

ВЛИЯНИЕ ПОЛИКРЕМНИЯ И ФОСФОРО-СИЛИКАТНЫХ СЛОЁВ НА РАДИАЦИОННУЮ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МОП-СТРУКТУР

© В. Г. Горячев, В. В. Чернокожин

ОАО «НПП» Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

Рассматривалась радиационная чувствительность параметров МОП-структур с поликремниевыми и ФСС-слоями с учётом переноса носителей, генерируемых ИИ, в электрическом поле сложного диэлектрика. Показано наличие в ФСС-слое электронных ловушек, а также дырочных ловушек у границы раздела окисел-ФСС-слой. Показано, что наличие ФСС-слоя в МОП-структуре может как повышать, так и уменьшать радиационную чувствительность МОП-структур.

Ключевые слова: радиационная чувствительность, МОП-структура, фосфорно-силикатное стекло, поликремний, C-V измерения

Сведения об авторах: Горячев Владимир Глебович, pulsar@dol.ru; Чернокожин Владимир Викторович, vch@pulsampp.ru

THE POLYSILICON AND PSG-LAYER INFLUENCE ON RADIATION SENSITIVITY OF MOS-STRUCTURES

V. G. Goraychev, V. V. Chernokozhin

JSC «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okružhnoy proezd, 27

Radiation sensitivity of parameters of MOS-structure with polysilicon and PSG-layer taking into account the transfer of carriers, generated by IR in electrical field of complex dielectric, was considered. The presence of electron traps in PSG-layer and a hole traps at the oxide – PSG layer interface was shown. It was shown that presence of PSG-layer in MOS-structure could either increase or decrease radiation sensitivity of MOS-structures.

Key words: radiation sensitivity, MOS-structure, phosphorus silicate glass, polysilicon/ C-V measurement

Data of authors: Goraychev Vladimir Glebovich, pulsar@dol.ru; Chernokozhin Vladimir Viktorovich, vch@pulsampp.ru

Введение

Радиационная чувствительность параметров МОП-структур, в частности $U_{нс}$ (напряжение плоских зон), в значительной мере определяется процессами переноса и захвата генерируемых излучением носителей в диэлектрике [1]. В настоящей работе рассматривалось влияния свойств поликремниевых и ФСС-слоёв (слоёв фосфорно-силикатного стекла), используемых при изготовлении МОП-приборов, на радиационную чувствительность МОП-структур.

Нанесение в МОП-структурах на подзатворный диэлектрик сильнолегированных поликремниевых слоёв широко используется при изготовлении полупроводниковых приборов и микросхем [2]. В процессе их нанесения в окисле возможно образование ФСС-слоёв. ФСС-слои могут также использоваться в МОП-приборах для подгонки пороговых напряжений – $U_{пор}$. В работе [3] подгонка $U_{пор}$ и другие эффекты были возможны из-за наличия в ФСС-слое электронных ловушек. С другой стороны,

в работе [4] возможность корректировки $U_{пор}$ связывалась с образованием в ФСС-слое термостабильного положительного заряда, связанного с «ионизированными атомами пентавалентной примеси (фосфора), замещающих атомы кремния в кислородных тетраэдрах двуокиси кремния».

Добавление к структуре диэлектрика Si-SiO₂, содержащего в основном дырочные ловушки, ФСС-слоя с ловушками для свободных носителей должно внести особенности в поведении МОП-структур при воздействии ионизирующего излучения. Уточнению процессов накопления фиксированных зарядов в диэлектриках при облучении в МОП-структурах с ФСС-слоями, изготовленных в различных технологических процессах окисления и получения ФСС-слоёв, посвящена данная работа.

1. Объект исследований

Исследовались 4 группы структур, прошедших различные технологические процессы окисления (SiO₂), изготовления нелегированных (Si_i) и легированных фосфором поликремневых затворов (Si*), а также нанесения пассивирующих фосфоросиликатных слоёв, используемые при создании полупроводниковых приборов.

Облучались 4 группы структур (табл. 1):

1 группа (исходная), состоящая из структур подложка – окисел;

2 группа, состоящая из структур 1 группы с дополнительно нанесённым на окисел нелегированным поликремнием;

3 группа, состоящая из структур 2 группы, прошедших дополнительное легирование поликремния;

4 группа, состоящая из структур 1 группы, на которые дополнительно наносились различным способом пассивирующие ФСС-слои.

На все структуры наносилась металлизация Mo/Al.

Использовались окисные плёнки, полученные при сухом (с.), влажном (вл.) и пироженном (п.) окислениях, в ряде случаев окисление проводилось с добавлением хлора (Cl). В процессе получения конечной структуры после отдельного технологического этапа (табл. 1) отбирались пластины с МОП-структурами. На этих структурах проводились исследования оценки влияния отдельных технологических процессов на радиационную чувствительность МОП-структур по параметру $U_{пз}$ (напряжения плоских зон). Величина $U_{пз}$ определялась по измерениям ВЧ-CV-характеристик. Измерительная установка для измерений ВЧ-CV характеристик ($f = 1$ МГц) позволяла проводить измерения структур с ёмкостями $C = 10-500$ пФ при изменении напряжения на затворе в диапазоне $U_з = -20 \div +20$ В.

