

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИС-
СЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Вишняков Глеб Евгеньевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Мемристорный эффект в диэлектрических пленках, полученных со-
распылением оксида германия / оксида кремния**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18310

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. Камаев Г. Н.

Оценка научного руководителя

«_____» Декабря 2019г.

Преподаватель практикума

Оценка преподавателя практикума

«_____» Декабря 2019г.

Куратор практикума:

к. т. н. В. Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» Декабря 2019г.

Аннотация

В данной работе производилось исследование проводимости диэлектрических плёнок, полученных сораспылением $GeO_{0,5}/SiO_{0,5}$ и влияние ограничения по величине тока и длительности переключающего импульса на эффекты переключения (включение и выключение) в мемристорах.

Для выявления механизма электрической проводимости и особенностей переноса заряда в исследуемых пленках использовались существующие модели электрической проводимости, такие как модель проводимости Пула – Френкеля, модель термоэлектронной эмиссии Шоттки, модель туннельной эмиссии Фаулера – Нордгейма. Анализ проводимости пленок осуществлялся на основании ВАХ и зависимостей, построенных в координатах Фаулера – Нордгейма ($\ln(I/U^2)$ от $\sqrt{U}$), Шоттки ($\ln(I)$ от $\sqrt{U}$) Пула – Френкеля ($\ln(I/U)$ от $1/U$). Было выявлено, что механизм проводимости после прохождения образцом нескольких последовательных циклов не изменился и описывается моделью Пула-Френкеля.

Показано, что в мемристорной структуре при увеличении длительности переключающего импульса или увеличении величины тока при фиксированных остальных параметрах возрастает разница между величиной тока во включенном и выключенном состояниях.

.

Оглавление

Введение	4
1. Теоретическая часть	5
1.1. Металлы, полупроводники и диэлектрики	5
1.2. Перенос носителей заряда через диэлектрик. Основные механизмы переноса	6
1.3 Мемристорный эффект	9
2. Постановка задачи	10
3. Методика эксперимента	10
3.1. Описание экспериментальных образцов	10
3.2. Методика экспериментальных измерений	10
4. Экспериментальные результаты и их обсуждение	11
5. Выводы	15
6. Список литературы	16

Введение

В современном мире наблюдается усложнение вычислительных задач в различных областях жизни. А это в свою очередь требует создания высокопроизводительной вычислительной техники, а также разработки новых методов их решения.

Теоретически мемристорные запоминающие элементы могут быть более плотными и быстрыми, чем современная флеш-память. Также блоки из них могут заменить ОЗУ. Умение мемристоров изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от прошедшего через него электрического заряда позволит впоследствии отказаться от загрузки системы компьютера: в памяти компьютера, отключённого от питания, будет храниться его последнее состояние. При поддержке со стороны программного обеспечения компьютер можно будет включить и начать работу с того места, на котором она была остановлена при выключении.

Кроме хранения информации мемристоры могут осуществлять и ее обработку. Скоммутированные определенным образом мемристоры, функционирующие в аналоговом режиме, могут моделировать нейроны головного мозга. Такие нейроноподобные мемристорные сети способны к обучению и адаптивным вычислениям.

Внедрение новых перспективных мемристорных элементов позволит создать эффективные вычислительные системы для решения поставленных задач. Поэтому интерес к исследованию мемристорных элементов возрастает с каждым годом.

Целью данной работы является изучение меристорного эффекта в МДП-структуре на основе плёнок SiO / GeO и сопоставлении полученных результатов с имеющимися на данный момент теориями, описывающими перенос заряда в диэлектриках, а также в определении диапазонов напряжений, в которых преобладает тот или иной механизм проводимости.

1. Теоретическая часть

1.1. Металлы, полупроводники и диэлектрики

Энергетический спектр электронов в твердом теле существенно отличается от энергетического спектра свободных электронов (являющегося непрерывным) или спектра электронов, принадлежащих отдельным изолированным атомам (дискретного с определенным набором доступных уровней) – он состоит из отдельных разрешенных энергетических зон, разделенных зонами запрещенных энергий.

Запрещённой зоной называется область значений энергии, которыми не может обладать электрон. Наивысшая из разрешенных энергетических зон в полупроводниках и диэлектриках, в которой при температуре 0 К все энергетические состояния заняты электронами, называется валентной, следующая за ней – зоной проводимости. В проводниках зоной проводимости называется наивысшая разрешенная зона, в которой находятся электроны при температуре 0 К. Именно по принципу взаимного расположения этих зон все твердые вещества и делят на три большие группы.

