

УДК 621.317

*А.Е. Чижиков, С.Б. Ильичев, Е.В. Блинова*

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ИЗМЕРЕНИЯ И РАСЧЕТА БАРЬЕРНОЙ ЕМКОСТИ СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

*Рассмотрены особенности определения барьерной емкости  $C_\delta$  методом емкостно-омического делителя, используемого для дискретных диодов, применительно к кремниевым монокристаллическим солнечным элементам (СЭ). Установлено, что малая величина дифференциального сопротивления СЭ при обратном включении приводит к неверным результатам вычисления. Выведена корректная формула для расчета  $C_\delta$ , и оговорены условия ее применимости. Установлено, что величина удельной емкости перехода СЭ в диапазоне обратных напряжений (0,05 ÷ 4) В составляет (945 ÷ 350) нФ/мм<sup>2</sup>.*

**Ключевые слова:** солнечный элемент, барьерная емкость.

**Введение.** Повышение качества СЭ предполагает оперативный контроль электрофизических параметров формируемой структуры в процессе производства. В производственной практике широко распространен метод вольт-фарадных характеристик. Снятая экспериментально зависимость барьерной емкости р-п-перехода от обратного напряжения позволяет определить контактную разность потенциалов  $\varphi_k$ , а по ней – концентрации носителей заряда по известной формуле

$$\varphi_k = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{n_{n0} p_{p0}}{n_i^2} \right),$$

а также подтвердить или опровергнуть предполагаемый профиль легирования [1].

Целью данной работы является исследование особенностей измерения барьерной емкости СЭ, обусловленных спецификой диодной структуры элемента, в частности большой площадью ОПЗ.

Представление о барьерной емкости вводится в теории идеального р-п-перехода, вольт-амперная характеристика (ВАХ) которого описывается известным уравнением Шокли. Величина емкости при этом определяется как емкость плоского конденсатора, обкладками которого служат области полупроводника с разными типами проводимости, а роль разделяющего диэлектрика играет область пространственного заряда (ОПЗ). Ширина ОПЗ пропорциональна приложенному обратному напряжению, поэтому и величина барьерной емкости также будет зависеть от обратного напряжения. Вид вольт-

фарадной характеристики (ВФХ)  $C_\delta(U)$  определяется характером распределения примесей, и для резкого, ступенчатого, сильно несимметричного (одностороннего) перехода выражение для барьерной емкости имеет следующий вид:

$$C_\delta = S \sqrt{\frac{q \varepsilon \varepsilon_0 N}{2(\varphi_k - U)}},$$

где  $S$  – площадь перехода,  $q$  – величина элементарного заряда,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника,  $N$  – концентрация примеси в слаболегированной области,  $\varphi_k$  – контактная разность потенциалов,  $U$  – величина обратного напряжения (берется со знаком «минус»), а для плавного линейного перехода

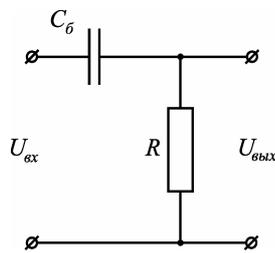
$$C_\delta = S \cdot \sqrt[3]{\frac{(\varepsilon \varepsilon_0)^2 q \Delta}{12(\varphi_k - U)}},$$

где  $\Delta$  – градиент концентрации, остальные обозначения те же. Из приведенных выражений очевидно, что снятые экспериментально точки ВФХ резкого одностороннего перехода, построенные в координатах  $(1/C_\delta^2) \div (U)$ , лягут на прямую линию с отрицательным тангенсом угла наклона, пересечение которой с осью абсцисс даст величину контактной разности потенциалов  $\varphi_k$ . То же справедливо для ВФХ плавного линейного перехода, построенной в координатах  $(1/C_\delta^3) \div (U)$ . Важно отметить, что факт принадлежности экспериментальных точек прямой линии в указанных координатах служит подтверждением принятого характера распределения концентрации примесей, но не доказательством, так как различные распределения примесей мо-

гут обеспечивать одну и ту же ВФХ.

**Обоснование методики.** При измерении барьерной емкости дискретных диодов применяют метод емкостно-омического делителя [2]. Принципиальная схема устройства для реализации метода приведена на рисунке 1.

