

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.315.592

### ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ ПОЗИТИВНЫХ ФОТОРЕЗИСТОВ

© 2014 г. Д. И. Бринкевич<sup>1</sup>, С. Д. Бринкевич<sup>1</sup>, Н. В. Вабищевич<sup>2</sup>,  
В. Б. Оджаев<sup>1</sup>, В. С. Просолович<sup>1</sup>

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

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

E-mail: Brinkevich@bsu.by

Поступила в редакцию 10.06.2013 г.

Исследованы процессы радиационного дефектообразования при ионной имплантации пленок позитивного фоторезиста ФП9120. Установлено, что процессы радиационного дефектообразования протекают не только в области торможения ионов, но и далеко за областью проецированного пробега ионов Sb. Эффект радиационного упрочнения полимера наблюдался по всей толщине пленки, причем за слоем внедрения ионов указанный эффект выражен сильнее. Предположительно, он обусловлен процессами радиационного сшивания. Ионная имплантация приводит к снижению микротвердости вблизи границы раздела фоторезист/Si, что обусловлено ухудшением адгезионного взаимодействия фотополимерной пленки с кремнием.

DOI: 10.7868/S0544126914010037

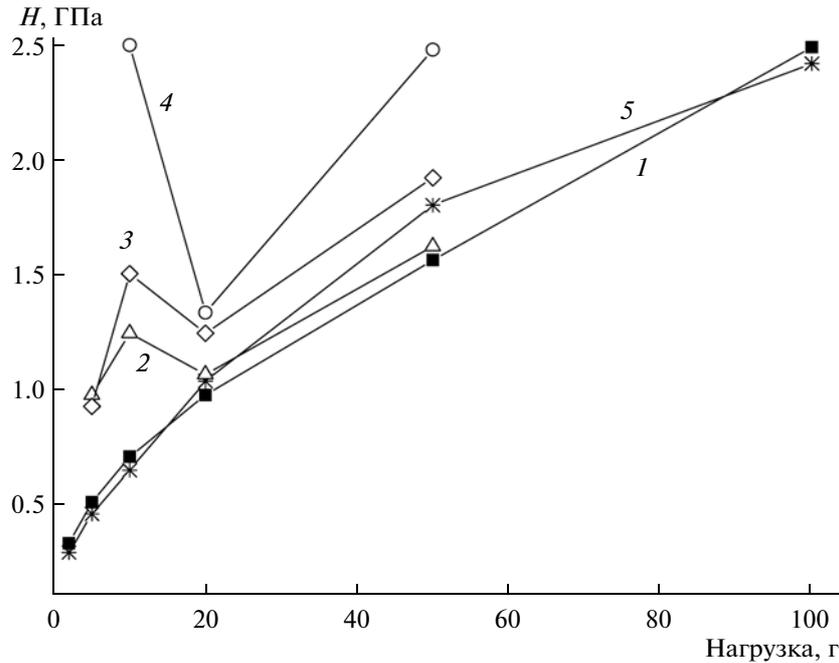
#### ВВЕДЕНИЕ

Ионная имплантация широко применяется в современной полупроводниковой микроэлектронике с целью загонки строго дозированного количества примесных атомов для последующей диффузионной разгонки при формировании локальных легированных карманов [1–4]. Повышение степени интеграции предъявляет высокие требования к блоку операций, обеспечивающих маскирование ионного пучка. Одним из основных материалов маскирующего покрытия являются фоторезисты. Так, если при формировании элементной базы по n-МОП технологии применяется до 10 операций фотолитографии, из которых маскирование ионного легирования обеспечивают 3, то при формировании элементной базы по БИКМОП технологии применяется до 22 операций фотолитографии, из которых маскирование обеспечивают около 12 [5]. В качестве масок в процессах субмикронной и нанолитографии важную роль играют диазохинон-новолачные (ДХН) резисты [1]. Взаимодействие ДХН-резистов с электронами, дальним ультрафиолетом, рентгеновским и видимым излучением исследовано достаточно подробно [1]. Однако влияние ионной имплантации на свойства указанных резистов изучено недостаточно, хотя протекающие в резистах процессы радиационного дефектообразования могут оказывать существенное влияние на качество создаваемых приборов.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В настоящей работе методом микроиндентирования исследовались процессы дефектообразования при ионной имплантации пленок промышленного позитивного фоторезиста ФП 9120, представляющего собой композит из светочувствительного О-нафтохинондиазида и фенолформальдегидной смолы. Пленка фоторезиста толщиной 1.8 мкм наносилась промышленным способом на поверхность пластин кремния марки КДБ-10 (111). Имплантация ионами  $Sb^+$  с энергией 60 кэВ (“ $N^+$  стоки” КМОП-технологии и “ $N^+$  скрытый слой” БИКМОП-технологии) в интервале доз  $1 \times 10^{15} - 5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$  при плотности ионного тока  $j = 4 \text{ мкА/см}^2$  проводилась в остаточном вакууме  $10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$  на ионно-лучевом ускорителе “Везувий-6”. Облучение  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  осуществлялось при комнатной температуре и атмосферном давлении на установке МРХ- $\gamma$ -25М. Мощность поглощенной дозы составляла  $0.36 \pm \pm 0.008 \text{ Гр/с}$ . Интервал поглощенных доз 6–200 кГр.

