

**ВЛИЯНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯДОВ В ОКСИДЕ НА ДЕГРАДАЦИЮ  
ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУР МЕТАЛЛ – ДИЭЛЕКТРИК – ПОЛУПРОВОДНИК**

<sup>1</sup>Черкесова Н.В.\*, <sup>1</sup>Мустафаев Г.А., <sup>2</sup>Мустафаев А.Г.

<sup>1</sup>*Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова*

<sup>2</sup>*Дагестанский государственный университет народного хозяйства*

\*natasha07\_2002@mail.ru

*Проведена оценка влияния медленного движения дырок на деградацию n-канальных МДП ПТ с n<sup>+</sup>-поликремниевым затвором. Исследовано влияние высвобождения захваченных электронов на динамическую деградацию p-канальных МДП ПТ после инжекции горячих носителей в канал. Показано, что на процесс восстановления характеристик влияет поле в оксиде, причем зависимость от времени носит ярко выраженный неэкспоненциальный характер. Показано, что инжекция электронов при высоком напряжении на затворе в процессе чередующихся статических воздействий вызывает рекомбинацию захваченных дырок, а учет эффектов освобождения захваченного заряда позволяет решить проблемы релаксации процессов деградации.*

**Ключевые слова:** дрейфовая подвижность, диоксид кремния, динамическая деградация, рекомбинация, заряд, инжекция, поле, диффузия, миграция, ловушки.

**THE INFLUENCE OF CHARGE MOVEMENT WITHIN AN OXIDE ON THE DEGRADATION  
OF CHARACTERISTICS IN METAL-DIELECTRIC-SEMICONDUCTOR STRUCTURES**

<sup>1</sup>Cherkesova N.V., <sup>1</sup>Mustafaev G.A., <sup>2</sup>Mustafaev A.G.

<sup>1</sup>*Kabardino-Balkarian State University*

<sup>2</sup>*Dagestan State University of National Economy*

*The effect of slow hole motion on the deterioration of an n-channel MDP PT with an n<sup>+</sup>-polysilicon gate was investigated. The influence of trapped electron release on the dynamic degradation of p-channel MDP PT following hot carrier injection into the channel is examined. It is demonstrated that the field in the oxide influences the process of restoring features, and the time dependency has a distinct non-exponential character. It is demonstrated that the injection of electrons at high voltage at the gate during the process of alternating static effects causes trapped hole recombination, and that taking into account the effects of releasing the trapped charge allows the problems of relaxation of degradation processes to be solved.*

**Keywords:** drift mobility, silicon dioxide, dynamic degradation, recombination, charge, injection, field, diffusion, migration, traps.

**Введение**

Перенос электронов и дырок через оксид протекает различным образом [1–5]. Так дрейфовая подвижность электронов в оксиде при значении поля 1 мВ/см составляет 20 см<sup>2</sup>/В·с и при толщине оксида 20 нм электроны пролетают его менее чем за 0,1 пс, и не могут обуславливать медленно протекающие процессы. Напротив, дырки генерированных в объеме оксида электронно-дырочных пар движутся намного медленнее. При этом в первые несколько пикосекунд дырки имеют относительно высокую подвижность – 1 см<sup>2</sup>/(В·с), так что при поле 1 мВ/см они смещаются на 10 нм. Вследствие поляри-

зации решетки диоксида кремния зарядом дырок последние локализуются на кислородном атоме связи Si-O-Si, из которого их перенос на соседний атом кислорода осуществляется по прыжковому механизму. Как правило [3], аморфный оксид МДП прибора содержит большое число дефектов, где дырка после «прыжка» может захватываться, что в еще большей степени снижает подвижность.

