

ISSN 1561-2430 (Print)
ISSN 2524-2415 (Online)
УДК 621.315

Поступила в редакцию 27.10.2017
Received 27.10.2017

А. Г. Новиков, О. Ю. Наливайко, П. И. Гайдук

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОКИСЛЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МОП-КОНДЕНСАТОРОВ С НАНОКРИСТАЛЛАМИ Ge

Аннотация. Проведены исследования структуры и электрофизических характеристик МОП-конденсаторов, сформированных путем термического окисления в различных режимах тонких слоев SiGe сплавов на туннельном диэлектрике. Методом просвечивающей электронной микроскопии показано формирование нанокристаллов Ge и обнаружено влияние режимов окисления на структуру слоев SiO₂. С помощью измерений высокочастотных вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик изучены электрические свойства МОП-структур и показано, что они обладают гистерезисом вольт-фарадных характеристик, а его величина существенно зависит от режима и атмосферы термообработок. Качество сформированных МОП-структур улучшается при использовании окисления в сухом кислороде с учетом оптимальной длительности окисления пленки SiGe, что подтверждается данными вольт-амперных характеристик. Полученные результаты обсуждаются с учетом возможного механизма удаления Ge из слоя SiO₂ за счет низкотемпературного испарения монооксида германия (GeO).

Ключевые слова: МОП-конденсаторы, нанокристаллы Ge, термическое окисление, сплав SiGe

Для цитирования. Новиков, А. Г. Влияние режимов окисления на характеристики МОП-конденсаторов с нанокристаллами Ge / А. Г. Новиков, О. Ю. Наливайко, П. И. Гайдук // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2018. – Т. 54, № 1. – С. 119–126.

A. G. Novikau, O. Yu. Nalivaiko, P. I. Gaiduk

Belarusian State University, Minsk, Belarus

THERMAL OXIDATION EFFECT ON ELECTRICAL PROPERTIES OF MOS CAPACITORS WITH EMBEDDED Ge NANOCRYSTALS

Abstract. A 2D layer of spherical, crystalline Ge nanodots embedded in a SiO₂ layer was formed by low pressure chemical vapor deposition combined with furnace oxidation and rapid thermal annealing. The samples were characterized structurally by using transmission electron microscopy in plan-view and cross-section geometries. It was found that the formation of high-density Ge dots took place due to oxidation induced by the Ge segregation. Electrical properties were controlled by measuring C–V and I–V characteristics after the formation of MOS capacitors in different oxidation conditions and the ambient medium. A strong evidence of the charge storage effect on the crystalline Ge-nanodot layer was demonstrated by the hysteresis behavior of the high-frequency C–V curves. It is shown that dry oxidation followed by its reduction increases the hysteresis value compared to wet oxidation conditions. This hysteresis behavior is discussed taking into account the decrease in the Ge concentration and a possible effect of low temperature GeO evaporation is followed by wet oxidation.

Keywords: nonvolatile memory, nanocrystals, thermal oxidation

For citation. Novikau A. G., Nalivaiko O. Yu., Gaiduk P. I. Thermal oxidation effect on electrical properties of MOS capacitors with embedded Ge nanocrystals. *Vesti Natsyional'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 119–126 (in Russian).

Введение. Процессы формирования низкоразмерных полупроводниковых структур представляют особый интерес в связи с их возможным применением в современных технологиях микро- и наноэлектроники [1–3]. В частности, в последнее время активно исследуются возможности создания Flash-приборов памяти, которые используют нанокристаллы в качестве ключевых элементов хранения заряда. Такие нанокристаллы, будучи встроенными в подзатворный диэлектрик МОП-транзистора, выполняют роль плавающего затвора, в котором осуществляется запись и хранение информации [1–9]. Для формирования слоев подзатворного диэлектрика со встроенными нанокристаллами могут применяться методы ионной имплантации [3, 4], молекулярно-лучевой

эпитаксии [1, 5], химического осаждения из газовой фазы [6, 7]. Однако такие методы формирования нанокристаллов не позволяют контролировать с достаточной точностью толщину туннельного оксида и являются технологически относительно сложными и дорогостоящими.

Оригинальный метод самоорганизованного формирования нанокристаллов Ge (НК-Ge) в тонких слоях подзатворного диэлектрика был предложен в наших недавних исследованиях [8, 9]. Он основан на явлении сегрегационного оттеснения атомов Ge при термообработке слоев SiGe в окисляющей среде. В силу того что энтальпия формирования оксидов Si превышает таковую для оксидов Ge, при термообработке SiGe в окисляющей среде происходит преимущественное окисление атомов Si. Низкая растворимость Ge в SiO₂ (менее 0,1 ат.% [8]) приводит к сегрегационному оттеснению атомов Ge фронтом окисления SiO₂/SiGe с последующим формированием НК-Ge на заданном расстоянии от области канала. Данные теоретических расчетов концентрационных профилей Ge свидетельствуют о том, что основные закономерности сегрегации Ge определяются атмосферой окисления и температурно-временными условиями термообработки [8]. В частности, в случае термообработки в атмосфере сухого O₂ не обнаружено ни диффузии Ge вглубь структуры, ни его испарения в атмосферу.