Микроиндентирование проводилось 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 5–50 г. Травление пленок фоторезиста проводилось в 3 М водном растворе КОН при комнатной температуре.



**Рис. 1.** Зависимости микротвердости от нагрузки для структур фоторезист-кремний. Индентирование осуществлялось со стороны полимерного слоя. Доза внедренных ионов  $Sb^+$ ,  $см^{-2}$ : 1 – исходный; 2 –  $1 \times 10^{15}$ ; 3 –  $1 \times 10^{16}$ ; 4 –  $5 \times 10^{16}$ ; 5 –  $\gamma$ -облученный, поглощенная доза 2800 кГр.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В исходных (неимплантированных) образцах отпечатки индентора имели бочковидную форму, что указывает на наличие растягивающих напряжений в полимерной пленке [6]. Возможно, это обусловлено уменьшением объема фотополимера в процессе сушки. При нагрузках свыше 20 г в центре отпечатка наблюдаются светлые квадраты – отпечатки в кремниевой подложке, поскольку при этих нагрузках глубина внедрения индентора превышает толщину пленки фотополимера (1.8 мкм).

Микротвердость исходных (неимплантированных) структур фотополимер-кремний монотонно возрастает при увеличении нагрузки, т.е. глубины проникновения индентора (рис. 1, кривая 1). Так микротвердость фоторезиста при глубине проникновения индентора 1.2 мкм (нагрузка 2 г) была  $\sim 0.30$  ГПа, а на глубине 1.65 мкм (нагрузка 10 г) возросла более чем в 2 раза до 0.74 ГПа. Аналогичное увеличение микротвердости по мере приближения к границе раздела фоторезист-кремний наблюдалось нами ранее для тонких пленок сополимеров на основе полиметилметакрилата [6]. Такое поведение полимерных пленок кардинально отличается от поведения металлических и боридно-нитридных пленок, микротвердость которых постоянна по глубине и не зависит от величины нагрузки [7].

Для оценки численных значений микротвердости по глубине слоя вблизи границы раздела фоторезист-Si экспериментальные зависимости  $H(P)$  были пересчитаны по формуле [8]

$$H_i^{сл} = \frac{H_{i+1}h_{i+1} - H_i h_i}{h_{i+1} - h_i}, \quad (1)$$

где  $H_i^{сл}$  – микротвердость  $i$ -го слоя,  $H_i$  и  $h_i$  – величины микротвердости и глубины проникновения индентора, измеренные при  $i$ -ой нагрузке из дискретного набора нагрузок ( $P = 5, 10, 20$  г ...). Результаты расчета представлены в виде гистограмм на рис. 2. В необлученных образцах  $H^{сл}$  у поверхности фоторезиста соответствует значениям  $\sim 0.25$  ГПа, характерным для монолитной пленки полимера (рис. 2а, кривая 1). Величина слоевой микротвердости монотонно возрастает при приближении к границе раздела фоторезист-Si и на расстоянии  $\sim 2.5$  мкм от поверхности фоторезиста ( $\sim 0.7$  мкм от границы раздела фоторезист-кремний) выходит на значение  $\sim 9.7$  ГПа, характерное для микротвердости пластин кремния марки КДБ-10 (рис. 2а, кривая 1). Глубина упрочненного слоя полимера у границы с кремнием достигает 0.5 мкм.

