

УДК 531.7, 534.1.08

Склерометрический метод измерения микротвердости пленок фоторезиста на кремнии

Бринкевич Д.И.¹, Просолович В.С.¹, Янковский Ю.Н.¹, Вабищевич С.А.²,
Вабищевич Н.В.², Гайшун В.Е.³

¹Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

²Полоцкий государственный университет,
ул. Блохина, 29, 211440, г. Новополоцк, Беларусь

³Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины,
ул. Советская, 104, 246019, Гомель, Беларусь

Поступила 01.12.2015

Принята к печати 28.01.2016

В последние годы интенсивно разрабатываются новые виды резистов для нано- и субмикронной литографии современной электроники. В качестве перспективных материалов для резистов рассматриваются различные полимерные композиции на основе термически и механически стойких полимеров. Целью настоящей работы являлось изучение возможности применения методов микроиндентирования и склерометрии для исследования микротвердости пленок полимерного резиста, нанесенного на пластины монокристаллического кремния различных марок. В качестве примера использовались пленки позитивного диазохинон-новолачного фоторезиста толщиной 1,0–5,0 мкм, которые наносились на пластины кремния различных марок методом центрифугирования. Проведен сравнительный анализ методов индентирования и склерометрии для измерения микротвердости структур фоторезист-кремний. Показано, что метод царапания ребром четырехгранной алмазной пирамиды (метод склерометрии) пригоден для измерения микротвердости фоторезистивных пленок толщиной от 1,0 мкм, в то же время метод индентирования нельзя использовать для измерений тонких ($h = 1,0–2,5$ мкм) пленок фоторезиста. Установлено, что при использовании нагрузки $P = 1–2$ г более точные, независимые от величины нагрузки, значения микротвердости дает метод склерометрии. Метод микроиндентирования дает заниженные на 20–40 % значения микротвердости, зависящие к тому же от величины нагрузки. Увеличение нагрузки до 10 и более грамм приводит к нивелированию указанных различий – значения микротвердости, полученные обоими методами, совпадают. Облучение фоторезистивных пленок также приводит, вследствие изменения структуры пленок, к сближению значений прочностных характеристик, полученных методом склерометрии и методом индентирования.

Ключевые слова: фоторезист, кремний, склерометрия, индентирование, микротвердость.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-77-84

Адрес для переписки:

Просолович В.С.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь
e-mail: prosolovich@bsu.by

Address for correspondence:

Prosolovich V.S.
Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, 220030, Minsk, Belarus
e-mail: prosolovich@bsu.by

Для цитирования:

Бринкевич Д.И., Просолович В.С., Янковский Ю.Н.,
Вабищевич С.А., Вабищевич Н.В., Гайшун В.Е.
Склерометрический метод измерения микротвердости пленок
фоторезиста на кремнии.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 1. – С. 77–84.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-77-84

For citation:

Brinkevich D.I., Prosolovich V.S., Yankovski Yu.N.,
Vabishchevich S.A., Vabishchevich N.V., Gaishun V. E.
[Measurement of microhardness of photoresist films on silicon by the
scratching method].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 1, pp. 77–84 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-77-84

Введение

В последние годы интенсивно разрабатываются новые виды резистов для нано- и субмикронной литографии современной электроники [1, 2]. В качестве перспективных материалов для резистов рассматриваются различные полимерные композиции на основе полиметилметакрилата [3, 4], политетрафторэтилена [5], полиимида [6, 7], полиэтилентерефталата [8] и других термически и механически стойких полимеров. Особенно важную роль играют диазохинон-новолачные (ДХН) резисты [9, 10]. Определение микротвердости фоторезистивных пленок на кремниевых подложках является весьма актуальным, поскольку непосредственно характеризует такие важные свойства фоторезистов, как адгезия к подложке и стойкость к истиранию при кратковременном контактном взаимодействии тел в процессе литографии. Для измерения микротвердости тонких металлических и наноструктурных пленок и покрытий широко используется метод индентирования [11–13], однако возможность применения указанного метода для пленок полимера до настоящего времени не исследовалась. В то же время для определения микротвердости используется также метод склерометрии, однако работы, описывающие результаты применения указанного метода для исследования тонких полимерных пленок, в доступных авторам данной работы литературных источниках отсутствуют. Целью настоящей работы являлось изучение возможности применения методов микроиндентирования и склерометрии для исследования прочностных свойств пленок позитивного полимерного диазохинон-новолачного резиста, нанесенного на пластины монокристаллического кремния различных марок.