Напротив, использование влажной атмосферы приводит к большим потерям Ge (около 30 ат.%) из слоя SiO₂ [9]. Как отмечено в [8], потери Ge могут быть объяснены испарением летучего монооксида GeO из слоя SiO₂. Хорошо известно, что скорость термического окисления, структурное качество слоев SiO₂ и их диэлектрические свойства существенно зависят от состава атмосферы при термообработке [10]. Так, добавление паров воды может приводить к существенному ускорению окисления, увеличению концентрации дефектов и росту упругих напряжений в слое SiO₂. Можно поэтому ожидать, что и в случае сплавов SiGe изменение атмосферы термического окисления будет приводить к формированию НК-Ge и слоев диоксида кремния различного структурного совершенства. В свою очередь, будучи встроенными в слой диэлектрика, НК-Ge различного структурного состояния могут оказывать значительное влияние на электрофизические характеристики МОП-структур.

Цель настоящей работы – исследование режимов формирования нанокристаллов Ge в тонких слоях подзатворного SiO₂, а также изучение влияния состава атмосферы окисления сплавов SiGe на электрофизические характеристики МОП-структур поли-Si/SiO₂+НК-Ge/*n*-Si.

Методика эксперимента. В качестве исходных подложек использовали пластины кремния *n*-типа проводимости с ориентацией (100). Операции окисления и осаждения слоя SiGe сплава выполняли на ОАО «Интеграл». Перед осаждением слоев SiGe сплавов пластины термически окисляли до толщины SiO₂ от 6 до 26 нм. Выбор толщины оксида был обусловлен необходимостью, с одной стороны, эффективного удержания (хранения) носителей заряда в МОП-конденсаторе при отсутствии смещения, а с другой – снижения порогового напряжения для туннелирования зарядов в канал МОП-транзистора. Слой сплава Si_{0,955}Ge_{0,045} толщиной 22 нм наносили методом химического осаждения из газовой фазы при температуре порядка 560 °С, после чего последовательно проводили операции окисления сплава SiGe и редукиции оксида GeO₂ мономерами Si [9]. Термическое окисление осуществляли в атмосфере сухого или влажного кислорода при температуре 850–950 °С в течение 5–120 мин. Операцию редукиции выполняли в атмосфере сухого азота при температуре 850–950 °С в течение 30–180 с.

Структурно-фазовое состояние образцов исследовали методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и микродифракции (ПЭД) с использованием электронного микроскопа Phillips CM-20 с ускоряющим напряжением 200 кВ. Композиционный состав исходных слоев, перераспределение Ge после термообработок исследовали методом резерфордского обратного рассеяния (РОР) ионов He⁺ с энергией 1,0–1,5 МэВ в скользящей геометрии пучка. После формирования МОП-конденсаторов путем осаждения поли-Si-затворов площадью 125 мкм² были измерены высокочастотные вольт-фарадные (С-V) и вольт-амперные (I-V) характеристики. Схематическое изображение МОП-структур с нанокристаллами Ge приведено на рис. 1. Измерения проводились с использованием прецизионного анализатора полупроводниковых приборов HP4156B и LCRZ-метра E4980A.

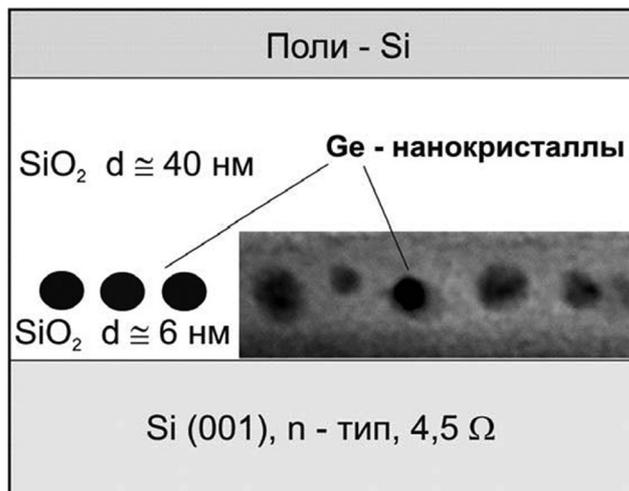


Рис. 1. Схема структуры МОП-конденсатора, сформированного для C-V- и I-V-измерений. На вставке приведена светлопольная ПЭМ-микрофотография в поперечном сечении структуры SiO₂/Si, содержащей нанокристаллы Ge

Fig. 1. Sketch of the MOS capacitor structure formed for electrical characterization.

