

На правах рукописи

БОГОСЛОВСКИЙ Никита Александрович

ЭЛЕКТРОННО-ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ ЭФФЕКТОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ И ПАМЯТИ,
ОСНОВАННАЯ НА МНОГОФОНОННОЙ ТУННЕЛЬНОЙ ИОНИЗАЦИИ U-МИНУС
ЦЕНТРОВ В ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СТЕКЛООБРАЗНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Специальность 01.04.10 – «физика полупроводников»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе

К.Д. Цэндин

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе

А.В. Горбатюк

доктор физико-математических наук, профессор,
Санкт-Петербургская химико-фармацевтическая академия

Е.Д. Эйдельман

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Защита состоится « 21 » февраля 2013 г. в 12 час. 00 мин.

на заседании диссертационного совета Д 002.205.02 при ФТИ им. А.Ф. Иоффе
по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Отзывы об автореферате в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « 18 » января 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук



Л.М. Сорокин

Актуальность темы

В настоящее время ведущие мировые производители элементов памяти активно разрабатывают технологию памяти с изменяемым фазовым состоянием, в основе которой лежит фазовый переход халькогенидное стекло – кристалл. По сравнению с наиболее распространенной сегодня флэш-памятью, память с изменяемым фазовым состоянием имеет значительно более высокую скорость записи, выдерживает приблизительно в 10 тысяч раз больше циклов перезаписи и потенциально может иметь более высокую плотность записи информации.

Запись информации в памяти с изменяемым фазовым состоянием происходит на фоне сильной нелинейности вольтамперной характеристики (ВАХ) и эффекта переключения, который заключается в том, что тонкая пленка халькогенидного стеклообразного полупроводника в сильном электрическом поле скачком переходит из состояния с высоким сопротивлением в проводящее состояние. Эффект переключения так же используется в электронных переключателях, для которых характерны высокая плотность тока в открытом состоянии и высокая скорость переключения.

Нелинейность ВАХ халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) и эффект переключения впервые наблюдались в начале 1960-х годов [1]-[3], однако механизм нелинейности вольтамперных характеристик халькогенидов, а так же физика эффекта переключения остаются неизвестными до настоящего времени. Были предложены различные модели эффекта переключения, однако ни одна из моделей не может описать всю совокупность экспериментальных характеристик эффекта переключения, а следовательно, не может претендовать на целостное описание процессов, происходящих при переключении. Очевидно, что понимание механизмов нелинейной проводимости халькогенидов в сильных электрических полях и эффекта переключения может сделать существенный вклад в физику неупорядоченных полупроводников. Кроме того понимание происходящих при записи процессов необходимо для разработки элементов памяти с изменяемым фазовым состоянием и переключателей на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников, а так же численного моделирования их характеристик.

В слабых электрических полях халькогенидные стеклообразные полупроводники демонстрируют ряд уникальных свойств, а именно нелегируемость, проводимость с энергией активации порядка половины ширины запрещенной зоны и отсутствие парамагнетизма. Для объяснения этих свойств Андерсоном была предложена модель состояний с отрицательной корреляционной энергией электронов, которые также называют U-минус центрами [4]. Такие центры закрепляют положение уровня Ферми

между уровнями первой и второй ионизации центров и определяют величину энергии активации проводимости в слабом электрическом поле. Поэтому в настоящей работе было сделано предположение, что нелинейность вольтамперной характеристики в сильном электрическом поле и переключение в проводящее состояние могут быть связаны с процессами ионизации U-минус центров и захвата электронов на центры в сильном электрическом поле.

Цель работы: Построить модель, описывающую эффекты переключения и памяти в халькогенидных стеклообразных полупроводниках

Задачи работы:

Проверить может ли нелинейность ВАХ халькогенидов в сильном поле быть связана с поведением U-минус центров, в частности с многофононной туннельной ионизацией центров.

Развить качественно и количественно модель, которая согласованно описывает свойства ХСП в слабом поле, свойства в сильном поле и переключение в проводящее состояние.

Исследовать построенную модель эффекта переключения.

Сопоставить полученные результаты с экспериментальными данными по зависимости порогового электрического поля и тока от толщины и температуры.

