

**Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов вузов  
в области нанотехнологий и наноматериалов**

**Раздел конкурса**

**Наноинженерия**

---

(название научного раздела конкурса по приказу Федерального агентства по образованию)

**ВУЗ** Государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования "Московский  
государственный технический университет имени Н.Э.  
Баумана", Калужский филиал

(название вуза)

**Факультет** Электроники информатики и управления

(название факультета)

**Кафедра** Конструирование и производство электронной аппаратуры

(название кафедры)

**Моделирование инжекционной модификации многослойных  
нанометровых диэлектрических слоев легированный фосфором**

---

(название работы)

**Выполнил:**

**Студент** \_\_\_\_\_ (Андреев Д.В. )

**Научный руководитель** \_\_\_\_\_ (Столяров А.А. )

**2009 г.**

## А Н Н О Т А Ц И Я

### научной работы

Название: Моделирование инжекционной модификации многослойных нанометровых диэлектрических слоев легированный фосфором

Вуз: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана", Калужский филиал

Год завершения научной работы: 2009

Краткая аннотация работы

Предложена модель модификации МДП-структур с термической плёнкой  $\text{SiO}_2$ , пассивированной слоем фосфорно-силикатного стекла, в условиях управляемой сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик. Исследованы процессы зарядовой деградации и модификации МДП-структур  $\text{Si-SiO}_2\text{-Al}$ ,  $\text{Si-SiO}_2\text{-ФСС-Al}$  и  $\text{Si-SiO}_2$ -поликремний при сильнополевой туннельной инжекции электронов. Моделирование процессов зарядовой деградации с учетом распределения локальных электрических полей в системе  $\text{Si-SiO}_2\text{-ФСС-Al}$  указывает на существенное ослабление генерации дырок в слое ФСС. Показано, что процессы изменения зарядового состояния двуокиси кремния, пассивированной фосфорно-силикатным стеклом, необходимо рассматривать с учетом изменения параметров захваченных зарядов и локальных электрических полей в диэлектрике.

Объем работы \_\_\_ с.

Количество приложений \_\_\_

Количество иллюстраций 4

Количество таблиц 1

Количество источников литературы 15 ед.

## Х А Р А К Т Е Р И С Т И К А

### научной работы

Классификация научной работы (фундаментальная, прикладная)

Вид научной работы (учебная, научная)

Ключевые слова (не более 10) нанометровые диэлектрические слои, МДП-структура, инжекционная модификация, моделирование

Цель научной работы:

на основе ранее полученных экспериментальных данных разработать модель модификации и деградации МДП-структур с термической плёнкой  $\text{SiO}_2$ , пассивированной слоем ФСС, в условиях управляемой сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик,

учитывающей термическую генерацию, как с дырочных, так и электронных ловушек. На основе разработанной модели провести исследование процессов зарядовой деградации и модификации МДП-структур Si-SiO<sub>2</sub>-Al, Si-SiO<sub>2</sub>-ФСС-Al и Si-SiO<sub>2</sub>-Si\* при сильнополевой туннельной инжекции электронов из кремния в режиме постоянного тока, а также определить параметры, входящие в модель.

Методы проведенных исследований: моделирование, экспериментальное исследование

Основные результаты научного исследования (научные, практические):

1. Разработана модель инжекционной деградации и модификации МДП-структур с термической пленкой SiO<sub>2</sub>, пассивированной ФСС, учитывающая три основных механизма изменения зарядового состояния диэлектрика. Во-первых, захват электронов на ловушки в ФСС. Во-вторых, накопление положительного заряда, возникающего в результате межзонной ударной ионизации в SiO<sub>2</sub> с образованием электронно-дырочных пар и последующим захватом дырок на ловушки в окисле, а также инжекции дырок из анода. В-третьих, захват электронов на первичные электронные ловушки в SiO<sub>2</sub>.

2. Моделирование процессов зарядовой деградации с учетом распределения локальных электрических полей в системе Si-SiO<sub>2</sub>-ФСС-Al указывает на существенное ослабление генерации дырок в слое ФСС, ответственных за накопление положительного заряда в пленке SiO<sub>2</sub>, что может быть связано с отличием величин параметров ударной ионизации в слое ФСС от их значений в двуокиси кремния или рекомбинацией дырок в ФСС. Показано, что процессы изменения зарядового состояния двуокиси кремния, пассивированной фосфорно-силикатным стеклом, нельзя рассматривать как простую суперпозицию отдельных механизмов накопления зарядов, поскольку их взаимное влияние в значительной мере усложняет общую картину зарядовой деградации и требует использования моделей, учитывающих процесс изменения параметров захваченных зарядов и локальных электрических полей в диэлектрике.

Научный руководитель \_\_\_\_\_ (Столяров А.А.)

Студент \_\_\_\_\_ (Андреев Д.В. )

**С В Е Д Е Н И Я**  
о студенте (студентах) и его (их) научном руководителе

**Студент:**

1. Фамилия Андреев
2. Имя Дмитрий
3. Отчество Владимирович
4. Курс 2
5. Адрес фактического места проживания 248003, г. Калуга, ул. Белинского, д.42
6. Телефон (домашний, сотовый) +7 906 5096782
7. Адрес электронной почты DAndreev-EIC@yandex.ru

**Научный руководитель:**

1. Фамилия Столяров
2. Имя Александр
3. Отчество Алексеевич
4. Место работы Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана", Калужский филиал
5. Должность Заведующий кафедрой
6. Ученая степень доктор технических наук
7. Ученое звание профессор
8. Адрес фактического места проживания 248023, г. Калуга, ул. Ст.Разина, д.7, кв.49
9. Телефон +7 903 635 50 53
10. Адрес электронной почты p1kf@bmstu-kaluga.ru

Научный руководитель \_\_\_\_\_ (Столяров А.А.)

Студент \_\_\_\_\_ (Андреев Д.В. )

О Т З Ы В  
научного руководителя

*Название работы:* Моделирование инжекционной модификации многослойных нанометровых диэлектрических слоев легированный фосфором

*Авторы:* Андреев Д.В.

*Научный руководитель:* Столяров А.А.

Освоение производства полевых приборов на основе инжекционно модифицированных наноразмерных диэлектрических слоев заметно сдерживается отсутствием достоверных моделей, описывающих процессы инжекционной модификации и деградации в условиях сильных электрических полей в широком диапазоне температур. Поэтому работа студента Андреева Д.В. «Моделирование инжекционной модификации многослойных нанометровых диэлектрических слоев легированный фосфором», посвященная разработке модели модификации и деградации МДП-структур с термической плёнкой  $\text{SiO}_2$ , пассивированной слоем ФСС, в условиях управляемой сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик, учитывающей термическую генерацию, как с дырочных, так и электронных ловушек без сомнения является, актуальной, а полученные результаты имеют значительную научную и практическую ценность.

