  (а) и напряжения отсечки  $U_s$  от частоты  $\omega = 2\pi f$  (б) при комнатной температуре.

$f$ , МГц: 1 — 0.5, 2 — 1, 3 — 3; 4 — восстановленная  $C_b^{-2}-U$ -характеристика.

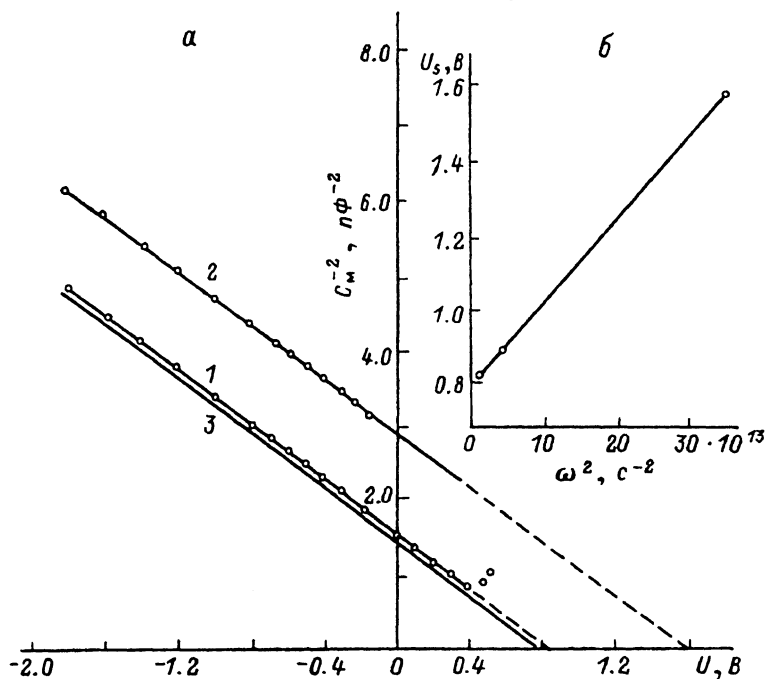


Рис. 3. Зависимость емкости  $C_m$  от напряжения  $U$  для Au-GaAs структур при разных значениях частоты измерительного сигнала  $f$  (а) и напряжения отсечки  $U_s$  от частоты  $\omega = 2\pi f$  (б) при комнатной температуре.

$f$ , МГц: 1 — 0.5, 2 — 3; 3 — восстановленная  $C_b^{-2}-U$ -характеристика.

Измеренные  $C_m^{-2}-U$ -характеристики (рис. 2,3) имели достаточно протяженные линейные участки при  $f < 3$  МГц (GaAs) и при  $f < 2$  МГц (GaP). С ростом  $\omega$  линейные участки  $C_m^{-2}-U$ -характеристик параллельно сдвигаются в сторону больших значений  $C_m^{-2}$ , так что  $U_s$  возрастает. Зависимость  $U_s$  от  $\omega^2$  оказалась линейной (рис. 2,3), и определенные из этой зависимости значения диффузионной разности потенциалов  $U_D$  оказались равными  $0.80 \pm 0.02$  В (GaAs) и  $1.25 \pm 0.02$  В (GaP).

Значения высоты барьера  $\varphi_b$ , определенные по спектрам фототока, оказались равными  $0.82$  эВ (GaAs) и  $1.29$  эВ (GaP), так что значения  $U_D$ , вычисленные по формуле  $U_D = \varphi_b - (\mu/q)$ , оказались равными  $0.80$  эВ (GaAs) и  $1.25$  эВ (GaP) (здесь  $\mu$  — энергия уровня Ферми в полупроводнике, отсчитанная от дна  $s$ -зоны, которая для наших структур составляла  $0.02$  эВ (GaAs) и  $0.04$  эВ (GaP)).

Таким образом, значения  $U_D$ , определенные из семейства  $C_m^{-2}-U$ -характеристик при разных  $\omega$ , в точности совпали со значениями  $U_D$ , определенными из спектров фототока. Эти значения были отложены на оси абсцисс характеристик  $C_m^{-2}-U$ , через эти точки были проведены прямые линии, параллельные линейным участкам семейства  $C_m^{-2}-U$ -характеристик, в результате чего были получены восстановленные  $C_b^{-2}-U$ -характеристики. Из этих характеристик по обычным формулам были определены значения параметров GaAs и GaP структур: ширины слоя объемного заряда  $w = 0.12$  и  $0.03$  мкм, концентрации ионизованных доноров минус концентрация ионизованных акцепторов  $N_D = 1 \cdot 10^{17}$  и  $2 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, максимальные значения напряженности электрического поля в слое объемного заряда  $E_m = 1.3 \cdot 10^5$  и  $8.3 \cdot 10^5$  В/см соответственно.

6. Итак, предложен частотно-емкостной метод определения электростатических параметров структур с потенциальным барьером, необходимый при изготовлении и исследовании  $p-n$  и  $m-s$ -структур, особенно на основе слабо легированных полупроводников, когда влияние остаточного сопротивления на измеряемую емкость особенно существенно.

Автор благодарен Б.В.Паренкову за постановку задачи и участие в разработке теории метода.

#### Список литературы

- [1] Schottky W. // Z. Phys. 1942. Vol. 118. N 9/10. P. 539-592.
- [2] Shockley W. // Bell System Techn. J. 1949. Vol. 28. P. 435.
- [3] Sah C.T., Reddi V.G.K. // IEEE Trans. on Electron. Dev. 1964. Vol. ED-11. N 7. P. 345-348.
- [4] Перель В.И., Эфрос А.Л. // ФТП. 1967. Т. 1. № 11. С. 1693-1701.
- [5] Crowell C.R., Nakano K. // Sol. St. Electron. 1972. Vol. 15. N 6. P. 605-610.
- [6] Родерик Э.Х. Контакты металл-полупроводник. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1982. С. 78.
- [7] Thanailakis A., Rasul A. // J. Phys. C. 1976. Vol. 9. P. 337.
- [8] Ковальчук А.В. // ФТП. 1985. Т. 19. Вып. 2. С. 307-320.
- [9] Константинов О.В., Мезрин О.А. // ФТП. 1983. Т. 16. Вып. 2. С. 305-311.
- [10] Гольдберг Ю.А., Иванова О.В., Львова Т.В., Паренков Б.В. // ФТП. 1983. Т. 17. Вып. 6. С. 1068-1072.
- [11] Гольдберг Ю.А., Иванова О.В., Львова Т.В., Паренков Б.В. // ФТП. 1984. Т. 18. Вып. 8. С. 1472-1475.
- [12] Гольдберг Ю.А., Джаманбалин К.К., Дмитриев А.Г. и др. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 11. С. 208-209.