Научная новизна работы

В работе детально рассмотрены процессы ионизации U-минус центров в ХСП в сильных электрических полях. Показано, что известные выражения для вероятности многофононной туннельной ионизации центров неприменимы для центров с энергией порядка 0,3-0,5 эВ, характерной для халькогенидных стеклообразных полупроводников системы GeSbTe. Предложен аналитический метод вычисления вероятности туннелирования электрона с положительно заряженного центра. Разработана модель, описывающая нелинейность ВАХ, эффекты переключения и памяти, которая основана на многофононной туннельной ионизации U-минус центров с учетом нагрева. Показано, что данная модель количественно и качественно описывает все известные экспериментальные данные по нелинейности ВАХ и эффекту переключения в халькогенидах системы GeSbTe. На основании полученных результатов сделан вывод, что нелинейность ВАХ тонких пленок халькогенидов, а также эффекты переключения и памяти связаны с многофононной туннельной ионизацией U-минус центров.

Практическая значимость работы

Полученные в диссертации результаты вносят существенный вклад в формирование современных представлений о механизмах нелинейности проводимости, а также эффектов переключения и памяти в халькогенидных стеклообразных полупроводниках. Разработанная модель нелинейности вольтамперных характеристик в сильных полях и эффекта переключения может быть использована при численном моделировании характеристик элементов памяти.

Положения, выносимые на защиту:

1. Многофононная туннельная ионизация U-минус центров может являться причиной экспоненциальной зависимости проводимости от электрического поля в халькогенидных стеклообразных полупроводниках в широком диапазоне электрических полей. Этот механизм описывает участок квазилинейной зависимости логарифма тока от электрического поля, наблюдаемый экспериментально на высокоомной ветви вольтамперных характеристик ХСП.
2. Модель, основанная на многофононной туннельной ионизации U-минус центров и учитывающая нагрев, согласованно описывает омический участок, участок с экспоненциальной зависимостью проводимости от электрического поля и предпробойный участок, наблюдаемые экспериментально на высокоомной ветви вольтамперной характеристики ХСП.
3. Построенная модель описывает эффект переключения пленки ХСП в состояние с низким сопротивлением, а так же зависимость амплитуды S-образной ВАХ от параметров задачи.
4. Модель количественно описывает экспериментальные зависимости электрического поля и тока в пороговой точке от толщины пленки ХСП и температуры, а так же зависимость времени задержки переключения от величины напряжения.

Апробация работы. Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на следующих отечественных и международных конференциях и семинарах:

Аморфные и микрокристаллические полупроводники. VI международная конференция, Санкт-Петербург, 2008

25-я международная конференция Defects in semiconductors, Санкт-Петербург, 2009

Международная конференция "Development of Nanotechnology and Mongolia", Улан-Батор, Монголия, 2009

Аморфные и микрокристаллические полупроводники. VII международная конференция, Санкт-Петербург, 2010

53-я научная конференция МФТИ Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук Москва, 2010

5-th International Conference on Amorphous and Nanostructured Chalcogenides. Fundamentals and Applications. Bucharest, Romania, 2011

Аморфные и микрокристаллические полупроводники. VIII международная конференция, Санкт-Петербург, 2012

European \ Phase Change and Ovonic Symposium, Tampere, Finland, 2012

Заседании ученого совета отделения физики твердого тела Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН

Публикации. По результатам исследований, проведенных в ходе выполнения работы, опубликовано 7 статей в российских и зарубежных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура диссертации Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 112 страниц машинописного текста, включая 48 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** к работе обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель и основные задачи работы, показана научная новизна, научная и практическая значимость полученных результатов, изложены положения, выносимые на защиту, и перечислены основные публикации автора по теме работы.

Первая глава работы посвящена обзору литературы по теме работы. Рассмотрены основные экспериментальные данные по нелинейности вольтамперных характеристик (ВАХ) халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП), эффектам переключения и памяти. Описано современное состояние технологии памяти с изменяемым фазовым состоянием на основе ХСП, рассмотрены основные преимущества такого типа памяти по сравнению с флэш-памятью, а так же существующие проблемы технологии памяти с изменяемым фазовым состоянием.

Рассмотрена структура халькогенидов системы GeSbTe, используемых в элементах памяти с изменяемым фазовым состоянием. Показано, что высокая скорость кристаллизации и большое количество циклов записи – стирания обусловлены особенностями строения аморфной и кристаллической фаз материалов этой системы. В кристаллической фазе связи между атомами можно разделить на сильные, преимущественно ковалентные, и слабые резонансные. При переходе в аморфную фазу сильные ковалентные связи сохраняются, а слабые связи разрываются и происходит перестройка и разупорядочение структуры. Таким образом, переход в аморфную фазу происходит без плавления материала [5].

Сделан подробный обзор теоретических моделей, описывающих свойства ХСП в слабых электрических полях, нелинейность ВАХ в сильных полях, а так же эффекты переключения и памяти. Рассмотрены сильные и слабые стороны известных моделей и показано, что существующие модели нелинейности и эффекта переключения качественно и количественно не согласуются со многими известными экспериментальными данными.