The insert shows the bright field TEM image of the Si/SiO₂ structure with embedded Ge nanocrystals

Результаты и их обсуждение. Методом ПЭМ установлено, что термическое окисление (ТО) в атмосфере сухого кислорода длительностью 60 мин приводит к полному прокислению поверхностного слоя SiGe толщиной 22 нм в образцах структур SiGe/SiO₂/n-Si при температуре 850 °С. Светлопольные ПЭМ-микрофотографии структуры слоев SiGe/SiO₂/Si после осаждения SiGe и термической обработки в условиях: 850 °С (a), 60 мин, O₂; 850 °С, 60 мин, O₂ + редукция в N₂ (b, c), представлены на рис. 2 и демонстрируют формирование неоднородностей контраста нанометровых размеров с высокой плотностью. Эти неоднородности представляют собой темные пятна на светлом фоне, имеющие округлую (сферическую) форму. Более темный по сравнению с фоном абсорбционный ПЭМ-контраст пятен указывает на то, что соответствующие им структурные образования являются преципитатами, включающими в свой состав более тяжелые по сравнению с окружающей матрицей атомы (в данной структуре это атомы Ge). Сравнение ПЭМ-изо-

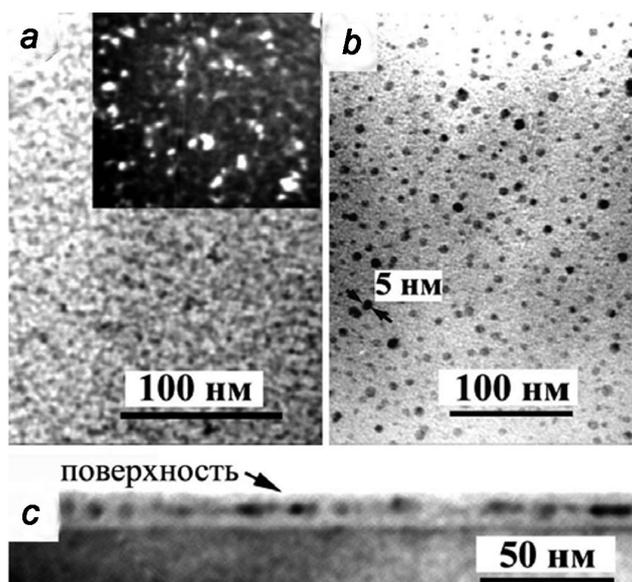


Рис. 2. Типичные светлопольные ПЭМ-микрофотографии структуры слоев SiGe/SiO₂/Si после осаждения и термической обработки в условиях: a – 850 °С, 60 мин, O₂; b, c – 850 °С, 60 мин, O₂ + редукция в N₂. Образцы a, b получены в планарном, а образцы c – в поперечном сечении

Fig. 2. Bright-field images of a plan-view TEM (a, b) and XTEM (c) samples, oxidized at 850 °С for 60 min in O₂ (a) followed by reduction for 30 s in N₂ (b, c)

бражений в режимах светлого и темного поля, а также анализ картин электронной дифракции показали, что преципитаты имеют кристаллическую структуру и являются нанокристаллами Ge (НК-Ge). По результатам ПЭМ-исследований образцов структур, приготовленных в планарной геометрии, определены размеры и поверхностная плотность НК-Ge. Как следует из микрофотографий, представленных на рис. 2, средний размер НК-Ge и их плотность составляют соответственно 2–6 нм и $>10^{12}$ см⁻² в окисленных образцах, тогда как дополнительная операция редукиции при температуре 900–950 °С приводит к увеличению среднего размера до 4–10 нм и уменьшению их плотности до $(3–4) \cdot 10^{11}$ см⁻². Таким образом, процесс редукиции, наряду с отжигом дефектов и улучшением диэлектрических свойств оксида кремния [9], приводит к уменьшению плотности нанокристаллов ниже критической величины 10^{12} см⁻², что, по данным исследований [7], способствует изоляции нанокристаллов в поперечном направлении. Приведенные на рис. 2 микрофотографии структуры в поперечной и планарной геометриях показывают, что нанокристаллы Ge имеют незначительный разброс по размерам и локализованы практически в одной плоскости. Расстояние от плоскости нанокристаллов Ge до границы раздела SiO₂/Si составляет около 4–6 нм. Таким образом, в результате термического окисления слоев Si/SiO₂/SiGe в атмосфере сухого кислорода и последующего отжига в инертной среде происходит формирование структуры Si/SiO₂/НК-Ge/SiO₂.

