

УДК 621.382

МОРФОЛОГИЯ И СТРУКТУРА ЛОКАЛЬНЫХ АНОДНЫХ ПЛЕНОК ОКСИДА КРЕМНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ ЗОНДОВЫМ ОКИСЛЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА

С.А. Ковалева¹, В.А. Пилипенко², В.С. Сякерский², Т.В. Петлицкая²,
П.А. Витязь¹, Л.Д. Буйко²

¹ Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
220072, ул. Академическая 12, Минск, Беларусь, тел./факс (+37517) 284-24-01
E-mail: sveta_kovaleva@tut.by

² НТЦ "Белмикросистемы" УП "Завод полупроводниковых приборов",
220108, ул. Корженевского 12, Минск, Беларусь, тел. (+37517) 212-18-14,
факс (+37517) 278-28-22, E-mail: office@bms.by

Представлены результаты исследований по формированию локальных анодных пленок на кремнии в интервале напряжений 10–30 В с помощью проводящего зонда атомно-силового микроскопа, а также исследования их морфологии и структуры. Показано, что при напряжениях 10 В формируются тонкие аморфные пленки с шероховатостью границы раздела кремний – оксид в 0,6 нм. С повышением напряжения выше 15 В отмечается увеличение скорости роста оксидов, что может быть связано с электрическим пробоем анодной пленки и ускорением анодного окисления кремния, и, кроме того, рост отдельных оксидов, представляющих собой полимерные структуры, состоящие из тетраэдров – оксидов кремния.

Введение

Постоянная тенденция уменьшения норм проектирования заставляет исследователей и разработчиков приборов совершенствовать традиционные и создавать принципиально новые методы получения оксидных пленок. Перспективным методом получения локальных оксидных структур является метод атомно-силовой микроскопии (АСМ), который позволяет переводить полупроводниковые подложки в диэлектрические структуры и одновременно проводить визуализацию и контроль сформированных объектов.

Анодные оксидные пленки кремния находят широкое применение на различных стадиях изготовления сверхбольших интегральных схем (СБИС): для очистки поверхности полупроводниковых подложек перед процессом эпитаксиального наращивания; прецизионного удаления полупроводника путем анодирования и последующего растворения его ультратонких слоев с целью уменьшения толщины эпитаксиальных слоев; как диэлектрические и защитные слои в структурах металл – оксид – полупроводник (МОП); в качестве маски при диффузии и травлении, защитного и просветляющего покрытия в солнечных фотоэлементах, в качестве изоляции в схемах с многослойной металлизацией; как составная часть шаблона для рентгеновской литографии.

Выполнен большой ряд работ по изучению кинетики локального окисления полупроводниковых материалов, в том числе и кремния, и формированию одномерных и линейных структур на поверхности в диапазоне напряжений ± 10 В [1–5]. В то же время практически не изучена структура ультратонких окисных слоев кремния.

В настоящей работе представлены результаты исследований по формированию локальных анодных пленок на кремнии в интервале напряжений 10–30 В методом

атомно-силовой микроскопии, а также исследования их морфологии и структуры.

Методика эксперимента

В качестве подложки использовали эпитаксиальный слой монокремния (111), выращенный методом молекулярно-лучевой эпитаксии на кремнии КДБ-13. Формирование локальных оксидных пленок проводили на АСМ NT-206 (производство ОДО «Микротест-машины»). При сканировании зонд заземляли, а на поверхность образца подавали постоянное положительное напряжение U в диапазоне 10–30 В. Локальное окисление осуществляли кремниевыми зондами с проводящим покрытием Ti–Pt и жесткостью кантилевера $k = 48$ Н/м при относительной влажности воздуха 52 %. Для изучения полученных пленок оксида кремния также использовался АСМ NT-206 в контактном режиме и растровый микроскоп высокого разрешения S-4800 Hitachi (Япония). Для определения глубины проникновения оксида кремния в исходную подложку и изучения границы раздела оксид – кремний методами АСМ и растровой электронной микроскопии (РЭМ) выполняли химическое травление полученных оксидов в 10%-м водном растворе HF.

Результаты и обсуждение

Установлено, что при напряжениях анодирования до 10 В с временем выдержки в точке 7 мкс удается сформировать тонкий слой оксида высотой 4–6 нм с хорошей геометрией. На границах раздела нет деформационных искажений, трещин, пор (рис.1). Отмечено уширение оксидных образований относительно задаваемых размеров. Выход формируемого оксида за границы начального объема обусловлен разными плотностями кремния и его оксида.