В слабых полях нелегируемость материала, закрепление уровня Ферми вблизи середины запрещенной зоны и отсутствие парамагнетизма (то есть отсутствие значительной концентрации локализованных одноэлектронных состояний вблизи уровня Ферми) объясняется существованием в ХСП значительной концентрации центров с отрицательной корреляционной энергией, или U-минус центров. Поэтому было сделано предположение, что нелинейность ВАХ и эффект переключения могут быть связаны с поведением U-минус центров в сильных электрических полях.

Вторая глава посвящена исследованию поведения U-минус центров в сильном электрическом поле и вычислению вероятности ионизации центров. Также во второй главе построена модель, описывающая нелинейность ВАХ и эффект переключения, которая основана на многофононной туннельной ионизации центров и учитывает нагрев материала Джоулевым теплом.

Рассмотрены процессы первой и второй ионизации центра в сильном электрическом поле (рис. 1). Вычисление вероятности ионизации проведено аналогично [6]. Показано, что вероятность ионизации центра может быть представлена в виде

$$e_n \propto \exp\left(-\frac{\varepsilon_b}{kT}\right) \int \exp\left(\frac{\varepsilon}{kT^*} - \frac{4}{3} \frac{\sqrt{2m\varepsilon^{3/2}}}{Fq\hbar}\right) d\varepsilon \quad (1)$$

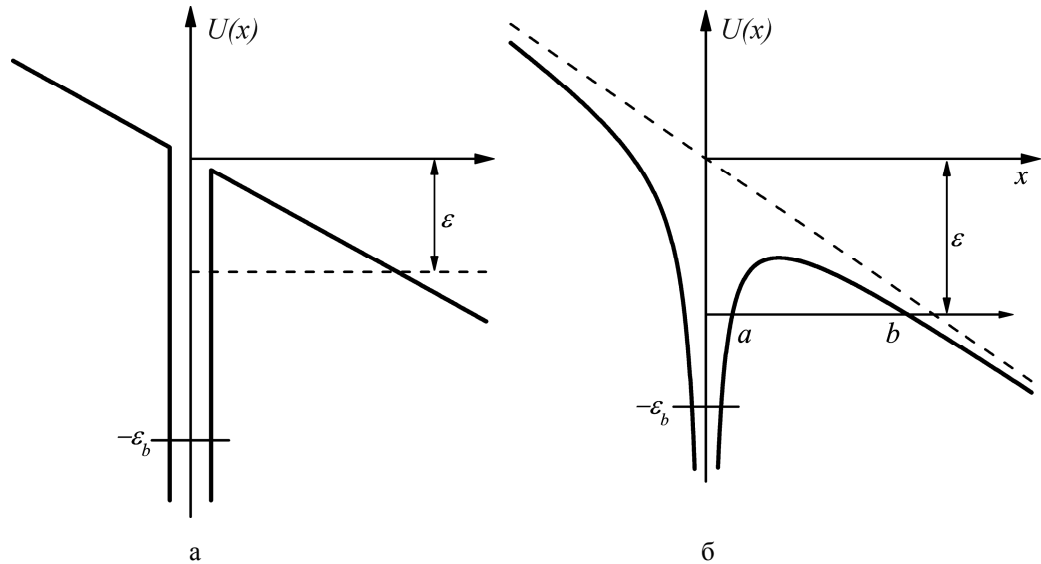


Рис. 1. Первая ионизация в короткодействующем потенциале нейтрального ядра центра (а) и вторая ионизация в притягивающем потенциале положительно заряженного ядра центра (б).

Здесь ε_b – энергия связи электрона на центре, ε – уровень энергии, с которого происходит туннелирование, T^* – эффективная температура электронов, m – эффективная масса, F – электрическое поле, q – элементарный заряд.

Показано, что приближенное выражение для вероятности ионизации центров, полученное в [6], не может быть использовано в случае центров с энергией порядка 0,3 – 0,5 эВ, характерной для ХСП. В отличие от приближенного выражения, точно рассчитанная вероятность ионизации центра в широком диапазоне электрических полей возрастает пропорционально экспоненте от электрического поля в первой степени. Это показывает, что наблюдаемая экспериментально квазилинейная зависимость логарифма тока от приложенного напряжения может быть связана с многофононной туннельной ионизацией U-минус центров.