Облучение проводилось на установке гамма-излучения на основе ¹³⁷Cs. Мощность экспозиционной дозы при облучении составляла 40 Рад/с. Для подачи электрических режимов в процессе облучения и последующего измерения параметров структур образцы помещались на специальный держатель. В экспериментах при облучении на затворы структур относительно подложки подавался один из следующих электрических режимов: положительное смещение $-U_з = +5$ В или $U_з = +10$ В; отрицательное смещение $-U_з = -5$ В или $U_з = -10$ В; режим замыкания затворов на подложку $-U_з = 0$ В (режим «КЗ»). Одновременно облучалось 6 структур – по две структуры для каждого электрического режима. В качестве подложки в основном использовался кремний *n*-типа с $\rho = 20$ Ом*см. Проводилось облучение контрольных структур на кремнии *p*-типа с $\rho = 4$ Ом*см.

Таблица 1

МОП-структуры, используемые при радиационных исследованиях

Группы	Состав МОП-структур		
1	Si	SiO ₂	
2	Si	SiO ₂	Si _i
3	Si	SiO ₂	Si*
4	Si	SiO ₂	ФСС

На всех структурах на начальном этапе облучения наблюдался параллельный сдвиг ВЧ-CV характеристик. Не отмечалась искажения CV характеристик при облучении контрольных МОП-структур с ФСС-слоем на кремнии *p*-типа. Это указывало на малый вклад поверхностных состояний в нижней половине запрещённой зоны в изменение $U_{пз}$ при облучении в наших экспериментах.

Оценка радиационной чувствительности по параметру $U_{пз}$ определялась как по величине изменения напряжения плоских зон ($\Delta U_{пз}$) для рассматриваемой структуры при фиксированной дозе облучения (*D*), так и по величине отношения изменения напряжения плоских зон ($\Delta U_{пз}$) к изменению величины дозы облучения (ΔD) на начальном участке облучения – $\alpha_{пз}$. При облучении при положительном напряжении на затворе полученная величина радиационной чувствительности $\alpha_{пз}$ обозначалась как $\alpha_{пз+}$, при отрицательном – как $\alpha_{пз-}$.

2. Влияние технологических процессов на радиационную чувствительность МОП-структур. Экспериментальные результаты

2.1 Влияние хлорного окисления и поликремниевых затворов МОП-структур на изменение $U_{пз}$ при облучении структур 1-3 групп

На первом этапе исследовалось влияние свойств поликремниевых затворов. Использовались окислы, выращенные в парах воды (вл.) и окислы, выращенные в атмосфере «сухого» кислорода (с.). В ряде экспериментов применялся окисел, выращенный в пирогежном процессе (п.). Температура выращивания была $T_{ок} = 920$ °С, 1000 °С, толщины окислов $d_{ок} = 760 \div 1000$ А. Дополнительно изготавливались структуры, выращенные в тех же средах, но с добавлением паров хлора: вл.(Cl), с.(Cl), п.(Cl). В качестве затворов использовались легированный (Si*) и нелегированный поликремний (Si_i), затем для металлизации затворов наносились Mo/Al.

