

Тонкие пленки диоксида ванадия для применения в СВЧ-ключачах с электрическим управлением

И. Д. Неустроев, Т. К. Легкова, А. А. Цымбалюк, А. Е. Комлев✉

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ aekomlev@etu.ru

Аннотация

Введение. Ввиду постоянно растущих требований к пропускной способности беспроводных систем связи все более востребованным становится применение перестраиваемых или коммутирующих устройств, выполненных на основе СВЧ-ключей. В настоящее время актуальным направлением является разработка СВЧ-ключей на основе нелинейных материалов, например диоксида ванадия. Ключи на основе данного материала имеют планарную конструкцию, которая вследствие своей простоты может быть широко востребована при создании СВЧ-устройств по гибридной технологии.

Цель работы. Исследование свойств тонких пленок диоксида ванадия и разработка конструкции СВЧ-ключа с электрическим переключением на их основе.

Материалы и методы. Экспериментальные образцы тонких пленок диоксида ванадия получены методом магнетронного распыления. Результаты экспериментального исследования параметров фазового перехода образцов материала были использованы при компьютерном моделировании планарной двухэлектродной структуры СВЧ-ключа методом конечных элементов.

Результаты. Изготовлены экспериментальные образцы пленок диоксида ванадия и исследованы зависимости их удельного сопротивления от температуры. Показано, что у полученных пленок изменение сопротивления достигает трех порядков. Разработана конструкция ключа на основе пленок диоксида ванадия. Проведено моделирование формирования токопроводящего канала в пленках диоксида ванадия при подаче управляющего напряжения. Получены оценки порогового напряжения элемента в зависимости от его конструктивных параметров.

Заключение. Использование экспериментальных данных как основы для компьютерного моделирования позволило определить пороговые значения токов, зависящих от топологии и конструкции СВЧ-ключа. Результаты моделирования структуры СВЧ-ключа показали, что сформированный токопроводящий канал имеет четко выраженные границы как по распределению плотности тока, так и по распределению температуры на поверхности пленки.

Ключевые слова: диоксид ванадия, фазовый переход, компьютерное моделирование, управляемые СВЧ-элементы

Для цитирования: Тонкие пленки диоксида ванадия для применения в СВЧ-ключачах с электрическим управлением / И. Д. Неустроев, Т. К. Легкова, А. А. Цымбалюк, А. Е. Комлев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 3. С. 48–57. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-48-57

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 22-29-01607.

Статья поступила в редакцию 28.11.2022; принята к публикации после рецензирования 24.04.2023; опубликована онлайн 29.06.2023

Thin Vanadium Dioxide Films for Use in Microwave Keys with Electric Control

Ilya D. Neustroev, Tatyana K. Legkova, Andrey A. Tsymbalyuk, Andrey E. Komlev✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ aekomlev@etu.ru

Abstract

Introduction. In view of the ever-tightening bandwidth requirements for wireless communication systems, the use of tunable or switching devices based on microwave keys is becoming increasingly popular. Currently, the development of microwave keys based on nonlinear materials, such as vanadium dioxide, is a relevant research direction. The keys based on this material are distinguished by a planar and simple design, thus being suitable for creating microwave devices using hybrid technology.

Aim. To study the properties of thin vanadium dioxide films and to develop a microwave switch with electrical switching on their basis.

Materials and methods. Experimental samples of thin vanadium dioxide films were obtained by magnetron sputtering. The phase transition parameters of the samples obtained experimentally were used in computer simulation of a planar two-electrode structure of a microwave key by the finite element method.

Results. Experimental samples of vanadium dioxide films were manufactured, and the dependences of their resistivity on temperature were studied. The resistance of the obtained vanadium dioxide films was found to change three-fold. A microwave key design based on vanadium dioxide films was developed. The formation of a current-conducting channel in vanadium dioxide films was simulated when a control voltage was applied. The threshold voltage of the element was estimated depending on its design parameters.

Conclusion. The use of experimental data as a basis for computer simulation made it possible to determine the threshold values of currents depending on the topology and design of the proposed microwave key. The results of simulating the key structure showed the formed conductive channel to have clearly defined boundaries in terms of distribution of both current density and temperature across the film surface.

Keywords: vanadium dioxide, phase transition, computer simulation, controlled microwave elements

For citation: Neustroev I. D., Legkova T. K., Tsymbalyuk A. A., Komlev A. E. Thin Vanadium Dioxide Films for Use in Microwave Keys with Electric Control. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 3, pp. 48–57. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-48-57

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgements. This work is supported by the Russian Science Foundation under grant № 22-29-01607.

