



Рисунок 5. – Эпюры сигналов на входе CLK (а) и выходе Q (б) при облучении в ждущем режиме

ЛИТЕРАТУРА

1. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / под ред. Г.Г. Райкунова. - М.: Физматлит, 2013. – 256 с.
2. Темирбулатов, М.С. Методы повышения стойкости к сбоям счетного триггера / М.С. Темирбулатов, В.И. Эннс, Д.В. Бобровский // Научно-технический сборник «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2016». - М., 2016. - С. 125–126.
3. Першенков, В.С. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем / В.С. Першенков, В.Д. Попов, А.В. Шальнов. - М.: Энергоатомиздат, 1988. – 256 с.

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУР ФОТОРЕЗИСТ – КРЕМНИЙ ПРИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

В. С. Просолович¹, Д. И. Бринкевич¹, С. А. Вабищевич²,
Н. В. Вабищевич², Ю. Н. Янковский¹

¹Белорусский государственный университет, prosolovich@bsu.by

²Полоцкий государственный университет, vabser@tut.by

Методами атомно-силовой микроскопии, склерометрии и индентирования исследованы пленки позитивного фоторезиста ФП9120, облученные γ -квантами ^{60}Co и имплантированные ионами V^+ и P^+ . Показано, что в процессе имплантации происходит модификация морфологии поверхности фоторезиста, обусловленная релаксацией упругих напряжений, и радиационно-химическими процессами в слое фоторезиста. Процессы радиационного упрочнения при ионной имплантации структур фоторезист – Si протекают далеко за область проецированного пробега ионов. Полученные экспериментальные результаты объяснены процессами радиационного сшивания молекул полимера за область пробега ионов, усадкой полимерной пленки и ее карбонизацией в области пробега ионов.

Позитивный фоторезист ФП9120 широко используется в современной электронике в качестве защитного светочувствительного материала в прецизионных фотолитографических процессах при изготовлении полупроводниковых приборов и инте-

гральных микросхем [1, 2]. Целью настоящей работы являлось исследование свойств пленок фоторезиста ФП9120, подвергнутых высокоэнергетическим воздействиям.

Пленки фоторезиста толщиной от 1,0 до 5,0 мкм наносились на поверхность пластин (диаметр 100 см) кремния марок КДБ10, КДБ0,05, КЭС0,01 с ориентацией (111) и КДБ4,5, КДБ12, КЭФ4,5 с ориентацией (100) методом центрифугирования. Исследование прочностных свойств структур фоторезист – кремний проводилось при комнатной температуре на приборе ПМТ-3 методами индентирования и склерометрии. Нагрузка P на индентор варьировалась в пределах 1–50 г. Склерометрия осуществлялась царапанием ребром четырехгранной алмазной пирамиды с квадратным основанием в оправе типа НПМ и углом при вершине $\alpha = 136^\circ$. Скорость движения индентора варьировалась в диапазоне 40–120 мкм/с. Значения склерометрической микротвердости $H_{\square}^{\text{скл}}$ вычислялись в соответствии с ГОСТ 21318-75. Измерения микротвердости $H^{\text{н}}$ методом микроиндентирования проводились этой же пирамидой по восстановленному отпечатку с использованием стандартной методики согласно ГОСТ 9450-76. При каждом измерении на поверхность образца наносилось не менее 50 отпечатков и проводилась обработка результатов измерений с использованием методов математической статистики.

Имплантация ионами фосфора P^+ (энергия 100 кэВ) и бора B^+ (энергия 60 кэВ) в интервале доз $5 \cdot 10^{14}$ – $1 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$ в режиме постоянного ионного тока (плотность ионного тока $j = 4$ мкА/см $^{-2}$) проводилась при комнатной температуре 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 1–300 кГр.

Морфология поверхности фоторезистивной пленки исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) при комнатной температуре в полуконтактном резонансном режиме на частоте 145 кГц на приборе Solver P-47. Использовались кантилеверы 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. С увеличением дозы γ -квантов R_a слабо возрастала, при этом увеличивалась и дисперсия R_a . При $\Phi_{\gamma} = 300$ кГр среднеарифметическая шероховатость $R_a = 0,35$ нм при дисперсии $\Delta R_a = 0,2$.

