

УДК 621.315.592.011.4

## ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВЕЛИЧИНУ БАРЬЕРНОЙ ЁМКОСТИ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

**Николай Николаевич Беспалов, Виталий Павлович Глебочкин**

ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева»,  
факультет электронной техники, кафедра автоматики,  
Российская Федерация, 430005, г. Саранск, ул. Богдана Хмельницкого, д. 39  
E-mail: [bnn48@mail.ru](mailto:bnn48@mail.ru) , [glebochkin@mail.ru](mailto:glebochkin@mail.ru) ; тел.: +7 (8342) 24-37-05

**Аннотация.** В статье рассматриваются факторы, влияющие на величину барьерной ёмкости силовых полупроводниковых приборов, приводятся экспериментальные вольт-фарадные характеристики силовых тиристоров.

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

### I. ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения бóльших максимально допустимых токов, протекающих через силовые полупроводниковые приборы (СПП), работающих в мощных преобразовательных установках, производители СПП увеличивают площадь выпрямительного элемента — полупроводниковой структуры (ПС).

Увеличение площади ПС снижает величину тока, приходящуюся на единицу площади структуры, предотвращая тем самым перегрев СПП и его выход из строя. Однако, при увеличении площади ПС увеличивается величина барьерной ёмкости СПП. Барьерная ёмкость обратносмещённого  $p-n$  перехода представляет собой конденсатор, величина ёмкости которого зависит от приложенного обратного напряжения и сказывается на характере протекания переходных процессов в СПП. В связи с этим её влияние необходимо обязательно учитывать.

### II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

ПС современных СПП достигают в диаметре 150 мм, что обуславливает достижение величин барьерной ёмкости до нескольких сотен нанофарад при величине обратного напряжения на  $p-n$  переходе, близкой к нулю. Влияние этой ёмкости существенным образом сказывается на режиме эксплуатации СПП. В связи с этим при расчёте переходных процессов необходимо учитывать влияние барьерной ёмкости.

В частности, величина барьерной ёмкости сказывается на процессе переключения тиристора в проводящее состояние под действием скорости прямого напряжения — «эффекта  $du/dt$ ». Барьерная ёмкость играет роль конденсатора, который шунтирует коллекторный переход тиристора при приложении к нему импульса прямого напряжения. Через этот «конденсатор» в базовые области тиристора протекает значительный ёмкостный ток, играющий роль тока управления, под действием которого прибор при определённых условиях может переключиться.

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

Барьерная ёмкость СПП в общем случае может быть найдена как ёмкость плоского конденсатора по формуле [1], расстояние между обкладками которого равно ширине слоя объёмного заряда  $W_0$ :

$$C_{\sigma} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{W_0}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость кремния;  
 $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума (электрическая постоянная);  
 $S$  — площадь  $p$ - $n$  перехода;  
 $W_0$  — ширина слоя объёмного заряда, которая определяется для резкого несимметричного  $p$ - $n$  перехода как [2]:

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

где  $q$  — 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  $p$ - $n$  перехода в состоянии равновесия.  
 Подставляя выражение (2) в формулу (1), получим выражение, определяющее вольт-фарадную характеристику СПП при обратном напряжении на  $p$ - $n$  переходе:

$$C_{\phi} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{\sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{qN} \left( \psi_{bi} + U_R - \frac{2kT_j}{q} \right)}}. \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что на величину барьерной ёмкости СПП будут влиять площадь ПС, концентрация легирующей примеси  $N$ , контактная разность потенциалов  $\psi_{bi}$ , обратное напряжение на  $p$ - $n$  переходе  $U_R$  и температура  $T_j$  структуры. Среди этих параметров СПП, влияющих на величину барьерной ёмкости, наиболее значимыми будут площадь ПС, напряжение и концентрация примеси. Влияние остальных параметров будет мало ввиду их незначительной величины [2].

На рис. 1 показаны зависимости барьерной ёмкости от обратного напряжения при различных концентрациях легирующей примеси, полученных по формуле (3).