1. *проводники*–материалы, у которых зона проводимости и валентная зона перекрываются (нет энергетического зазора), образуя одну зону, называемую зоной проводимости (таким образом, электрон может свободно перемещаться между ними, получив любую допустимо малую энергию);

2. *полупроводники*– материалы, у которых зоны не перекрываются и расстояние между ними (ширина запрещенной зоны) лежит в интервале 0,1–3 эВ (для того, чтобы перевести электрон из валентной зоны в зону проводимости требуется энергия меньшая, чем для диэлектрика, поэтому чистые полупроводники слабо пропускают ток).

3. *диэлектрики*– материалы, у которых зоны не перекрываются и расстояние между ними составляет более 5 эВ (для того, чтобы перевести электрон из валентной зоны в зону проводимости требуется значительная энергия, поэтому диэлектрики ток практически не проводят);

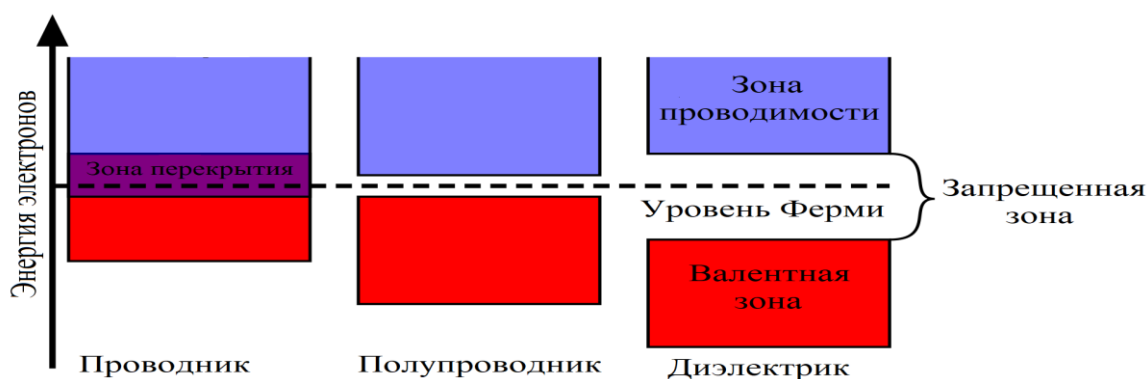


Рис.1. Упрощенная зонная диаграмма для проводников, полупроводников и диэлектриков

1.2. Перенос носителей заряда через диэлектрик. Основные механизмы переноса

Работа выхода

В металлах имеются электроны проводимости, образующие электронный газ и участвующие в тепловом движении. Так как электроны проводимости удерживаются внутри металла, то, следовательно, вблизи поверхности существуют силы, действующие на электроны и направленные внутрь металла. Чтобы электрон мог выйти из металла за его пределы, должна быть совершена определенная работа ψ против этих сил, которая получила название работа выхода электрона. Её можно определить следующим образом:

$$\psi = e\phi' - E_F, \quad (1.1)$$

где ϕ' – среднее значение потенциала электрического поля внутри металла, E_F – энергия Ферми, e – заряд электрона.

Отметим, что энергия Ферми – максимальное значение энергии, которой обладают электроны при абсолютном нуле.

Термоэлектронная эмиссия – эмиссия Шоттки

Термоэлектронная эмиссия Шоттки преобладает при достаточно высоких температурах, таких что тепловой энергии достаточно для преодоления барьера на контакте и носители заряда способны с уровня Ферми контакта возбудиться в

зону проводимости диэлектрика. Сильная полевая зависимость в эффекте Шоттки обусловлена понижением барьера за счет сил изображения. Выражение для тока при инжекции из металла в диэлектрик имеет вид

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{\Phi_0 - \beta_{\text{шт}} E^{\frac{1}{2}}}{kT}\right) \quad (1.2)$$

Здесь $A = \frac{4\pi m^* k^2 e}{m_e h^2}$ - постоянная Ричардсона-Дешмана; $\beta_{\text{шт}} = \sqrt{\frac{e^3}{4\pi\epsilon_\infty\epsilon_0}}$.

Для эмиссии Шоттки характерна экспоненциальная зависимость тока от температуры и электрического поля. Вольт-амперная характеристики, построенные в координатах $\ln(I) = f(\sqrt{U})$, представляют из себя прямые линии.

Туннелирование по Фаулеру-Нордгейму

Механизм Фаулера-Нордгейма доминирует в сильных электрических полях, при низких температурах, таких, что из зоны проводимости контакта (полупроводника или металла) носители заряда могут туннелировать в зону проводимости диэлектрика. Туннельный эффект имеет исключительно квантовую природу, и, следовательно, не зависит от температуры, однако число свободных носителей заряда на уровне Ферми металла зависит от температуры, в результате чего в выражении для тока получается слабая температурная зависимость. При сильных электрических полях трапециевидный потенциальный барьер вырождается в треугольный (см. рис. 2). Такое происходит при электрических полях больше некоторого критического значения поля E_{ox} при которых падения потенциала в окисле V_{ox} превосходит высоту барьера Φ_0 между зоной проводимости электрода и диэлектрика. $E_{ox} = \frac{\Phi_0}{d_{ox}}$, где Φ_0 - высота треугольного потенциального барьера на границе раздела электрод-диэлектрик, d_{ox} - толщина диэлектрика.