Submitted 28.11.2022; accepted 24.04.2023; published online 29.06.2023

Введение. Последние десятилетия можно охарактеризовать активным ростом требований к увеличению пропускной способности беспроводных систем связи, влекущих за собой развитие новых стандартов связи [1–3]. Разработка и концептуальное развитие идеи сети пятого поколения (5G) значительно повысили внимание исследователей к развитию элементной базы с рабочими частотами значительно выше 10 ГГц, вплоть до миллиметровых волн [4–6]. Кроме того, из-за постоянно растущих требований к скорости беспроводной передачи данных все более востребован-

ными становятся широкополосные и сверхширокополосные устройства [7, 8], а также возрастает необходимость поддержки нескольких частотных диапазонов. Существующие решения телекоммуникационных архитектур основаны на различных схемах мультиплексирования каналов связи, что приводит к необходимости использования коммутирующих устройств. В СВЧ-диапазоне основой коммутирующего устройства можно считать СВЧ-ключи, широко используемые для настройки перестраиваемых антенн, усилителей и многополосных фильтров [9–11].

В настоящее время полупроводниковую технологию можно назвать одной из доминирующих технологий в радиочастотных переключателях. Например, технологии, основанные на комплементарной структуре металлооксид-полупроводник (КМОП) с использованием изолирующих подложек и низковольтных транзисторов со сложенными затворами, могут быть использованы для получения переключателей с низкими потерями и высокой мощностью [12]. Технология КМОП широко доступна, что делает ее привлекательной для производства радиочастотных переключателей и устройств на их основе. Однако ввиду ряда особенностей их широкое применение ограничивается нижней частью СВЧ-диапазона. Еще одним примером СВЧ-ключей на основе полупроводниковой технологии являются рпн-диоды. Их достоинства – высокая линейность и возможность коммутации большого уровня мощности. Для улучшения изоляции иногда используют несколько последовательно соединенных рпн-диодов, что негативно сказывается на вносимом затухании. К тому же схемы на рпн-диодах требуют больших токов управления, что делает их малоприменимыми для использования в портативных приборах [13]. Следующим примером СВЧ-ключей являются микроэлектромеханические элементы (МЭМ-ключи). Переключатель МЭМ – это миниатюрное устройство, которое за счет механического перемещения кантилевера обеспечивает токопроводящее (ON) или изолирующее (OFF) состояние линии передачи. Основные недостатки МЭМ-ключей – невысокая скорость переключения (1...100 мкс) и малая мощность (<2 Вт) [14–16].

Помимо отмеченных конструкций в научных работах рассматриваются варианты создания СВЧ-ключей на основе нелинейных материалов, которые могут быть лишены указанных недостатков. Одним из таких материалов является диоксид ванадия [17, 18]. Данный материал обладает фазовым переходом, сопровождающимся значительным изменением электрических и оптических свойств. В частности, изменение удельного сопротивления может достигать пяти порядков [19]. При этом переход из высокоомного (диэлектрического) состояния в

низкоомное (проводящее) возможен вследствие целого ряда воздействующих факторов: теплового, электрического, оптического, механического [18, 19]. В данной статье рассматривается вариант планарной конструкции ключа на основе тонких пленок диоксида ванадия с электрическим управлением. Представленная конструкция может быть использована при создании СВЧ-устройств по гибридной технологии. Рассмотрена топология электродов элемента, а также исследованы особенности формирования токопроводящего канала. Представленные результаты моделирования основаны на экспериментально полученных характеристиках изготовленных образцов пленок диоксида ванадия.

Материалы и методы. *Получение тонких пленок диоксида ванадия.* Для синтеза пленок диоксида ванадия использован метод реактивного магнетронного распыления металлической мишени на постоянном токе в смеси аргона и кислорода. Изменение параметров осаждения (в частности, массового расхода кислорода) позволяет гибко управлять фазовым и химическим составами покрытий, получая пленки заданного стехиометрического состава. Эксперименты проводились на модернизированной установке УВН-71, оснащенной плоским магнетроном с мишенью, изготовленной из ванадия (99.95 %), диаметром 115 мм. Пленки осаждали на подложки из сапфира R-среза в смеси газов при суммарном давлении 1.3 Па, постоянной плотности тока разряда 69 мА/см² и температуре подложки 600 °С.

Для определения параметров осаждения пленок VO₂ применялся метод оптической эмиссионной спектроскопии. Использовался спектрометр ISM3600, оптическая часть которого построена по схеме полихроматора с приемником излучения на основе прибора с зарядовой связью. Прибор предназначен для регистрации оптических спектров в диапазоне 250...1000 нм со спектральным разрешением в видимой части спектра не более 2.5 нм и имеет абсолютную ошибку измерения длины волны в видимой части спектра не более ±0.5 нм. Вывод оптического сигнала, генерируемого плазмой, из вакуумной камеры выполнен с помощью кварцевого моноволокна диаметром 0.4 мм. Обработка спектров проводилась в про-

граммной среде Aspect. Метод оптической эмиссионной спектроскопии позволяет по спектру испускания разряда определить элементный и ионный составы плазмы разряда и исследовать физические процессы и явления, происходящие при осаждении пленки, что значительно облегчает выбор основных параметров технологического цикла.

В таблице представлены выбранные для исследования эмиссионные линии газового разряда максимальной интенсивности, обладающие наибольшей информативностью. Римскими цифрами после названия элемента обозначена степень ионизации.

