

УДК 621.382.2/3.012

## ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛЬТ-ФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Беспалов Николай Николаевич, Глебочкин Виталий Павлович  
ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва»,  
Российская Федерация, г. Саранск,

E-mail: [ka-mgu@mail.ru](mailto:ka-mgu@mail.ru), [glebochkin@mail.ru](mailto:glebochkin@mail.ru); тел.: +7(834-2) 24-37-05,  
430005, г. Саранск, ул. Богдана Хмельницкого, д. 39, каб. 515

**Аннотация.** В статье приведены экспериментальные вольт-фарадные характеристики силовых полупроводниковых приборов, объясняются полученные результаты.

**Ключевые слова:** вольт-фарадная характеристика; барьерная ёмкость; силовой полупроводниковый прибор; тиристор;  $du/dt$ .

### I. ВВЕДЕНИЕ

Барьерная ёмкость является неотъемлемым свойством  $p-n$  перехода, смещённого в обратном направлении. Величина барьерной ёмкости силовых полупроводниковых приборов (СПП) определяется рядом технологических и геометрических параметров полупроводниковой структуры (ПС), а также электрическими и температурными факторами. С увеличением площади выпрямительного элемента увеличивается барьерная ёмкость, большое значение которой сказывается на протекании переходных процессов включения и выключения СПП.

В связи с этим представляет интерес нахождения экспериментальных зависимостей барьерной ёмкости от приложенного обратного напряжения — вольт-фарадных характеристик (ВФХ) — и изучение влияния различных факторов и параметров на значение барьерной ёмкости.

### II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Необходимость в учете барьерной ёмкости возникает при расчёте переходных процессов переключения силовых тиристорov с большой площадью выпрямительного элемента, когда значения барьерной ёмкости достигают нескольких сотен нанофарад при величине обратного напряжения на  $p-n$  переходе, близкой к нулю. Влияние этой ёмкости существенным образом сказывается на режиме эксплуатации СПП.

Особый интерес с точки зрения влияния барьерной ёмкости представляет процесс переключения тиристора в проводящее состояние под действием скорости прямого напряжения — «эффект  $du/dt$ » [1]. Барьерная ёмкость шунтирует коллекторный переход тиристора при приложении к нему импульса прямого напряжения и проводит значительный ёмкостный ток, играющий роль тока управления, под действием которого тиристор переключается в проводящее состояние при амплитудном значении анодного напряжения, меньшем анодного напряжения переключения в статическом режиме  $U_{(BO)}$ .

Таким образом, большая величина барьерной ёмкости СПП является нежелательной, так как через неё протекает значительный ёмкостный ток. В связи с этим представляет интерес оценка факторов, влияющих на величину барьерной ёмкости с целью определения возможности её минимизации.

### III. ТЕОРИЯ

Рассмотрим зависимость барьерной ёмкости от приложенного обратного напряжения на примере резкого несимметричного  $p-n$  перехода. Согласно теории полупроводников барьерная ёмкость СПП в общем случае может быть найдена как ёмкость плоского конденсатора, расстояние между обкладками которого равно ширине ОПЗ  $W_0$  [2]:

$$C_{\bar{o}} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{W_0} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{\sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{qN} \left( \psi_{bi} + U_R - \frac{2kT_j}{q} \right)}}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость кремния;  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума (электрическая постоянная);  $S$  — площадь  $p$ - $n$  перехода;  $q$  — заряд электрона;  $N$  — концентрация легирующей примеси со стороны менее легированной части  $p$ - $n$  перехода;  $\psi_{bi}$  — контактная разность потенциалов  $p$ - $n$  перехода;  $U_R$  — обратное напряжение на  $p$ - $n$  переходе;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T_j$  — температура ПС в состоянии равновесия.

Из формулы (1) видно, что на величину барьерной ёмкости СПП влияют геометрические и технологические параметры (площадь ПС, концентрация легирующей примеси, контактная разность потенциалов  $\psi_{bi}$ ), а также электрические и температурные факторы (обратное напряжение на  $p$ - $n$  переходе  $U_R$  и температура ПС  $T_j$ ). Среди величин, входящих в формулу (1), наибольшее влияние на величину барьерной ёмкости оказывают площадь ПС, напряжение  $U_R$  и концентрация примеси  $N$ .

