

Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов

ФИЦ ИУ РАН, ВМК МГУ, АО НИИМЭ, МАИ

Исследование термических эффектов в HfO₂ RRAM-структурах в процессе Reset

Ганыкина Е.А.^{1,2}, Горнев Е.С.¹, Резванов А.А.^{1,2}
АО «НИИМЭ»¹, МФТИ²

Актуальность

RRAM-устройства, в частности на основе оксида гафния, вызывают наибольший интерес из-за высокой скорости работы, стабильности и долговечности, а также возможности 3D-интеграции. Простая структура, отличная масштабируемость и КМОП-совместимость являются ключевыми характеристиками RRAM-устройств.

В настоящей работе исследуется образование и разрыв проводящего слоя вакансий в структуре Hf/HfO₂/TiN. Работа охватывает теоретическое рассмотрение термических эффектов, возникающих в данной структуре в процессе Reset. Также рассмотрено внедрение слоя Al₂O₃ в структуру Hf/HfO₂/TiN.

Образование филамента

Формирование филамента в оксиде металла включает в себя разрыв связей металлокислород и последующую диффузию выпущенных ионов кислорода. Движущими силами этих двух процессов являются температура и электрическое поле. Из-за сильного кулоновского взаимодействия вакансия и ион кислорода, образовавшиеся при разрыве Hf-O-связи, быстро рекомбинируют. Однако в условиях инъекции электронов из внешней цепи у отрицательного электрода образуются электрически нейтральные вакансии, которые предотвращают быструю рекомбинацию. Дальнейшая диффузия ионов кислорода происходит по прыжковому (междоузельному) механизму (рис. 1).

Таким образом, у отрицательного электрода начинается формирование кластера вакансий. Вследствие различной высоты барьеров у Hf и TiN электродов наблюдается расширение слоя вакансий у верхнего Hf-электрода (рис. 2).