С повышением напряжения изменяется скорость роста оксида (рис. 2) и сама структура оксидной пленки. Так, при напряжениях 10–15 В рост пленки незначительный, а в интервале 15–30 В происходит формирование отдельных оксидов, представляющих собой полимерные структуры, состоящие из тетраэдров с латеральными размерами до 500 нм (рис. 3). Наблюдаемый рост оксидов при напряжениях от 15 В может быть связан с электрическим пробоем анодной пленки и ускорением анодного окисления кремния.

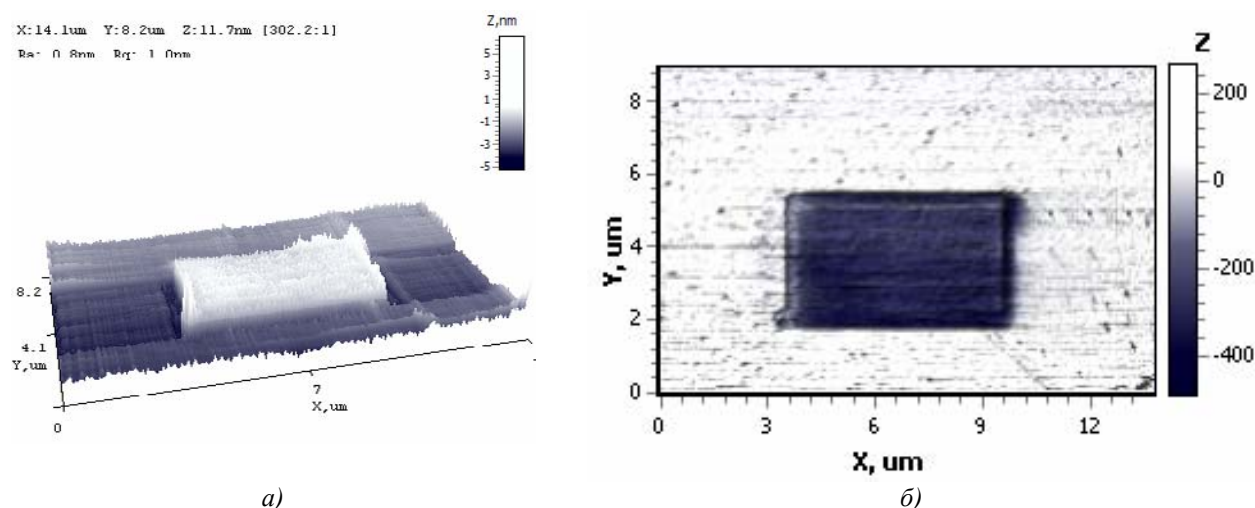


Рис. 1. 3D-топография поверхности кремния с локальной пленкой оксида кремния, сформированного при $U = 10$ В (а), и картина распределения латеральных сил трения с изменением контраста на оксиде (б)

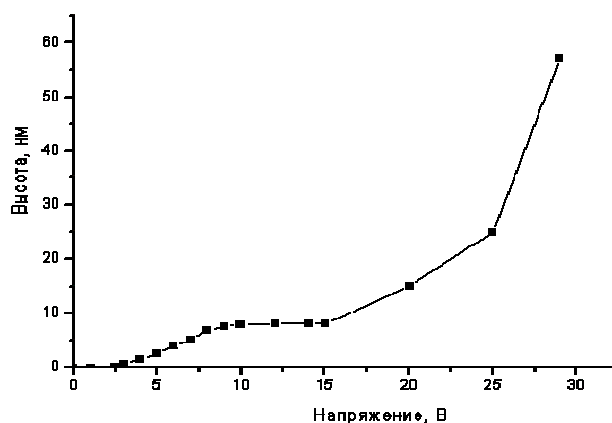


Рис. 2. Зависимость высоты локальной анодной пленки от заданного напряжения на образце

Величина прикладываемого напряжения оказывает влияние на характер распределения среднеквадратичной шероховатости R_a границы раздела кремний – оксид кремния. При напряжениях до 10 В шероховатость R_a границы раздела для оксидной пленки, выращенной при напряжениях до 10 В, составила 0,6 нм. При таких напряжениях формируются тонкие однородные аморфные оксидные пленки.

С увеличением напряжения выше 10 В характер распределения среднеквадратичной шероховатости границы раздела изменяется и для оксидов, полученных при напряжениях 15–30 В, составляет 3 нм (рис. 3). Наряду с тонкими аморфными участками присутствуют кристаллические образования оксида, глубина которых может достигать 50–100 нм в зависимости от напряжения, времени экспозиции и состояния зонда (рис. 4).