Методика эксперимента

Пленки позитивного фоторезиста ФП9120, представляющего собой композит из светочувствительного О-нафтохинондиазида и фенолформальдегидной смолы, толщиной от 1,0 до 5,0 мкм наносились на поверхность пластин (диаметр 100 мм) кремния различных марок (таблица 1) методом центрифугирования. Толщина h пленки фоторезиста определялась скоростью вращения и составляла: 1,0 мкм при скорости вращения $\nu = 8300$ об/мин; 1,8 мкм – при

$\nu = 2900$ об/мин; 2,5 мкм – при $\nu = 1200$ об/мин. Пленки толщиной $h = 5,0$ мкм формировались в две стадии с $\nu = 1800$ об/мин на обеих стадиях. Толщина пленок фоторезиста контролировалась с помощью микроинтерферометра МИИ-4 по пяти фиксированным точкам, расположенным на двух взаимно перпендикулярных диаметрах на каждой пластине, при этом отклонения от среднего значения по пластине для всех исследованных образцов (независимо от ориентации и вида и уровня легирования пластины) не превышали 2 %, что близко к погрешности измерений.

Таблица 1 / Table 1

Характеристики пластин кремния Specifications of silicon wafers

Пластины кремния Silicon wafers	Ориентация Orientation	Удельное сопротивление, Ом·см Specific resistance, Ohm·sm	Легированная примесь Dopant impurity
КДБ 10/КДВ 10	(111)	10	В
КДБ 0,005/ КДВ 0,005	(111)	0,005	В
КЭС 0,01/КЕС 0.01	(111)	0,01	Sb
КДБ 12/ КДВ 10	(100)	12	В
КДБ 4,5/ КДВ 4.5	(100)	4,5	В
КЭФ 4,5/КЕФ 4.5	(100)	4,5	Р

Исследование прочностных свойств структур фоторезист-кремний проводилось при комнатной температуре на приборе ПМТ-3 методом склерометрии – царапанием ребром четырехгранной алмазной пирамиды с квадратным основанием в оправе типа НПМ и углом при вершине $\alpha = 136^\circ$ согласно ГОСТу 9377-81. Нагрузка (P) на индентор варьировалась в пределах 1–20 г. Скорость движения индентора варьировалась в диапазоне 40–120 мкм/с. Наносилось не менее 7 канавок при каждой нагрузке и скорости движения индентора, а затем измерялась их ширина. Значения склерометрической микротвердости H_{\square}^{skl} вычислялись в соответствии с ГОСТом 21318-75 по средней ширине канавок согласно формуле:

$$H_{\square}^{skl} = \frac{3,708}{b^2},$$

где b – средняя ширина канавки.

Для сравнения на этом же приборе ПМТ-3 и этой же пирамидой проводились измерения микротвердости методом микроиндентирования по восстановленному отпечатку с использованием стандартной методики согласно ГОСТу 9450-76.

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 [14]. Величина микротвердости H^i рассчитывалась по средней величине диагонали отпечатка d согласно формуле:

$$H^i = \frac{1,854}{d^2}.$$

Имплантация ионами бора B^+ (энергия $E = 100$ кэВ) и фосфора P^+ (энергия 60 кэВ) в интервале доз $5 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$ в режиме постоянного ионного тока (плотность ионного тока $j = 4$ мкА/см 2) проводилась при комнатной температуре в остаточном вакууме не хуже 10^{-5} Па на ионно-лучевом ускорителе «Везувий-6». Облучение γ -квантами ^{60}Co осуществлялось при комнатной температуре и атмосферном давлении на установке МРХ- γ -25М. Мощность поглощенной дозы составляла $0,36 \pm 0,008$ Гр/с. Интервал поглощенных доз 6–200 кГр.