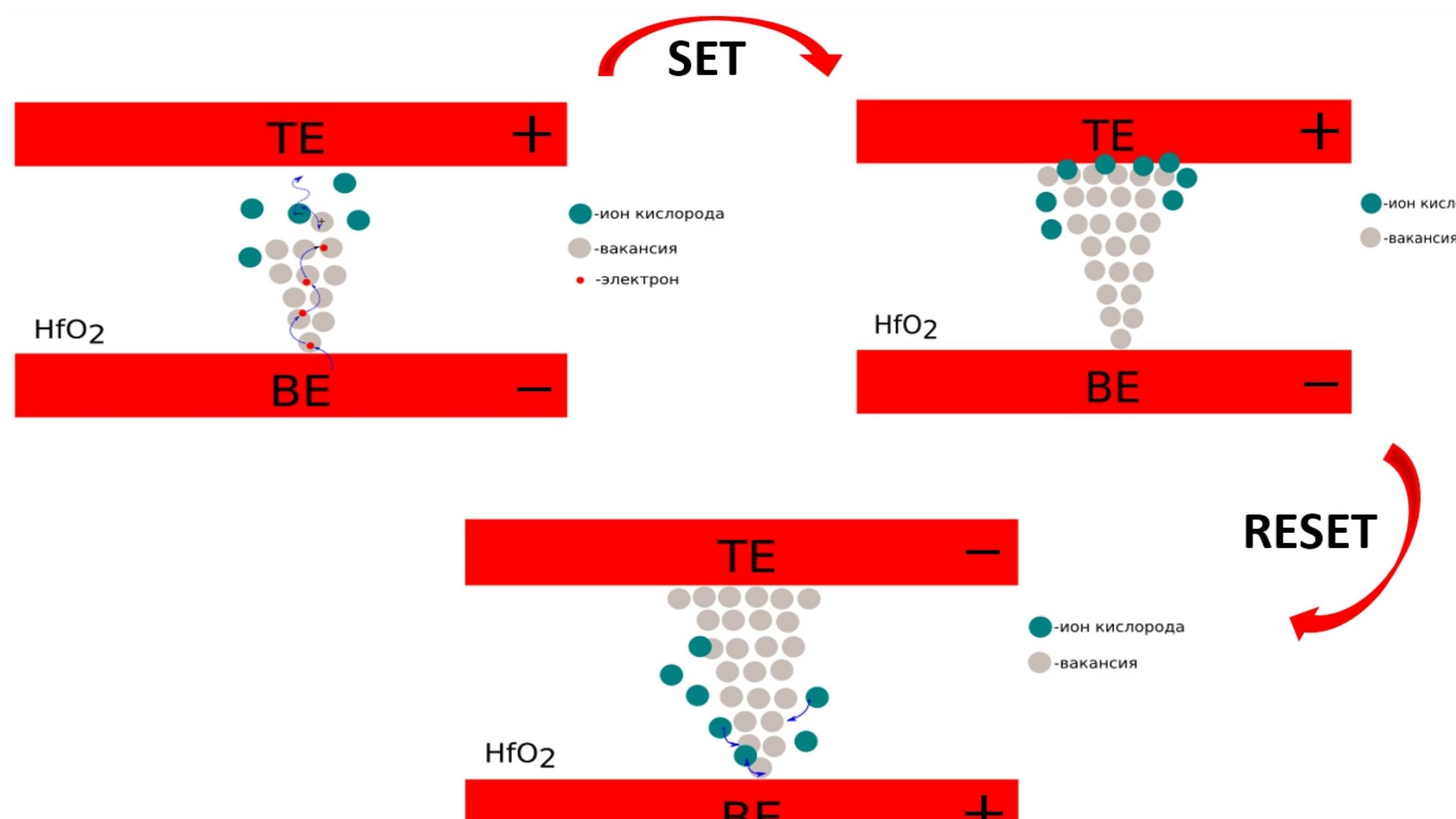


Рис.2 – Схема процессов Set и Reset

Процесс Reset в структуре Hf/HfO₂/TiN

При переключении напряжения (процесс Reset) ионы кислорода начинают собираться вблизи нижнего электрода, который является хорошим блокирующим слоем (криSTALLическая структура TiN не имеет вакансий для внедрения ионов кислорода). Движущие внешним полем и градиентом температуры, ионы кислорода диффундируют к нижнему электрому и втягиваются в область филамента, рекомбинируя с имеющимися там вакансиями, что ведет к разрыву проводящего слоя. Диффузия ионов в направлении от филамента подавляется сильным снижением температуры: более низкая температура вне области филамента снижает скорость диффузии. При моделировании данной структуры было обнаружено, что наибольший разогрев наблюдается в зоне сужения филамента вблизи нижнего электрода (рис. 3).

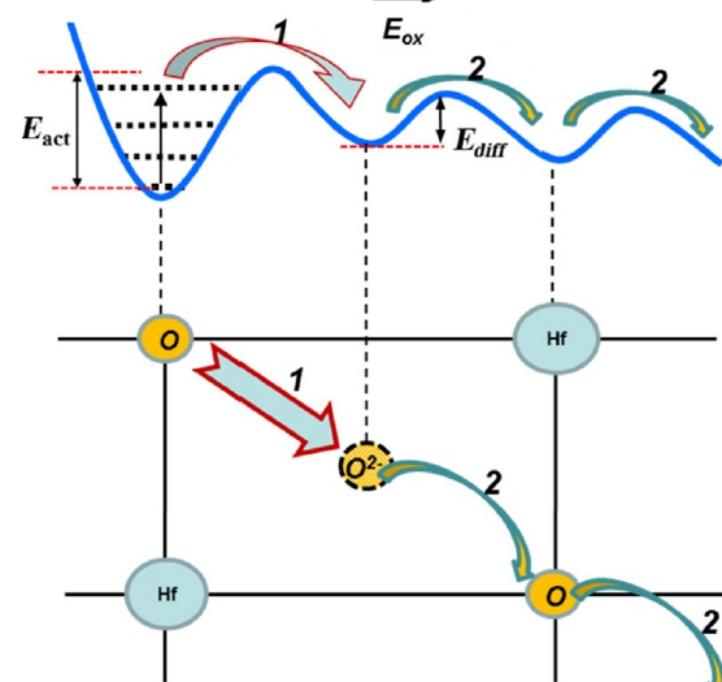


Рис.1 – Схема разрыва Hf-O связи (1) и диффузии ионов кислорода (2)

$$R = v \cdot \exp\left(-\frac{E_a - QE_{eff}^{\lambda}}{k_b T}\right)$$

Частота прыжков по междоузельному механизму (к рис.1)

Моделирование структуры Hf/HfO₂/TiN

При переключении напряжения (процесс Reset) ионы кислорода начинают собираться вблизи нижнего электрода, который является хорошим блокирующим слоем (криSTALLическая структура TiN не имеет вакансий для внедрения ионов кислорода). Движущие внешним полем и градиентом температуры, ионы кислорода диффундируют к нижнему электрому и втягиваются в область филамента, рекомбинируя с имеющимися там вакансиями, что ведет к разрыву проводящего слоя. Диффузия ионов в направлении от филамента подавляется сильным снижением температуры: более низкая температура вне области филамента снижает скорость диффузии. При моделировании данной структуры было обнаружено, что наибольший разогрев наблюдается в зоне сужения филамента вблизи нижнего электрода (рис. 3).

