

ВЛИЯНИЕ ТОНКОГО СЛОЯ С ПОВЫШЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ПРИМЕСИ НА НАПРЯЖЕНИЕ ПРОБОЯ P-N ПЕРЕХОДА

© В. П. Падеров, Д. С. Силкин

ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва»,
430005, Республика Мордовия, г. Саранск, Большевистская ул., 68

Разработана аналитическая модель влияния тонкого слоя с повышенной концентрацией легирующей примеси на напряжение пробоя p-n перехода. Показано влияние дозы примеси в слое, положения в области пространственного заряда и площади слоя на напряжение пробоя p-n перехода. Результаты аналитической модели сравниваются с результатами двумерного моделирования в программе Synopsys TCAD.

Ключевые слова: p-n переход, лавинный пробой, тонкий легированный слой, моделирование, напряжение пробоя

Сведения об авторах: Падеров Виктор Петрович, к.ф.-м.н., доцент, paderov@mail.ru; Силкин Денис Сергеевич, аспирант, d-s.silkin@mail.ru

THE EFFECT OF A THIN LAYER OF HIGH IMPURITY CONCENTRATION ON THE BREAKDOWN VOLTAGE OF THE P-N JUNCTION

V. P. Paderov, D. S. Silkin

Mordovia State University named after N.P. Ogarev,
43000568, Mordovia Republic, Saransk, Bolshevistskaya street, 68

In the given research, the analytical model of the effect of a thin layer of high impurity concentration on the breakdown voltage of p-n junction was developed. The influence of the dose of impurities in the layer, the position in the space charge region and the area of the layer on the breakdown voltage of p-n junction was shown. The results of the analytical model are compared with the results of the two-dimensional simulation in the Synopsys TCAD program.

Keywords: p-n junction, avalanche breakdown, thin doping layer, modeling, breakdown voltage

Data of authors: Paderov Victor Petrovich, Ph.D., associate professor, paderov@mail.ru; Silkin Denis Sergeevich, postgraduate, d-s.silkin@mail.ru

Введение

Устройство силовых тиристорov позволяет встраивать защиту от разрушающего отказа при перенапряжении непосредственно в тиристорную структуру [1]. Принцип такой встроенной защиты заключается в том, чтобы обеспечить развитие пробоя в области первого вспомогательного тиристора, что приведёт к нормальному включению структуры основного тиристора. Одним из способов уменьшения

напряжения пробоя в области первого вспомогательного тиристора является локальное введение в слаболегированную n-базовую область дополнительного тонкого N'-слоя с большей концентрацией легирующей примеси [2]. Такой слой можно сформировать с помощью локального протонного облучения [3].

Целью данной работы является исследование влияния дозы донорной примеси в N'-слое, положения и размеров N'-слоя на напряжение пробоя резкого асимме-

тричного р⁺-п перехода, а также разработка аналитической модели для расчёта напряжения пробоя р⁺-п перехода с N'-слоем.

1. Расчёт напряжения пробоя р⁺-п перехода с N'-слоем

Расчёт производился для одномерного резкого ассиметричного р⁺-п перехода. Предполагалось, что N'-слой имеет однородный прямоугольный профиль легирования с концентрацией N_d' , полушириной ΔR_p и глубиной залегания R_p , которая определяется, как середина прямоугольного профиля. Распределение напряжённости электрического поля в структуре с резким ассиметричным р⁺-п переходом без N'-слоя имеет треугольный вид [4] и показано пунктирной линией на рис. 1. Точка X_m соответствует металлургической границе р⁺-п перехода, где поле максимально.

После введения в структуру тонкого N'-слоя, легированного сильнее, картина распределения напряжённости поля в структуре изменится. Это изменение показано на рис. 1 сплошной линией.

