

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИИ ВЕЛИЧИНЫ ЗАРЯДА ОБРАТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Беспалов Николай Николаевич, Капитонов Сергей Сергеевич  
ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева»  
Российская Федерация, г. Саранск,

E-mail: [ka-mgu@mail.ru](mailto:ka-mgu@mail.ru) , [kapss88@mail.ru](mailto:kapss88@mail.ru) , тел. +7(834-2) 24-37-05,  
430005, г. Саранск, ул. Богдана Хмельницкого, д. 39, каб. 526

**Аннотация.** В статье рассмотрено влияние на величину заряда обратного восстановления силовых полупроводниковых приборов при их выключении величин параметров их полупроводниковой структуры, таких как время жизни дырок в  $n$ -области, и значения температуры полупроводниковой структуры.

**Ключевые слова:** преобразователь, групповое соединение, силовые полупроводниковые приборы; заряд обратного восстановления; время жизни дырок; температура, полупроводниковая структура.

### I. ВВЕДЕНИЕ

В современных мощных преобразователях электрической энергии широко применяется последовательное групповое соединение силовых полупроводниковых приборов (СПП). Номинальные токи подобных преобразователей составляют десятки тысяч ампер, а напряжения – десятки киловольт, поэтому даже при незначительной вариации величин параметров полупроводниковой структуры (ПС) СПП последовательной цепи, общее напряжение распределяется по приборам при их выключении неравномерно. Неравномерное распределение напряжения способно привести к выходу из строя СПП, величина напряжения на которых превысит значение их класса.

Заряд обратного восстановления  $Q_{rr}$  СПП при их выключении является одним из параметров ПС, влияющих на распределение напряжения по приборам последовательной цепи при групповом соединении СПП при их выключении. Исследование вариации величины заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  позволит оценить возможные пределы изменения  $Q_{rr}$  для оптимизации устройств, обеспечивающих защиту СПП последовательной цепи от возможных перенапряжений по напряжению.

### II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Вариация величин заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  СПП последовательной цепи при групповом соединении приборов оказывает влияние на распределение напряжения по СПП при их выключении. Причиной вариации величин  $Q_{rr}$  является вариация значений параметров ПС СПП, которые оказывают влияние на величину  $Q_{rr}$ .

Основными параметрами ПС СПП, оказывающими влияние на величину заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  СПП при их выключении, являются время жизни дырок в  $n$ -области  $\tau_p$  и температура ПС  $T_j$ .

В работе рассмотрены зависимости величины заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  от величин времени жизни дырок в  $n$ -области  $\tau_p$  и температуры ПС  $T_j$  и определены возможные пределы изменения  $Q_{rr}$  в реальных приборах при их последовательном групповом соединении при вариации величин  $\tau_p$  и  $T_j$ .

### III. ТЕОРИЯ

Поскольку вариация величины заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  зависит от вариации значений времени жизни дырок в  $n$ -области  $\tau_p$  и температуры ПС  $T_j$ , оказывающих влияние на  $Q_{rr}$ , то необходимо определить характер влияния указанных параметров на величину  $Q_{rr}$ . Заряд обратного восстановления  $Q_{rr}$  СПП при его выключении математически

для тока синусоидальной формы описывается следующим выражением [1]:

$$Q_{rr} = 0,5 I_{F(T)m} f \tau_p^2; \quad (1)$$

где  $I_{F(T)m}$  – амплитудное значение тока, протекающего через СПП в состоянии высокой проводимости;  $f$  – частота питающего напряжения.

В свою очередь величина времени жизни дырок в  $n$ -области  $\tau_p$  зависит от температуры ПС  $T_j$  СПП. Зависимость  $\tau_p$  от  $T_j$  описывается выражением [2]:

$$\tau_p = \tau_{p0} \left( \frac{T_j}{T_{j0}} \right)^{1,5}; \quad (2)$$

где  $\tau_{p0}$  — время жизни дырок в  $n$ -области при  $T_{j0}$ .

