

УДК 546.28:621.315.592

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИНДЕНТОРА С ПЛЕНКАМИ СОПОЛИМЕРОВ  
НА ОСНОВЕ МЕТИЛМЕТАКРИЛАТА***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**(Белорусский государственный университет, Минск)*

*Исследованы процессы, протекающие при индентировании алмазным индентором пленок статистического сополимера метакриламид/метилметакрилат, синтезированных на пластинах монокристаллического кремния. Установлено, что поля упругих напряжений вблизи поверхности полимерной пленки оказывают существенное влияние на форму отпечатка индентора. Отмечались как растягивающие напряжения, так и напряжения сжатия. Вокруг отпечатков наблюдается интерференционная картина, обусловленная формированием при индентировании приповерхностного слоя с показателем преломления, отличным от объемного. Рассчитано критическое напряжение начала модификации приповерхностного слоя полимера. Показано, что на прочностные свойства полимерных пленок оказывает существенное влияние наличие сильной адгезионной связи между кремнием и сополимером.*

**Ключевые слова:** *структура сополимер-кремний, индентирование, микротвердость, показатель преломления.*

**Введение.** В современной электронике сополимеры на основе метилметакрилата (ММА) широко используются в качестве чувствительных к высокоэнергетичному излучению резистов, обеспечивающих повышенную разрешающую способность [1–6], и в микроволноводных структурах типа полимер/SiO<sub>2</sub>/Si – для обеспечения функционирования различных устройств [7, 8]. Кроме того, полимерные пленки используются в качестве диэлектрических слоев в малогабаритных конденсаторах и в качестве защитных слоев тонкопленочных структур. Такое применение их обусловлено, прежде всего, высокими термостойкостью и электрической прочностью, химической стойкостью к растворам кислот и щелочей, высокой адгезией пленок к полупроводникам при высокой эластичности и устойчивости к пластическим деформациям [9]. Полимерные пленки особенно привлекательны из-за относительно дешевой технологии их получения. В последнее время внимание исследователей сконцентрировано на создании различных электронных устройств с использованием полимерных пленок, таких как сенсорные и электрохимические датчики, электролюминесцентные приборы, диоды Шоттки и органические транзисторы [10]. Одной из основных причин деградации параметров приборов являются механические и термические воздействия, приводящие к формированию полей упругих напряжений в полимерных пленках у границы раздела полимер/кремний.

Метод индентирования позволяет изучать процессы развития деформации в малых объемах, что весьма важно при малой толщине полимерной пленки. К тому же индентирование является основным (а в некоторых случаях и единственным) способом моделирования процессов при кратковременном контактом взаимодействии тел, например, при абразивной обработке [11–13]. Нет причин ожидать, что поведение материала при столь экстремальных условиях будет похоже на поведение при испытаниях квазистатическим одноосным сжатием или растяжением. Следовательно, создание экспериментальных ситуаций, в которых бы, с одной стороны, материал ставился в подобные условия, а с другой – имелась бы возможность изучать его реакцию, – весьма актуальная научная и практическая задача.

В настоящей работе исследовалось взаимодействие алмазного индентора с пленками сополимеров метакриламида (ММА) и метилметакрилата (ММА), нанесенными на поверхность монокристаллического кремния.

**Методика эксперимента.** Статистические сополимеры метакриламид/метилметакрилат с различным соотношением ММА/ММА синтезировались методом радикальной полимеризации из соответствующих мономеров. Пленки (толщиной 15–80 мкм) наносились на пластины монокристаллического кремния марки КЭФ-4,5 в виде концентрированного раствора, после чего проводилось удаление растворителя в изотермических условиях (при 25 °С). Параметры исследованных пленок представлены в таблице 1.

Индентирование проводилось по стандартной методике на приборе ПМТ-3 четырехгранной алмазной пирамидой с квадратным основанием в оправе типа НПМ и углом при вершине  $\alpha = 136^\circ$  согласно ГОСТ 9450-76. Наносилось 40–50 отпечатков. Расчет величин микротвердости осуществлялся с приме-

нением статистического метода обработки данных [14]. Погрешность измерения микротвердости не превышала 4%.