Напряжение пробоя при наличии N'-слоя равно площади фигуры под распределением напряжённости поля, изображённой на рис. 1 в момент, когда $E_{max} = E_{crit}$ – критической напряжённости поля, при которой наступает лавинный пробой. Это напряжение меньше, чем напряжение пробоя в структуре без N'-слоя и отличается на величину, равную площади заштрихованной фигуры на рис. 1. Напряжение пробоя можно оценить как сумму площадей трёх фигур: трапеции I, трапеции II и треугольника III.

Если за точку отсчёта принять металлургическую границу $X_m = 0$, то напряжение пробоя при наличии N'-слоя можно оценить по формуле:

$$V_b = \frac{1}{2} \cdot (E_1 + E_{crit}) \cdot (R_p - \Delta R_p) + \Delta R_p \cdot (E_1 + E_2) + \frac{1}{2} \cdot E_2(W' - R_p - \Delta R_p), \tag{1}$$

$$E_1 = E_{crit} - a_1(R_p - \Delta R_p),$$

$$E_2 = E_1 - a_2(2\Delta R_p),$$

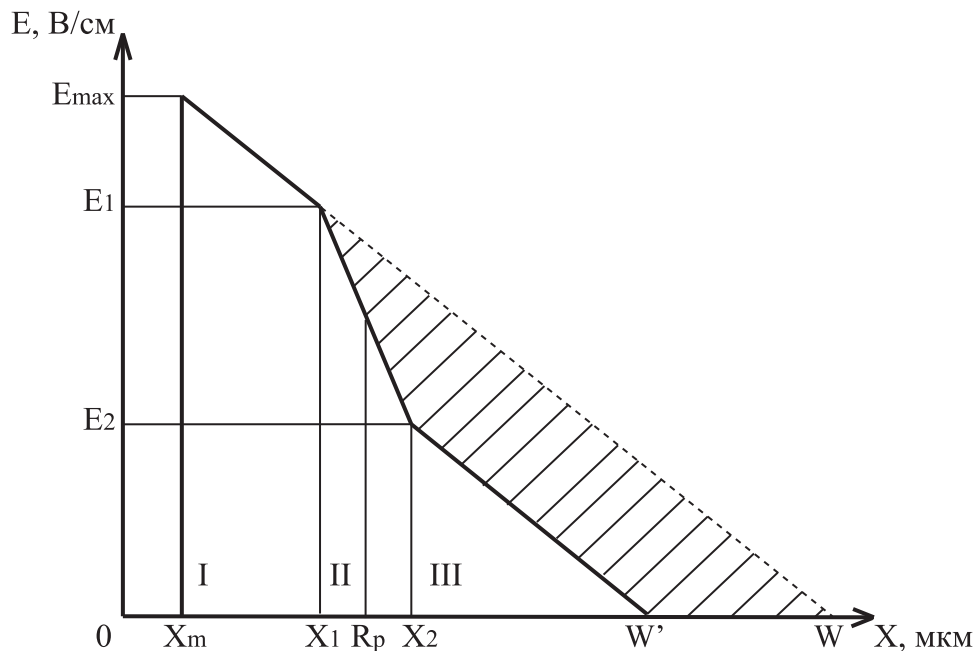


Рис. 1

Распределение напряжённости поля в случае резкого ассиметричного р⁺-п перехода без N'-слоя (пунктирная линия) и с N'-слоем (сплошная линия), ($X_1 = R_p - \Delta R_p$, $X_2 = R_p + \Delta R_p$)

$$W' = \frac{E_2}{a_1} + (R_p + \Delta R_p),$$

где $a_1 = qN_d / (\varepsilon_0 \varepsilon_s)$, $a_2 = qN_d' / (\varepsilon_0 \varepsilon_s)$; E_1 , E_2 – напряжённость поля на левой и правой границах N'-слоя, соответственно; N_d' , N_d – концентрации легирующей примеси в N'-слое и исходном n-слое, соответственно; $\varepsilon_0 \varepsilon_s$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость кремния; q – заряд электрона. W' – ширина области пространственного заряда для структуры с N'-слоем.