Для второй ионизации центра, которая происходит в притягивающем потенциале положительно заряженного ядра центра (рис. 1б), предложен аналитический метод вычисления вероятности туннелирования электрона, которая в квазиклассическом приближении задается выражением

$$D(\varepsilon) = \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \int_a^b \sqrt{2m \left| \varepsilon - Fqx - \frac{q^2}{\varepsilon x} \right|} dx\right). \quad (2)$$

Здесь x – конфигурационная координата, ε – диэлектрическая проницаемость материала. Для вычисления вероятности ионизации потенциал раскладывался в ряд Тейлора вблизи середины классически недоступной области. Увеличение вероятности ионизации притягивающего центра в электрическом поле описывается выражением

$$e(F) \propto \exp\left(\frac{\varepsilon_{PF}}{kT^*}\right) \cdot \left(1 + kT \int_0^{\varepsilon_b - \varepsilon_{PF}} \exp\left(\frac{\varepsilon}{kT^*}\right) D(\varepsilon) d\varepsilon\right) \quad (3)$$

Здесь ε_{PF} – уменьшение энергии ионизации кулоновского центра в электрическом поле, T^* – эффективная температура туннелирующих электронов.

Рассмотрены кинетические уравнения для концентрации электронов проводимости и различных состояний U-минус центров. Показано, что в электрическом поле концентрация электронов проводимости описывается выражением

$$n(T, F) = \frac{1}{g} N_c \cdot \exp\left(-\frac{E_{T1} + E_{T2}}{2kT} + \frac{w_1 + w_2}{2}\right). \quad (4)$$

Здесь E_{T1} и E_{T2} – тепловые энергии первой и второй ионизации центра, w_1 и w_2 – численно рассчитанные величины, описывающие увеличение вероятности 1-й и 2-й ионизации центра в электрическом поле, учитывающие туннелирование электрона и понижение барьера ионизации из-за эффекта Пула-Френкеля.

Затем рассмотрено уравнение теплового баланса для тонкой пленки ХСП, концентрация электронов проводимости в которой зависит от величины электрического поля и температуры согласно выражению (4). Уравнение теплового баланса решено относительно температуры, то есть получена стационарная температура пленки в зависимости от величины приложенного электрического поля. Полученное значение температуры используем для вычисления проводимости пленки $\sigma(F) = q\mu n(T(F), F)$. При некоторых значениях электрического поля уравнение теплового баланса имеет три решения по температуре, что соответствует трем ветвям вольтамперной характеристики, то есть S-образной ВАХ.

Третья глава посвящена исследованию и анализу построенной в предыдущей главе модели нелинейности ВАХ и эффекта переключения в ХСП.

Показано, что при характерных для ХСП значениях параметров, теоретически рассчитанная вольтамперная характеристика является S-образной. На ветви ВАХ с высоким сопротивлением можно выделить 4 характерных участка (см. рис. 2). На первом участке (от 0 до 0,1 В) сопротивление пленки практически постоянно. На втором участке (от 0,1 до 0,4 В) сопротивление пленки уменьшается по закону $R \propto \exp(-\sqrt{F/F_1})$, что связано с понижением барьера для ионизации притягивающего центра, то есть эффектом Пула - Френкеля. На третьем, самом протяженном участке (от 0,4 до 0,9 В), сопротивление пленки уменьшается при увеличении электрического поля согласно

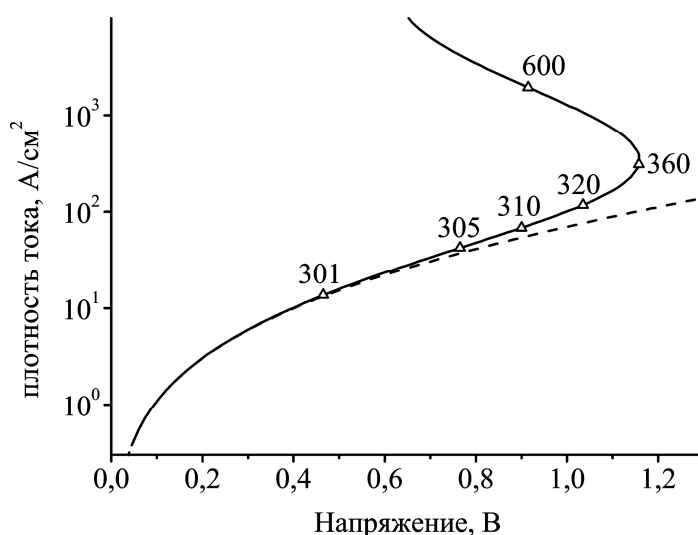


Рис. 2. Теоретически рассчитанные вольтамперные характеристики тонкой пленки халькогенида, рассчитанные с учетом нагрева (сплошная линия) и без учета нагрева (пунктир).

