

---

---

# 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 фотополимер. Однако влияние ионной имплантации на морфологию поверхности фотополимеров практически не исследовано. Указанные обстоятельства и определили цель настоящей работы – исследование методом атомно-силовой микроскопии модификации ионным облучением поверхности позитивного фотополимера ФП9120, представляющего собой композит из светочувствительного О-нафтохинондиазида и фенол-формальдегидной смолы.

Пленка фотополимера толщиной 1,8 мкм наносилась на поверхность пластин кремния марки КДБ-10 (111) методом центрифugирования при скорости вращения 1800 об/мин. Имплантация ионами  $\text{Ni}^+$ ,  $\text{Fe}^+$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{B}^+$  и  $\text{Sb}^+$  с энергией 30 – 60 кэВ в интервале доз  $1 \times 10^{15}$ – $6 \times 10^{17}$  см<sup>-2</sup> в режиме постоянного ионного тока (плотность ионного тока  $j = 4$  мкА/см<sup>2</sup>) 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 фотополимера 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 фотополимера очень неравномерно. Среди них преобладают достаточно крупные структуры с

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

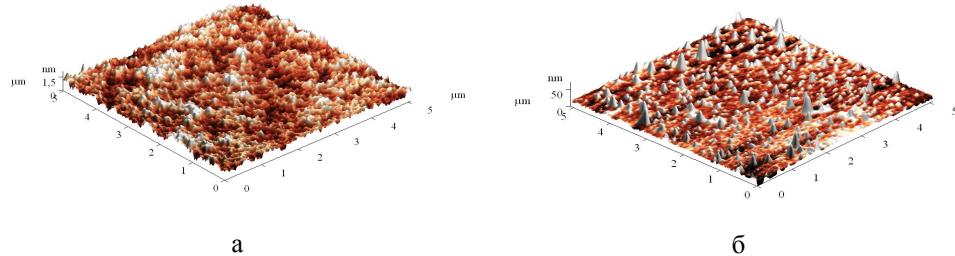


Рис. 1. Трёхмерные ACM изображения исходной (а) и имплантированных ионами Fe (б) и поверхностей фотополимера. Доза  $\Phi = 2,5 \cdot 10^{16}$  см $^{-2}$

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).

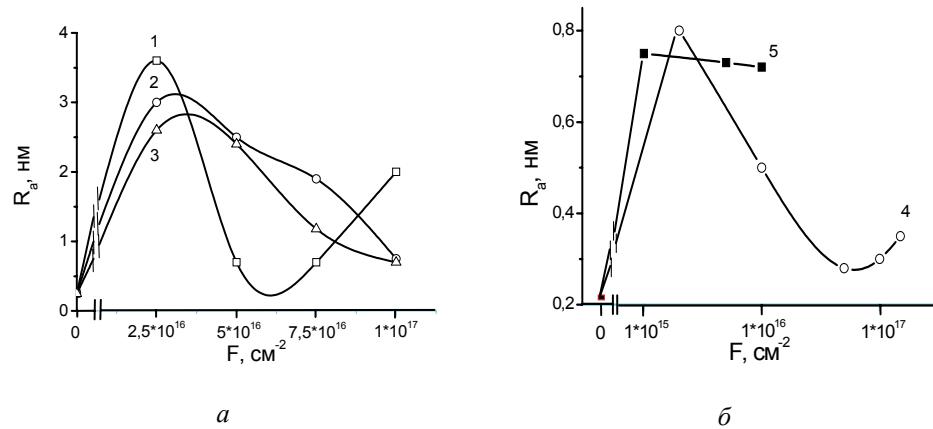


Рис. 2. Дозовые зависимости шероховатости  $R_a$  образцов, имплантированных ионами Ag (1), Ni (2) и Fe (3) на ускорителе ИЛУ-3 (а) и ионами В (4) и Sb (5) на ускорителе «Везувий-6» (б)

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 «дырок» 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, 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 фотоприемника 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 фотоприемника, наблюдавшейся в диапазоне флюенсов  $(1-5) \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ .

Возрастание  $R_a$  при  $\Phi$  выше  $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  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 врачающийся барабан, вследствие чего имплантация носит квазимпульсный 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. Вабищевич<sup>1</sup>, Н. В. Вабищевич<sup>1</sup>, Д. И. Бринкевич<sup>2</sup>, В. С. Просолович<sup>2</sup>,  
Д. А. Русакевич<sup>3</sup>, Ю. Н. Янковский<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup>Полоцкий государственный университет, vabser@tut.by

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, prosolovich@bsu.by

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет

Использование высокоэнергетической ( $E \sim 1$  МэВ) ионной имплантации донорных и акцепторных примесей в кремниевом 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 защелки.

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 необходиима доза внедряемой примеси бора в  $p$ -карман  $Q = 1,0 \cdot 10^{13} - 1,0 \cdot 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> при энергии имплантации  $E \sim 500$  кэВ, доза внедряемой примеси фосфора в  $n$ -карман  $Q = 5,0 \times 10^{13} - 5,0 \times 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> 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  $\sim 1$  мкм, в то время как концентрация примеси у поверхности находится в пределах  $1,0 \times 10^{15} \text{ см}^{-3} - 1,0 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , 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  $460 \pm 20$  мкм имплантировались ионами  $B^+$  ( $E = 500$  кэВ) и  $P^+$  ( $E = 1000$  кэВ) дозами ( $\Phi$ ) от  $5 \times 10^{12}$  до  $5 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup> при комнатной температуре на ускорителе ионов DTL. Плотность ионного тока варьировалась в интервале от 0,3 до