В работе разработана модель модификации МДП-структур с термической плёнкой  $\text{SiO}_2$ , пассивированной слоем фосфорно-силикатного стекла, в условиях управляемой сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик. Исследованы процессы зарядовой деградации и модификации МДП-структур  $\text{Si-SiO}_2\text{-Al}$ ,  $\text{Si-SiO}_2\text{-ФСС-Al}$  и  $\text{Si-SiO}_2$ -поликремний при сильнополевой туннельной инжекции электронов. Моделирование процессов зарядовой деградации с учетом распределения локальных электрических полей в системе  $\text{Si-SiO}_2\text{-ФСС-Al}$  указывает на существенное ослабление генерации дырок в слое ФСС. Показано, что процессы изменения зарядового состояния двуокиси кремния, пассивированной фосфорно-силикатным стеклом, необходимо рассматривать с учетом изменения параметров захваченных зарядов и локальных электрических полей в диэлектрике.

Студент Андреев Д.В., успевающий на «отлично», с первого курса занимается научно-исследовательской работой на кафедре конструирования и производства электронной аппаратуры Калужского филиала МГТУ им. Н.Э.Баумана. Регулярно участвует в научно-технических конференциях студентов и аспирантов, имеет 5 публикаций.

Считаю, что представленная работа полностью соответствует требованиям положения о конкурсе научно-исследовательских работ студентов вузов в области нанотехнологий и наноматериалов по разделу «НАНОИНЖЕНЕРИЯ» и рекомендуется для участия в данном конкурсе.

\_\_\_\_\_  
Подпись руководителя

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2009г.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНЖЕКЦИОННОЙ МОДИФИКАЦИИ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОМЕТРОВЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЕВ ЛЕГИРОВАННЫХ ФОСФОРОМ

Д.В.Андреев

## АННОТАЦИЯ

Предложена модель модификации МДП-структур с термической плёнкой  $\text{SiO}_2$ , пассивированной слом фосфорно-силикатного стекла, в условиях управляемой сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик. Исследованы процессы зарядовой деградации и модификации МДП-структур  $\text{Si-SiO}_2\text{-Al}$ ,  $\text{Si-SiO}_2\text{-ФСС-Al}$  и  $\text{Si-SiO}_2$ -поликремний при сильнополевой туннельной инжекции электронов. Моделирование процессов зарядовой деградации с учетом распределения локальных электрических полей в системе  $\text{Si-SiO}_2\text{-ФСС-Al}$  указывает на существенное ослабление генерации дырок в слое ФСС. Показано, что процессы изменения зарядового состояния двуокиси кремния, пассивированной фосфорно-силикатным стеклом, необходимо рассматривать с учетом изменения параметров захваченных зарядов и локальных электрических полей в диэлектрике.

## Введение

Несмотря на широкое распространение МДП-структур с термической пленкой  $\text{SiO}_2$ , пассивированной фосфорно-силикатным стеклом (ФСС), большинство работ [1–12], посвященных исследованию зарядовой нестабильности МДП-структур  $\text{Si-SiO}_2\text{-ФСС}$ , носили экспериментальный характер, и в них не проводился теоретический анализ с построением математической модели зарядовой деградации исследуемых структур. Отсутствие математической модели, позволяющей количественно описывать процессы зарядовой деградации и модификации МДП-структур с пленкой двуокиси кремния, пассивированной ФСС, затрудняет получение диэлектрических пленок с требуемыми зарядовыми характеристиками и не позволяет исследовать физические явления в МДП-структурах с двухслойным диэлектриком  $\text{SiO}_2\text{-ФСС}$  за пределами экспериментальных возможностей.

В настоящей работе на основе ранее полученных экспериментальных данных предложена модель модификации и деградации МДП-структур с термической пленкой  $\text{SiO}_2$ , пассивированной слоем ФСС, в условиях управляемой сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик, учитывающая термическую генерацию, как с дырочных, так и электронных ловушек. На основе предложенной модели исследованы процессы зарядовой деградации и модификации МДП-структур  $\text{Si-SiO}_2\text{-Al}$ ,  $\text{Si-SiO}_2\text{-ФСС-Al}$  и  $\text{Si-SiO}_2\text{-Si}^*$  при сильнополевой туннельной инжекции электронов из кремния в режиме постоянного тока, а также проведено обсуждение и уточнение параметров, входящих в модель.

### Модель зарядовой модификации и деградации МДП-структур

Наличие пленки ФСС и связанное с ней накопление отрицательного заряда при инжекции заряда в диэлектрик существенно меняет характер изменения зарядового состояния МДП-структур с двухслойным диэлектриком  $\text{SiO}_2\text{-ФСС}$  по сравнению с МДП-системами без пассивации фосфором. Однако отсутствие общей модели, описывающей изменение зарядового состояния МДП-систем с пленкой  $\text{SiO}_2\text{-ФСС}$  в широком диапазоне инжектируемых зарядов и условий инжекции, существенно затрудняет использование таких диэлектрических пленок для проектирования полупроводниковых приборов с инжекционной модификацией параметров. Таким образом, воспользовавшись новыми экспериментальными данными [5–8], была предложена модель зарядовой модификации и деградации МДП-системы  $\text{Si-SiO}_2\text{-ФСС-Al}$ .

В работе [12] была предложена структурная модель фосфорносиликатного стекла, в которой постулировалось присутствие в пленке ФСС положительно и отрицательно заряженных групп, связанных с атомами фосфора, при общей электронейтральности стекла. Отрицательно заряженные группы выступают в роли геттера подвижного положительного заряда, стабилизируя тем самым электрические характеристики рабочих элементов МДП-ИС. Согласно предположениям, сделанным в работах [2, 3], инжектированные в диэлектрик электроны захватываются положительно заряженными группами.

Однако полученные экспериментальные данные не могут быть объяснены только в рамках этой модели, основанной на наличии в пленке ФСС электронных ловушек одного типа. По-видимому, основной вклад в величину накапливаемого отрицательного заряда в ФСС вносят электронные ловушки, связанные с положительно заряженными группами и имеющие сечение захвата  $\sigma_1 = 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ .

Электронные ловушки данного типа наблюдаются в пленке ФСС при обеих полярностях импульса тока и, следовательно, не зависят от условий инжекции. Присутствие электронных ловушек с близкими сечениями захвата было обнаружено и в структурах  $\text{Si-SiO}_2\text{-ФСС-Mo}$  [4]. Помимо ловушек первого типа в двухслойном диэлектрике  $\text{SiO}_2\text{-ФСС}$  присутствуют электронные ловушки с сечением захвата  $\sigma_2 = 3,2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ , наблюдающиеся при инжекции электронов из  $\text{Si}$ , и электронные ловушки с сечением захвата  $\sigma_3 = 7 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$  при инжекции электронов из  $\text{Al}$ . Поскольку центр тяжести отрицательного заряда находится в

объёме подзатворного диэлектрика, то, по-видимому, электронные ловушки  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  имеют одну физическую природу, а отличие в величине  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  обусловлено различием условий инжекции при изменении полярности токового импульса, а также отличием в перераспределении внутренних электрических полей, связанных с накоплением отрицательного заряда при инжекции электронов из Al.

Одним из возможных объяснений появления электронных ловушек этого типа является воздействие молекул  $\text{POCl}_3$  на структуру  $\text{SiO}_2$  [11], в результате чего происходит перестройка структуры двуокиси кремния вблизи границы раздела  $\text{SiO}_2$ -ФСС, приводящая к появлению оборванных связей кислорода, которые могут выступать в роли электронных ловушек [9]. Следовательно, кинетика накопления отрицательного заряда в МДП-системе Si-SiO<sub>2</sub>-ФСС-Al может быть удовлетворительно описана выражением:

$$Q_{\text{зax}}(t) = \sum_{i=1}^3 Q_{0i} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\sigma_i Q_{\text{inj}}(t)}{q}\right) \right], \quad (1)$$

где в случае инжекции электронов из Si  $Q_{03}=0$ , а в случае инжекции электронов из Al  $Q_{02}=0$ .

Полевая зависимость зарядовой деградации МДП-структуры Si-SiO<sub>2</sub>-ФСС-Al, наблюдающаяся при инжекции электронов из Si, связана, по-видимому, в основном с генерацией положительного заряда в плёнке SiO<sub>2</sub> у границы с Si и может быть учтена путём использования соответствующих моделей, описывающих образование положительного заряда в SiO<sub>2</sub> [6, 13, 14]. Однако, накопление в подзатворном диэлектрике МДП-структуры Si-SiO<sub>2</sub>-ФСС-Al отрицательного и положительного зарядов не является их простой суперпозицией, а требует учёта их совместного влияния друг на друга и учёта перераспределения внутренних электрических полей в диэлектрической плёнке.

Энергетическая зонная диаграмма МДП-структуры Si-SiO<sub>2</sub>-ФСС-Al, учитывающая предложенные модельные представления, изображена на рис. 1. При инжекции электронов из кремния (рис. 1, а) в плёнке SiO<sub>2</sub>-ФСС происходит накопление положительного и отрицательного зарядов. Положительный заряд, расположенный у границы раздела Si-SiO<sub>2</sub>, приводит к понижению энергетического уровня зоны проводимости диэлектрической плёнки, а отрицательный заряд, накапливающийся в слое ФСС у границы раздела SiO<sub>2</sub>-ФСС, повышает этот энергетический уровень.

При инжекции электронов из Al (рис. 1, б) в двухслойном диэлектрике SiO<sub>2</sub>-ФСС происходит накопление отрицательного заряда, расположенного в плёнке ФСС. Накопление отрицательного заряда приводит к повышению энергетического уровня зоны проводимости.

Моделирование изменения зарядового состояния МДП-структур с термической пленкой SiO<sub>2</sub>, пассивированной слоем ФСС при сильнополевой туннельной по Фаулеру-Нордгейму инжекции электронов проводилось на основе следующей системы уравнений:

- уравнение сдвига напряжения на МДП-структуре при инжекции электронов из кремния

$$\Delta V_1(+)=\frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0}\left[n_{\text{pg}}(d_{\text{ox}}-x_{\text{pg}})+n_t(d_{\text{ox}}-x_n)-p(d_{\text{ox}}-x_p)\right] \quad (2)$$

- уравнение сдвига напряжения на МДП-структуре при инжекции электронов из металлического электрода

$$\Delta V_1(-)=\frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0}\left[n_{\text{pg}}x_{\text{pg}}+n_tx_n\right] \quad (3)$$

- уравнение для плотности электронов накапливаемых в слое ФСС

$$n_{\text{pg}} = \sum_{i=1}^3 N_{\text{pgi}} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\sigma_{\text{pgi}} + \beta_i}{q} Q_{\text{inj}}\right) \right] \quad (4)$$

- уравнение для плотности электронов накапливаемых в объеме SiO<sub>2</sub>

$$n_t = N_t \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\sigma_t + \beta_t}{q} Q_{\text{inj}}\right) \right] \quad (5)$$



- уравнение для плотности положительного заряда накапливаемого в пленке  $\text{SiO}_2$

