DOI: 10.17117/nv.2015.02.025

Поступила (Received): 18.04.2015

<http://ucom.ru/doc/nv.2015.02.025.pdf>

ka-mgu@mail.ru

**Беспалов Н.Н., Капитонов С.С.,
Ильин М.В., Григорович С.Ю.
Описание модели силового диода
в состоянии высокой проводимости**

**Bespalov N.N., Kapitonov S.S., Ilyin M.V., Grigorovich S.Y.
Description of the model of the power
diode in high conductivity state**

Многие устройства силовой электроники, выпускаемые в настоящее время, основаны на групповом соединении силовых полупроводниковых приборов. Вследствие нестабильности технологического процесса производства возникает разброс значений параметров силовых полупроводниковых приборов, из которых формируются последовательные или параллельные цепи. Для повышения надёжности устройств силовой электроники на основе группового соединения силовых полупроводниковых приборов при его проектировании требуется осуществлять моделирование различных режимов работы с учётом вариации значений параметров приборов. С целью получения адекватных результатов моделирования нужно разработать модели приборов, учитывающие значения геометрических и электрофизических параметров их полупроводниковой структуры. В статье представлена схема замещения силового диода в состоянии высокой проводимости. Получены математические зависимости, описывающие процессы, которые протекают в силовых диодах в состоянии высокой проводимости при различных величинах параметров их полупроводниковой структуры. Сделаны выводы о возможных областях применения разработанной модели

Ключевые слова: силовые диоды, устройства силовой электроники

Many devices of power electronics, is currently produced based on the group connection of power semiconductor devices. Because of the instability of production process parameters a spread of power semiconductors, which are formed from the serial or parallel circuit. To improve the reliability of power electronic devices based on the group connection of power semiconductor devices in its design needed to carry out simulations of different modes of operation, taking into account variations in the parameters of devices. In order to obtain adequate simulation results need to develop models of devices that take into account the values of the geometrical and electrical parameters of semiconductor structures. The article presents a diode equivalent circuit of the power in a state of high conductivity. The mathematical dependences describing the processes that occur in the power diode in high conductivity state at different values of the parameters of the semiconductor structure. Conclusions about the possible applications of the developed model

Key words: power diodes, power electronic devices

Беспалов Николай Николаевич

Кандидат технических наук, зав. кафедрой
Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва
г. Саранск, ул. Большевистская, 68

Bespalov Nikolai Nikolaevich

Candidate of Technical Sciences, Head of the
Department
Ogarev Mordovia State University
Saransk, Bolshevistskaya st., 68

Капитонов Сергей Сергеевич

Кандидат технических наук, доцент
Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва
г. Саранск, ул. Большевистская, 68

Kapitonov Sergei Sergeevich

Candidate of Technical Sciences, associate Professor
Ogarev Mordovia State University
Saransk, Bolshevistskaya st., 68

Ильин Михаил Владимирович

Кандидат технических наук, доцент
Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва
г. Саранск, ул. Большевистская, 68

Ilyin Mikhail Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, associate Professor
Ogarev Mordovia State University
Saransk, Bolshevistskaya st., 68

Григорович Сергей Юрьевич

Студент
Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва
г. Саранск, ул. Большевистская, 68

Grigorovich Sergei Yurievich

Student
Ogarev Mordovia State University
Saransk, Bolshevistskaya st., 68

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда
(проект №15-19-20057)

Введение (Introduction)

Многие устройства силовой электроники (УСЭ), выпускаемые в настоящее время, основаны на групповом соединении силовых полупроводниковых приборов (СПП) [1–3]. Вследствие нестабильности технологического процесса производства возникает разброс значений параметров СПП, из которых формируются последовательные или параллельные цепи. Для повышения надёжности УСЭ на основе группового соединения СПП при его проектировании требуется осуществлять моделирование различных режимов работы с учётом вариации значений параметров приборов [4–7]. С целью получения адекватных результатов моделирования нужно разработать модели СПП, учитывающие значения геометрических и электрофизических параметры их полупроводниковой структуры (ПС) [8, 9]. Рассмотрим описание модели силового диода в состоянии высокой проводимости (СВП).

Материалы и методы (Materials and Methods)

Схема замещения СПП в СВП представляет собой параллельное соединение нелинейного сопротивления R_F и диффузионной ёмкости C_d р-п перехода (рис. 1) [10–12].

Рис. 1. Схема замещения СПП в СВП

На основании зависимостей, приведённых в [6], нами получено выражение, позволяющее определить R_F при напряжении на СПП в СВП u_F при протекании через него тока i_F в зависимости от электрофизических и геометрических параметров ПС СПП. Согласно [6] прямое напряжение u_F на диоде определяется следующей зависимостью:

$$u_F = \frac{2kT_j}{q} \ln \frac{i_F}{I_{si}} + \frac{1,5kT_j}{q} \exp\left(\frac{W_n}{2L'_p}\right) + \frac{W_n}{16S} i_F, \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана; T_j – температура ПС СПП; q – элементарный электрический заряд; I_{si} – ток насыщения; W_n – толщина n -базы; L'_p – диффузионная длина дырок в n -базе при высоких уровнях инжекции; S – площадь ПС СПП.