Сравнительные ПЭМ-исследования образцов *n*-Si/SiO₂/SiGe, окисленных в атмосфере влажного кислорода при температуре 850 °С, показывают, что кинетика окисления слоя SiGe, а также закономерности сегрегации Ge и формирования НК-Ge существенно не отличаются от случая окисления в атмосфере сухого кислорода. Вместе с тем необходимо отметить следующие особенности контраста ПЭМ-изображений, которые указывают на наличие высокой концентрации дефектов в слое SiO₂, по-видимому, связанных с захватом, окислением и испарением атомов германия. Во-первых, наряду с НК-Ge, ПЭМ-изображение слоев в светлом поле содержит размытый зернистый контраст с характерным размером неоднородностей менее 2 нм. Такие неоднородности могут быть связаны с кластерами точечных дефектов вакансионного типа, а также шероховатостью поверхности. Во-вторых, температура окисления 850 °С является недостаточно высокой для эволюции вакансионных дефектов в нанопустоты или поры, однако образование летучих монооксидов SiO и GeO становится возможным уже при температурах 500 °С и выше [11, 12]. В нашей работе [13] показано, что дополнительная высокотемпературная (1000 °С) термообработка таких слоев может приводить к формированию наноразмерных пустот. Однако в настоящей работе высокотемпературный отжиг не приводил к формированию пор или пузырей, по-видимому, из-за весьма малой толщины слоя SiO₂: аргументы для подтверждения такой интерпретации подробно изложены в нашей работе [13]. Наконец ПЭМ-исследования в поперечном сечении показали возрастание шероховатости поверхности в случае окисления образцов во влажной среде, что указывает на наиболее вероятный механизм удаления летучих монооксидов посредством их сублимации с поверхности образцов.

Результаты исследования электрофизических характеристик приборных МОП-структур с внедренными НК-Ge показывают хорошую корреляцию с результатами структурных исследований. После изготовления в стандартном технологическом процессе структур с нанокристаллами Ge в слое SiO₂ (в области плавающего затвора) и осаждения кремниевого поликристаллического затвора были сформированы МОП-конденсаторы с вертикальной структурой, где толщина туннельного оксида составляла ~6 нм. Влияние атмосферы окисления на эффективность накопления заряда исследовали путем измерения на каждой экспериментальной пластине высокочастотных (1 МГц) C-V-характеристик.

Как можно видеть на рис. 3, высокочастотные C-V-кривые, полученные при измерении с граничными значениями напряжений U от –5 до +5 В обладают гистерезисными свойствами. Обнаружено, что воздействие внешнего напряжения приводит к параллельному сдвигу C-V-кривых в направлении положительных значений, что свидетельствует о накоплении эффективного отрицательного заряда [10]. Такое поведение C-V-характеристик свойственно для случаев окисления SiGe-сплавов и во влажной, и в сухой атмосфере. Вместе с тем установлено, что величина гистерезиса C-V-характеристик существенно зависит как от атмосферы окисления, так и от темпера-

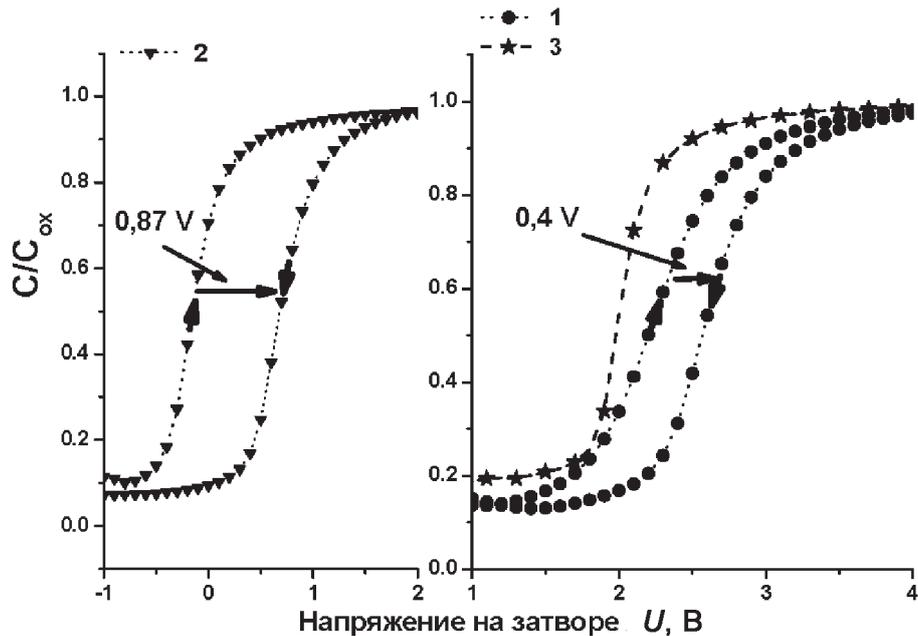


Рис. 3. Высокочастотные вольт-фарадные характеристики МОП-структур, полученных после окисления тонких слоев SiGe-сплавов: 1 – структура, содержащая Ge и окисленная в атмосфере влажного кислорода при 850 °С 15 мин; 2 – структура, содержащая Ge и окисленная в атмосфере сухого кислорода при 850 °С 60 мин; 3 – C-V-характеристика структуры n -Si/SiO₂, содержащей чистый SiO₂