### Результаты и обсуждение

Для оценки влияния медленного движения дырок на деградацию МДП ПТ изготавливали по стандартной технологии [6], n-канальные приборы с p<sup>+</sup>-поликремниевым затвором длиной 1,0 мкм; толщина затворного оксида составляла 22 нм. Импульсы тока подавали на сток и затвор при заземленном истоке во избежание возникновения избыточного воздействия и осцилляций. После инжекции дырок (подача импульса на сток) следовал период ожидания (без подачи импульса), последующая подача импульса на затвор вызывала движение подвижных дырок. Зависимость уровня деградации приборов по такому параметру, как коэффициент умножения от времени ожидания при воздействии положительного (рис. 1) и отрицательного (рис. 2) импульсов длительностью 20 нс (пунктирная линия на рис. 1 – уровень деградации без подачи импульса на затвор) свидетельствует о том, что в первом случае импульсное воздействие вызывает движение дырок назад в кремний, а во втором – в глубь оксида. Время инжекции поддерживали очень коротким – всего 1,5 нс. За это время дырки проникали в оксид на глубину менее 1 нм. За период ожидания, когда поле в оксиде мало, дырки могут диффундировать – примерно на 1 нм за 5 нс. При положительном импульсе они за это время достигнут области, где происходит непрерывный их захват, особенно при возрастании времени ожидания до 20 нс.

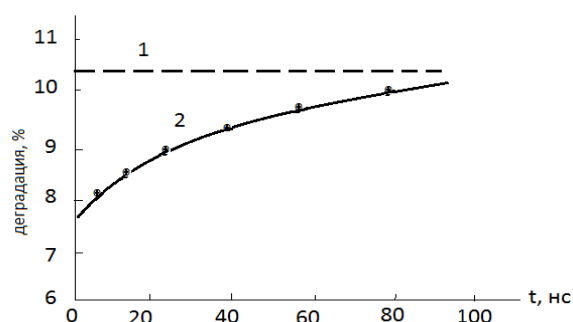


Рис. 1. Изменения уровня коэффициента умножения от времени ожидания при воздействии положительного импульса длительностью 20 нс, амплитуда-8 В, (пунктирная линия показывает уровень деградации без подачи импульса на затвор)

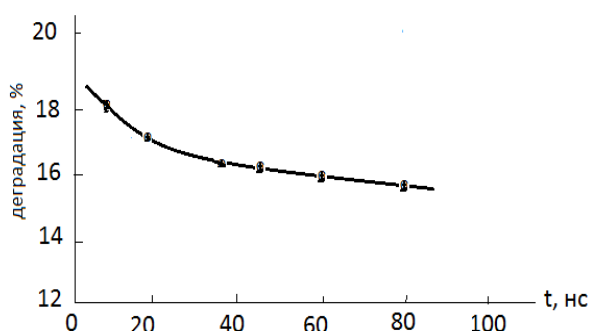


Рис. 2. Изменения уровня коэффициента умножения от времени ожидания при воздействии отрицательного импульса длительностью 20 нс, амплитуда-8 В

Как видно из рис. 1, подвижные дырки в оксиде, которые могут быть захвачены, есть после времени ожидания даже 50 нс, однако положительный импульс на затворе их вытягивает назад в кремний. При отрицательном импульсе на затворе и малом времени ожидания, как это видно из рис. 2, диффузия дырок назад в кремний меньше, и после начального импульса инжекции они в основном локализованы

в пределах слоя оксида толщиной 2 нм. По расчетам в таких образцах непрерывный захват дырок возможен в пределах области оксида глубиной от 2 до 5 нм от поверхности раздела с кремнием.

Другим процессом, длительность которого составляет от нескольких нс до нескольких дней, является освобождение захваченного заряда в оксиде [5]. Восстановление количества дырок в зависимости от времени после инъекции в канале n-МДП ПТ при разных значениях поля в оксиде (рис. 3) характеризуется хорошим совпадением экспериментальных и расчетных данных.