На вход схемы подается синусоидальное напряжение; емкость  $C$  на рисунке представляет собой эквивалент барьерной емкости обратно смещенного диода. При величине реактивного сопротивления емкости  $X_C \gg R$  падение напряжения на резисторе с малой долей погрешности можно представить в виде  $U_{\text{вых}} = 2\pi RfCU_{\text{вх}}$ , т.е. величина выходного напряжения прямо пропорциональна емкости диода.



**Рисунок 1 – Принципиальная схема емкостно-омического делителя**

Однако с формальной точки зрения, обратный ток, хотя и очень мал, должен учитываться в эквивалентной схеме как сопротивление  $R_д$ , подключенное параллельно емкости  $C_б$ . Модуль комплексной проводимости в этом случае равен:

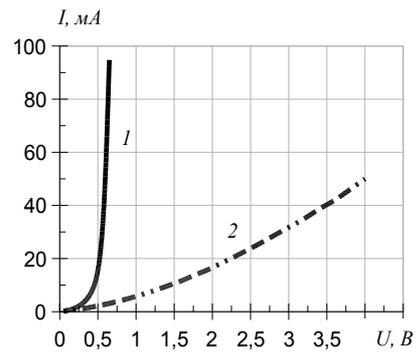
$$|Y| = \sqrt{\frac{1}{R^2} + (2\pi fC)^2}$$

У дискретных диодов порядок обратного тока составляет  $10^{-9}$  А, т.е. порядок дифференциального сопротивления  $10^9$  Ом, а порядок реактивного сопротивления  $C_б - 10^4$  Ом. Поэтому первым слагаемым в выражении можно пренебречь и рассматривать только  $C_б$ .

Иначе обстоит дело с монокристаллическими кремниевыми солнечными элементами (СЭ). Конструктивно СЭ представляет собой односторонний (разница концентраций доноров и акцепторов составляет несколько порядков) диффузионный переход с несравнимо большей, чем у дискретных диодов, площадью. Обратная ветвь ВАХ кремниевого диода определяется током генерации носителей в ОПЗ [3], и ток этот растет с увеличением объема ОПЗ. Большая площадь перехода СЭ приводит к значительной величине обратного тока, сравнимого при малых напряжениях с прямым.

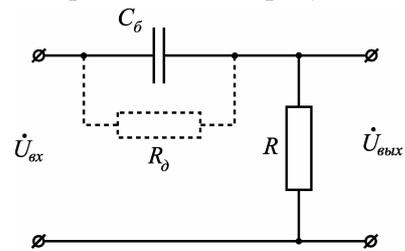
При проведении экспериментов для удобства использовалась небольшая часть СЭ площадью  $2 \text{ см}^2$ . На рисунке 2 приведены прямая и обратная ветви ВАХ исследованного образца,

где 1 – прямая ветвь, 2 – обратная.



**Рисунок 2 – Вольт-амперная характеристика СЭ. 1 – прямая ветвь, 2 – обратная**

Как видно, при обратном смещении протекает существенный ток, что приводит к малой величине дифференциального сопротивления. Значения дифференциального сопротивления рассчитывались по экспериментальным ВАХ. Эквивалентная схема измерений при этом принимает вид, приведенный на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Эквивалентная схема измерений.  $C_б$  – барьерная емкость,  $R_д$  – дифференциальное сопротивление СЭ,  $R$  – измерительное сопротивление**

Делитель здесь образован комплексным сопротивлением СЭ  $Z_{СЭ}$ , состоящим из параллельно соединенных емкости  $C_б$  и дифференциального сопротивления  $R_д$ , и измерительным резистором  $R$ . Выражение комплексного сопротивления СЭ в показательной форме имеет следующий вид:

$$Z_{СЭ} = \frac{R_д}{\sqrt{1 + (2\pi fCR_д)^2}} e^{-j \arctg(2\pi fCR_д)} = |Z_{СЭ}| e^{j \arg(Z_{СЭ})}$$