Эмиссионные линии элементов
Emission lines of elements

Линия	VI	VI	OI	ArI
Длина волны, нм	318.4	411.2	777.1	811.5

При снятии зависимостей напряжения от расхода реактивного газа и спектров испускания газового разряда в качестве независимых переменных была выбрана плотность тока разряда, составлявшая 69 мА/см^2 (напряжение на разряде при этом составило 425 В). Расход кислорода варьировался в пределах $0 \dots 4.5 \text{ см}^3/\text{мин}$.

Задачей проведенной серии экспериментов являлось определение границ режимов работы ванадиевой мишени при распылении в кислородосодержащей среде. Некоторые характерные результаты серии представлены на рис. 1. При фиксированной плотности тока на мишени были определены зависимости интенсивности линий аргона, кислорода и ванадия от расхода реактивного газа. Согласно результатам, полученным с помощью оптической эмиссионной спектроскопии, можно заключить, что поведе-

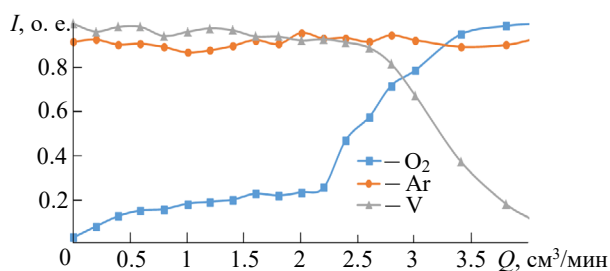


Рис. 1. Интенсивность спектральных линий

Fig. 1. Intensity of spectral lines

ние газового разряда при реактивном магнетронном распылении ванадия аналогично поведению при распылении других металлов переходной группы. Четко определяются границы режимов работы мишени: металлический, переходный и оксидный.

Процессы, происходящие в газовом разряде при реализации металлического режима, проявляются в диапазоне расхода реактивного газа $0 \dots 2.25 \text{ см}^3/\text{мин}$ для фиксированной плотности тока 69 мА/см^2 . При этом интенсивность линии металла в спектре не изменяется, а на поверхности подложки формируется металлическая пленка ванадия. Оксидный режим характеризуется практически полным исчезновением линии металла и выходом в максимальное насыщение линии кислорода. Характерной точкой перехода работы мишени в оксидный режим является расход кислорода $3.5 \text{ см}^3/\text{мин}$. По данным рентгенофазового анализа на поверхности подложки формируется пленка V_2O_5 . Наибольший практический интерес для синтеза пленок диоксида ванадия представляет переходный режим работы мишени при расходе кислорода $2.25 < Q < 3.5 \text{ см}^3/\text{мин}$. В промежуточном состоянии интенсивность линии VI стремительно снижается, а OI — продолжает возрастать.

Типичная рентгенограмма образцов пленок, осажденных в переходном режиме при плотности тока 69 мА/см^2 , расходе кислорода $2.75 \text{ см}^3/\text{мин}$ на подложку, изготовленную из сапфира R-среза, представлена на рис 2, а. В образце присутствует моноклинная фаза оксида ванадия VO_2 с ориентацией относительно плоскости (110) в области $2\theta = 28^\circ$. Как показано на рис. 2, б, дальнейшее увеличение массового расхода кислорода приводит к изменению преимущественной ориентации и формированию в пленке орторомбических фаз V_4O_9 и V_8O на фоне следов тетрагональной фазы VO_2 (021).

Для полученных экспериментально образцов тонких пленок диоксида ванадия измерялась удельная проводимость в зависимости от температуры. Измерения сопротивления проводились с помощью четырехзондового метода в условиях термостатирования образцов диоксида ванадия. Термостатирование обеспечивалось с помощью

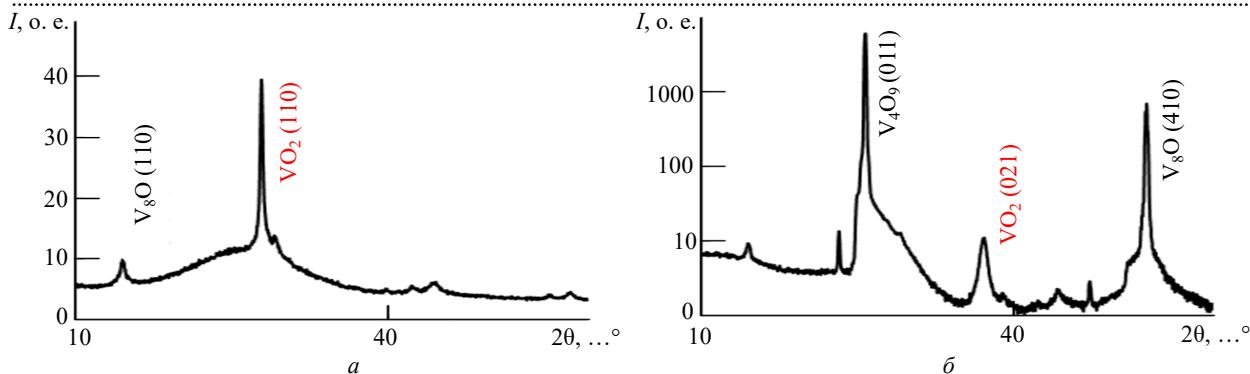


Рис. 2. Рентгенограммы образцов, изготовленных при расходе кислорода: а – 2.75 см³/мин; б – 3.5 см³/мин