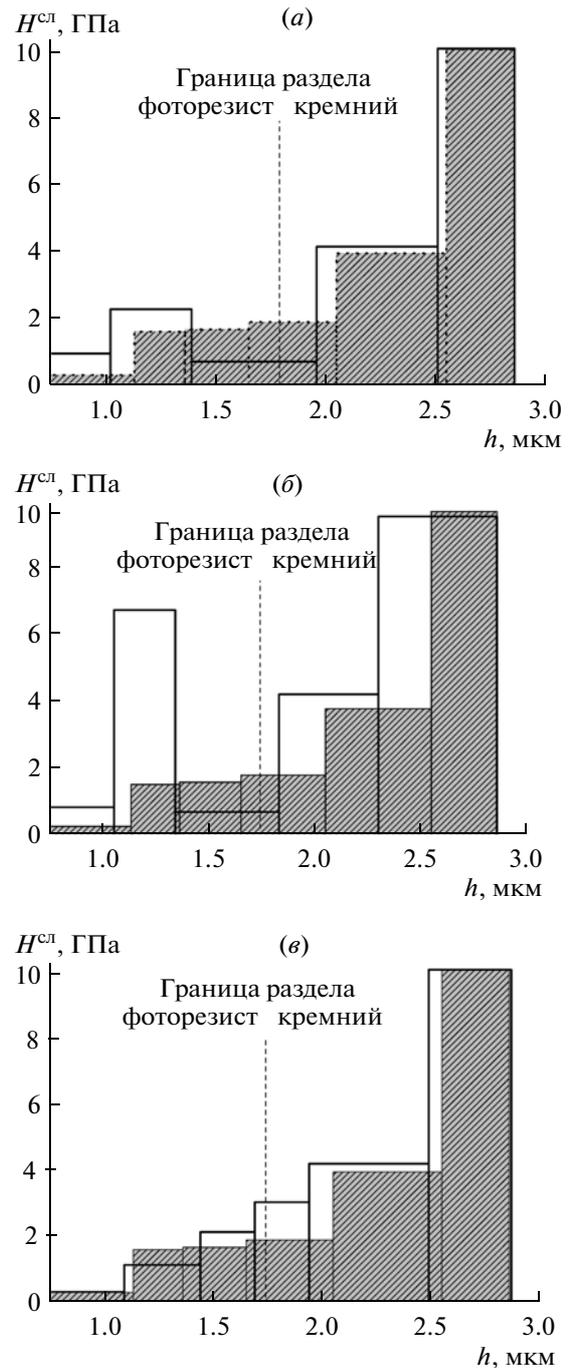
Полученные экспериментальные данные могут быть объяснены взаимодействием фоторезиста и кремния (окисла на его поверхности), приводящим к упорядочению его структуры вследствие ориентации молекул, что неизбежно должно способствовать упрочнению полимерной пленки

вдоль направления ориентации. Подобное взаимодействие отмечалось авторами [9, 10] для полиметилметакрилата и SiO<sub>2</sub> и наблюдалось на глубинах до десятков микрон. Авторами [11] на границе раздела полиакриламид – кремний наблюдалось образование связей между атомами водорода в амидных группах и кислорода на поверхности кремния, приводящее к ориентации карбонильных групп параллельно поверхности кремния. Согласно [12], полимеры способны ориентироваться под действием внешних воздействий (например, электрического или магнитного поля) и после удаления растворителя сохранять стабильный порядок. Причем степень кристалличности системы ориентированных цепей может быть близка к 100%.

Имплантация структур фоторезист-кремний ионами Sb<sup>+</sup> приводила к снижению трещиностойкости полимера. При дозе 1 × 10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup> радиальные трещины в пределах отпечатка наблюдаются только при нагрузках свыше 20 г. С увеличением дозы ионов трещинообразование внутри отпечатка усиливается и наблюдается при меньших нагрузках. При дозах свыше 1 × 10<sup>16</sup> см<sup>-2</sup> трещинообразование настолько сильно, что приводит к искажению формы отпечатка. Однако при нагрузках менее 10 г даже при дозе 5 × 10<sup>16</sup> см<sup>-2</sup> трещины наблюдаются только под ребрами у вершины пирамиды, где развиваются максимальные напряжения. Отметим, что трещинообразование происходит только в слое полимера. В кремнии трещин не наблюдается. Облегченное трещинообразование вдоль направления ориентации характерно для ориентированных полимеров [12]. Резкое усиление трещинообразования в пленках фоторезиста при проникновении индентора в кремний обусловлено, вероятно, релаксацией упругих напряжений.

Микроиндентирование структур фотополимер-кремний со стороны кремниевой подложки не выявило каких-либо существенных отличий по сравнению с исходными пластинами кремния. При этом измеренные значения микротвердости и микрохрупкости после имплантации существенно не изменялись. После удаления фоторезиста микротвердость кремниевых подложек не отличалась (в пределах погрешности эксперимента ~3%) от микротвердости исходных (до нанесения фоторезиста) пластин кремния. Это свидетельствует о физико-химических процессах под воздействием ионной имплантации только в полимерной пленке.

