

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДЫРОЧНЫХ ЛОВУШЕК В ЗАХОРОНЕННОМ ОКСИДЕ СТРУКТУР КРЕМНИЙ-НА-ИЗОЛЯТОРЕ МЕТОДАМИ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ПУЛА-ФРЕНКЕЛЯ И ИНЖЕКЦИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА

*В. А. Герасимов, С. И. Суродин, А. А. Ширяев, Е. Л. Шоболов*

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Нижний Новгород

## Введение

Одной из основных причин ограничения дозой радиационной стойкости КМОП-микросхем на основе структур кремний-на-изоляторе (КНИ) является образование паразитного проводящего канала в  $n$ -канальных транзисторах на границе с захороненным оксидом структуры КНИ, представляющим собой термический диоксид кремния. Этот канал индуцируется положительным зарядом дырок, образующихся в оксиде в результате ионизации и захватывающихся на ловушки, представляющие собой точечные дефекты с глубокими уровнями в запрещенной зоне диоксида кремния. В связи с этим с целью прогнозирования радиационной стойкости микросхем, определения требований к уровню дефектности захороненного оксида и анализа его влияния на радиационную стойкость микросхем необходима разработка методов контроля параметров этих ловушек (их концентрации, сечения захвата и пространственного распределения).

Основной метод, широко освещенный в научных публикациях [1-6], заключается в измерении радиационно-индуцированного сдвига порогового напряжения донного паразитного транзистора или напряжения плоских зон структуры КНИ – величин, напрямую определяющихся данными параметрами ловушек. Однако разработка альтернативных методов, особенно неразрушающих, не использующих ионизирующее излучение, может открыть новые возможности в области контроля качества и обеспечения радиационной стойкости полупроводниковых приборов. Такой метод может найти применение, например, для повышения точности моделирования радиационной стойкости микросхем, оптимизации процесса изготовления структур КНИ, обеспечения применения специальных технологических методов предотвращения образования паразитного канала, а также отбраковки структур КНИ. Обзору таких методов посвящена работа [7]. В работе [8] в качестве наиболее перспективного предложен метод на основе эффекта Пула–Френкеля.

Эффект Пула–Френкеля заключается в следующем. Электроны под действием температуры и электрического поля эмитируются с донорных уровней в зону проводимости диэлектрика. Влияние электрического поля проявляется в уменьшении энергетического барьера для электронов на донорных уровнях.

При этом зависимость плотности тока диэлектрика от напряженности электрического поля в нем устанавливается следующей формулой:

$$J = q\mu EN_D(T, E), \quad (1)$$

где  $q$  – элементарный заряд;  $\mu$  – подвижность электронов в диэлектрике ( $20 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  – в случае термического диоксида кремния [9]);  $N_D(T, E)$  – концентрация ионизированных донорных центров в диэлектрике, зависящая от температуры  $T$  и напряженности поля  $E$  по следующей формуле:

$$N_D = N_C \exp \left( - \frac{q\phi - \sqrt{\frac{q^3 E}{\pi \varepsilon_0 \varepsilon}}}{kT} \right), \quad (2)$$

где  $N_C$  – плотность квантовых состояний в зоне проводимости диэлектрика (примерно  $1,5 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$  – в случае термического диоксида кремния [10]);  $\phi$  – уровень донорных центров в диэлектрике (относительно дна зоны проводимости);  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  $k$  – постоянная Больцмана.

В результате выполнения предыдущей работы [8] были сделаны следующие выводы. В термическом диоксиде кремния в низких полях наблюдается омический механизм электропроводности, а в высоких – механизм Фаулера–Нордгейма. Эффект Пула–Френкеля в термическом диоксиде кремния наблюдается при напряженностях электрического поля от 5 до 10 МВ/см во всем исследованном диапазоне температур от 300 до 400 К, как при толщине 30 нм, так и при толщине 150 нм.

При этом удалось получить следующую информацию: энергетическое положение дырочных ловушек в запрещенной зоне диэлектрика (2,34 эВ), соответствующее уровню вакансии кислорода ( $E'_V$ -центру), и концентрацию ионизированных дырочных ловушек ( $10^9 \text{ см}^{-3}$ ) при определенной температуре и определенной напряженности поля.

Цель настоящей работы – определение концентрации и энергетического положения дырочных ловушек в захороненном оксиде. Для этого были применены метод на основе эффекта Пула–Френкеля и метод на основе инжекции носителей заряда, который использовался в качестве имитации радиационного

воздействия для обоснования возможности применения метода на основе эффекта Пула–Френкеля для прогнозирования радиационного накопления заряда в захороненном оксиде.