Fig. 2. X-ray patterns of samples prepared at an oxygen consumption of: а – 2.75 cm³/min; б – 3.5 cm³/min

элементов Пельтье размерами 40 × 40 мм, температурного датчика РТ100 и программной реализации ПИД-регулятора. Колебания температуры после установления целевого значения не превышали ±0.1 К. Полученные зависимости представлены на рис. 3. Изготовленные образцы демонстрируют перестройку удельной проводимости более трех порядков при ширине гистерезиса ~4 К.

Моделирование. Для исследования процесса формирования токопроводящего канала в тонкой пленке диоксида ванадия было использовано компьютерное моделирование на основе метода конечных элементов (МКЭ) в программном пакете Comsol Multiphysics. Для моделирования структуры использовался мультифизический модуль Electromagnetic Heating (электромагнитный нагрев), в состав которого входили 2 физических модуля – Electric Currents (электрические токи) и Heat Transfer in Solids (телоперенос в твердых телах). Геометрия модели представлена на рис. 4. Модель для исследования процесса формирования токопроводящего

канала представляет собой пленку диоксида ванадия, нанесенную на подложку сапфира. Для подачи напряжения на пленке диоксида ванадия расположены металлические электроды (Cu) в форме треугольников со скругленной вершиной.

Скругление вершины металлического контакта в направлении формируемого канала необходимо для улучшения сходимости решения, получаемого в результате формирования расчетной сетки для МКЭ. В случае треугольной топологии электродов (без скругления вершины) острый угол вершины электрода в процессе формирования расчетной сетки приведет к неоправданно высокому значению напряженности электрического поля (в пределе стремящемуся к бесконечности) в окрестности данной вершины. Известно, что в процессе фотолитографии перенос рисунка топологии осуществляется с некоторой погрешностью, определяемой рядом факторов: разрешающей способностью и точностью оборудования, а также разрешающей способностью переноса рисунка

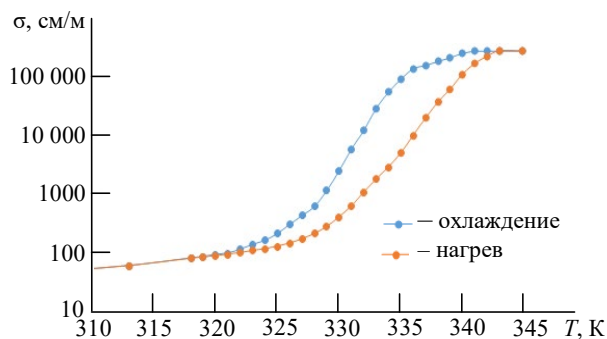


Рис. 3. Температурный гистерезис удельной проводимости экспериментальных образцов тонких пленок диоксида ванадия

Fig. 3. Thermal hysteresis of conductivity of experimental samples of thin vanadium dioxide films

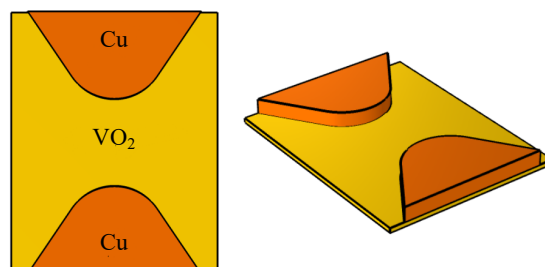


Рис. 4. Вид компьютерной модели для исследования процесса формирования токопроводящего канала в тонкой пленке диоксида ванадия

Fig. 4. A computer model for studying the formation of a conductive channel in a thin vanadium dioxide film

топологии при изготовлении фотошаблона. Таким образом, при изготовлении экспериментальных образцов вершины треугольных металлических электродов будут иметь скругление, радиус которого определяется топологией и выполнен в пределах точности оборудования либо определен пределом точности изготовления фотошаблонов. В рамках данного моделирования радиус скругления вершины треугольного электрода составлял 3 мкм, толщина электродов – 100 нм, а пленки диоксида ванадия – 200 нм. Материал и толщина подложки не учитывались, так как в процессе моделирования на нижней границе пленки диоксида ванадия задавалось условие термостатирования.

Длина формируемого токопроводящего канала, определяемая как наименьшее расстояние между ближайшими точками скругленных встречно-направленных вершин треугольных электродов, являлась переменной величиной, принимая значения из ряда: 5, 10, 20 мкм. При приложении разности потенциалов к электродам по пленке диоксида ванадия протекал ток, который разогревал диоксид ванадия до температуры фазового перехода. Таким образом, в данной статье учтен только джоулев нагрев структуры без учета влияния инжекции электронов из металлических электродов.