Ток насыщения I_{si} описывается формулой [6]:

$$I_{si} = S \frac{qD_p n_i}{L_p}, \quad (2)$$

где D_p – коэффициент диффузии дырок; n_i – концентрация собственных носителей полупроводника; L_p – диффузионная длина дырок.

Зависимость площади ПС СПП от диаметра его ПС d представлена в виде:

$$S = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (3)$$

Температурная зависимость концентрации собственных носителей полупроводника n_i определяется выражением [6]:

$$n_i = n_{i0} \exp\left[B\left(1 - \frac{T_{j0}}{T_j}\right)\right], \quad (4)$$

где n_{i0} – концентрация собственных носителей полупроводника при температуре ПС $T_{j0} = 25^\circ\text{C}$; $B \approx 23,6$ для кремния при температуре ПС $T_{j0} = 25^\circ\text{C}$.

Диффузионная длина дырок в n -базе при высоких уровнях инжекции L'_p описывается формулой [6]:

$$L'_p = \sqrt{D\tau_p}, \quad (5)$$

где D – амбиполярный коэффициент диффузии; τ_p – время жизни дырок в n -области.

Амбиполярный коэффициент диффузии D равен [6]:

$$D = \frac{2bD_p}{b+1}, \quad (6)$$

где b – отношение подвижностей электронов и дырок.

Температурная зависимость времени жизни дырок в n -области τ_p определяется выражением [6]:

$$\tau_p = \tau_{p0} \left(\frac{T_j}{T_{j0}}\right)^{1,5}, \quad (7)$$

где τ_{p0} – время жизни дырок в n -области при температуре ПС $T_{j0} = 25^\circ\text{C}$;
Температурная зависимость толщины n -базы W_n описывается выражением:

$$W_n = W_{n0} \left(\frac{T_j}{T_{j0}} \right)^{1,5}, \quad (8)$$

где W_{n0} – толщины n -базы при температуре ПС $T_{j0} = 25^\circ\text{C}$;

Подстановкой вышеописанных формул в выражение (1), определена зависимость значения напряжения u_F от значения тока i_F и величин параметров электрофизических и геометрических параметров ПС СПП:

$$u_F = \frac{2kT_j}{q} \ln \left[\frac{4L_p}{\pi q d^2 D_p n_i \exp \left[B \left(1 - \frac{T_{j0}}{T_j} \right) \right]} \times i_F \right] + \frac{1,5kT_j}{q} \exp \left[\frac{W_n}{2} \sqrt{\frac{b+1}{2bD_p\tau_p}} \right] + \frac{W_n}{4\pi d^2} \left(\frac{T_j}{T_{j0}} \right)^{1,5} \times i_F. \quad (9)$$

Результаты (Results)

На основании полученных выше зависимостей получено математическое описание нелинейного сопротивления R_F и диффузионной ёмкости C_d p - n перехода, параллельное соединение которых составляет схему замещения СПП в СВП (рис. 1).

Нелинейное сопротивление r_F равно:

$$r_F = \frac{u_F}{i_F}. \quad (10)$$

С учётом (2.9) получено выражение, описывающее r_F [6]:

$$r_F = \left(\frac{2kT_j}{q} \ln \left[\frac{4L_p}{\pi q d^2 D_p n_i \exp \left[B \left(1 - \frac{T_{j0}}{T_j} \right) \right]} \times i_F \right] + \frac{1,5kT_j}{q} \exp \left[\frac{W_n}{2} \sqrt{\frac{b+1}{2bD_p\tau_p}} \right] \right) \times (i_F)^{-1} + \frac{W_n}{4\pi d^2} \left(\frac{T_j}{T_{j0}} \right)^{1,5}. \quad (11)$$

Диффузионная ёмкость C_d p - n перехода описывается выражением, приведённым в [6], как:

$$C_d = \frac{q}{kT_j} i_F \tau_p. \quad (12)$$

С учётом температурной зависимости времени жизни дырок в n -области τ_p , заданной формулой (7), получаем из (12):

$$C_d = \frac{q}{kT_j} i_F \tau_p \left(\frac{T_j}{T_{j0}} \right)^{1,5}. \quad (13)$$

Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion)

Полученные зависимости нелинейного сопротивления R_F и диффузионной ёмкости C_d p - n перехода СПП от значений электрофизических и геометрических параметров их ПС приняты за основу модели силового диода в СВП, реали-

зованную в среде моделирования электрических схем Multisim [13–16]. Разработанная модель позволяет исследовать процессы, протекающие в УСЭ на основе группового соединения СПП при вариации значений их параметров [17–20].

