

ГОРЯЧКИН Ю. В., БЕСПАЛОВ Н. Н., КОКУЛОВ С. Г.
ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВКЛЮЧЕННОГО
СОСТОЯНИЯ ОТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТИРИСТОРА

Аннотация. В статье рассматриваются результаты исследования зависимостей линейной скорости распространения включенного состояния от плотности тока в открытом состоянии тиристоров при вариации величин их геометрических параметров. Исследования проведены на основе моделирования процесса включения тиристоров в программной среде Synopsys TCAD. Приводятся аппроксимационные зависимости скорости распространения включенного состояния от геометрических параметров тиристора.

Ключевые слова: тиристор, управляющий электрод, скорость распространения включенного состояния, плотность тока, моделирование, диаметр шунтов, расстояние между шунтами.

GORYACHKIN YU. V., BESPALOV N. N., KOKULOV S. G.
DEPENDENCES OF ON-STATE PROPAGATION VELOCITY
ON THYRISTOR GEOMETRIC PARAMETERS

Abstract. The article considers the study results of on-state linear propagation velocity dependences on current density in open thyristors by varying the values of their geometric parameters. The study was carried out on the basis of modelling of thyristor turn-on in Synopsys TCAD software environment. The approximation dependences of on-state propagation velocity on thyristor geometric parameters are presented.

Keywords: thyristor, control electrode, on-state propagation velocity, current density, modelling, shunt diameter, distance between shunts.

Введение. Линейная скорость распространения включенного состояния (РВС) v в тиристорной структуре (ТС) зависит от величин ее электрофизических параметров, геометрических параметров (параметров встроенных шунтов) и плотности тока в открытом состоянии j_T и является переменной величиной во времени и пространстве. Зависимость скорости РВС от плотности тока $v(j_T)$ обычно описывают степенной или, соответственно, логарифмической эмпирическими зависимостями [1–4]:

$$v(j_T) = A j_T^{1/n}, \quad (1)$$

$$v(j_T) = C_1 \ln j_T + C_2, \quad (2)$$

где A , n , C_1 и C_2 – константы. Эти зависимости получены экспериментальным путем на конкретных опытных образцах ТС. Причем из всех этих констант приводятся значения только константы n и в очень широком диапазоне: от 2 до 6 [1; 3].

Что касается влияния геометрических параметров – диаметра шунтов и плотности шунтировки на скорость РВС, то в литературе подобных эмпирических зависимостей не приводится. Поэтому целью работы было определение данных зависимостей.

Разработка модели тиристора и моделирование. В работе для решения данной задачи использовалось компьютерное моделирование процессов в ТС на основе пакета программ приборно-технологического моделирования Synopsys TCAD.

Современные тиристоры имеют разветвленный управляющий электрод (УЭ) достаточно сложной конструкции. Промоделировать процессы, протекающие в таком тиристоре, не представляется возможным. Однако из топологии ТС можно выделить трехмерную элементарную ячейку, с помощью которой можно исследовать процесс РВС. Принцип выделения такой ячейки из топологии ТС для моделирования описан в [5; 6].

В качестве объекта моделирования была использована ТС типичного быстродействующего импульсного силового тиристора, рассчитанного на величину повторяющегося напряжения в закрытом состоянии $U_{DM} = 2\,000$ В. При этом задавались следующие электрофизические и геометрические параметры ТС: удельное сопротивление n -базы $\rho_n = 80$ Ом·см; толщина n -базы $W_n = 280$ мкм; время жизни дырок в n -базе $\tau_p = 4$ мкс; диаметр шунтов $D_{ш} = 200$ мкм; расстояние между шунтами $L_{ш-ш} = 800$ мкм.

Разработанная модель учитывает эффекты высокого уровня инжекции (электронно-дырочное рассеяние и Оже-рекомбинацию), влияние концентрации легирующей примеси на электрофизические параметры полупроводниковой структуры (подвижность, время жизни неравновесных носителей заряда, собственную концентрацию свободных носителей заряда) и эффекты, связанные с неоднородным по объему тепловым разогревом структуры под действием протекающих токов. Подробное описание этих эффектов приведено в [7].

Моделировались процессы в ТС при включении по цепи управления в резистивно-индуктивной силовой цепи, питаемой от источника постоянного напряжения $U_0 = 2000$ В. Индуктивность силовой цепи выбиралась такой, чтобы время нарастания тока в открытом состоянии было порядка 10 мкс. Амплитуда тока в открытом состоянии регулировалась величиной активного резистора силовой цепи.

В результате моделирования были получены распределения плотности тока по моделируемой элементарной ячейке ТС в заданные моменты времени относительно подачи импульса управления на УЭ, на основании которых были определены зависимости $v(j_T)$ при различных значениях геометрических параметров ТС.