$R \propto \exp(-F/F_0)$. Такое поведение связано с тем, что вероятность многофононной туннельной ионизации U-минус центров в сильном поле возрастает пропорционально экспоненте от поля в первой степени. Наконец, на четвертом участке (от 0,9 до 1,2 В) пленка начинает значительно нагреваться, в результате чего сопротивление пленки уменьшается и происходит переключение в проводящее состояние. Для нескольких характерных точек на ВАХ указана рассчитанная температура пленки. Также рассмотрена модель без учета нагрева, соответствующая зависимость показана на рис. 2 пунктиром. На первых трех участках вольтамперные характеристики, рассчитанные с учетом и без учета нагрева близки. Это показывает, что квазилинейный участок на зависимости логарифма электрического тока от напряжения, наблюдаемый экспериментально на вольтамперных характеристика ХСП [7], может быть объяснен в рамках модели, основанной на многофононной туннельной ионизации U-минус центров.

Также исследована зависимость вольтамперных характеристик от температуры, толщины пленки ХСП, величины энергии активации проводимости, эффективной массы и времени туннелирования. По зависимости ВАХ от температуры построена зависимость энергии активации проводимости от величины приложенного электрического поля. Показано, что полученная зависимость качественно согласуется с экспериментальными данными. Рассмотрена зависимость ВАХ ячейки памяти от сопротивления нижнего электрода. Показано, что при увеличении сопротивления электрода размах S-образности ВАХ по напряжению значительно уменьшается. Также рассмотрена область параметров, при которых собственная ВАХ пленки является S-образной.

Четвертая глава посвящена сравнению результатов расчета с экспериментальными данными, полученными на тонкопленочных образцах системы GeSbTe и анализу применимости предложенной модели для описания нелинейности и эффекта переключения в халькогенидах этой системы.

На рис. 3 точками показана высокоомная ветвь вольтамперной характеристики образца $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ толщиной 40 нм, измеренная при комнатной температуре [8], а сплошной линией показана теоретически рассчитанная зависимость. Показано, что модель, основанная на многофононной туннельной ионизации U-минус центров, позволяет согласованно описывать экспериментальные данные в омической, нелинейной и предпробойной областях. Также в рамках данной модели удалось описать экспериментальные данные по зависимости проводимости пленок состава SiTeAsGe от величины приложенного напряжения и температуры. На основании полученных результатов был сделан вывод о том, что нелинейность ВАХ халькогенидов в сильном электрическом поле может быть связана с многофононной туннельной ионизацией U-минус центров.

На рис. 4 маркерами показана зависимость порогового электрического поля от толщины и температуры, измеренная в работе [9] на свеженапыленных аморфных пленках и пленках, аморфизированных из кристаллической фазы импульсом тока. В настоящей работе было сделано предположение, что данные пленки отличаются по величине энергии активации проводимости. Соответствующие зависимости, рассчитанные в рамках предложенной модели, показаны на рис. 4 сплошными линиями. Пунктирными линиями показана зависимость порогового напряжения, рассчитанная с учетом контактной

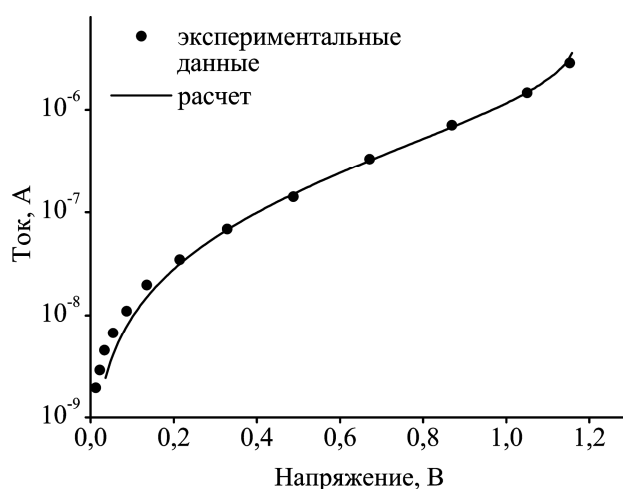


Рис. 3. Сравнение расчетов с экспериментальными данными для высокоомной ветви ВАХ пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ толщиной 40 нм при комнатной температуре [8].

разности потенциалов, равной 0,2 В. Данная зависимость наилучшим образом согласуется с экспериментальными данными.