Имплантация кардинально изменяла характер зависимости микротвердости полимерного слоя от нагрузки – она становилась немонотонной (рис. 1). Особенно ярко это проявляется для пересчитанных согласно формуле (1) значений слоевой микротвердости  $H^{сл}$  (рис. 2). На гистограммах  $H^{сл}$  четко прослеживается формирование в процессе имплантации нескольких слоев полимера с



**Рис. 2.** Гистограммы зависимости слоевой микротвердости структур фоторезист-кремний от расстояния  $h$  от поверхности фоторезиста: (а) затемненная гистограмма (штриховая) – исходный; светлая гистограмма (сплошная линия) – имплантированный ионами Sb<sup>+</sup> дозой 1 × 10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup>; (б) затемненная гистограмма (штриховая) – исходный; светлая гистограмма – имплантированный ионами Sb<sup>+</sup> дозой 1 × 10<sup>16</sup> см<sup>-2</sup>; (в) затемненная гистограмма (штриховая) – исходный; светлая гистограмма –  $\gamma$ -облученный дозой 50 кГр.

различными прочностными свойствами. Формирование при имплантации приповерхностного слоя с параметрами отличными от объемных подтверждается также исследованиями спектров отражения указанных структур [13]. Так интерференционная картина, наблюдавшаяся в спектрах отражения структур фотополимер-кремний, указывает на то, что в имплантированных структурах вблизи поверхности фоторезиста формируется слой толщиной от 0.25 до 0.5 мкм, показатель преломления в котором находится в пределах 2.4–3.4 (в зависимости от дозы имплантации), что существенно выше показателя преломления исходного необлученного фоторезиста ФП 9120, который согласно [13] составлял  $n = 1.71$ .

При анализе рис. 2 можно выделить по крайней мере 3 области фоторезиста с различным характером изменения микропрочностных свойств: приповерхностную область, область в глубине фоторезиста и область вблизи границы раздела полимер-кремний. В приповерхностной области (до глубины 1 мкм) микротвердость  $H^{сл}$  при малых флюенсах имплантации возрастает и выходит на постоянное значение  $\sim 1$  ГПа при  $\Phi = 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Дальнейшее увеличение дозы имплантации изменения приповерхностной  $H^{сл}$  не вызывает. В глубине фоторезиста  $H^{сл}$  интенсивно растет во всем диапазоне исследованных доз имплантации и при  $\Phi > 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$  достигает значений  $H^{сл} = 7$  ГПа (рис. 2б).

Микротвердость полимера вблизи границы раздела полимер-кремний в процессе имплантации падает и при флюенсе  $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$  индентор практически не испытывает сопротивления при прохождении этого слоя (значения  $H^{сл}$  уменьшаются  $\sim$  в 20 раз). Эти экспериментальные данные могут быть интерпретированы как ухудшение адгезионного взаимодействия фотополимера с кремнием при ионной имплантации. В [1] отмечалось, что защитные полимерные покрытия на основе фенольных материалов при облучении электронами становятся хрупкими, а сцепление между ними и основным материалом ухудшается. В наших экспериментах наблюдались аналогичные явления за пределами проецируемого пробега ионов Sb. Проецированный пробег  $R_p$  ионов Sb с энергией 60 кэВ в фоторезисте ФП 9120, рассчитанный с использованием программы SRIM-2010 ([www.srim.org](http://www.srim.org)), составляет 58 нм. Однако упрочненный слой простирается до глубин свыше 1 мкм, что почти в 20 раз превышает величину рассчитанного проецированного пробега. Характерно, что на глубинах, соответствующих  $R_p$  изменение микротвердости при имплантации существенно ниже, чем в в глубине фоторезиста (рис. 2а, 2б).

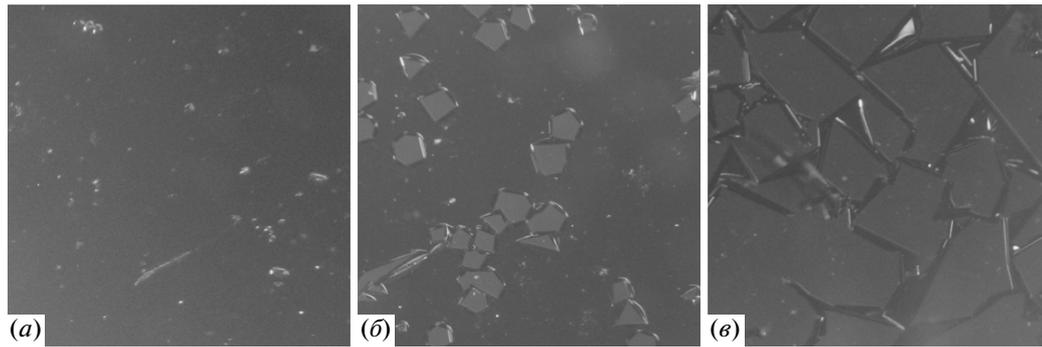
В отличие от ионной имплантации при облучении  $\gamma$ -квантами, “пронизывающими” насквозь пролимерную пленку, немонотонности микро-