Список используемых источников:

1. Беспалов Н.Н., Капитонов С.С. Исследование температурной зависимости тока обратного восстановления силовых полупроводниковых приборов // XL Огаревские чтения : материалы науч. конф.: в 3 ч. Саранск : изд-во Мордов. ун-та, 2012. С. 234-238.
2. Беспалов Н.Н., Капитонов С.С. Исследование вариации величины заряда обратного восстановления силовых полупроводниковых приборов // Электроника и информационные технологии. 2011. Вып. 2 (11).
3. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С. Испытательная аппаратура для определения электрических и тепловых параметров и характеристик силовых полупроводниковых приборов // Электроника и информационные технологии. 2012. Вып. 1 (12).
4. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S. Current generator for testing power semiconductor devices in high conduction state // 11th International conference on actual problems of electronic instrument engineering, APEIE. 2012. Novosibirsk: IEEE, 2012. №1. P. 143-147.
5. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С., Лебедев С.В. Разработка и исследование электротепловых моделей силовых полупроводниковых приборов основных типовых конструкций // Естественные и технические науки. М.: Спутник+, 2011. Вып. №6. С. 405-412.
6. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С., Лебедев С.В. Моделирование процессов в силовых полупроводниковых приборах при их групповом последовательном включении в среде Multisim // Электроника и электрооборудование транспорта. Томилино: Научно-производственное предприятие «Томилинский электронный завод», 2012. Вып. 4. С. 30-35.
7. Беспалов Н.Н., Капитонов С.С. Выравнивание напряжений на последовательно распределенных силовых полупроводниковых приборах в состоянии низкой проводимости // Нелинейный мир. М.: Радиотехника, 2011. Вып. 8. С. 500-506.
8. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С., Капитонова А.В. Методика подбора силовых полупроводниковых приборов для групповых последовательных цепей устройств силовой электроники // Научно-технический вестник Поволжья. Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2014. Вып. 1. С. 65-68.
9. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С., Лебедев С.В. Определение минимальных величин ёмкостей снабберных цепей для ограничения коммутационных перенапряжений на силовых полупроводниковых приборах при их выключении // Естественные и технические науки. М.: Спутник+, 2011. Вып. 6. С. 396-404.
10. Беспалов Н.Н., Евишев А.В., Ильин М.В., Капитонов С.С. Исследование процессов, протекающих в цепях с последовательным групповым соединением силовых полупроводниковых приборов при их выключении // Огарев-online. Технические науки. 2015. № 11.
11. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С. Аппаратно-программный комплекс для испытания и диагностики силовых полупроводниковых приборов // Труды VIII международной (XIX всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 в 2-х томах. Саранск : изд-во Мордов. ун-та, 2014. Т. 1. С. 362-364.
12. Беспалов Н.Н., Капитонов С.С., Пьянзин И.И. Моделирование характеристик силовых полупроводниковых приборов в состоянии низкой проводимости // Электроника и информационные технологии. 2010. Вып. 2 (9).
13. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С., Матюшкин В.В. Генератор испытательных импульсов для диагностики силовых полупроводниковых приборов в состоянии низкой проводимости // Огарев-online. Технические науки. 2014. № 3.
14. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С., Смолин А.Н. Обзор устройств для измерения значений параметров и характеристик силовых полупроводниковых приборов в состоянии низкой проводимости // Огарев-online. Технические науки. 2014. № 22.
15. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С., Лысенков А.Е. Испытательное оборудование на базе технологий компании NATIONAL INSTRUMENTS для определения вольт-амперной характеристики силовых полупроводниковых приборов в состоянии высокой проводимости // Компьютерные измерительные технологии. Материалы I Международного симпозиума. М.: ДМК пресс, 2015. Том 1. С. 97-100.

16. Беспалов Н.Н., Лысенков А.Е., Ильин М.В., Капитонов С.С. Аппаратно-программный комплекс для испытания силовых МДП-транзисторов // Компьютерные измерительные технологии. Материалы I Международного симпозиума. М: ДМК пресс, 2015. Том 1. С. 168-171.
17. Беспалов Н.Н., Ильин М.В., Капитонов С.С. Описание модели силового диода в состоянии низкой проводимости // Вопросы образования и науки: теоретический и методический аспекты: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практич. конф. Тамбов, 2015. С. 20-23.
18. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S. Equipment for testing and diagnostics of power semiconductor devices // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21-23, 2015.
19. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S., Lysenkov A.E. Program for modeling transient off of power semiconductor devices // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21-23, 2015.
20. Bepalov N.N., Lysenkov A.E., Ilyin M.V., Kapitonov S.S. MOSFETs selection software to form parallel and series connections // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21-23, 2015.