Тогда для треугольного барьера формула для плотности тока по механизму Фаулера-Нордгейма имеет вид:

$$J = \frac{q^2 E_{ox}^2}{8\pi h \Phi_0} \exp\left(-\frac{8\sqrt{2m^*\Phi_0^{\frac{3}{2}}}}{3hqE_{ox}}\right) \quad (1.4)$$

Здесь J -плотность тока, E_{ox} -электрическое поле, Φ_0 -высота треугольного потенциального барьера на границе раздела электрод-диэлектрик, m^* -туннельная эффективная масса.[2]

Стоит заметить, что в координатах Фаулера-Нордгейма ($\ln(J/U^2)$ от $1/U$) уравнение 1.4 отображается прямой линией.

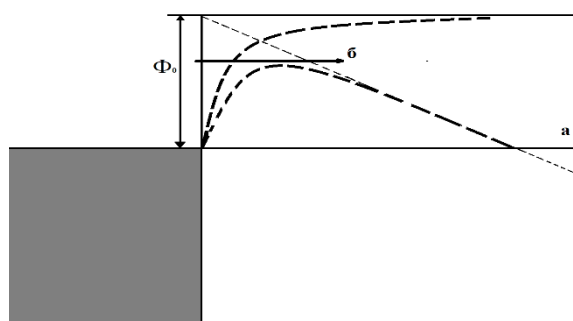


Рис.2. Механизмы инжекции электронов: а – механизм проводимости Фаулера-Нордгейма; б – эффект Шоттки.

Туннелирование по Пулу-Френкелю

Транспорт носителей по Пулу-Френкелю заключается в термической активации носителей заряда с ловушек, энергетически располагающихся в запрещённой зоне диэлектрического слоя, и последующем их переходе в зону проводимости диэлектрика. Эмиссию по Пулу-Френкелю можно считать одной из разновидностей туннелирования через ловушки. Зачастую рассматривают энергетические ловушки, представляющие из себя потенциальные ямы. Природа таких ловушек, как правило, связана с технологическими особенностями получения диэлектрических плёнок. Например, кислородные вакансии [3]. Высота потенциального барьера при данном механизме переноса определяется глубиной залегания ловушки, на которую захвачен туннелирующий по Пулу-Френкелю носитель. При данном механизме при низком падении напряжения на диэлектрическом слое МДП структуры и при высокой температуре окружающей среды ток

туннелирования определяется возбуждёнными электронами, переходящими из одного энергетического состояния в диэлектрическом слое на другое

Формула для вычисления плотности тока туннелирования по Пулу-Френкелю

$$J = E \exp \left(- \frac{q(\Phi_B - \sqrt{qE/\pi\epsilon_i})}{kT} \right) \quad (1.5)$$

Где ϵ_i – динамическая диэлектрическая проницаемость диэлектрической плёнки, Φ_B – высота потенциального барьера.

Следует отметить, что в координатах Пула-Френкеля ($\ln(I/U)$ от $U^{1/2}$) уравнение отображается прямой. [1]

1.3. Мемристорный эффект

Мемристоры – это электронные устройства резистивного типа, которые имеют гистерезисные нелинейные вольтамперные характеристики (ВАХ). Ключевой особенностью мемристоров является способность изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от прошедшего через него электрического заряда. Мемристорный эффект может возникать благодаря изменению характеристик барьера Шоттки на границе металл-диэлектрик. Это изменение обусловлено, в частности, миграцией в электрическом поле заряженных кислородных вакансий к межфазной границе. [1]

2. Постановка задачи

Цель работы заключается в изучении механизмов переноса носителей заряда в МДП-структурах на основе плёнок SiO / GeO путем анализа ВАХ, сопоставлении полученных результатов с имеющимися на данный момент теориями, описывающими перенос заряда в диэлектриках, а также в определении диапазонов напряжений, в которых преобладает тот или иной механизм проводимости. Предполагается, что графики будут выглядеть как прямые в соответствующих координатах Пула-Френкеля, Шоттки или Фаулера-Нордгейма.

Также рассмотрим влияние ограничения по величине тока и длительности переключающего импульса на эффекты переключения (включение и выключение) в мемристорах.

3. Методика эксперимента

3.1. Описание экспериментальных образцов

Образец $\text{SiO}_{(0.5)}/\text{GeO}_{(0.5)}$ был получен испарением материала с мишеней под действием электронных пушек. Пленка осаждалась на сильнолегированную кремниевую подложку в высоком вакууме при температуре подложки 100 С°. Состав пленки определялся материалом испаряемой мишени и соотношением их потоков при одновременном испарении. Толщина пленки составляла 50 nm.