прочностных свойств пленки не наблюдалось. Облучение приводило к возрастанию  $H^{сл}$  по всей толщине пленки. Вид зависимостей  $H^{сл}$  от глубины в процессе облучения существенно не изменялся (ср. рис. 2а, 2в). Вблизи границы раздела фаз полимер-кремний значения  $H^{сл}$  при облучении  $\gamma$ -квантами существенно возрастают ( $\sim$  в 2 раза).

Таким образом приведенные экспериментальные данные указывают на то, что процессы радиационного дефектообразования при ионной имплантации структур фотополимер-кремний протекают далеко за областью проецированного пробега ионов Sb.

Необходимо отметить, что эффект радиационного упрочнения наблюдается на глубинах существенно превышающих пробег ионов уже при минимальной дозе имплантации ( $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ). Это позволяет предполагать, что эффект упрочнения не связан с формированием нанокompозита или с карбонизацией полимера в области торможения ионов. Он может быть обусловлен процессами радиационного сшивания молекул полимера за областью пробега ионов [14, 15]. Высокоэнергетичные излучения (в отличие от актиничного излучения) могут поглощаться как чувствительным компонентом (нафтохинондиазид), так и самой смолой. В этом случае могут протекать и реакции с образованием нерастворимых в проявителе продуктов [1, 16]. Так, в [1] отмечалось, что фенолформальдегидная смола становится нерастворимой при воздействии на нее больших доз электронного излучения.

Для проверки этого предположения имплантированные структуры фоторезист-кремний обрабатывались в 3 М водном растворе КОН. Установлено, что процессы, протекающие под воздействием КОН в исходных и имплантированных структурах фотополимер-кремний, кардинальным образом отличаются. При помещении в водный раствор КОН необлученных структур пленка фоторезиста набухает и без внешних воздействий отслаивается, причем полное отслоение пленки происходит в течении 30–50 секунд. Имплантированная пленка значительно более устойчива к воздействию щелочного раствора, причем растворяется она неоднородно. На поверхности структуры через несколько минут пребывания в КОН появляются светлые точки (рис. 3). Их количество и размеры увеличивается со временем. Данные светлые точки обусловлены локальным растворением пленки фоторезиста до кремния. По краям их наблюдается небольшое отслаивание пленки от кремния. Заканчивается процесс образованием на поверхности кремниевой подложки сетки, которая со временем отслаивается от кремния и распадается на отдельные “нити” едва видимые невооруженным глазом и не рас-



**Рис. 3** Фотографии поверхности имплантированных ( $\Phi = 1 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ) структур фоторезист-кремний в процессе обработки в 3 М водном растворе КОН. Длительность обработки, мин: (а) 2; (б) 18; (в) 90 (увеличение 20×).

творимые в КОН (по крайней мере, в течение недели). Анализ показал, что “нити” состоят из атомов углерода. Вероятнее всего, это короткие нити углеродных волокон, формирующиеся из имплантированного слоя полимера.

Описанные выше факты объясняются неоднородностью характера взаимодействия водного раствора КОН со слоями фоторезиста с разной степенью изменения структуры после ионной имплантации. Имплантированные слои вследствие карбонизации и формирования нанокompозита устойчивы к травителю и практически не растворяются в нем. Скорость травления нижних слоев фоторезиста значительно выше. Проникновение к ним травителя и, соответственно, растворение фоторезиста идет по микротрещинам в имплантированном слое, формирующимся в процессе имплантации. С увеличением длительности травления трещины увеличиваются как по ширине, так и в длину, формируя кружевные сетки, которые, в свою очередь, распространяются по поверхности и превращают остатки фоторезиста в островки, уменьшающиеся со временем в размерах. Остатки имплантированного слоя формируют нерастворимые в КОН углеродные волокна (“нити”).