Разность напряжённостей поля $E_1 - E_2$ пропорциональна дозе легирующей примеси в N'-слое $N_d'(2\Delta R_p)$, следовательно, увеличение дозы будет приводить к увеличению высоты заштрихованной трапеции, и в итоге к уменьшению напряжения пробоя р-п перехода с N'-слоем. При уменьшении расстояния от N'-слоя до металлургической границы р-п перехода напряжение пробоя структуры также должно непрерывно уменьшаться, так как увеличиваются длины оснований заштрихованной трапеции.

Необходимо отметить, что величина E_{crit} остаётся постоянной, только если N'-слой располагается вне области ударной ионизации, которая занимает от 20 % до 30 % ширины области пространственного заряда (ОПЗ) для высоковольтных переходов, причём эта доля уменьшается с увеличением напряжения пробоя [5]. Если N'-слой оказывается в области ионизации, то напряжённость поля E_{crit} должна возрасти, чтобы выполнялось условие для лавинного размножения, поскольку N'-слой сужает область ударной ионизации. Поэтому, чтобы определить влияние N'-слоя на напряжение пробоя структуры в тех случаях, когда N'-слой заходит в область ударной ионизации, необходимо сначала получить зависимость напряжённости поля E_{crit} от глубины залегания R_p N'-слоя.

2. Влияние N'-слоя в области ударной ионизации на пробой р⁺-п перехода

Повышенная концентрация доноров в N'-слое приводит к сильному снижению напряжённости поля в пределах этого

слоя (рис. 1). Поэтому N'-слой, оказываясь в пределах области ударной ионизации, фактически, сужает ширину области ударной ионизации. Чем ближе R_p находится к металлургической границе, тем большая напряжённость поля требуется для возникновения лавинного пробоя. Таким образом, при уменьшении R_p в пределах области ударной ионизации критическая напряжённость поля и напряжение пробоя структуры будут расти.

Рассчитать зависимость E_{crit} от R_p можно, используя приближения эффективного коэффициента ударной ионизации [1] и степенной аппроксимации зависимости эффективного коэффициента ударной ионизации от напряжённости электрического поля [6].

Условие лавинного пробоя запишется в виде [1]:

$$\int_0^{W'} \alpha_{eff}(E(x)) dx = 1, \quad (2)$$

где α_{eff} – эффективный коэффициент ударной ионизации, который определяется формулой:

$$\alpha_{eff}(E) = C \left(\frac{E}{E_0} \right)^n,$$

где n и C – коэффициенты, равные:

$$n = b_{eff} / E_0,$$

$$C = a_{eff} e^{-n}.$$

Здесь a_{eff} и b_{eff} – эмпирические коэффициенты из экспоненциального закона Чиновеса [7], равные $a_{eff} = 1,06 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$, $b_{eff} = 1,68 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ [1].

Учитывая линейный характер зависимости $E(x)$, условие (2) можно переписать в выражение (3).

Такой интеграл берётся аналитически. Интегрирование выражения (3) приводит к трансцендентному уравнению вида (4).

$$\int_0^{R_p - \Delta R_p} C \left(\frac{E_{crit} - a_1 x}{E_0} \right)^n dx + \int_{R_p - \Delta R_p}^{R_p + \Delta R_p} C \left(\frac{E_1 - a_2 x}{E_0} \right)^n dx + \int_{R_p + \Delta R_p}^{W'} C \left(\frac{E_2 - a_1 x}{E_0} \right)^n dx = 1. \quad (3)$$

$$E_{norm}^{n+1} - (E_{norm} - K_1)^{n+1} + (E_{norm} - K_2)^{n+1} + \frac{N_d}{N'_d} [(E_{norm} - K_1)^{n+1} - (E_{norm} - K_2)^{n+1}] - K_3, \quad (4)$$

где

$$K_1 = \frac{a_1(R_p - \Delta R_p)}{E_0}, \quad K_2 = \frac{a_2(2\Delta R_p) + a_1(R_p - \Delta R_p)}{E_0}, \quad K_3 = \frac{a_1(n+1)}{C}, \quad E_{norm} = \frac{E_{crit}}{E_0}.$$

