

На правах рукописи



Бортников Сергей Григорьевич

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ПРОТЕКАНИЯ
ТОКА В ПЛЕНКАХ ДИОКСИДА ВАНАДИЯ ВБЛИЗИ ФАЗОВОГО
ПЕРЕХОДА ПОЛУПРОВОДНИК-МЕТАЛЛ**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

Алиев Владимир Шакирович, кандидат химических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник

Официальные оппоненты:

Шадрин Евгений Борисович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией физики фазовых переходов в твердых телах, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Боярский Леонид Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физических методов исследования твердого тела, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петрозаводский государственный университет»

Защита состоится «14» июня 2016 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.037.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, д. 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук: http://www.isp.nsc.ru/comment.php?id_dissert=869

Автореферат разослан «29» апреля 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Погосов Артур Григорьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В настоящее время в микроэлектронике широко используются функциональные материалы, которые благодаря своим уникальным свойствам позволяют создать на их основе различные типы устройств: энергонезависимую память, термохромные оптические покрытия, датчики температуры, давления, потока газа и т.д. Поиск новых материалов, исследование их свойств и описание характеристик приборов на их основе являются одними из важнейших направлений современной физики. Разработка новых устройств, основанных на глубоком понимании процессов, происходящих в материале, выяснение механизмов ответственных за конкретные свойства материалов, а также явлений, происходящих в них, являются одними из главных задач физики конденсированного состояния.

Одними из интереснейших материалов с точки зрения их электрофизических и оптических свойств являются оксиды некоторых d-элементов, такие как NiO, CoO, оксиды ванадия и т.д. Такие материалы имеют частично заполненные электронами d-оболочки атомов и с точки зрения зонной теории являются металлами, однако, имеют запрещенную зону (Мотт-Хаббардовская щель) в электронном спектре и при определенных условиях, например при изменении давления или температуры, в них наблюдается фазовый переход полупроводник-металл (ФППМ).

В диоксиде ванадия (VO_2) при температуре около 341 К происходит ФППМ, сопровождаемый изменением электропроводности до 5 порядков (для монокристалла) и одновременным изменением симметрии кристалла с моноклинной на тетрагональную с уменьшением вдвое объема элементарной ячейки (переход Пайерлса). Долгое время считалось, что именно переход Пайерлса ответственен за ФППМ в VO_2 . Однако последние исследования показывают, что ФППМ в VO_2 может являться переходом Мотта, обусловленным межэлектронным взаимодействием, а структурный переход является вторичным явлением, сопровождающим электронный ФППМ. К настоящему времени известно, что ФППМ в VO_2 может быть инициирован различными способами: изменением температуры, приложением электрического поля, фотонной засветкой и механическим напряжением в материале [1-5].

В 2008 году были обнаружены автоколебания тока и напряжения в пленке VO_2 в электрической схеме, не содержащей каких-либо реактивных компонентов [6, 7]. Схема включала лишь источник постоянного напряжения, поликристаллическую пленку VO_2 и последовательное ей сопротивление. Автоколебания заключались в периодическом, с частотой до 1 МГц, изменении значений напряжения и тока, проходящего через пленку VO_2 . В настоящее время предполагается, что при автоколебаниях вся по объему пленка VO_2 поочередно переходит из полупроводникового состояния в металлическое, а переключение из одного состояния в другое происходит под действием электрического поля по механизму Мотта без существенного изменения температуры пленки. В рамках этой модели трудно объяснить, почему электрическое сопротивление пленки VO_2 при автоколебаниях изменяется не более чем на 1-2 порядка, в то время как

электрическое сопротивление полупроводникового состояния отличается от такового в металлическом состоянии на 2-3 порядка. Также непонятна причина, вызывающая обратный переход металл-полупроводник – для этого в модель привлекается некоторая искусственная возвращающая сила (restoring force) [6, 8]. Предполагая, что ФППМ в VO_2 на частотах ~ 1 МГц вызван не нагревом материала протекающим током до температуры структурного фазового перехода (341 К) и последующим остыванием, тепловыми процессами в пленке VO_2 при рассмотрении автоколебаний тока обычно пренебрегают, и их роль в настоящее время остается невыясненной. Несмотря на неясность механизмов ответственных за автоколебания тока в VO_2 , на основе этого явления уже создаются модуляторы электрического сигнала и электрические переключатели [9]. Автоколебания тока в VO_2 наблюдаются и в планарных микроструктурах, и в сэндвич-структурах, что позволяет создавать массивы VO_2 -осцилляторов с высокой плотностью и применять их как в микроконтроллерах для задания тактовой частоты, так и в качестве быстродействующих инверторов [10].

Известно также, что VO_2 нашел практическое применение для создания устройств детектирования и визуализации инфракрасного (ИК-) и терагерцового (ТГц-) излучения в качестве чувствительного слоя микроболометрических матриц [11, 12]. Способность детектора обнаруживать слабые сигналы характеризуется не только его чувствительностью, но и уровнем собственных шумов, или соотношением сигнал-шум на входе (SNR_{in}) и выходе (SNR_{out}) детектора. В обычном детекторе $\text{SNR}_{\text{out}} < \text{SNR}_{\text{in}}$, поскольку сам детектор приносит шум в систему регистрации. На основе явления стохастического резонанса (СР) в нелинейной системе [13] можно создать «супер» детектор, для которого $\text{SNR}_{\text{out}} > \text{SNR}_{\text{in}}$ [14]. Явлению СР в нелинейной системе с пленкой VO_2 посвящено лишь несколько работ [15, 16], и в настоящее время это явление остается практически неизученным.

Цель и задачи работы

Целью работы было выяснение механизмов, ответственных за автоколебания тока и стохастический резонанс в поликристаллических пленках VO_2 . Работа заключалась в решении следующих задач:

1. Исследование температурного поля пленки VO_2 при автоколебаниях тока и выяснение роли тепловых процессов.
2. Измерение температурной зависимости электрической емкости планарных микроструктур с пленкой VO_2 в температурном диапазоне, включающем фазовый переход полупроводник-металл.
3. Выяснение основных закономерностей стохастического резонанса, определение коэффициента передачи отношения сигнал-шум, а также влияние состава пленок на характеристики стохастического резонанса.

Научная новизна работы

В результате исследования были получены новые экспериментальные результаты по автоколебаниям тока и стохастическому резонансу. На основе полученных результатов предложены модели этих явлений.

1. Впервые исследовано температурное поле микроструктуры с пленкой VO_2 при автоколебаниях тока и напряжения. Установлено, что автоколебания сопровождаются образованием и диссипацией узкого разогретого проводящего канала в пленке – явление *пространственно-временной нестабильности протекания тока* в пленке VO_2 . При автоколебаниях температура в канале превышает 390 К, что существенно превосходит температуру структурного фазового перехода Пайерлса в VO_2 (341 К).

2. Впервые проведены измерения электрической емкости планарных микроструктур с пленкой VO_2 , которые показали, что при нагреве до температуры структурного фазового перехода полупроводник-металл электрическая емкость пленки может возрасти на 5 порядков, что не учитывалось в предыдущих моделях автоколебаний тока.

