

УДК 546.28:621.315.592

ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР ФОТОРЕЗИСТ ФП9120-КРЕМНИЙ

канд. физ.-мат. наук, доц. С.А. ВАБИЩЕВИЧ; Н.В. ВАБИЩЕВИЧ

(Полоцкий государственный университет);

канд. физ.-мат. наук Д.И. БРИНКЕВИЧ; канд. физ.-мат. наук, доц. В.С. ПРОСОЛОВИЧ;

д-р физ.-мат. наук, проф. В.Б. ОДЖАЕВ; канд. физ.-мат. наук Ю.Н. ЯНКОВСКИЙ

(Белорусский государственный университет, Минск)

Методами атомно-силовой микроскопии и индентирования исследованы пленки позитивного фоторезиста ФП9120 толщиной 1,0...5,0 мкм, нанесенные на пластины монокристаллического кремния методом центрифугирования. Показано, что шероховатость пленки фоторезиста варьируется в пределах 0,18...0,30 нм, резко возрастая при толщине пленки ~ 5 мкм, что обусловлено, вероятнее всего, формированием толстых слоев в две стадии. Зона разрушения у отпечатка индентора возрастает по мере приближения индентора к границе раздела фоторезист – кремний и при пересечении этой границы выходит на стационарное значение. Средний диаметр зоны разрушения возрастает при увеличении толщины фоторезистивной пленки.

Введение. Повышение степени интеграции предъявляет высокие требования к блоку операций фотолитографии. Так, если при формировании элементной базы по n-МОП-технологии применяется до 10 операций фотолитографии, то при формировании элементной базы по БИКМОП-технологии используется до 22 операций фотолитографии [1]. В качестве масок в процессах субмикронной литографии важную роль играют диазохинон-новолачные (ДХН) резисты [2]. В частности, позитивный фоторезист ФП9120, который представляет собой композит из светочувствительного О-нафтохинондиазида и фенолформальдегидной смолы, широко используется в современной полупроводниковой электронике в качестве защитного светочувствительного материала в прецизионных фотолитографических процессах.

Целью настоящей работы являлось исследование прочностных свойств пленок ФП9120 различной толщины, нанесенных на пластины кремния различных марок.

Методика эксперимента. Пленка фоторезиста толщиной от 1,0 до 5,0 мкм наносилась на поверхность пластин (диаметр 100 см) кремния различных марок (таблица) методом центрифугирования на ПО «Интеграл». Толщина *h* пленки фоторезиста определялась скоростью вращения и составляла: 1,0 мкм при скорости вращения $v = 8300$ об/мин; ~ 1,8 мкм – при $v = 2900$ об/мин; ~ 2,5 мкм – при $v = 1200$ об/мин.

Пленки толщиной $h = 5,0$ мкм формировались в две стадии со скоростью $v = 1800$ об/мин на обеих стадиях. Толщина пленок фоторезиста контролировалась с помощью микроинтерферометра МИИ-4 по 5 фиксированным точкам (центр, верх, низ, слева, справа) на каждой пластине, при этом отклонения от среднего значения не по пластине для всех исследовавшихся образцов (независимо от ориентации и легирования пластины) не превышали 2 %, что близко к погрешности измерений.

Использовавшиеся пластины кремния

Марка	Ориентация	Удельное сопротивление, Ом·см	Легирующая примесь
КДБ-10	(111)	10	Бор
КДБ-0,005	(111)	0,005	Бор
КЭС-0,01	(111)	0,01	Сурьма
КДБ-12	(100)	12	Бор
КДБ-4,5	(100)	4,5	Бор
КЭФ-4,5	(100)	4,5	Фосфор

Морфология поверхности модифицированной имплантацией полимерной плёнки исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) при комнатной температуре в полуконтактном резонансном режиме на частоте 145 кГц на приборе Solver P-47. Использовались кантилеверы серии NSG 01 с радиусом закругления 10 нм. Исследование прочностных свойств структур фоторезист-кремний прово-

дилось методом микроиндентирования на приборе ПМТ-3 по стандартной методике при комнатной температуре. В качестве индентора использовался алмазный наконечник в форме четырехгранной пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине $\alpha = 136^\circ$. Нагрузка (P) на индентор варьировалась в пределах 2...100 г. При каждом измерении на поверхность образца наносилось не менее 50 отпечатков и проводилась обработка результатов измерений с использованием методов математической статистики по методике, изложенной в [3]. Это обеспечивало погрешность измерений микротвердости менее 4 % (с доверительной вероятностью 0,95).