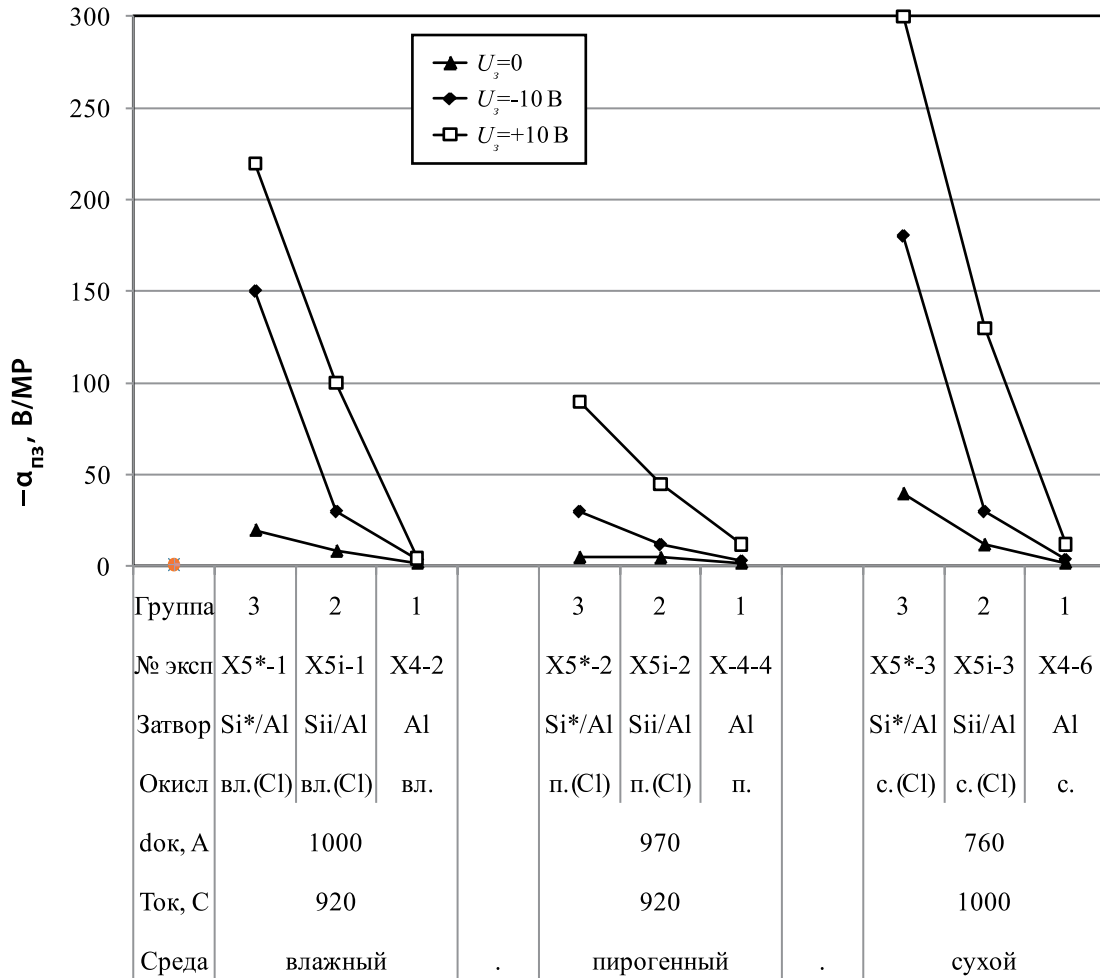
Результаты облучения показаны на рис. 1. Здесь же указаны основные тех-

нологические этапы и параметры МОП-структур. В процессе облучения на затворы структур подавалось напряжение $U_з = +10$ В, $U_з = -10$ В и режим $U_з = 0$. Пары хлора при окислении добавлялись в экспериментах X-5* и X-5i. Так как параметр $U_{пз}$ в результате облучения сдвигался в сторону более отрицательных значений, то величина $\alpha_{пз}$ имела отрицательное значение и это соответствовало введению положительного фиксированного заряда.

Из представленных результатов видно, что присутствие хлора при выращивании окисла и нанесение нелегированного поликремния существенно повышает радиационную чувствительность по параметру $U_{пз}$ для МОП-структур независимо от основной компоненты среды окисления по сравнению с контрольными структурами. Еще в большей степени повышает их радиационную чувствительность процесс легирования поликремния. В данных экспериментах наименьшие изменения наблюдались при облучении в режиме «КЗ». Наиболее эффективно влияние облучения при положительном напряжении на затворах. Это соответствует «классическим» представлениям поведения МОП-структур на основе SiO₂ при облучении [5].

2.2 Влияние слоёв фосфо-силикатного стекла в МОП-структурах 4 группы на изменение $U_{пз}$ при облучении

Из результатов предыдущего раздела видно, что процессы нанесения поликремния и его легирования можно связать с образованием как минимум дополнительных дырочных ловушек в МОП-структурах. В свою очередь, необходимо заметить, что в процессе легирования поликремниевой плёнки фосфор может проникнуть в окисел с ФСС-слоя. Следовательно, в МОП-структуре при наличии поликремниевых затворов имеется более сложный диэлектрик, состоящий из окисла и ФСС-слоя с дополнительными свойствами, влияющими на радиационную чувствительность таких структур. Поэтому в данном разделе работы исследовалось влияние на радиационную чувствительность по параметру $U_{пз}$ нескольких вариантов нанесения ФСС-слоёв, используемых при изго-



Параметры технологии

Рис. 1

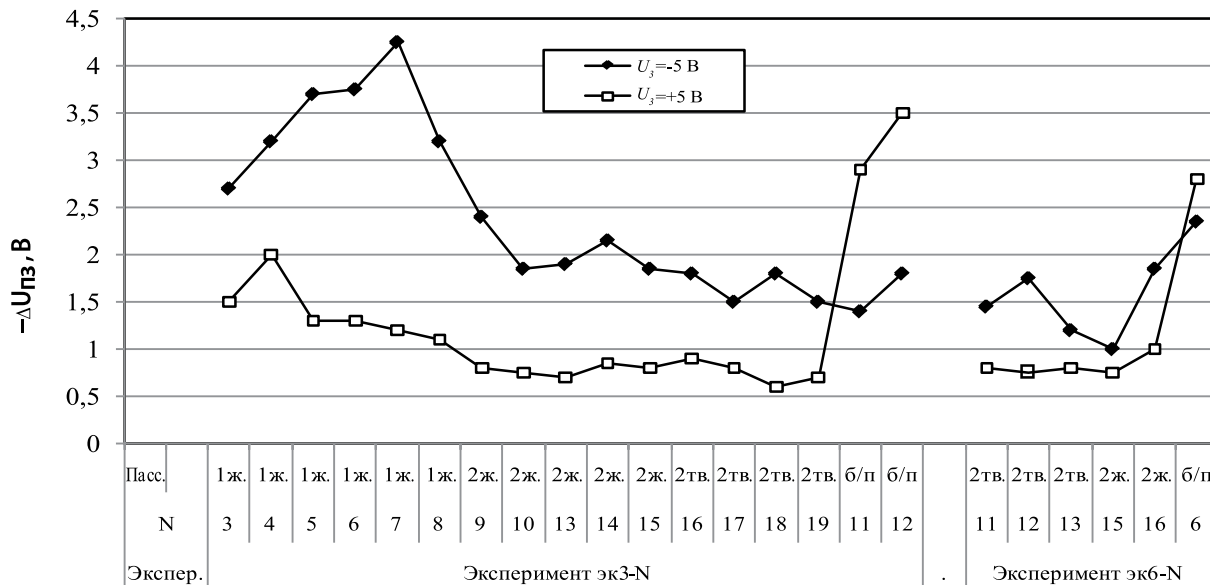
Влияние «хлорного» окисления и поликремниевых затворов на радиационную чувствительность $U_{пз}$ в МОП-структурах 1-3 групп

