

1. Витязь, П. А. Наноструктурные материалы/ Витязь П.А.// Беларусь – Россия. Минск. 2004. С. 7.
2. Симакин, А. В., Воронов, В. В., Шафеев, Г. А. Образование наночастиц при лазерной абляции твердых тел в жидкостях/. Симакин А. В., Воронов В. В., Шафеев Г. А. //Труды института общей физики им. Прохорова.- 2004. -Т. 60.- С. 83-107.
3. Scaffidi, J., Cremers, D.A., Angel, S.M. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy/ Scaffidi J., Cremers D.A., Angel S.M.//Elsevier.-2007.- P.137.
4. Агеев, С.П., Горбачук, Н.И., Дидковский, Я.И., Последович, М.Р., Обухов, В.Е, Шпак, Е.П. Диагностика пленок алмазоподобного углерода методом комбинационного рассеяния/ Агеев С.П., Горбачук Н.И., Дидковский Я.И., Последович М.Р., Обухов В.Е, Шпак Е.П.//9-ая Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом». - Минск. -2011.-С.397-398.

УДК 546.28: 621.315.592

## ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА И МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТРУКТУР ФОТОРЕЗИСТ ФП9120 – КРЕМНИЙ

Бринкевич Д.И.<sup>1</sup>, Оджаев В.Б.<sup>1</sup>, Просолович В.С.<sup>1</sup>, Янковский Ю.Н.<sup>1</sup>, Вабищевич С.А.<sup>2</sup>,  
Вабищевич Н.В.<sup>2</sup>, Черный В.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

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 фенол-формальдегидной смолы, широко используется в современной полупроводниковой электронике в качестве защитного светочувствительного материала в прецизионных фотолитографических процессах. Целью настоящей работы являлось исследование прочностных свойств пленок фоторезиста марки ФП9120 различной толщины, нанесенных на пластины кремния различных марок.

Пленка фоторезиста толщиной от 1,0 до 5,0 мкм наносилась на поверхность пластин кремния различных марок (табл.1) методом центрифугирования. Толщина  $h$  пленки фоторезиста определялась скоростью вращения и составляла: 1,0 мкм при скорости вращения  $v = 8300$  об/мин; 1,75 мкм – при  $v = 2900$  об/мин; 2,4 мкм – при  $v = 1200$  об/мин. Пленки толщиной  $h = 5,0$  мкм формировались в две стадии с  $v = 1800$  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.

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 кантеливеры серии NSG 01 с радиусом закругления 10 нм. Характерные АСМ изображения поверхности фоторезиста приведены на рис.1. Значения средне-арифметической 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. Существенной зависимости величины шероховатости от типа кремниевой подложки и толщины слоя фоторезиста не наблюдалось.



Рисунок 1 – Характерные АСМ изображения поверхности фоторезиста в режиме 3D топографии

Исследование прочностных свойств структур фоторезист-кремний проводилось методом микроиндентирования на приборе ПМТ-3 по стандартной методике при комнатной температуре. В качестве индентора использовался алмазный на-

конечник 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 малых нагрузках (1, 2 г) измерения проводились также методом склерометрии. 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 2,5 % (с доверительной вероятностью 0,95).

На основе полученных экспериментальных данных 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 (рис.2)

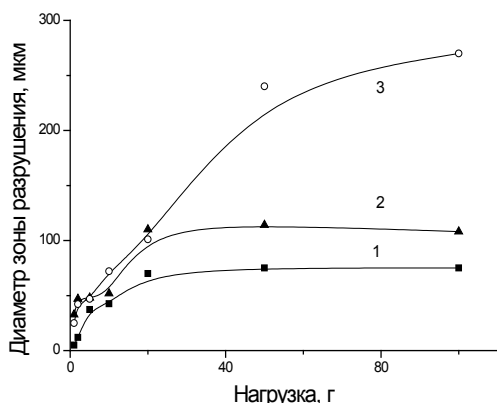


Рисунок 2 – Зависимость диаметра зоны разрушения вокруг отпечатка от величины нагрузки для структур фоторезист-кремний марки КДБ-12 (100). Толщина пленки фоторезиста, мкм: 1 – 1,8; 2 – 2,5; 3 – 5,0.

Существенной зависимости диаметра зоны разрушения от ориентации кремниевой подложки и уровня ее легирования не наблюдалось. Следует отметить, что зона разрушения фоторезиста на кремнии p-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  $H$  фоторезиста – для всех образцов при минимальной нагрузке 2 г величина микротвердости составляла ~ 0,2 ГПа (рис.4).

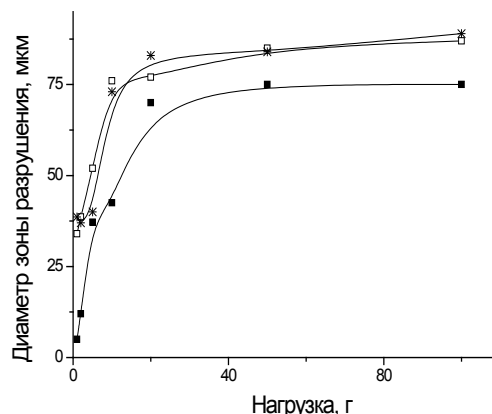


Рисунок 3 – Зависимость диаметра зоны разрушения вокруг отпечатка от величины нагрузки для пленок фоторезист толщиной 1,8 мкм на кремнии различных марок: 1 - КДБ-12 (100); 2 – КЭФ-4,5(100); 3 – КЭС-0,01 (111).

