

06;12

Изменение микроморфологии поверхности эпитаксиальных слоев кремния на сапфире при облучении рентгеновским излучением ”допороговых” энергий

© А.Н. Киселев, В.А. Перевощиков, В.Д. Скупов, Д.О. Филатов

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

E-mail: spm@phys.unn.runnet.ru

Поступило в Редакцию 21 марта 2001 г.

Методом атомно-силовой микроскопии обнаружено изменение микрорельефа поверхности гетероэпитаксиальных пленок кремния на сапфире (КНС) после импульсного облучения рентгеновскими лучами с энергией $E \leq 140$ keV.

Проблема повышения стойкости полупроводниковых приборов к действию внешних дестабилизирующих факторов (температура, радиация, давление) — одна из актуальных в современной микроэлектронике. Среди различных путей ее решения центральным является применение структур ”кремний на диэлектрике” в качестве основы для создания интегральных схем в тонком приборном слое кремния на монокристаллических (сапфир, шпинель и др.) или аморфных (SiO_2 , Si_3N_4) диэлектриках. Наибольшее распространение для изготовления специальных микросхем средней степени интеграции получили структуры ”кремний на сапфире” (КНС). Вместе с тем гетероэпитаксиальный характер приборных слоев композиций КНС обуславливает высокий уровень остаточных напряжений и структурных дефектов в них, что может служить причиной развития процессов старения и деградации параметров приборов [1]. Причем эти явления могут протекать при облучении структур излучениями как с надпороговыми, так и с допороговыми энергиями [2,3]. Последний случай наиболее интересен, поскольку практически не изучен, но важен для понимания природы деградационных процессов при низкоэнергетических радиационных воздействиях.

Цель настоящей работы состояла в исследовании методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на сканирующем зондовом микроскопе ТМХ-2100 "Accurex" в режиме Non-Contact AFM морфологии поверхности пленок n -Si (001) толщиной $0.6 \mu\text{m}$, выращенных пиролизом моносилана на подложках α -Al₂O₃ (01 $\bar{1}$ 2) толщиной $540 \mu\text{m}$ до и после рентгеновского облучения. Структуры облучались со стороны пленок рентгеновским излучением сплошного спектра с $E_{\text{max}} \leq 140 \text{keV}$ в импульсном режиме. Длительность одного импульса $\Delta t_r = 150 \text{ns}$, экспозиционная доза в импульсе $0.142 \div 0.162 \text{R}$, а суммарная доза облучения составляла $(1.52 \pm 0.46) \text{R}$.

Эксперименты показали, что наличие на исходных кремниевых пленках слоя естественного оксида искажает топографию поверхности, увеличивая высоту отдельных микронеровностей до 50nm при средней шероховатости до 8nm . При этом во впадинах диоксида кремния обнаружены "столбчатые" образования, предположительно микровключения монокристаллического SiO₂. Удаление диоксида кремния во фтористоводородной кислоте уменьшает высоту максимальных микронеровностей до 30nm , а шероховатость поверхности до 5nm . Заметным образом изменяется и гистограмма распределения латеральных размеров микрорельефа (рис. 1, *b*), которая по форме приближается к гауссовской. После рентгеновского облучения спектр распределения латеральных размеров микрорельефа пленок сдвигается в сторону меньших значений и по виду становится близким к распределению Пуассона. Максимальная высота микронеровностей поверхности достигает 40nm , а среднее значение шероховатости $\sim 7 \text{nm}$ (рис. 1, *c*). В отдельных локальных областях кремниевых пленок облученных структур были обнаружены островки размером $0.1 \div 0.3 \mu\text{m}$ с планарной ориентацией [111] (рис. 2).