На рисунке 1 показаны графики зависимости $v(j_T)$ при изменении диаметра шунтов $D_{ш}$, на рисунке 2 показаны графики зависимости $v(j_T)$ при изменении расстояния между шунтами $L_{ш-ш}$.

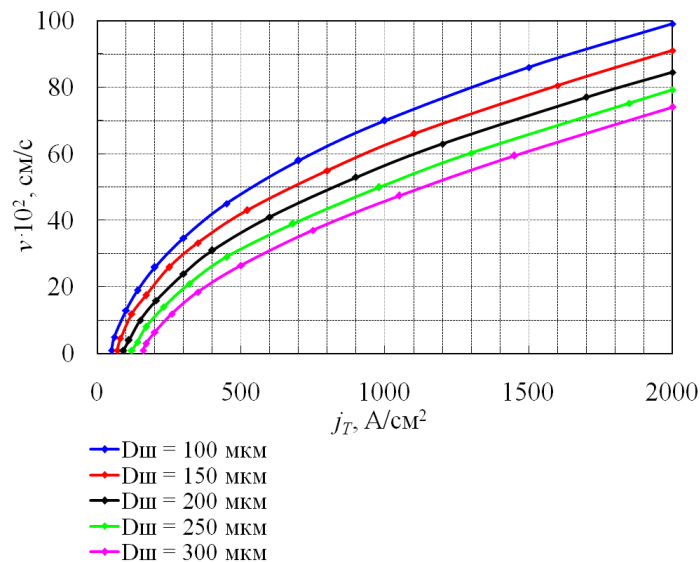


Рис. 1. Графики зависимостей $v(j_T)$ для различных значений $D_{ш}$.

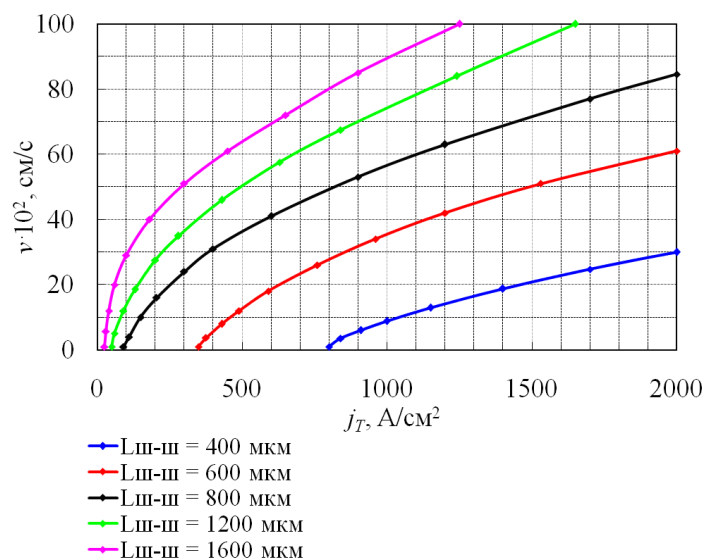


Рис. 2. Графики зависимостей $v(j_T)$ для различных значений $L_{ш-ш}$.

Далее были построены графики зависимости скорости РВС от диаметра шунтов $v(D_{ш})$ и расстояния между шунтами $v(L_{ш-ш})$ при значениях плотности тока 200 А/см² и 1 000 А/см². На рисунке 3 показаны графики зависимости скорости РВС от диаметра шунтов.

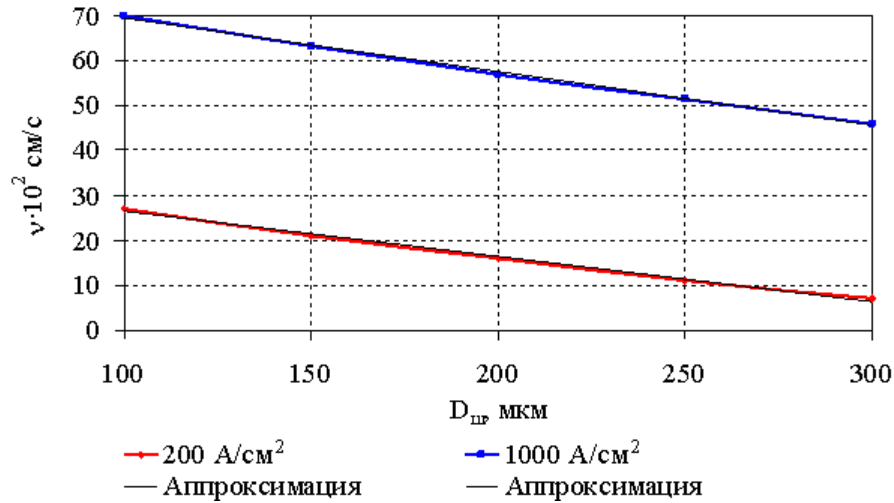


Рис. 3. Графики зависимости скорости РВС от диаметра шунтов при значениях плотности тока 200 А/см² и 1 000 А/см².