Известно, что подложка оказывает существенное влияние на величину микротвердости твердотельных композиций пленка-подложка [15–18]. Это влияние наиболее сильно проявляется в случае «твердой» пленки на «мягкой» подложке, когда не только упругая, но и пластическая деформация подложки начинается уже на начальной стадии индентирования. В этом случае влияние подложки ощущается уже при глубине проникновения индентора приблизительно 6–10 % от толщины пленки [17, 18]. В случае «мягкой» пленки на «твердой» подложке пластическая деформация локализуется в пленке и микротвердость композиции пленка-подложка существенно возрастает лишь при глубине проникновения индентора, равной толщине пленки [16]. Указанные обстоятельства и определили выбор максимальной нагрузки ( $P$ ). Минимальная нагрузка определялась из следующего условия: глубина проникновения индентора должна превышать высоту неровностей поверхности пленки, поскольку в противном случае будут иметь место искажения реальной площади контакта пленка-индентор.

Таблица 1 – Характеристики исследованных полимерных пленок

Номер образца	Состав пленки сополимера, ММА:ММА	Толщина пленки, мкм	Форма отпечатка	Напряженное состояние пленки	Наличие «ореолов» (сферической модифицированной области)	Максимальный порядок интерференции
1	6:4	15	бочковидный	растяжение	для всех нагрузок	3
2	6:4	80	вогнутый	сжатие	нет	–
3	4:6	80	вогнутый	сжатие	для нагрузок > 50 г	2
4	1:1	80	бочковидный	растяжение	для всех нагрузок	4

При микро- и наноиндентировании наблюдается изменение формы отпечатка за счет упругого последствия при разгрузке. В достаточно пластичных материалах вершины отпечатка своего положения не меняют, т.е. расстояние между вершинами при возврате сохраняется [19]. В связи с чем измерялись обе диагонали отпечатка, а микротвердость рассчитывалась по их среднему значению. В настоящей работе измерялась «восстановленная» микротвердость ( $H$ ) [20].

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** Характерные микрофотографии отпечатков индентора для различных образцов представлены на рисунке 1. Существенных различий в размерах диагоналей не отмечалось. Это свидетельствует о том, что пленки являются изотропными, а характер деформации в них – гомогенный. После снятия нагрузки, имеющей небольшие значения, происходит упругая релаксация приповерхностной области пленки. Так, для образцов 1 и 4 из таблицы 1 при  $P = 5$  г наблюдалось не более 5–10% отпечатков; подавляющее большинство отпечатков восстанавливалось полностью.

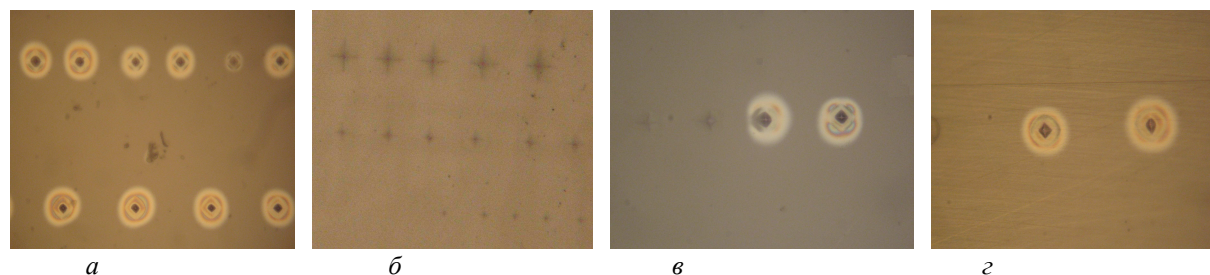


Рисунок 1 – Микрофотографии отпечатков для образцов:  $a - 1$ ;  $b - 2$ ;  $v - 3$ ;  $z - 4$

Форма отпечатка отличалась от формы индентора, что обусловлено упругим последствием при его разгрузке. Причем форма отпечатка различалась для разных пленок. В образцах 1 и 4 отпечатки имели бочковидную форму – наблюдался прогиб в сторону от индентора граней отпечатка, усиливающийся к вершине. Это свидетельствует о наличии растягивающих напряжений у поверхности пленки. В образцах 2, 3 отпечатки были вогнуты внутрь, что свидетельствует о наличии напряжений сжатия. Обычное фото получить невозможно, поскольку поверхность зеркальная и отпечатка не видно. В этих образцах изображение получено фотографированием в поляризованном свете, выявляющем грани отпечатка