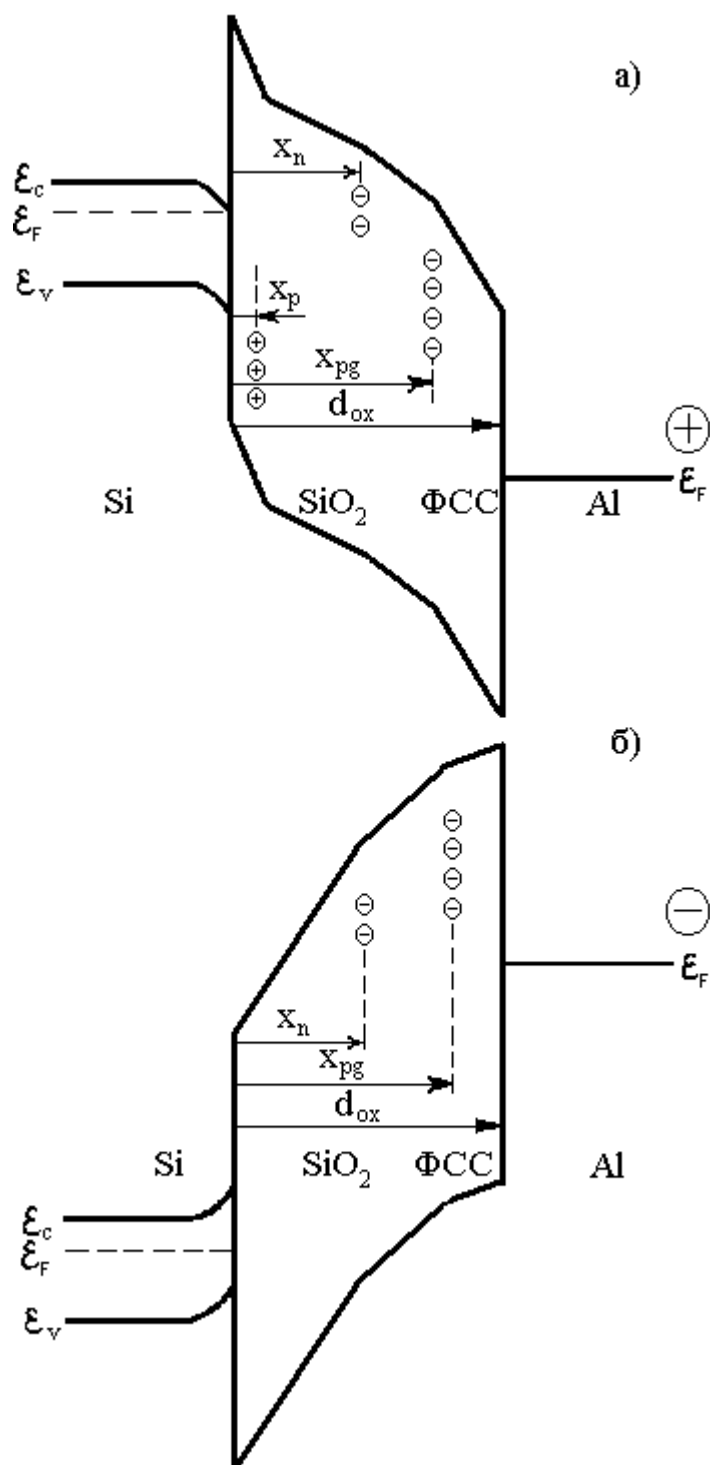


Рис. 1. Энергетические зонные диаграммы, характеризующие зарядовую модификацию МДП-структуры Si-SiO<sub>2</sub>-FCAl-Al при инжекции электронов из Si (а) и при инжекции электронов из Al (б).

$$q \frac{dp}{dt} = J_n \cdot [(m-1) + g] \cdot \sigma_p \cdot (N_p - p) - J_n \cdot \sigma_n \cdot p - qpv \exp\left(-\frac{E_{at}}{kT}\right) \quad (6)$$

- уравнение для плотности тока Фаулера-Нордгейма

$$J_n = AE^2 \exp\left(-\frac{B}{E}\right), \quad (7)$$

где  $q$  – заряд электрона;  $\epsilon\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  $n_{pg}$  и  $n_t$  – плотности электронов накапливаемых в ФСС и SiO<sub>2</sub> соответственно;  $p$  – плотность дырок накапливаемых в SiO<sub>2</sub>;  $d_{ox}$  – толщина подзатворного диэлектрика;  $x_{pg}$ ,  $x_n$ , и  $x_p$  – положения центроидов (относительно границы Si- SiO<sub>2</sub>) отрицательного заряда в ФСС, отрицательного заряда в SiO<sub>2</sub> и положительного заряда в SiO<sub>2</sub> соответственно;  $N_{pgi}$  и  $\sigma_{pgi}$  – плотности и сечения захвата  $i$ -х электронных ловушек в пленке ФСС;  $N_t$  и  $\sigma_t$  – плотности и сечения захвата электронных ловушек в пленке SiO<sub>2</sub>;  $t$  – время;  $Q_{inj}$  – заряд инжектированный в диэлектрик;  $(m-1)$  – коэффициент генерации дырок ( $m$  – коэффициент умножения электронов);  $g$  – коэффициент генерации дырок из анода;  $N_p$  и  $\sigma_p$  – плотности и сечения захвата дырочных ловушек в SiO<sub>2</sub>;  $\sigma_n$  – сечения захвата инжектированных электронов заполненными дырочными ловушками;  $A=1,54 \cdot 10^{-6} \cdot m_0/m^* \cdot \varphi_B^{-1}$  [A/B<sup>2</sup>] и  $B=6,83 \cdot 10^7 \cdot m_0/m^* \cdot \varphi_B^{3/2}$  [В/см] – постоянные туннельной по Фаулеру-Нордгейму инжекции;  $m_0$  и  $m^*$  – масса электрона в вакууме и эффективная масса электрона в диэлектрике;  $\varphi_B$  – высота потенциального барьера на инжектирующей границе раздела;  $E$  – напряженность катодного электрического поля;  $\beta_i$  – сечение генерации  $i$ -х электронных ловушек в пленке ФСС;  $\beta_t$  – сечение генерации электронных ловушек в пленке SiO<sub>2</sub>. Система (2)-(7) решалась при начальных условиях:  $n_{pg}(0) = n_t(0) = p(0) = 0$ .

Плотность захваченных дырок находилась путем численного решения методом Рунге-Кутты четвертого порядка дифференциального уравнения (6), в котором сечение захвата электронов  $\sigma_n$  имеет полевую зависимость  $\sigma_n = b_o \cdot E^{-3}$ , где  $b_o$  – параметр модели,  $E$  – напряженность электрического поля в диэлектрике (МВ/см). Коэффициент генерации дырок рассчитывался с использованием выражений, предложенных в [10]:

$$m-1 = P_{mf} \cdot \left[ \frac{E}{E_{th}^{ii}} - 1 \right]^4, \quad (8)$$

где величины порогового поля  $E_{th}^{ii}$  (МВ/см) и коэффициента  $P_{mf}$  определяются как:

$$E_{th}^{ii} = E_{th}^{\infty} \cdot \left[ 1 + \frac{t_1}{t_{ox} - t_d} \right] \quad (9)$$

и

$$P_{mf} = P_o \cdot (t_{ox} - t_d) + P_l \cdot \frac{1}{t_{ox} - t_d}, \quad (10)$$

где  $t_{ox}$  – толщина слоя окисла. Для толщин окисла больше 30 нм параметры, входящие в выражения (9) и (10), были следующими:  $E_{th}^{\infty} = 6,4$  МВ/см;  $t_d = 8,2$  нм;  $t_1 = 1,56$  нм;  $P_o = 9 \cdot 10^{-3}$  нм<sup>-1</sup>;  $P_l = 3$  нм.

