

## ПОВРЕЖДЕНИЕ КНИ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР С УЛЬТРАТОНКИМ СКРЫТЫМ СЛОЕМ $\text{HfO}_2\text{:Al}$ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ БЫСТРЫМИ ИОНАМИ $\text{Xe}^+$ И $\text{Bi}^+$

В.А. Антонов<sup>1)</sup>, А.К. Гутаковский<sup>1)</sup>, В.И. Вдовин<sup>1)</sup>,  
И.Е. Тыщенко<sup>1)</sup>, В.П. Попов<sup>1)</sup>, А.В. Мьяконких<sup>2)</sup>, К.В. Руденко<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова,  
пр. Ак. Лаврентьева 13, Новосибирск 630090, Россия,

popov@isp.nsc.ru, ava@isp.nsc.ru, gut@isp.nsc.ru, tys@isp.nsc.ru

<sup>2)</sup>Московский физико-технический институт, Институтский переулок 9, Долгопрудный  
141701, Московская область, Россия, miakonkikh@gmail.com, rudenko@gmail.com

Изучены механизмы деградации электрических свойств КНИ-МОП-структур со слоем захороненного диэлектрика  $\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 15 нм под действием облучения быстрыми ионами  $\text{Xe}^{+26}$  (150 МэВ) и  $\text{Bi}^{+51}$  (670 МэВ) флюенсом  $2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . КНИ-структуры формировались методом прямого сращивания и водородного переноса 500 нм пленки Si с предварительно нанесенными слоями  $\text{HfO}_2$ , ламинированных моно-слоями  $\text{Al}_2\text{O}_3$  через каждые 10 монослоев  $\text{HfO}_2$ , на кремний. Структурные изменения в приборных слоях после облучения изучались с помощью высокоразрешающей электронной микроскопии на поперечных срезах. Электрофизические параметры определялись из измерения вольт-амперных характеристик КНИ-МОП-структур. Установлено, что по мере увеличения массы иона происходит уменьшения тока через структуру и уменьшение окна гистерезиса, обусловленного сегнетоэлектрическим эффектом. Полученные результаты объясняются генерацией точечных дефектов в пленке КНИ и кремниевой подложке под диэлектриком, что приводит к увеличению сопротивления кремния. Уменьшение окна памяти связывается с расплавом и последующей кристаллизацией пленок  $\text{HfO}_2$  в треках ионов  $\text{Xe}^+$  и  $\text{Bi}^+$ , в результате чего происходит исчезновение сегнетоэлектрической орторомбической фазы и формирование несегнетоэлектрической t-фазы.

**Ключевые слова:** ионная имплантация; кремний-на-изоляторе;  $\text{HfO}_2$ ; КНИ-МОП-структура; быстрые ионы.

## DESTRUCTION OF SOI DEVICE STRUCTURES WITH AN ULTRATHIN BURIED $\text{HfO}_2\text{:Al}$ LAYER BY SWIFT $\text{Xe}^+$ AND $\text{Bi}^+$ ION IRRADIATION

Valentin Antonov<sup>1)</sup>, Anton Gutakovskii<sup>1)</sup>, Vladimir Vdovin<sup>1)</sup>, Ida Tyschenko<sup>1)</sup>,  
Vladimir Popov<sup>1)</sup>, Andrey Miakonkikh<sup>2)</sup>, Konstantin Rudenko<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>A.V. Rzhzanov Institute of Semiconductor Physics, 13 Lavrentyev Ave., 630090 Novosibirsk,  
Russia, popov@isp.nsc.ru, ava@isp.nsc.ru, gut@isp.nsc.ru, vivdivin@isp.nsc.ru, tys@isp.nsc.ru

<sup>2)</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutsky Lane, 141701 Dolgoprudny,  
Moscow Region, Russia, miakonkikh@gmail.com, rudenko@gmail.com