Затем, образец был подвергнут отжигу в печи при 500°С в течение 20 минут. Термообработка проводилась в цилиндрической печи в атмосфере инертного газа - аргона. Поддержание температуры производилось при помощи терморегулятора ПИТ–3, оборудованного термопарой Pt – PtRh 10.

МДП-структура была формировалась путём испарения ИТО на диэлектрик через маску в вакууме. На тыльной стороне структур формировался омический контакт нанесением индий-галлиевой пасты (эвтектической смеси In-Ga).

3.2. Методика экспериментальных измерений

Измерения ВАХ МДП-структур проводились на постоянном токе с помощью двухканального источника-измерителя AgilentB2902A. К нему были подключены микропозиционеры с зондами, замыкающие цепь на исследуемой структуре. С помощью программы Agilent B2900A Quick I/V Measurement Software задавались параметры измерений. Полученные данные в ходе измерения сохранялись в файл формата Excel. Блок-схема установки представлена на рис.3.

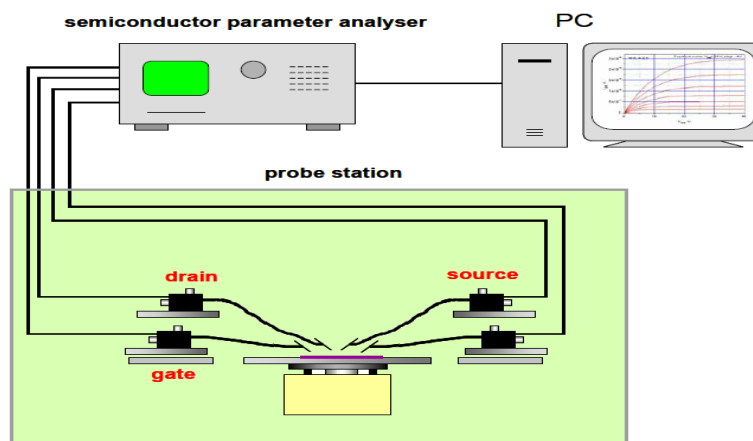
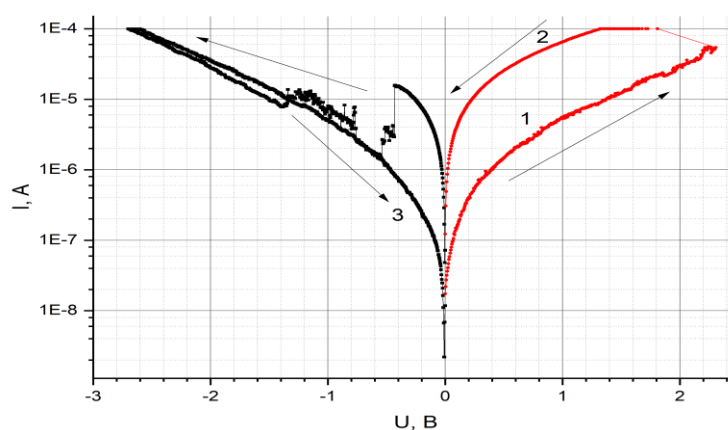


Рис.3. Блок-схема установки

4. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 4 приведены ВАХ МДП структуры на основе плёнок $\text{SiO}_{(0.5)} / \text{GeO}_{(0.5)}$, при развертке напряжения смещения в диапазоне от -4 В до $+6$ В. Первоначально на структуру подавалось положительное смещение от 0 до $+6$ В. При достижении напряжения $+2.2$ В, происходит резкий скачок тока, источник переходит в токовый режим из-за ограничения величины тока (100 мкА). Структура находится при этом ограничении по току до $+1.3$ В. Далее при развертке от 0 до -4 В структура остаётся в низкоомном состоянии вплоть до -0.4 В, где произошёл обратный переход, в таком режиме структура остается до полной развертки в -4 В и при обратном ходе от -4 до 0 В. Таким образом наблюдается переключение структуры. Впоследствии ВАХ на рис. 4 была разбита на 3 области. Первая область в диапазоне напряжений от 0 до $+6$ В, вторая- от $+6$ В до 0 и третья - от -4 В до 0 .

Рис. 4. ВАХ при развертке напряжения смещения в диапазоне от -4 В до $+6$ В.

На рис. 5 представлены 5 последовательных циклов развертки от -1 В до +2 В. Для изучения механизмов проводимости был выбран пятый проход, и он также был разбит на 3 области: от 0 до +2 В, от +2 В до 0 и от -2В до 0.