3. Предложена тепловая модель автоколебаний тока в VO_2 , основанная на джоулевом разогреве пленки VO_2 и шнуровании тока в пленке. Положительную обратную связь в модели осуществляет электрическая емкость пленки VO_2 , аномально возрастающая вблизи температуры структурного фазового перехода полупроводник-металл в VO_2 .

4. Впервые исследовано явление стохастического резонанса в планарных микроструктурах с поликристаллическими пленками VO_2 и V_6O_{13} с VO_2 -каналом, и предложена тепловая модель стохастического резонанса в VO_2 .

Научная и практическая значимость работы

Большой практический интерес вызывает способность ФППМ в VO_2 происходить за сверхкороткие времена (100 фс), а также близость температуры ФППМ к комнатной. В настоящее время интерес к ФППМ в VO_2 сместился от чисто научного к инженерному: на его основе создаются модуляторы излучения [17], смарт-стекла [18], электрические переключатели [9], гибридные метаматериалы [19, 20], устройства хранения данных [21, 22].

На основе полученных экспериментальных результатов в настоящей работе решена актуальная и практически значимая задача для развития физики конденсированного состояния – создана модель, описывающая автоколебания тока в VO_2 , способная объяснить шнурование тока и высокую температуру в образующемся узком проводящем канале в пленке при автоколебаниях. Возможность возбуждения автоколебаний тока в пленках VO_2 позволяет инициировать ФППМ без использования высокочастотных генераторов, при этом частотой автоколебаний можно управлять величиной напряжения/тока через пленку. В результате исследования были получены доказательства первостепенной роли тепловых процессов ответственных за ФППМ при автоколебаниях тока в пленках

VO_2 , и обнаружен аномальный рост электрической емкости пленки вблизи ФППМ. В работе также исследовано явление стохастического резонанса (СР) в пленках VO_2 , и предложена тепловая модель этого явления. Получены результаты по исследованию СР для пленки VO_2 и пленки V_6O_{13} с узким VO_2 -каналом. Помимо того, что СР в VO_2 позволяет выделить и усилить слабый сигнал на фоне шума и помех, это явление способно также обеспечить скрытность передачи информации.

Положения, выносимые на защиту

1. Автоколебания тока в поликристаллических пленках VO_2 сопровождаются обратимыми процессами образования и исчезновения узкого проводящего канала в пленке, разогретого выше температуры структурного фазового перехода полупроводник-металл (перехода Пайерлса).
2. Электрическая емкость поликристаллической пленки VO_2 в планарной микроструктуре в области температур вблизи фазового перехода полупроводник-металл испытывает аномальный рост. Положительная обратная связь при автоколебаниях тока осуществляется за счет электрической емкости пленки VO_2 вблизи температуры фазового перехода полупроводник-металл.
3. В микроструктурах с пленками VO_2 явление стохастического резонанса обусловлено тепловыми процессами в пленке.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 4 статьи в рецензируемых журналах и 9 тезисов докладов в сборниках трудов российских конференций.

Достоверность и надежность представленных результатов обеспечивается использованием современных методов экспериментального исследования, воспроизводимостью результатов и применением апробированных моделей для расчета электрофизических характеристик.

Личный вклад соискателя заключался в участии в синтезе поликристаллических пленок VO_2 , проведении электрофизических измерений, выполнении численных расчетов, написании научных статей.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и выводов. Объем диссертации составляет 109 страниц, включая 52 рисунка. Список цитированной литературы содержит 88 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определяются исследуемые электрические явления в VO_2 – автоколебания тока и стохастический резонанс, указывается актуальность работы,

сформулированы цель и задачи работы, изложены основные защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены существующие в научной литературе представления о физической природе ФППМ в VO_2 : структурный переход Пайерлса и электронный переход Мотта. Представлены основные методы синтеза пленок VO_2 . Рассмотрены механизмы автоколебаний тока и стохастического резонанса в VO_2 , как эти явления к настоящему времени отражены в литературе. Рассмотрены недостатки существующих моделей этих явлений. Сформулированы основные задачи настоящей работы. Впервые предложено исследование температурного поля VO_2 -пленки при автоколебаниях тока методом ИК-микроскопии для выяснения роли тепловых процессов при автоколебаниях тока.

Во второй главе описан метод ионно-лучевого синтеза поликристаллических пленок оксидов ванадия, и приведены результаты по структурной характеристике полученных пленок методами дифракции быстрых электронов (ДБЭ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ).

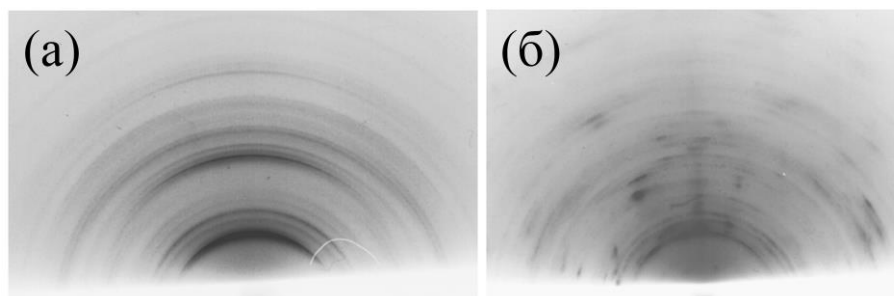


Рисунок 1. Электронограммы ДБЭ на отражение для поликристаллических пленок VO_2 , выращенных на подложках $\text{Si}(100)/\text{SiO}_2$ (а) и сапфира (0001) (б) при одинаковых условиях ($T_{\text{роста}}=813 \text{ K}$).

Дифракционные исследования показали, что пленки, выращенные на сапфире (0001) и $\text{Si}(100)/\text{SiO}_2$ при температуре подложки выше 800 К состоят из одной VO_2 фазы (Рис. 1). При температурах подложки 700 – 800 К растут поликристаллические пленки оксидов ванадия смешанного состава с преимущественным содержанием V_6O_{13} . Приведена методика приготовления планарных микроструктур подложка/ $\text{VO}_x/\text{Ni}/\text{Au}$ с различной шириной межэлектродного зазора (3 – 56 мкм) на подложках $\text{Si}(100)/\text{SiO}_2$ и сапфира (0001) для электрофизических измерений (Рис. 2).

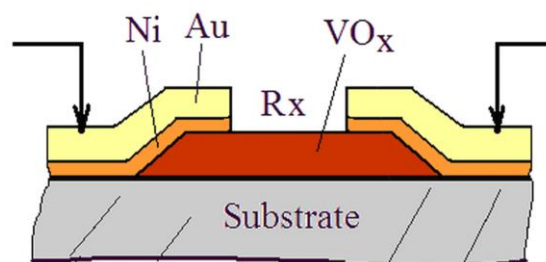


Рисунок 2. Схематическое изображение сечения планарной $Au/Ni/VO_x/Ni/Au$ микроструктуры. R_x – сопротивление VO_x -пленки.

