

Эффект резистивного переключения в структурах на базе тонких пленок нитрида кремния

П. А. Крупенков¹⁾, И. А. Романов¹⁾, Ф. Ф. Комаров¹⁾, Н. С. Ковальчук²⁾,
С. А. Демидович²⁾

¹⁾ Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, e-mail: rct.krupenko@bsu.by,

²⁾ ОАО «Интеграл», Минск, Беларусь, e-mail: 7033696@mail.ru

В настоящей работе исследованы процессы резистивного переключения и электрофизические свойства мемристорных структур ITO/SiN_x/Si и Ni/SiN_x/Si. Анализ вольт-амперных характеристик показал, что основными механизмами переноса носителей заряда в исследуемых структурах является механизм туннелирования между ловушками в нитриде кремния и перенос носителей заряда по проводящим каналам, образовавшимся из материалов контактов в слоях SiN_x.

Ключевые слова: нитрид кремния; резистивное переключение; мемристор; вольт-амперные характеристики; механизмы проводимости.

The effect of resistive switching in structures based on thin films of silicon nitride

P. A. Krupenkov¹⁾, I. A. Romanov¹⁾, F. F. Komarov¹⁾, N. S. Kovalchuk²⁾,
S. A. Demidovich²⁾

¹⁾ Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: rct.krupenko@bsu.by

²⁾ JSC "INTEGRAL" - Holding Management Company, Minsk, Belarus, e-mail: 7033696@mail.ru

In this paper, the processes of resistive switching and the electrophysical properties of memristor structures ITO/SiN_x/Si and Ni/SiN_x/Si are investigated. The analysis of volt-ampere characteristics showed that the main mechanisms of charge carrier transfer in the studied structures are the mechanism of tunneling between traps in silicon nitride and the transfer of charge carriers through conductive channels formed from contact materials in SiN_x layers.

Keywords: silicon nitride; resistive switching; memristor; volt-ampere characteristics; conduction mechanisms.

Введение

В связи с повышением требований вычислительных систем к характеристикам запоминающих устройств, в настоящее время активно разрабатывается новый тип полупроводниковой энергонезависимой памяти – мемристоры [1]. Преимуществами мемристоров перед традиционными элементами флеш-памяти являются: более высокая степень интеграции, большее время хранения информации, радиационная стойкость, низкое энергопотребление [2].

Принцип работы мемристоров основан на использовании двух устойчивых состояний материала: состояние с высоким сопротивлением (СВС) и состояние с низким сопротивлением (СНС). Переключение между состояниями осуществляется путем изменения полярности приложенного к элементам памяти напряжения. Применение нестехиометрического нитрида кремния SiN_x ($x < 1,33$) в качестве

диэлектрика, обладающего свойствами резистивного переключения, позволяет решить проблему совместимости мемристоров с традиционной кремниевой микроэлектронной технологией.

В настоящей работе представлены результаты исследования электрофизических свойств структур ИТО/SiN_x/Si и Ni/SiN_x/Si, обладающих эффектом резистивного переключения. Обсуждаются возможные механизмы проводимости в состояниях с низким и высоким сопротивлением.

1. Методы получения и исследования мемристоров

Исходная структура SiN_x/Si для образца ИТО/SiN_x/Si была изготовлена на кремниевой подложке марки КДБ-10 с кристаллографической ориентацией (100). Пленка нитрида кремния наносилась методом химического осаждения из газовой фазы в реакторе пониженного давления (метод LPCVD) из смеси азота (N₂) и моносилана (SiH₄) при температуре подложки 800 °С. Для получения неоднородного состава по глубине соотношение реагирующих газов SiH₄/N₂ варьировалось в процессе осаждения. Далее образец проходил быстрый термический отжиг при температуре 1200 °С в атмосфере аргона в течение 3 минут. Для создания структур ИТО/SiN_x/Si на исходные и отожженные образцы SiN_x/Si методом реактивного магнетронного распыления при температуре 290 °С наносились пленки ИТО с поверхностным сопротивлением 60 Ом/□. Нанесение пленок ИТО выполнялось на промышленной установке непрерывного действия «Плазма ЛНД» с автоматическим поддержанием постоянного тока разряда. Использовалась мишень состава (In-85%, Sn-15%). Методом фотолинтографии на образцах были сформированы квадратные площадки из оксида индия-олова размером 300 × 300 мкм. Толщины пленки SiN_x и нанесенного контакта ИТО измерялись на сколе методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Для анализа распределения элементов по глубине образца SiN_x/Si использовался метод резерфордовского обратного рассеяния (РОР). Моделирование профиля распределения элементов по глубине на основе данных РОР проводилось в программе SIMNRA 7.0, измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) – на анализаторе параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500 при комнатной температуре.

