УДК 539.2

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА ПУЛА-ФРЕНКЕЛЯ И ИНЖЕКЦИИ
НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФЕКТНОСТИ
ТЕРМИЧЕСКОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ**

А.А. Ширяев¹, В.М. Воротынцев², Е.Л. Шоболов¹

¹Филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»
603137, Нижний Новгород, ул. Тропинина, 47;

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»
603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

В работе с помощью эффекта Пула-Френкеля определены значения концентрации и энергетического положения донорных центров в термическом диоксиде кремния с целью прогнозирования величины радиационно-индуцированного заряда в диэлектрических слоях. Сделана попытка применить явление сильнополевой инжекции носителей заряда для имитации радиационного воздействия. Сделаны выводы с точки зрения практического применения эффекта Пула-Френкеля и инжекции носителей заряда для прогнозирования величины радиационно-индуцированного заряда в термическом диоксиде кремния.

Ключевые слова: эффект Пула-Френкеля, термический диоксид кремния, инжекция носителей заряда, прогнозирование радиационной стойкости, кремний-на-изоляторе

Сведения об авторах: Ширяев Алексей Александрович, alsh92@rambler.ru; Воротынцев Владимир Михайлович, д.х.н., профессор; Шоболов Евгений Львович, к.ф.-м.н.

**APPLICATION OF POOLE-FRENKEL EFFECT AND CHARGE CARRIER
INJECTION FOR DEFECTIVENESS RESEARCH OF THERMAL SILICON DIOXIDE**

A.A. Shiryayev¹, V.M. Vorotyntsev², E.L. Shobolov¹

¹Branch of RFNC VNIIEF Sedakov Measuring Systems Research Institute
603137 Nizhny Novgorod, Tropinin street, 47;

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev"
603950 Nizhny Novgorod, Minin street, 24

In this work with the help of Poole-Frenkel effect values of concentration and energy position of donor centers in thermal silicon dioxide were determined in order to predict the value of radiation induced charge in dielectric layers. An attempt was made to use phenomenon of high field injection of charge carriers for radiation exposure imitation. Conclusions were drawn concerning practical application of Poole-Frenkel effect and charge carrier injection for prediction of the value of radiation induced charge in thermal silicon dioxide.

Keywords: Poole-Frenkel effect, thermal silicon dioxide, charge carrier injection, radiation hardness prediction, silicon-on-insulator

Authors: Shiryayev A.A., alsh92@rambler.ru; Vorotyntsev V.M., Doctor of chemical sciences, professor; Shobolov E.L., Candidate of physical and mathematical sciences

Введение

Дефектность захороненного оксида структуры кремний-на-изоляторе (КНИ), представляющего собой термический диоксид кремния, а именно такие свойства центров с глубокими уровнями в запрещённой зоне, как концентрация, сечение захвата и пространственное распределение, оказывает значительное влияние на дозовую радиационную стойкость КМОП-микросхем. Это влияние проявляется в накоплении положительного заряда в захороненном оксиде и образовании паразитного канала в *n*-канальных транзисторах на границе с захороненным оксидом. В связи с этим для прогнозирования и повышения радиационной стойкости микросхем необходима разработка методов контроля дефектности захороненного оксида. Обзору таких методов посвящена работа [1]. Основной метод, использовавшийся в работах [2-7], состоит в контроле порогового напряжения паразитного транзистора или напряжения плоских зон структуры КНИ до и после облучения. Облучение приводит к накоплению заряда в диэлектрике и поверхностных состояний на его границах, что делает этот метод разрушающим. С точки зрения прогнозирования радиационной стойкости перспективнее разработать неразрушающий метод, который к тому же мог бы нести информацию о природе дефектов в диэлектрике. В работе [8] предложен метод на основе эффекта Пула-Френкеля. Кроме того, актуальным является исследование инъекции носителей заряда в захороненный оксид, которую, согласно работе [9], можно использовать для имитации радиационного воздействия.

Эффект Пула-Френкеля [10] 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 напряжённости электрического поля в нём устанавливается следующей формулой:

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

где q – элементарный заряд; μ – подвижность электронов в диэлектрике ($20 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ – в случае термического диоксида кремния [11]); $N_D(T, E)$ – концентрация ионизированных донорных центров в диэлектрике, зависящая от температуры T и напряжённости поля E по следующей формуле:

$$N_D = N_C \exp \left(- \frac{q\varphi - \sqrt{\frac{q^3 E}{\pi \epsilon_0 \epsilon}}}{kT} \right), \quad (2)$$

где N_C – плотность квантовых состояний в зоне проводимости диэлектрика (примерно $1.5 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$ – в случае термического диоксида кремния [12]); φ – уровень донорных центров в диэлектрике (относительно дна зоны проводимости); ϵ_0 – электрическая постоянная; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; k – постоянная Больцмана.