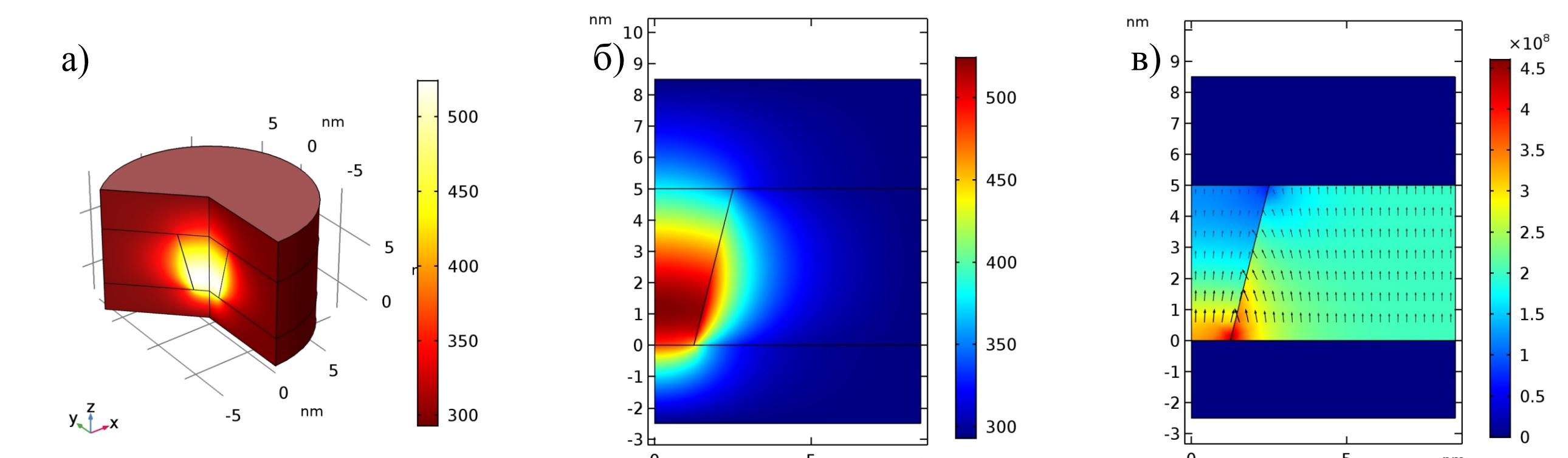


Рис.3 – Моделирование структуры Hf/HfO₂/TiN в среде COMSOL при Vreset=−1B: распределения температуры (а, б) и электрического поля (в)

Внедрение слоя Al₂O₃ в структуру Hf/HfO₂/TiN

Внедрение слоя Al₂O₃ приводит к увеличению асимметрии профиля распределения вакансий, что в свою очередь позволяет увеличить контролируемость процесса переключения (рис. 4,5). Преимущество внедрения слоя Al₂O₃ заключается в том, что сильная химическая связь Al-O позволяет вакансиям аннигилировать более эффективно, даже если полное растворение проводящего филамента не происходит.

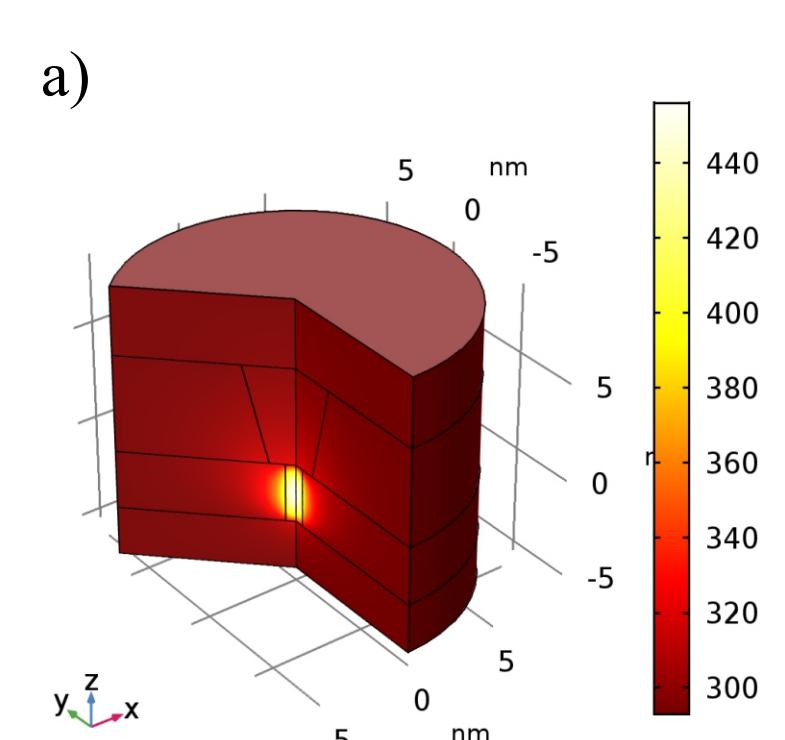


Рис.4 – Моделирование структуры Hf/HfO₂/Al₂O₃/TiN в среде COMSOL при Vreset = −1,5B: распределения температуры (а, б) и плотности тока (в)