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Характерные АСМ-изображения поверхности фоторезиста приведены на рисунке 1. Значения среднеарифметической шероховатости R_a усреднялись по результатам не менее чем 10 измерений в различных точках образца и варьировались в пределах 0,18...0,30 нм для всех исследовавшихся образцов. С увеличением толщины пленки фоторезиста наблюдался рост шероховатости. Наибольшие значения R_a , существенно превосходящие величины шероховатости для других образцов, наблюдались при толщине фоторезиста 5,0 мкм, что, вероятнее всего, обусловлено двухстадийным формированием таких слоев. Зависимости величины шероховатости от марки кремниевой подложки не было выявлено.

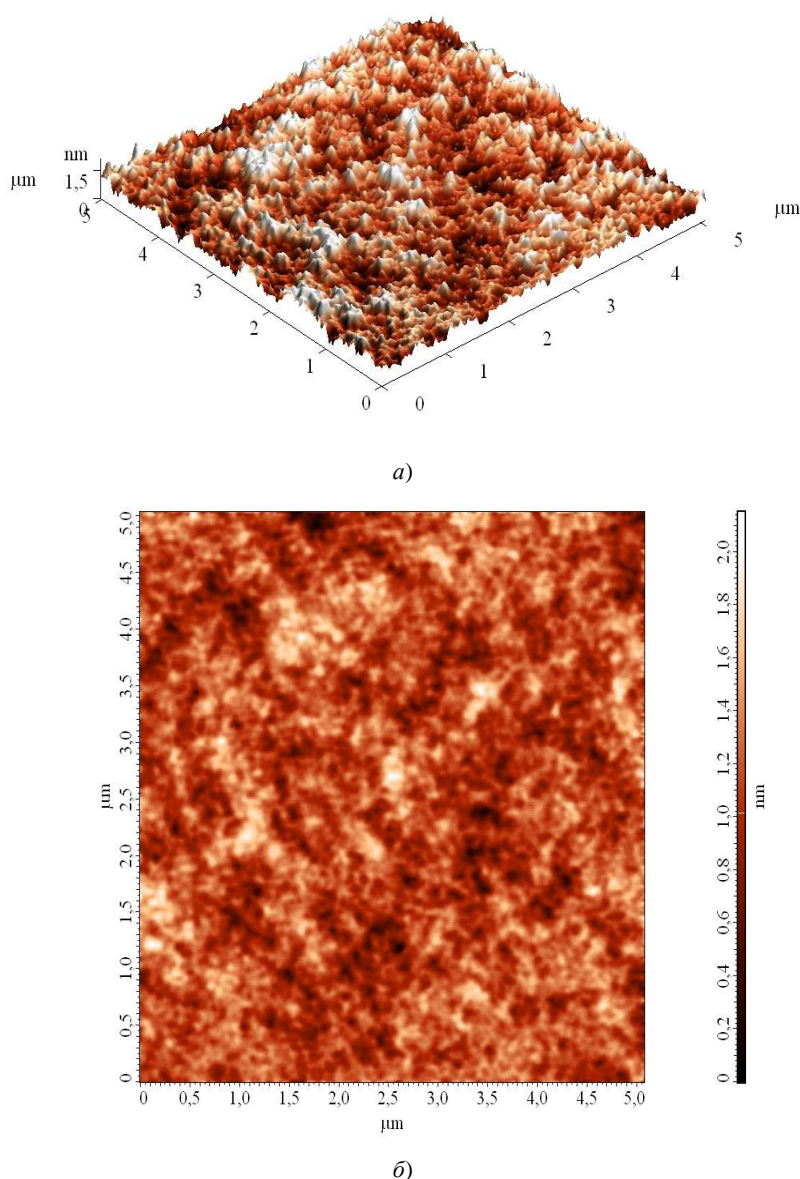


Рис. 1. Характерные АСМ-изображения поверхности фоторезиста в режимах топографии (а) и фазового контраста (б)