В результате выполнения предыдущей работы [8] были сделаны следующие

выводы. В термическом диоксиде кремния в низких электрических полях наблюдался омический механизм электропроводности, а в высоких – механизм Фаулера-Нордгейма. Эффект Пула-Френкеля в термическом диоксиде кремния наблюдался при напряжённостях электрического поля от 5 до 10 МВ/см во всём 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 запрещённой зоне диэлектрика (2.34 эВ), по-видимому, соответствующее уровню вакансии кислорода (E'_γ -центру), и концентрацию ионизированных дырочных ловушек ($1.0 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$) при температуре 400 К и напряжённости поля 10 МВ/см.

Целью настоящей работы являлось определение концентрации и энергетического положения дырочных ловушек в термическом диоксиде кремния с использованием эффекта Пула-Френкеля и явления сильнополевой инжекции носителей заряда, которое также использовалось в качестве имитации радиационного воздействия для обоснования возможности применения метода на основе эффекта Пула-Френкеля для прогнозирования радиационного накопления заряда в диэлектрических слоях.

Методика эксперимента

Образцами исследований являлись три тестовых *p*-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 были заземлены, а на затвор подавалось напряжение 28 В (соответствующее напряжённости в диэлектрике 8 МВ/см) в течение 5 часов при температуре 423 К.

Инжекция проводилась также на двух МОП-конденсаторах с площадью обкладок $100 \times 100 \text{ мкм}^2$ и толщиной подзатворного диэлектрика 30 нм, сформированных на низколегированной *n*-подложке. Использовались следующие режимы: подложка заземлялась, на верхнюю обкладку подавалось напряжение +24 В и –24 В (соответствующее напряжённости в диэлектрике 8 МВ/см) в течение 30 минут при температурах 295 и 473 К. Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) конденсаторов измерялись при заземлённой 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 зависимости плотности тока подзатворного термического диоксида кремния от напряжённости электрического поля, измеренные до

и после проведения инъекции, и смоделированная характеристика по формулам (1) и (2) с указанием рассчитанных концентраций и энергетического положения донорных центров, участвующих в проводимости Пула-Френкеля. При комнатной температуре (295 К) была получена концентрация центров $7,8 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, а уровень энергии составил 2,53 эВ. При температуре 423 К соответствующие значения составили $8,29 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ и 2,95 эВ. После проведения инъекции концентрация ловушек снизилась до значения $3,6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ при энергии 2,55 эВ. Все концентрации были рассчитаны для значения напряжённости

8.6 МВ/см, поскольку при более высоких значениях наблюдался пробой диэлектрика.

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

В таблице представлены концентрации участвующих в проводимости Пула-Френкеля дырочных ловушек при температуре 423 К и напряжённости 8.6 МВ/см для трёх образцов подзатворного термического диоксида кремния, расположенных в разных точках пластины, и соответствующие сдвиги порогового напряжения тестовых транзисторов после проведения инъекции.

Рис. 1

ВАХ подзатворного диэлектрика, измеренные до и после проведения инъекции, и смоделированная характеристика по формулам (1) и (2) (модель Пула-Френкеля) с указанием рассчитанных концентраций и энергетических положений центров

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

Таблица

Сравнение концентраций центров, участвующих в проводимости Пула-Френкеля при температуре 423 К и напряжённости 8.6 МВ/см, и сдвига порогового напряжения МОП-транзисторов после проведения инжекции

Номер образца	Концентрация ловушек, 10^5 см^{-3}	Сдвиг порогового напряжения, В (при $I_D = 1 \text{ мкА}$)
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. Максимальная эффективность инжекции наблюдалась при наибольшей температуре (473 К). Вольт-фарадные характеристики, измеренные до и после инжекции при температуре 473 К, показаны на рис. 3. Сначала проводилась инжекция электронов, а затем инжекция дырок. 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 инъекции дырок; ΔV_{FB} – сдвиг напряжения плоских зон (опреде-

ляемого как напряжение максимума первой производной ВФХ) в результате инъекции дырок (проведённой после инъекции электронов); C_{ox} – ёмкость диэлектрика. Величина N_D составила $7.3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$.