### Методика эксперимента

Образцами исследований являлись три тестовых р-канальных кольцевых транзистора с длиной канала 6 мкм и шириной канала 80 мкм с толщиной подзатворного термического диоксида кремния 35 нм. При измерении вольт-амперных характеристик (ВАХ) подзатворного диэлектрика (при температурах 295 и 423 К) исток, подложка и сток заземлялись, а на затвор подавалось напряжение от 0 до 30 В с шагом 100 мВ. При измерении входных ВАХ транзисторов исток и подложка заземлялись, на сток подавалось напряжение  $-100$  мВ, а на затвор подавалось напряжение от 0 до  $-3$  В с шагом  $-10$  мВ. Инжекция носителей заряда в подзатворный диэлектрик тестовых МОП-транзисторов проводилась в следующем режиме. Исток, подложка и сток заземлялись, а на затвор подавалось напряжение 28 В (соответствующее напряженности в диэлектрике 8 МВ/см) в течение 5 часов при температуре 423 К.

Инжекция проводилась также на двух МОП-конденсаторах с площадью обкладок  $100 \times 100$  мкм<sup>2</sup> и толщиной подзатворного диэлектрика 30 нм, сформированных на низколегированной n-подложке. Использовались следующие режимы: подложка заземлялась, на верхнюю обкладку подавалось напряжение  $+24$  и  $-24$  В (соответствующее напряженности в диэлектрике 8 МВ/см) в течение 30 минут при температурах 295 и 473 К. Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) конденсаторов измерялись при заземленной подложке, напряжении от 6 до  $-6$  В с шагом  $-10$  мВ на верхней обкладке, частоте 1 МГц, амплитуде измерительного сигнала 10 мВ.

### Экспериментальные результаты

На рис. 1 представлены вольтамперные характеристики (ВАХ) подзатворного диэлектрика, измеренные до и после проведения инжекции, и смоделированная характеристика по формулам (1) и (2) с указанием рассчитанных концентраций и энергетического положения ловушечных центров, участвующих в проводимости Пула–Френкеля. При комнатной температуре (295 К) была получена концентрация центров  $7,8 \cdot 10^5$  см<sup>-3</sup>, а уровень энергии составил 2,53 эВ. При температуре 423 К соответствующие значения составили  $8,29 \cdot 10^5$  см<sup>-3</sup> и 2,95 эВ. После проведения инжекции концентрация ловушек снизилась до значения  $3,6 \cdot 10^{11}$  м<sup>-3</sup> при энергии 2,55 эВ. Все концентрации были рассчитаны для значения напряженности 8,6 МВ/см.

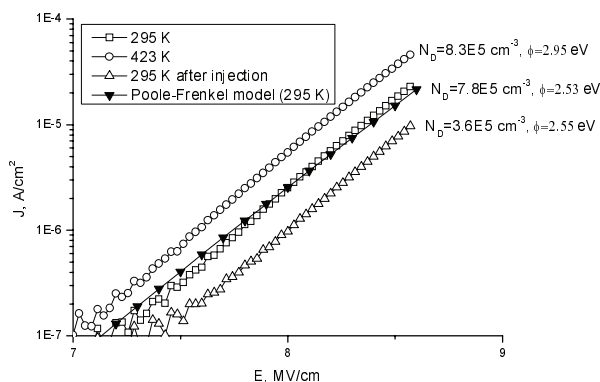


Рис. 1. ВАХ подзатворного диэлектрика и смоделированная характеристика

На рис. 2 приведены входные ВАХ одного из исследованных МОП-транзисторов до и после проведения инжекции.

В таблице представлены концентрации участвующих в проводимости Пула–Френкеля дырочных ловушек при температуре 423 К и напряженности 8,6 МВ/см для трех образцов подзатворного термического диоксида кремния и соответствующие сдвиги порогового напряжения тестовых транзисторов после проведения инжекции.

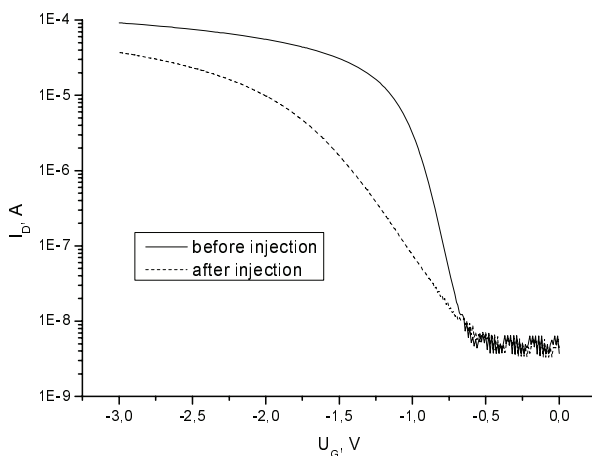


Рис. 2. Входные ВАХ исследованного МОП-транзистора до и после проведения инжекции при температуре 150 °С в течение 5 часов при напряжении на затворе 28 В