На рис. 5 точками показаны экспериментальные данные по зависимости пороговой плотности тока от толщины пленки для халькогенидов различных составов [10], а сплошной линией показана соответствующая зависимость, рассчитанная теоретически. Показано, что модель дает близкое к экспериментально наблюдаемому значение пороговой плотности тока, а так же качественно описывает уменьшение пороговой плотности тока при увеличении толщины пленки. Количественное несоответствие пороговой плотности тока в области тонких пленок вероятно связано с предположением об однородном распределении тока в пленке.

На рис. 6 показана рассчитанная зависимость времени задержки переключения от величины приложенного напряжения. Полученная зависимость качественно согласуется с известными экспериментальными данными [11]. Количественное несоответствие времени задержки может быть связано с тем, что пробой и переключение в проводящее состояние происходят не во всей ячейке, а только в узкой области, или шнуре тока.

Важно отметить, что в рамках предложенной теоретической модели впервые удалось количественно и качественно описать все известные экспериментальные характеристики эффекта переключения. Хорошее соответствие между рассчитанными зависимостями и экспериментальными результатами позволяет сделать вывод о том, что многофононная туннельная ионизация U-минус центров в сильных электрических полях с учетом нагрева является вероятным механизмом нелинейности ВАХ и эффекта переключения в ХСП.

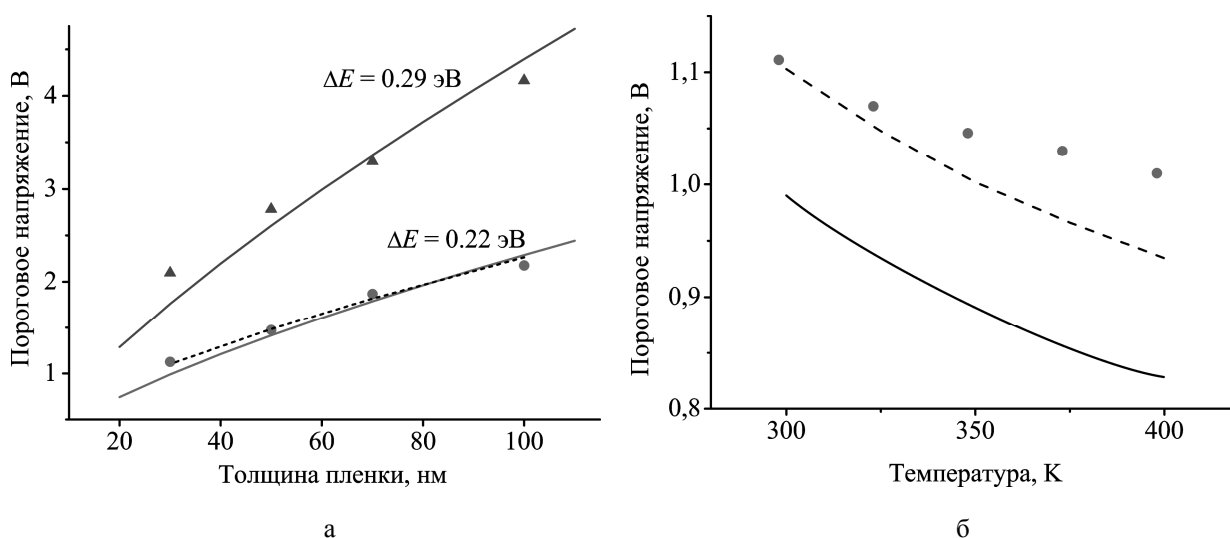


Рис. 4. Зависимость порогового напряжения для пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ от толщины при температуре 300 К (а) и от температуры для пленки толщиной 30 нм (б) [9]. Треугольными маркерами показаны данные, полученные на свеженанесенных аморфных пленках, а круглыми – на пленках, аморфизированных импульсом тока из кристаллической фазы. Сплошными линиями показана теоретически рассчитанная зависимость, а пунктиром – зависимость, рассчитанная с учетом контактной разности потенциалов, равной 0,2 В.