Рис. 3

Высокочастотные ВФХ тестовых МОП-конденсаторов до и после проведения инъекции при температуре 473 К в течение 30 минут при напряжении на верхней обкладке 24 В (при инъекции электронов) и –24 В (при инъекции дырок)

Обсуждение полученных результатов

Из рис. 1 видно, что с повышением температуры количество центров в диэлектрике, участвующих в проводимости Пула-Френкеля, растёт, что соответствует формулам (1) и (2). Однако интересным выглядит тот факт, что концентрация ионизированных центров уменьшается после проведения инъекции. Для объяснения

этого явления следует провести дополнительные исследования. Расчёт концентраций проводился для значения напряжённости 8.6 МВ/см, потому что выше этого значения наблюдался пробой диэлектрика. Значения концентраций оказались на 4 порядка ниже значения, полученного в предыдущей работе [8], что связано с меньшим напряжением пробоя диэлектрика,

наблюдавшимся в настоящей работе. Следует отметить, что в результате расчётов на основании измерений, проведённых в разных условиях, были получены разные уровни энергии донорных центров. Это может быть связано с участием дополнительных механизмов электропроводности, которые не учитывались при расчётах.

Из рис. 2 видно, что сдвиг порогового напряжения p -канального транзистора наблюдается в отрицательную сторону, что соответствует инъекции дырок в диэлектрик. Однако судя по тому, что нижняя часть характеристики не смещается, а изменение порогового напряжения (на токе 1 мкА) происходит только за счёт изменения подпорогового наклона, можно сделать вывод, что инъекции 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 инъекции (таблица). Зависимости между этими величинами не было обнаружено, поскольку, как уже было сказано, наблюдалось только накопление поверхностных состояний.

Явление инъекции 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 инъекции электронов из кремния – нижней

обкладки) и затем влево (при инъекции дырок из кремния). Учитывая то, что напряжённость 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 сделать вывод, что эффективность инъекции носителей заряда в диэлектрик определяется конструкцией тестовой структуры.

Значение концентрации дырочных ловушек, измеренное с помощью инъекции дырок, оказалось на несколько порядков выше, чем значение, измеренное методом на основе эффекта Пула-Френкеля. Поскольку напряжённость поля при реализации обоих методов была практически одинаковой, можно предположить, что процесс зарядки дырочных ловушек при инъекции дырок в диэлектрик отличается от процесса зарядки при проводимости Пула-Френкеля и является более интенсивным.

С точки зрения прогнозирования радиационно-индуцированного накопления заряда в термическом диоксиде кремния 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 напряжённости поля (избегая пробоя диэлектрика и проводимости Фаулера-Нордгейма). Инъекцию носителей заряда для оценки концентрации дырочных ловушек в диэлектрике следует проводить на тестовых МОП-конденсаторах. Следует провести дополнительные исследования корреляции

концентрации дырочных ловушек, участвующих в проводимости Пула-Френкеля, и инжектированного заряда в диэлектрике. Метод на основе инъекции (имитация радиационного воздействия) позволил получить большую концентрацию задействованных дырочных ловушек. В то же время метод на основе эффекта Пула-Френкеля в отличие от метода на основе инъекции является неразрушающим.

Заключение

В данной работе с помощью эффекта Пула-Френкеля определены значения концентрации и энергетическое положение дырочных ловушек в термическом диоксиде кремния. Для имитации радиационного воздействия проведена инъекция носителей заряда в термический диоксид кремния при разных условиях: различные тестовые структуры, разные температуры, продолжительности инъекции, полярности. Произведена оценка концентрации дырочных ловушек на основе полученных при проведении инъекции экспериментальных данных. Полученные результаты рассмотрены с точки зрения прогнозирования величины радиационно-индуцированного заряда в термическом диоксиде кремния.