На вольт-амперных характеристиках (ВАХ) микроструктур с пленкой VO_2 (Рис. 3) имеются высокоомная ветвь ВАХ, низкоомная ветвь и область отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС). Можно предположить, что изменение сопротивления микроструктур связано с ФППМ в VO_2 . Однако при перескоке с высокоомной ветви на низкоомную сопротивление микроструктур изменялось не более чем в 50 раз, хотя при нагреве микроструктур коэффициент изменения сопротивления превышал 3 порядка. Это могло свидетельствовать о локальном разогреве VO_2 -пленки при пропускании через нее электрического тока, возникновении локального ФППМ и локальном протекании тока по металлической фазе, в то время как остальная часть пленки оставалась в полупроводниковой фазе (пространственная неравномерность протекания тока). Неравномерный разогрев пленки током и возникновение узкого проводящего канала в пленке позволяют объяснить не столь значительное изменение сопротивления микроструктуры при перескоке на ВАХ, что являлось затруднением для сторонников «voltage-triggered» модели – полевой модели нетеплового переключения сопротивления в VO_2 [8, 23]. Исследованию температурного поля VO_2 -пленки при ФППМ, вызванном протеканием электрического тока, посвящен один из пунктов третьей главы.

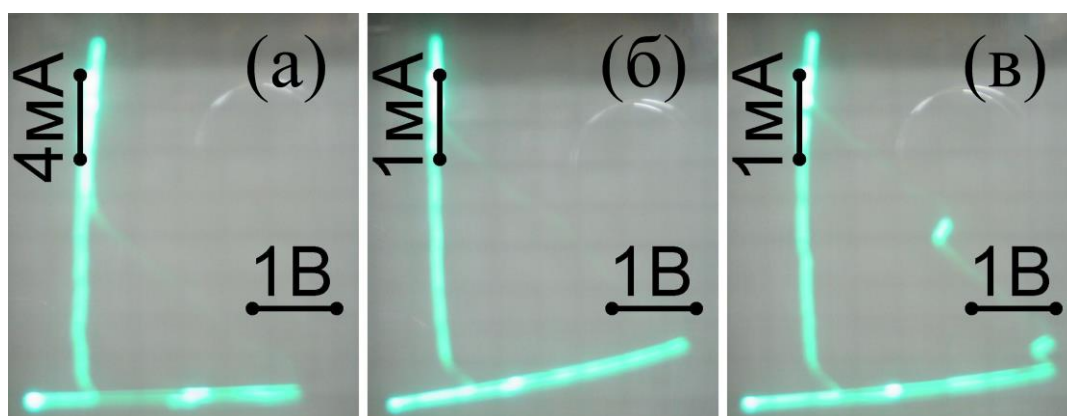


Рисунок 3. ВАХ микроструктуры с пленкой VO_2 на сапфире при комнатной температуре, полученные на характеристикографе с ограничивающим сопротивлением $R_{огр}$: (а) – $R_{огр}=250 \Omega$, (б) – $R_{огр}=1 \kappa\Omega$, (в) – ступенчатые перескоки на ВАХ ($R_{огр}=1 \kappa\Omega$).

Микроструктуры с пленкой V_6O_{13} с целью локального изменения состава с V_6O_{13} на VO_2 были подвергнуты операции электроформовки электрическим током, которая заключалась в кратковременной (~ 10 мс) подаче на микроструктуру напряжения с напряженностью электрического поля $\sim 7 \times 10^5$ В/см. В результате в межэлектродном зазоре микроструктуры формировался канал шириной ~ 2 мкм, визуализированный методом АСМ. ВАХ микроструктур после электроформовки были подобны ВАХ микроструктур с VO_2 -пленками (Рис. 3). Микроструктуры с VO_2 -пленкой на сапфире и микроструктуры с V_6O_{13} с VO_2 -каналом на Si/SiO_2 были использованы для исследования явлений автоколебаний тока и стохастического резонанса, которым посвящены третья и четвертая главы, соответственно.

В третьей главе приводятся результаты по исследованию автоколебаний электрического тока в пленках VO_2 на сапфировой подложке, поскольку эти пленки имели наибольший коэффициент отношения сопротивлений в полупроводниковом и металлическом состояниях ($>3 \times 10^3$). На основании полученных экспериментальных данных предлагается тепловая модель автоколебаний тока в VO_2 , когда ФППМ вызван локальным разогревом пленки протекающим в ней током до температуры структурного ФППМ (переход Пайерлса). Автоколебания тока исследовались на микроструктурах, включенных в электрическую цепь в режимах источника тока и источника напряжения (Рис. 4). Частота автоколебаний тока находилась в диапазоне 40 кГц – 6 МГц.

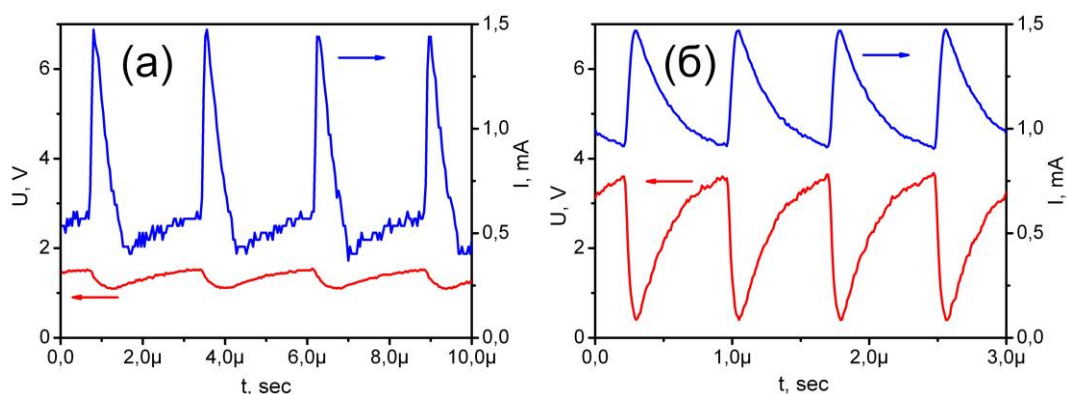


Рисунок 4. Осциллограммы тока и напряжения на микроструктуре с пленкой VO_2 в схеме с источником тока (а) и источником напряжения с последовательным сопротивлением (б).

В режиме источника тока при увеличении пропускаемого через пленку тока наблюдается монотонный, почти линейный, рост напряжения на микроструктуре (Рис. 5). В области точки А напряжение на микроструктуре практически не изменяется, но становится неустойчивым. В точке А могли возникнуть либо автоколебания тока, либо произойти перескок в точку В.