Fig. 3. High-frequency capacitance vs. voltage curves of samples from wafer, oxidized at 850 °C for 15 min in wet O₂ (1), oxidized at 850 °C for 60 min in dry O₂ (2). The CV curve from the reference sample of pure SiO₂ is shown (3)

турно-временных условий. Максимальное значение гистерезиса получено на образцах, окисленных в атмосфере сухого кислорода при 850 °С в течение 60 мин (см. рис. 3, кривая 2), и достигало $U = 0,87$ В. Величина гистерезиса на образцах, окисленных во влажной атмосфере, составляла $\sim 0,4$ В при ТО в течение 15 мин при 850 °С (см. рис. 3, кривая 1) и возрастала до значения $\sim 0,6$ В при увеличении длительности окисления до 25 мин. Таким образом, МОП-структуры, в которых диэлектрический слой сформирован путем термического окисления сплава SiGe, обладают гистерезисом C-V-характеристик. Следует отметить, что контрольная МОП-структура, полученная термическим окислением слоя чистого Si кремния до толщины оксида 26 нм, не обладает гистерезисом C-V-характеристик: полученное значение $\Delta U = 0,06$ В находится в пределах погрешности измерений. Таким образом, из сравнения результатов структурных и C-V-исследований можно сделать вывод, что появление гистерезиса C-V-характеристик связано с наличием массивов НК-Ge внутри слоя SiO₂ сформированных МОП-структур.

На рис. 4 приведены C-V-характеристики, полученные в режимах аккумуляции и инверсии, что для подложки Si n -типа соответствует подаче положительного и отрицательного значений напряжения. Обнаружено существенное различие величины смещения C-V-характеристик в зависимости от полярности первоначального напряжения. В случае подачи положительного смещения наблюдается режим аккумуляции, т. е. происходит снижение барьера для электронов и зарядка нанокристаллов Ge отрицательным потенциалом. В случае же подачи отрицательного напряжения (режим инверсии) происходит зарядка положительными носителями, что и приводит к смещению C-V-кривой в сторону отрицательных значений напряжений. В этом случае можно предполагать, что происходит туннельная инжекция дырок из полупроводника на медленные ловушки на границе n -Si/SiO₂, что и подтверждается результатами в работе [14].

Дополнительные исследования МОП-структур проводили путем измерения токов утечки и пробивных напряжений. Измерения I-V-характеристик МОП-структур проводились до напряжения $U = 20$ В с целью определения пробивного напряжения и тока утечек затвора при 5 В. На рис. 5 представлены вольт-амперные характеристики для структур, полученных окислением в атмосфере сухого и влажного кислорода. Их анализ показывает, что окисление в сухом кисло-

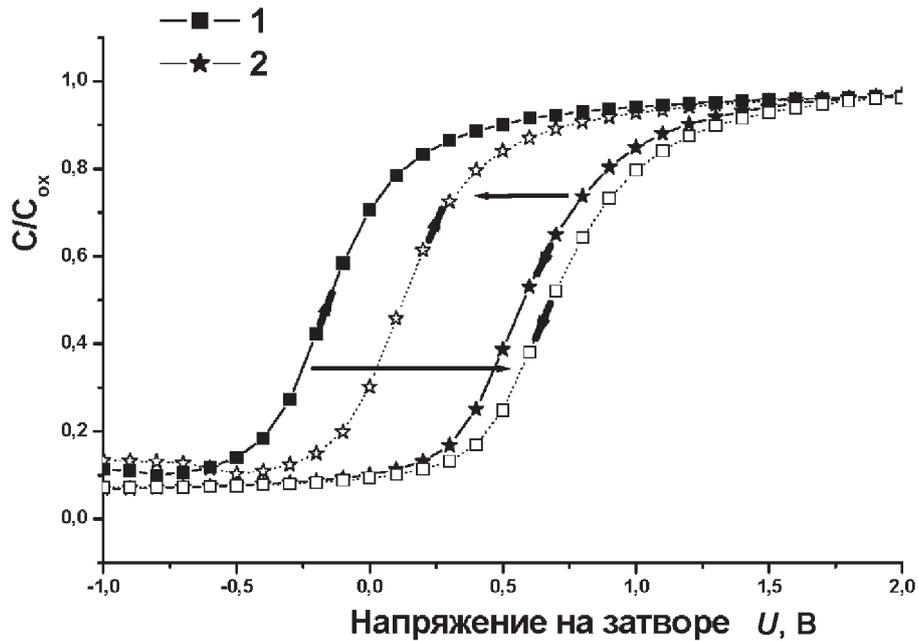


Рис. 4. Вольт-фарадные характеристики МОП-конденсаторов с нанокристаллами Ge в слое SiO₂, измеренные: 1 – при изменении напряжения +5 В/–5 В/+5 В; 2 – при изменении напряжения –5 В/+5 В/–5 В