Для образца Ni/SiN_x/Si структура SiN_x/Si также была изготовлена на кремниевой подложке марки КДБ-10 с кристаллографической ориентацией (100). Пленка нитрида кремния наносилась методом химического осаждения из паровой фазы с индуктивно связанной плазмой (метод LPCVD) из смеси азота (N₂) и моносилана (SiH₄) при температуре подложки 350 °С. Далее образец проходил быстрый термический отжиг при температуре 1200 °С в атмосфере аргона в течение 3 минут. Затем были нанесены контакты из никеля. Толщина пленки SiN_x/Si образца Ni/SiN_x/Si, измерялась методом эллипсометрии.

2. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены изображения исследуемых мемристорных структур. Толщины слоев нитрида кремния в структурах ИТО/SiN_x/Si и Ni/SiN_x/Si, измеренные методом растровой электронной микроскопии (РЭМ), составили 200 и 52,9 нм соответственно. Методами РЭМ и резерфордовского обратного рассеяния

установлено, что пленка нитрида кремния в структуре ITO/SiN_x/Si имеет высокую неоднородность состава по глубине. Параметр x для этого образца варьируется в диапазоне 0,42 – 0,92. Показатель преломления нитрида кремния в структуре Ni/SiN_x/Si, измеренный методом эллипсометрии на длине волны 632,8 нм, составил 2,5, что соответствует параметру $x \approx 0,92$ [3].

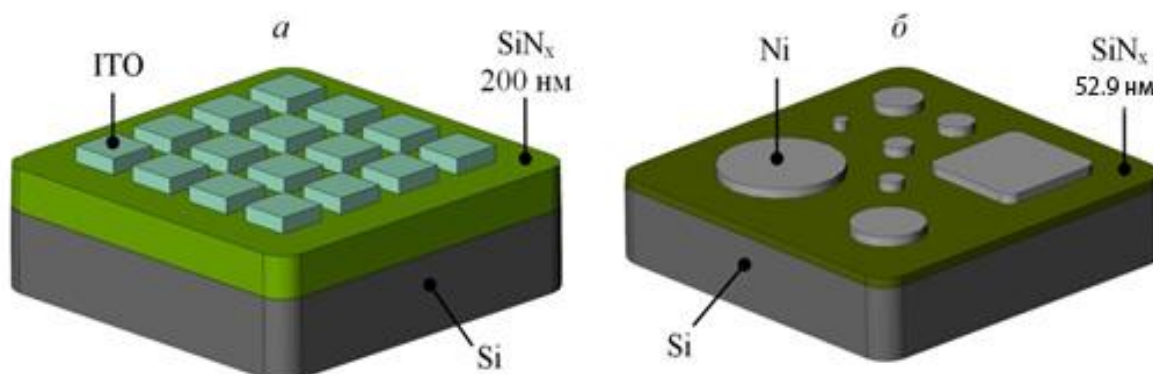


Рис. 1. Изображения исследуемых структур (a – ITO/SiN_x/Si, b – Ni/SiN_x/Si)

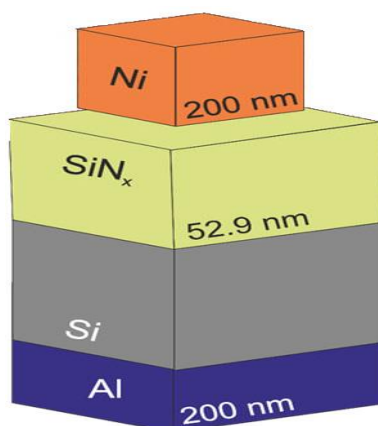


Рис. 2. Изображение структуры Ni/SiN_x/Si

Соотношение сопротивлений для 2-х состояний структуры ITO/SiN_x/Si составило 180. В первом случае необратимый пробой возник после 24-го цикла, во втором после 45-го.

Соотношение средних сопротивлений в двух состояниях структуры Ni/SiN_x/Si составило 4.1, что значительно меньше, чем для структуры ITO/SiN_x/Si.