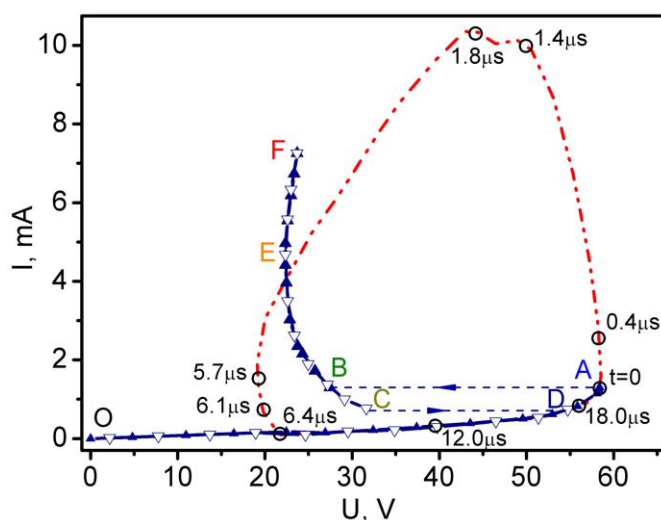


Рисунок 5. Статическая ВАХ (сплошная) и динамическая ВАХ (штрихпунктирная) микроструктуры с VO_2 пленкой в режиме источника тока. Отмечены временные координаты (t) одного периода (~ 21 мкс) автоколебаний тока. Критическая точка А принята за начало периода ($t=0$).

Статическая ВАХ и динамическая ВАХ (при автоколебаниях) имеют общий участок на высокоомной ветви вплоть до точки перескока на низкоомную ветвь. В режиме источника напряжения с последовательным сопротивлением при превышении некоторого порогового напряжения на микроструктуре мог также произойти либо перескок на низкоомную ветвь ВАХ, либо возникнуть автоколебания тока.

По данным ИК-микроскопии при перескоке из точки А в точку В в пленке локально образуется канал протекания тока, температура которого превышает температуру структурного фазового перехода в VO_2 (Рис. 6). При автоколебаниях тока температура в канале может превышать 680 К, и в течение продолжительного времени работы микроструктуры в режиме автоколебаний тока морфология пленки в канале по данным АСМ необратимо изменяется и отличается от таковой на периферии пленки.

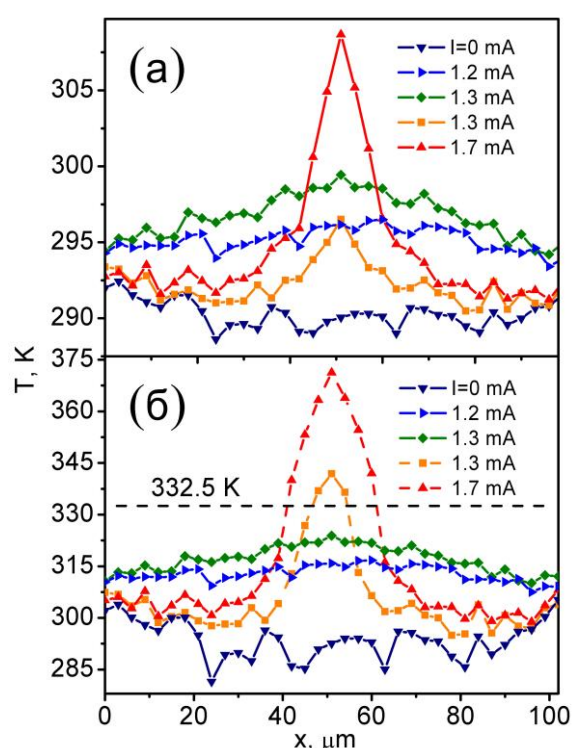


Рисунок 6. Сечение температурного поля VO_2 -пленки в направлении перпендикулярном протеканию тока через микроструктуру при различных его значениях: (а) – данные для АЧТ, (б) – данные с учетом значений коэффициентов серости в полупроводниковом и металлическом состояниях VO_2 -пленки.

Известно, что установление автоколебаний в электрических цепях возможно благодаря наличию положительной обратной связи [24]. Такая положительная обратная связь может быть обеспечена наличием емкостной компоненты импеданса VO_2 -пленки. Оценки в рамках тепловой модели показывают, что для существования автоколебаний тока электрическая емкость микроструктур должна быть не менее 100 пФ, что на ~ 3 порядка выше рассчитанной емкости микроструктур с VO_2 пленкой в полупроводниковой фазе (< 70 фФ). Проведенные измерения температурной зависимости электрического импеданса микроструктур показали, что

при приближении к температуре ФППМ электрическая емкость микроструктур резко возрастает с фФ до нФ (Рис. 7).

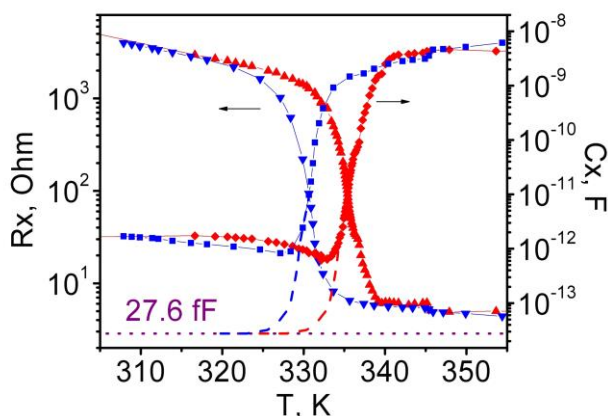


Рисунок 7. Температурные зависимости электрической емкости C_x и сопротивления R_x микроструктуры с пленкой VO_2 на частоте 1 МГц при нагреве и охлаждении. Штриховой линией отмечена рассчитанная величина C_x при комнатной температуре.

Резкое изменение сопротивления пленки в области ФППМ объясняется в рамках теории протекания: с ростом температуры концентрация металлической фазы в пленке возрастает, и образуются электрически связанные металлические кластеры. Когда размеры кластеров становятся сопоставимыми с межэлектродным расстоянием, в пленке наступает перколяция.

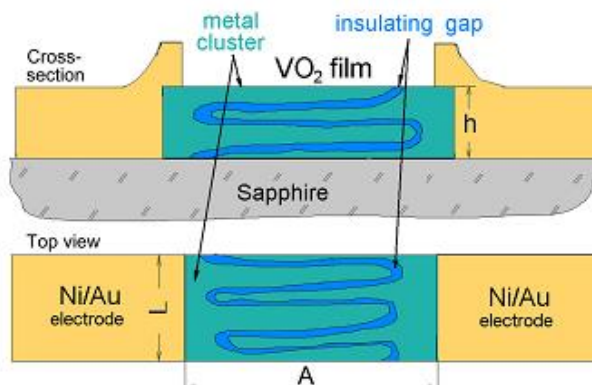


Рисунок 8. Схематическое представление пленки VO_2 вблизи порога перколяции в виде двух металлических кластеров, соединенных с левым и правым электродами микроструктуры.

Вблизи точки перколяции металлические кластеры в пленке имеют развитую поверхность (Рис. 8), структура которой, как предполагается, определяет anomalous поведение электрической емкости.