Параметры модели, входящие в выражения (2-7), полагались следующими:  $\sigma_p = 5 \cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup>;  $b_o = 3 \cdot 10^{-13}$  МВ<sup>3</sup>/см;  $N_p = 1 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>;  $\sigma_t = 1 \cdot 10^{-18}$  см<sup>2</sup>;  $N_t = 1,5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>;  $\sigma_{pg1} = 1,4 \cdot 10^{-13}$  см<sup>2</sup>;  $\sigma_{pg2} = 3,2 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>;  $N_{pg1} = 4 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>;  $N_{pg2} = 5 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>.

## Образцы и методики эксперимента

В качестве экспериментальных образцов использовались тестовые МДП-конденсаторы на основе термической двуокиси кремния и термической двуокиси кремния, пассивированной пленкой фосфорно-силикатного стекла (ФСС), изготовленные на пластинах КЭФ-4,5 кристаллографической ориентацией  $\langle 100 \rangle$ . Двуокись кремния толщиной 100 нм получали термическим окислением кремния в атмосфере кислорода при температуре 1000 °С с добавлением 3% HCl. Пленку ФСС формировали диффузией фосфора из газовой фазы путем пиролиза смеси  $\text{POCl}_3\text{-O}_2$  при температуре 900 °С. С целью получения экспериментальных образцов с различной толщиной ФСС варьировалось время загонки фосфора в пределах от 3 до 6 минут. Затем пластины отжигались в атмосфере азота при температуре 1000°С. Алюминиевые электроды площадью  $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$  напыляли магнетронным методом. После формирования Al-электродов проводили отжиг в среде азота при температуре 475 °С. В результате были изготовлены МДП-конденсаторы со структурой Si-SiO<sub>2</sub>-Al и три группы образцов со структурой Si-SiO<sub>2</sub>-ФСС-Al, отличающиеся параметрами слоя ФСС, которые приведены в табл. 1. Технологический процесс диффузии фосфора контролировался по измерениям величины сопротивления растекания диффузионных слоёв, а толщина плёнки ФСС измерялась методом химического травления в селективном травителе [149, 150].

Изменение зарядового состояния МДП-структур контролировалось с использованием C-V метода и метода управляемой токовой нагрузки [6], заключавшегося в приложении к образцу импульса тока специальной формы, обеспечивающего заряд ёмкости МДП-структуры и последующую сильнополевую туннельную инжекцию электронов в диэлектрик, обычно осуществляемую в режиме протекания постоянного тока. В течение сильнополевой инжекции измерялось приращение напряжения на МДП-структуре  $\Delta V_1$ , характеризовавшее изменение зарядового состояния МДП-структуры.

Таблица 1. Параметры пленки ФСС.

Параметры	Номер группы		
	I	II	III
1. Время загонки фосфора, мин.	6	4	3
2. Толщина слоя ФСС, нм	27	18	13
3. Концентрация фосфора в ФСС, %	2	1	0,7
4. Пространственное расположение центроида отрицательного заряда (от границы Si-SiO <sub>2</sub> ), нм	84	87	90

### Экспериментальные результаты и обсуждения

Результаты расчета с использованием описанной модели приведены на рис. 2, где показано изменение напряжения на МДП-структуре в процессе туннельной инжекции электронов из кремния (1,2,3) и алюминия (1', 2', 3') в режиме протекания постоянного тока  $10^{-6} \text{ А/см}^2$  в зависимости от величины инжектированного заряда для образцов различных групп отличающихся технологией получения и параметрами слоя ФСС (таблица 1). Поскольку центроид отрицательного заряда, накапливаемого в пленке ФСС, находится значительно дальше дистанции туннелирования от границы Si-SiO<sub>2</sub>, то при инжекции электронов из кремния этот заряд оказывает практически одинаковое влияние на сдвиги напряжения плоских зон  $\Delta V_{\text{FB}}$  и напряжения туннельной инжекции  $\Delta V_1$ . Приращение напряжения на МДП-структуре при инжекции электронов из металлического электрода  $\Delta V_1(-)$  значительно превосходят приращения напряжения при инжекции из кремния  $\Delta V_1(+)$ , что объясняется положением центроида отрицательного заряда накапливаемого в ФСС.

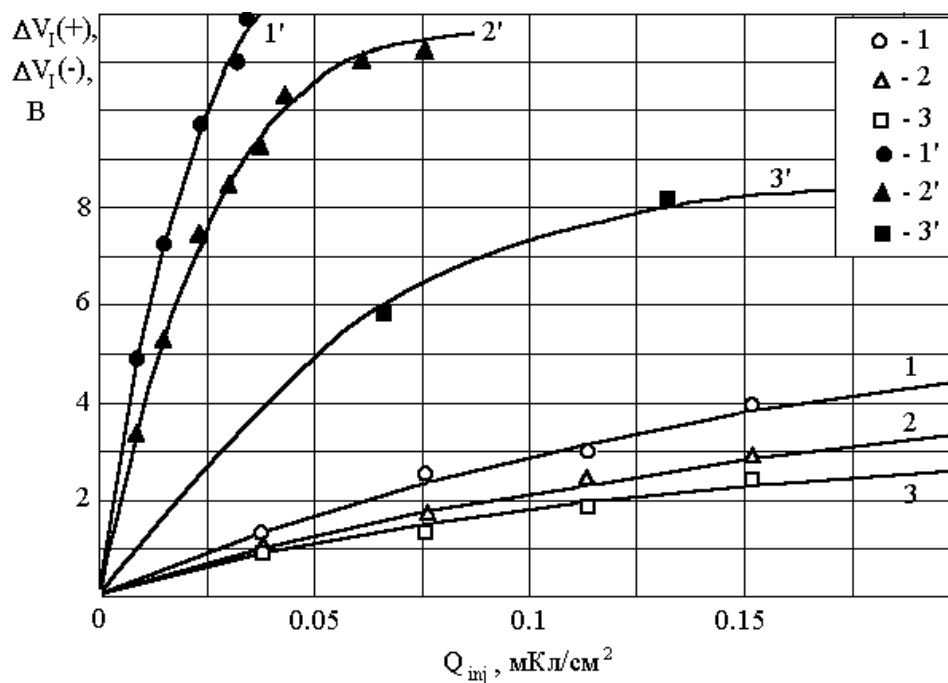


Рис. 2. Экспериментальные (значки) и теоретические (сплошные линии) зависимости приращения напряжений на МДП-структуре в процессе туннельной инжекции электронов из кремния  $\Delta V_I(+)$  (1, 2, 3) и алюминия  $\Delta V_I(-)$  (1', 2', 3') в зависимости от величины инжектированного заряда для образцов различных групп табл.1: I – (1, 1'); II – (2, 2'); III – (3, 3').