Сравнение концентраций участвующих в проводимости Пула–Френкеля центров при температуре 423 К и напряженности 8,6 МВ/см и сдвига порогового напряжения МОП-транзисторов после проведения инжекции

Номер образца	Концентрация ловушек, $10^5$ см <sup>-3</sup>	Сдвиг порогового напряжения, В (при $I_D = 1$ мкА)
1	18,9	-0,54
2	8,29	-0,50
3	14,3	-0,72

В данной работе также была проведена инжекция носителей заряда в подзатворный термический диоксид кремния тестовых МОП-конденсаторов при разных температурах и полярностях.

Измеренные вольт-фарадные характеристики (ВФХ) до и после инжекции показаны на рис. 3. Оценка концентрации дырочных ловушек проводилась по следующей формуле:

$$N_D = \frac{Q}{q} = \frac{\Delta V_{FB} C_{ox}}{q}, \quad (3)$$

где  $Q$  – заряд в диэлектрике, накопленный в результате инжекции дырок;  $\Delta V_{FB}$  – сдвиг напряжения плоских зон (определяемого как напряжение максимума первой производной ВФХ) в результате инжекции дырок (после инжекции электронов);  $C_{ox}$  – емкость диэлектрика. Величина  $N_D$  составила  $7.3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ .

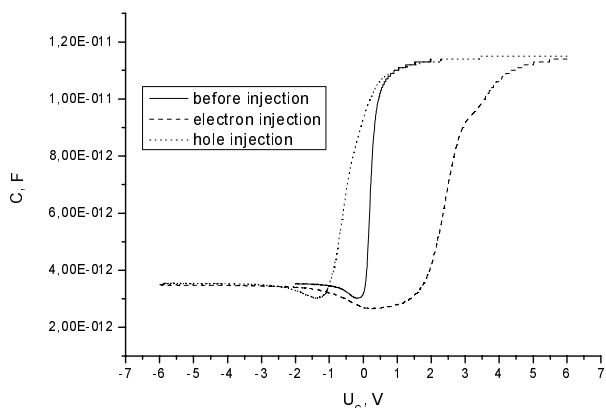


Рис. 3. Высокочастотные ВФХ тестовых МОП-конденсаторов до и после проведения инжекции при температуре 473 К в течение 30 минут при напряжении на верхней обкладке 24 В (electron injection) и –24 В (hole injection)

### Обсуждение полученных результатов

Из рис. 1 видно, что с повышением температуры количество центров в диэлектрике, участвующих в проводимости Пула-Френкеля, растет, что соответствует формулам (1) и (2). Однако интересным выглядит тот факт, что концентрация ионизированных центров уменьшается после проведения инжекции. Для объяснения этого явления следует провести дополнительные исследования. Расчет концентраций проводился для значения напряженности 8,6 МВ/см, потому что выше этого значения наблюдался пробой диэлектрика.

Из рис. 2 видно, что сдвиг порогового напряжения р-канального транзистора наблюдается в отрицательную сторону, что соответствует инжекции дырок в диэлектрик. Однако, судя по тому, что нижняя часть характеристики не смещается, а изменение порогового напряжения (на токе 1 мкА) происходит только за счет изменения подпорогового наклона, можно сделать вывод, что инжекции носителей не

происходит, а имеет место образование поверхностных состояний на границе диэлектрика.

Несмотря на это, в данной работе было проведено сравнение рассчитанных концентраций дырочных ловушек диэлектрика, участвующих в проводимости Пула-Френкеля, и сдвига порогового напряжения транзисторов после возможной инжекции (таблица). Как и следовало ожидать, зная, что имеет место только накопление поверхностных состояний, зависимость между этими величинами не было обнаружено.

Явление инжекции носителей заряда в термический диоксид кремния было обнаружено при исследовании МОП-конденсаторов (рис. 3). Здесь помимо изменения наклона ВФХ, свидетельствующего о накоплении поверхностных состояний, ясно виден сдвиг ВФХ вправо (при инжекции электронов из кремния – нижней обкладки) и затем влево (при инжекции дырок из кремния). Учитывая то, что напряженность поля в диэлектрике при исследовании и МОП-транзисторов, и МОП-конденсаторов была одинаковая (8 МВ/см), а сдвиг ВФХ конденсаторов наблюдался как при температуре 473 К, так и при 295 К, можно сказать, что присутствие явления инжекции носителей заряда в диэлектрик определяется конструкцией тестовой структуры.