Было проведено моделирование пространственно-временной нестабильности протекания тока и образования проводящего шнура в пленке VO_2 . В рамках этой модели пленка представлялась в виде параллельных нелинейных резисторов, имитирующих узкие участки пленки и имеющих температурную зависимость электросопротивления VO_2 (Рис. 9а). Температура каждого резистора определялась

из решения системы уравнений теплового баланса для каждого резистора и уравнения токового баланса (1), которая была решена численным методом:

$$\begin{cases} Cm \frac{d}{dt} T(i,t) = I^2(i,t) \cdot r(T(i,t)) - \eta_c \cdot (T(i,t) - T_k) - \eta_b \cdot (2 \cdot T(i,t) - T(i-1,t) - T(i+1,t)) \\ I_s = \sum_{i=1}^n I(i,t) \end{cases}, \quad (1)$$

где: i – номер резистора от 1 до n , Cm – произведение коэффициента теплоемкости на массу для каждого резистора, η_c – эффективный коэффициент теплопроводности резистор-среда, η_b – эффективный коэффициент теплопроводности между соседними резисторами, T_k – температура среды; $T(i,t)$ – температура i -го резистора в момент времени t , $r(T(i,t))$ – сопротивление i -го резистора в момент времени t , $I(i,t)$ – ток через i -й элемент в момент времени t , I_s – суммарный ток через микроструктуру.

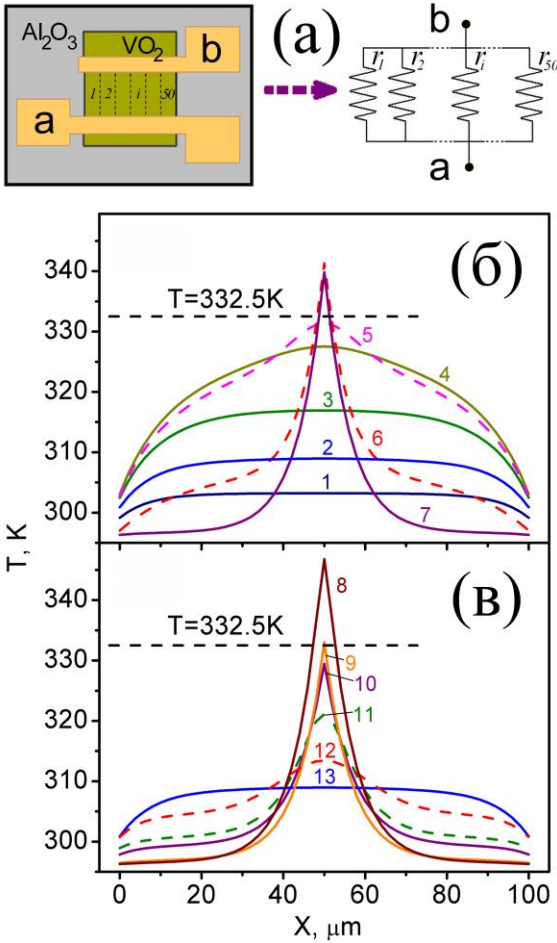


Рисунок 9. Представление пленки VO_2 в виде параллельных нелинейных резисторов (а), расчет температурного профиля пленки в направлении перпендикулярном протеканию тока через микроструктуру при увеличении тока (б) и при его уменьшении (в).

Уравнение теплового баланса учитывало отток тепла в среду и теплообмен между соседними резисторами. В стационарных условиях сумма токов через все резисторы равна току через микроструктуру, который задавался источником тока. Из расчета следует, что при увеличении тока через микроструктуру (Рис. 9б) платообразное

распределение температуры в пленке в направлении перпендикулярном протеканию тока переходит в шпалеобразное (образование узкого канала), и при уменьшении тока (Рис. 9в) возвращается к равномерному платообразному виду, что хорошо согласуется с экспериментальными результатами (Рис. 6). В динамических условиях при автоколебаниях тока необходимо учитывать ток зарядки-разрядки внешней электрической емкости и собственной электрической емкости микроструктуры (Рис. 7), которая оказывает положительную обратную связь: при нагреве электрическая емкость микроструктуры разряжается перегревая канал, при охлаждении емкость заряжается, уменьшая протекающий ток через канал, тем самым его переохлаждая. Общий участок статической и динамической ВАХ (Рис. 5) свидетельствует о том, что канал в пленке успевает образоваться (нагреться) и исчезнуть (остыть) за время одного периода автоколебаний. В результате проведенного исследования удалось описать экспериментально наблюдаемые процессы автоколебания тока и шнурования тока в пленке в рамках тепловой модели, когда ФППМ в VO_2 -пленке вызван джоулевым разогревом, когда пленка VO_2 разогревается неравномерным протеканием через нее тока до температуры структурного перехода Пайерлса.

В четвертой главе исследовано явление стохастического резонанса на микроструктурах с пленкой VO_2 и пленкой V_6O_{13} , прошедшей операцию электроформовки с образованием VO_2 -канала, в электрической схеме, где на вход подавалось постоянное смещение, шум и полезный сигнал (Рис. 10). Результаты рассматриваются в рамках тепловой модели, когда ФППМ в VO_2 инициируется джоулевым разогревом при пропускании тока через пленку.

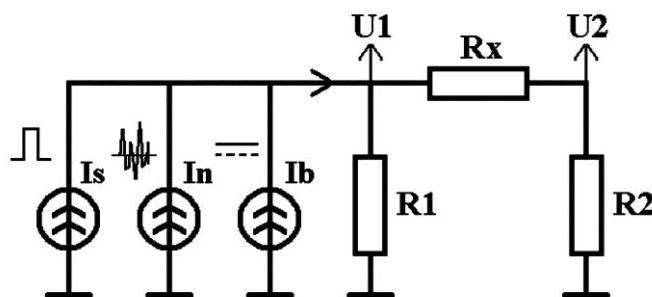


Рисунок 10. Электрическая схема для наблюдения СР в пленках VO_2 . R_x – сопротивление микроструктуры. $R1=99.6 \Omega$, $R2=1150 \Omega$. I_b – источник постоянного тока, I_n – источник шума, I_s – источник сигнала.

Из полученных осциллограмм были рассчитаны отношения сигнал-шум на входе и выходе схемы (Рис. 11). Для микроструктур на подложке $Si(100)/SiO_2$ наблюдается более выраженный рост, затем спад зависимости отношения сигнал-шум на выходе. Такое поведение зависимости отношения сигнал-шум от внешне вводимого в систему шума характерно для явления стохастического резонанса [13]. На первый взгляд может показаться, что простая нединамическая модель, состоящая из порогового устройства и интегратора [25], хорошо описывает явление СР в пленках VO_2 [26]. Действительно, для пленок VO_2 существует пороговое напряжение U_{th} , при котором они переключаются из полупроводникового в

металлическое состояние. Однако анализ осциллограмм показывает, что переключение из одного состояния в другое наблюдается не всегда при превышении напряжения сигнал+шум порогового значения напряжения U_{th} .

