

## Деградация сегнетоэлектрических свойств тонких пленок $\text{HfO}_2\text{:La}$

Залялов Тимур Маратович

Новосибирский государственный университет

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН

Исламов Дамир Ревинирович

[t.zalialov@g.nsu.ru](mailto:t.zalialov@g.nsu.ru)

Увеличение вычислительных мощностей современных компьютеров сопровождается увеличением быстродействия и информационной емкости элементов памяти, снижением их энергопотребления. Распространенным делением типов памяти на два вида является деление на оперативные запоминающие устройства (ОЗУ) и постоянные запоминающие устройства (ПЗУ). Уменьшение энергопотребления энергозависимой памяти и увеличение быстродействия энергонезависимой памяти требует создания универсальной памяти, совмещающей в себе высокую скорость работы ОЗУ и энергонезависимость ПЗУ.

Одним из кандидатов на роль универсальной памяти является сегнетоэлектрическая память, или FeRAM. В основе ее ячейки лежит структура с запоминающей средой, представляющей собой сегнетоэлектрик. Сегнетоэлектрики – это материалы, способные к самопроизвольной поляризации. При приложении внешнего электрического поля поляризация может быть переориентирована. Так можно задавать два хорошо различимых состояния – поляризация «вверх» и «вниз», что будет соответствовать, например, логическим «0» и «1».

В основе выпускаемой в наши дни памяти, лежит цирконат-титанат свинца  $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$  (PZT). Сегнетоэлектрическая память, основанная на PZT обладает огромным, в сравнении с флэш-памятью числом возможных перезаписей:  $10^{14}$  против  $10^5$ . Время чтения и записи FeRAM составляет 50 нс, в то время как флэш-память имеет время чтения порядка 100 нс, а записи –  $10^{-6}$ – $10^{-3}$  с. Однако, при уменьшении толщины сегнетоэлектрических пленок, после достижения определенного порога, начинается катастрофически быстрое исчезновение сегнетоэлектрических свойств пленок. Это существенно влияет на масштабирование ячеек приборов FeRAM, так как при уменьшении площади ячейки необходимо уменьшать толщину диэлектрического слоя. Данное ограничение приводит к тому, что объем памяти производимых в настоящее время устройств не превышает 256 Кбит.

Прорыв в исследовании сегнетоэлектрической памяти случился в 2011 году, когда был открыт сегнетоэлектрический эффект в 10 нм пленках оксида гафния, легированных кремнием [1]. После этого открытия было получено множество данных о наличии сегнетоэлектрических свойств в тонких пленках оксида гафния, легированных целым рядом примесей, а также, в твердых растворах оксида гафния и циркония. Сегнетоэлектричество в данных материалах связывают с возможностью стабилизации центрo-несимметричной орторомбической фазы при малых толщинах диэлектрических пленок.

Благодаря малым толщинам пленок оксида гафния, ячейки FeRAM могут иметь размеры, позволяющие обеспечить высокую информационную емкость прибора памяти. Однако, у технологии FeRAM, основанной на оксиде гафния, имеются две нерешенные проблемы. Первая проблема связана с недостаточно долгим хранением информации. Оксид гафния теряет свою поляризацию за короткое время и считывание информации становится невозможным. В то же время, известны образцы, полученные по другой технологии, обеспечивающие хранение информации на протяжении 10 лет. Но с описанными образцами связана вторая проблема – недостаточное число возможных циклов перезаписи. Окно памяти начинает уменьшаться после  $10^4$  циклов перезаписи [2]. Указанное отличие образцов связано с разными параметрами запоминающей ячейки, в том числе, легирующими примесями активной среды. Существующие проблемы накладывают ограничения на производство памяти по технологии FeRAM на основе  $\text{HfO}_2$  и тормозят ее развитие на уровне разработки и выпуска опытных образцов. Это делает актуальным исследование пленок оксида гафния с разными легирующими примесями для выбора материала запоминающей среды, совмещающего в себе большой ресурс циклирования и длительное хранение информации.

В данной работе представлены зависимости поляризации и концентрации дефектов от числа циклов переключения поля в тонких пленках оксида гафния, легированных лантаном. Показано, что при достижении некоторого порогового количества циклов перезаписи  $\sim 10^5$  концентрация дефектов возрастает на фоне уменьшения окна памяти.

Список публикаций:

[1] T. S. Böske, St. Teichert, J. Müller, D. Bräuhaus, U. Schroeder, U. Böttger, T. Mikolajick, *Appl. Phys. Lett.* 99(10), 102903 (2011).

[2] D.R. Islamov, V.A. Gritsenko, T.V. Perevalov, V.A. Pustovarov, O.M. Orlov, A.G. Chernikova, A.M. Markeev, S. Slesazek, U. Schroeder, T. Mikolajick, G. Ya. Krasnikov, *Acta Materialia* 166, 47-55 (2019).