Как видно из рисунка, эти графики достаточно хорошо аппроксимируются линейной зависимостью $v(D_{ш}) = C_1 D_{ш} + C_2$ со следующими значениями коэффициентов:

$$C_1 = -10 \text{ с}^{-1}, C_2 = 3\,640 \text{ см/с} \quad \text{при } j_T = 200 \text{ А/см}^2;$$

$$C_1 = -12 \text{ с}^{-1}, C_2 = 8\,152 \text{ см/с} \quad \text{при } j_T = 1\,000 \text{ А/см}^2.$$

На рисунке 4 показаны графики зависимости скорости РВС от расстояния между шунтами.

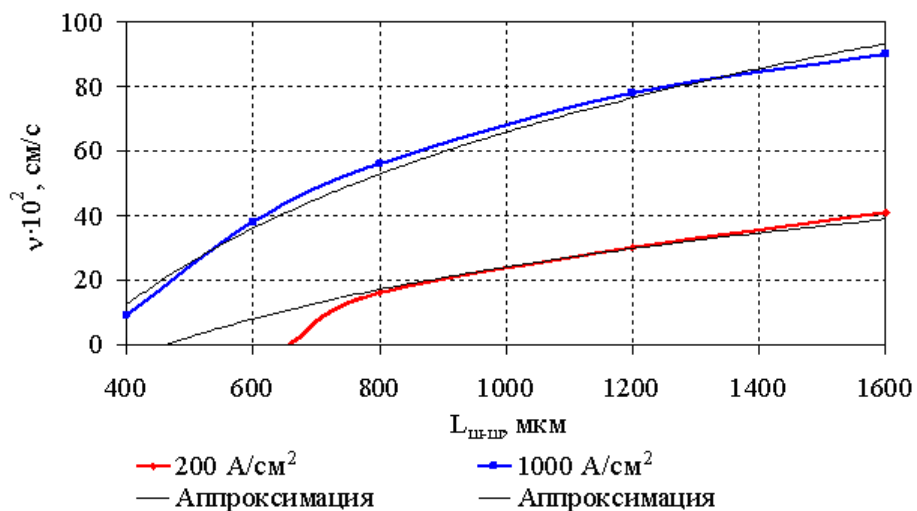


Рис. 4. Графики зависимости скорости РВС от расстояния между шунтами при значениях плотности тока 200 А/см² и 1 000 А/см².

Эти графики лучше всего аппроксимируются логарифмической зависимостью $v(L_{u-u}) = C_1 \ln L_{u-u} + C_2$ со следующими значениями коэффициентов:

$$C_1 = 3\,141 \text{ см}/(\text{с} \cdot \ln(\text{см})), C_2 = -19\,294 \text{ см}/\text{с} \quad \text{при } j_T = 200 \text{ А}/\text{см}^2;$$

$$C_1 = 5\,845 \text{ см}/(\text{с} \cdot \ln(\text{см})), C_2 = -33\,793 \text{ см}/\text{с} \quad \text{при } j_T = 1\,000 \text{ А}/\text{см}^2.$$

Однако, как видно из сравнения рисунков 3 и 4, погрешность аппроксимации для графиков зависимости скорости РВС от расстояния между шунтами гораздо больше, чем погрешность аппроксимации для графиков зависимости скорости РВС от диаметра шунтов, особенно для значения $j_T = 200 \text{ А}/\text{см}^2$ в диапазоне значений диаметра шунтов от 400 до 800 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович М. И. Бабайлов В. М., Либер В. Е. и др. Диоды и тиристоры в преобразовательных установках. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 432 с.
2. Блихер А. Физика тиристоров. – Л.: Энергоиздат, 1991. – 264 с.
3. Герлах В. Тиристоры. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 328 с.
4. Тейлор П. Расчет и проектирование тиристоров. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.
5. Беспалов Н. Н., Горячкин Ю. В., Ильин М. В. Определение линейной скорости распространения включенного состояния в тиристоре // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 6. – С. 80–83.
6. Горячкин Ю. В., Хайбулин Р. Р. Моделирование заряда обратного восстановления тиристора [Электронный ресурс] // Огарев-online. Раздел "Технические науки". – 2014. – № 22. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/modelirovanie-zaryada-obratnogo-vosstanovleniya-tiristora>.
7. Горячкин Ю. В. Нестеров С. А., Сурин Б. П. Физико-топологическое моделирование в САПР TCAD. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2006. – 124 с.