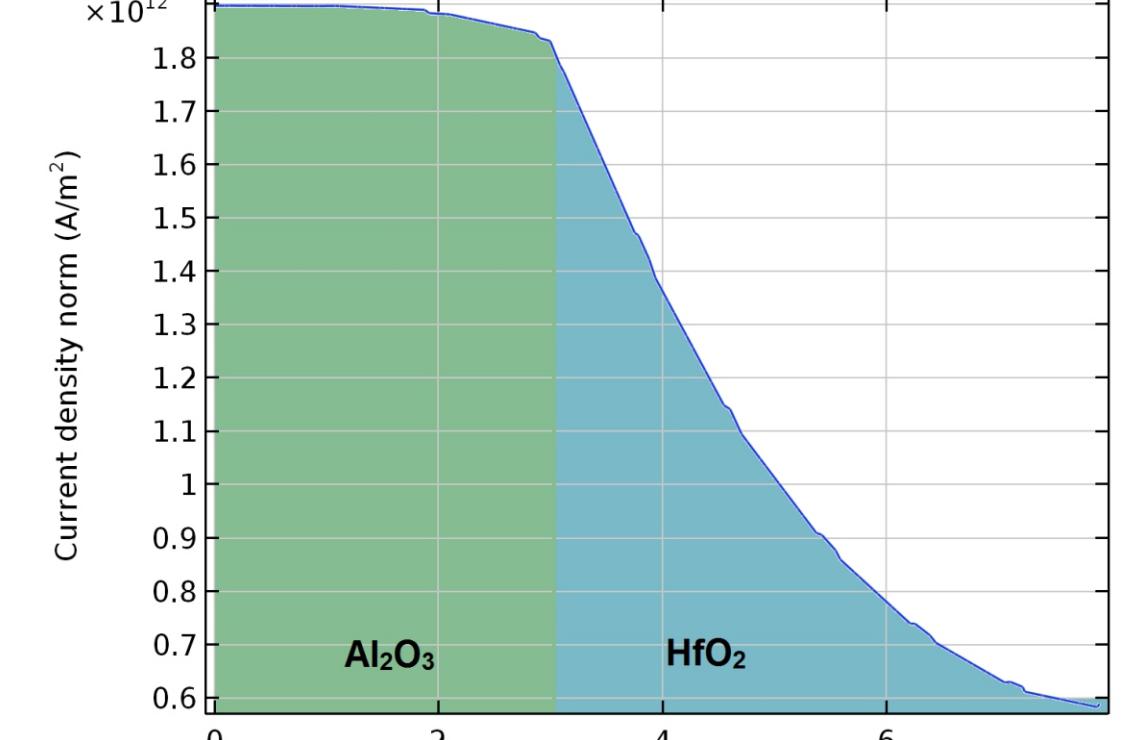


Рис.5 – График зависимости плотности тока от толщины структуры

Выходы

Были рассмотрены и проанализированы процессы формирования и разрыва проводящего слоя вакансий в структуре Hf/HfO₂/TiN. Также были получены распределения температуры и электрического поля в процессе Reset. Было показано, что в низкоомном состоянии электрическое поле и градиент температуры вызывают диффузию ионов кислорода к нижнему краю филамента и их втягивание, что приводит к переключению структуры в высокоомное состояние. Кроме того, внедрение слоя Al₂O₃ в структуру Hf/HfO₂/TiN приводит к увеличению асимметрии профиля распределения вакансий.

Литература

- Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон» // История отечественной электроники. М.: Столичная энциклопедия, 2012.
- Bersuker G., Gilmer D. C., Veksler D. Metal-oxide resistive random access memory (RRAM) technology: Material and operation details and ramifications //Advances in Non-Volatile Memory and Storage Technology: Woodhead Publishing, 2019. C. 35-102.
- Kalanarian A. HfO₂-based Resistance Switching Non-volatile Random Access Memory: Low Power Operation and Reduced Variability : дис. – Stanford University, 2015.
- Goux L. OxRAM technology development and performances // Advances in Non-Volatile Memory and Storage Technology: Woodhead Publishing, 2019. C. 3-33.
- Shahrabi E. et al. Performance improvement of chip-level CMOS-integrated ReRAM cells through material optimization //Microelectronic Engineering. – 2019. – Т. 214. – С. 74-80.