В процессе индентирования правильные четырехугольные отпечатки наблюдались только при проникновении индентора в кремний. В фоторезисте форма отпечатков искажалась – они становились бочковидными. Это свидетельствует о наличии в пленке растягивающих напряжений, релаксация которых после снятия нагрузки и обеспечивает такую форму отпечатков. Вокруг отпечатков имеется обширная зона разрушения, существенно превосходящая размеры отпечатка индентора (рис. 2).

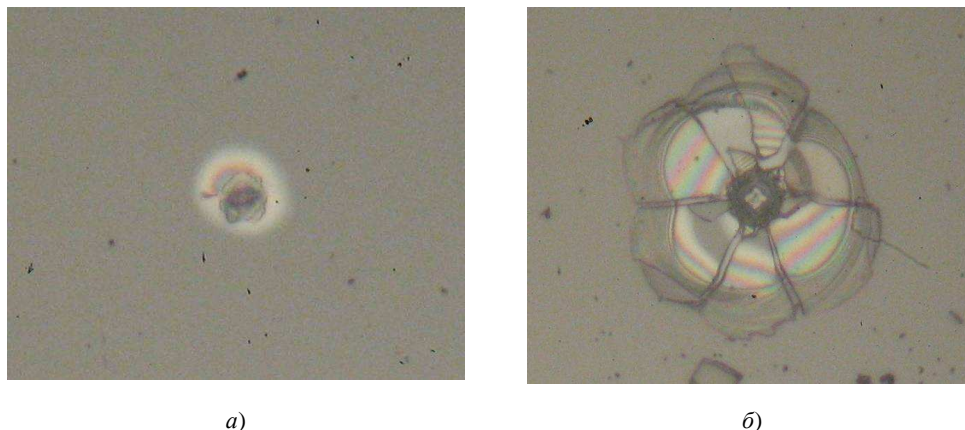


Рис. 2. Фотоснимки характерных отпечатков индентора при нагрузках 5 г (а) и 100 г (б) для структур фоторезист-кремний при толщине фоторезистивной пленки 1,8 мкм

При малых нагрузках, когда глубина проникновения индентора меньше толщины пленки фоторезиста (в частности, при толщине пленки 1,8 мкм это нагрузки менее 10 г), вокруг отпечатка наблюдаются так называемые «ареолы», проявляющиеся на фотографиях как светлые области, по форме близкие к окружностям (рис. 2, а). Вероятнее всего, это области деформации (вспучивания) фоторезиста.

При пересечении индентором границы раздела фоторезист – кремний внутри отпечатков наблюдаются четкие четырехгранники, воспроизводящие форму индентора. При этом форма «ареолов» сильно изменяется – они теряют симметрию, становятся похожи на лепестки цветов, внутри их появляются трещины (рис. 2, б). Вероятно, это обусловлено отслоением пленки фоторезиста от кремния в процессе пересечения индентором границы раздела фоторезист – кремний. Появление на снимках четких четырехгранников от индентора в кремнии позволяет контролировать толщину пленки фоторезиста.

Зависимости средних размеров зон разрушения («ареолов» при малых нагрузках) от толщины слоя фоторезиста и от марки кремния представлены на рисунках 3 и 4.