На рисунках 1 и 2 представлены типичные микрофотографии царапин поверхности пленки фоторезиста. Царапины имеют ровные края и пригодны для измерения ширины.

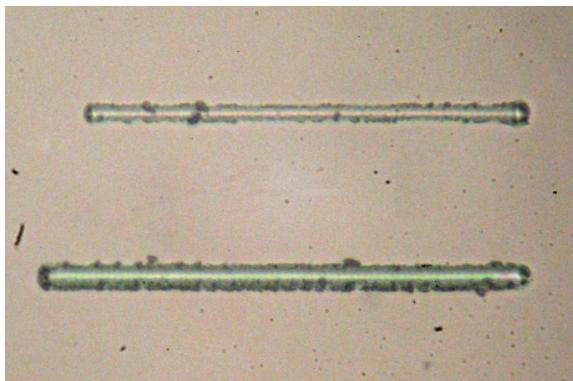


Рисунок 1 – Микрофотография царапин поверхности пленки фоторезиста толщиной 1,8 мкм при нагрузках 1 г (верхняя полоса) и 2 г (нижняя полоса; средняя ширина канавки $b \approx 12$ мкм)

Figure 1 – Micrograph scratches the surface of the film of photoresist with a thickness 1,8 μ m with loads of 1 g (the upper band) and 2 g (the lower band; average groove width $b \approx 12$ μ m)

Экспериментальные результаты и их обсуждение

У края царапины наблюдаются трещины в пленке фоторезиста, величина которых возрастает при увеличении нагрузки.

При условии, что глубина проникновения индентора меньше толщины пленки фоторезиста, значения склерометрической микротвердости для одного и того же образца совпадали или были близки друг к другу. Для пленок толщиной 5 мкм это условие соответствует нагрузкам до 5 г включительно (см. таблицу 2). Таким образом, материал подложки не оказывает влияния на результат измерений и согласно ГОСТу 21318-75 царапание алмазными наконечниками при указанных нагрузках пригодно для измерения склерометрической микротвердости пленок фоторезиста. Выбор величины нагрузки определяется толщиной пленки $h_{пл}$. Так, например, для $h_{пл} = 1,8$ мкм величина нагрузки не должна превышать 1 г, а для $h_{пл} = 5$ мкм допустимы нагрузки в диапазоне 1–5 г. Выбор нагрузки в каждом конкретном случае обусловлен тем, что индентор не должен достигать границы раздела фоторезист-кремний. Рекомендуется использовать минимальные нагрузки, дающие царапины с шириной, пригодной для корректных измерений. В нашем случае достаточна нагрузка 1 г для всех исследуемых пленок.

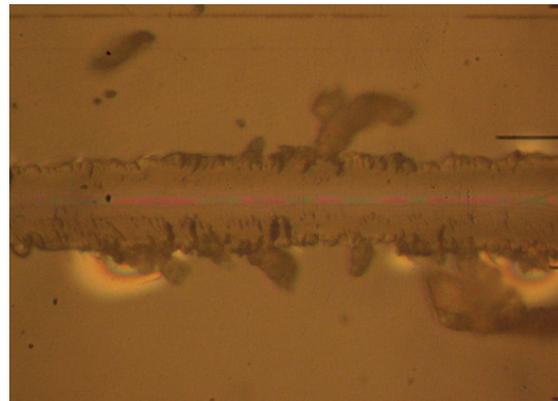


Рисунок 2 – Микрофотография царапины поверхности пленки фоторезиста толщиной 1,8 мкм при нагрузке 5 г. Индентор проникает в кремниевую подложку

Figure 2 – Micrograph scratches the surface of the film of photoresist with a thickness 1,8 μ m at a load of 5 g. The indenter penetrates into the silicon substrate

При увеличении нагрузки до 5 г и выше индентор проникает в кремниевую подложку. У границ царапины возникает большое количество трещин и, вероятно, локальные отслаивания пленки от подложки (рисунок 2). При этом значения склерометрической микротвердости снижаются до значений, соответствующих переходному слою вблизи границы раздела фоторезист-монокристаллический кремний (табли-

ца 2). Измерения, представленные в таблице 2, выполнялись при скорости движения индентора 50 мкм/с. Увеличение скорости движения индентора в 2 раза приводило к уменьшению в 1,2 раза ширины царапины и, соответственно, к увеличению измеренной микротвердости в 1,44 раза. Увеличение скорости движения индентора приводит к завышению значений микротвердости по сравнению с истинными значениями. Указанный эффект может быть обусловлен приподниманием индентора при высокой скорости движения. Таким образом, скорость движения индентора не должна превышать 50 мкм/с.