В ходе электрохимического процесса при локальном анодировании образование оксида происходит согласно закону Фарадея. К настоящему времени механизмы локального процесса оксидирования мало изучены. Формирование оксида на кремнии может проходить по двум моделям: 1 – оксидирование под воздействием приложенного электрического смещения, которое ионизирует молекулы воды и способствует их диффузии через растущий оксид; 2 – анодизация поверхности образца в присутствии адсорбированного слоя воды. При этом рост анодного оксида на кремнии происходит на границе раздела оксид/электролит вследствие движения в оксиде ионов анода, а не ионов кислорода. Лучшей моделью, описывающей локальное оксидирование, пока является модель Кабрера – Мотта [4, 5].

Образование оксида при напряжениях выше 10 В происходит также в условиях локального разогрева, возникающего при протекании больших плотностей тока через узкий наноразмерный канал. Повышение температуры приводит к испарению адсорбированного слоя воды на поверхности, и захват кислорода, вероятно, осуществляется с воздуха. Увеличение времени выдержки зонда в точке до 10 мкс и высокая температура приводят к протеканию рекристаллизационных процессов оксида кремния, размытию диффузионных областей, а также к генерации дефектов (пор, трещин), которые могут возникать в слое из-за разницы в объемах кремния и оксида кремния. Полученное изображение в режиме латерального контраста позволяет видеть изменение механических свойств кремния в ореоле сформированного оксида (рис. 5).

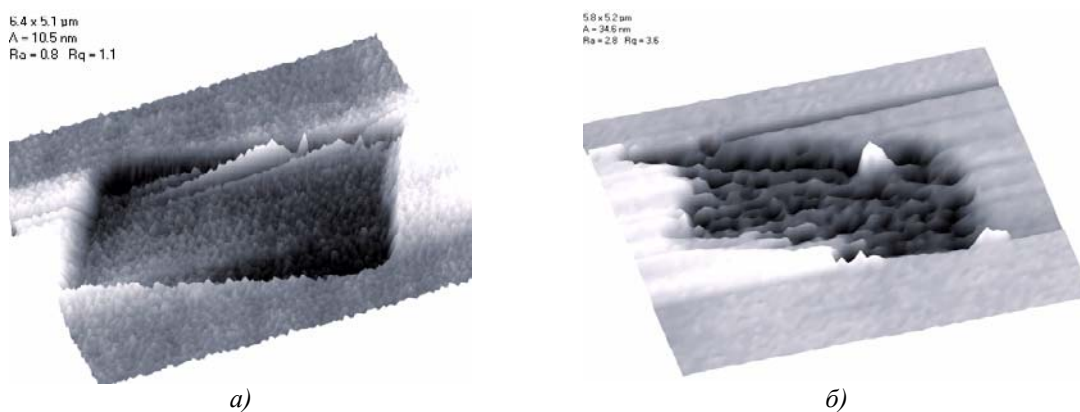


Рис. 3. АСМ-изображение ямок травления оксидов, полученных при $U = 10$ В (а), $U = 28$ В (б)

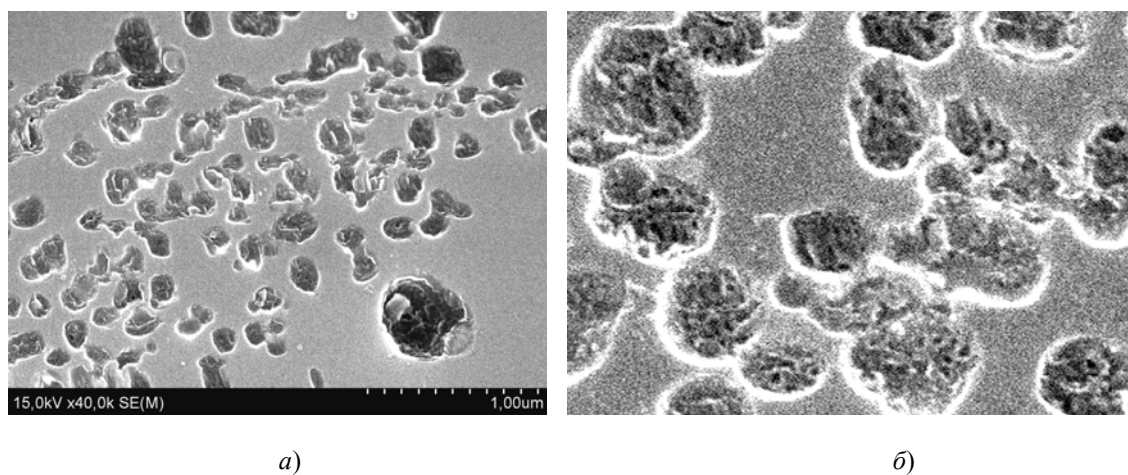


Рис. 4. РЭМ-изображение границы раздела кремний – оксид кремния ($U = 28$ В). После травления на дне ямки границы раздела наблюдаются поры размером 10 нм