где  $R_д$  – дифференциальное сопротивление СЭ,  $C$  – барьерная емкость. Видно, что барьерная емкость входит в качестве параметра как в множитель, так и в показатель экспоненты. Выражение для полного сопротивления цепи выводится в следующей последовательности:

$$\begin{aligned} \text{Re } Z &= |Z_{СЭ}| \cdot \cos(\arg(Z_{СЭ})) + R, \\ \text{Im } Z &= |Z_{СЭ}| \cdot \sin(\arg(Z_{СЭ})), \\ Z &= \sqrt{\text{Re } Z^2 + \text{Im } Z^2} e^{j \arctg \frac{\text{Im } Z}{\text{Re } Z}} \end{aligned}$$

Выражение содержит барьерную емкость в различных степенях как в множителе, так и в показателе экспоненты, что затрудняет вывод общей ее зависимости от каких-либо измеряемых параметров. Однако существует режим работы схемы, позволяющий вывести аналитическую зависимость барьерной емкости от величин дифференциально и измерительного сопротивлений и частоты.

Рассмотрим такой режим работы цепи, в котором

$$|Z_{CЭ}| = R. \quad (1)$$

Комплексное напряжение генератора имеет следующий вид:

$$\dot{U} = U_m e^{j2\pi ft},$$

комплексная амплитуда тока в цепи запишется как

$$\dot{I} = \frac{U_m}{|Z|} e^{j\left(2\pi ft - \arctg \frac{\text{Im} Z}{\text{Re} Z}\right)}.$$

Тогда падения напряжения на плечах делителя будут определяться следующими выражениями:

$$\dot{U}_R = U_m \frac{R}{|Z|} e^{j\left(2\pi ft - \arctg \frac{\text{Im} Z}{\text{Re} Z} + 0\right)},$$

$$\dot{U}_{\dot{N}\dot{Y}} = U_m \frac{|Z_{\dot{N}\dot{Y}}|}{|Z|} e^{j\left(2\pi ft - \arctg \frac{\text{Im} Z}{\text{Re} Z} + \arg(Z_{\dot{N}\dot{Y}})\right)}.$$

Подробно расписывая все сокращенные обозначения, можно показать, что при выполнении условия (1) справедливо равенство

$$\arctg \frac{\text{Im} Z}{\text{Re} Z} = \frac{\arg(Z_{CЭ})}{2}.$$

Тогда величины падения напряжения на плечах делителя становятся равны по модулю:

$$\dot{U}_R = \dot{U}_{CЭ} = U_m \frac{R}{|Z|},$$

что и можно зафиксировать экспериментально. Из приведенного равенства видно, что, несмотря на равенство модулей сопротивлений плечей делителя, коэффициент деления входного напряжения при этом не обязательно равен двум. Тогда из условия (1) значение барьерной емкости можно определить по формуле:

$$C = \frac{\sqrt{\left(\frac{R_a}{R}\right)^2 - 1}}{2\pi f R_a}. \quad (2)$$

Как было указано выше, барьерная емкость является функцией обратного напряжения, поэтому для измерения ее необходимо рассматривать как малосигнальный параметр. Критерием малосигнальности служит следующее соотношение [3]:

$$U_m \ll \varphi_T,$$

где  $\varphi_T$  – тепловой потенциал, но данный критерий плохо применим на практике из-за очень малой амплитуды, сравнимой с шумами, поэтому нами было принято условие малосигнальности по малости величины отношения амплитуды переменного сигнала к уровню постоянного напряжения смещения.

**Экспериментальная часть.** Методика была опробована на схеме, собранной по рисунку 3 из дискретных элементов. Источник синусоидального напряжения позволял изменять частоту сигнала. Падения напряжения на измерительном резисторе и комплексном сопротивлении с помощью переключателя раздельно подавались на осциллограф, изменением частоты сигнала добивались равенства амплитуд падения напряжения на плечах делителя, после чего рассчитывали барьерную емкость по формуле (2).

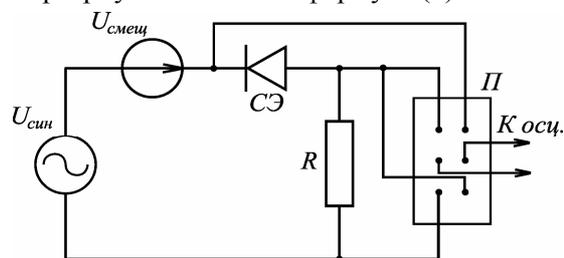


Рисунок 4 – Схема измерения  $C_b$  CЭ.