Значение концентрации дырочных ловушек, измеренное с помощью инжекции дырок, оказалось на несколько порядков выше, чем значение, измеренное методом на основе эффекта Пула-Френкеля. Это говорит о том, что процесс зарядки дырочных ловушек при инжекции дырок в диэлектрик отличается от процесса зарядки при проводимости Пула-Френкеля и является более интенсивным.

С точки зрения прогнозирования радиационно-индуцированного накопления заряда в захороненном оксиде структур КНИ можно сделать следующие выводы. Для того чтобы зафиксировать большее количество дырочных ловушек в диэлектрике, следует проводить измерения проводимости Пула-Френкеля при повышенной температуре и повышенной напряженности поля (избегая пробоя диэлектрика и проводимости Фаулера-Нордгейма). Инжекцию носителей заряда для оценки концентрации дырочных ловушек в захороненном оксиде следует проводить на тестовых МОП-конденсаторах, образованных структурой КНИ. Следует провести дополнительные исследования корреляции концентрации дырочных ловушек, участвующих в проводимости Пула-Френкеля, и инжектированного заряда в захороненном оксиде структуры КНИ. Метод на основе инжекции (имитация радиационного воздействия) благодаря большому количеству задействованных дырочных ловушек может позволить более адекватно прогнозировать радиационное накопление заряда в захороненном оксиде, чем метод на основе эффекта Пула-Френкеля. В то же время метод на основе эффекта Пула-Френкеля в отличие от метода на основе инжекции является неразрушающим.

## Заключение

В данной работе методом на основе эффекта Пула–Френкеля определены значения концентрации и энергетическое положение дырочных ловушек в термическом диоксиде кремния. Для имитации радиационного воздействия проведена инжекция носителей заряда в термический диоксид кремния при разных условиях: различные тестовые структуры, разные температуры, продолжительности инжекции, полярности. Произведена оценка концентрации дырочных ловушек на основе полученных при проведении инжекции экспериментальных данных. Полученные результаты рассмотрены с точки зрения прогнозирования радиационного накопления заряда в захороненном оксиде структур КНИ.

## Литература

1. Ouisse T., Cristoloveanu S., Borel G. Electron trapping in irradiated SIMOX buried oxides // IEEE Electron Device Letters. 1991. 12, 6. P. 312.
2. Pennise C. A., Boesch H. A. Determination of the charge-trapping characteristics of buried oxides using a 10-keV x-ray source. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1990. 37, 6. P. 1990–1994.
3. Stahlbush R. E., Campisi G. J., McKitterick J. B., Maszara W. P., Roitman P., Brown G. A. Electron and hole trapping in irradiated SIMOX, ZMR and BESOI buried oxides. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1992. 39, 6. P. 2086.
4. Гуськова О. П., Воротынцев В. М., Шоболов Е. Л., Абросимова Н. Д. Влияние германия, им-

плантированного в структуру «диоксид кремния на кремнии», на процессы накопления заряда при воздействии низкоэнергетического стационарного ионизирующего излучения // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2012. 4, 60. С. 28–32.

5. Николаев Д. В., Антонова И. В., Наумова О. В., Попов В. П., Смагулова С. А. Накопление заряда в диэлектрике и состояния на границах структур кремний-на-изоляторе при облучении электронами и  $\gamma$ -квантами // Физика и техника полупроводников. 2003. 37, 4. С. 443–449.

6. Аскинази А. Ю., Барабан А. П., Дмитриев В. А., Милоглядова Л. В. Энергетическое положение электрически активных центров в окисном слое SIMOX-структур // Письма в ЖТФ. 2002. 28, 23. С. 23–29.

7. Ширяев А. А., Шоболов Е. Л., Герасимов В. А. Методы экспериментального исследования дырочных ловушек в захороненном оксиде структур «кремний на изоляторе» // В сб.: XXI Нижегородская сессия молодых ученых. Технические науки: материалы докладов / Под ред. И. А. Зверевой. Княгинино, НГИЭУ. 2016. С. 105.

8. Ширяев А. А., Воротынцев В. М., Шоболов Е. Л. Эффект Пула–Френкеля и возможность его применения для прогнозирования радиационного накопления заряда в термическом диоксиде кремния. Физика и техника полупроводников. 2018. Т. 52. Вып. 9. С. 990–994.

9. Зебрев Г. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции. М.: НИЯУ МИФИ, 2010.

10. Sevik C., Bulutay C. Theoretical study of the insulating oxides and nitrides. Journal of Materials Science. 2007. 42, 16. P. 6555.