товлении МОП-приборов. Слои наносились из твердого (тв.) и жидкого (ж.) источников, проводимых на различных установках.

В качестве среды окисления использовался «сухой» кислород. Окисление проводилось при $T_{ок} = 950 \text{ }^\circ\text{C}$ ($d_{ок} = 500\div 1000 \text{ } \text{Å}$) с предварительной продувкой в течение нескольких часов либо в атмосфере трихлорэтилена, либо в парах соляной кислоты. Затем на окисел кроме контрольных структур в экспериментах серии эк3 (эк3-11, эк3-12), См3 (См3-3) и См5 (См5-1, См5-3, См5-4) наносился пассивирующий слой фосфоро-силикатного стекла. При нанесении из жидкого источника (установки – 1ж., 2ж., 3ж.) его толщина составляла $d_{фсс ж} = 50 \text{ } \text{Å}$, в случае твердого источ-

ника $d_{фсс тв} = 40 \text{ } \text{Å}$ (установка – 2тв.) и $d_{фсс тв} = 30\text{-}140 \text{ } \text{Å}$ (установка – 1тв.). В качестве затвора использовалась металлизация Mo/Al. На рис. 2 показаны результаты радиационных изменений $U_{пз}$ для МОП-структур серии эк3 и серии эк6 с ФСС-слоями и контрольных структур без пассивации (б/п). Структуры были облучены дозой $D = 1,3 \text{ MP}$ при напряжениях на затворах $U_g = +5 \text{ В}$ и $U_g = -5 \text{ В}$. На рис. 3 представлены величины радиационной чувствительности по параметру $U_{пз}$, $\alpha_{пз}$, для серий См3 и См5.

В экспериментах серии эк3 наличие пассивации в значительной степени уменьшало влияние положительного смещения на затворе при облучении по сравнению с контрольными структурами. В то



Параметры технологии

Рис. 2

Влияние ФСС на зависимость радиационной чувствительности $U_{пз}$ от знака $U_з$ в МОП-структурах 4 группы. Окисел – «сухой», $T_{ок} = 950 \text{ }^\circ\text{C}$, $d_{фсс,ж} = 50 \text{ \AA}$, $d_{фсс,тв} = 40 \text{ \AA}$, $d_{ок} = 500 \text{ \AA}$, подложка -n-Si, затвор – Mo/Al

же время, при отрицательном смещении на затворе облучение приводило к сравнимым, либо к более сильным изменениям по сравнению с контрольными структурами. В экспериментах эк6 при преобладающем влиянии отрицательного напряжения на затворе наличие ФСС-слоёв приводило к уменьшению радиационной чувствительности по параметру $U_{пз}$ относительно контрольных структур не зависимо от полярности напряжения на затворах.