Как видно из рисунка 2 результаты расчетов хорошо совпадают с экспериментальными данными. Таким образом, измеряя приращение напряжения на МДП-структуре  $\Delta V_1$  и используя предложенную модель, можно контролировать изменение зарядового состояния образца в процессе инжекции электронов при любой полярности токового импульса, что позволяет проводить прецизионную корректировку пороговых напряжений МДП-приборов.

Накопление отрицательного заряда захваченных электронов в пленке ФСС достаточно большой плотности  $\sim 1,6 \cdot 10^{-6}$  Кл/см<sup>2</sup> вызывает резкое возрастание анодного электрического поля в пленке ФСС. Так как процесс межзонной ударной ионизации имеет полевую зависимость, то присутствие сильного электрического поля в ФСС требует отдельного рассмотрения вопроса о генерации дырок в слое фосфорно-силикатного стекла. Для выяснения данного вопроса и проверки рассматриваемой модели на соответствие результатам эксперимента было проведено сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей напряжения сдвига вольт-амперных (I-V) характеристик  $\Delta V_1$  систем Si-SiO<sub>2</sub>-Al и Si-SiO<sub>2</sub>-ФСС-Al, изготовленных в едином технологическом цикле.

На рис.3 приведены экспериментальные (изображенные значками) и расчетные (сплошные кривые) зависимости напряжения на МДП-системах Si-SiO<sub>2</sub>-Al (кривые 4, 5, 6, 4', 5', 6') и Si-SiO<sub>2</sub>-ФСС-Al (кривые 1, 2, 3, 1', 2', 3', 7, 8, 9) от заряда, инжектированного в диэлектрик, для амплитуд токовых воздействий  $10^{-7}$  А/см<sup>2</sup> (кривые 1, 1', 4, 4', 7),  $10^{-6}$  А/см<sup>2</sup> (кривые 2, 2', 5, 5', 8),  $10^{-5}$  А/см<sup>2</sup> (кривые 3, 3', 6, 6', 9) А/см<sup>2</sup>.

Как видно из рис. 3, расчетные кривые (4, 5, 6) для структур Si-SiO<sub>2</sub>-Al достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными, а отклонения экспериментальных точек не превышают разброс изменения  $\Delta V_1$  от образца к образцу. Если параметры межзонной ударной ионизации в ФСС принимались равными параметрам межзонной ударной ионизации в SiO<sub>2</sub>, то расчетные кривые (7, 8, 9) для структур Si-SiO<sub>2</sub>-ФСС-Al значительно отличались от экспериментальных (1', 2', 3'). Ввиду того, что в слое ФСС напряженность электрического поля может достигать 11 МВ/см, в фосфорно-силикатном стекле должно наблюдаться существенное ослабление генерации дырок межзонной ударной ионизацией. Ослабление генерации дырок в ФСС может быть связано с изменением распределения горячих электронов в пленке ФСС по сравнению с SiO<sub>2</sub> и, как следствие, уменьшением вероятности протекания процесса межзонной ударной ионизации в ФСС. На основе сопоставления результатов численного моделирования с экспериментальными зависимостями была проведена оценка порогового поля ударной ионизации в ФСС. Пороговое поле ударной ионизации, определяемое с помощью уравнения (9), характеризует напряженность электрического поля в диэлектрике, при которой в распределении электронов по энергии появляются высокоэнергетические хвосты с энергией большей ширины запрещенной зоны диэлектрика.

Для совпадения результатов расчета с экспериментальными данными величина порогового поля ударной ионизации в ФСС, соответствующая устойчивому состоянию переноса носителей,  $E_{th}^{\infty}$ , должна быть больше или равна 9,8 МВ/см (рис. 3 кривые 1, 2, 3).

В [2, 3] показано, что пленка ФСС может образовываться и в структурах Si-SiO<sub>2</sub>-Si\*. Однако этот факт не учитывается во многих исследованиях МДП-структур с поликремниевым затвором в условиях туннельной инжекции [7]. Для установления особенностей зарядовой деградации структур с поликремниевым затвором было проведено сравнение изменения напряжения на структурах Si-SiO<sub>2</sub>-Si\* и Si-SiO<sub>2</sub>-Al при сильнополевой туннельной инжекции заряда в диэлектрик импульсом постоянного тока.