Дополнительно к атомно-силовой микроскопии были проведены эллипсометрические исследования кремниевых пленок на эллипсометре ЛЭФ-601 ($\lambda = 0.63 \mu\text{m}$), в результате которых установлено, что после рентгеновского облучения показатель преломления их увеличивается от $n_0 = 2.331$ до $n = 3.821$, а коэффициент экстинкции уменьшается от $k_0 = 3.006$ до $k = 1.770$. Одновременно уменьшаются более чем на порядок величины дисперсии обоих параметров. Изменения n и k происходят не только при облучении, но и после его прекращения при хранении структур в нормальных условиях в течение месяца.

Полученные результаты можно объяснить изменениями микроморфологии поверхности пленок вследствие перестройки их дислокационной структуры (плотность дислокаций в гетерослоях может достигать

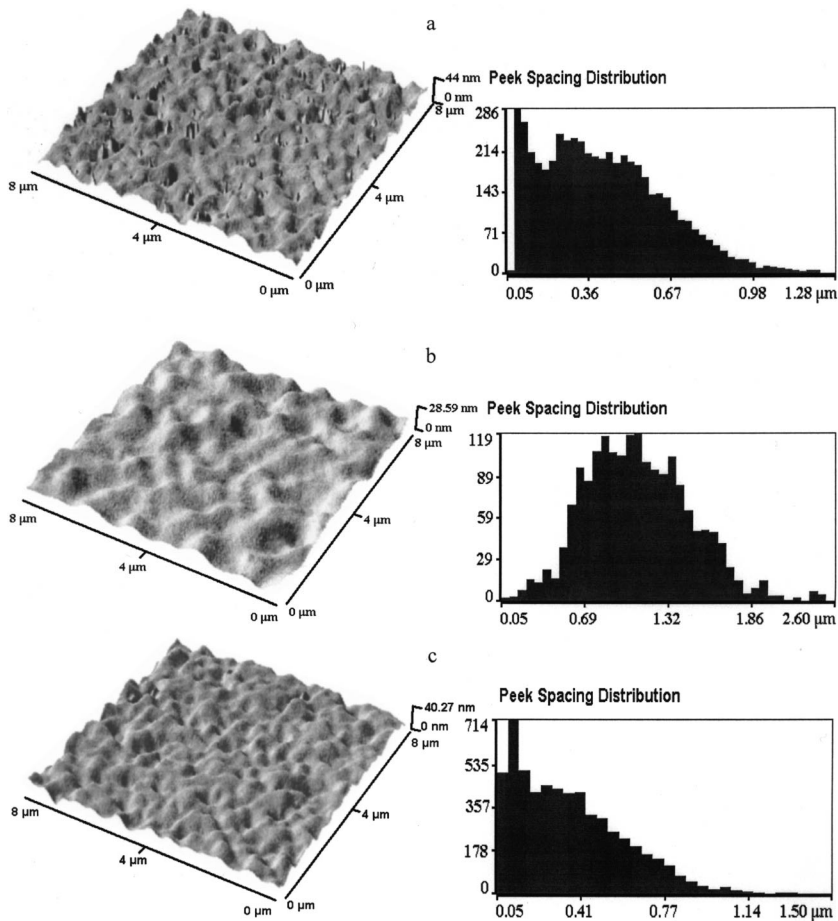


Рис. 1. Микротопографии и гистограммы распределения латеральных размеров микрорельефа поверхности кремния структур КНС в исходном состоянии (а), после удаления диоксида кремния (b) и после рентгеновского облучения (с).

$10^9 \div 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ [1]) под действием упругих волн. Последние возникают в сапфировой подложке за счет кулоновского отталкивания положительно заряженных ионов алюминия и ионизированных рентгеновским излучением атомов кислорода. Амплитуду давления в упругой волне от одного