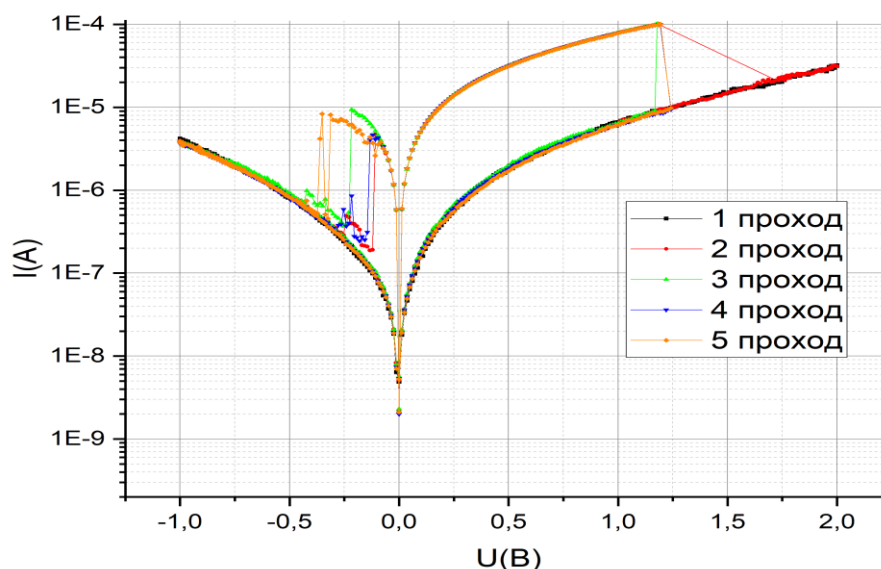


Рис. 5. Пять последовательных проходов развертки от -1 В до + 2 В.

Для установления преобладания того или иного механизма проводимости, наиболее точно описывающего ВАХ исследуемого образца в определённом диапазоне напряжений, графики ВАХ МДП структуры после нулевого цикла(цикл формовки) и после пятого прохода были спрямлены в соответствующих координатах Пула-Френкеля, Шоттки и Фаулера-Нордгейма. Результаты преобразований показаны на рис. 6–8. Анализ представленных на рисунках данных показывает, что механизм проводимости после прохождения образцом нескольких последовательных циклов не изменился и описывается моделью Пула-Френкеля.

На рис. 9 представлены графики, где менялось ограничение по величине тока при фиксированных значениях длительности переключающего импульса (0.5 с) и диапазона напряжения развертки (от -5 В до +4 В). Было проделано 25 циклов. Из анализа графиков следует, что при увеличении величины тока, при фиксированных остальных параметрах, возрастает разница между величиной тока во включенном и выключенном состояниях и повышается стабильность переключения.

На рис. 10 представлены графики, где менялась длительность переключающего импульса при фиксированном ограничении по току (1мА) и диапазон напряжения развертки (от -5 В до +4 В). Было проделано также 25 циклов. Видно, что при увеличении длительности переключающего импульса, при фиксированных остальных параметрах, возрастает разница между величиной тока во включенном и выключенном состояниях и повышается стабильность переключения.

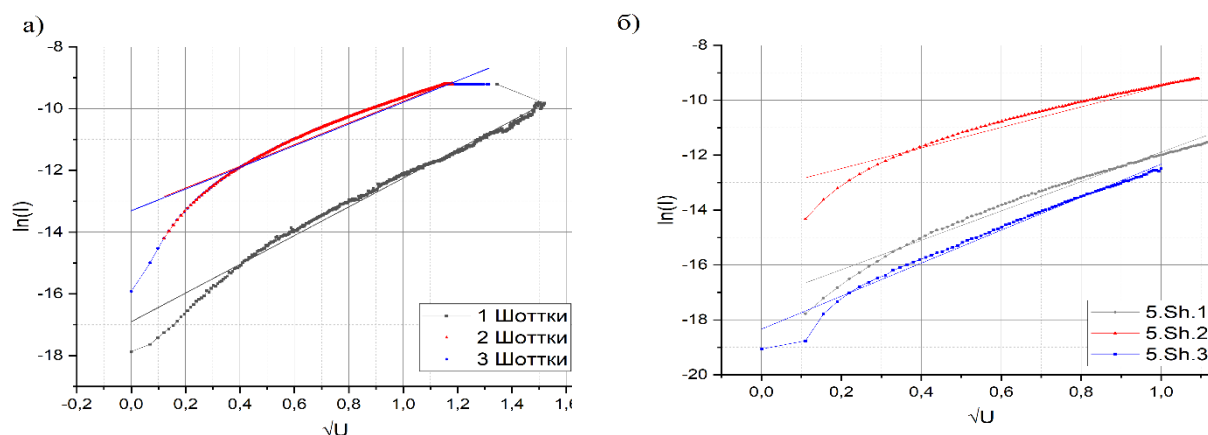


Рис. 6. Зависимость $\ln(I)$ от $\sqrt{U}$ в координатах Шоттки для трех областей ВАХ: а) - нулевой проход; б) - пятый проход