по-разному, поскольку расположены под разными углами. За счет этого удается посчитать отношение величины прогиба стороны к стороне отпечатка ( $\Delta a/a$ ). Это отношение  $\Delta a/a$  составляло для образца 2 в среднем 0,15; а для образца 3 – 0,08. Вероятнее всего, такие различия в напряженных состояниях пленок обусловлены различиями в условиях нанесения пленок (количество растворителя, время выпаривания и т.д.). На это указывает тот факт, что пленки одного состава, но разной толщины ведут себя по-разному (сравни образцы 1 и 2). Отметим также, что знак напряжений может изменяться по глубине отпечатка. Так, в образцах 1 и 4 растягивающие напряжения у поверхности пленки, вероятнее всего, сменяются на сжимающие в глубине отпечатка. За счет этого видны темные крестообразные изображения в центре отпечатка.

Вокруг отпечатков в образцах с растягивающими напряжениями (образцы 1 и 4 в табл. 1) наблюдались ореолы – светлые сферические области, внутри которых наблюдались интерференционные полосы. Размеры ореолов существенно варьировались при постоянной нагрузке, однако наблюдалась очевидная тенденция их увеличения с ростом нагрузки. Диаметр ореолов обычно в 4–5 раз превышал размеры отпечатка. При нагрузке 20–50 г иногда отмечались перекрытия ореолов от соседних 3–5 отпечатков (рис. 2). В образцах со сжимающими напряжениями при малых нагрузках ореолы не прослеживались. При максимальной нагрузке (50 г) они наблюдались вокруг части отпечатков только на образце 3 (см. рис. 1, в). В образце 2 формирования ореолов не отмечалось.

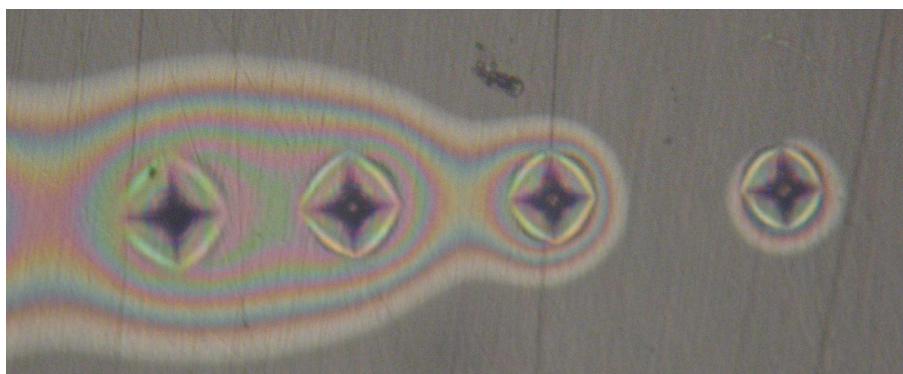


Рисунок 2 – Микрофотография отпечатков для образца 1 при нагрузке 50 г

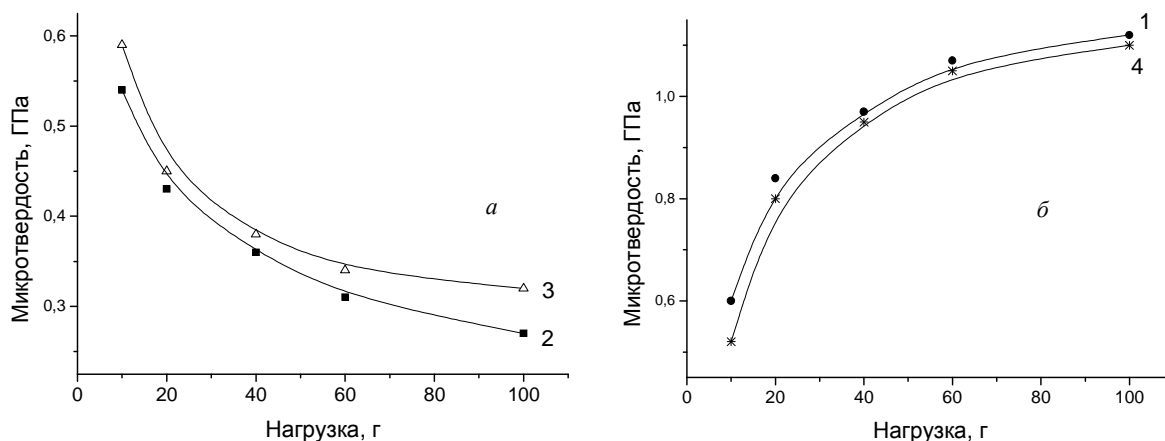
Измеренные значения восстановленной микротвердости исследовавшихся полимерных пленок варьировались в широких пределах (от 0,2 до 1,5 ГПа) и существенно зависели от нагрузки, состава и толщины пленки. В отличие от монокристаллических полупроводников для полимерных пленок характерны достаточно большие разбросы измеряемых значений диагоналей отпечатков и, следовательно, рассчитанных значений микротвердости. Так, среднее квадратичное отклонение случайного распределения измеренных величин микротвердости зависело от нагрузки и составляло от 3 до 20% от величины микротвердости (табл. 2). При больших нагрузках гистограмма случайного распределения величин микротвердости представляла собой гауссово распределение, наиболее четко выраженное для образцов 2 и 3, имеющих напряжения сжатия. В указанных образцах среднее квадратичное отклонение микротвердости составляло от 4 до 5% при нагрузке 50 г и было близко к аналогичным величинам, характерным для монокристаллических полупроводников (от 2 до 3% для кремния [21]). В образцах с растягивающими напряжениями (1 и 4) среднее квадратичное отклонение распределения микротвердости было существенно (в 3–4 раза) выше, а гистограмма случайного распределения  $H$  имела существенные отклонения от гауссова распределения, наиболее выраженные при малых нагрузках.