На рис. 1 приведены зависимости  $\tau_p$  от температуры ПС  $T_j$  при различных величинах времени жизни дырок в  $n$ -области  $\tau_{p0}$  при температуре ПС  $T_{j0}=25$  °С, равных  $\tau_{p01} = 1$  мкс,  $\tau_{p02} = 10$  мкс,  $\tau_{p03} = 25$  мкс,  $\tau_{p04} = 100$  мкс.

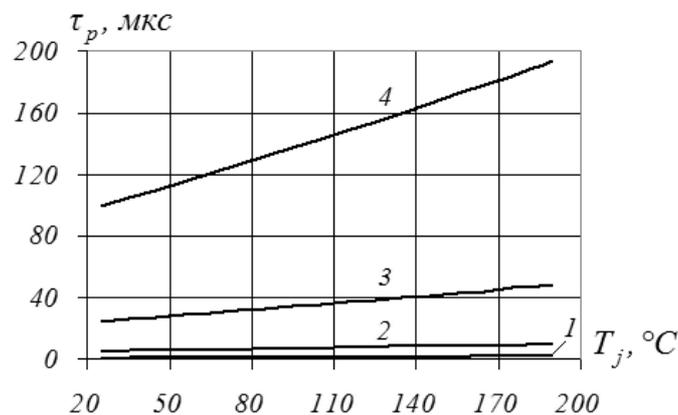


Рис. 1. Зависимости  $\tau_p$  от температуры ПС  $T_j$  при  $\tau_{p01} = 1$  мкс (кривая 1),  $\tau_{p02} = 10$  мкс (кривая 2),  $\tau_{p03} = 25$  мкс (кривая 3),  $\tau_{p04} = 100$  мкс (кривая 4).

Из рис. 1 следует, что с увеличением температуры ПС  $T_j$  время жизни дырок в  $n$ -области  $\tau_p$  значительно возрастает. Характер изменения  $\tau_p$  в выбранном диапазоне температур практически линейный.

Подставив (2) в (1) получаем выражение для заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  СПП при его выключении, которое приобретает следующий вид:

$$Q_{rr} = 0,5 I_{Fm} f \tau_{p0}^2 \left( \frac{T_j}{T_{j0}} \right)^3. \quad (3)$$

Выражение (3) описывает влияние на величину заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  значений времени жизни дырок в  $n$ -области  $\tau_p$  и температуры ПС  $T_j$ , что позволило получить зависимости величины  $Q_{rr}$  от значений  $\tau_p$  и  $T_j$ .

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Проведено исследование зависимости величины заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  от величины времени жизни дырок в  $n$ -области  $\tau_p$ . На рис. 2 представлены результаты исследования данной зависимости при изменении значения  $\tau_{p0}$  от 1 мкс до 100 мкс, при величине температуры ПС  $T_j = 80$  °С, значения  $I_{F(T)m}$  и  $f$  здесь и далее  $I_{F(T)m} = 628$  А,  $f = 50$  Гц.

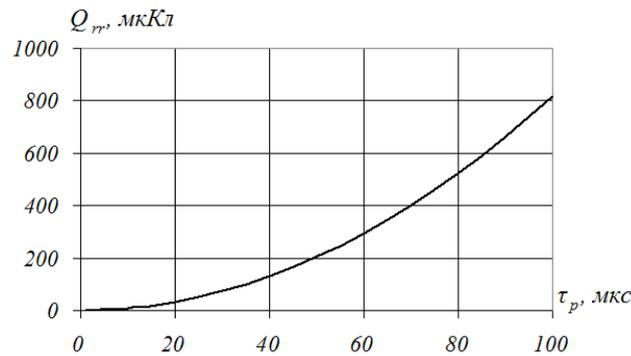


Рис. 2. Зависимость величины заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  от величины времени жизни дырок в  $n$ -области  $\tau_p$ .