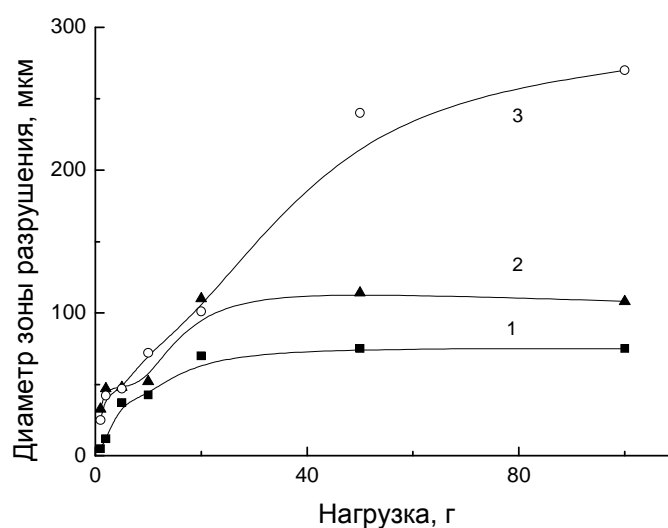


Рис. 3. Зависимость диаметра зоны разрушения вокруг отпечатка от величины нагрузки для структур фоторезист-кремний марки КДБ-12 (100) (толщина пленки фоторезиста, мкм: 1 – 1,8; 2 – 2,5; 3 – 5,0)

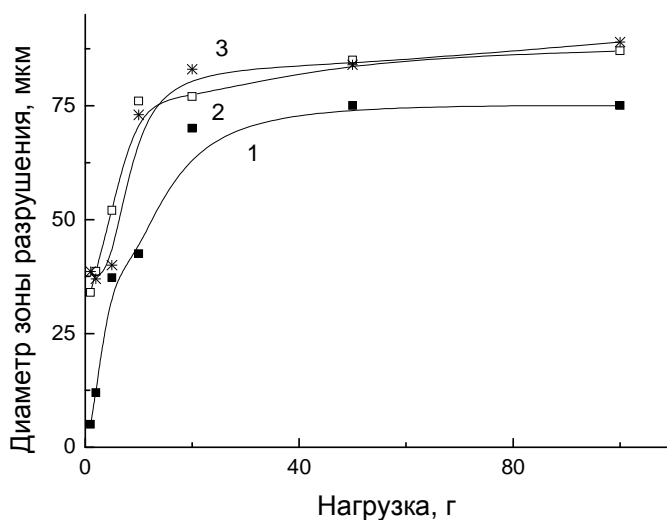


Рис. 4. Зависимость диаметра зоны разрушения вокруг отпечатка от величины нагрузки для пленок фоторезиста толщиной 1,8 мкм на кремнии различных марок: 1 – КДБ-12 (100); 2 – КЭФ-4,5(100); 3 – КЭС-0,01 (111).

На основе представленных зависимостей можно сделать следующие выводы:

- зона разрушения у отпечатка возрастает по мере приближения индентора к границе раздела фоторезист – кремний и при пересечении этой границы выходит на стационарное значение;
- средний диаметр зоны разрушения возрастает при увеличении толщины фоторезистивной пленки (см. рис. 2);
- существенной зависимости диаметра зоны разрушения от ориентации кремниевой подложки и уровня легирования не наблюдалось.

Следует отметить, что зона разрушения фоторезиста на кремнии n-типа (кривые 2 и 3, рис. 3) была несколько выше, чем в пленке на p-Si (кривая 1, рис. 3).

Также не обнаружено влияния подложки и толщины пленки на микротвердость фоторезиста при малых нагрузках (рис. 5).