Результаты. Чтобы снизить электрическую мощность, необходимую для переключения состояния пленки VO_2 , целесообразным является термостатирование пленки (устройства на ее основе). Стоит заметить, что выбор точки термостатирования зависит от применения устройства и необходимости оптимизации энергопотребления, обуславливающего как фазовый переход пленки, так и собственно термостатирование. При температуре 320 К значения удельной проводимости ($\sim 100 \text{ См/м}$) различаются менее чем на 5 %, что может быть обусловлено погрешностью измерительного прибора. Дальнейшее моделирование проводилось в условиях термостатирования при данной температуре.

Экспериментально полученные зависимости удельной проводимости были использованы при моделировании процесса формирования токопроводящего канала. На рис. 5 представлены вольт-амперные характеристики, полученные в

результате моделирования нагрева и охлаждения элементов с различной длиной токопроводящего канала (5, 10, 20 мкм). Видно, что с ростом длины токопроводящего канала происходит увеличение порогового значения напряжения. Полученные значения пороговых напряжений составляют 23, 42 и 73 В при длинах токопроводящего канала 5, 10, 20 мкм соответственно, при пороговом токе 1.21 мА (точки 1–3 на рис. 5). Таким образом, использование экспериментально полученной температурной характеристики фазового перехода тонких пленок диоксида ванадия позволяет моделировать более сложные структуры на основе данных пленок.

Для оценки быстродействия элемента было проведено моделирование отклика на прямоугольный импульс тока амплитудой 1.4 мА и длительностью $\sim 50 \text{ нс}$. Результаты показали, что время образования токопроводящего канала составляет: $\sim 25 \text{ нс}$ при длине канала 5 мкм; $\sim 32 \text{ нс}$ при 10 мкм; 43 нс при 20 мкм. Так как фазовый переход пленки диоксида ванадия осуществляется за счет нагрева под действием тока, то время образования канала определяется количеством энергии, необходимым для нагрева пленки до температуры фазового перехода. Увеличение длины канала означает увеличение объема пленки, которую необходимо нагреть, что приводит к росту времени образования канала при неизменной амплитуде импульса тока. Время разрушения канала составляет $\sim 2 \text{ нс}$ независимо от длины канала, так как определяется, в основном, эффективностью теплоотвода от пленки диоксида ванадия.

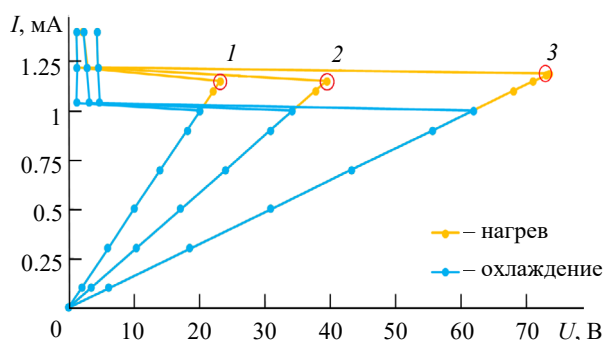


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика фазового перехода при различном расстоянии между электродами, полученная в результате моделирования

Fig. 5. Simulated current-voltage characteristic of the phase transition at different distances between the electrodes

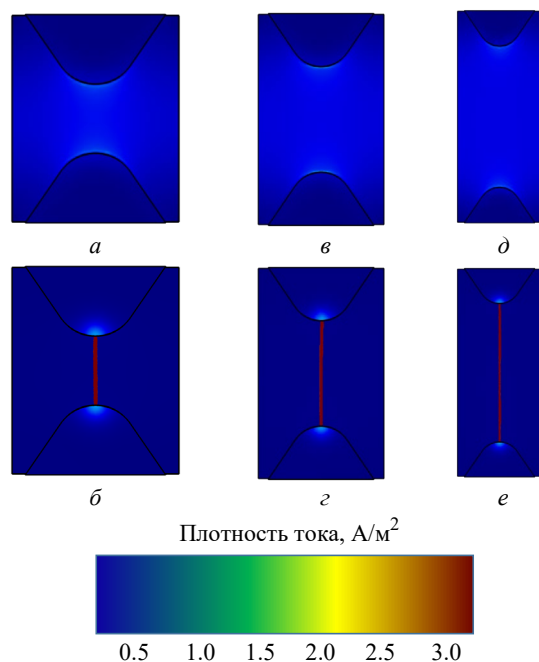


Рис. 6. Результаты моделирования процесса формирования токопроводящего канала при различном расстоянии между электродами: а, б – 5 мкм; в, г – 10 мкм; д, е – 20 мкм

Fig. 6. Simulation results of the formation of a conductive channel at different distances between the electrodes: а, б – 5 μm ; в, г – 10 μm ; д, е – 20 μm

На рис. 6 представлено распределение плотности тока по поверхности пленки при различном расстоянии между электродами. Можно заметить, что до фазового перехода (рис. 6, а, в, д) максимумы плотности тока наблюдаются в области контакта металлических электродов и пленки диоксида ванадия, по остальной поверхности ток распределен почти равномерно. При фазовом переходе (рис. 6, б, г, е) наблюдается формирование ярко выраженного токопроводящего канала с отчетливыми границами. Локальность образованного токопроводящего канала также заметна на распределении температуры по поверхности пленки (рис. 7).