Таблица 2 – Среднее квадратичное отклонение случайного распределения величин микротвердости исследовавшихся полимерных пленок при различных нагрузках

Номер образца	Среднее квадратичное отклонение величин микротвердости, %		
	10 г	20 г	50 г
1	15	12	10
2	8	6	5
3	5	4	4
4	17	17	19

Приведенные выше экспериментальные данные свидетельствуют о высокой неоднородности исследовавшихся пленок. Так, в полупроводниковых материалах [21] увеличение случайного разброса величины микротвердости обычно связывается с образованием крупных неоднородностей (включений второй фазы) с размерами близкими к размерам отпечатка индентора (в исследовавшемся случае приблизительно 20–40 мкм). С другой стороны, согласно [22] разброс значений прочностных характеристик полимерных пленок обусловлен неоднородностью (вероятнее всего, негомогенностью, хотя нельзя исключить и формирование мезофаз) материала, а количественная оценка этого разброса (величина среднего квадратичного отклонения) может служить количественной оценкой неоднородности. Таким образом, полученные экспериментальные результаты указывают на существенно более высокую (в 2–3 раза) неоднородность образцов 1 и особенно 4 по сравнению с образцами 2 и 3. Следует также учитывать неоднородность полей упругих напряжений вблизи поверхности полимера, которые существенно искажают форму отпечатка индентора ввиду упругого последействия после снятия нагрузки, что приводит к дополнительному разбросу измеряемых значений диагоналей отпечатков и, следовательно, рассчитанных значений микротвердости.

Зависимость восстановленной микротвердости ( $H$ ) от нагрузки на индентор ( $P$ ) представлена на рисунке 3. Она приведена для нагрузок превышающих 5 г, когда наблюдаются все 100% отпечатков и имеет место пластическая деформация. Характер указанных зависимостей обусловлен знаком полей упругих напряжений в приповерхностной области полимерных пленок. Для пленок с напряжениями сжатия (кривые 2 и 3 на рис. 3, *а*) зависимости микротвердости от нагрузки схожи с аналогичными зависимостями, характерными для кристаллов и пленок твердых материалов – с увеличением нагрузки на индентор микротвердость снижается и выходит на постоянное значение [17, 19, 23]. Для пленок с растягивающими напряжениями (образцы 1 и 4 в таблице 1) данные зависимости кардинально отличаются (кривые 1 и 4 на рисунке 3) – с ростом нагрузки микротвердость возрастает в 2–3 раза.



**Рисунок 3 – Зависимости восстановленной микротвердости от нагрузки. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице 1**

Таким образом, комплекс экспериментальных данных указывает на существенно различный характер деформаций при индентировании образцов 2 и 3, с одной стороны, и образцов 1 и 4, с другой. Процессы деформации в образцах № 2 и 3 схожи с процессами деформации, протекающими в твердых телах (монокристаллах и поликристаллах). Характер изменений при индентировании образцов 1 и 4 более сложен. В них при увеличении нагрузки наблюдается рост значений микротвердости при одновременном увеличении пластичности. Вероятнее всего, такой характер зависимости микротвердости от нагрузки обусловлен снижением вклада растягивающих напряжений при ее увеличении, что должно приводить к уменьшению измеренной диагонали отпечатка и, соответственно, к росту рассчитанных значений микротвердости.