$U_{\text{син}}$  – источник синусоидального напряжения малой амплитуды,  $U_{\text{смещ}}$  – источник постоянного напряжения смещения,  $R$  – измерительный резистор,  $\Pi$  – переключатель

Сравнение результатов расчета с показаниями цифрового мультиметра АРРА-207, предоставляющего возможность измерять емкости начиная от предела 4 нФ до 4 мкФ с погрешностью 0.9 % от величины предела, показало расхождение, не превышающее 10 %.

Измерение барьерной емкости исследуемого образца CЭ производилось по схеме, приведенной на рисунке 4, где источник напряжения использовался для задания постоянного обратного напряжения смещения перехода в пределах (0,05 ÷ 4) В, а амплитуда синусоидального сигнала устанавливалась равной 30 мВ. Результаты измерения барьерной емкости приведены на рисунке 5.

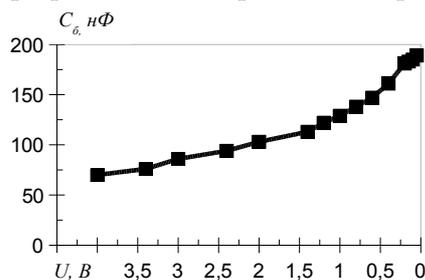


Рисунок 5 – Зависимость  $C_b$  от обратного напряжения

На следующем рисунке 6 приведена та же зависимость в координатах обратного квадрата и обратного куба емкости.

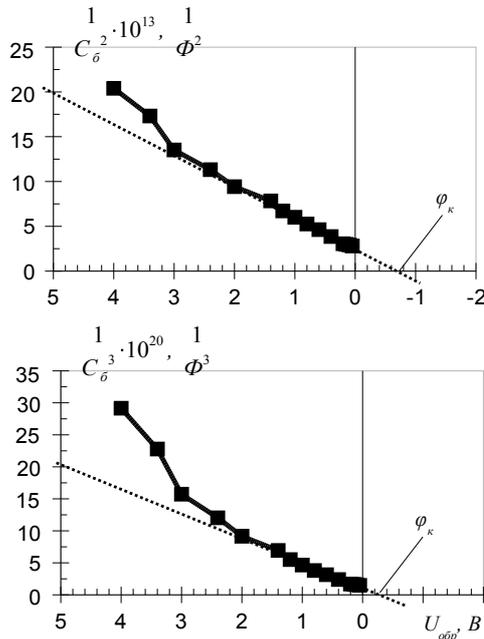


Рисунок 6 – Зависимость обратного квадрата и куба  $C_b$  от обратного напряжения.  
 $\varphi_k$  – контактная разность потенциалов

Как видно, ни одна из них не ложится на прямую линию, что обусловлено как погрешностью измерений, так и тем, что реальный профиль легирования не аппроксимируется ни резким, ни плавным линейным переходами. Контактная разность потенциалов, определенная по пересечению продолжения наиболее линейного участка с осью абсцисс, составляет для обратной

кубической зависимости около 0,2 В, а для обратной квадратичной зависимости порядка 0,7 В, что более близко к литературным данным [3].

**Заключение.** В результате исследований была разработана методика определения барьерной емкости монокристаллических солнечных элементов, особенностью которых является большая величина обратного тока, обусловленного генерацией носителей в ОПЗ несравнимо большего объема, чем у дискретных диодов. Качественно можно обосновать применение предложенной скорректированной методики к пластинам СЭ площадью  $(12,5 \times 12,5)$  см<sup>2</sup>: увеличение площади перехода приведет к росту обратного тока, т.е. к уменьшению дифференциального сопротивления. Однако по той же причине вырастет барьерная емкость, что приведет к уменьшению реактивного сопротивления перехода. Таким образом, величины активного и реактивного сопротивлений останутся сопоставимыми и расчет барьерной емкости также может быть осуществлен по формуле (2).

#### Библиографический список

1. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: учеб. для вузов – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1987.
2. Грин Г.И. Измерение параметров и испытание полупроводниковых приборов. учеб. пособие. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1974.
3. Электронные приборы: учебник для вузов / В.Н. Дулин, Н.А. Аваев, В.П. Демин и др.; под ред. Г.Г. Шишкина. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989.