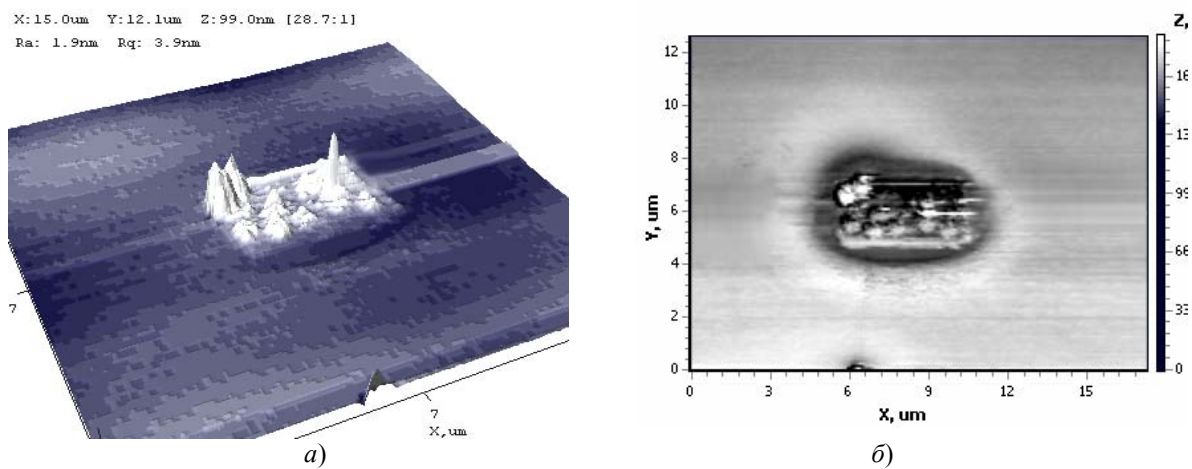


Рис. 5. Топография (а) и латеральный контраст (б) поверхности кремния с полученными оксидными структурами при $U = 24$ В с выдержкой в точке 10 мкс

Заключение

Исследования, выполненные в данной работе, показали возможности АСМ при проведении модификации поверхности, в частности получение ультратонких пленок оксида кремния на кремниевой подложке. Качество получаемых пленок определяется условиями их формирования. При напряжениях до 10 В на поверхности кремния происходит образование ультратонких пленок с аморфной структурой. Отмечено уширение оксидных образований относительно задаваемых размеров, что обусловлено разными плотностями кремния и его оксида.

От напряжения $U = 15$ В происходит рост отдельных оксидов, представляющих собой полимерные структуры, состоящие из тетраэдров – оксидов кремния. Увеличение напряжения способствует повышению локальной температуры процесса, что приводит к генерации пор, трещин. Среднеквадратичная шероховатость границы раздела кремний – оксид составила 0,6–0,8 нм для тонких аморфных оксидных пленок, для кристаллических пленок – 3,0 нм.

Следует отметить, что процессы формирования наноразмерных структур характеризуются недостаточной воспроизводимостью. Это связано с влиянием параметров технологической среды (влажности, температуры) и качества подложки (зернистости пленки, наличия нарушенного слоя на поверхности полупроводниковых подложек и т. д.), а также качества проводящего покрытия зонда. Локальные неоднородности свойств материалов приводят к нестабильности процессов токо- и массопереноса в зазоре зонд – подложка, следствием этого является неравномерность геометрических параметров оксидных образований.

Работа выполнена в рамках задания 4.10 ГКПНИ «Наноматериалы и технологии».

Литература

1. Быков В.А., Лемешко С.В., Саунин С.А. Локальное окисление поверхности полупроводников и металлов твердотельным зондом СЗМ в режиме полуконтактного сканирования как перспективный метод создания элементов нанoeлектроники // Материалы всерос. совещания «Зондовая микроскопия –2000». Нижний Новгород, 28 февраля – 2 марта 2000. ИФН РАН. 2000. С. 308–314.
2. Menglong Yang, Zhikun Zhen, Eaqing Liu, Bailin Zhang. Scanned probe oxidation on an octadecyl-terminated silicon (111) surface with an atomic force microscope: kinetic investigation in line patterning // Nanotechnology. 2006. Vol. 17. Pp. 330–337.
3. Phaedon Avoris, Tobias Hertel, et.al. Atomic force microscope tip-induced local oxidation of silicon: kinetics, mechanism, and nanofabrication // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 71 (2). Pp. 285–287.
4. Avoris Ph., Martel R., Hertel T., Sandstrom R. AFM-tip-induced and current-induced local oxidation of silicon and metals // Appl. Phys. 1998. A 66. S659–S667.
5. Соколов Д.В. Механизмы наноокислeования n-In GaAs с помощью атомно-силового микроскопа // ЖТФ. 2002. Т. 72, вып. 1. С. 60–65.