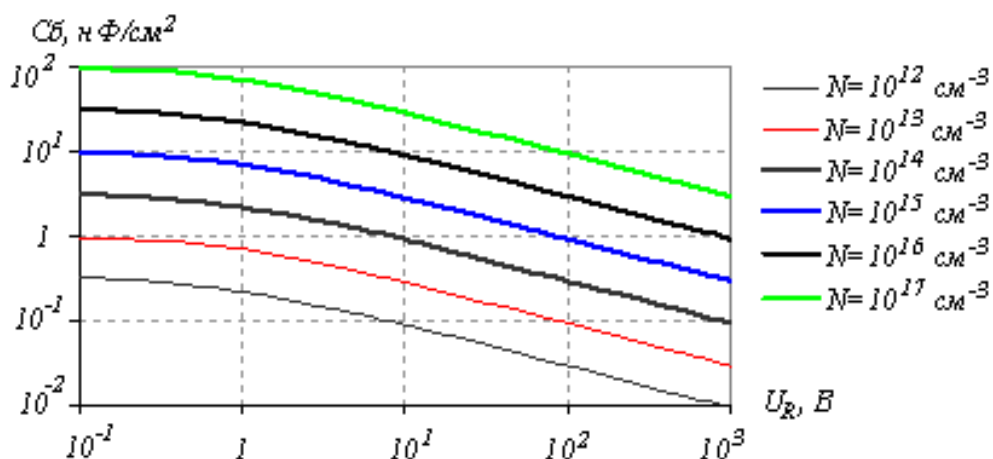


Рис. 1. Зависимость барьерной ёмкости от величины обратного напряжения при различных концентрациях легирующей примеси  $N$ .

Из рис. 1 видно, что для уменьшения величины барьерной ёмкости при сохранении размеров площади ПС для обеспечения высокой пропускной способности по току необходимо уменьшать концентрацию легирующей примеси  $N$ .

## IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для экспериментального определения вольт-фарадных характеристик СПП использован метод, при котором ёмкость обратносмещенного  $p-n$  перехода используется в качестве ёмкостного частото задающего плеча генератора. Изменение величины напряжения на  $p-n$  переходе вызывает изменение барьерной ёмкости, которая потом рассчитывается по значению периода генератора. 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 [3].

На рис. 2 и рис. 3 приведены вольт-фарадные характеристики силовых тиристоров T253-1000 и T353-800 с диаметрами ПС, равными  $d=56$  мм, при приложении обратного и прямого напряжений в закрытом состоянии.

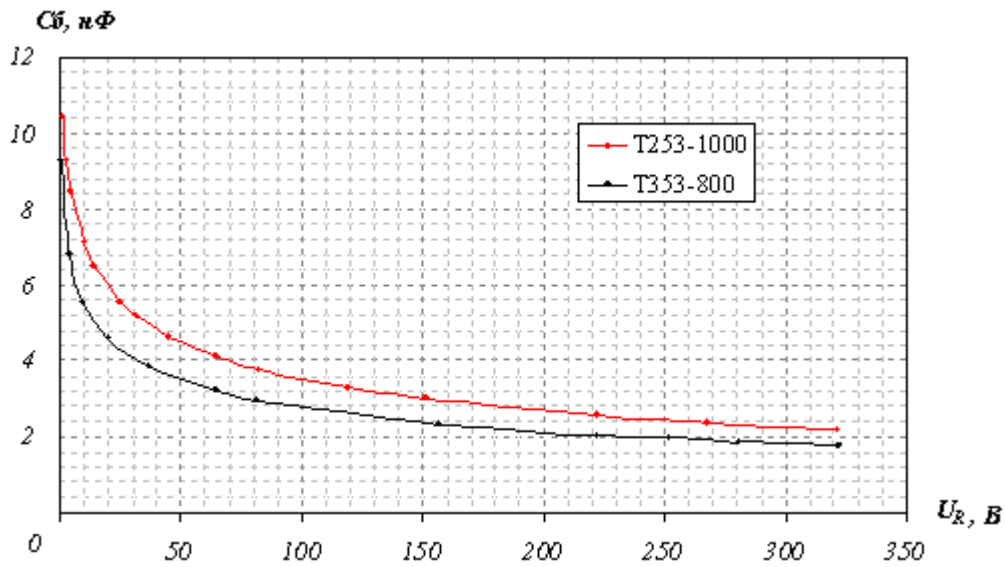


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики силовых тиристоров T253-1000 и T353-800 при обратном напряжении  $U_R$ .