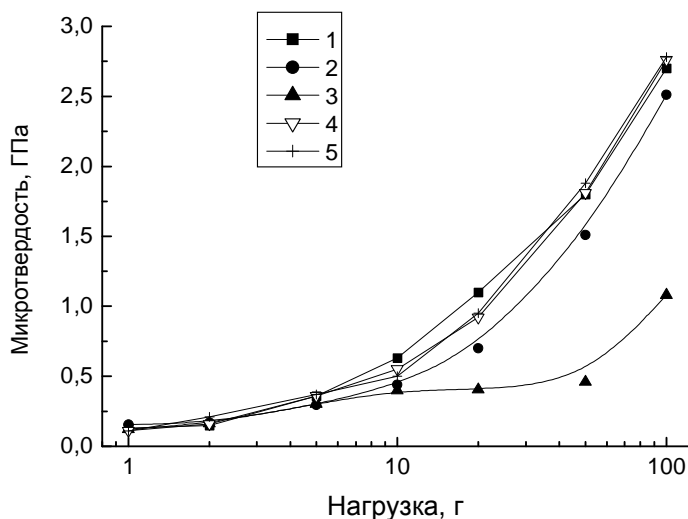


Рис. 5. Зависимость микротвердости от нагрузки для структур фоторезист-кремний: 1 – 3 – марка пластин кремния КДБ-12(100); 4 – КЭФ-4,5(100); 5 – КЭС-0,01(111) (толщина пленки фоторезиста, мкм: 1, 4, 5 – 1,8; 2 – 2,5; 3 – 5,0)

Для всех образцов при минимальной нагрузке 2 г величина микротвердости составляла $H \sim 0,2$ ГПа. При увеличении нагрузки по мере приближения индентора к границе раздела фоторезист – кремний микротвердость структуры (или, другими словами, ее сопротивление вдавливанию) возрастает. Резкий рост величины H наблюдается при проникновении индентора в кремниевую подложку – для пленок толщиной 1,8 мкм при нагрузках 20 г и выше (кривые 1–3, рис. 5). Для пленки толщиной 5,0 мкм такой критической нагрузкой является 50 г (кривая 5, рис. 5). Такое поведение микротвердости характерно для «мягких» пленок на «твердых» подложках [4].

В заключение проведенного исследования можно сделать следующие **выводы**:

- шероховатости пленки фоторезиста варьируется в пределах 0,18...0,30 нм, резко возрастая при толщине пленки ~ 5 мкм, что обусловлено, вероятнее всего, формированием таких слоев в две стадии;
- зона разрушения у отпечатка индентора возрастает по мере приближения индентора к границе раздела фоторезист – кремний и при пересечении этой границы выходит на стационарное значение;
- средний диаметр зоны разрушения возрастает при увеличении толщины фоторезистивной пленки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Применение фоторезистивных масок для маскирования ионного пучка в технологии КМОП-интегральных схем / С.В. Гранько и [др.] / Вестн. Нижегород. ун-та. Сер. Физика. – 2001. – № 2. – С. 41–47.
2. Моро, У. Микролитография. Принципы, методы, материалы: в 2-х ч. / У. Моро. Ч. 2. – М.: Мир, 1990. – 632 с. (Moreau W.M. Semiconductor lithography. Principles, practices and materials. N.Y., London: Plenum Press).
3. Бринкевич, Д.И. Микромеханические свойства эпитаксиальных слоев GaP, легированных редкоземельным элементом диспрозием / Д.И. Бринкевич, Н.В. Вабищевич, В.С. Просолович // Неорганические материалы. – 2012. – Т. 48, № 8. – С. 878–883.
4. Шугуров А.Р. Особенности определения механических характеристик тонких пленок методом наноиндентирования / А.Р. Шугуров, А.В. Панин, К.В. Оскомов // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50, № 6. – С. 1007–1012.

Поступила 08.09.2014

STRENGTH PROPERTIES OF FP9120 PHOTORESIST-SILICON STRUCTURES

**S. VABISHCHEVICH, N. VABISHCHEVICH,
D. BRINKEVICH, V. PROSOLOVICH, V. ODZHAEV, YU. YANKOVSKI**

Films of the FP9120 positive photoresist thickness of 1,0...5,0 microns deposited on silicon wafers by spin coating was investigated by the atomic force microscopy and indentation. It has been shown that the roughness of the photoresist film was ranged at 0,18 to 0,30 nm, increasing sharply when the film thickness ~ 5 microns, due likely to the formation of thick layers in two stages. Zone destructive indentation increases as the indenter to the interface silicon and photoresist – crossing this boundary reaches a steady state value. The average diameter of the zone of destruction increases with the thickness of the photoresist film.