Исследована зависимость величины заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  от величины температуры ПС  $T_j$ . На рис. 3 представлены результаты исследования данной зависимости при изменении значения  $T_j$  от  $-40$  °С до  $+190$  °С, при величине  $\tau_{p0} = 25$  мкс.

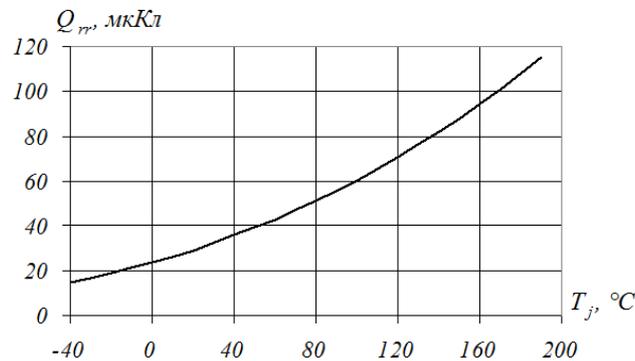


Рис. 3. Зависимость величины заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  от величины температуры ПС  $T_j$ .

В работе рассмотрено совместное влияние значений времени жизни дырок в  $n$ -области  $\tau_p$  и температуры ПС  $T_j$  на величину заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$ , что позволило определить возможные пределы вариации  $Q_{rr}$ . Поскольку технологический разброс величины  $\tau_p$  не превышает 10%, а из [3] известно, что для низкочастотных СПП величина времени жизни дырок в  $n$ -области  $\tau_p \approx 25$  мкс, то исследования проводились, соответственно, при  $\tau_{p01} = 22,5$  мкс,  $\tau_{p02} = 25$  мкс и  $\tau_{p03} = 27,5$  мкс. Диапазон изменения величины температуры ПС  $T_j$  выбран от  $-40$  °С до  $+190$  °С. На рис. 4 представлены результаты исследования зависимости величины заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  от величины температуры ПС  $T_j$  при различных значениях времени жизни дырок в  $n$ -области  $\tau_p$ .

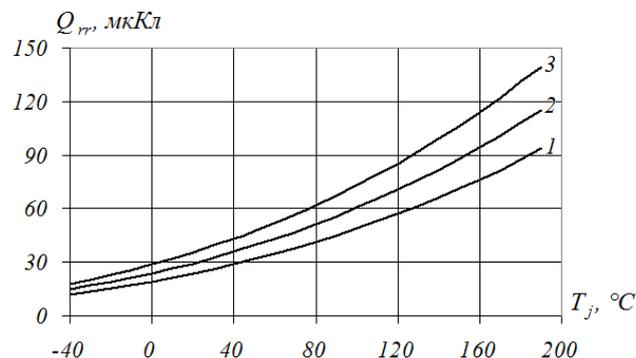


Рис. 4. Зависимость величины заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  от величины температуры ПС  $T_j$  при значениях времени жизни дырок в  $n$ -области  $\tau_{p01} = 22,5$  мкс (кривая 1),  $\tau_{p02} = 25$  мкс (кривая 2) и  $\tau_{p03} = 27,5$  мкс (кривая 3).

## V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из рис. 2 видно, что зависимость заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  от величины времени жизни дырок в  $n$ -области  $\tau_p$  нелинейная и представляет собой параболическую функцию. При наиболее часто применяемых величинах  $\tau_p < 40$  мкс [3] значение  $Q_{rr}$  не превышает 150 мкКл.

Рис. 3 показывает, что зависимость величины заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  от величины температуры ПС  $T_j$  нелинейная. С увеличением значения  $T_j$  величина  $Q_{rr}$  также увеличивается, и при предельно допустимой температуре ПС силовых диодов  $T_{jm} = +190$  °C достигает значения  $Q_{rr} = 116$  мкКл.