Как широко известно [15, 17, 18], при высокоэнергетичном облучении полимеров наблюдается интенсивный выход газообразных продуктов ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  и т.д.). В области пробега ионов число смещенных атомов велико, структура полимера должна разрушаться и вследствие интенсивного газовыделения в этом слое остаются преимущественно атомы углерода [18]. Наблюдается усадка полимера в области пробега ионов, что приводит к формированию на границе этой области упругих напряжений. Эти упругие напряжения приводят к короблению полимерных пленок, что наблюдалось нами при имплантации тонких (40 мкм) пленок полиимида и полиэтилентерефталата [6]. Наличие упругих напряжений может приводить к упрочнению структуры. С другой стороны, когда полимер

под карбонизированным слоем, сформировавшимся в области пробега ионов, растворяется в КОН, эти упругие напряжения могут способствовать сворачиванию углеродистой пленки в цилиндры (“нити”). Аналогичные явления наблюдались нами при растворении тонких пленок полиимида, имплантированных ионами  $\text{Ni}^+$  с  $E = 40\text{--}60$  эВ.

Изменение свойств полимера на глубинах, значительно превышающих проецируемый пробег ионов, невозможно объяснить эмиссией вторичных электронов, образующихся при электронном торможении имплантируемых ионов Sb, поскольку они не способны модифицировать полимер на глубине существенно превышающей 0.1 мкм. В органических резистах эмиссия вторичных электронов очень мала и ограничена областью в  $\sim 10$  нм [1]. Отметим, что с увеличением массы имплантируемых ионов доля электронного торможения снижается и для тяжелых ионов Sb составляет около 10% [19].

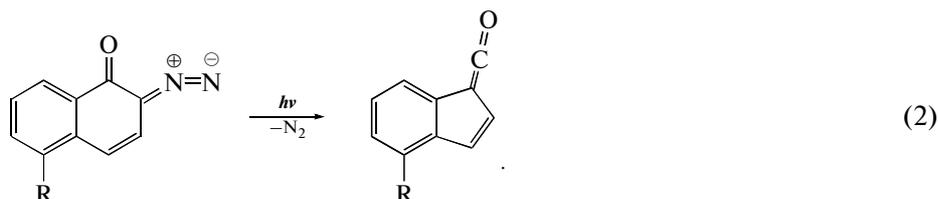
Увеличение микротвердости фоторезиста на глубинах, превышающих 0.1 мкм, должно быть обусловлено химической модификацией структуры полимера, в частности образованием сшивок между макромолекулами полимера. Некоторое упрочнение может также быть связано с развитием механической деформации пленки в процессе ионной имплантации.

Радиационное сшивание макромолекул полимеров, протекающее по свободнорадикальному механизму, является хорошо исследованным процессом и широко применяется для модификации механических свойств полимерных материалов [15, 20]. Однако в условиях ионной имплантации сложно ожидать реализации свободнорадикальных процессов на глубинах, значительно превышающих проецируемый пробег ионов Sb и выбиваемых ими электронов, поскольку миграция радикалов в матрице полимеров затруднена.

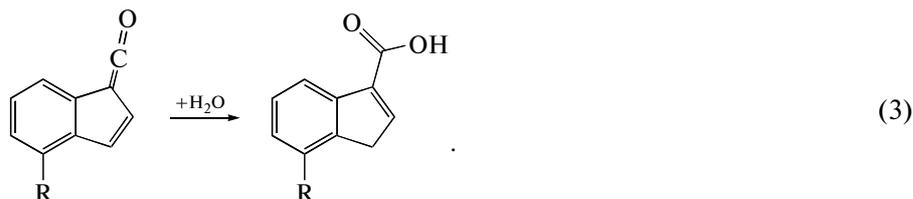
Прямое воздействие ионов Sb на полимер, а также нейтрализация разноименно заряженных ионов и рекомбинация свободных радикалов в

треке иона приводит к образованию молекул в возбужденном состоянии. В отличие от диффузии радикалов перенос возбуждения может происходить на значительные расстояния вглубь полимера. По данным [16] энергия возбуждения может передаваться в полимере на расстояние более 1000 мономерных звеньев. Поэтому образование сшивок в объеме фоторезиста, обеспечивающее увеличение микротвердости, должно происходить в реакциях с участием возбужденных частиц.