Fig. 4. Gate voltage sweep from accumulation (+ 5 V) to inversion (1) and from inversion (–5 V) to accumulation (2) is shown

роде приводит к уменьшению токов утечки при напряжении $U = 5$ В практически на порядок величины. Тем не менее минимальные токи утечки для образцов, содержащих НК-Ge, на порядок величины (для влажного окисления на два порядка) больше, чем в структуре Si/SiO₂. По результатам исследования процессов сегрегации Ge при окислении в различных средах нами показано, что в случае влажного окисления происходит значительное уменьшение содержания Ge

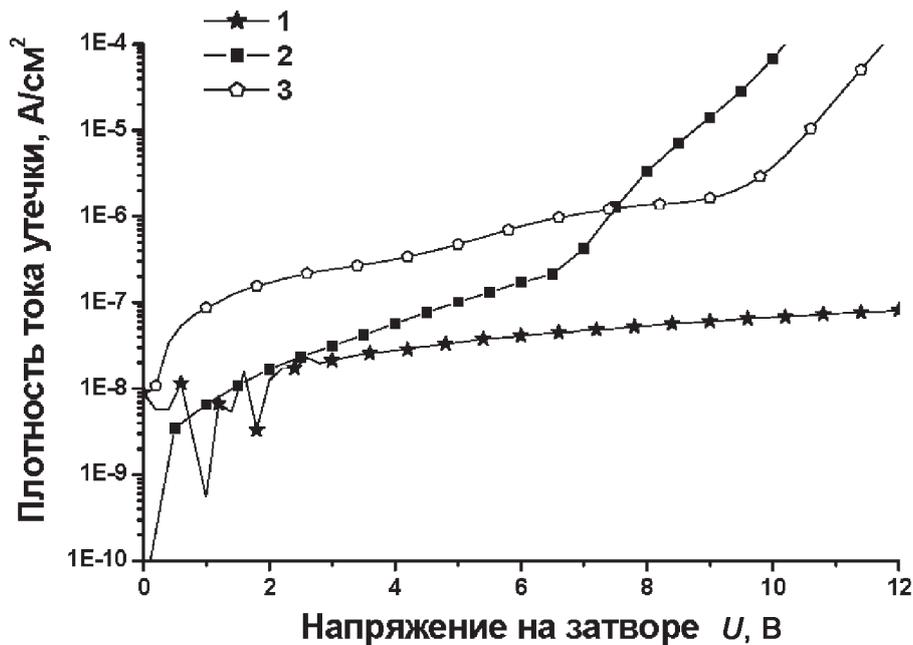


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики МОП-конденсаторов: 1 – ТО чистого кремния; 2 – ТО в сухом кислороде; 3 – ТО во влажном кислороде. Толщина оксида на образце Si/чистый-SiO₂ составляла примерно 26 нм

Fig. 5. Leakage current vs. gate voltage characteristics obtained from wafers oxidized either in dry (2) or wet (3) conditions at 850 °C. The curve I–V from reference sample of pure SiO₂ (26 nm of thickness) is shown (1)

(до 30 ат.%) [8]. Как уже отмечалось, предполагаемый механизм удаления Ge за счет его испарения в виде GeO способствует образованию дефектов, т. е. формированию кластеров точечных дефектов вакансионного типа размером в единицы нанометров. Очевидно, что разрушение в области дефектов значительного количества Si-O-связей будет обуславливать снижение диэлектрической проницаемости туннельного SiO₂ и увеличение токов утечки, что наблюдали, например, в работе [15]. Как можно видеть на рис. 5, значения плотности тока утечки для образцов после термообработки в атмосфере сухого O₂ составляют ~10⁻⁷ А/см². Такие значения токов утечки практически на порядок величины меньше, чем известные из литературы для других методов создания нанокристаллов. Типичные значения токов утечки в работах [3–7] составляют примерно 10⁻⁶ А/см². Учитывая, что в таких методах формирования НК-Ge, как ионная имплантация в предварительно выращенные слои SiO₂, либо осаждение диэлектрических слоев после формирования нанокристаллов, невозможно избежать деградации оксида. Следовательно, можно ожидать, что применение сухого термического окисления будет приводить к снижению токов утечки в МОП-структурах с НК-Ge, полученных путем сегрегационного формирования.