Таблица 2 / Table 2

Склерометрические исследования пленок ФП 9120 на пластинах кремния / Scratching study of diazoquinone-novolak films on silicon wafers

Пластины кремния Silicon wafers	Толщина пленки, мкм Film thickness μm	Нагрузка, г Load, g	b , мкм μm	h , мкм μm	H^{skl} , ГПа GPa
КДБ 12 (100)/ KDB 12 (100)	1,8	1	7,05	1,01	0,73
		2	13,20	1,89	0,42
		5	21,90	3,13	0,38
	2,5	1	7,40	1,07	0,63
		2	12,75	1,82	0,45
		5	20,40	2,91	0,44
5,0	1	7,40	1,07	0,63	
	2	11,25	1,61	0,56	
	5	18,00	2,57	0,57	
КЭС 0,01 (111)/ KES 0,01 (111)	1,8	1	7,35	1,05	0,67
		2	11,10	1,59	0,59
		5	21,00	3,00	0,41
КЭФ 4,5 (100)/ KEF 4,5 (100)	1,8	1	7,20	1,03	0,70
		2	12,45	1,78	0,47
		5	21,60	3,09	0,39

Механизм образования канавок на испытуемой поверхности при царапании ребром состоит, как отмечено в ГОСТе 21318-75, в пластическом деформировании материала преимущественно сдвигом в сторону и смещением его в направлении от оси к краям канавки. Это может приводить к формированию навалов у края царапины при испытании твердых металлов и сплавов. В наших экспериментах с полимерными фоторезистивными пленками таких навалов у границ канавки не обнаружено.

Проведенные исследования прочностных свойств структур фоторезист-кремний методом микроиндентирования показали, что при данном методе измерений полученное значение микротвердости H^f на 20–40 % меньше значения микротвердости, полученного методом склерометрии. Причем значение H^f зависит от приложенной нагрузки – оно возрастает при увеличении нагрузки даже при минимальных значениях P (1–2 г), когда влияние подложки при измерениях методом склерометрии не сказывается. Вероятнее всего, это обусловлено влиянием полей упругих напряжений вблизи поверхности фоторезистивной пленки. Данные упругие напряжения возникают при сушке нанесенных на кремний фоторезистивных пленок. Они растягивают отпечаток, сформировавшийся при индентировании, что приводит к увеличению его диагонали и, соответственно, к заниженным значениям микротвердости при измерении методом индентирования с использованием малых нагрузок. Схематически этот механизм представлен на рисунке 3.

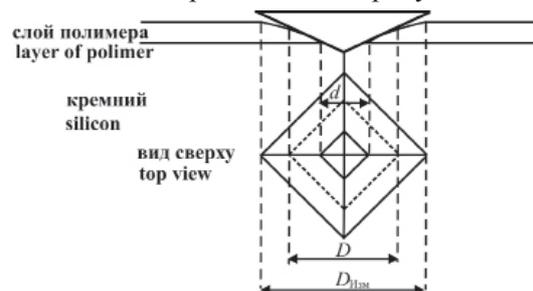


Рисунок 3 – Схема проникновения индентора в структуру полимер-кремний
Figure 3 – Scheme of penetration of the indenter into the structure of the polymer-silicon

Следует учесть, что при проникновении индентора в кремний на фотографии наблюдались 2 отпечатка: на границе воздух-полимер (с размерами диагонали $D_{изм}$) и на границе полимер-кремний (размер диагонали d). С учетом того, что глубина проникновения индентора (h) и его диагональ (d) для использовавшейся в работе четырехгранной алмазной пирамиды с квадратным основанием связаны соотношением $d = 7h$, исходя из подобия треугольников на рисунке 3, можно оценить величину диагонали индентора D на границе раздела воздух-полимер. Величина диагонали индентора D на границе раздела воздух-полимер была меньше измеренной диагонали отпечатка $D_{изм}$ на 10–20 %, что и приводило к заниженным значениям микротвердости, измеренной

методом индентирования. Различия между $D_{изм}$ и истинной величиной D возрастают при снижении нагрузки.

