

Аннотация

В работе решена проблема создания бесформовочных мемристорных структур со сверхтонкими диэлектрическими слоями (5–20 нм). Новизна предлагаемого решения заключается в использовании водородной плазмы электрон-циклотронного резонанса. Метод формирования функционального оксидного слоя опробован на МДП структурах p^{++} -Si/SiO_x/Ni и p^{++} -Si/HfO_x/Ni, которые продемонстрировали превосходные мемристорские свойства. Исследован и предложен механизм переноса заряда в оксидных слоях, подвергнутых воздействию водородной плазмы и в мемристорах в различных состояниях проводимости. Проведён анализ влияния химического состава оксидных слоёв и режимов обработки в плазме на ключевые параметры мемристоров.

Исполнитель (Ф.И.О): Исхакзай Рамин Мохаммад Ханифович

Наименование выпускной научно-квалификационной работы: Исследование и разработка бесформовочного мемристора на основе оксидных диэлектриков, обработанных в водородной плазме электрон-циклотронного резонанса

Объект исследования: мемристоры со структурой p^{++} -Si/SiO_x/Ni и p^{++} -Si/HfO_x/Ni.

Цель: разработать бесформовочный мемристор на основе нестехиометрических оксидных диэлектриков SiO_x и HfO_x путем восстановления в процессе обработки термического SiO₂ и ALD HfO₂ в водородной плазме электрон-циклотронного резонанса, определить механизм транспорта заряда и механизм резистивного переключения исследуемых мемристоров, установить природу ловушек, участвующих в проводимости.

Методы исследования: спектральная эллипсометрия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), электрофизические измерения, аппроксимация экспериментальных ВАХ по известным моделям проводимости.

Теоретическая и практическая значимость:

Полученные результаты демонстрируют возможность получения слоев нестехиометрических оксидов SiO_x и HfO_x с контролируемым составом путем послеростовой обработки стехиометрических оксидов термического SiO₂ и ALD HfO₂ в водородной плазме электрон-циклотронного резонанса. Анализ результатов спектральной эллипсометрии, РФЭС, электрофизических измерений и их моделирования позволили установить режим обработки, при котором МДП структуры на основе нестехиометрических оксидов SiO_x и HfO_x, обработанных в плазме, проявляют резистивные переключения не нуждающиеся в операции формовки. Полученные результаты могут быть применимы для изготовления элементов резистивной памяти ReRAM.

Новизна результатов заключается в том, что впервые:

1. Применен метод получения нестехиометрических оксидов SiO_x и HfO_x ($x < 2$), с контролируемым составом, путем восстановления тонких пленок (5–20 нм) термического SiO₂ и ALD HfO₂ в водородной плазме электрон-циклотронного резонанса.
2. Разработаны структуры p^{++} Si/SiO_x/Ni и p^{++} Si/HfO_x/Ni ($x < 2$) проявляющие свойства бесформовочного обратимого резистивного переключения, функциональный слой которых был получен обработкой в водородной плазме электрон-циклотронного резонанса.
3. Подробно изучен механизм транспорта заряда мемристоров со структурой p^{++} Si/SiO_x/Ni и p^{++} Si/HfO_x/Ni ($x < 2$) в исходном, низкоомном и высокоомном состоянии,

установлено, что ловушками ответственными за проводимость в таких мемристорах являются вакансии кислорода. Также установлен механизм резистивного переключения исследуемых мемристоров.

Область применения: промышленное изготовление резистивной памяти ReRAM

Список ключевых слов: стехиометрические оксиды, послеростовая обработка, водородная плазма электрон-циклотронного резонанса, восстановление оксидов, нестехиометрические оксиды, SiO_x , HfO_x , спектральная эллипсометрия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, механизм транспорта заряда, фонон облегченное туннелирование между ловушками, вакансии кислорода, механизм резистивного переключения, ТОПЗ, формовка, бесформовочный мемристор, резистивная память, ReRAM

Апробация работы:

По результатам исследований, составляющих содержание квалификационной работы, опубликовано 5 печатных работ в рецензируемых отечественных и международных научных журналах, входящих в перечень Высшей аттестационной комиссии, а также 4 работы в сборниках тезисов российских и международных конференций.

Публикации:

Статьи:

1. Voronkovskii V.A., Perevalov T.V., Iskhakzay R.M.H., Aliev V.Sh., Gritsenko V.A., Prosvirin I.P. Phonon-assisted electron tunneling between traps in silicon oxide films treated in hydrogen plasma Journal of Non-Crystalline Solids 2020 Vol. 546 p. 120256.
2. Кручинин В. Н. и др. Оптические свойства тонких пленок SiO_x ($x < 2$), полученных обработкой термического диоксида кремния в водородной плазме //Оптика и спектроскопия. – 2020. – Т. 128. – №. 10. – С. 1467-1472.
3. Перевалов Т. В. и др. Атомная и электронная структура пленок SiO_x , полученных с помощью водородной плазмы электрон-циклотронного резонанса //Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2020. – Т. 158. – №. 6. – С. 1083-1088.
4. Исхакзай Р.М.Х. и др. Транспорт заряда в нестехиометрическом SiO_x , полученном обработкой термического SiO_2 в водородной плазме электронно-циклотронного резонанса //Микроэлектроника. – 2022. – №.1. – С. 28-40.
5. Перевалов Т.В. и др. Бесформовочные мемристоры на основе оксида гафния, обработанного в водородной плазме электрон-циклотронного резонанса //Письма в ЖЭТФ. – 2022. – Вып. 2. – С. 89-93.

Тезисы и труды конференций:

1. Исхакзай Р.М.Х., Воронковский В.А., Алиев В.Ш. Мемристорный эффект в пленках термического SiO_2 , обработанных в водородной ЭЦР плазме //XXI Всероссийская молодежная конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике. – Санкт-Петербург, 2019.
2. Р.М.Х. Исхакзай, В.А. Воронковский, Мемристорный эффект структур $\text{Si/SiO}_x/\text{Ni}$ на основе термического SiO_2 , обработанного в ЭЦР плазме //Школа молодых ученых «Актуальные проблемы полупроводниковых наносистем» АППН-2020. – Новосибирск, 2020.
3. Iskhakzay R., Voronkovskii V., Aliev V, Gritsenko V. Resistive Switching Effect in Thermal SiO_2 Films Treated in Electron-Cyclotron Resonance Hydrogen Plasma 2021 IEEE

22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM) IEEE 2021 p. 67-70.

4. Р.М.Х. Исхакзай, Т.В. Перевалов, И.П. Просвирин, В.Ш. Алиев, В.А. Гриценко, Мемристоры на основе оксида гафния, обработанного в водородной плазме электронно-циклотронного резонанса //Школа молодых ученых «Актуальные проблемы полупроводниковых наносистем» АППН-2021. – Новосибирск, 2021.