
ДЕФЕКТНО-ПРИМЕСНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ. РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЗИТИВНОГО ФОТОРЕЗИСТА ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Д. И. Бринкевич, М. Г. Лукашевич, В. Б. Оджаев,
В. С. Просолович, Ю. Н. Янковский

Белорусский государственный университет, prosolovich@bsu.by

Повышение степени интеграции обуславливает возрастание роли ионной имплантации в создании активных областей интегральных микросхем. Основным материалом, обеспечивающим маскирование ионного пучка, является фоторезист. Однако влияние ионной имплантации на морфологию поверхности фоторезистов практически не исследовано. Указанные обстоятельства и определили цель настоящей работы – исследование методом атомно-силовой микроскопии модификации ионным облучением поверхности позитивного фоторезиста ФП9120, представляющего собой композит из светочувствительного О-нафтохинондиазида и фенол-формальдегидной смолы.

Пленка фоторезиста толщиной 1,8 мкм наносилась на поверхность пластин кремния марки КДБ-10 (111) методом центрифугирования при скорости вращения 1800 об/мин. Имплантация ионами Ni^+ , Fe^+ , Ag^+ , B^+ и Sb^+ с энергией 30 – 60 кэВ в интервале доз 1×10^{15} – 6×10^{17} см⁻² в режиме постоянного ионного тока (плотность ионного тока $j = 4$ мкА/см²) проводилась при комнатной температуре в остаточном вакууме не хуже 10^{-5} Па на имплантаторах ИЛУ-3 и «Везувий-6». Во избежание перегрева и деструкции образца в процессе имплантации на ИЛУ-3 использовалась кассета, обеспечивающая эффективный сток ионного заряда с поверхности полимера и плотный контакт плёнок с металлическим основанием, охлаждаемым водой [1].

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. Значения среднеарифметической шероховатости R_a усреднялись по результатам не менее чем 10 измерений в различных точках образца.

Типичные для всех исследовавшихся полимеров трёхмерные АСМ изображения поверхности показаны на рис.1. Рельеф исходной поверхности достаточно гладкий, средняя арифметическая шероховатость R_a составляет $\sim 0,2$ нм. Высота отдельных неровностей не превышает 1,5–2 нм. Имплантация приводит к появлению на поверхности фоторезиста конусообразных структур (рис.1б), которые наблюдались при всех имплантированных ионах уже на начальных дозах. Высота, диаметр в основании и плотность таких образований зависела от вида имплантированного иона и условий облучения. Конусообразные структуры распределены по поверхности фоторезиста очень неравномерно. Среди них преобладают достаточно крупные структуры с

диаметром в основании $\sim 100\text{--}150$ нм и высотой до $50\text{--}60$ нм. С ростом дозы имплантации размеры конусообразных структур уменьшаются, их количество растёт и при дозах свыше $7 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ они начинают перекрываться. На отдельных образцах наблюдались «кратеры», обусловленные, вероятнее всего, выходом остатков растворителя и азота, образующегося при радиационном разложении диазохинона.

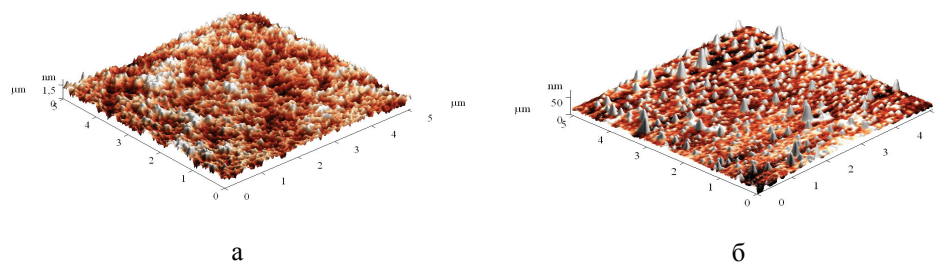


Рис. 1. Трёхмерные АСМ изображения исходной (а) и имплантированных ионами Fe (б) поверхностей фоторезиста. Доза $\Phi = 2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$

С образованием конусообразных структур при имплантации связан существенный рост среднеарифметической шероховатости R_a (рис.2) на начальных дозах имплантации. Отметим, что величина R_a существенным образом зависит от условий имплантации. Так при имплантации на ускорителе «Везувий-6» величина R_a обычно ниже (примерно в 3-4 раза), чем на имплантаторе ИЛУ-3. Масса имплантируемого иона оказывает существенно меньшее влияние. Значения R_a для разных ионов различались не более чем на 50-60 % при имплантации на одном имплантаторе (рис.2). При увеличении дозы F имплантации наблюдается снижение величины R_a , причем для более тяжелых ионов это снижение наблюдается при меньших значениях F (рис.2а).