По формуле (1) для оценки величины барьерной ёмкости были рассчитаны ВФХ СПП с различными диаметрами ПС при  $T_j = 25^\circ\text{C}$ ,  $\psi_{bi} = 0,85\text{ В}$ ,  $N = 10^{13}\text{ см}^{-3}$ . Эти характеристики приведены на рис. 1.

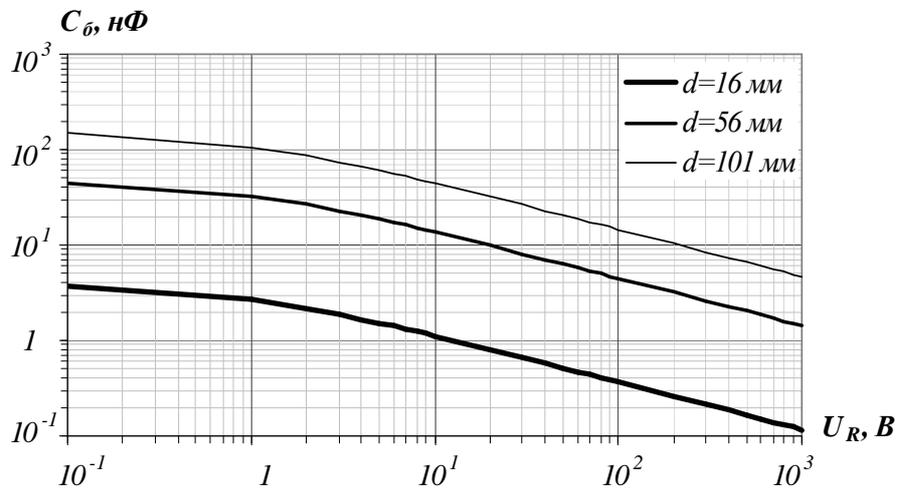


Рис. 1. ВФХ СПП с различными диаметрами  $d$  ПС.

Достоинство теоретической оценки барьерной ёмкости СПП заключается в возможности приблизительной оценки значения барьерной ёмкости и её зависимости от различных параметров и факторов без проведения измерений реальных приборов. Однако, в случае оценки  $du/dt$ -стойкости СТ необходим индивидуальный подход к приборам, имеющим разброс ВФХ в пределах одной партии. Для этого необходимо определять ВФХ экспериментально.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперимент проводился на программно-аппаратном комплексе для определения вольт-фарадных характеристик СПП, управление измерительной частью которого и обработка полученных результатов измерения осуществляется с помощью оборудования и программного обеспечения LabVIEW фирмы National Instruments.

На рис. 2 и рис. 3 приведены ВФХ силовых тиристоров Т253-1000 и Т353-800 с диаметрами ПС, равными  $d=56$  мм, при приложении обратного и прямого напряжений в закрытом состоянии.

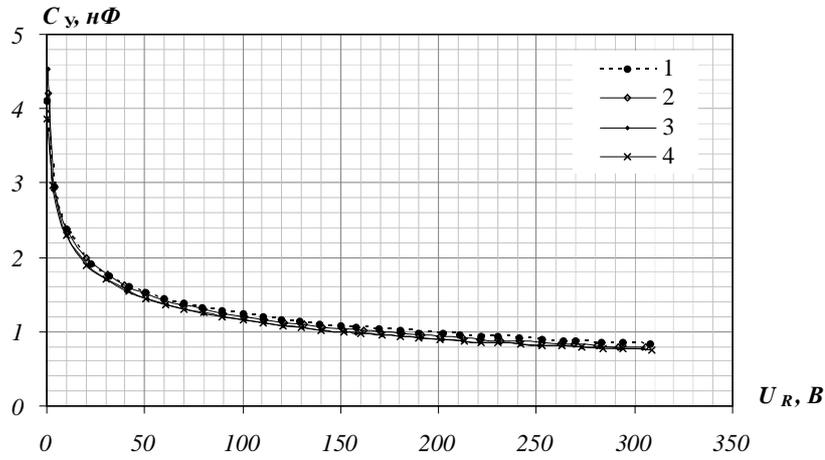


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики 4-х силовых тиристоров Т171-250-4-42 при обратном включении.