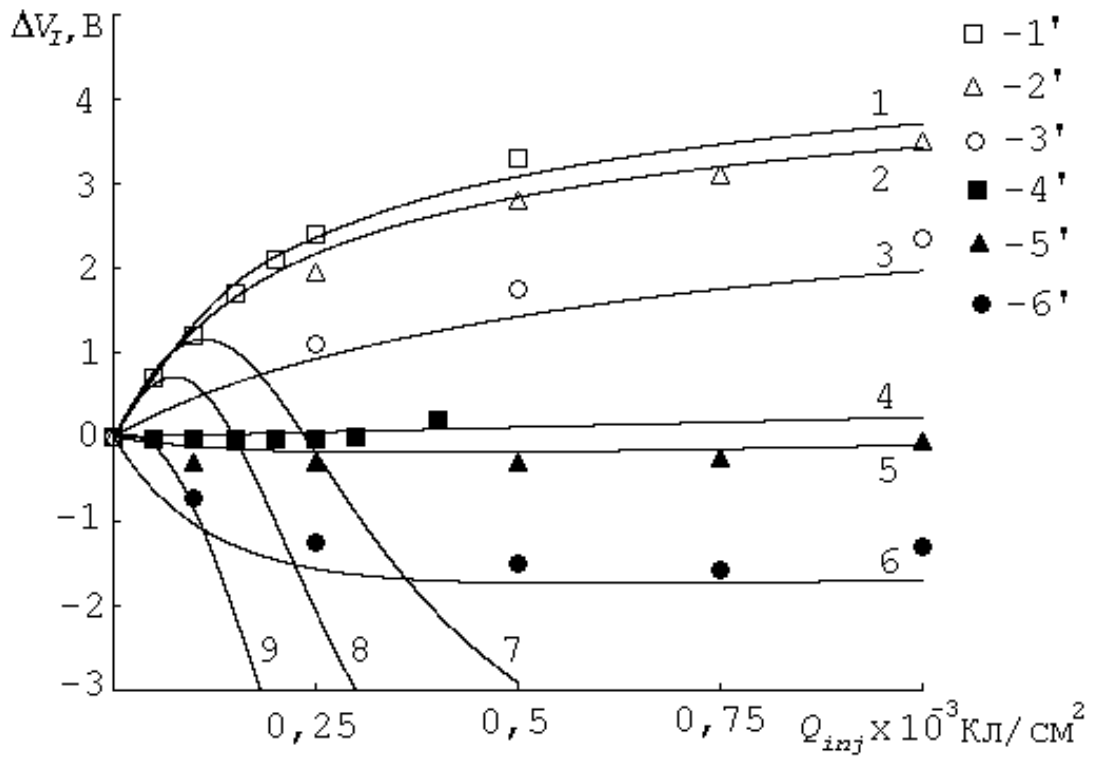


Рис. 3. Экспериментальные (изображенные значками) и расчетные (сплошные кривые) зависимости напряжения на МДП-системах Si-SiO<sub>2</sub>-Al (кривые 4,5,6,4',5',6') и Si-SiO<sub>2</sub>-ФСС-Al (кривые 1,2,3,1',2',3',7,8,9) от заряда, инжектированного в диэлектрик, для амплитуд токовых воздействий 10<sup>-7</sup> А/см<sup>2</sup> (1,1',4,4',7), 10<sup>-6</sup> А/см<sup>2</sup> (2,2',5,5',8), 10<sup>-5</sup> А/см<sup>2</sup> (3,3',6,6',9) А/см<sup>2</sup>.

Установлено, что в МДП-структурах Si-SiO<sub>2</sub>-Al и Si-SiO<sub>2</sub>-Si\* при высокополевой инжекции заряда до 10<sup>-3</sup> Кл/см<sup>2</sup> импульсами постоянного тока в диапазоне 10<sup>-6</sup>÷10<sup>-3</sup> А/см<sup>2</sup> зарядовая деградация диэлектрической плёнки обусловлена, в основном, накоплением положительного заряда, имеющего сильную полевую зависимость, что хорошо согласуется с моделью генерации дырок межзонной ударной ионизацией [10]. На рис. 4 приведены расчетные (сплошные линии) и экспериментальные (значки) зависимости изменения напряжения на МДП-структурах Si-SiO<sub>2</sub>-Al (кривые 2, 2') и Si-SiO<sub>2</sub>-Si\* (кривые 1, 1') в процессе туннельной инжекции электронов из кремния от величины инжектированного заряда при плотности тока 6·10<sup>-6</sup> А/см<sup>2</sup>. Видно, что при одном и том же инжектированном заряде величина накапливаемого положительного заряда в структурах Si-SiO<sub>2</sub>-Al значительно превышает величину аналогичного заряда в структурах Si-SiO<sub>2</sub>-Si\*. Данный факт может быть объяснён образованием плёнки фосфорно-силикатного стекла (ФСС) у границы раздела SiO<sub>2</sub>-Si\*. Как было показано в [6], с пленкой ФСС связано появление в подзатворном диэлектрике электронных ловушек с большим сечением захвата.

Следовательно, менее слабый сдвиг вольт-амперной характеристики по оси напряжений, характеризуемый  $\Delta V_1$ , для МДП-структур с поликремниевым затвором может быть обусловлен частичной компенсацией положительного заряда электронами, захватываемыми на ловушки в слое ФСС. Это подтверждается и увеличением накопления отрицательного заряда в структурах Si-SiO<sub>2</sub>-Si\* с ростом степени легирования поликремниевого затвора при инжекции заряда в диэлектрик [15]. Поскольку, как было показано выше, в пленках ФСС интенсивность процесса межзонной ударной ионизации ниже, чем в SiO<sub>2</sub>, то образование ФСС приводит к уменьшению толщины слоя SiO<sub>2</sub>, в котором протекает межзонная ударная ионизация, в результате чего также уменьшается величина положительного заряда. При расчете зависимости изменения напряжения на структуре в процессе туннельной инжекции с использованием рассмотренной выше модели (рис.4, кривая 1) толщина слоя ФСС в структурах Si-SiO<sub>2</sub>-Si\* полагалась равной 4,5 нм, а параметры электронных ловушек принимались равными:  $\sigma_{pg1} = 1,4 \cdot 10^{-15}$  см<sup>2</sup>;  $\sigma_{pg2} = 3,2 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>;  $N_{pg1} = 2 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>;  $N_{pg2} = 3 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>.

Таким образом, уменьшение величины  $\Delta V_1$  в структурах Si-SiO<sub>2</sub>-Si\* по сравнению с Si-SiO<sub>2</sub>-Al может быть связано с частичной компенсацией положительного заряда электронами, захватываемыми в слое ФСС, и уменьшением толщины пленки SiO<sub>2</sub>, ответственной за генерацию дырок. Всегда ли происходит образование пленки ФСС, вследствие диффузии фосфора из поликремниевого электрода, или образуется только некоторый переходный слой двуокиси кремния, легированный фосфором, – в настоящее время остается до конца не выясненным [15]. По-видимому, захват электронов в системах Si-SiO<sub>2</sub>-Si\* и уменьшение интенсивности генерации дырок могут быть связаны и со слоем двуокиси кремния, в который диффундировали атомы фосфора. На это указывает и то, что центроид отрицательного заряда в структурах Si-SiO<sub>2</sub>-ФСС-Al располагается ближе к границе раздела SiO<sub>2</sub>-ФСС и с ростом толщины ФСС смещается вглубь двуокиси кремния [6].

Проведенные исследования модели системы Si-SiO<sub>2</sub>-ФСС-Al позволили уточнить процессы накопления зарядов в данной системе и произвести количественные оценки величин локальных электрических полей, плотностей захваченных зарядов, параметров центров захвата.