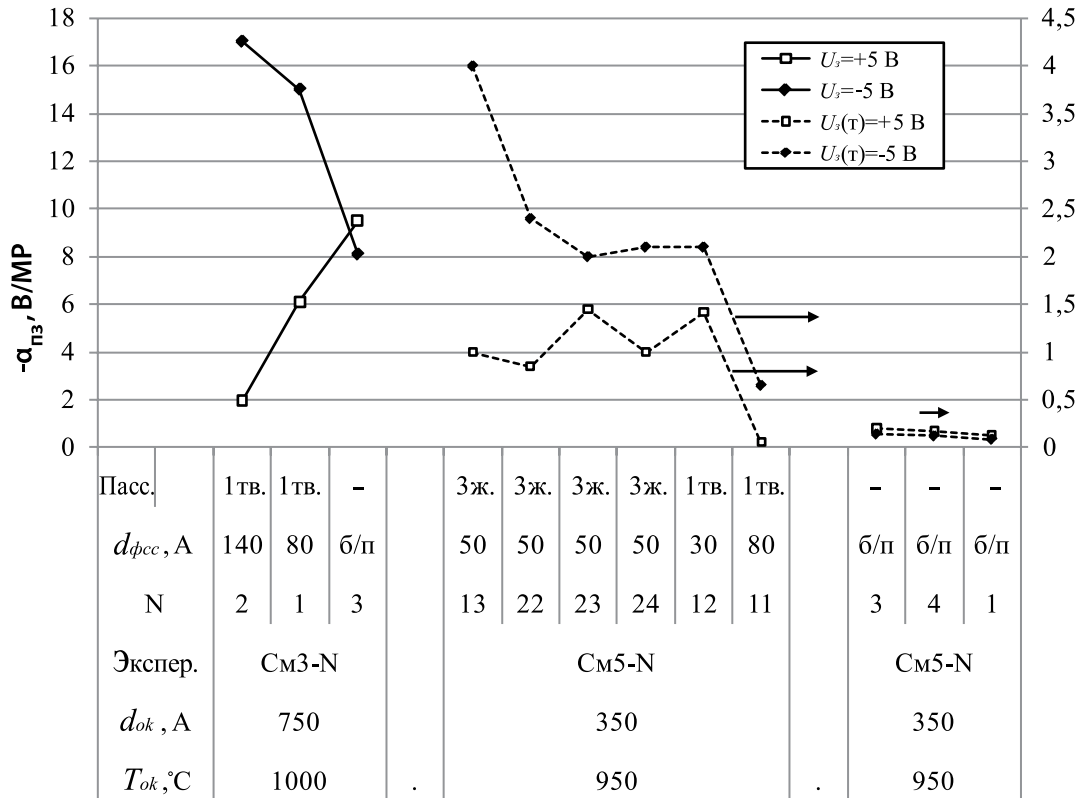
В экспериментах серий См3 и См5 (рис. 3) исследовалось влияние ФСС-слоёв, изготовленных на других установках. Наносились ФСС-слои из жидкой (Зж.) или твердой фаз (1тв.) различной толщины, а также при различных толщинах окислов. Использовались те же процессы предварительной продувки газами. Окисление проводилось в тех же рабочих каналах с использованием более широких условий создания структур.

В контрольных структурах без пассивации, как обычно, более эффективно облучение при положительных напряжениях на затворах. В структурах с пассивацией отрица-

тельное напряжение на затворе более эффективно с точки зрения влияния на радиационную чувствительность по параметру $U_{пз}$, чем положительное, то есть результаты изменений аналогичны поведению структур эк3.

В то же время, в отличие от предыдущих результатов в экспериментах серии См5, при большей эффективности отрицательного напряжения на затворах радиационная чувствительность по $U_{пз}$ независимо от полярности напряжения была выше результатов облучения для контрольных структур (кроме См5-11). По-видимому, с ростом толщины ФСС-слоя увеличивается различие между величинами $\alpha_{пз-}$ и $\alpha_{пз+}$ (См3 на рис. 3).

Результаты показывают, что во всех случаях наличие используемой пассивации приводило к более эффективному влиянию облучения на $U_{пз}$ при отрицательном напряжении на затворе по сравнению с облучением при положительном напряжении. Разные условия предварительной подготовки окислительного тракта, фазовые состояния источника пассивации и используемой установки в экспериментах, по-видимому, не влияли



Параметры технологии

Рис. 3

Влияние ФСС на зависимость радиационной чувствительности $U_{пз}$ в зависимости от знака U_3 в МОП-структурах 4 группы. Окисел – «сухой», подложка -n-Si, затвор – Mo/Al

на наблюдаемую особенность зависимости от полярности знака напряжения на затворе радиационной чувствительности по параметру $U_{пз}$ в МОП-структурах с ФСС-слоями.

Кроме того, эксперименты показали, что применение пассивации может привести как к уменьшению, так и к росту радиационной чувствительности по параметру $U_{пз}$ относительно контрольных структур без пассивирующих слоёв.

Полученные экспериментальные результаты по характеру проявления радиационных дефектов можно разделить на следующие группы (учитывая отрицательные величины радиационной чувствительности, они рассматривались по абсолютной величине):

– эксперименты группы А, включающую структуры 1-3 групп (табл. 1): радиационная чувствительность по параметру $U_{пз}$ в МОП-структурах с поликремниевыми слоями при отрицательных напряжениях на за-

творках структур меньше, чем при положительных (эксперименты серии X, рис. 1);

– эксперименты группы Б, включающую структуры 4 группы: радиационная чувствительность по параметру $U_{пз}$ для рассматриваемых МОП-структур с ФСС-слоями при отрицательных напряжениях на затворах структур выше, чем при положительных.