Полученные экспериментальные результаты могут быть объяснены с учетом следующих обстоятельств. Сополимеры метакриламид/метилметакрилат относят к аморфно-кристаллическим полимерам. Они состоят из кристаллических областей, разделенных аморфными зонами, причем одна и та же полимерная цепь в силу большой длины может входить как в первые, так и во вторые области. Объемная степень кристаллическости – доля объема, занятая кристаллитами, – зависит от условий кристаллизации, состава и природы полимера, присутствия примесей и т.д. При внешних механических воздействиях возможно разрушение слабых межмолекулярных связей и смещение цепей полимера с образованием

областей с молекулярным упорядочением – так называемая «кристаллизация» в аморфных областях. Такое молекулярное упорядочение наблюдалось авторами [24] при облучении полиметилметакрилата миллисекундными лазерными импульсами. При приложении внешней нагрузки (индентировании) ориентация молекул полимера приводит к известному эффекту ориентационного упрочнения полимеров [22]. В наших экспериментах указанный эффект проявлялся в образце 4 с одинаковым содержанием метилметакрилата и метакриламида. При изменении состава сополимера в ту или иную сторону (образцы 3 и 2) эффект ориентационного упрочнения (увеличение микротвердости при возрастании нагрузки) не наблюдался.

Следует отметить также существенное влияние на результаты экспериментов кремниевой подложки, что проявлялось в увеличении микротвердости при снижении толщины пленки. Это обусловлено тем, что на прочностные свойства пленок оказывает существенное влияние наличие сильной адгезионной связи между кремнием и сополимером. Так, на поверхности кремния всегда имеется естественный окисел толщиной 3–5 нм, который при наличии кислорода формируется в течение нескольких минут. С другой стороны, между полиметилметакрилатом и кварцем  $\text{SiO}_2$  наблюдается сильное адгезионное взаимодействие [25]. Глубина, на которую простирается указанное взаимодействие, может достигать 100 мкм. Наличие такого взаимодействия должно приводить к увеличению механической прочности структур полимер-кремний, что и наблюдалось нами.

Интерференционная картина, наблюдавшаяся вокруг отпечатков (см. рис. 1), указывает на то, что вокруг отпечатка формируется модифицированный приповерхностный слой с показателем преломления  $n$ , отличным от объемного (рис. 4). Интерференция возникает тогда, когда толщина приповерхностного модифицированного слоя сравнима с длиной волны  $\lambda$  падающего оптического излучения (в нашем случае видимого диапазона). Отметим, что в работе [26] показано, что при облучении  $\gamma$ -квантами поглощенной дозой 6–40 кГр пленок полиэтилентерефталата происходит модификация структуры тонких приповерхностных слоев пленки, проявляющаяся в возникновении интерференционной картины на спектрах пропускания и отражения в диапазоне длин волн 300–1100 нм. При этом толщина модифицированного слоя составляет 1,4–1,7 мкм, а показатель преломления слоя изменяется в диапазоне 1,55–1,48 в зависимости от дозы.

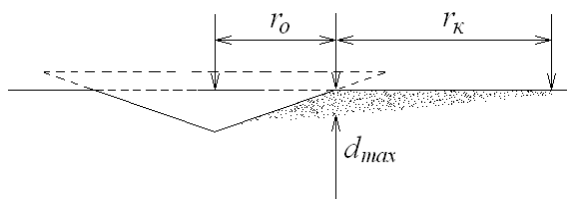


Рисунок 4 – Модификация слоя полимера при контакте с индентором

Оценим толщину модифицированного слоя полимера. Условие максимумов при интерференции от модифицированного слоя при нормальном падении

$$2dn = m\lambda,$$

Откуда толщина модифицированного слоя

$$d = \frac{m\lambda}{2n}.$$

Показатель преломления пленки полиметилметакрилата  $n = 1,27$  [27]. Допустим, что изменение показателя преломления составляет  $\Delta n = 0,03$ . Максимальный порядок интерференции равен  $m_{\max} = 4$  (см. табл. 1). Подставляя значения  $n = 1,30$ ;  $m = m_{\max} = 4$ ;  $\lambda = 700$  нм, получаем максимальную толщину модифицированного слоя полимерной пленки  $d_{\max} = 1,1$  мкм, что примерно соответствует глубине проникновения индентора.