Позитивный фоторезист на основе новолачной смолы обладает низкой скоростью травления в щелочных водных растворах с концентрацией щелочи в диапазоне от 0.1 до 0.3 моль/литр. Фоточувствительным элементом в составе позитивного фоторезиста ФП 9120 является *орто*-нафтохинондиазид. При поглощении кванта света в УФ-диапазоне (максимум чувствительности ~ 320 нм) он переходит в возбужденное состояние и подвергается деазотированию с образованием кетена по реакции (2) [1, 21]:

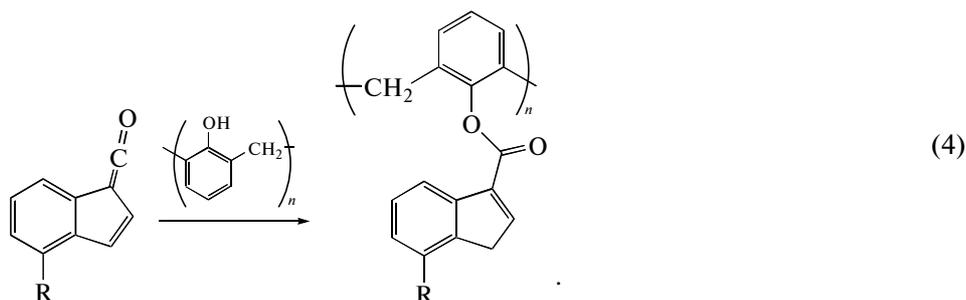


Пленка фоторезиста после сушки содержит небольшое количество воды (до 1% от веса фоторезиста). Кроме того, вода может поступать в полимер из атмосферы. Поэтому в условиях фотолитографии кетен присоединяет воду по реакции (3) и превращается в 1-Н-инден-3-карбоновую кислоту, растворимую в 0.1–0.3 М водных растворах щелочей [1, 21].



Это приводит к увеличению растворимости засвеченного фоторезиста в проявителе.

Образование возбужденных частиц при облучении ионами  $Sb^{+}$  может вызывать деазотирование *орто*-нафтохинондиазида в объеме фоторезиста по реакции (2). В условиях ионной имплантации (остаточный вакуум  $10^{-5}$  мм рт. ст.) вода полностью удаляется из полимера и кетен взаимодействует с OH-группой смолы с образованием эфирных сшивок по реакции (4), что должно приводить к увеличению микротвердости и охрупчиванию резистивной пленки [1].



Таким образом, образование эфирных сшивок между феноксильной группой новолачной смолы и карбоксильной группой 1-Н-инден-3-карбоновой кислоты по реакции (4) приводит к упрочнению фоторезиста за слоем внедрения ионов.

Еще одним механизмом упрочнения полимера в условиях имплантации  $Sb^{+}$  может быть образование сшивок между макромолекулами полимера по свободнорадикальному (гомолитическому)

механизму. Известно, что свободные радикалы могут образовываться при распаде возбужденных частиц [20]. Отметим, что для гомолитического разрыва химической связи необходимо затратить энергию, которая как минимум в 1.5–2 раза превышает энергию, необходимую для образования кетена из *орто*-нафтохинондиазида и последующего образования эфирных сшивок. Поэтому свободнорадикальный механизм образования сшивок нам кажется значительно менее вероятным.