Из рис. 4 видно, что в пределах технологического разброса  $\tau_p$  при  $T_{jm} = 190$  °C, величина  $Q_{rr}$  изменяется от 94 мкКл до 140 мкКл, при этом вариация  $\Delta Q_{rr}$  составляет 46 мкКл. Кроме того в пределах технологического разброса теоретически возможен случай, при котором вариация  $\Delta Q_{rr}$  достигает величины в 125 мкКл. Этот случай возникает когда берётся разность для точек с  $\tau_{p01} = 22,5$  мкс,  $T_j = -40$  °C и  $\tau_{p03} = 27,5$  мкс,  $T_j = +190$  °C.

Из всех представленных результатов видно, что величины времени жизни дырок в  $n$ -области  $\tau_p$  и температуры ПС  $T_j$  оказывают существенное влияние на величину заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  СПП при их выключении. Максимальная величина вариации  $Q_{rr}$  при изменении величины  $\tau_p$  в пределах технологического разброса и изменении величины  $T_j$  от  $-40$  °C до  $+190$  °C составляет  $\Delta Q_{rr} = 125$  мкКл. Подобная вариация  $Q_{rr}$  непременно окажет влияние на распределение напряжения по СПП последовательной цепи при групповом соединении при их выключении.

## VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поскольку возможна существенная вариация величины заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$  в пределах технологического разброса величин параметров СПП, вызванная, прежде всего, вариацией величины времени жизни дырок в  $n$ -области  $\tau_p$  и температуры ПС  $T_j$ , то необходимо при последовательном групповом соединении СПП защитить приборы от возникающих на них перенапряжений по напряжению при их выключении. Защита СПП от перенапряжений может осуществляться с помощью снабберных цепей, либо путём подбора приборов по величинам заряда обратного восстановления  $Q_{rr}$ , что позволит уменьшить массогабаритные показатели преобразователя.

## Список литературы

1. Евсеев Ю. А., Дерменжи П. Г. Силовые полупроводниковые приборы: Учебник для техникумов. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 472 с.
2. Беспалов Н. Н. Моделирование характеристик силовых полупроводниковых приборов в состоянии высокой проводимости / Н. Н. Беспалов, С. С. Капитонов, Ю. А. Катяев // Электроника и информационные технологии. 2011. Вып. 1 (10). – [http://fetmag.mrsu.ru/2011-1/pdf/Characteristics\\_Power\\_Semiconductor\\_Devices.pdf](http://fetmag.mrsu.ru/2011-1/pdf/Characteristics_Power_Semiconductor_Devices.pdf) – 04201100067/0005.
3. Кузьмин Н. Н., Дерменжи П. Г., Крюкова В. А. и др. Расчёт силовых полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1980. – 184 с.

## INVESTIGATION OF THE VARIATION OF REVERSE RECOVERY CHARGE VALUES OF POWER SEMICONDUCTOR DEVICES

Bespalov Nikolay Nikolaevich, Kapitonov Sergey Sergeevich  
Mordovian N. P. Ogarev state university,  
Russian Federation, Saransk city

E-mail: ka-mgu@mail.ru, kapss88@mail.ru, tel.: +7(834-2) 24-37-05,  
39, Bohdan Khmelnytsky street, room 526, 433005, Saransk, Mordovia, Russia

**Annotation.** In this paper we consider the influence on the reverse recovery charge of power semiconductor devices of semiconductor structure parameters values, such as the lifetime of holes in n-type region, and the semiconductor structure temperature, when devices are turned off.

**Key words:** power converter, group connection, power semi-conductor devices; reverse recovery charge; lifetime of holes; temperature; semiconductor structure.



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

Окончил радиотехнический факультет Новосибирского электротехнического института (1974). Кандидат технических наук (2000). Заведующий кафедрой автоматизации (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.



Капитонов Сергей Сергеевич  
Россия, РМ, г. Саранск  
Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва  
E-mail: kapss88@mail.ru.  
Тел. +7(834-2) 24-37-05

Окончил факультет электронной техники Мордовского государственного университета имени Н. П. Огарёва (2010). Аспирант кафедры автоматизации факультета электронной техники Мордовского государственного университета имени 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.