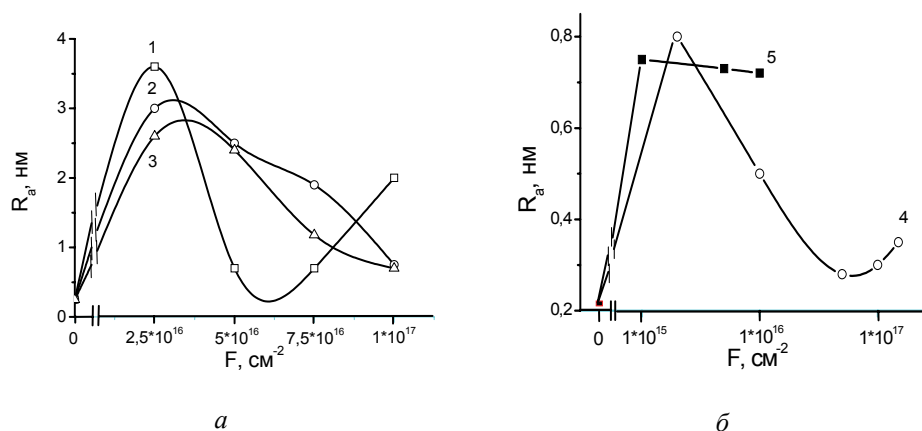


Рис. 2. Дозовые зависимости шероховатости R_a образцов, имплантированных ионами Ag (1), Ni (2) и Fe (3) на ускорителе ИЛУ-3 (а) и ионами В (4) и Sb (5) на ускорителе «Везувий-6» (б)

Объяснить полученные экспериментальные результаты можно с учетом следующего. При высокоэнергетичном воздействии происходит процесс ионизации, заключающийся в удалении электрона с определенной молекулярной орбитали и формировании так называемой «дырки». В макромолекулах следует учитывать возможность образования делокализованных ионизированных состояний с эффективным размером, существенно превышающим размер элементарного звена, и возможность быстрой (недиффузионной) миграции «дырки» по цепи макромолекулы на значительные в молекулярном масштабе расстояния. Первичные физические процессы (ионизация или возбуждение) и следующие за ними химические изменения (разрыв связи, деструкция молекулы) могут быть разделены существенным расстоянием вследствие эффективной миграции «дырок» и переноса возбуждения [2]. Следует также учитывать микрофазную неоднородность (микрогетерогенность) макроструктуры полимера. В полимерных материалах возможен перенос электрона или «дырки» через границу раздела фаз, что может привести к локализации радиационных повреждений в определенных микрообластях системы (например, вблизи раздела фаз) [2]. Проявлением такой локализации радиационно-индуцированной модификации полимеров, приводящей к локальному хаотичному вспучиванию поверхности полимера, и являются, на наш взгляд, наблюдавшиеся экспериментально конусообразные структуры на поверхности имплантированного полимера.

Образование конусообразных структур на начальных этапах облучения возможно также вследствие релаксации упругих напряжений, возникающих в пленке фоторезиста в процессе ее формирования. В области имплантации картина усложняется. Вследствие высокой локальной неоднородности процессов радиационно-индуцированной модификации полимеров в процессе их облучения возможна как релаксация существующих, так и формирование новых полей упругих напряжений вблизи вновь сформированных межфазных границ раздела. Кроме того, в процессе имплантации возможно распыление сформировавшихся ранее конусообразных структур. Эти обстоятельства могут приводить к трансформации конусообразных структур и снижению среднеарифметической шероховатости R_a поверхности фоторезиста, наблюдавшейся в диапазоне флюенсов $(1-5) \times 10^{16} \text{ см}^2$.