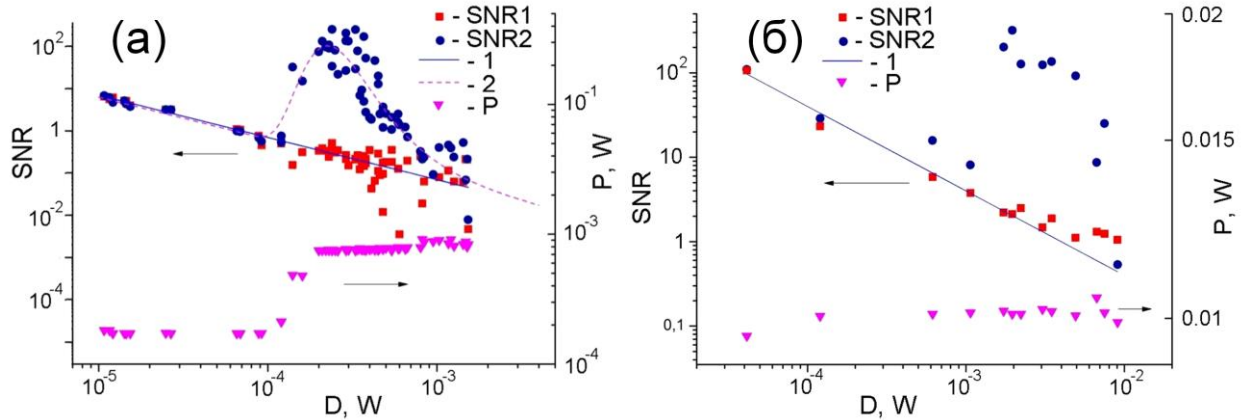


Рисунок 11. Расчет отношения сигнал-шум на входе (SNR1) выходе (SNR2) схемы с микроструктурой #1 на (а) Si/SiO₂ и (б) сапфировой подложках. P – выделяемая в микроструктуре мощность.

Для объяснения полученных результатов по СР в VO₂ применена модель нелинейной системы с бистабильным потенциалом. Динамика температуры пленки VO₂ при пропускании через нее тока определяется тепловым балансом между выделившейся электрической мощностью $\frac{Ux^2(T)}{Rx(T)}$ и рассеянной мощностью $\kappa \cdot (T - T_k)$ за счет теплопроводности подложки и окружающей среды:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{G} \cdot P(T), \quad (2)$$

где $P(T) = \frac{Ux^2(T)}{Rx(T)} - \kappa \cdot (T - T_k)$ – суммарная мощность, выделяемая в пленке VO₂, G – коэффициент, равный произведению теплоемкости пленки на ее массу, Rx – сопротивление пленки, Ux – напряжение на пленке, κ – эффективный коэффициент теплопроводности, T_k – температура окружающей среды (комнатная температура). Если пленка встроена в электрическую схему, то ее температура может изменяться относительно стационарного значения T_i, которая находится из условия $P(T_i) = 0$. Расчет величины P(T) с учетом зависимости Rx(T) для нашей электрической схемы представлен на Рис. 12. Этот рисунок в силу (2) является изображением фазового пространства $(T, \frac{dT}{dt})$ нашей нелинейной динамической системы с точностью до постоянного множителя $\frac{1}{G}$. Видно, что существуют три значения температуры пленки T₁, T₂ и T₃, при которых мощность обращается в ноль. Точка T₂, является неустойчивой к малым изменениям температуры, поскольку $\left. \frac{dP(T)}{dT} \right|_{T_2} > 0$.

Аналогично, точки T_1 и T_3 , являются устойчивыми, поскольку $\left. \frac{dP(T)}{dT} \right|_{T_1, T_3} < 0$, и отвечают полупроводниковому и металлическому состояниям пленки соответственно. При этом переключение из состояния с температурой T_1 в состояние с температурой T_3 определяется не уровнем напряжения на микроструктуре, а необходимой для такого переключения тепловой энергией. Величина этой тепловой энергии, очевидно, зависит от локальности ее выделения.

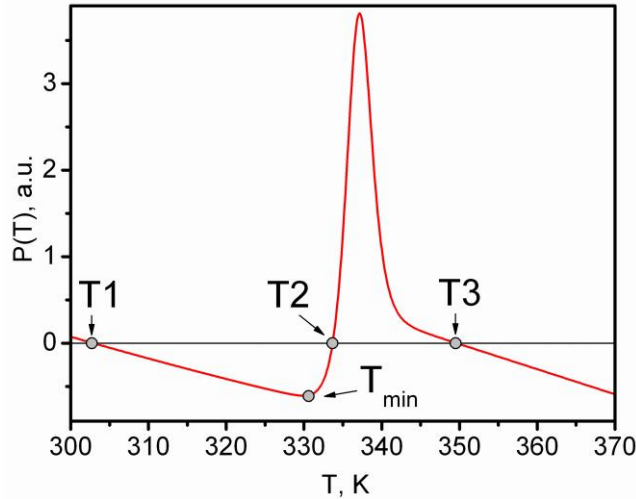


Рисунок 12. Суммарная мощность, выделяемая в пленке, как функция температуры пленки для электрической схемы, показанной на Рис. 10. В отмеченных точках суммарная мощность равна нулю.

По отдельности шум и сигнал сдвигают точку устойчивого состояния на графике $P(T)$ вправо от точки T_1 , и поднимают минимум $P(T_{min})$, однако требование устойчивости состояния $\left. \frac{dP(T)}{dT} \right|_{T_1, T_3} < 0$ сохраняется. При совместном действии напряжений сигнала и шума $P(T_{min}) > 0$, и состояние системы становится неустойчивым: положение кривой $P(T)$ зависит от плотности шума D и мощности сигнала (P_c), т.е. $P(T) = P(T, D + P_c)$. Из (2) можно рассчитать среднее время τ необходимое для нагрева микроструктуры от температуры T_1 до температуры, выше которой микроструктура необратимо переходит в неустойчивое состояние:

$$\tau(D) = \frac{G1}{T_{min} - T_1} \cdot \int_{T_1}^{T_{min}} \frac{1}{P(T, D + P_c)} dT, \quad (3)$$

где: $G1$ – константа. Функция $\tau(D + P_c)$ в диапазоне около одного порядка плотности шума может быть аппроксимирована степенной функцией $10^{-0.4*(D+P_c)}$, которая является мультипликативной: $\tau(D + P_c) = \tau(D) \cdot \tau(P_c)$ и $\lg(\tau(D + P_c)) = \lg(\tau(D)) + \lg(\tau(P_c))$ (Рис. 13). Это означает, что если случайная величина – напряжение белого шума – имеет нормальное распределение, то величина $\tau(D + P_c)$ подчиняется логарифмически нормальному распределению [27]. При увеличении D выше

некоторого критического значения D_{cr} , средняя величина $\tau(D_{cr})$ уменьшается до значения близкого, но большего, чем период импульсов сигнала.