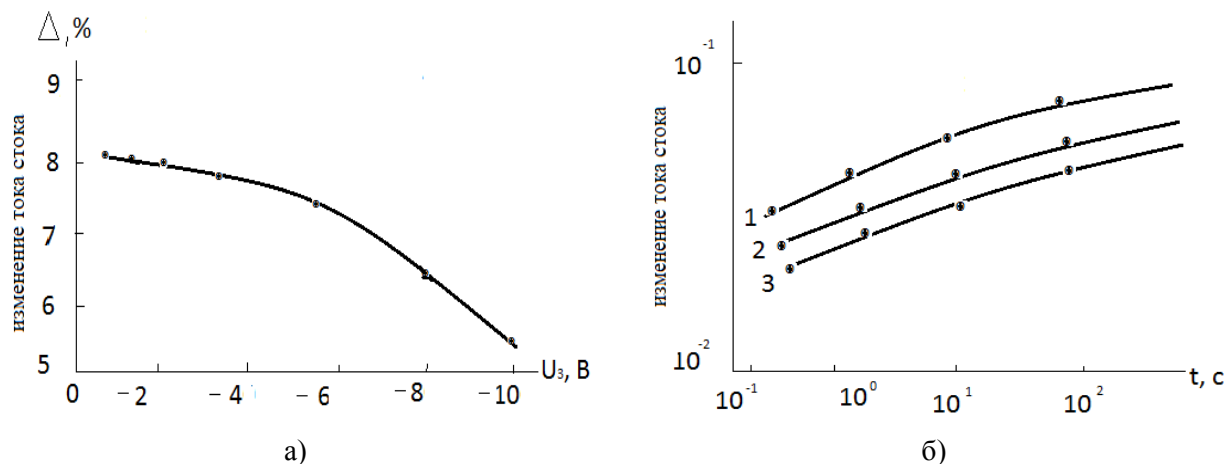


Рис. 3. Восстановление количества дырок в зависимости от времени после инъекции в канале n-МДП ПТ при разных значениях поля в оксиде, длительность «холодной» фазы: 1 – 25 нс, 2 – 1 мкс, 3 – 10 мкс

Для оценки влияния высвобождения захваченных электронов на динамическую деградацию p-МДП ПТ после статического воздействия (инъекции горячих носителей в канал) на затвор длиной 1,0 мкм подавали смещение – 3 В при напряжении на стоке – 8 В. На процесс восстановления характеристик сильно влияет поле в оксиде, причем зависимость от времени носит ярко выраженный неэкспоненциальный характер, т. е. отжиг проходит по механизмам стимулированной полем термической эмиссии, ударной ионизации инжектированными электронами ловушечных центров по Фаулеру–Нордхейму или, как и в случае захваченных дырок, разряда путем туннелирования захваченных электронов из оксида [7, 8]. Опустошение электронных ловушек является причиной большей долговечности p-МДП ПТ, так как захваченные электроны могут покидать оксид, туннелируя назад к затвору или полупроводнику [4].

Экспериментальную проверку эффектов влияния освобождения захваченных зарядов на динамическую деградацию p-МДП ПТ проводили на приборах с толщиной оксида 16 нм и длиной затвора 0,9 мкм. Электроны инжектировали при напряжении на затворе – 2 В и напряжении на стоке – 6 В в течение 0,5 мкс (длительность «горячей» фазы). После этого напряжение стока снижали до нуля, и в течение определенного времени (9,5 мкс – длительность «холодной» фазы) затвор находился под определенным напряжением. Как показали эксперименты (см. рис. 3а), с увеличением амплитуды напряжения на затворе в течение «холодной» фазы деградация заметно падает поскольку при этом поле оксида способствует освобождению захваченных ранее электронов, причем тем в большей степени, чем выше поле. Для количественной оценки эффекта влияния высвобождающихся электронов на долговечность МДП ПТ проводили эксперименты в режиме, когда инъекция горячих носителей осуществлялась в течение 100 нс при таком же напряжении стока, что и поддерживаемое на затворе в течение «холодной» фазы (в режиме инъекции – 3 В). Как видно из рис. 3б, при длительности горячей фазы долговечность можно увеличить, если длительность «холодной» фазы возрастет с 25 нс до 10 мкс. По мере снижения толщины слоя оксида поле в нем будет возрастать, что сделает эффект освобождения электронов более существенным.