Возрастание R_a при Φ свыше $1 \times 10^{17} \text{ см}^2$ обусловлено на наш взгляд преимущественно деструкцией и распылением приповерхностного слоя полимера и образованием углеродно-металлических нанокластеров. Распыление приповерхностного слоя в процессе ионной имплантации может приводить к выходу на поверхность полимера углеродно-металлических нанокластеров, сформировавшихся в имплантированном слое на начальной стадии имплантации. При этом скорость распыления металлических нанокластеров ниже, чем скорость деструкции и распыления окружающих их остатков полимерной матрицы. Поэтому при этих дозах на поверхности полимера формируется лабиринтоподобная структура, коррелирующая со структурой металлических нанокластеров (рис.1б).

Существенно более низкие значения R_a при имплантации на имплантаторе «Везувий-6» (рис.2б) по сравнению с ИЛУ-3 (рис.2а) обусловлены техническими особенностями этих имплантаторов. «Везувий-6» имеет вращающийся барабан, вследствие чего имплантация носит квазиимпульсный характер; в ИЛУ-3 пластина постоянно находится под пучком ионов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Lukashchevich M.G.* Modification of magnetic properties of polyethyleneterephthalate by iron implantation / M.G. Lukashchevich [et al.] // Nucl. Instr. Meth.B. – 2007. – V.257. N 1-2. – P.589-592.
2. Экспериментальные методы химии высоких энергий / Под общ. ред. М.Я.Мельникова. – М.: МГУ, 2009. – С.169-178.

МОДИФИКАЦИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ИМПЛАНТИРОВАННЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

С. А. Вабишевич¹, Н. В. Вабишевич¹, Д. И. Бринкевич², В. С. Просолович²,
Д. А. Русакевич³, Ю. Н. Янковский²

¹Полоцкий государственный университет, vabser@tut.by

²Белорусский государственный университет, prosolovich@bsu.by

³Белорусский национальный технический университет

Использование высокоэнергетичной ($E \sim 1$ МэВ) ионной имплантации донорных и акцепторных примесей в кремнии при изготовлении КМОП-структур позволяет создавать особый профиль распределения примесей в карманах транзисторов с максимумом концентрации примеси, расположенным в глубине подложки, где поверхностный канал МОП-транзистора не формируется. В этом случае на поверхности возможно сформировать низкую концентрацию носителей заряда, необходимую для невысоких значений порогового напряжения транзистора, а в глубине – высокую, что уменьшит сопротивление самого кармана и сделает очень малым коэффициент усиления паразитного биполярного транзистора, поскольку концентрация примеси в его базе будет возрастать по направлению к коллектору, приводя к полной рекомбинации неосновных носителей. В конечном итоге создание карманов с подобным распределением примесей позволит создавать КМОП-структуры, в которых ослаблен или подавлен эффект защёлки.

Моделирование процесса изготовления КМОП [1] при расстоянии между стоками транзисторов равным 4 мкм показало, что для обеспечения приемлемых характеристик МОП-транзисторов, процесс функционирования которых связан с поверхностной концентрацией необходима доза внедряемой примеси бора в p - карман $Q = 1,0 \cdot 10^{13} - 1,0 \cdot 10^{14}$ ион/см² при энергии имплантации $E \sim 500$ кэВ, доза внедряемой примеси фосфора в n -карман $Q = 5,0 \cdot 10^{13} - 5,0 \cdot 10^{14}$ ион/см² при энергии имплантации $E \sim 1000$ кэВ и активации примеси быстрым термическим отжигом при $T=1000^\circ\text{C}$ в течение 1 мин. В таком случае профиль распределения примеси имеет максимум на глубинах ~ 1 мкм, в то время как концентрация примеси у поверхности находится в пределах $1,0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3} - 1,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что и необходимо для субмикронных МОП-транзисторов. Целью настоящей работы являлось исследование влияния радиационных дефектов, созданных имплантацией, на свойства приповерхностной (рабочей) области пластин монокристаллического кремния.

Полированные пластины кремния марки КЭФ 4,5(100), КДБ 12(100) и КДБ 10(111) толщиной 460 ± 20 мкм имплантировались ионами B^+ ($E= 500$ кэВ) и P^+ ($E= 1000$ кэВ) дозами (Φ) от $5 \cdot 10^{12}$ до $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ при комнатной температуре на ускорителе ионов DTL. Плотность ионного тока варьировалась в интервале от 0,3 до