Кроме того, на стабильность и точность измерений микротвердости методом индентирования при малых нагрузках, как указано в ГОСТе 9377-81, может также оказывать влияние перемычка (линия стыка противоположных граней), возникающая при вершине четырехгранной пирамиды в процессе ее изготовления. При индентировании перемычка оказывает дополнительное нестабильное сопротивление вдавлению, которое выявляется в основном при сравнительно малой глубине отпечатка h (одного порядка с размером перемычки).

В соответствии с вышесказанным, можно сделать вывод, что метод индентирования имеет ограниченные возможности при исследовании тонких фоторезистивных пленок вследствие влияния полей упругих напряжений вблизи поверхности пленки, которые растягивают отпечаток, что приводит к увеличению его диагонали и, соответственно, к заниженным значениям микротвердости при измерении этим методом.

Исследования прочностных свойств пленок фоторезиста, имплантированных ионами бора и фосфора, а также облученных γ -квантами ^{60}Co , показали, что радиационное воздействие приводило к увеличению как значения склерометрической микротвердости H_{\square}^{skl} , так и значения микротвердости H^* , полученного методом индентирования, и исчезновению различий между ними. При этом возрастала дисперсия микротвердости при измерениях при малых нагрузках, появлялись растрескивания вокруг отпечатков и склерометрических полос. Это свидетельствует о существенном возрастании неоднородности фоторезистивной пленки и развитии в ней полей упругих напряжений после ионной имплантации. Увеличение дозы имплантации привело к уменьшению зоны разрушения вокруг склерометрических полос, ареолы (предположительно, навалы) пропадают, возникают трещины в пределах отпечатка индентора и склерометрических полос.

Заключение

На основании полученных экспериментальных результатов можно сделать вывод, что метод склерометрии пригоден для измерения микро-

твердости фоторезистивных пленок толщиной от 1,0 мкм и выше, в то же время метод индентирования нельзя использовать для измерений тонких ($h = 1,0\text{--}2,5$ мкм) пленок фоторезиста.

Метод склерометрии дает более точные и стабильные значения микротвердости при малых нагрузках вплоть до 1–2 г. Метод микроиндентирования при указанных нагрузках дает заниженные значения микротвердости, что обусловлено влиянием полей упругих напряжений вблизи поверхности фоторезистивной пленки, которые возникают при сушке пленки. Увеличение нагрузки до 10 и более грамм приводит к нивелированию указанных различий – значения микротвердости, полученные методом индентирования, согласуются со значениями, характерными для метода склерометрии. Облучение фоторезистивных пленок приводит к релаксации упругих напряжений вблизи поверхности полимера и, как следствие, к совпадению значений микротвердости, измеренных методами склерометрии и индентирования.

Список использованных источников

1. Моро, У. Микролитография. Принципы, методы, материалы. В 2-х ч. Ч. 2 / У. Моро – М.: Мир, 1990. – 632 с.
2. Булгакова, С.А. Химически усиленные резисты для литографии высокого разрешения / С.А. Булгакова [и др.] // Микроэлектроника. – 2013. – Т. 42, № 3. – С. 206–217.
3. Рау, Э.И. Комплексные исследования эффектов зарядки полимерного резиста (ПММА) при электронной литографии / Э.И. Рау [и др.] // Микроэлектроника. – 2013. – Т. 42, № 2. – С. 116–126.
4. Генцелев, А.Н. Исследование влияния синхротронного излучения на термофизические параметры рентгенорезиста ПММА / А.Н. Генцелев [и др.] // Поверхность. – 2012. – № 1. – С. 14–20.
5. Назьмов, В.П. Абляция политетрафторэтилена под воздействием синхротронного излучения при формировании микроструктур с высоким аспектным отношением / В.П. Назьмов [и др.] // Поверхность. – 2001. – № 3. – С. 10–14.
6. Guoping Mao, Somasiri N.L.D., Stacey N.A. Photoimageable, aqueous acid soluble polyimide polymers: US patent 6559245, publication 06 05.2003 / 3M Innovative Properties Company.
7. Ngo, D.D. Photoimageable polyimide coating: US patent 5599655, publication 04.02.1997 / Amoco Corporation.
8. Митрофанов, А.В. Исследование поверхности пленок из полиэтилентерефталата, модифицированных вакуумно-ультрафиолетовым облучением на воздухе / А.В. Митрофанов [и др.] // Поверхность. – 2009. – № 7. – С. 30–38.