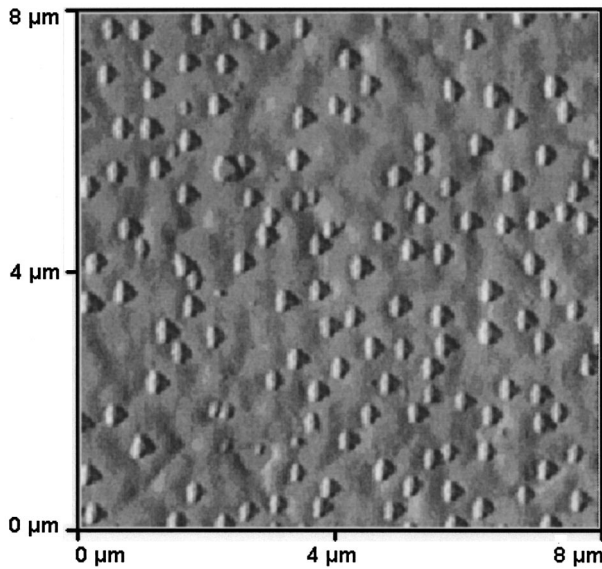


Рис. 2. Микротопография поверхности (001) облученной пленки кремния с островками, имеющими ориентацию [111].

центра излучения можно оценить из выражения [4]:

$$P_0 = \frac{q_1 \cdot q_2 \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon d^4},$$

где q_1, q_2 — кратность ионизации соседних ионов; e — заряд электрона; ϵ_0, ϵ — диэлектрические константы вакуума и материала подложки; d — расстояние между ионами. Пренебрегая поглощением волн в компонентах структур и учитывая только волны, генерируемые в сапфире вблизи границы раздела с кремнием, для суммарной амплитуды давления от j источника можно записать [5]:

$$P = P_0 R [2\pi j \tau_i]^{1/2} = P_0 R [2\pi \tau_i \sigma_i N_0 W D R]^{1/2},$$

где $R = \tau_i \cdot c$ — размер области синхронного излучения группы волн в течение времени релаксации электронного возбуждения на "выделенной" паре ионов τ_i [4] (c — скорость света); σ_i — сечение ионизации

i -й оболочки атомов кислорода (для k -оболочки $\sigma \cong 10^{-18} \text{ cm}^2$); N_0 — число атомов в единице объема; W — вероятность ионизации i -го уровня ($W \cong \exp\{-\frac{E_i}{E_0}\}$; E_i , E_0 — энергия ионизации i -го уровня и энергия первичного излучения); D — плотность потока первичного излучения, равная для рентгеновских лучей с $E_0 \leq 2 \text{ MeV}$, согласно [6]:

$$D = \frac{1.9 \cdot 10^9}{\Delta t, E_0} \left[\frac{\text{quanta}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \right].$$

Расчеты, выполненные для указанных выше режимов облучения и для случая ионизации k -оболочки кислорода ($E_k = 0.532 \text{ keV}$), дают эффективную амплитуду волн в кремниевой пленке $P \cong 6 \text{ МПа}$. Действие такого давления в тонких слоях с сильно развитой субструктурой может приводить к консервативной и неконсервативной перестройке дислокаций, и в частности к образованию скоплений 60° -ных дислокаций на гранях $\{111\}$ октаэдра $\{001\}$ вблизи поверхности пленок в местах локально высоких исходных упругих напряжений. Видимо, именно такие скопления и создаваемые ими микротрещины наблюдаются на атомно-силовых топограммах поверхности гетерослоев в виде островков с ориентацией $[111]$.

Список литературы

- [1] Папков В.С., Цыбульников М.Б. Эпитаксиальные кремниевые слои на диэлектрических подложках и приборы на их основе. М.: Энергия, 1979. 88 с.
- [2] Адонин А.С., Беспалов А.В., Китиченко Т.С. и др. // Микроэлектроника. 2000. Т. 29. № 4. С. 279–295.
- [3] Оболенский С.В., Скупов В.Д. // Поверхность. 2000. № 5. С. 75–79.
- [4] Клингер М.И., Лущик Ч.Б., Машовец Т.В. и др. // УФН. 1985. Т. 147. В. 3. С. 523–558.
- [5] Павлов П.В., Семин Ю.А., Скупов В.Д. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 3. С. 503–507.
- [6] Винецкий В.Л., Холодарь Г.А. Радиационная физика полупроводников. Киев: Наук. думка, 1979. 336 с.