Заключение. В результате измерений электрофизических параметров МОП-конденсаторов на основе *n*-Si/SiO₂/НК-Ge/SiO₂ структур обнаружено наличие гистерезиса C-V-характеристик. Показано, что величина гистерезиса существенно зависит от режима и атмосферы термообработки тонких слоев SiGe/SiO₂. Определены режимы термообработки, при которых величина гистерезиса C-V-характеристик максимальна. Анализ данных измерений C-V-характеристик показал, что при подаче на тестовую структуру МОП-конденсатора напряжения инверсии в 5 В величина гистерезиса C-V-характеристики равна 0,87 В. Электрические характеристики сформированных МОП-структур улучшаются при использовании окисления в сухом кислороде с учетом оптимальной длительности окисления пленки SiGe. Показано, что метод формирования НК-Ge путем сегрегационного оттеснения атомов Ge при термическом окислении слоев SiGe позволяет создавать МОП-структуры с нанокристаллами Ge в слое туннельного SiO₂, локализованными в плоскости на расстоянии порядка 6 нм от границы раздела SiO₂/Si и обладающими средним размером 4–10 нм и плотностью до (3–4)·10¹¹ см⁻². Наличие выраженного гистерезиса C-V-характеристик позволяет считать данный метод перспективным для разработки новых приборов опто- и нанoeлектроники, в частности приборов памяти и фотоприемников.

Благодарности. Исследования проводились при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта БРФФИ-РФФИ № Т16Р-167, а также ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника» (задание № 3.2.03.01).

Acknowledgements. We would like to acknowledge support from the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Project No. T16P-167) and the Belarusian Scientific Research Program “Photonics, Optics- and Microelectronics” (Project No. 3.2.03.01).

Список использованных источников

1. Structural and electrical properties of silicon dioxide layers with embedded germanium nanocrystals grown by molecular beam epitaxy / A. Kanjilal [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2003. – Vol. 82, № 8. – P. 1212–1214.
2. Chemical vapor deposition of Ge nanocrystals on SiO₂ / T. Baron [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2003. – Vol. 83, № 7. – P. 1444–1446.
3. Blue photo- and electroluminescence of silicon dioxide layers ion-implanted with group IV elements / L. Rebohle [et al.] // *Appl. Phys. B.* – 2000. – Vol. 71, №2. – P. 131–151.
4. Effect of annealing environment on the memory properties of thin oxides with embedded Si nanocrystals obtained by low-energy ion-beam synthesis / P. Normand [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2003. – Vol. 83, № 1. – P. 168–170.
5. Effects of Ge concentration on SiGe oxidation behavior / H. K. Liou [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 1991. – Vol. 59, № 10. – P. 1200.
6. Oxidation rate enhancement of SiGe epitaxial films oxidized in dry ambient / M. Spadafora [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2003. – Vol. 83, № 18. – P. 3713–3715.
7. Choi, W. K. Rapid thermal oxidation of radio frequency sputtered polycrystalline silicon germanium films / W. K. Choi, A. Natarajan, L. K. Bera // *J. Appl. Phys.* – 2002. – Vol. 91, № 4. – P. 2443–2448.
8. Сегрегация Ge в SiGe сплавах при окислении / А. Г. Новиков [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2009. – Т. 53, № 2. – С. 52–56.
9. Novikau, A. Germanium segregation in CVD grown SiGe layers / A. Novikau, P. Gaiduk // *Open Physics.* – 2010. – Vol. 8, № 1. – P. 57–60.
10. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн.: пер. с англ. / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – 2 кн.

11. Самсонов, Г. В. Физико-химические свойства окислов / Г. В. Самсонов. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.
12. Shklyayev, A. A. Visible photoluminescence of Ge dots embedded in Si/SiO₂ matrices / A. A. Shklyayev, M. Ichikawa // *Appl. Phys. Lett.* – 2002. – Vol. 80, № 8. – P. 1432–1434.
13. Гайдук, А. П. Распад пересыщенных сплавов SiO₂(Ge) при термической обработке / А. П. Гайдук [и др.] // *Перспективные материалы.* – 2007. – № 2. – С. 29–35.
14. Сопоставление электрических свойств и фотолюминесценции в зависимости от состава слоев SiO_x, содержащих нанокристаллы кремния / И. В. Антонова [и др.] // *Физика и техника полупроводников.* – 2006. – Т. 40, вып. 10. – С. 1229–1235.
15. Novel low-k dielectric obtained by Xenon implantation in SiO₂ / H. Assaf [et al.] // *Solid State Phenomena.* – 2005. – № 291. – P. 108–109.