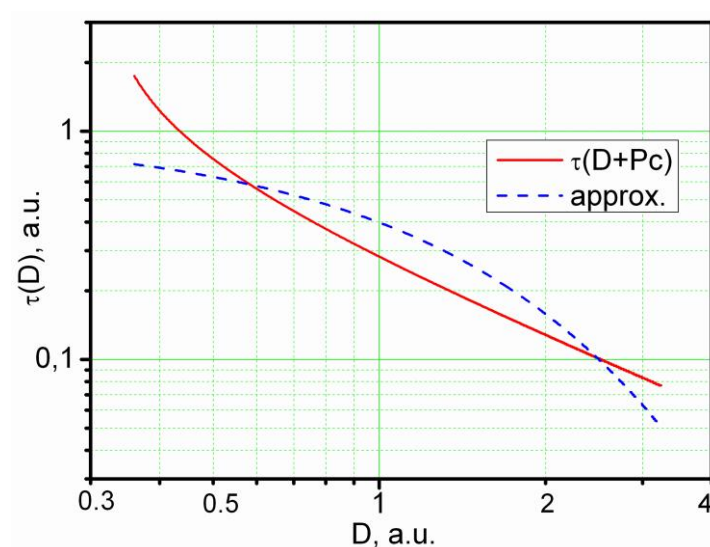


Рисунок 13. Зависимость $\tau(D+Pc)$ и ее аппроксимация степенной функцией $10^{-0.4 \cdot (D+Pc)}$.

Добавка Pc в определенный момент времени, когда состояние микроструктуры находится вблизи точки равновесия T_1 , приводит к совпадению средней величины $\tau(D_{cr}+Pc)$ с периодом сигнала и одновременно синхронизирует сигнал с гармоникой шума, по частоте и фазе совпадающей с сигналом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Методом ионно-лучевого распыления-осаждения выращены поликристаллические пленки VO_2 , испытывающие фазовый переход полупроводник-металл с коэффициентом отношения удельных проводимостей более 10^3 .
2. На планарных микроструктурах $Au/Ni/VO_2/Ni/Au$ изучено влияние внешних параметров электрической цепи на частотную зависимость автоколебаний тока. Экспериментально установлена область существования автоколебаний. Достигнутая частота автоколебаний превышала 6 МГц и, по известным авторам данным, является рекордной.
3. В планарных микроструктурах с пленкой VO_2 обнаружен аномальный рост электрической емкости $\sim 10^5$ при приближении к температуре фазового перехода полупроводник-металл.
4. Впервые *in situ* исследовано температурное поле пленки VO_2 при автоколебаниях тока с помощью ИК-микроскопа. Обнаружено образование узкого высокотемпературного канала в пленке вдоль направления протекания тока. Установлено, что температура в канале превышает температуру структурного фазового перехода полупроводник-металл.

5. Установлено, что при автоколебаниях тока высокая температура в образующемся канале является причиной модификации в нем поверхности пленки и разрушения приэлектродных областей микроструктур.

6. Предложена тепловая модель для объяснения автоколебаний тока в пленках VO_2 .

7. Выявлен эффект стохастического резонанса в микроструктурах с пленками VO_2 и V_6O_{13} с VO_2 -каналом.

8. Впервые измерены коэффициенты передачи отношения сигнал-шум при стохастическом резонансе в пленках VO_2 и пленках V_6O_{13} с VO_2 -каналом. Для пленок V_6O_{13} с VO_2 -каналом этот коэффициент достигает 250 на частоте сигнала 100 Гц, а для пленок VO_2 может достигать 700 на частоте 5 кГц. Установлено, что зависимость отношения сигнал-шум от мощности шума на выходе схемы хорошо аппроксимируется функцией логарифмически нормального распределения.

Список публикаций по результатам работы:

[A1] Алиев В. Ш., Бортников С. Г., Демьяненко М. А. Усиление сигнала при стохастическом резонансе в пленке диоксида ванадия // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38. – №. 21. – С. 13-21.

[A2] Aliev V. S., Bortnikov S. G., Badmaeva I. A. Investigations of stochastic resonance in two-terminal device with vanadium dioxide film // Journal of Applied Physics. – 2014. – Т. 115. – №. 20. – С. 204511.

[A3] Aliev V. S., Bortnikov S. G., Badmaeva I. A. Anomalous large electrical capacitance of planar microstructures with vanadium dioxide films near the insulator-metal phase transition // Applied Physics Letters. – 2014. – Т. 104. – №. 13. – С. 132906.

[A4] Aliev V. S., Bortnikov S. G., Mzhelskiy I. V., Badmaeva I. A. Current oscillations as a manifestation of spatio-temporal inhomogeneity of temperature distribution in vanadium dioxide films at semiconductor-metal phase transition // Applied Physics Letters. – 2014. – Т. 105. – №. 14. – С. 142101.

[A5] Aliev V. S., Bortnikov S. G. Bolometer at semiconductor-metal phase transition in VO_2 thin films // Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2011 International Conference and Seminar of Young Specialists on. – IEEE, 2011. – С. 129-131.

[A6] Бортников С. Г., Алиев В. Ш. Создание болометрической структуры на основе поликристаллической пленки диоксида ванадия // Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества, Третья Всероссийская молодежная конференция. – Москва, 2012. – С. 92-93.

[A7] Aliev V. Sh., Bortnikov S. G., Badmaeva I. A., Atuchin V. V. Bolometer at semiconductor-metal phase transition in VO_2 thin films // Байкальский материаловедческий форум, Всероссийская научная конференция с международным участием. – Улан-Удэ, 2012. – С. 7-8.

[A8] Aliev V. S., Bortnikov S. G., Gerasimova A. K. Stochastic resonance in VO₂ thin films //Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2013 14th International Conference of Young Specialists on. – IEEE, 2013. – С. 10-14.

[A9] Aliev V. S., Bortnikov S. G., Voronkovsky V. A. Abnormal electric capacitance behavior of VO₂-films-based microstructures near semiconductor-to-metal phase transition //Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2013 14th International Conference of Young Specialists on. – IEEE, 2013. – С. 49-52.

[A10] Алиев В. Ш., Бортников С. Г. Стохастический резонанс в пленках VO₂ вблизи фазового перехода металл-полупроводник //Полупроводники-2013, XI Российская конференция по физике полупроводников. – Санкт-Петербург, 2013. – С. 168.

[A11] Алиев В. Ш., Бортников С. Г., Бадмаева И. А. Быстродействующие управляемые электрические переключатели на основе пленок диоксида ванадия //Экологобезопасные и ресурсосберегающие технологии и материалы, II Всероссийская молодежная научная конференция с международным участием. – Улан-Удэ, 2014. – С. 25.

[A12] Алиев В. Ш., Бортников С. Г., Бадмаева И. А., Герасимова А. К. Исследование свойств пленок диоксида ванадия для детектирования ИК-излучения и слабых электрических сигналов //Экологобезопасные и ресурсосберегающие технологии и материалы, II Всероссийская молодежная научная конференция с международным участием. – Улан-Удэ, 2014. – С. 197.

[A13] Бортников С. Г., Алиев В. Ш., Мжельский И. В., Бадмаева И. А. Осцилляции тока в пленках диоксида ванадия как проявление пространственно-временной нестабильности тока вблизи фазового перехода полупроводник-металл //Конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам физики полупроводниковых структур. – Новосибирск, 2014. – С. 71.

Список цитируемой литературы

[1] Morin F. J. Oxides which show a metal-to-insulator transition at the Neel temperature //Physical Review Letters. – 1959. – Т. 3. – №. 1. – С. 34-36.

[2] Chen C., Wang R., Shang L., and Guo C. Gate-field-induced phase transitions in VO₂: monoclinic metal phase separation and switchable infrared reflections //Applied Physics Letters. – 2008. – Т. 93. – №. 17. – С. 171101-171101-3.