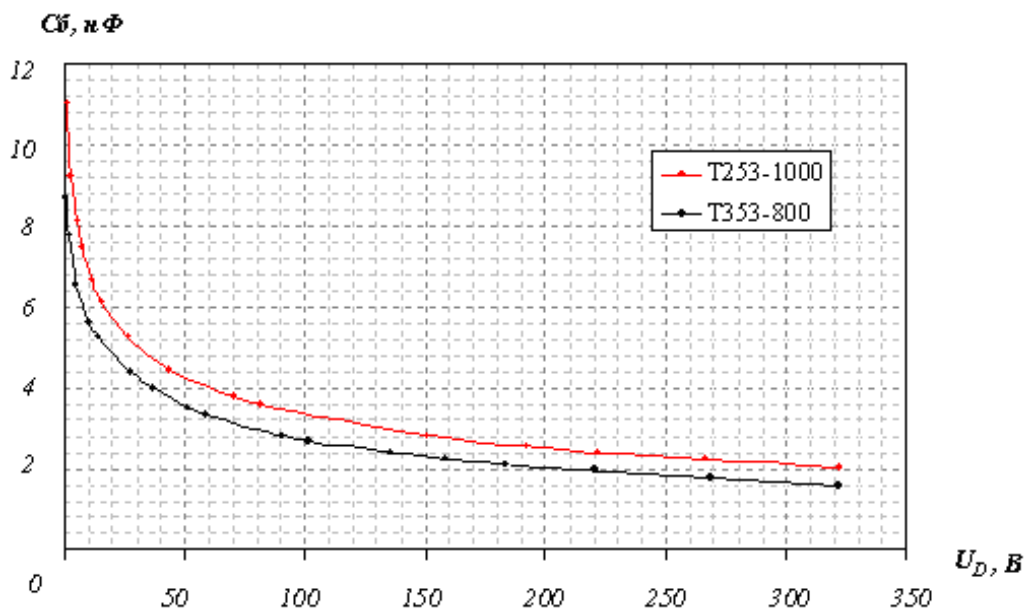


Рис. 3. Вольт-фарадные характеристики силовых тиристоров T253-1000 и T353-800 при прямом напряжении  $U_D$ .

## V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Оценка зависимости величины барьерной ёмкости от концентрации легирующей примеси резкого  $p-n$  перехода, приведённая на рис. 1, показывает, что при больших концентрациях  $N$  легирующей примеси барьерная ёмкость может достигать существенных величин, что, несомненно, сказывается на характере протекания переходных процессов в СПП.

Разброс экспериментально полученных вольт-фарадных характеристик силовых тиристоров Т253-1000 и Т353-800 (рис. 2 и 3), имеющих одинаковые площади выпрямительных элементов, свидетельствует о различии толщин областей пространственного заряда  $W_0$ , вызванном разными концентрациями легирующих примесей  $N$  со стороны слаболегированной части  $p-n$  перехода.

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. 2 и 3), из которых видно, что Т353-800 по сравнению с Т253-1000 имеет меньшую барьерную ёмкость, но большую номинальную критическую скорость нарастания прямого напряжения  $(du/dt)_{crit}$ , 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.

## VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Самым распространённым способом увеличения  $du/dt$ -стойкости тиристоров является шунтировка катодного эмиттерного перехода. Однако, увеличение числа и площади шунтов уменьшает чувствительность прибора к управляющему току и вызывает потери в цепи управления. Поэтому необходимо уменьшать величину барьерной ёмкости, от которой зависит величина ёмкостного тока. Полученные результаты, приведенные в статье, показывают, что основными параметрами ПС, влияющими на величину барьерной ёмкости, являются её площадь и концентрация легирующей примеси. Для снижения барьерной ёмкости при сохранении площади ПС СПП необходимо уменьшать концентрацию легирующей примеси.

Однако уменьшение концентрации легирующей примеси вызывает увеличение сопротивления базовых областей тиристора, за счёт чего возрастают потери во включённом состоянии. Таким образом, необходимо выбирать оптимальные значения концентраций примеси в зависимости от режима работы прибора. Если необходимо обеспечить низкие потери в открытом состоянии, то уменьшать концентрацию примеси не следует. Если требуется обеспечить высокую  $du/dt$ -стойкость, то необходимо уменьшать концентрацию легирующей примеси для уменьшения величины ёмкостного тока.

### 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.
3. Глебочкин В. П. Программно-аппаратный комплекс для определения вольт-фарадных характеристик силовых полупроводниковых приборов / В. П. Глебочкин, Н. Н. Беспалов // Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Инновации и актуальные проблемы техники и технологий» в двух томах. — Саратов, 2010. — Том первый. — С. 304—307.

## FACTORS INFLUENCING THE BARRIER CAPACITANCE 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: [bnn48@mail.ru](mailto:bnn48@mail.ru), [glebochkin@mail.ru](mailto:glebochkin@mail.ru); tel.: +7 (8342) 24-37-05

**Annotation.** The article is devoted to factors influencing the barrier capacitance of power semiconductor devices, experimental capacitance-voltage characteristics of power semiconductor devices are given.

**Key words:** capacitance-voltage characteristic; barrier capacitance; doping concentration; power semiconductor device; thyristor;  $du/dt$ ; critical charge.



Беспалов Николай Николаевич

Россия, РМ, г. Саранск

Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва

Электронная почта: [bnn48@mail.ru](mailto:bnn48@mail.ru)

Тел.: +7 (8342) 24-37-05

Окончил радиотехнический факультет Новосибирского электротехнического института (1974). Кандидат технических наук (2000). Заведующий кафедрой автоматики (с 2003 г. по настоящее время).

*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

Закончил факультет электронной техники Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва в 2008 г. по специальности автоматика. В настоящее время является аспирантом кафедры 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