References

1. Kanjilal A., Lundsgaard Hansen J., Gaiduk P., Nylandsted Larsen A., Cherkashin N., Claverie A., Normand P., Kapetanakis E., Skarlatos D., Tsoukalas D. Structural and electrical properties of silicon dioxide layers with embedded germanium nanocrystals grown by molecular beam epitaxy. *Applied Physics Letters*, 2003, vol. 82, no. 8, pp. 1212–1214. Doi: 10.1063/1.1555709
2. Baron T., Pelissier B., Perniola L., Mazen F., Hartmann J. M., Rolland G. Chemical vapor deposition of Ge nanocrystals on SiO₂. *Applied Physics Letters*, 2003, vol. 83, no. 7, pp. 1444–1446. Doi: 10.1063/1.1604471
3. Rebohle L., Von Borany J., Fröb, H., Skorupa W. Blue photo- and electroluminescence of silicon dioxide layers ion-implanted with group IV elements. *Applied Physics B*, 2000, vol. 71, no. 2, pp. 131–151. Doi: 10.1007/pl00006966
4. Normand P., Kapetanakis E., Dimitrakis P., and Tsoukalas D. Effect of annealing environment on the memory properties of thin oxides with embedded Si nanocrystals obtained by low-energy ion-beam synthesis. *Applied Physics Letters*, 2003, vol. 83, no. 1, pp. 168–170. Doi: 10.1063/1.1588378
5. Liou H. K., Mei P., Gennser U., Yang E. S. Effects of Ge concentration on SiGe oxidation behavior. *Applied Physics Letters*, 1991, vol. 59, no. 10, pp. 1200–1202. Doi: 10.1063/1.105502
6. Spadafora M., Privitera G., Terrasi A., Scalese S., Bongiorno C., Carnera A., Di Marino M., Napolitani E. Oxidation rate enhancement of SiGe epitaxial films oxidized in dry ambient. *Applied Physics Letters*, 2003, vol. 83, no. 18, pp. 3713–3715. Doi: 10.1063/1.1622439
7. Choi W. K., Natarajan A., Bera L. K., Wee A. T. S., Liu Y. J. Rapid thermal oxidation of radio frequency sputtered polycrystalline silicon germanium films. *Journal of Applied Physics*, 2002, vol. 91, no. 4, pp. 2443–2448. Doi: 10.1063/1.1431435
8. Novikau A. G., Ratkevich S. V., Gaiduk P. I., Komarov F. F. Oxidation induced Ge segregation in SiGe alloys. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2009, vol. 53, no. 2, pp. 52–56 (in Russian).
9. Novikau A., Gaiduk P. Germanium segregation in CVD grown SiGe layers. *Open Physics*, 2010, vol. 8, no. 1, pp. 57–60. Doi: 10.2478/s11534-009-0082-0
10. Sze S. M. *Physics of semiconductor devices*. New York, John Wiley & Sons, 1969. 812 p.
11. Samsonov G. V. *Physical chemistry properties of oxides*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 472 p. (in Russian).
12. Shklyayev A. A., Ichikawa M. Visible photoluminescence of Ge dots embedded in Si/SiO₂ matrices. *Applied Physics Letters*, 2002, vol. 80, no. 8, pp. 1432–1434. Doi: 10.1063/1.1451986
13. Gaiduk A. P., Larsen A. N., Sheval'e Zh., Gaiduk P. I. Decomposition of supersaturated SiO₂(Ge) alloys after thermal annealing. *Perspektivnye Materialy*, 2007, no. 2, pp. 29–35 (in Russian).
14. Antonova I. V., Gulyaev M. B., Yanovitskaya Z. Sh., Volodin V. A., Marin D. V., Efremov M. D., Goldstein Y., Jedrzejewski J. Electrical properties and photoluminescence of SiO_x layers with Si nanocrystals in relation to the SiO_x composition. *Semiconductors*, 2006, vol. 40, no. 10, pp. 1198–1203. Doi: 10.1134/s1063782606100137
15. Assaf H., Ntsoenzok E., Ruault M. O., Kaitasov O. Novel low-k dielectric obtained by Xenon implantation in SiO₂. *Solid State Phenomena*, 2005, vol. 108–109, pp. 291–296. Doi: 10.4028/www.scientific.net/ssp.108-109.291

Информация об авторах

Новиков Андрей Геннадьевич – старший преподаватель кафедры физической электроники и нанотехнологий, факультет радиофизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета (ул. Курчатова, 5, 220045, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: novikaua@bsu.by

Наливайко Олег Юрьевич – заместитель главного технолога, холдинг «Интеграл» (ул. Казинца, 121а, 220099, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: onalivaiko@integral.by

Гайдук Петр Иванович – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физической электроники и нанотехнологий, факультет радиофизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета (ул. Курчатова, 5, 220045, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: gaiduk@bsu.by

Information about the authors

Andrei G. Novikau – Senior Lecturer of the Physical Electronics and Nanotechnology Department, Faculty of Radiophysics and Computer Science of the Belarusian State University (5, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: novikaua@bsu.by

Oleg Yu. Nalivaiko – Deputy Chief of Technology, Holding Company “Integral” (121a, Kazinets Str., 220099, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: onalivaiko@integral.by

Peter I. Gaiduk – D. Sc. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Professor of the Physical Electronics and Nanotechnology Department, Faculty of Radiophysics and Computer Science of the Belarusian State University (5, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gaiduk@bsu.by