

КИРДЯШКИН Н. Н., ПАДЕРОВ В. П.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ ВКЛЮЧЕНИЯ
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТИРИСТОРОВ ОТ КОНСТРУКЦИИ
ВСТРОЕННОГО ДИОДА ВКЛЮЧЕНИЯ

Аннотация. Статья посвящена исследованию влияния конструкции диода включения на напряжение включения тиристорov с самозащитой от перенапряжения. Рассматриваются результаты физико-топологического моделирования.

Ключевые слова: высоковольтный тиристор, самозащита от перенапряжения, диод включения, моделирование напряжения включения.

KIRDYASHKIN N. N., PADEROV V. P.
SIMULATION OF DEPENDENCE OF SWITCHING VOLTAGE OF HIGH-VOLTAGE
THYRISTORS ON CONSTRUCTION OF BREAKOVER DIODE

Abstract. The article is devoted to the study of the influence of the breakover diode construction on the switching voltage of thyristors with self-protection against overvoltage. The results of a physical and topological simulation are provided.

Keywords: high-voltage thyristor, self-protection against overvoltage, breakover diode, turn-on voltage simulation.

Одним из способов создания тиристорov с самозащитой от перенапряжения является встраивание в центральную область прибора диода включения – ДВ (breakover diode – BOD) [1], как показано на рисунке 1. Данный диод имеет кривизну перехода в центральной части и тонкий p^+ -слой на периферии. Кривизна перехода имеет результатом возрастание максимальной напряженности электрического поля в области ДВ и дает регулируемое уменьшение напряжения пробоя ДВ ниже блокирующего напряжения пробоя тиристора в области фаски. Совместно с несколькими вспомогательными тиристорами и токоограничивающим резистором на слое p^+ -базы это гарантирует, что тиристор безопасно включается лавинным током диода включения, когда напряжение, приложенное к прибору, превышает напряжение пробоя диода включения.

В [2] показано, что напряжение включения тиристора может быть задано путем изменения радиуса центральной p -области с кривизной перехода (внутренний радиус тонкого p^+ -кольца слоя бора) и ширины слоя бора (рис. 1). Однако зависимости приведены в относительных единицах без указания параметров структуры и только при одной глубине перехода тонкого p^+ -слоя бора. Целью данной статьи является двумерное физико-

топологическое моделирование высоковольтной тиристорной структуры в системе Synopsys TCAD-10 [3; 4] и построение зависимости напряжения включения структуры при перенапряжении от внешнего радиуса ($R_{\text{внеш}}$) и глубины залегания (h) тонкого p^+ -слоя. Эта зависимость позволит сформулировать практические рекомендации по структуре ДВ для эффективной защиты тиристора от перенапряжения.

В качестве объекта моделирования была использована часть структуры типичного силового тиристора, рассчитанного на величину повторяющегося импульсного напряжения в закрытом состоянии $U_{\text{DRM}} = 6\,500\text{ В}$. При этом задавались электрофизические параметры структуры, соответствующие тиристору, рассчитанному на данное напряжение. Также было проведено моделирование той же структуры с фаской. Напряжение включения по фаске составило 7883 В. Чтобы создать структуру с самозащитой от перенапряжения, напряжение включения по центру должно быть меньше напряжения включения по фаске на 200–300 В. Для моделирования была создана двумерная структура, показанная на рисунке 1, где h – глубина залегания p^+ -слоя, $R_{\text{внут}}$ – внутренний радиус кольца, $R_{\text{внеш}}$ – внешний радиус кольца.