В свою очередь, экспериментальные результаты группы Б можно разделить на следующие подгруппы:

– подгруппа Б1. В экспериментах серий эк3 (рис. 2), См3 и См5-11 (рис. 3) при положительном напряжении на затворе, наблюдалось значительное уменьшение радиационной чувствительности по параметру $U_{пз}, \alpha_{пз+}$, по сравнению с контрольными структурами. Величина уменьшения радиационной чувствительности менялась в различных экспериментах. Для тех же структур при отрицательном смещении на затворе

радиационная чувствительность по параметру $U_{пз}$, $\alpha_{пз-}$, была сравнима (экЗ-10÷3-19,) или больше контрольных значений (экЗ-3÷3-9, СмЗ). В ряде экспериментов величина $\alpha_{пз-}$ для МОП-структур с ФСС-слоями даже превышала значения $\alpha_{пз+}$ в контрольных структурах (экЗ-5÷3-7, СмЗ-1, СмЗ-2).

– подгруппа Б2. В экспериментах серии См5 (кроме эксперимента См5-11) при положительном и отрицательном напряжениях на затворе наблюдалось возрастание радиационной чувствительности по параметру $U_{пз}$ по сравнению с контрольными структурами (рис. 3).

– подгруппа Б3. В экспериментах серии эк6 (рис. 2) при положительном и отрицательном напряжениях на затворе наблюдалось уменьшение радиационной чувствительности по параметру $U_{пз}$ по сравнению с контрольными структурами.

3. Обсуждение результатов

Предполагается, что в экспериментах наблюдаемые эффекты при облучении связаны, в первую очередь, с наличием электронных ловушек в ФСС-слое. Предполагается также наличие в ФСС-слоях дополнительных дырочных ловушек. Считается, что процессы захвата генерированных излучением носителей на дополнительные и исходные ловушки не зависимы и свободные носители не захватываются на заряженные ловушки в ФСС-слое. Учитывается также, что ширина запрещённой зоны в окисле и ширина в ФСС-слое сравнимы, то есть для свободных носителей при переходе между диэлектриками нет барьеров.

Так как при анализе результатов облучения рассматривались изменения величин $U_{пз}$, то на результаты не должны оказывать влияния наличие небольших различий в их начальных значениях для структур 2-4 групп относительно соответствующих значений $U_{пз}$ для структур 1 группы.

Предварительно введём обозначения:

– ПФЗ(+), ПФЗ(-), ПФЗ*(+), ПФЗ*(-) – положительные фиксированные заряды в окисле на исходных и дополнительных дырочных ловушках при положительном и отрицательном напряжениях на затворе, соответственно, образующиеся при

облучении. Звездочками указаны заряды дополнительных ловушек в ФСС-слое; – ОтФЗ*(+), ОтФЗ*(-) – отрицательные фиксированные заряды в ФСС-слое при положительном и отрицательном напряжениях на затворе, соответственно, образующиеся при облучении.

Рассмотрим сначала простейший случай.

3.1 В ФСС-слое присутствуют только электронные ловушки

Облучение с $U_з < 0$.

Электроны. Часть генерированных излучением электронов в ФСС-слое захватывается на электронные ловушки, остальные под действием внешнего поля уходят в окисел и вместе с электронами, созданными в окисле, инжектируются в подложку. В результате этого процесса в ФСС-слое может образоваться отрицательный заряд ОтФЗ*(-), величина которого зависит от эффективности электронных ловушек, величины электрического поля и толщины слоя.

Дырки. Часть генерированных в окисле дырок может быть захвачена на исходные ловушки, образуя положительный заряд ПФЗ(-), остальные вместе с созданными в ФСС-слое рекомбинируют на затворе.

Таким образом, при $U_з < 0$ по сравнению с контрольными образцами в МОП-структурах с ФСС-слоями может возникнуть некоторый отрицательный заряд ОтФЗ*(-), частично компенсирующий влияние на $U_{пз}$, расположенный в окисле положительный заряд ПФЗ (-) на исходных ловушках. Поэтому в результате облучения МОП-структур с ФСС-слоями при $U_з < 0$ изменения $U_{пз}$ либо сравнимо с контрольными структурами, либо меньше из-за захвата на ловушки части электронов, генерированных в ФСС-слое.

Облучение с $U_з > 0$.

Электроны. Электроны, генерированные излучением в окисле, инжектируются в ФСС-слой и вместе с электронами, созданными здесь, могут быть захвачены на электронные ловушки, образуя в ФСС-слое отрицательный фиксированный заряд ОтФЗ*(+), остальные уходят в затвор.

Дырки. Часть дырок, генерированных излучением в ФСС-слое, перейдя в окис-

сел, вместе с дырками, генерированными в окисле, либо захватывается на исходные дырочные ловушки, образуя положительный заряд ПФЗ(+), либо уходит в подложку. Учитывая малую толщину ФСС-слоя, вкладом генерированных в нём дырок в образование положительного заряда ПФЗ(+) в окисле можно пренебречь.

При достаточной величине образующегося отрицательного заряда ОтФЗ*(+) в ФСС-слое в процессе облучения при $U_3 > 0$ изменение $U_{пз}$ может быть существенно меньше изменения $U_{пз}$ в контрольных структурах. Это вполне допустимо, хотя центростремительный заряд ПФЗ(+) на исходных дырочных ловушках расположен ближе к границе кремний-окисел, чем образующийся в ФСС-слое отрицательный заряд ОтФЗ*(+). При малой концентрации исходных дырочных ловушек в «хорошем» окисле при облучении может произойти даже инверсия знака изменения $U_{пз}$ относительно его исходного значения в сторону положительных значений.