[3] Rini M., Cavalleri A., Schoenlein R. W., López R., Feldman L. C., Haglund R. F. Jr., Boatner L. A., and Haynes T. E. Photoinduced phase transition in VO₂ nanocrystals: ultrafast control of surface-plasmon resonance //Optics Letters. – 2005. – Т. 30. – №. 5. – С. 558-560.

[4] Lysenko S., Rua A. J., Vikhnin V., Jimenez J., Fernandez F., and Liu H. Light-induced ultrafast phase transitions in VO₂ thin film //Applied Surface Science. – 2006. – Т. 252. – №. 15. – С. 5512-5515.

[5] Guo H., Chen K., Y. Oh, Kevin Wang, Dejoie C., Syed Asif S. A., Warren O. L., Shan Z. W., Wu J., and Minor A. M. Mechanics and dynamics of the strain-induced M1-M2

structural phase transition in individual VO₂ nanowires //Nano Letters. – 2011. – Т. 11. – №. 8. – С. 3207-3213.

[6] Sakai J. High-efficiency voltage oscillation in VO₂ planer-type junctions with infinite negative differential resistance //Journal of Applied Physics. – 2008. – Т. 103. – №. 10. – С. 103708-103708-6.

[7] Lee Y. W., Kim B.-J., Lim J.-W., Yun S. J., Choi S., Chae B.-G., Kim G., and Kim H.-T. Metal-insulator transition-induced electrical oscillation in vanadium dioxide thin film //Applied Physics Letters. – 2008. – Т. 92. – №. 16. – С. 162903-162903-3.

[8] Kim H.-T., Kim B.-J., Choi S., Chae B.-G., Wook L. Y., Driscoll T., Qazilbash M. M., and Basov D. N. Electrical oscillations induced by the metal-insulator transition in VO₂ //Journal of Applied Physics. – 2010. – Т. 107. – №. 2. – С. 023702.

[9] Crunteanu A., Givernaud J., Leroy J., Mardivirin D., Champeaux C., Orlianges J.-C., Catherinot A., and Blondy P. Voltage-and current-activated metal–insulator transition in VO₂-based electrical switches: a lifetime operation analysis //Science and Technology of Advanced Materials. – 2010. – Т. 11. – №. 6. – С. 065002.

[10] Beaumont A., Leroy J., Orlianges J.-C., and Crunteanu A. Current-induced electrical self-oscillations across out-of-plane threshold switches based on VO₂ layers integrated in crossbars geometry //Journal of Applied Physics. – 2014. – Т. 115. – №. 15. – С. 154502.

[11] Chen C., Yi X., Zhao X., Xiong B. Characterizations of VO₂-based uncooled microbolometer linear array //Sensors and Actuators A: Physical. – 2001. – Т. 90. – №. 3. – С. 212-214.

[12] Демьяненко М. А., Есаев Д. Г., Овсяк В. Н., Фомин Б. И., Марчишин И. В., Алиев В. Ш., Князев Б. А., Герасимов В. В., Кулипанов Г. Н., Винокуров Н. А., Литвинцев В. И. Разработка и применение неохлаждаемых матричных микроболометров для терагерцового диапазона //Вестник НГУ. Серия: Физика. – 2010. – Т. 5. – №. 4. – С. 73-78.

[13] Анищенко В. С., Нейман А. Б., Мосс Ф., Шиманский-Гайер Л. Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения степени порядка //Успехи Физических Наук. – 1999. – Т. 169. – №. 1. – С. 7-38.

[14] Chen H., Varshney P. K, Kay S. M., and Michels J. H. Theory of the stochastic resonance effect in signal detection: Part I—Fixed detectors //Signal Processing, IEEE Transactions on. – 2007. – Т. 55. – №. 7. – С. 3172-3184.

[15] Kanki T., Hotta Y., Asakawa N., Kawai T., and Tanaka H. Noise-driven signal transmission using nonlinearity of VO₂ thin films //Applied Physics Letters. – 2010. – Т. 96. – №. 24. – С. 242108.

[16] Velichko A. A., Pergament A. L., Stefanovitch G. B., and Boriskov P. P. Nonlinear Phenomena and Deterministic Chaos in Systems With Vanadium Dioxide //Journal on Selected Topics in Nano Electronics and Computing. – 2014. – Т. 2. – №. 1. – С. 20-25.

[17] Seo M., Kyoung J., Park H., Koo S., Kim H.-S., Bernien H., Kim B. J., Choe J. H., Ahn Y. H., Kim H.-T., Park N., Park Q.-H., Ahn K., and Kim D.-S. Active terahertz

nanoantennas based on VO₂ phase transition //Nano Letters. – 2010. – Т. 10. – №. 6. – С. 2064-2068.

[18] Chen Z., Gao Y., Kang L., Du J., Zhang Z., Luo H., Miao H., and Tan G. VO₂-based double-layered films for smart windows: optical design, all-solution preparation and improved properties //Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2011. – Т. 95. – №. 9. – С. 2677-2684.

[19] Driscoll T., Palit S., Qazilbash M. M., Brehm M., Keilmann F., Chae B.-G., Yun S.-J., Kim H.-T., Cho S. Y., Jokerst N. M., Smith D. R., and Basov D. N. Dynamic tuning of an infrared hybrid-metamaterial resonance using vanadium dioxide //Applied Physics Letters. – 2008. – Т. 93. – №. 2. – С. 024101.

[20] Kocer H., Butun S., Banar B., Wang K., Tongay S., Wu J., and Aydin K. Thermal tuning of infrared resonant absorbers based on hybrid gold-VO₂ nanostructures //Applied Physics Letters. – 2015. – Т. 106. – №. 16. – С. 161104.

[21] Driscoll T., Kim H. T., Chae B. G., Kim B. J., Lee Y. W., Jokerst N. M., Palit S., Smith D. R., Di Ventra M., and Basov D. N. Memory metamaterials //Science. – 2009. – Т. 325. – №. 5947. – С. 1518-1521.

[22] Driscoll T., Kim H.-T., Chae B.-G., Di Ventra M., and Basov D. N. Phase-transition driven memristive system //Applied Physics Letters. – 2009. – Т. 95. – №. 4. – С. 043503.

[23] Driscoll T., Quinn J., Di Ventra M., Basov D. N., Seo G., Lee Y.-W., Kim H.-T., and Smith D. R. Current oscillations in vanadium dioxide: Evidence for electrically triggered percolation avalanches //Physical Review B. – 2012. – Т. 86. – №. 9. – С. 094203.

[24] Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. – М.: ГИФМЛ, 1959. – 916 с.

[25] Gingl Z., Kiss L. B., Moss F. Non-dynamical stochastic resonance: Theory and experiments with white and arbitrarily coloured noise //EPL (Europhysics Letters). – 1995. – Т. 29. – №. 3. – С. 191.

[26] McNamara B., Wiesenfeld K. Theory of stochastic resonance //Physical Review A. – 1989. – Т. 39. – №. 9. – С. 4854.

[27] Корн Т., Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1974. – 832 с.