Уравнение (4) решается численными методами. В качестве примера использовался p⁺-n переход с напряжением пробоя около 9 кВ при следующих исходных данных: $N_d = 1,13 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $E_0 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ В/см}$, $\Delta R_p = 5 \text{ мкм}$, $N'_d = 1,13 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Область ударной ионизации составляет для такого p⁺-n перехода менее 200 мкм [8]. Полученная при этом зависимость $E_{crit}(R_p)$ изображена на рис. 2.

Подставляя значения E_{crit} в формулу (1), можно рассчитать зависимость $V_b(R_p)$. Эта зависимость изображена на

рис. 3 сплошной линией. Из рисунка видно, что, начиная с некоторого значения R_p , критическая напряжённость электрического поля становится практически постоянной величиной, а напряжение начинает расти по линейному закону. Это свидетельствует о том, что N'-слой вышел за пределы области ударной ионизации. Кроме того, из рис. 3 видно, что существует определённая глубина залегания N'-слоя, на которой напряжение пробоя структуры минимально, и это расстояние находится в пределах области ударной ионизации.

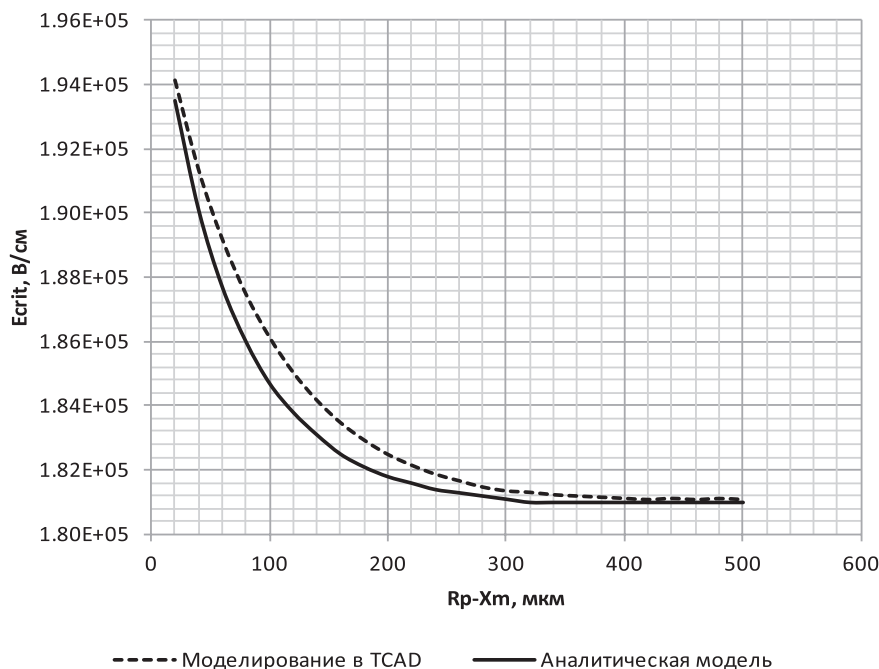


Рис. 2

Зависимость критической напряжённости поля, при которой происходит лавинный пробой, от положения N'-слоя относительно металлургической границы перехода