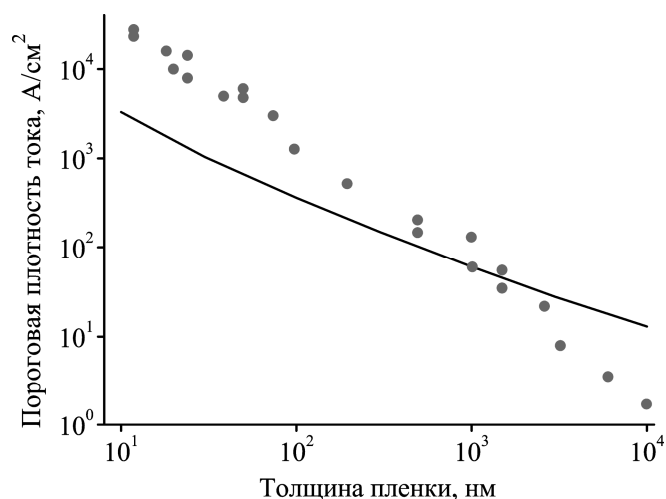


Рис. 5. Зависимость пороговой плотности тока от толщины пленки.
Экспериментальные данные получены на пленках ХСП различных составов [10].

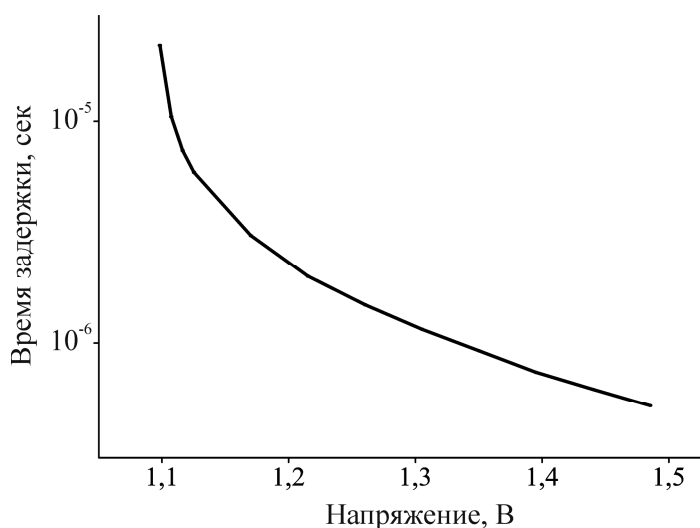


Рис. 6. Зависимость времени задержки переключения от величины напряжения, рассчитанная для пленки ХСП толщиной 50 нм.

В **заключении** перечислены основные результаты работы:

1. Критически проанализированы существующие модели, описывающие нелинейность вольтамперной характеристики ХСП, эффекты переключения и памяти. Показано, что ни одна из ранее предложенных моделей не может согласованно описать все известные экспериментальные данные.
2. Известно, что многие свойства ХСП в слабом электрическом поле определяются U-минус центрами, поэтому было сделано предположение, что нелинейность ВАХ в сильном поле и эффект переключения также могут быть связаны с поведением U-минус центров. При рассмотрении процессов ионизации U-минус центров было

показано, что для центров с энергией связи порядка 0,3-0,5 эВ, характерной для халькогенидов системы GeSbTe, известное приближенное выражение [6], согласно которому логарифм вероятности ионизации пропорционален квадрату электрического поля, неприменимо. В настоящей работе вероятность ионизации центров рассчитана численно и получено, что в широком диапазоне электрических полей логарифм вероятности ионизации центра линейно зависит от электрического поля.

3. Показано, что вольтамперная характеристика, рассчитанная с учетом многофононной туннельной ионизации U-минус центров, согласованно описывает экспериментальные данные в омической области и в области с экспоненциальной зависимостью тока от приложенного напряжения. Модель, основанная на многофононной туннельной ионизации U-минус центров с учетом нагрева, также описывает предпробойный участок вольтамперной характеристики и переключение в проводящее состояние.
4. Рассмотрено влияние нагрева и показано, что в высокоомном состоянии существенный нагрев наблюдается только при напряжениях, близких к пороговому напряжению. Нагрев пленки в пороговой точке зависит главным образом от величины энергии активации проводимости и составляет несколько десятков градусов. Нагрев пленки в проводящем состоянии составляет сотни градусов, таким образом, температура пленки в проводящем состоянии близка к температуре размягчения, при которой происходит кристаллизация.
5. В рамках построенной модели проведено исследование зависимости вольтамперных характеристик от параметров модели. В том числе рассмотрена область параметров, при которых вольтамперная характеристика является S-образной.
6. Проведено сравнение модели с известными экспериментальными данными по нелинейности ВАХ тонких пленок GeSbTe, зависимости порогового напряжения от толщины пленки и температуры, зависимости пороговой плотности тока от толщины, а также зависимости времени задержки от величины напряжения. Показано, что модель количественно и качественно описывает все экспериментальные данные. Небольшое количественное несоответствие величины времени задержки может быть связано с предположением о том, что ток протекает в ячейке однородно, в то время как в действительности возможно образование шнура с высокой плотностью тока.
7. На основании полученных результатов сделан вывод, что нелинейность ВАХ тонких пленок халькогенидов, а также эффекты переключения и памяти связаны с многофононной туннельной ионизацией U-минус центров.