Медленно протекающие процессы у поверхности раздела изучали на примере характера изменения состояний акцепторных ловушек в n-канальных МДП ПТ с использованием методики накачки заряда. При этом на области истока, стока и на подложку подавали постоянное смещение, а на затвор – импульсное напряжение, которое поочередно создавало на поверхности раздела режимы накопления и инверсии заряда. При инверсном состоянии поверхности уровень Ферми расположен близко к зоне

проводимости, вследствие чего электроны из канала захватываются акцепторными ловушками. В состоянии сильной инверсии временная константа этого процесса мала и захват происходит постоянно. В режиме аккумуляции заряда те поверхностные ловушки, для которых время термической эмиссии меньше длительности переходного импульса напряжения на затворе, излучают электрон в канал [3]. Электроны же с более высокими временными константами могут только рекомбинировать с дырками на поверхности, создавая ток накачки заряда. Таким образом, при малой длительности импульса на затворе этот ток является прямой мерой общего числа акцепторных ловушек на поверхности раздела, имеющих большие временные константы. Такие ловушки могут играть заметную роль в процессе динамической деградации, когда импульс переходного напряжения смещает уровень Ферми для электронов из положения инверсии в середину запрещенной зоны или ниже. При высоком напряжении на стоке и малой длительности переходных импульсов напряжения на затворе на поверхности раздела вблизи стока отрицательный заряд в динамическом режиме больше, чем в статическом, что усиливает горизонтальное электрическое поле (т. е. инжекцию) и тем самым – динамическую деградацию. На образцах p – канальных МДП ПТ изучали также влияние попеременной инжекции в затвор электронов и дырок на динамическую деградацию. В таких приборах при низком напряжении на затворе горизонтальное электрическое поле высокое, поле в оксиде притягивает дырки, поэтому ток инжекции дырок относительно большой. Вероятность захвата инжектированных дырок велика. В результате его осуществления максимальное горизонтальное поле уменьшается, а накапливающийся в оксиде положительный заряд тормозит дальнейшую инжекцию дырок. При высоком напряжении на затворе в значительных количествах инжектируются только электроны, с которыми могут рекомбинировать захваченные ранее дырки, нейтрализуя заряд, что восстанавливает величину горизонтального электрического поля и тем самым усиливает инжекцию дырок при низком напряжении на затворе.

На рис. 4 приведены результаты исследований n-МДП приборов с слаболегированным стоком, длиной затвора 0,9 мкм и толщиной оксида 20 нм в динамическом режиме в инверторном включении и статическом режиме при напряжении смещения на стоке и максимальном генерируемом токе подложки.

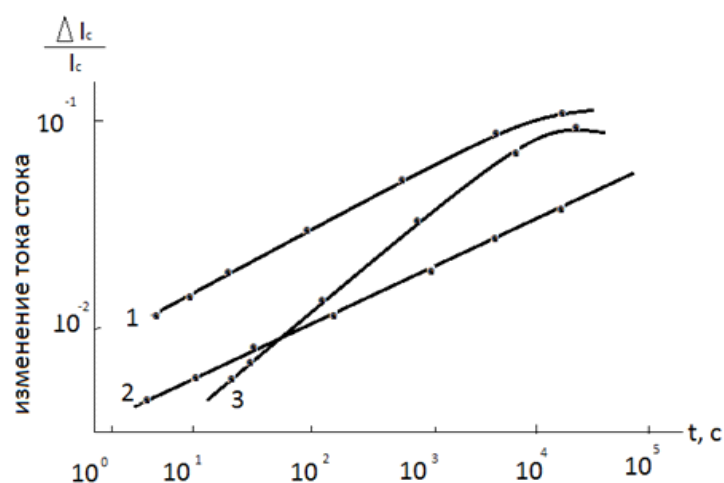


Рис. 4. Изменение тока стока от времени воздействия, в динамическом режиме:

- 1 – при напряжении на стоке 9 В, на затворе 3 В, 2 – при напряжении на стоке 8 В, на затворе 3 В, 3 – при напряжении на стоке и на затворе 8 В в инверторном включении и статическом режиме

Как видно, деградация в динамическом режиме носит более плавный характер, причем в тем большей степени, чем выше напряжение на стоке. При низких напряжениях на затворе инжектированные дырки захватываются в оксиде, что приводит к резкому снижению тока подложки (и одновременно – инжекционного тока в оксиде). Инжекция электронов при высоком напряжении на затворе в процессе чередующихся статических воздействий вызывает рекомбинацию захваченных дырок [3], поэтому снижение поля вследствие захвата заряда значительно менее ярко выражено. Как и ожидалось, при динамическом воздействии ток подложки уменьшается незначительно и обусловлено это только последовательным сопротивлением.

Таким образом, в инверторном режиме снижение инжекционного тока в оксиде значительно меньше, поэтому деградация путем генерации ловушек на поверхности раздела протекает гораздо быстрее. Исследования показали, что при использовании стандартной МДП технологии свойства оксида и поверхности раздела оксид/полупроводник не являются причиной сильной динамической деградации МДП ПТ. Учет эффектов освобождения захваченного заряда позволяет решить проблемы релаксации процессов деградации.

### **Выводы**

Показано, что при воздействии положительного импульса в структурах «металл – диэлектрик – полупроводник» импульсное воздействие вызывает движение дырок назад в кремний, а воздействие отрицательного импульсов вызывает движение дырок в глубь оксида. Установлено, что с увеличением амплитуды напряжения на затворе в течение «холодной» фазы деградация снижается, так как поле оксида способствует освобождению захваченных электронов, причем тем в большей степени, чем выше поле, а при низких напряжениях на затворе инжектированные дырки захватываются в оксиде, что приводит к снижению тока подложки (и одновременно – инжекционного тока в оксиде). Показано, что свойства оксида и поверхности раздела оксид/полупроводник не являются причиной динамической деградации МДП ПТ, а учет эффектов освобождения захваченного заряда позволяет решить проблемы релаксации процессов деградации.

### **Библиография**

1. Литовченко В.Г., Горбань А.П. Основы физики микроэлектронных систем металл-диэлектрик-полупроводник. Киев: Наукова думка, 1978. 316 с.
2. Свойства структур металл – диэлектрик – полупроводник / под ред. А.В. Ржанова. М: Наука, 1976. 277 с.
3. Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. М.: Техносфера, 2011. 800 с.
4. Солдатов В.С., Соболев Н.В. Электронный захват в МДП структурах с термическим окислом кремния при туннельной инжекции // Известия вузов. Физика. 1989. № 12. С. 82–84.
5. Андреев В.В., Бондаренко В.Г. Зарядовая деградация МДП-систем с термическим окислом кремния, пассивированным ФСС, при высокополевой туннельной инжекции // Микроэлектроника. 1997. № 6. С. 640–646.
6. Мустафаев Г.А., Черкесова Н.В. Проектирование элементов цифровых МДП-схем устойчивых к воздействию дестабилизирующих факторов: учебное пособие. Нальчик, 2020. 95 с.
7. Мустафаев Г.А., Черкесова Н.В. Трехмерные интегральные схемы: учебное пособие. Нальчик: КБГУ, 2016. 89 с.
8. Mustafaev G.A., Khasanov A.I., Mustafaev A.G. Cherkesova N.V. Thin Layers of Oxide Coating in Very-Large-Scale Integration // AER-Advances in Engineering Research. 2018. V. 177. P. 377–379.