References:

1. Bepalov N.N., Kapitonov S.S. The temperature dependence of the reverse recovery current of power semiconductor devices. XL Ogarev readings: materials of scientific conference: in 3 parts. Saransk: publisher of Mordovia State University, 2012. P. 234-238.
2. Bepalov N.N., Kapitonov S.S. Study of variation values of reverse recovery charge of power semiconductor devices. Electronics and Information Technology, 2011. Vol. 2 (11).
3. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S. Test equipment to determine the electrical and thermal parameters and characteristics of power semiconductor devices. Electronics and Information Technology, 2012. Vol. 1 (12).
4. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S. Current generator for testing power semiconductor devices in high conduction state. 11TH International conference on actual problems of electronic instrument engineering, APEIE 2012. Novosibirsk: IEEE, 2012. №1. P. 143-147.
5. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S., Lebedev S.V. Development and research of models for electric power semiconductor devices typical basic designs // Natural and Technical Sciences. Moscow: Sputnik +, 2011. Vol. 6. P. 405-412.
6. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S., Lebedev S.V. Modeling of processes in power semiconductor devices in the series connection of the group in the medium Multisim. Electronics and electrical transport. Tomilino: Tomilino Electronic Factory, 2012. Vol. 4. P. 30-35.
7. Bepalov N.N., Kapitonov S.S. Alignment voltage on sequentially distributed power semiconductor devices in a low conductivity. Nonlinear world. M: Radio, 2011. Vol. 8. P. 500-506.
8. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S., Kapitonova A.V. Method of selection of power semiconductor devices for group sequential circuits of power electronics devices. Scientific and Technical Gazette of Volga. Kazan: Scientific and Technical Gazette of Volga, 2014. Vol. 1. P. 65-68.
9. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S., Lebedev S.V. Determination of the minimum capacitance values snubber circuits to limit switching surges on power semiconductor devices when they are turned off. Natural and Technical Sciences. Moscow: Sputnik +, 2011. Vol. 6. P. 396-404.
10. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S., Evishev A.V. Investigation of the processes occurring in the circuit with a consistent group connection of power semiconductor devices when you turn off the. Ogarev-online. Technical science. 2015. № 11.
11. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S. Hardware-software complex for testing and diagnostics of power semiconductor devices. Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) Conference on automated electric AEP 2014 in 2 volumes. Saransk: publisher of Mordovia State University, 2014. Vol. 1. P. 362-364.
12. Bepalov N.N., Kapitonov S.S., Pyanzin I.I. Modeling of characteristics of power semiconductor devices in low conductivity state. Electronics and Information Technology. 2010. Vol. 2 (9).
13. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S., Matyushkin V.V. Generator of test pulse for the diagnosis of power semiconductor devices in low conductivity state. Ogarev-online. Technical science. 2014. № 3.
14. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S., Smolin A.N. Overview of devices for measuring the values of the parameters and characteristics of power semiconductor devices in a state of low conductivity. Ogarev-online. Technical science. 2014. № 22.
15. Bepalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S., Lysenkov A.E. Test equipment, based on technology of NATIONAL INSTRUMENTS company, to determine the current-voltage characteristics of power semiconductor devices in a

- state of high conductivity. *Computer Measurement Technology. Proceedings of the I International Symposium*. M: DMK press, 2015. Vol. 1. P. 97-100.
16. Bespalov N.N., Lysenkov A.E., Ilyin M.V., Kapitonov S.S. Hardware-software complex for testing power MOSFETs. *Computer Measurement Technology. Proceedings of the I International Symposium*. M: DMK press, 2015. Vol. 1. P. 168-171.
17. Bespalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S. Model description of the power diode in low conductivity state. *Questions of Education and Science: theoretical and methodical aspects: collection of scientific papers on the materials of the International scientific and practical conference. Practical. Conf. Tambov, 2015*. P. 20-23.
18. Bespalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S. Equipment for testing and diagnostics of power semiconductor devices. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Omsk State Technical University. Omsk, May 21-23, 2015*.
19. Bespalov N.N., Ilyin M.V., Kapitonov S.S., Lysenkov A.E. Program for modeling transient off of power semiconductor devices. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Omsk State Technical University. Omsk, May 21-23, 2015*.
20. Bespalov N.N., Lysenkov A.E., Ilyin M.V., Kapitonov S.S. MOSFETs selection software to form parallel and series connections. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Omsk State Technical University. Omsk, May 21-23, 2015*.

© 2015, Беспалов Н.Н., Капитонов С.С., Ильин М.В., Григорович С.Ю.

Описание модели силового диода в состоянии высокой проводимости

© 2015, Bespalov N.N., Kapitonov S.S., Ilyin M.V., Grigorovich S.Y.

Description of the model of the power diode in high conductivity state