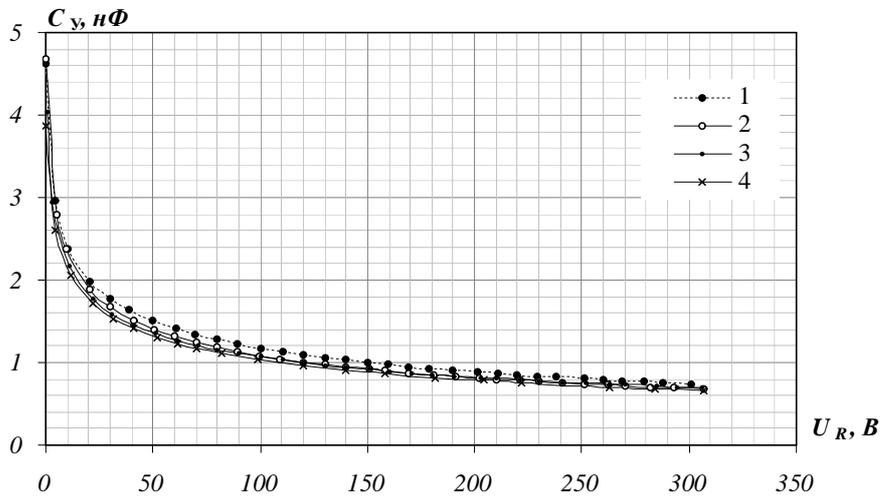


Рис. 3. Вольт-фарадные характеристики 4-х силовых тиристоров Т171-250-4-42 при прямом включении.

На рис. 4, 5 приведены экспериментально определенные ВФХ силовых тиристоров Т253-1000 и Т353-800 с диаметрами ПС  $d=56$  мм при прямом и обратном напряжении.

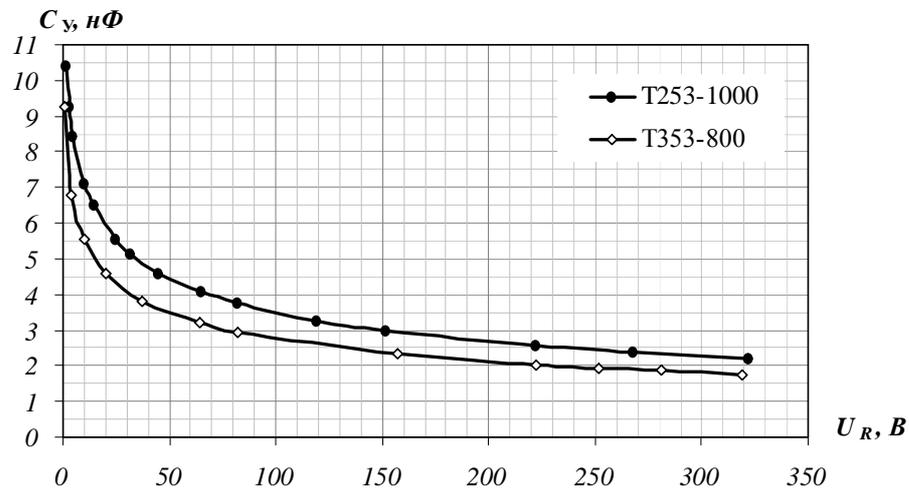


Рис. 4. Вольт-фарадные характеристики силовых тиристоров Т253-1000 и Т353-800 при обратном включении.