Известно, что нестехиометрический нитрид кремния является диэлектриком с высокой концентрацией дефектов. Среди основных механизмов переноса носителей заряда можно выделить механизм Пула-Френкеля и механизм туннелирования между ловушками [2, 3].

На рис. 3, a изображен цикл ВАХ структуры ITO/SiN_x/Si. Стрелками указано направление измерения. Напряжению включения (U_{ON}) соответствует переход из СВС в СНС, напряжению выключения (U_{OFF}) – переходу из СНС в СВС. Путем

измерения 70 циклов ВАХ установлено, что значения напряжений включения находятся в диапазоне 12 – 30 В, напряжения выключения – в диапазоне -10 – -25 В.

ВАХ в состоянии с высоким сопротивлением аппроксимированы моделью туннелирования между ловушками (рис. 3, б). Концентрации ловушек, определенные для прямой и обратной ветвей, имеют величину близкую к 10^{20} см^{-3} , что хорошо согласуется с литературными данными для нестехиометрического нитрида кремния [1–3]. Аппроксимация этих ветвей законом Пула-Френкеля дает слишком высокие значения диэлектрической проницаемости слоя SiN_x порядка 25 – 28 [3].

В состоянии СНС ветви ВАХ несимметричны. Прямая ветвь ВАХ аппроксимирована линейной зависимостью тока от напряжения с проводимостью $\sigma = 3 \times 10^{-7} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$. Эта величина близка к проводимости аморфного кремния. Несимметричность ВАХ и высокая проводимость свидетельствует в пользу того, что проводящий канал формируется из материала контакта, проводимость которого на несколько порядков превышает проводимость нитрида кремния [1].

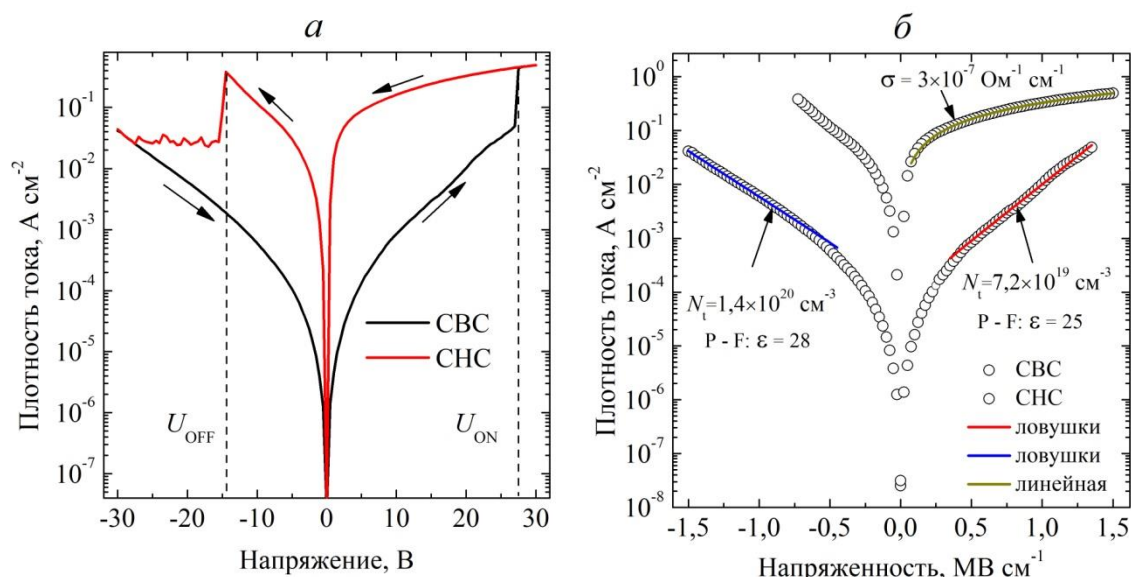


Рис. 3. Один цикл вольт-амперных характеристик структуры ИТО/ SiN_x /Si (а); аппроксимация вольт-амперных характеристик структуры ИТО/ SiN_x /Si (б)

На рис. 4, представлены ВАХ структуры $\text{Ni}/\text{SiN}_x/\text{Si}$. Обратные ветви ВАХ аппроксимированы линейными зависимостями с проводимостями $5,7 \times 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ и $15 \times 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1} - 115 \times 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$. Эти величины на 2–3 порядка превышают проводимость предыдущего образца в СНС. Для этого образца предполагается, что и в состоянии с низким сопротивлением и в состоянии с высоким сопротивлением проводимость обусловлена протеканием тока по каналам, сформировавшимся из материала контакта. Значения U_{ON} и U_{OFF} для этой структуры составляют 6 и -5 В соответственно.

