

ЭФФЕКТ РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В СТРУКТУРАХ НА БАЗЕ ТОНКИХ СЛОЕВ НИТРИДА КРЕМНИЯ

П. А. Крупенков

pasha.krupenkov1@mail.ru;

Научный руководитель — И. А. Романов, старший преподаватель

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 являются механизм туннелирования между ловушками в нитриде кремния и перенос носителей заряда по проводящим каналам, формирующимся в слоях SiN_x.

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

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 переключении между двумя устойчивыми состояниями: состояние с высоким сопротивлением (СВС) и состояние с низким сопротивлением (СНС). 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 ITO/SiN_x/Si и Ni/SiN_x/Si, обладающих эффектом резистивного переключения. Обсуждаются возможные механизмы проводимости в состояниях с низким и высоким сопротивлением.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пленки нитрида кремния с избытком кремния (SiN_x) выращены на кремниевых подложках р-типа марки КДБ-10. Пленка SiN_x для структуры ITO/SiN_x/Si изготовлена методом химического осаждения из газовой фазы при низком давлении из смеси азота (N₂) и моносилана (SiH₄) при

температуре 800 °С. Пленка нитрида кремния для структуры Ni/SiN_x/Si нанесена методом химического осаждения из газовой фазы с индуктивно-связанной плазмой из смеси N₂ и SiH₄ при температуре 350 °С. Термический отжиг структур проводился при температуре 1200 °С в атмосфере аргона в течение 3 минут. Верхние контакты оксида индия-олова (ИТО) и никеля (Ni) наносились методом магнетронного распыления. Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводилось на анализаторе параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500 при комнатной температуре.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Толщины слоев нитрида кремния в структурах ИТО/SiN_x/Si и Ni/SiN_x/Si, измеренные методом растровой электронной микроскопии (РЭМ), составили 200 и 53 нм соответственно. Методами РЭМ и резерфордовского обратного рассеяния установлено, что пленка нитрида кремния в структуре ИТО/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].

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. 1, *а* изображен цикл ВАХ структуры ИТО/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. 1, *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 СНС ветви ВАХ несимметричны. Прямая ветвь аппроксимирована линейной зависимостью тока от напряжения с проводимостью $\sigma = 3 \times 10^{-7}$ Ом⁻¹ см⁻¹. Эта величина близка к проводимости аморфного

кремния. Несимметричность ВАХ и высокая проводимость свидетельствует в пользу того, что проводящий канал формируется из кремния или материала контакта ИТО, проводимость которого на несколько порядков превышает проводимость нитрида кремния [1].

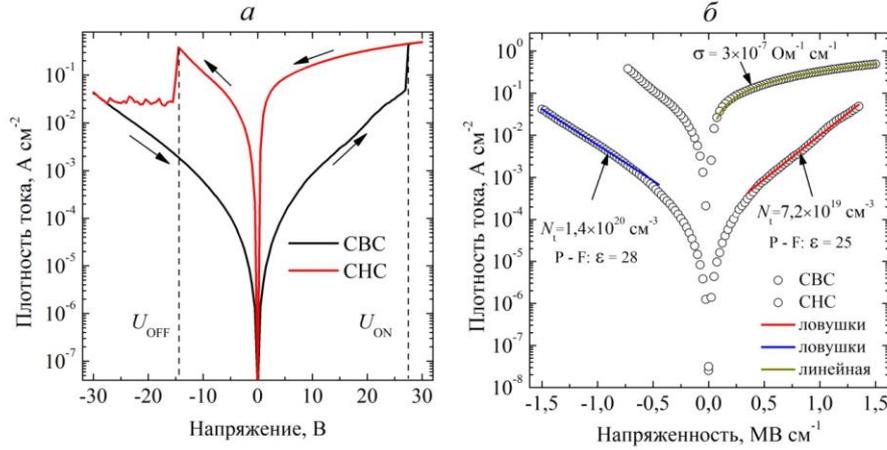


Рис. 1. Один цикл вольт-амперных характеристик структуры ИТО/SiN_x/Si (а); аппроксимация вольт-амперных характеристик структуры ИТО/SiN_x/Si (б)

На рис. 2, представлены вольт-амперные характеристики структуры Ni/SiN_x/Si. Обратные ветви ВАХ аппроксимированы линейными зависимостями с проводимостями $5,7 \times 10^{-5}$ и $1,5 \times 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$. 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, сформированным из кремния или никеля. Значения U_{ON} и U_{OFF} для этой структуры составляют 6 и -5 В соответственно.

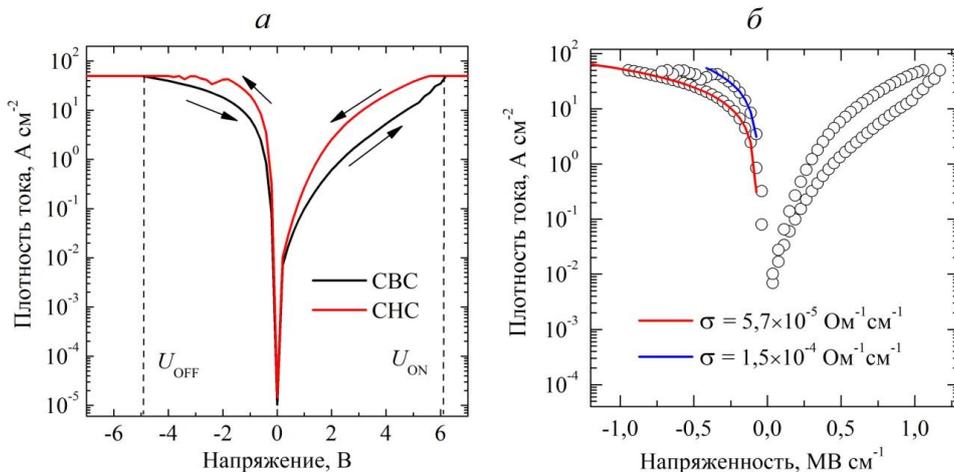


Рис.2. Один цикл вольт-амперных характеристик структуры Ni/SiN_x/Si (а); аппроксимация вольт-амперных характеристик структуры Ni/SiN_x/Si (б)

Формирование проводящих каналов в нашем случае может происходить за счет проникновения атомов из материалов контактов (Si, Sn, In, Ni) в диэлектрический слой SiN_x либо за счет возникновения пробоев между нанокристаллами кремния в матрице SiN_x, сформировавшимися в процессе высокотемпературного отжига. Эффекта резистивного переключения в структурах, не прошедших термообработку, не обнаружено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По вольт-амперным характеристикам идентифицированы механизмы проводимости мемристорных структур на основе пленок SiN_x.

Установлено, что проводимость структуры ITO/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. 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 структур в СНС объясняется переносом носителей заряда по проводящим каналам в слоях SiN_x.

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.
2. Charge transport mechanism in SiN_x-based memristor / A.A. Gismatulin [et. al.] // Applied Physics Letters. 2019. Vol. 115, N 25. P. 253502(5 p.).
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.