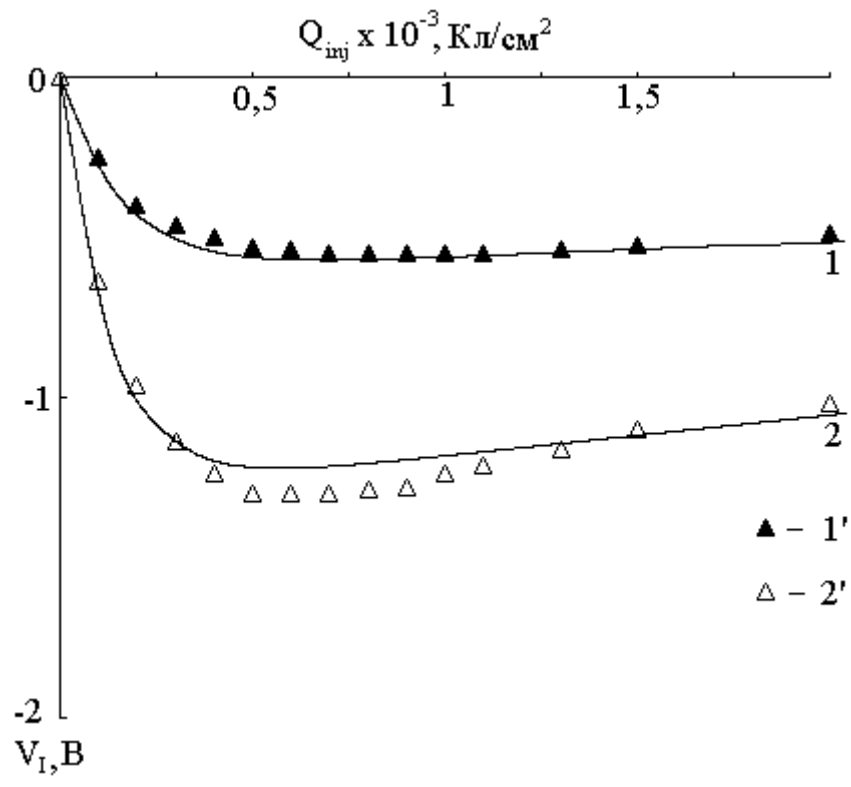


Рис. 4. Расчетные (сплошные линии) и экспериментальные (значки) зависимости изменения напряжения на МДП-структурах Si-SiO<sub>2</sub>-Al (кривые 2, 2') и Si-SiO<sub>2</sub>-Si\* (кривые 1, 1') в процессе туннельной инжекции электронов из кремния от величины инжектированного заряда при плотности тока  $6 \cdot 10^{-6}$  А/см<sup>2</sup>.



## Выводы

1. Разработана модель инжекционной деградации и модификации МДП-структур с термической пленкой  $\text{SiO}_2$ , пассивированной ФСС, учитывающая три основных механизма изменения зарядового состояния диэлектрика. Во-первых, захват электронов на ловушки в ФСС. Во-вторых, накопление положительного заряда, возникающего в результате межзонной ударной ионизации в  $\text{SiO}_2$  с образованием электронно-дырочных пар и последующим захватом дырок на ловушки в окисле, а также инжекции дырок из анода. В-третьих, захват электронов на первичные электронные ловушки в  $\text{SiO}_2$ .

2. Моделирование процессов зарядовой деградации с учетом распределения локальных электрических полей в системе Si-SiO<sub>2</sub>-ФСС-Al указывает на существенное ослабление генерации дырок в слое ФСС, ответственных за накопление положительного заряда в пленке  $\text{SiO}_2$ , что может быть связано с отличием величин параметров ударной ионизации в слое ФСС от их значений в двуокиси кремния или рекомбинацией дырок в ФСС. Показано, что процессы изменения зарядового состояния двуокиси кремния, пассивированной фосфорно-силикатным стеклом, нельзя рассматривать как простую суперпозицию отдельных механизмов накопления зарядов, поскольку их взаимное влияние в значительной мере усложняет общую картину зарядовой деградации и требует использования моделей, учитывающих процесс изменения параметров захваченных зарядов и локальных электрических полей в диэлектрике.

## Литература

1. Зайцев Н.А., Козлов А.М., Неустроев С.А. Влияние термообработки структур Si-SiO<sub>2</sub> в атмосфере  $\text{PCl}_3$  на их электротрофизические характеристики // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника.-1977.-Вып.6.-С.18-23
2. Михайловский И.П., Эпов А.Е. Зарядовая нестабильность кремниевых МДП-структур в сильных электрических полях // Микроэлектроника. - 1985. - Т.14. - Вып.2. - С.173-176
3. Mikhailovskii I.P., Potapov P.V., Epov A.E. Sign of the charge accumulated in thermal films of silicon MIS structures under high electric field condition // Phys. Stat. Sol.(a). 1986. Vol.94. P.679-685
4. Солдатов В.С., Воеводин А.Г., Коляда В.А. Модель генерации поверхностных состояний в МДП-структурах при туннельной инжекции// Поверхность. 1990. № 7. С.92-97
5. Андреев В.В., Барышев В.Г., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Шахнов В.А. Зарядовая деградация МДП-систем с термическим оксидом кремния, пассивированным фосфорно-силикатным стеклом, при высокополевой туннельной инжекции // Микроэлектроника. 1997. № 6. С.640-646.
6. Андреев В.В., Барышев В.Г., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Шахнов В.А. Исследование зарядовой деградации МДП-структур в сильных электрических полях методом управляемой токовой нагрузки // Микроэлектроника. 2000. Т.29. № 2. С.105-112.
7. Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A., Tkachenko A.L. Modification of metal-oxide-semiconductor devices by electron injection in high-fields // Vacuum. 2002. Vol. 67/3-4. P.507-511.
8. Андреев В.В., Барышев В.Г., Столяров А.А. Нестабильность параметров диэлектрических слоев в условиях высокополевых инжекционных нагрузок // Перспективные материалы. 1996. № 6. С.39-45.
9. Balk P., Eldridge J.M. Phosphosilicate glass stabilization of FET devices // Proc. IEEE. 1969. Vol.57. P.1558-1563.

10. Электронный захват в МДП-структурах с термическим оксидом кремния при туннельной инжекции / В.С.Солдатов, Н.В.Соболев, И.Б. Варлашов и др. // Изв. вузов. Физика.-1989.-№ 12.-С.82-84.
11. Зайцев Н.А., Красников Г.Я., Неустроев С.А. Воздействие паров  $\text{PCl}_3$  на свойства структур Si-SiO<sub>2</sub> // Изв. АН СССР: Неорган. материалы.-1989.-Т.25.-№ 3.-С.403-405.
12. Bhattacharya A.B., Manchande L., Vase J. Electron traps in SiO<sub>2</sub> grown in the presence of trichlorethylene // J. Electrochem. Soc.-1982.-Vol.129.-№ 12.-P.2772-2778.
13. Arnold D., Cartier E., DiMaria D.J. Theory of high-field electron transport and impact ionization in silicon dioxide // Phys. Rev. B. 1994. Vol.49. № 15. P.10278-10297.
14. Avni E., Shappir J. Modeling of charge-injection effects in metal-oxide-semiconductor structures // J. Appl. Phys, 1988, v. 64, no. 2, p.734-742.
15. Improvement of oxide quality by rapid thermal annealing / H. Wendt, A. Spitzer, W. Bensch et al. // J.Appl. Phys.-1990.-Vol.67.-№ 12.-P.7531-7535.