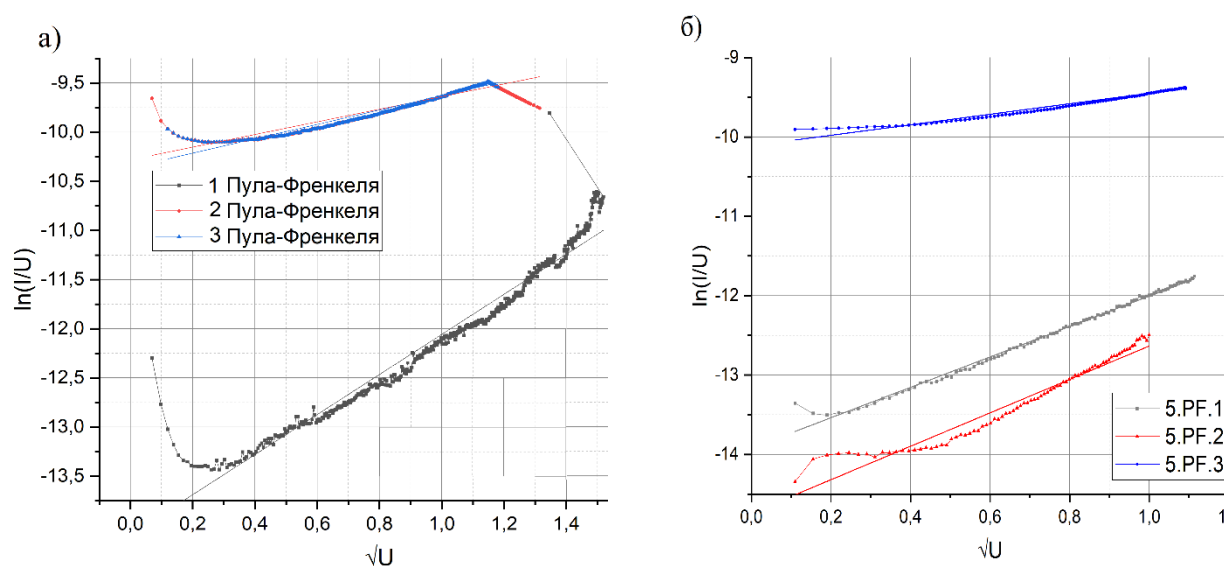


Рис. 7. Зависимость $\ln(I/U)$ от $\sqrt{U}$ в координатах Пула-Френкеля для трех областей ВАХ: а) - нулевой проход; б)- пятый проход

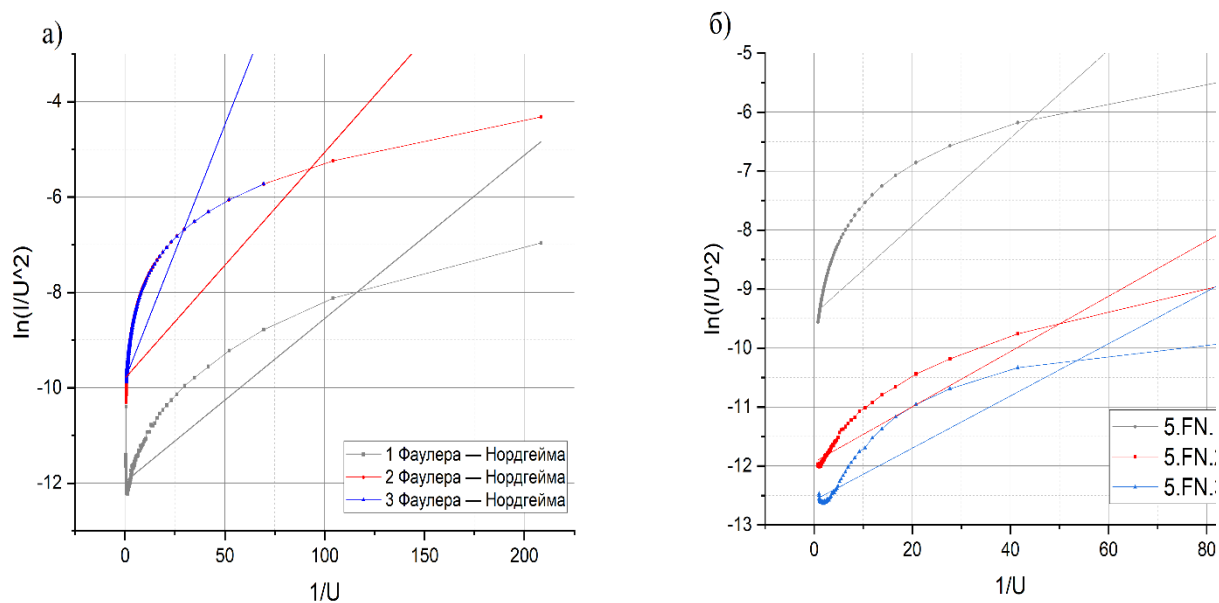


Рис. 8. Зависимость $\ln(I/U^2)$ от $1/U$ в координатах Фаулера–Нордгейма для трех областей:
а) – нулевой проход; б) - пятый проход