The degradation mechanisms of the MOS structure electrical properties based on the silicon-on-insulator (SOI) structure with the 15 nm thick buried  $\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  layer were investigated under the irradiation with swift  $\text{Xe}^{+26}$  (150 MeV) and  $\text{Bi}^{+51}$  (670 MeV) ions. The ion fluence was  $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ . The SOI structures were prepared by direct wafer bonding and subsequent hydrogen transfer of a 500 nm thick Si layer coated with 10:1  $\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  stacks deposited by atomic layer deposition. Structural changes in the layers after irradiation were studied using high-resolution cross-sectional electron microscopy. The electrical parameters were extracted from the current-voltage (I-V) characteristics of the MOS structures. As the ion mass increases, the current through the MOS structure decreases and the hysteresis window due to the ferroelectric effect decreases, too. A decrease in the current was explained by the point defects generation under the ion-bombardment that results in the SOI film destruction. As result, silicon layer resistance grows. In the high-k dielectric, the swift ion implantation produces molten ion tracks, which destroy the ferroelectric orthorhombic phase. Upon subsequent crystallization of  $\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , a tetragonal t-phase of  $\text{HfO}_2$  is formed in ion tracks. As result, a decrease in the memory window takes place, as the ion mass grows. The removal of material from the high-k dielectric film was detected by high-resolution electron microscopy.

The ion track size was estimated from the size of the removed material area. These regions were about 4 and 6 nm wide in the case of  $\text{Xe}^+$  and  $\text{Bi}^+$  ions, respectively.

**Keywords:** ion implantation; silicon-on-insulator;  $\text{HfO}_2$ ; swift ions; SOI MOS-structure.

## Введение

Использование двухзатворного транзистора с подзатворным диэлектриком  $\text{HfO}_2$  в качестве базового элемента может значительно увеличить быстродействие КМОП-интегральных схем (ИС) и снизить их энергопотребление по сравнению с транзисторами на основе  $\text{SiO}_2$ . Создание таких ИС чрезвычайно важно для применения в условиях космоса. Однако присутствующее в космосе галактическое излучение, в составе которого наряду с протонами и  $\alpha$ -частицами присутствуют и тяжелые ионы высокой энергии (менее 1%), может привести как к необратимым разрушениям ИС при прямом взаимодействии тяжелых ионов с приборной структурой, так и к генерации вторичных частиц, например, за счет торможения в корпусе ИС.

Поэтому целью данной работы было изучить механизмы деградации псевдо-МОП транзистора на основе структур металл-диэлектрик-полупроводник ( $\Psi$ -МОП) с подзатворным диэлектриком  $\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  под действием высокоэнергетичных тяжелых ионов  $\text{Xe}^+$  и  $\text{Bi}^+$ .

## Методика эксперимента

Поликристаллические пленки  $\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  в соотношении числа монослоев 10:1 были сформированы методом плазменного атомно-слоевого осаждения на подложки Si (100) диаметром 100 мм при температуре 250 °С. Полная толщина осажденных пленок была около 15 нм. Методом водородно-индуцированного переноса пленка  $\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  вместе со слоем p-Si толщиной около 500 нм переносилась на подложку p-Si с удельным сопротивлением 3.5-10 Ом·см.

С целью создания геттерирующего слоя кремния под захороненным диэлектриком нанометровой толщины в подложку предварительно были имплантированы

ионы  $\text{CO}^+$ . После имплантации структуры подвергались ступенчатому быстрому термическому отжигу (RTA) длительностью 30 сек с интервалом 100 °С в диапазоне от 650 до 950 °С.

После отжига на КНИ структурах были изготовлены МОП-структуры, в которых контакты истока и стока были сформированы методом магнетронного напыления вольфрама площадью  $S = 2.25 \times 10^{-4} \text{ см}^2$ . Толщина контактной площадки была 100 нм, расстояние между контактами было 300 мкм. Затвор со стороны подложки формировался с помощью контакта InGa пасты между пластиной Si и медным держателем установки.

Созданные МОП структуры подвергались облучению быстрыми тяжелыми ионами  $\text{Xe}^+$  с энергией 150 МэВ или ионами  $\text{Bi}^+$  с энергией 670 МэВ. Доза ионов в обоих случаях составляла  $2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , средняя плотность потока ионов была  $\leq 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводилось в интервале смещений от -10 до +10 В между истоком и затвором при комнатной температуре.

## Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показаны ВАХ в прямом и обратном направлениях пропускания тока МОП-структур до и после имплантации ионами  $\text{Xe}^+$  и  $\text{Bi}^+$ . Из рисунка видно, что в неимплантированных структурах наблюдается гистерезис с окном памяти около 2 В. Имплантация ионов  $\text{Xe}^+$  приводила к уменьшению окна памяти практически на порядок величины и уменьшению тока через структуру. Это может быть обусловлено двумя причинами: во-первых, увеличением сопротивления в структуре в целом за счет разупорядочения слоев КНИ и кремниевой подложки; во-вторых, изменениями, происходящими в диэлектрике под действием бомбардировки. По-

сле имплантации ионов  $\text{Bi}^+$  эти эффекты еще больше усиливаются. Окно памяти практически исчезает, а ток через структуру уменьшается более чем на порядок величины по сравнению с необлученной структурой.