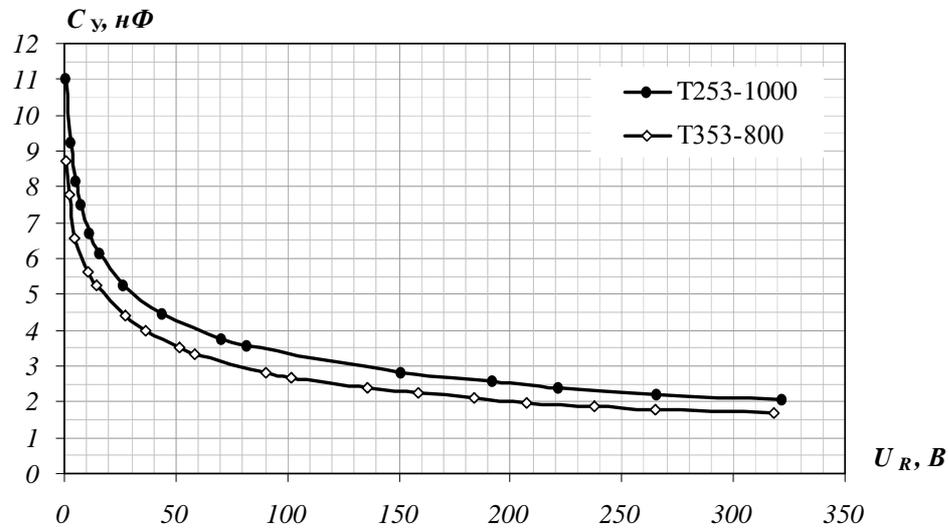


Рис. 5. Вольт-фарадные характеристики силовых тиристоров Т253-1000 и Т353-800 при прямом включении.

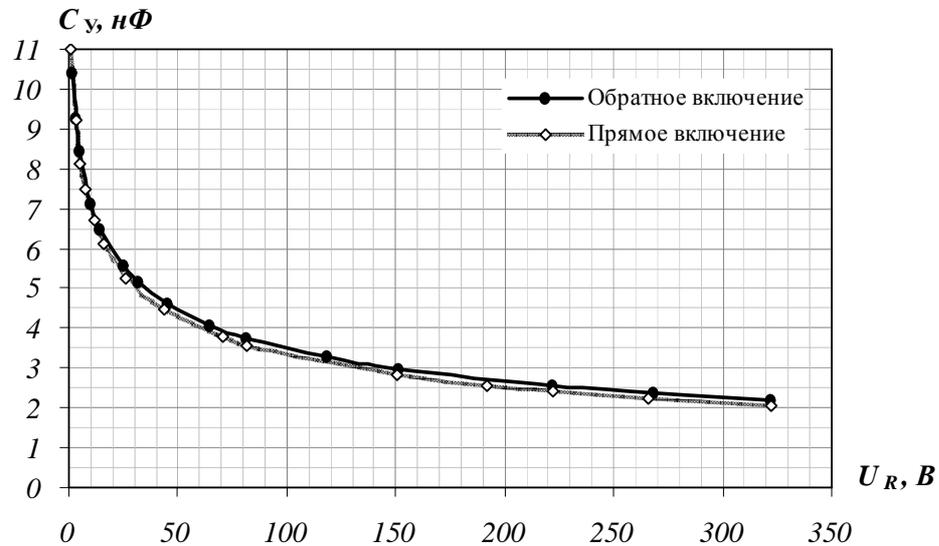


Рис. 6. Вольт-фарадные характеристики силового тиристора Т253-1000 при прямом и обратном включении.

#### V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из рис. 2, 3 видно, что разброс величин барьерной ёмкости у СПП в пределах одной партии невелик. Разброс экспериментально полученных ВФХ силовых тиристоров Т253-1000 и Т353-800 (рис. 4 и 5), имеющих одинаковые площади ПС, свидетельствует о различии толщин областей пространственного заряда  $W_0$ , вызванном разными концентрациями легирующих примесей  $N$ .

Также из рисунка 6 видно, что при обратном напряжении на тиристоре величина барьерной ёмкости больше, чем при прямом смещении. При обратном смещении тиристорная структура имеет бóльшую барьерную ёмкость по причине наличия фаски, которую применяют с целью исключения электрического пробоя по поверхности  $p-n$  перехода. Из-за расположения фаски площадь коллекторного  $p-n$  перехода меньше площади базового  $p-n$  перехода. Этим объясняется разница в барьерной ёмкости при обратном и прямом смещении.