Выводы. Показано, что численные эксперименты на основе компьютерного моделирования позволяют получить основные характеристики СВЧ-переключателя на базе тонких пленок диоксида ванадия. Рассмотрена планарная двухэлектродная конструкция переключателя, управляемого напряжением. Компьютерное моделирование фазового перехода и образования токопроводящего канала СВЧ-переключателя основано на экспериментально по-

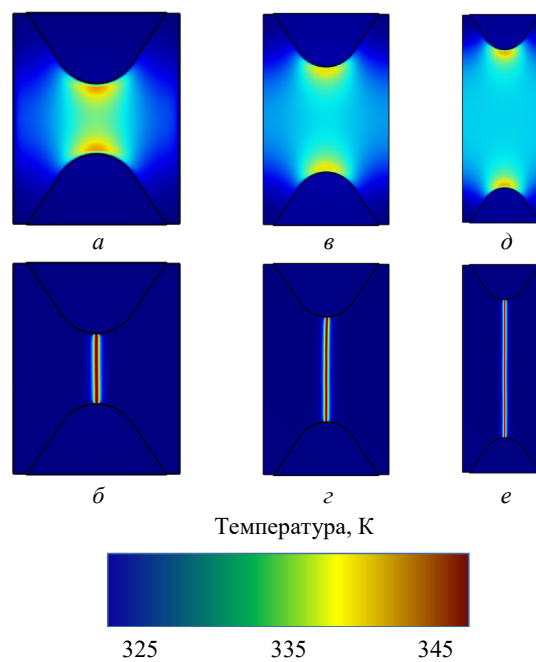


Рис. 7. Распределение температуры при формировании токопроводящего канала при различном расстоянии между электродами: а, б – 5 мкм; в, г – 10 мкм; д, е – 20 мкм

Fig. 7. Temperature distribution during the formation of a conductive channel at different distances between the electrodes: а, б – 5 μm ; в, г – 10 μm ; д, е – 20 μm

лученной температурной зависимости проводимости образцов диоксида ванадия. В результате моделирования была определена оптимальная температура термостатирования (323 K). Установлены значения порогового тока и напряжения на электродах ключа, при превышении которого образуется высокотемпературный токопроводящий канал. В зависимости от расстояния между управляющими электродами значения порогового напряжения составили 23, 42 и 73 В при длинах токопроводящего канала 5, 10, 20 мкм соответственно. Также получены вольт-амперные характеристики при различной длине токопроводящего канала. Результаты моделирования показали, что вольт-амперные характеристики имеют S-образный вид с выраженным гистерезисом. При этом время образования токопроводящего канала составило: ~25 нс при длине канала 5 мкм; ~32 нс при 10 мкм; 43 нс при 20 мкм. Исследование процесса формирования токопроводящего канала является первым шагом при проектировании управляемых СВЧ-элементов на основе тонких пленок диоксида ванадия.

Авторский вклад

Неустроев Илья Дмитриевич – изготовление экспериментальных образцов материала, компьютерное моделирование, написание текста статьи.

Легкова Татьяна Константиновна – обработка экспериментальных данных, компьютерное моделирование.

Цымбалюк Андрей Александрович – сборка и наладка оборудования для проведения температурных измерений, экспериментальное исследование пленок диоксида ванадия.

Комлев Андрей Евгеньевич – общее руководство исследованием, постановка задач, изготовление экспериментальных образцов материала, редактирование текста статьи.

Author's contribution

Ilya D. Neustroev, fabrication of experimental samples of the material, computer simulation, writing the text of the article.

Tatyana K. Legkova, processing of experimental data, computer simulation.

Andrey A. Tsymbalyuk, assembly and adjustment of equipment for temperature measurements, experimental study of vanadium dioxide films.

Andrey E. Komlev, general management of the study, setting tasks, making experimental samples of the material, editing the text of the article.