Цитируемая литература

- [1] A. D. Pearson, W. R. Northover, I. F. Dewald, I. W. Peck. Chemical, Physical and Electrical Properties of Some Unusual Inorganic Glasses // *Advances in Glass Technology: Technology papers of the VI International Congress on Glass*. – New York: Plenum Press, 1962. – Pp. 357-371.
- [2] Б.Т. Коломиец, Э.А. Лебедев. Вольтамперная характеристика точечного контакта со стеклообразными полупроводниками // *Радиотехника и электроника*. – 1963. – Вып. 8. – С. 2097-2098.
- [3] S. R. Ovshinsky. Reversible electrical switching phenomena in disordered structures // *Phys. Rev. Lett.* – 1968. – Vol. 21, no 20. – Pp. 1450-1453.
- [4] P. W. Anderson. Model for the Electronic Structure of Amorphous Semiconductors // *Phys. Rev. Lett.* – 1975. – Vol. 34, no. 15. – Pp. 953-955.
- [5] M. Krbal, A. V. Kolobov, P. Fons et al. Intrinsic complexity of the melt-quenched amorphous $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ memory alloy // *Phys. Rev. B*. – 2011. – Vol. 83. – 054203.
- [6] В. Н. Абакумов, В. И. Перель, И. Н. Ясиевич. Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках / СПб.: изд. ПИЯФ, 1997.
- [7] M. Nardone, M. Simon, I. V. Karpov, V. G. Karpov. Electrical conduction in chalcogenide glasses of phase change memory // *J. Appl. Phys.* – 2012. – Vol. 112. – 071101.
- [8] D. Ielmini. Threshold switching mechanism by high-field energy gain in the hopping transport of chalcogenide glasses // *Phys. Rev. B*. – 2008. – Vol. 78. – 035308.
- [9] V. G. Karpov, Y. A. Kryukov, S. D. Savransky, I. V. Karpov. Nucleation switching in phase-change memory // *Appl. Phys. Lett.* – 2007. – Vol. 90. – 123504.
- [10] S. A. Kostylev. Threshold and Filament Current Densities in Chalcogenide-Based Switches and Phase-Change-Memory Devices // *IEEE Electron Device Letters*. – 2009. – Vol. 30, no. 8. – Pp. 814-816.
- [11] M. Salina, M. Wimmer. The gradual nature of threshold switching // *EPCOS 2012. Proceedings*. – Tampere, 2012. – Pp. 115-120.

Основные публикации автора по теме диссертации

1. Н.А. Богословский, К.Д. Цэндин. Динамика оптической записи информации на тонких слоях халькогенидных стеклообразных полупроводников // Письма в журнал технической физики. – 2007. – Т. 33, вып. 12. – С. 1-8.
2. Н.А. Богословский, К.Д. Цэндин. Нелинейность вольт-амперных характеристик халькогенидных стеклообразных полупроводников, обусловленная многофононной туннельной ионизацией U-минус центров // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43, вып. 10. – С. 1378-1382.
3. N.A. Bogoslovskij, K.D. Tsendin. Electronic-thermal switching and memory in chalcogenide glassy semiconductors // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2011. – Vol. 357. – Pp. 992-995.
4. N.A. Bogoslovskiy, K.D. Tsendin. Multiphonon tunnel ionization of negative-U centers – the origin of switching and memory effects in chalcogenide glasses // Journal of optoelectronics and advanced materials. – 2011. – Vol. 13, no. 11-12. – Pp. 1423-1428.
5. K.D. Tsendin, N.A. Bogoslovskiy. Comparison of new and old generations of the phase change memory chalcogenide materials and devices // Journal of optoelectronics and advanced materials. – 2011. – Vol. 13, no. 11-12. – Pp. 1429-1432.
6. Н.А. Богословский, К.Д. Цэндин. Физика эффектов переключения и памяти в халькогенидных стеклообразных полупроводниках // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46, вып. 5. – С. 577-608.
7. N. Almasov, N. Bogoslovskiy, N. Korobova et. al. Switching and memory effects in partly crystallized amorphous $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films in a current controlled mode // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2012. – Vol. 358. – Pp. 3299–3303.
8. N. Bogoslovskiy. Electronic-thermal switching in amorphous chalcogenides // European \ Phase Change and Ovonic Symposium. Proceedings. – Tampere, 2012. – Pp. 146-147.