Большая величина барьерной ёмкости СПП является нежелательной, так как при

нарастании напряжения на приборе в закрытом состоянии через него протекает большой ёмкостный ток, что обуславливает уменьшение  $du/dt$ -стойкости силовых тиристоров. Это наглядно демонстрируют вольт-фарадные характеристики тиристоров Т253-1000 и Т353-800 (рис. 4 и 5), из которых видно, что Т353-800 по сравнению с Т253-1000 имеет меньшую барьерную ёмкость, но большую номинальную критическую скорость нарастания прямого напряжения  $(du_D/dt)_{crit}$ , равную 500...2500 В/мкс, в то время как Т253-1000 имеет 500...1600 В/мкс. Этот факт косвенно показывает влияние барьерной ёмкости на процесс накопления критического заряда включения в базах тиристора при приложении импульса прямого напряжения.

Также экспериментально удалось установить слабую температурную зависимость барьерной ёмкости ВФХ СПП при сравнении ВФХ, полученных при  $T_j=25^\circ\text{C}$  и  $125^\circ\text{C}$ . Это также следует из выражения (1), из которого видно, что величина  $2kT_j/q$  является слишком малой, чтобы существенно сказаться на температурной зависимости вольт-фарадных характеристик СПП.

Для оценки относительной погрешности определения барьерной ёмкости  $C_\delta$  от температуры  $p$ - $n$  перехода в состоянии равновесия  $T_j$  по формуле (1) были рассчитаны вольт-фарадные характеристики при температурах  $T_j$ , равных  $25^\circ\text{C}$ ,  $125^\circ\text{C}$ ,  $140^\circ\text{C}$  и  $190^\circ\text{C}$ . Последние три значения температуры были выбраны как принятые в настоящее время максимально допустимые температуры полупроводниковой структуры  $T_{jm}$  для серийных СПП.

Относительная погрешность определения барьерной ёмкости  $C_\delta$  от температуры  $p$ - $n$  перехода в состоянии равновесия  $T_j$ , определена по формуле:

$$\delta_{C_\delta(T_j)} = \frac{C_{\delta(T_j)} - C_{\delta(n)}}{C_{\delta(n)}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $C_{\delta(n)}$  — барьерная ёмкость при температуре  $p$ - $n$  перехода  $T_j = 25^\circ\text{C}$ , принятая за номинальную;  $C_{\delta(T_j)}$  — барьерная ёмкость при температуре  $p$ - $n$  перехода  $T_j$ , равной  $125^\circ\text{C}$ ,  $140^\circ\text{C}$  и  $190^\circ\text{C}$ .

На рис. 7 показана погрешность определения барьерной ёмкости  $C_\delta$  от температуры  $p$ - $n$  перехода  $T_j$ .

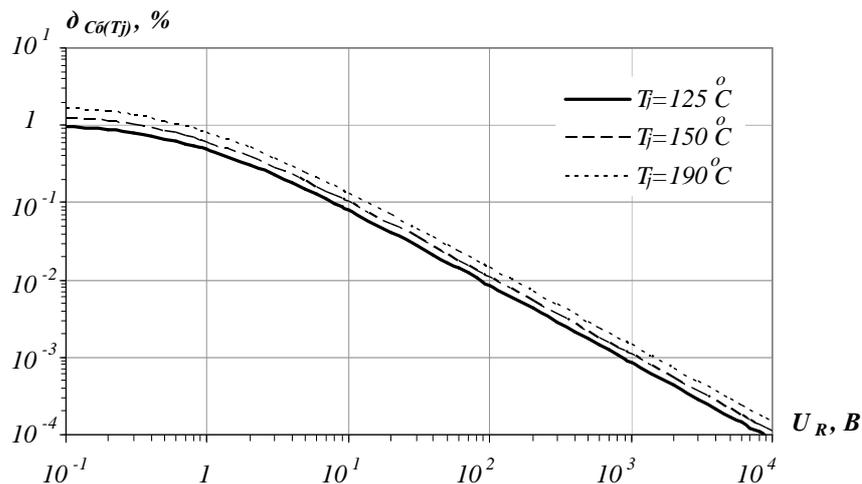


Рис. 7. Относительная погрешность  $\delta_{C_\delta(T_j)}$  определения барьерной ёмкости от обратного напряжения на  $p$ - $n$  переходе при различной температуре  $T_j$ .

## VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При практическом применении экспериментальный способ оценки барьерной ёмкости имеет по формуле (1) ряд недостатков. Во-первых, концентрация примеси  $N$  и профиль легирования, определяющие характер  $p-n$  перехода, являются технологическими параметрами, которые имеют существенный разброс, связанный с естественной технологической нестабильностью производства. Поэтому значения этих параметров для реальных СПП неизвестны. Во-вторых, теоретические расчеты учитывают только ёмкость полупроводниковой пластины, а в преобразователе работает весь прибор в целом, а, значит, помимо барьерной ёмкости он имеет паразитные ёмкости корпуса и выводов. На практике большое значение имеют индивидуальные особенности отдельных приборов (отклонения в пределах одной партии), которые могут быть определены только экспериментально.

Проведённое исследование показало, что вольт-фарадные характеристики СПП, полученные при температуре 25 °С, можно с достаточной точностью использовать для описания поведения СПП при температурах  $T_{jm}$  из-за их слабой температурной зависимости, которой можно пренебречь.

Полученные ВФХ СПП представляют большой интерес для моделирования переходных процессов СПП при переключении. Для этого используется возможность создания нелинейных ёмкостей в среде NI Multisim. При этом достигается большая достоверность полученных результатов моделирования за счет использования в моделях СПП характеристик реальных приборов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Расчет силовых полупроводниковых приборов / П. Г. Дерменжи [и др.] – М. : Энергия, 1980. – 184 с.
2. Sze S. M. Physics of semiconductor devices / S. M. Sze, K. Ng Kwok — New Jersey : — A John Wiley & Sons, Inc., 2007. — 815 p.

## INVESTIGATION OF CAPACITANCE-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF POWER SEMICONDUCTOR DEVICES

**Bespalov N. Nikolay, Glebochkin P. Vitaly**

N. P. Ogarev's Mordovian State University,  
Faculty of electronic engineering, Department of automatic control engineering,  
Russian Federation, 430005, Saransk, Bogdana Khelnickogo St., 39  
E-mail: ka-mgu@mail.ru, glebochkin@mail.ru; tel.: +7 (8342) 24-37-05

**Annotation.** The experimental capacitance-voltage characteristics of power semiconductor devices are shown, obtained results are explained.

**Key words:** capacitance-voltage characteristic; barrier capacitance; power semiconductor device; thyristor; du/dt.



Беспалов Николай Николаевич  
Россия, РМ, г. Саранск  
Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва  
Электронная почта: [ka-mgu@mail.ru](mailto:ka-mgu@mail.ru)  
Тел.: +7 (834-2) 24-37-05

Окончил радиотехнический факультет Новосибирского электротехнического института в 1974 г. по специальности радиотехника. Кандидат технических наук (2000 г.). С 2003 г. и по настоящее время является заведующим кафедрой автоматики Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва.  
**Область научных интересов:** разработка методов и аппаратуры для испытания силовых полупроводниковых приборов и определения их параметров и характеристик; разработка методов и аппаратуры для ионизации воздушной среды.



Глебочкин Виталий Павлович  
Россия, РМ, г. Саранск  
Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва  
Электронная почта: [glebochkin@mail.ru](mailto:glebochkin@mail.ru)  
Тел.: +7-902-666-87-37

Окончил факультет электронной техники Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва в 2008 г. по специальности автоматика. В настоящее время является соискателем кафедры автоматики Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва.  
**Область научных интересов:** разработка методов и аппаратуры для испытания и исследования силовых полупроводниковых приборов, и определения их параметров и характеристик.