Эффекта резистивного переключения в структурах, не прошедших термообработку, не обнаружено.

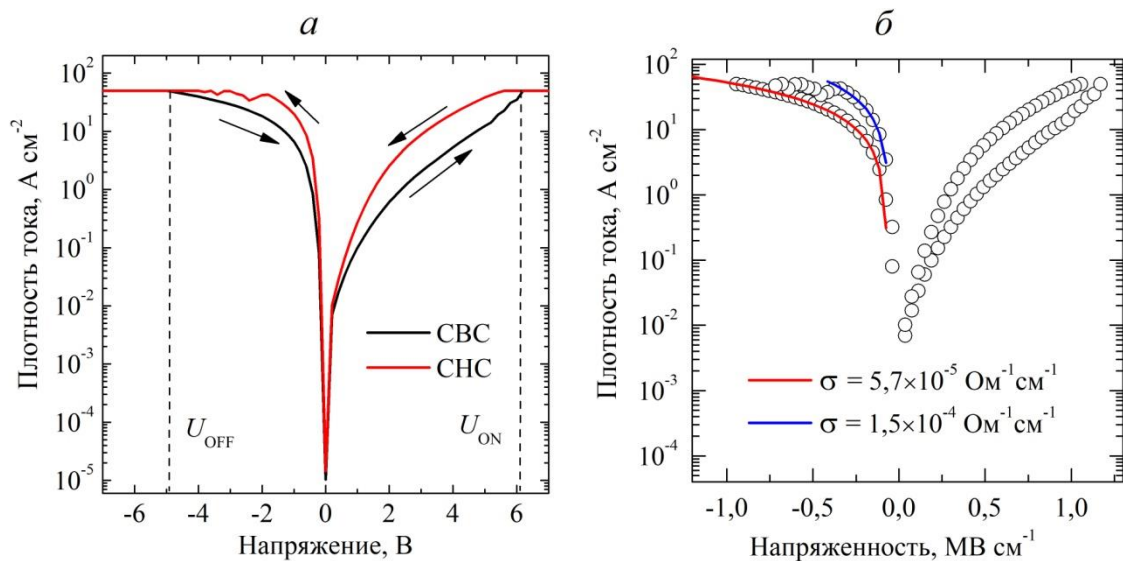


Рис. 4. Один цикл вольт-амперных характеристик структуры Ni/SiN_x/Si (а); аппроксимация вольт-амперных характеристик структуры Ni/SiN_x/Si (б)

Заключение

1. По вольт-амперным характеристикам идентифицированы механизмы проводимости мемристорных структур на основе пленок SiN_x;
2. Установлено, что проводимость структуры ИТО/SiN_x/Si в СВС описывается механизмом туннелирования между ловушками в нитриде кремния с концентрацией ловушек $\sim 10^{20}$ см⁻³. В СНС проводимость структуры сравнима с проводимостью аморфного кремния и составляет 3×10^{-7} Ом⁻¹см⁻¹;
3. Обратные ветви ВАХ структуры Ni/SiN_x/Si в СНС и СВС аппроксимированы линейными зависимостями с проводимостями $1,5 \times 10^{-4}$ и $5,7 \times 10^{-5}$ Ом⁻¹см⁻¹. Проводимость объясняется протеканием носителей заряда по проводящим каналам, образовавшимся из материала контакта.

Библиографические ссылки

1. Мемристорная структура с эффектом переключения сопротивления на основе тонких пленок нитрида кремния / Ф. Ф. Комаров [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2020. Т. 64, № 5. С. 403–410. DOI:10.29235/1561-8323-2020-64-4-403-410.
2. Charge transport mechanism in SiN_x-based memristor / A. A. Gismatulin [et al.] // Applied Physics Letters. 2019. Т. 115, № 25. С. 253502(5 с.). DOI:10.1063/1.5127039.
3. Насыров К. А., Гриценко В. А. Механизмы переноса электронов и дырок в диэлектрических плёнках // Успехи физических наук. 2013. Т. 183, № 10. С. 1099–1114.