В свою очередь, при сравнении влияния полярности знака на затворах, очевидно, что для структур с ФСС-слоями облучение при $U_3 > 0$ должен приводить к более высоким значениям величин отрицательного заряда ОтФЗ*(+) из-за большей величины потока электронов в ФСС-слое, участвующего в образовании этого заряда.

Рассмотренные выше рассуждения позволяют предположить, что результаты экспериментов эк3-10–эк3-19 (рис. 2) определяются наличием в ФСС-слое МОП-структур эффективных электронных ловушек в ФСС-слое. Однако в экспериментах эк3-3–эк3-9 (рис. 2), См3 и См5 (рис. 3) при облучении с $U_3 < 0$ изменение $U_{пз}$ было больше, чем в контрольных структурах. Очевидно, что такие изменения $U_{пз}$ нельзя объяснить наличием только электронных ловушек в ФСС-слое.

3.2 В ФСС-слое присутствуют электронные и дополнительные дырочные ловушки

На рис. 4 схематично показано образование при облучении отрицательного за-

ряда ОтФЗ*(-) на электронных ловушках и положительного заряда ПФЗ*(-) на дырочных ловушках в ФСС-слое при отрицательном напряжении на затворах в МОП-структурах (рис. 4а). Аналогично с учётом знака отражены процессы образования зарядов при положительном напряжении (рис. 4б). На схемах не представлены положительные заряды ПФЗ на исходных дырочных ловушках в окисле, так как в первую очередь интересны изменения $U_{пз}$ при облучении в структурах с ФСС-слоями относительно контрольных структур.

При $U_3 > 0$, как и в п. 3.1, электроны, созданные излучением в окисле и в ФСС-слое (рис. 4б), могут вызвать введение значительного по величине отрицательного заряда ОтФЗ*(+). Заряд ПФЗ*(+), созданный дырками, генерированными только в ФСС-слое, будет значительно меньше заряда ОтФЗ*(+) и поэтому результирующая величина изменения $U_{пз}$ может быть меньше, чем в контрольных структурах.

При $U_3 < 0$ в процессе облучения в образовании отрицательного заряда ОтФЗ*(-) участвуют электроны генерированные только в ФСС-слое (рис. 4а) и его величина меньше, чем заряд ОтФЗ*(+). В процессе облучения в ФСС-слое образуется также дополнительный положительный заряд ПФЗ*(-), создаваемый дырками генерированными в окисле и в ФСС-слое (рис. 4а). Этот положительный заряд ПФЗ*(-) может не только полностью компенсировать образующийся параллельно отрицательный заряд ОтФЗ*(-), но при достаточной концентрации дырочных ловушек в ФСС-слое привести к изменениям величины $U_{пз}$ более высоким, чем в контрольных структурах.

Таким образом, наличие дырочных и электронных ловушек в ФСС-слое качественно могут объяснить результаты экспериментов серий эк3 и См3.

Более сложная ситуация возникает при рассмотрении результатов экспериментов серий См5 и эк6. Анализ показывает необходимость наличия в МОП-структуре с ФСС-слоем, как минимум, других дополнительных дырочных ловушек с локализацией в окисле, и этот момент требует дополнительных исследований.

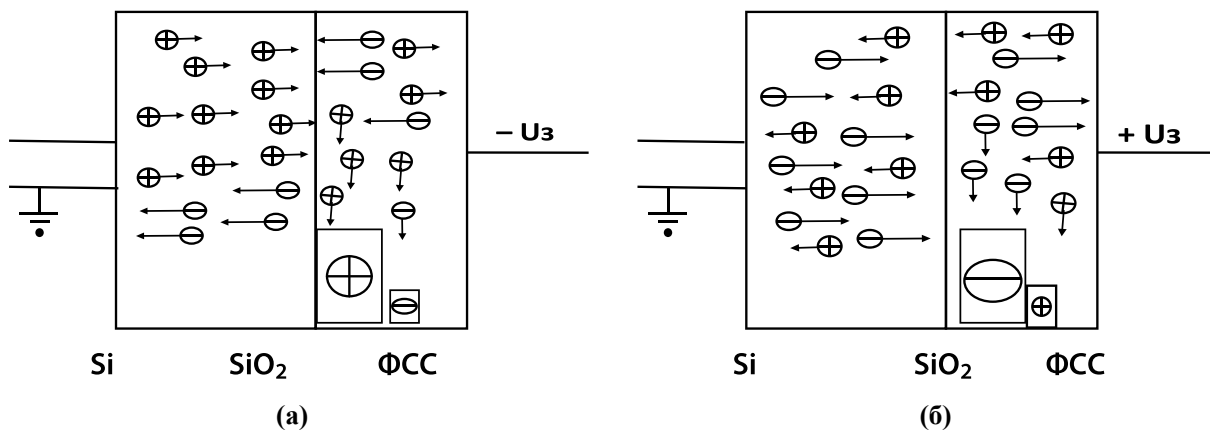


Рис. 4

Схема накопления в процессе облучения в МОП-структуре с ФСС-слоем фиксированных зарядов при различной полярности напряжения на затворах: (а) – $U_3 < 0$, (б) – $U_3 > 0$

3.3 «Хлорный» окисел, затвор из легированного поликремния

Эксперименты серии X (рис. 1).