Не следует исключать возможность воздействия на физико-механические свойства фоторезиста наведенного в его объеме, и в особенности у границы раздела фотополимер-кремний, заряда, созданного облучением заряженными частицами [22, 23]. Наведенный в полимере заряд может также модифицировать свойства приповерхностных слоев монокристаллического кремния (плотность поверхностных состояний, область объемного заряда и т.д.).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что процессы радиационного дефектообразования при ионной имплантации структур фотополимер – кремний протекают не только в области торможения ионов, но и далеко за областью проецированного пробега ионов Sb. Эффект радиационного упрочнения полимера наблюдался по всей толщине пленки, причем за слоем внедрения ионов указанный эффект выражен сильнее. Предположительно, он обусловлен процессами радиационного сшивания. Ионная имплантация приводит к снижению микротвердости вблизи границы раздела фоторезист/Si, что обусловлено ухудшением адгезионного взаимодействия фотополимерной пленки с кремнием.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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)
2. Технология СБИС. Под ред. Зи С. В 2-х кн. Кн. 1. М.: Мир, 1986. С. 292–353.
3. *Садовский П.К., Челядинский А.Р., Оджаев В.Б., Гайдук П.И., Белоус А.И., Плебанович В.И., Васильев Ю.Б.* Структурные и электрофизические параметры сильно легированных слоев кремния *n*-типа, создаваемых ионной имплантацией // Микроэлектроника. 2013. Т. 42. № 1. С. 50–55.
4. *Плебанович В.И., Челядинский А.Р., Васильев Ю.Б., Гладчук А.И., Осипов В.Е.* Структурные и электрофизические параметры сильно легированных слоев кремния *n*-типа, создаваемых ионной имплантацией // Микроэлектроника. 2008. Т. 37. № 3. С. 213–218.
5. *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.
6. *Вабищевич Н.В., Вабищевич С.А., Бринкевич Д.И., Волобуев В.С., Лукашевич М.Г., Оджаев В.Б., Просолович В.С.* Микроидентификация структур фотополимер-кремний // Вестник Полоцкого университета. Сер. С. Фундаментальные науки. 2011. № 4. С. 77–83.
7. *Штанский Д.В., Кулинич С.А., Левашов Е.А., Мооре J.J.* Особенности структуры и физико-механических свойств наноструктурных тонких пленок // Физика твердого тела. 2003. Т. 45. № 6. С. 1122–1129.
8. *Герасимов А.Б., Чирадзе Г.Д., Кутивадзе Н.Г., Библилашвили А.П., Бохоладзе З.Г.* О распределении величины микротвердости по глубине образца // Физика твердого тела. 1999. Т. 41. № 7. С. 1225–1227.
9. *Семенович Г.М., Липатов Ю.С., Гусев С.С.* Исследование структуры граничных слоев полиметилметакрилата методом нарушенного полного отражения // Высокомолекулярные соединения. Сер. Ф. 1978. Т. 20. № 9. С. 2000–2005.
10. *Топильский Г.В., Бутт Ю.М., Буянов В.И., Горбань А.К.* О взаимодействии метилметакрилата с силикатами минералов // Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура. 1975. № 12. С. 78–81.
11. *Lu Xiaolin, Mi Yongli.* Characterization of the interfacial interaction between polyacrylamide and silicon substrate by Fourier transform infrared spectroscopy // Macromolecules. 2005. V. 38. № 3. С. 839–843.
12. *Власов С.В., Кулизов В.Н.* Ориентированное состояние полимеров. М.: Знание, 1987. 48 с.
13. *Azarko I., Bumai Yu., Volobuev V., Zukowski P., Lukashovich M., Odzhaev V.* AFM, ESR and optic study of Sb<sup>+</sup> ions implanted photoresist // Przeglad elektrotechniczny. 2010. № 7. P. 270–271
14. *Кинг Р.В., Бродвей Н.Дж., Майер Р.А.* Полимеры // Влияние облучения на материалы и элементы электронных схем. М.: Атомиздат, 1967. С. 49–114. (Effect of radiation on materials and components. Eds. Kircher J.F., Bowman R.E. Reinhold Publishing Co., 1964).
15. *Грасси Н., Скотт Дж.* Деструкция и стабилизация полимеров. М.: Мир, 1988. 246 с. (*Grassie N., Scott G.* Polymer degradation and stabilization. Cambridge University Press, 1985).
16. Светочувствительные полимерные материалы. Под ред. Ельцова А.В. Л.: Химия, 1985. 296 с.
17. *Сухоруков В.В., Ежевский А.А., Зорин Е.И., Павлов П.В., Дудин Ю.А.* Спектры ЭПР алмазоподобных и облученных ионами полимерных углеродных пленок // Поверхность. 1991. № 5. С. 92–96.
18. Экспериментальные методы химии высоких энергий / Под общ. ред. Мельникова М.Я. М.: МГУ, 2009. 824 с.
19. *Оджаев В.Б., Козлов И.П., Попок В.Н., Свиридов Д.В.* Ионная имплантация полимеров. Мн.: БГУ, 1998. 197 с.
20. *Пицаев А.К.* Современная радиационная химия. Твердое тело и полимеры. Прикладные аспекты. М.: Наука, 1987. 448 с.
21. *Bendig J., Sauer E., Polz K., Schopf G., Koch A.* Synthesis and photochemistry of 1,2-naphthoquinonediazide-(2)-*n*-sulfonic acid derivatives // Tetrahedron. 1992. V. 48. № 42. С. 9207–9210.
22. *Акишин Ф.И., Витошкин Э.А., Иванов Л.И., Колокольцев В.Н.* Объемный разряд в диэлектрических материалах космических аппаратов при облучении электронами и протонами // Перспективные материалы. 2009. № 3. С. 12–16.
23. *Рау Э.И., Евстафьева Е.Н., Зайцев С.И., Князев М.А., Свищов А.А., Татаринцев А.А.* Комплексные исследования эффектов зарядки полимерного резиста (ПММА) при электронной литографии // Микроэлектроника. 2013. Т. 42. № 2. С. 116–126.