Расстояние от отпечатка, на котором возникают ореолы, позволяет оценить критическое напряжение начала модификации приповерхностного слоя при индентировании. В случае точечного источника расширения радиальные напряжения  $\sigma_r$ , вызывающие появление полости на поверхности материала, пропорциональны изменению ее объема  $\Delta V$  [28]:

$$\sigma_r = \frac{\mu}{\pi \cdot r^3} \Delta V, \quad (1)$$

где  $\mu$  – модуль сдвига.

Таким образом, локальные напряжения затухают по закону  $\sim r^{-3}$  по мере удаления от центра возмущения. Если непосредственно у стороны отпечатка  $r_0$  напряжение  $\sigma_0$  равно расчетному значению микротвердости  $H$ , то на границе  $r_k$  «модифицированной» области (см. рис. 4) напряжение  $\sigma$  может быть вычислено по формуле

$$\sigma = \sigma_0 \left( \frac{r_0}{r_0 + r_k} \right)^3. \quad (2)$$

В таблице 3 приведены рассчитанные согласно (2) критические напряжения, при достижении которых происходит модификация (изменение) показателя преломления. Для всех использовавшихся нагрузок оценки критического напряжения лежат в диапазоне 60–75 МПа.

Таблица 3 – Критические напряжения для образца 4

Нагрузка, г	Критическое напряжение $\sigma$ , МПа
10	62
20	63
50	73

**Заключение.** Таким образом, установлено, что поля упругих напряжений вблизи поверхности полимерной пленки оказывают существенное влияние на форму отпечатка индентора. Отмечались как растягивающие напряжения, так и напряжения сжатия. Вокруг отпечатков наблюдается интерференционная картина, обусловленная формированием при индентировании приповерхностного слоя с показателем преломления  $n$ , отличным от объемного. Рассчитано критическое напряжение начала модификации приповерхностного слоя полимера. Показано, что на прочностные свойства полимерных пленок оказывает существенное влияние наличие сильной адгезионной связи между кремнием и сополимером.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Ф16-151 от 20.05.2016 г.).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Комплексные исследования эффектов зарядки полимерного резиста (ПММА) при электронной литографии / Э.И. Рау и [др.] // Микроэлектроника. – 2013. – Т. 42, № 2. – С. 116–126.
2. Исследование влияния синхротронного излучения на термофизические параметры рентгенорезиста ПММА / А.Н. Генцелев и [др.] // Поверхность. – 2012. – № 1. – С. 14–20.
3. Формирование и исследование толстых резистивных слоев ПММА для LIGA-технологии / О.Н. Бобровникова и [др.] // Поверхность. – 2005. – № 9. – С. 38–43.
4. Тригуб, В.И. Модификация тонких пленок полиметилметакрилата и метилметакрилата-метилакриловой кислоты под воздействием ультразвука и электронов / В.И. Тригуб, А.В. Плотнов, С.В. Смирнов // Физика и химия обработки материалов. – 2003. – № 4. – С. 92–94.
5. Моро, У. Микролитография. Принципы, методы, материалы : в 2 ч. / У. Моро – М. : Мир, 1990. – Ч. 2. – 632 с.
6. Химически усиленные резисты для литографии высокого разрешения / С.А. Булгакова и [др.] // Микроэлектроника. – 2013. – Т. 42, № 3. – С. 206–217.
7. Hybrid silica-polymer structure for integrated optical waveguides with new potentialities / D. Bosc [et al.] // Mater. Sci. Eng. – 1999. – V. 75. – P. 155–160.
8. Формирование диэлектрических микроволноводов в системе полимер/SiO<sub>2</sub>/Si с использованием ионного облучения / А.В. Леонтьев [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – № 3. – С. 79–84.
9. Дебский, В. Полиметилметакрилат / В. Дебский. – М.-Л. : Химия, – 1972. – 152 с.
10. Шука, А.А. Нанoeлектроника / А.А. Шука. – М. : Физматкнига, 2007. – 464 с.
11. Poole, Ch. Introduction of Nanotechnology / Ch. Poole, F. Owens. – Indianapolis : John Wiley & Sons, Inc, 2003. – 400 p.
12. Головин, Ю.И. Новые принципы, техника и результаты исследования динамических характеристик твердых тел в микрообъемах / Ю.И. Головин // Журнал технической физики. – 2000. – Т. 70, № 5. – С. 82–91.
13. Литвинов, М.Ю. Методология определения механических свойств полупроводниковых материалов с помощью метода непрерывного вдавливания индентора / М.Ю. Литвинов, Ю.М. Литвинов // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2004. – № 4. – С. 11–16.
14. Калоша, В.К. Математическая обработка результатов эксперимента / В.К. Калоша, С.И. Лобко Т.С. Чикова. – Минск : Высш. шк., 1982. – 103 с.