9. *Weaver S.T., Wells R.* Photoimageable nozzle members and methods relating thereto: US patent 8173031, publication 8.05.2012/Lexmark International, Inc.

10. *Гранько, С.В.* Применение фоторезистивных масок для маскирования ионного пучка в технологии КМОП-интегральных схем / С.В. Гранько [и др.] // Вестник Нижегородского университета. Сер. «Физика». – 2001. – № 2. – С. 41–47.

11. *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.

12. *Андриевский, Р.А.* Наноиндентирование и деформационные характеристики наноструктурных боридонитридных пленок / Р.А. Андриевский [и др.] // Физика твердого тела. – 2000. – Т. 42, № 9. – С. 1624–1627.

13. *Штанский, Д.В.* Особенности структуры и физико-механических свойств наноструктурных тонких пленок / Д.В. Штанский [и др.] // Физика твердого тела. – 2003. – Т. 45, № 6. – С. 1122–1129.

14. *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.

Measurement of microhardness of photoresist films on silicon by the scratching method

Brinkevich D.I.¹, Prosolovich V.S.¹, Yankovski Yu.N.¹, Vabishchevich S.A.²,
Vabishchevich N.V.², Gaishun V. E.³

¹Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, 220030, Minsk, Belarus

²Polotsk State University,
Blohina str., 29, 211440, Novopolotsk, Belarus

³Francisk Skorina Gomel State University,
Sovetskaya st., 104, 246019, Gomel, Belarus

Received 01.12.2015

Accepted for publication 28.01.2016

Abstract. In recent years new types of resist for nano - and submicronic lithography are intensively developed. As perspective materials for resist various polymeric compositions on a basis thermally and mechanically resistant polymers are considered. The purpose of the real work was studying of possibility of application of a microindentation and scratching methods for research of strength properties of films of the polymeric resist applied on plates of single-crystal silicon. As an example films of positive diazoquinone-novolak photoresist 1,0–5,0 μm thick which were applied on plates of silicon of various brands with a centrifugation method were used. The comparative analysis of an microindentation and scratching methods for microhardness measurement of structures photoresist-silicon is carried out. It is shown that the scratching an edge of a tetrahedral diamond pyramid (a scratching method) is suitable for microhardness measurement of resistive films from 1,0 μm thick, at the same time the method of an microindentation can't be used for measurements thin ($h = 1,0\text{--}2,5 \mu\text{m}$) photoresist films. When using the load $P = 1\text{--}2 \text{ g}$, more accurate values of microhardness gives the scratching method. Value of the microhardness determined by a scratching method is 20–40 % more than value of the microhardness received by a microindentation method. The increase in loading to 10 g leads to leveling of the specified distinctions – the values of a microhardness received by both methods coincide. Radiation of resistive films changed the structure of resist films. It is results to correlation of microhardness values given on measurement as by a scratching method, and by an indentation method.