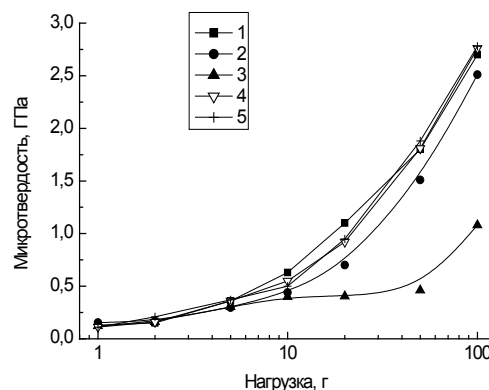


Рисунок 4 – Зависимость микротвердости от нагрузки для структур фоторезист-кремний

При увеличении нагрузки по мере приближения индентора к границе раздела фоторезист-кремний микротвердость структуры (или другими словами ее сопротивление вдавлению) возрастает. Резкий рост величины  $H$  наблюдается при проникновении индентора в кремниевую подложку - для пленок толщиной 1,8 мкм при нагрузках 20 г и выше (рис.4 кривые 1-3). Для пленки толщиной 5,0 мкм такой критической нагрузкой является 50 г (кривая 5 рис.4).

1. Гранько С.В., Волк С.А., Леонтьев А.В., Комаров Ф.Ф., Камышан А.С. Применение фоторезистивных масок для маскирования ионного пучка в технологии КМОП-интегральных схем // Вестник Нижегородского университета. Сер. Физика. – 2001. – № 2. – С.41-47.
2. Моро У. Микролитография. Принципы, методы, материалы. В 2-х ч. 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., Вабищевич Н.В., Просолович В.С. Микромеханические свойства эпи-

таксиальных слоев GaP, легированных редкоземельным элементом диспрозием // Неорганические материалы. – 2012. – Т.48, № 8. – С.878-883.

УДК 621.371

## ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ ЭКРАНЫ НА ОСНОВЕ СВЯЗАННЫХ ПОЛОСКОВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Будай А.Г.<sup>1</sup>, Кныш В.П.<sup>1</sup>, Малый С.В.<sup>2</sup>, Рудницкий А.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем БГУ, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Частотно-селективные поверхности (ЧСП) широко используются на практике в качестве экранов зеркальных антенн, стенок антенных обтекателей и укрытий, поляризационных фильтров, средств радиомаскировки, для решения задач электромагнитной совместимости [1].

ЧСП представляют собой периодические решетки проводящих или апертурных элементов, расположенных в узлах периодической решетки (прямоугольной или гексагональной). Наибольший интерес представляют ЧСП в виде периодических решеток отверстий, перфорированных в плоских проводящих экранах конечной толщины. Угловые, частотные и поляризационные свойства ЧСП зависят от формы элементов, толщины экрана, типа периодической решетки.

В настоящее время совершенствование ЧСП осуществляется в двух основных направлениях: уменьшение периодов решетки и размеров элементов; расширение функциональной нагрузки на ЧСП [2,3].

В оптике большое внимание уделяется эффекту аномально высокого прохождения электромагнитного излучения через периодическую решетку из отверстий малых волновых размеров, перфорированных в тонком металлическом экране.

В докладе рассмотрен новый тип ЧСП, период которой включает два четверть волновых полосковых резонатора и отверстие в экране. Геометрия исследуемой ЧСП представлена на рисунке 1.

Электромагнитные свойства ЧСП исследовались в рамках вычислительного эксперимента на основе метода минимальных автономных блоков [4-7]. Исходная дифракционная задача сводилась к электродинамически эквивалентной о рассеянии плоской электромагнитной волны на неоднородности, расположенной в волноводе, выделяющем период решетки, как показано на рисунке 2.

На стенках волновода накладываются периодические граничные условия, связанные с направлением распространения падающей на решетку электромагнитной волны.



Рисунок 1 – Частотно-селективная поверхность на связанных полосковых резонаторах



Рисунок 2 – Эквивалентный пространственный волновод с периодом решетки

Применение метода МАБ предполагает декомпозицию отрезка волновода на систему блоков в виде прямоугольных параллелепипедов. Электромагнитные свойства блоков описываются матрицами рассеяния по отношению к виртуальным каналам, подключенным к их граням. После расчета матриц рассеяния всех блоков, входящих в декомпозиционную схему, осуществляется рекомпозиция всех общих внутренних каналов, а также каналов, выходящих на стенки волновода. Результатом рекомпозиции является многоканальная матрица рассеяния. Порядок этой матрицы равен количеству каналов, выходящих на верхнее и нижнее сечения