Список литературы

1. Al-Falahy N., Alani O. Y. Technologies for 5G Networks: Challenges and Opportunities // IT Professional. 2017. Vol. 19, № 1. P. 12–20. doi: 10.1109/MITP.2017.9
2. Solutions for urban traffic issues by ITS technologies / H. Makino, K. Tamada, K. Sakai, Sh. Kamijo // IATSS Research. 2018. Vol. 42, № 2. P. 49–60. doi: 10.1016/j.iatssr.2018.05.003
3. Hansen C. J. WiGiG: Multi-gigabit wireless communications in the 60 GHz band // IEEE Wireless Communications. 2011. Vol. 18, № 6. P. 6–7. doi: 10.1109/MWC.2011.6108325
4. A perspective on terahertz next-generation wireless communications / J. F. O'Hara, S. Ekin, W. Choi, I. Song // Technologies. 2019. Vol. 7, № 2. P. 43. doi: 10.3390/technologies7020043
5. Saad W., Bennis M., Chen M. A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies and Open Research Problems // IEEE Network. 2019. Vol. 34, № 3. P. 134–142.
6. Larson L. RF and microwave hardware challenges for future radio spectrum access // Proc. of the IEEE. 2014. Vol. 102, № 3. P. 321–333. doi: 10.1109/JPROC.2014.2298231
7. Kumar P., Pai M. M. M., Ali T. Ultrawideband antenna in wireless communication: A review and current state of the art // Telecommunications and Radio Engineering. 2020. Vol. 79, № 11. P. 929–942. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i11.20
8. Скакунов Р. С., Сорокин К. Н., Кудрявцева Ю. А. Обзор стандартов беспроводной связи и перспектив их развития // Технологии. Инновации. Связь. 2022. С. 267–271.
9. Монолитный СВЧ МЭМ переключатель до 25 ГГц / И. В. Кунилич, В. А. Кагадей, Д. Бобошко, Н. Д. Малютин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. Вып. 1, ч. 1. С. 19–20.
10. Reconfigurable Antennas: Switching Techniques – A survey / N. O. Parchin, H. J. Basherlou, Y. A. A. Al-Yasir, A. M. Abdulkhaleq, R. A. Abd-Alhameed // Electronics. 2020. Vol. 9, № 2. P. 336. doi: 10.3390/electronics9020336
11. Recent progress in the design of 4G/5G reconfigurable filters / Y. I. Al-Yasir, N. O. Parchin, R. Abd-Alhameed, A. M. Abdulkhaleq // Electronics. 2019. Vol. 8, № 1. P. 17. doi: 10.3390/electronics8010114
12. Meng F., Ma K., Yeo K. S. Microwave and Millimeter-Wave Switches // Low-Power Wireless Communication Circuits and Systems. New York: Jenny Stanford Publishing, 2018. P. 205–222.
13. Гримм Дж., Дмитриев С. КМОП-ключи от псс Electronics бросают вызов ключам на основе GaAs // Компоненты и технологии. 2006. № 54. С. 22–23.
14. RF MEMS switches, switching networks and phase shifters for microwave to millimeter wave applications / S. Dey, Sh. K. Koul, A. Poddar, U. L. Rohde // ISSS J. of Micro and Smart Systems. 2020. Vol. 9, № 11. P. 33–47. doi: 10.1007/s41683-020-00051-4
15. Tian W., Li P., Yuan L. X. Research and analysis of MEMS switches in different frequency bands // Micromachines. 2018. Vol. 9, № 4. P. 185. doi: 10.3390/mi9040185
16. Уваров И. В., Куприянов А. Н. Исследование характеристик МЭМС-переключателя электростатического типа с механизмом активного размыкания // Микроэлектроника. 2018. Т. 47, № 5. С. 30–37.
17. Ramsey J., Henderson K., Ghalichechian N. Thermally Actuated Vanadium Dioxide Millimeter Wave Reflectarray // 16th European Conf. on Antennas and Propagation, Madrid, Spain, 1 March – 1 April 2022. IEEE, 2022. P. 1–3. doi: 10.23919/EuCAP53622.2022.9768925

18. Vanadium dioxide for reconfigurable antennas and microwave devices: Enabling RF reconfigurability through smart materials / D. E. Anagnostou, D. Torres, T. S. Teeslink, N. Sepulveda // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2020. Vol. 62, № 3. P. 58–73. doi: 10.1109/MAP.2020.2964521

19. High quality vanadium dioxide films prepared by an inorganic sol-gel method / D. Yin, N. Xu, J. Zhang, X. Zheng // Materials Research Bulletin. 1996. Vol. 31, № 3. P. 335–340.

Информация об авторах

Неустроев Илья Дмитриевич – магистрант 2-го года Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – технология материалов электронной техники, свойства нелинейных материалов. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: neustroev.ilya@gmail.com

Легкова Татьяна Константиновна – аспирантка 2-го года кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – СВЧ-электроника, антенны, свойства нелинейных материалов. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: legkova_tk@mail.ru

Цымбалюк Андрей Александрович – аспирант 2-го года кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – технология материалов электронной техники, свойства нелинейных материалов. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: tsymbalyuk.andrej@yandex.ru

Комлев Андрей Евгеньевич – кандидат технических наук (2011), доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – технология материалов электронной техники, плазма. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: aekomlev@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1017-5587>

References

1. Al-Falahy N., Alani O. Y. Technologies for 5G Networks: Challenges and Opportunities. IT Professional. 2017, vol. 19, no. 1, pp. 12–20. doi: 10.1109/MITP.2017.9

2. Makino H., Tamada K., Sakai K., Kamijo Sh. Solutions for Urban Traffic Issues by ITS Technologies. IATSS Research. 2018, vol. 42, no. 2, p. 49–60. doi: 10.1016/j.iatssr.2018.05.003

3. Hansen C. J. WiGiG: Multi-gigabit Wireless Communications in the 60 GHz Band. IEEE Wireless Communications. 2011, vol. 18, no. 6, pp. 6–7. doi: 10.1109/MWC.2011.6108325

4. O'Hara J. F., Ekin S., Choi W., Song I. A Perspective on Terahertz Next-Generation Wireless Communications. Technologies. 2019, vol. 7, no. 2, p. 43. doi: 10.3390/technologies7020043

5. Saad W., Bennis M., Chen M. A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies and Open Research Problems. IEEE Network. 2019, vol. 34, no. 3, pp. 134–142.