Keywords: photoresist, silicon, scratching, indentation, microhardness.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-77-84

Адрес для переписки:

Просолович В.С.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь
e-mail: prosolovich@bsu.by

Address for correspondence:

Prosolovich V.S.
Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, 220030, Minsk, Belarus
e-mail: prosolovich@bsu.by

Для цитирования:

Бринкевич Д.И., Просолович В.С., Янковский Ю.Н.,
Вабищевич С.А., Вабищевич Н.В., Гайшун В.Е.
Склерометрический метод измерения микротвердости пленок
фоторезиста на кремнии.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 1. – С. 77–84.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-77-84

For citation:

Brinkevich D.I., Prosolovich V.S., Yankovski Yu.N.,
Vabishchevich S.A., Vabishchevich N.V., Gaishun V. E.
[Measurement of microhardness of photoresist films on silicon by the
scratching method].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 1, pp. 77–84 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-77-84

References

1. Moreau W.M. Semiconductor lithography. Principles, practices and materials. N.Y., London, Plenum Press, 1988, 952 pp.
2. Bulgakova S.A., Jons M.M., Pestov A.E., Toropov M.N., Chkhalo N.I., Gusev S.A., Skorokhodov E.V., Salashchenko N.N. Chemically amplified resists for high-resolution lithography. *Russian Microelectronics*, 2013, vol. 42, no. 3, pp. 165–175.
3. Rau E.I., Evstaf'eva E.N., Zaitsev S.I., Knyazev M.A., Svintsov A.A., Tatarintsev A.A. Complex investigations of effects of charging a polymer resist (PMMA) during electron lithography. *Russian Microelectronics*. 2013. vol. 42, no. 2, pp. 89–98.
4. Gentshev A.N., Gol'denberg B.G., Petrova E.V., Pindyurin V.F., Kozlov A.S. A Study of the Effect of Synchrotron Radiation Exposure on the Thermophysical Parameters of the PMMA X-Ray Resist. *Journal of Surface Investigation*, 2012, vol. 6, no. 1, pp. 12–18.
5. Naz'mov V.P., Mezentseva L.A., Pindyurin V.F., Istomin V.E., [Abljatsija politetraforetilena pod vozdeistviem sinhrotronnogo izlucheniya pri formirovanii mikrostruktur s vysokim aspektnym otnosheniem]. *Poverkhnost*, 2001, no. 3, pp. 10–14 (in Russian).
6. Guoping Mao, Somasiri N.L.D., Stacey N.A. Photoimageable, aqueous acid soluble polyimide polymers: US patent 6559245, publication 06 05.2003 / 3M Innovative Properties Company.
7. Ngo D.D. Photoimageable polyimide coating: US patent 5599655, publication 04.02.1997 / Amoco Corporation.
8. Mitrofanov A. V., Karban O. V., Sugonyako A., Lubomska M. Investigation of the Surface of Poly(ethylene terephthalate) Films Modified by Vacuum Ultraviolet Irradiation in Air. *Journal of Surface Investigation*, 2009, vol. 3, no. 4, pp. 519–527.
9. Weaver S.T., Wells R. Photoimageable nozzle members and methods relating thereto: US patent 8173031, publication 8.05.2012/ Lexmark International, Inc.
10. Gran'ko S.V., Volk S.A., Leont'ev A.V., Komarov F.F., Kamyshan A.S. Application of photoresistive masks to mask the ion beam in the CMOS technology of integrated circuits. *Vestn. Nizhegorodsk. Univ., Ser. «Fizika»*, 2001, no. 2, pp. 41–47 (in Russian).
11. Shugurov A.R., Panin A.V., Oskomov K.V. Specific features of the determination of the mechanical characteristics of thin films by the nanoindentation technique. *Physics of the Solid State*, 2008, vol. 50, no. 6, pp. 1050–1055.
12. Andrievskii R.A., Kalinnikov G.V., Hellgren N., Sandstrom P., Shtanskii D.V. Nanoindentation and strain characteristics of nanostructured boride/nitride films. *Physics of the Solid State*, 2000, vol. 42, no. 9, pp. 1671–1674.
13. Shtanskii D.V., Kulinich S.A., Levashov E.A., Moore J.J. Structure and physical-mechanical properties of nanostructured thin films. *Physics of the Solid State*, 2003, vol. 45, no. 6, pp. 1177–1184.
14. Brinkevich D. I., Vabishchevich N.V., Prosolovich V.S. Micromechanical Properties of GaP<Dy> Epilayers. *Inorganic Materials*, 2012, vol. 48, no. 8, pp. 768–772.