15. Зависимость микротвердости эпитаксиальных слоев четверных твердых растворов соединений  $A^{III}B^V$  от их состава / М.В. Меженный [и др.] // Неорганические материалы. – 1990. – Т. 26, № 8. – С. 1601–1604.
16. Шугуров, А.Р. Особенности определения механических характеристик тонких пленок методом наноиндентирования / А.Р. Шугуров, А.В. Панин, К.В. Осколков // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50, № 6. – С. 1007–1012.
17. Наноиндентирование и деформационные характеристики наноструктурных боридонитридных пленок / Андриевский Р.А. [и др.] // Физика твердого тела. – 2000. – Т. 42, № 9. – С. 1624–1627.
18. Панин, А.В. Исследование механических свойств тонких пленок Ag на кремниевой подложке методом наноиндентирования / А.В. Панин, А.Р. Шугуров, К.В. Оскомов // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47, № 11. – С. 1973–1977.
19. Сойфер, Я.М. Исследование локальных механических свойств монокристаллов хлористого калия методом атомно-силовой микроскопии / Я.М. Сойфер, А. Вердян // Физика твердого тела. – 2003. – Т. 45, № 9. – С. 1621–1625.
20. Булычев, С.И. Соотношение между восстановленной и невосстановленной твердостью при испытании наномикроиндентированием / С.И. Булычев // Журнал технической физики. – 1999. – Т. 69, № 7. – С. 42–48.
21. Влияние фоновых примесей на формирование дефектов упаковки в пластинах кремния / Д.И. Бринкевич [и др.] // Микроэлектроника. – 2006. – Т. 35, № 2. – С. 112–116.
22. Гуль, В.Е. Структура и механические свойства полимеров / В.Е. Гуль, В.Н. Кулешов. – М. : Лабиринт, 1994. – 344 с.
23. Физическая природа изменения микротвердости по глубине образца / А.Б. Герасимов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2004. – № 3. – С. 71–74.
24. Изменение структуры полиметилметакрилата при облучении миллисекундными лазерными импульсами / С.В. Васильев [и др.] // Квантовая электроника. – 1998. – Т. 25, № 11. – С. 1023–1027.
25. Исследование структуры граничных слоев полиметилметакрилата методом нарушенного полного отражения / Г.М. Семенович [и др.] // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. – 1978. – Т. 20, № 9. – С. 2000–2005.
26. Модификация приповерхностных слоев пленок полиэтилентерефталата при облучении  $\gamma$ -квантами / Ю.А. Бумай [и др.] // Вестник БГУ. Сер. 1. Физика. Математика. Информатика. – 2012. – № 3. – С. 41–44.
27. Энциклопедия полимеров. Т.2. – М. : Сов. Энциклопедия, 1974.
28. Хирт, Дж. Теория дислокаций : пер. с англ. / Дж. Хирт, И. Лоте. – М. : Атомиздат. – 1972. – 600 с.

Поступила 18.03.2016

## INTERACTION OF THE INDENTOR WITH FILMS OF COPOLYMERS ON THE BASIS OF METHYLMETHACRYLATE

S. VABISHCHEVICH, N. VABISHCHEVICH, D. BRINKEVICH, V. PROSOLOVICH

*The processes at the indentation of a diamond indenter into the films of statistical methacrylamid/methylmethacrylate copolymer synthesized on plates of single-crystal silicon was investigated. It was established that fields of elastic tension near a surface of a polymeric film have significant effect on a print form. Were observed as the stretching tension, and compression tension. Around prints the interferential picture caused by formation a near-surface layer with the index of refraction other than volume is observed. The critical tension of the beginning of modification of a near-surface layer of polymer is calculated. It was shown that strong adhesive interaction between silicon and copolymer has significant effect on strength properties of polymeric films.*

**Keywords:** structure of the copolymer-silicon, indentation, micro-hardness, refractive index.