Имплантация P^+ приводит к появлению на поверхности фоторезиста конусообразных структур, распределенных по поверхности фоторезиста очень неравномерно. Среди них преобладают достаточно крупные структуры с диаметром в основании ~ 100–150 нм и высотой до 50–60 нм. С ростом дозы имплантации размеры конусообразных структур уменьшаются, а их количество растет. Наблюдался существенный рост (до 0,9 нм) среднеарифметической шероховатости R_a уже при начальной дозе имплантации $5 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$. Дальнейшее увеличение дозы имплантации до $1 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$ не приводило к заметному и изменению R_a . Наблюдаемые при имплантации изменения морфологии поверхности фоторезиста обусловлены релаксацией напряжений, образовавшихся в процессе изготовления полимерной пленки, и радиационно-химическими процессами в приповерхностном слое фоторезиста.

Облучение γ -квантами ^{60}Co приводило к увеличению значений микротвердости $H^{\text{н}}$, измеренной методом микроиндентирования, при малых нагрузках 2–5 г. При нагрузках свыше 20 г зависимости $H^{\text{н}}$ от дозы облучения выявлено не было. Склерометрическая микротвердость $H_{\square}^{\text{скл}}$ менее подвержена влиянию облучения, чем $H^{\text{н}}$. Значения $H^{\text{н}}$ и $H_{\square}^{\text{скл}}$, измеренные при малых нагрузках, сближаются при облучении.

Так, в исходных необлученных пленках при нагрузке 1 г значения H^H были ниже $H_{\square}^{\text{скл}}$ в 4–6 раз, то после облучения разница уменьшалась в ~ 2 раза. Отмеченные выше экспериментальные результаты могут быть обусловлены тем, что γ -облучение способствует релаксации упругих напряжений в полимерной пленке, которые растягивают отпечаток индентора и, соответственно, снижают значения H^H .

В имплантированных ионами бора образцах при малых нагрузках 1 – 2 г для обоих видов микротвердостей H^H и $H_{\square}^{\text{скл}}$ зависимости от дозы имплантации не наблюдается: H^H и $H_{\square}^{\text{скл}}$ возрастают (в 1,3 раза по сравнению с исходным) при минимальной исследовавшейся дозе $\Phi = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и при дальнейшем увеличении дозы имплантации практически не изменяются (табл.).

Таблица

Склерометрическая микротвердость имплантированных пленок фоторезиста толщиной 1,0 мкм, нанесенных на пластины кремния марки КДБ10 (111)

Ион	На- грузка, г	$H_{\square}^{\text{скл}}, \text{Гпа}$				
		Исход- ный	$\Phi = 5 \cdot 10^{14}$ см^{-2}	$\Phi = 1 \cdot 10^{15}$ см^{-2}	$\Phi = 5 \cdot 10^{15}$ см^{-2}	$\Phi = 1 \cdot 10^{16}$ см^{-2}
В ⁺	1	0,60	0,75	0,76	0,77	0,75
	2	0,57	0,68	0,74	0,74	0,73
Р ⁺	1	0,59	0,61	0,64	0,91	1,24
	2	0,61	0,66	0,59	0,82	1,15

При ионной имплантации в отличие от γ -облучения наблюдается рост H^H при больших нагрузках (свыше 10 г), когда индентор проникает в кремниевую подложку. Причем указанный эффект наблюдается при дозах $\Phi \geq 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ как для ионов В⁺, так и для ионов Р⁺. При $\Phi < 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ существенных различий от исходного необлученного образца в зависимостях $H^H(\text{Р})$ при нагрузках свыше 10 г не наблюдалось. Вероятнее всего, наблюдавшееся возрастание значений H^H при нагрузках свыше 10 г обусловлено упрочнением полимерной пленки вблизи границы раздела фотополимер-кремний.

Приведенные экспериментальные данные указывают на то, что процессы радиационного дефектообразования при ионной имплантации структур фотополимер-кремний протекают далеко за областью проецированного пробега ионов Р и В, причем при имплантации ионов бора указанный эффект более выражен. Необходимо также отметить, что эффект радиационного упрочнения наблюдается на глубинах существенно превышающих пробег ионов уже при минимальной дозе имплантации ($5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$). 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.