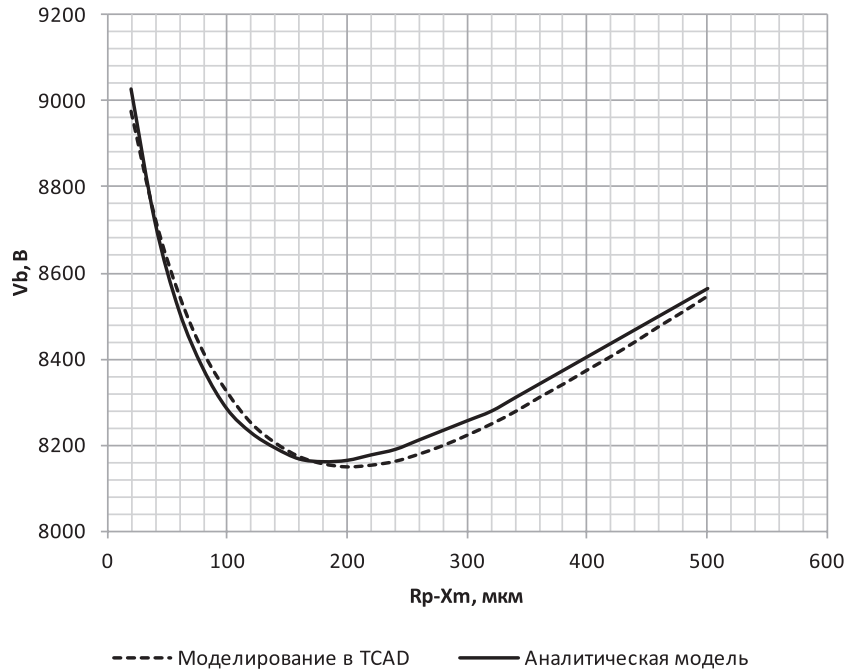


Рис. 3

Зависимости напряжений пробоя р⁺-n перехода с N⁺-слоем от положения N⁺-слоя

3. Сравнение результатов моделирования

Для проверки предложенной аналитической модели пробоя структура резкого асимметричного р⁺-n перехода с параметрами,

аналогичными для аналитической модели, была смоделирована в программе Synopsys TCAD. Для моделирования эффекта ударной ионизации использовалась модель Ван Оверстраттена – Де Мана. Значения a и

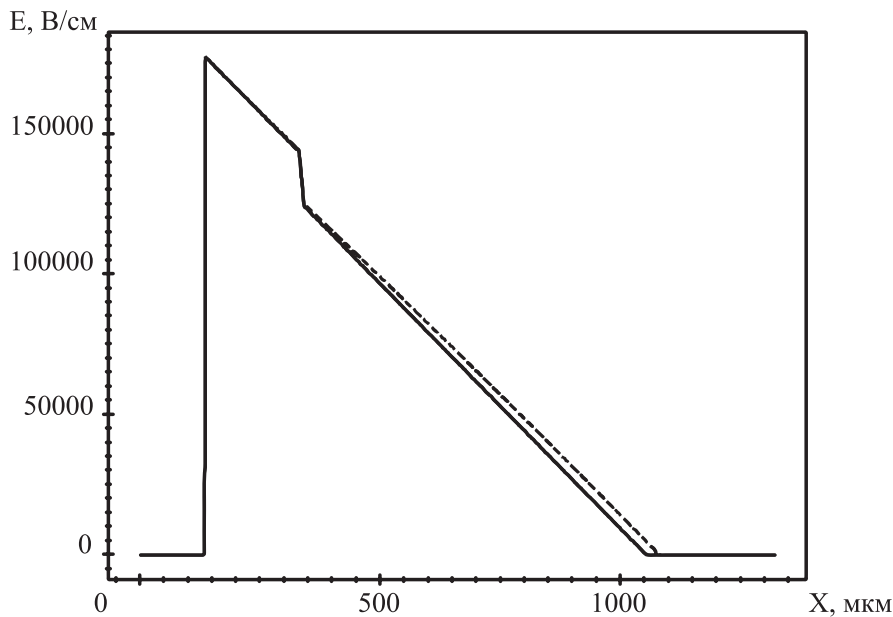


Рис. 4

Распределение напряжённости поля в центральной части р⁺-n перехода с N⁺-слоем из моделирования в Synopsys TCAD (пунктир – радиус N⁺-слоя равен половине ширины области пространственного заряда; сплошная – N⁺-слой распространяется на всю моделируемую структуру)