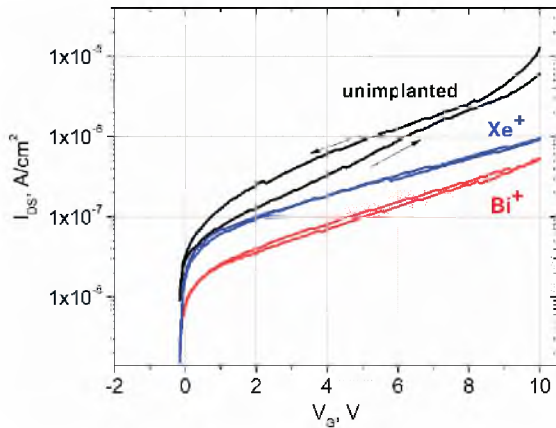


Рис. 1. ВАХ КНИ МОП-структур до и после имплантации ионами  $\text{Xe}^+$  и  $\text{Bi}^+$

На рис. 2 представлены электронно-микроскопические изображения высокого разрешения поперечных срезов КНИ структур, облученных ионами  $\text{Xe}^+$  и  $\text{Bi}^+$ .

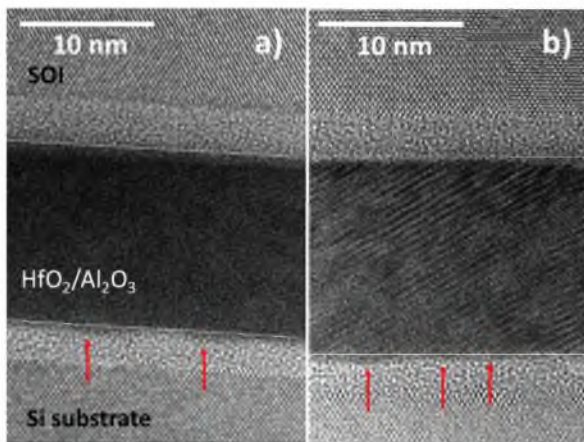


Рис. 2. Высокоразрешающие электронно-микроскопические изображения поперечных срезов КНИ структур после имплантации ионами  $\text{Xe}^+$  (150 МэВ) и  $\text{Bi}^+$  (670 МэВ). Стрелками показаны области вынесенного материала диэлектрика

Из рисунка видно, что нижняя граница раздела после облучения быстрыми ионами содержит куполообразный рельеф,

обусловленный выносом материала из пленки захороненного диэлектрика. Эти купола имеют размер в поперечнике около 4 нм в структурах, облученных ионами  $\text{Xe}^+$ , и около 6 нм в структурах, облученных ионами  $\text{Bi}^+$ . Формирование куполов естественно рассматривать как результат квазиплавления кремния и пленок диэлектрика в треке пролетающего иона и последующей их кристаллизации [1-3]. Различие в плотностях  $\text{HfO}_2$  и кремния в расплавленном и твердом состояниях может привести к вытеснению материала из пленки диэлектрика в подложку кремния.

### Заключение

Обнаружено снижение тока в КНИ-МОП-структурах со слоем  $\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 15 нм под действием облучения ионами  $\text{Xe}^+$  и  $\text{Bi}^+$  высоких энергий. Этот эффект тем больше, чем больше масса и энергия иона. Под действием бомбардировки быстрыми ионами наблюдалось уменьшение окна памяти ВАХ, обусловленное сегнетоэлектрическим эффектом. Полученные результаты объясняются генерацией точечных дефектов и изменением фазового состава диэлектрика в треке ионов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант №25-19-20049.

### Библиографические ссылки

1. Комаров Ф.Ф. Нано- и микроstructuring твердых тел быстрыми тяжелыми ионами. *УФН* 2017; 187 (5): 465-504.
2. Medvedev N., Volkov A.E., Rymzhanov R., Akhmetov F., Gorbunov S., Voronkov R., Babaev P. Frontiers, challenges, and solutions in modeling of swift heavy ion effects in materials. *J. Appl. Phys.* 2023; 133: 100701.
3. Medvedev N., Volkov A.E. Multitemperature atomic ensemble: Nonequilibrium evolution after ultrafast electronic excitation. *Phys. Rev. E* 2024; 110: 024142.