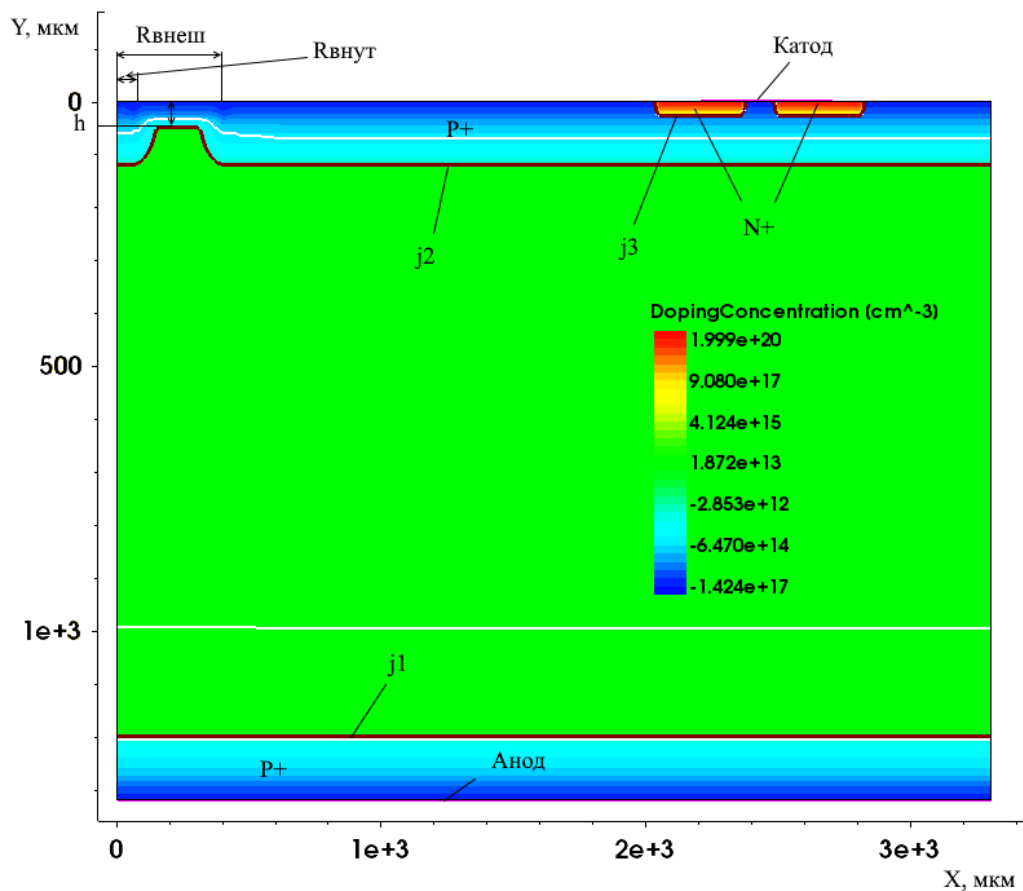


Рис. 1. Двумерная модель тиристорной структуры с диодом включения.

Моделирование структуры проводилось при глубине p^+ -кольца 10, 20, 30 и 40 мкм, а внутренний радиус оставался постоянным и составлял 60 мкм, внешний радиус менялся с 300 мкм до 1 000 мкм с шагом 100 мкм. На структуру подавался полусинусоидальный импульс напряжения амплитудой 10 кВ и длительностью 10 мс. В анодную цепь включался токоограничительный резистор 2,5 кОм. Структура моделировалась в цилиндрической системе координат. Для моделирования лавинного пробоя в модель Laskner, поскольку эта модель перекрывает диапазон критической напряженности поля от 10^5 до 10^6 В/см, максимальное время жизни носителей заряда задавалось равным 70 пс. Полученные зависимости изображены на рисунке 2.