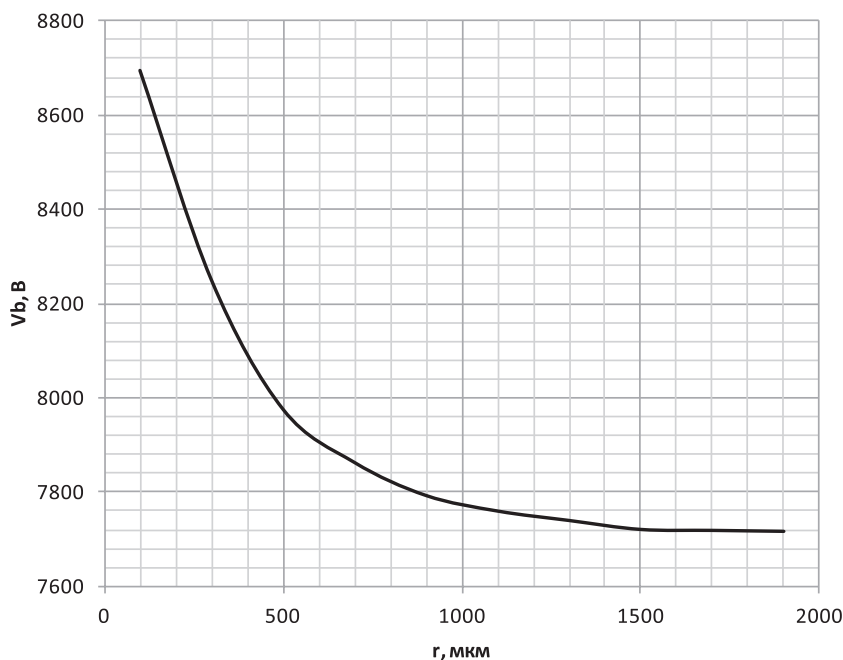


Рис. 5

Зависимость напряжения пробоя р⁺-n перехода от радиуса r N⁺-слоя из моделирования в Synopsys TCAD (ширина области пространственного заряда при пробое около 1000 мкм, радиус моделируемой структуры – 3000 мкм)

b в формулах для коэффициентов ударной ионизации электронов и дырок задавались в соответствии с [1]. Полученные зависимости $E_{crit}(R_p - X_m)$, $V_b(R_p - X_m)$ приведены на рис. 2 и 3 пунктирными линиями.

Погрешность аналитической модели при определении E_{crit} составляет менее 1 %. Погрешность аналитической модели напряжения пробоя не превышает 0,5 %. Из сравнения графических зависимостей следует высокое соответствие аналитической модели пробоя р⁺-n перехода с N⁺-слоем результатам моделирования в Synopsys TCAD, а, следовательно, и верность исходных положений в аналитической модели.

N⁺-слой, предназначенный для защиты тиристоров от перенапряжения, не распространяется на всю структуру, а занимает лишь небольшую центральную область структуры под первым вспомогательным тиристором с радиусом r . Этот радиус N⁺-слоя может быть соизмерим или даже меньше ширины области пространственного заряда р-n перехода при пробое. Из-за этого эффект экранировки N⁺-слоем электрического поля в центральной части структуры становится

слабее. Вследствие двумерного характера распределения поля наблюдается небольшое уменьшение наклона зависимости $E(x)$ в диапазоне x , находящихся дальше N⁺-слоя от металлургической границы (рис. 4). Это даёт увеличение площади фигуры под распределением поля, то есть увеличение напряжения пробоя структуры с уменьшением горизонтальных размеров N⁺-слоя.

Зависимость напряжения пробоя р⁺-n перехода от радиуса N⁺-слоя, полученная при квазитрёхмерном моделировании в цилиндрической системе координат в Synopsys TCAD, приведена на рис. 5.

Из рис. 5 следует, что когда радиус N⁺-слоя становится меньше ширины области пространственного заряда при пробое, напряжение пробоя р⁺-n перехода начинает существенно возрастать.