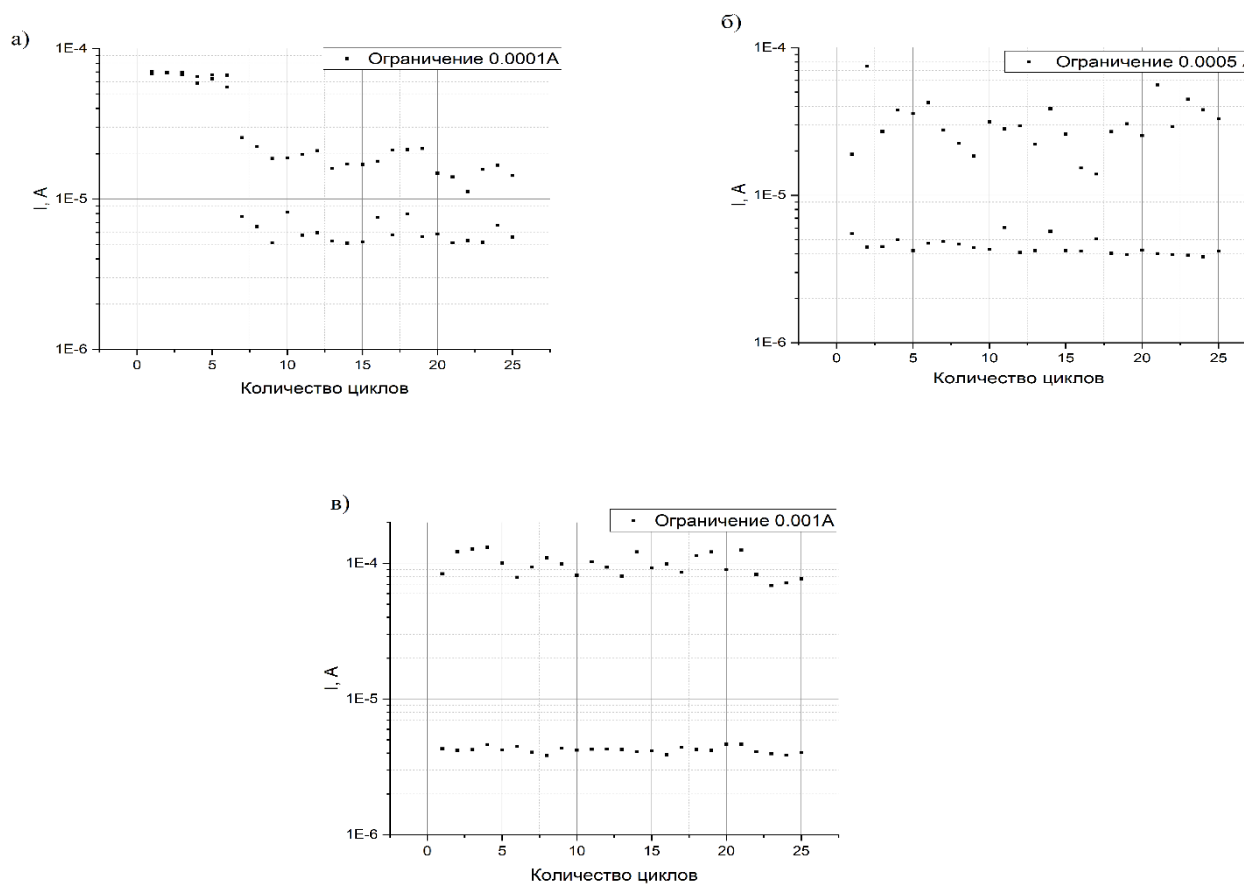


Рис.9. Влияние ограничения по току на величину окна переключения

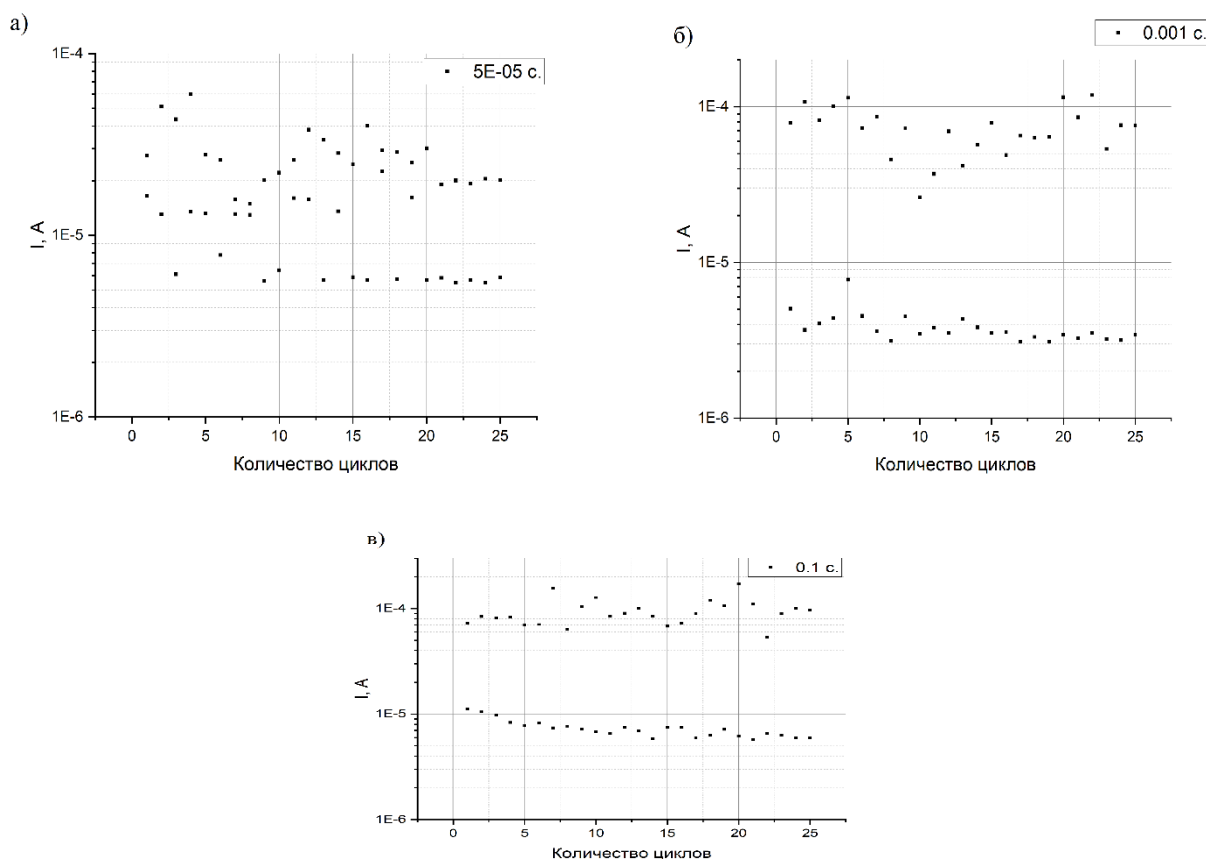


Рис. 10. Влияние длительности переключающего импульса на величину окна переключения

6. Выводы

Проведены измерения ВАХ МДП-структур на плёнках, полученных сораспылением $GeO_{0,5}/SiO_{0,5}$. Проведён анализ проводимости плёнок на основании зависимостей, построенных в координатах Фаулера-Нордгейма ($\ln(I/U^2)$ от $1/U$), Шоттки ($\ln(I)$ от $\sqrt{U}$) и Пула-Френкеля ($\ln(I/U)$ от $\sqrt{U}$). Было выявлено, что механизм проводимости после прохождения образцом нескольких последовательных циклов не изменился и описывается моделью Пула-Френкеля.

Также в результате работы было обнаружено, что при увеличении длительности переключающего импульса или увеличения величины тока при фиксированных остальных параметрах возрастает разница между величиной тока во включенном и выключенном состояниях.

Таким образом, для стабильной работы мемристора на него нужно подавать переключающий импульс либо большой длительности, либо выставлять большой ток.

7. Список литературы

1. В. А. Гриценко, Д.Р. Исламов Физика диэлектрических пленок: механизм транспорта заряда и физические основы приборов памяти. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2017. С 86-90, 303-315.
2. В. А. Гриценко, И.Е. Тыщенко, В.П. Попов, Т.В. Перевалов Диэлектрики в наноэлектронике. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2010. С.224–225.
3. Д. В. Андреев, Диссертация на тему зарядовые явления в диэлектрических пленках МДП-структур и элементов энергонезависимой памяти при сильнополевой инжекции электронов. Калуга 2016. МГТУ им Баумана. С. 15-18.
4. Г.Н. Камаев, А. А. Гисматулин Электрофизические свойства наноструктур Si / SiO₂, полученных методом прямого сращивания. ЖТФ. 2016. Т. 42, вып. 11. С. 73–79.