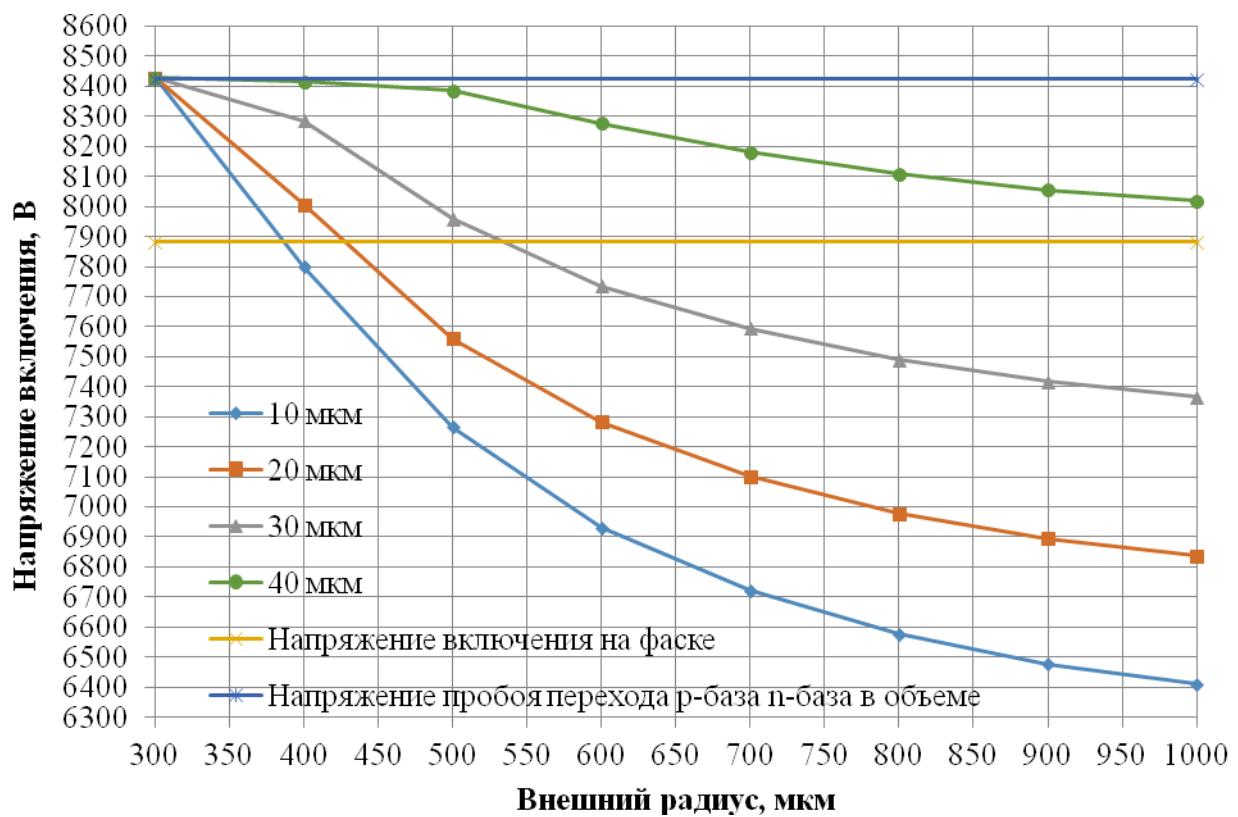


Рис. 2. Зависимость напряжения включения от внешнего радиуса ($R_{\text{внеш}}$) кольца, при внутреннем радиусе ($R_{\text{внут}}$) 60 мкм, глубине залегания p^+ -слоя (h) 10, 20, 30 и 40 мкм.

Из рисунка 2 можно сделать вывод, что при увеличении внешнего радиуса при глубине перехода бор-подложки (h) 10 мкм, напряжение включения уменьшается с 8424 В (при $R_{\text{внеш}} = 300$ мкм) до 6411 В (при $R_{\text{внеш}} = 1000$ мкм), при глубине 20 мкм с 8424 В (при $R_{\text{внеш}} = 300$ мкм) до 6837 В (при $R_{\text{внеш}} = 1000$ мкм), при глубине 30 мкм с 8424 В

(при $R_{\text{внеш}} = 300$ мкм) до 7366 В (при $R_{\text{внеш}} = 1000$ мкм) и при глубине 40 мкм с 8424 В (при $R_{\text{внеш}} = 300$ мкм) до 8018 В (при $R_{\text{внеш}} = 1000$ мкм). Для гарантированного включения прибора в центральной части структуры, внешний радиус, при глубине залегания p^+ -слоя (h) 10 мкм, должен быть больше 420 мкм – 450 мкм, при глубине залегания p^+ -слоя (h) 20 мкм, должен быть больше 470 мкм – 490 мкм и при глубине залегания p^+ -слоя (h) 30 мкм, должен быть больше 650 мкм – 700 мкм. При глубине залегания p^+ -слоя (h) 40 мкм структура будет включаться в области фаски, поскольку при внешнем радиусе 1000 мкм, напряжение включения в центральной области больше напряжения включения по фаске.

Из анализа полученных зависимостей можно сделать следующие выводы.

1. Напряжение включения структуры с ДВ уменьшается с увеличением внешнего радиуса кольца и уменьшением глубины залегания p^+ -слоя.
2. Внешний радиус кольца не рационально увеличивать больше, чем на ширину области пространственного заряда перехода j_2 при пробое.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 5455434 США, МПК Н 01 L 29 / 743, Thyristor with breakdown region / F. Pfirsch; заявитель и правообладатель Siemens Aktiengesellschaft – № 19930059492; заявл. 10.05.1993; опубл. 03.10.1995. – 5 с.
2. Niedernostheide F. -J., Schulze H.-J., Kellner-Werdehausen U., Dorn J., Westerholt D. Light-Triggered Thyristors with Integrated Protection Functions // Power Semiconductor Devices and ICs. – 2000. – Vol. 12. – P. 267–270.
3. Sentaurus Structure Editor User Guide. Synopsis TCAD Release 10.0., 2017. – 880 p.
4. Sentaurus Device User Guide. Synopsis TCAD Release 10.0, 2017. – 1546 p.