Применение процесса окисления с добавлением паров хлора и нанесение не легированного поликремния, как видно из экспериментов X4 и X5i, существенно увеличивают концентрацию дырочных ловушек в окисле независимо от основных сред окисления. Это связано с радиационным распадом хлорных комплексов, образованных в результате «хлорного» окисления. Поэтому использование хлора в процессе окисления для улучшения свойств окисла при создании МОП-приборов с точки зрения радиационной чувствительности является не целесообразным.

Из приведённых данных экспериментов X4 и X5 видно, что процессы нанесения и легирование поликремния могут увеличивать радиационную чувствительность МОП-структур. Можно предположить, что изменение радиационной чувствительности связано с образованием ФСС-слоя после легирования поликремния и наличие в нём дополнительных электронных и дырочных ловушек. Именно из-за наличия дополнительных дырочных ловушек наблюдалось увеличение радиационной чувствительности $U_{пз}$ после легирования поликремния. Однако именно из-за наличия электронных ловушек в ФСС-слое это увеличение в случае облучения при $U_3 > 0$ было меньше, чем мож-

но было ожидать, учитывая сильные изменения радиационной чувствительности $U_{пз}$ при отрицательном напряжении на затворе.

Выводы

1. Использование «хлорного» окисления для создания подзатворного окисла в МОП-структурах может значительно увеличить радиационную чувствительность по параметру $U_{пз}$.

2. В МОП-структурах с ФСС-слоем в этом слое существуют электронные ловушки, на которых при генерации ионизирующим облучением электронно-дырочных пар при $U_3 > 0$ эффективно образуется отрицательный фиксированный заряд.

3. В МОП-структурах с ФСС-слоем в этом слое существуют дырочные ловушки, на которых при генерации ионизирующим облучением электронно-дырочных пар при $U_3 < 0$ эффективно образуется положительный фиксированный заряд.

4. Наличие в МОП-структурах ФСС-слоя может как увеличивать, так и уменьшать радиационную чувствительность таких структур по параметру $U_{пз}$.

5. Наличие электронных и дырочных ловушек в МОП-структуре, связанных с нанесением на окисел ФСС-слоя, может существенно повлиять на зависимость радиационной чувствительности по параметру $U_{пз}$ от полярности приложенного на затвор напряжения.

Литература

1. Таперо К. М., Улимов В. Н., Членов А. М. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2012. – 304 с.
2. Пирс К., Адамс А., Кац Л., Цай Дж., Сейдел Т., Макгилс Д. Технология СБИС: В 2-х книгах. Кн.1. Пер с англ. / Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – 404 с.
3. Андреев В. В., Бондаренко Г. Г., Столяров А. А., Васютин М. С., Коротков С. И. Влияние температуры на инжекционную модификацию диэлектрических плёнок МДП-структур // Перспективные материалы. – 2008. – № 5. – С. 26-30.
4. Левин М. К., Гитлин В. Р., Татаринцев А. В., Остроухов С. С., Кадменский С. Г. Рентгеновская корректировка пороговых напряжений в производстве МДП-интегральных схем // Микроэлектроника. – 2002. – Т. 31, № 6. – С. 408-413
5. Митчел Дж., Уилсон Д. Поверхностные эффекты в полупроводниковых приборах, вызванные радиацией. – М.: Атомиздат, 1970. – 90 с.

References

1. Tapero K. M., Ulimov V. N., Chlenov A. M. *Radiatsionnye efekty v kremnievykh integralnykh skhemakh kosmicheskogo primeneniya* [Radiation effects i silicon integrated circuits for space application]. Moscow, Binom. Laboratoriya znaniy Publ., 2012, 304 p.
2. Pirs K., Adams A., Kats L., Tsay J., Seydel T., Makgils D. *Tekhnologiya SBIS* [LPIC Technology]. Moscow, Mir Publ., 1986, vol. 1, 404 p.
3. Andreev V. V., Bondarenko G. G., Stolyarov A. A., Vasyutin M. S., Korotkov S. I. Thermal influence on injected modification of dielectric films in MOS-structures. *Perspektivnye materialy* [Perspective materials], 2008, № 5, pp. 26-30.
4. Levin M. K., Gitlin V. R., Tatarintsev A. V., Ostroukhov S. S., Kadmenskiy S. G. X-ray correction of threshold voltages in fabrication of MOS-integrated circuits. *Mikroelektronika* [Microelectronics], 2002, T. 31, № 6, pp. 408-413
5. Mitchel J., Wilson D. *Poverkhnostnye efekty v poluprovodnikovyykh priborakh, vyzvannyye radiachiey* [Radiation induced surface effects in semiconductor devices]. Moscow, Atomizdat Publ., 1970, 90 p.