Выводы

1. Введение N⁺-слоя с повышенной концентрацией примеси в р-n переход приводит к уменьшению напряжения пробоя, и величина этого уменьшения в первом приближении пропорциональна дозе легирующей примеси в

N'-слое и расстоянию от N'-слоя до границы области пространственного заряда при пробое.

2. Существует определённое положение N'-слоя в области пространственного заряда p-n перехода, при котором напряжение пробоя структуры минимально, и это положение находится в области ударной ионизации вблизи её края. Такое поведение объясняется ростом критической напряжённости электрического поля при пробое, когда N'-слой попадает в область ударной ионизации, вследствие сужения области ударной ионизации.

3. Снижение напряжения пробоя p-n перехода N'-слоем зависит не только от концентрации примеси в N'-слое, его толщины и положения относительно металлургической границы, но и от площади N'-слоя, если линейные размеры этого слоя становятся меньше ширины области пространственного заряда p-n перехода при пробое.

Литература

1. Semiconductor Power Devices, Physics, Characteristics, Reliability / Lutz J., Schlangenotto H., Scheuermann U. etc., Heidelberg, Springer, 2011, 538 p.
2. Пат. 2410795 Российская Федерация. Силовой полупроводниковый прибор с регулируемым напряжением переключения. – № 2009128410/28; заявл. 22.07.2009; опубл. 27.07.09, Бюл. № 3. – 11 с.
3. Klug N., Lutz J., Meijer J. B. N-type doping of silicon by proton implantation // Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference, Birmingham, 2011, pp. 1-7.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2-х книгах. Кн. 1: [пер. с англ.]. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
5. Грехов И. В., Сержкин Ю. Н. Лавинный пробой p-n перехода в полупроводниках. – Ленинград: Энергия, 1980. – 152 с.
6. Shields J. Breakdown in Silicon p-n Junctions // Journ. Electron. Control, 1959, vol. 6, pp. 132-148.
7. Chynoweth A. G. Ionization rates for electrons and holes in silicon // Phys. Rev., 1958, vol. 109, pp. 1537-1540.
8. Сержкин Ю. Н., Шестеркина А. А. Исследование области эффективной ионизации при лавинном пробое кремниевых p-n переходов // Естественно-технические исследования: теория, методы, практика: межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 3 – Саранск: Ковылк. тип., 2003. – С. 116-120.

References

1. Semiconductor Power Devices, Physics, Characteristics, Reliability / Lutz J., Schlangenotto H., Scheuermann U. etc., Heidelberg, Springer, 2011, 538 p.
2. Power semiconductor device with regulating switching voltage: patent 2410795 Russia № 2009128410/28; submitted 22.07.2009, published 27.07.2009, Bulletin № 3, 11 p.
3. Klug N., Lutz J., Meijer J. B. N-type doping of silicon by proton implantation // Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference, Birmingham, 2011, pp. 1-7.
4. Zi S. *Fizika poluprovodnikovyx priborov* [Physics of semiconductor devices]. Moscow, Mir Publ., 1984, Vol. 1, 456 p.
5. Grekhov I. V., Serezhkin Y. N. *Lavinnyy proboy p-n perekhoda v poluprovodnikakh* [Avalanche breakdown on p-n junction in semiconductors]. Leningrad, Energiya Publ., 1980, 152 p.
6. Shields J. Breakdown in Silicon p-n Junctions // Journ. Electron. Control, 1959, vol. 6, pp. 132-148.
7. Chynoweth A. G. Ionization rates for electrons and holes in silicon // Phys. Rev., 1958, vol. 109, pp. 1537-1540.
8. Serezhkin Y. N., Shesterkina A. A. Research on effective ionization region during the avalanche breakdown of silicon p-n junction. *Estestvenno-tekhnicheskie issledovaniya: teoriya, metody, praktika: mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Natural and technical research: theory, techniques, practice: inter-high-school collection of scientific papers], Saransk, Kovylyk. Printing, 2003, Vol. 3, pp. 116-120.