6. Larson L. RF and Microwave Hardware Challenges for Future Radio Spectrum Access. Proc. of the IEEE. 2014, vol. 102, no. 3, pp. 321–333. doi: 10.1109/JPROC.2014.2298231

7. Kumar P., Pai M. M., Ali T. Ultrawideband Antenna in Wireless Communication: A Review and Current State of the Art. Telecommunications and Radio Engineering. 2020, vol. 79, no. 11, pp. 929–942. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i11.20

8. Skakunov R. S., Sorokin K. N., Kudryavtseva Yu. A. Overview of Wireless Communication Standards and Prospects for Their Development. Technologies. Innovation. Connection. 2022, pp. 267–271. (In Russ.)

9. Kunilich I. V., Kagadei V. A., Boboshko D., Mal'yutin N. D. Monolithic Microwave MEM Switch up to 25 GHz. Microwave Engineering and Telecommunication Technologies. 2020, iss. 1, pt. 1, pp. 19–20. (In Russ.)

10. Parchin N. O., Basherlou H. J., Al-Yasir Y. A. A., Abdulkhaleq A. M., Abd-Alhameed R. A. Reconfigura-

ble Antennas: Switching Techniques – A survey. Electronics. 2020, vol. 9, no. 2, p. 336. doi: 10.3390/electronics9020336

11. Al-Yasir Y. I., Parchin N. O., Abd-Alhameed R., Abdulkhaleq A. M. Recent Progress in the Design of 4G/5G Reconfigurable Filters. Electronics. 2019, vol. 8, no. 1, p. 17. doi: 10.3390/electronics8010114

12. Meng F., Ma K., Yeo K. S. Microwave and Millimeter-Wave Switches. Low-Power Wireless Communication Circuits and Systems. New York, Jenny Stanford Publishing, 2018, pp. 205–222.

13. Grimm J., Dmitriev S. CMOS Dongles from NEC Electronics Challenge GaAs-Based Dongles. *Komponenty i Tekhnologii* [Components and Technologies]. 2006, no. 54, pp. 22–23. (In Russ.)

14. Dey S., Koul Sh. K., Poddar A., Rohde U. L. RF MEMS switches, Switching Networks and Phase Shifters for Microwave to Millimeter Wave Applications. ISSS J. of Micro and Smart Systems. 2020, vol. 9, no. 11, pp. 33–47. doi: 10.1007/s41683-020-00051-4

15. Tian W., Li P., Yuan L. X. Research and Analysis of MEMS Switches in Different Frequency Bands.

Micromachines. 2018, vol. 9, no. 4, p. 185. doi: 10.3390/mi9040185

16. Uvarov I. V., Kupriyanov A. N. Investigation of the Characteristics of an Electrostatic-Type Mems Switch with an Active Opening Mechanism. Microelectronics. 2018, vol. 47, no. 5, pp. 30–37. (In Russ.)

17. Ramsey J., Henderson K., Ghalichechian N. Thermally Actuated Vanadium Dioxide Millimeter Wave Reflectarray. 16th European Conf. on Antennas and Propagation, Madrid, Spain, 1 March – 1 April 2022. IEEE, 2022, pp. 1–3. doi: 10.23919/EuCAP53622.2022.9768925

18. Anagnostou D. E., Torres D., Teeslink T. S., Sepulveda N. Vanadium Dioxide for Reconfigurable Antennas and Microwave Devices: Enabling RF Reconfigurability through Smart Materials. IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2020, vol. 62, no. 3, pp. 58–73. doi: 10.1109/MAP.2020.2964521

19. Yin D., Xu N., Zhang J., Zheng X. High Quality Vanadium Dioxide Films Prepared by an Inorganic Sol-Gel Method. Materials Research Bulletin. 1996, vol. 31, no. 3, pp. 335–340.

Information about the authors

Ilya D. Neustroev, student of the 2nd year of master of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 1 scientific publication. Area of expertise: technology of electronic materials, properties of non-linear materials. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: neustroev.ilya@gmail.com

Tatyana K. Legkova, Postgraduate Student of Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 2 scientific publications. Area of expertise: microwave electronics; antennas, properties of nonlinear materials. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: legkova_tk@mail.ru

Andrey A. Tsymbalyuk, Postgraduate Student of Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 2 scientific publications. Area of expertise: technology of electronic materials, properties of non-linear materials. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: tsymbalyuk.andrej@yandex.ru

Andrey E. Komlev, Cand. Sci. (Eng.) (2011), Associate Professor of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 60 scientific publications. Area of expertise: technology of electronic equipment materials, plasma. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia E-mail: aekomlev@etu.ru <https://orcid.org/0000-0003-1017-5587>