Литература

1. Ширяев, А.А. Методы экспериментального исследования дырочных ловушек в захороненном оксиде структур «кремний на изоляторе» / А.А. Ширяев, Е.Л. Шоболов, В.А. Герасимов // Сборник докладов XXI Нижегородской сессии молодых ученых. Технические науки; под ред. И.А. Зверевой. – Княгинино: НГИЭУ, 2016. – С. 105.
2. Ouisse T., Cristoloveanu S., Borel G. Electron trapping in irradiated SIMOX buried oxides. IEEE Electron Device Letters. – 1991. – vol.12. – no.6. – pp. 312-314.
3. 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. – vol. 37. – no. 6. – pp. 1990-1994.
4. 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. – vol.39 – no.6. – pp. 2086-2098.
5. Гуськова, О.П. Влияние германия, имплантированного в структуру «диоксид кремния на кремнии», на процессы накопления заряда при воздействии низкоэнергетического стационарного ионизирующего излучения / О.П. Гуськова, В.М. Воротынцев, Е.Л. Шоболов, Н.Д. Абросимова // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2012. – 4 (60). – С. 28-32.
6. Николаев, Д.В. Накопление заряда в диэлектрике и состояния на границах структур кремний-на-изоляторе при облучении электронами и γ -квантами / Д.В. Николаев, И.В. Антонова, О.В. Наумова, В.П. Попов, С.А. Смагулова // Физика и техника полупроводников. – 2003. – 37 (4). – С. 443-449.
7. Аскинази, А.Ю. Энергетическое положение электрически активных центров в окисном слое SIMOX-структур / А.Ю. Аскинази, А.П. Барабан, В.А. Дмитриев, Л.В. Милогладова // Письма в ЖТФ. – 2002. – № 28 (23). – С. 23-29.
8. Ширяев, А.А. Эффект Пула-Френкеля и возможность его применения для прогнозирования радиационного накопления заряда в термическом диоксиде кремния / А.А. Ширяев, В.М. Воротынцев, Е.Л. Шоболов // Физика и техника полупроводников. – 2018. – № 52 (9). – С. 990-994.
9. Knoll M., Braunig D., Fahrner W.R. Comparative studies of tunnel injection and irradiation on metal oxide semiconductor structures // Journal of Applied Physics. – 1982. – 53 (10). – P. 6946-6952.
10. Chiu F.C. A review on conduction mechanisms in dielectric films // Advances in Materials Science and Engineering. – 2014. – 2014 (578168). – P. 1-18.
11. Зебрев, Г.И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции. – М., НИЯУ МИФИ. – 2010.
12. Sevik C., Bulutay C. Theoretical study of the insulating oxides and nitrides // Journal of Materials Science. – 2007. – 42 (16). – P. 6555.

References

1. Shiryaev A.A., Shobolov E.L., Gerasimov V.A. Metody eksperimental'nogo issledovaniya dy-rochnykh lovushek v zakhoronennom okside struktur «kremniy na izolyatore» [Methods of experimental study of hole traps in buried oxide of silicon-on-insulator structures]. *Sbornik dokladov XXI Nizhegorodskoi sessii molodykh uchenykh. Tekhnicheskiye nauki*. Knyaginino, Nizhegorodskiy gosudarstvennyy inzhenerno-ekonomicheskii universitet, 2016, 105 p.
2. Ouisse T., Cristoloveanu S., Borel G. Electron trapping in irradiated SIMOX buried oxides. *IEEE Electron Device Letters*, 1991, vol. 12, no. 6, pp. 312-314.
3. 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, vol. 37, no. 6, pp. 1990-1994.
4. 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, vol. 39, no. 6, pp. 2086-2098.
5. Guskova O.P., Vorotyntsev V.M., Shobolov E.L., Abrosimova N.D. Vliyaniye germaniya, implantirovannogo v strukturu «dioksid kremniya na kremnii», na protsessy nakopleniya zaryada pri vozdeystvii nizkoenergeticheskogo statsionarnogo ioniziruyushchego izlucheniya [The effect of germanium implanted in the silicon dioxide-on-silicon structure on the processes of charge accumulation when exposed to low-energy stationary ionizing radiation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Materialy elektronnoy tekhniki*. 2012, no. 4(60), pp. 28-32.
6. Nikolaev D.V., Antonova I.V., Naumova O.V., Popov V.P., Smagulova S.A. Nakopleniye zaryada v dielektrike i sostoyaniya na granitsakh struktur kremniy-na-izolyatore pri obluchenii elektronami i γ -kvantami [Charge accumulation in a dielectric and the boundary states of silicon-on-insulator structures when irradiated with electrons and γ -quanta]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2003, no. 37(4), pp. 443-449.
7. Askinazi A.Yu., Baraban A.P., Dmitriev V.A., Miloglyadova L.V. Energeticheskoye polozheniye elektricheskii aktivnykh tsentrov v okisnom sloye SIMOX-struktur [The energy position of electrically active centers in the oxide layer of SIMOX structures]. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2002, no. 28(23), pp. 23-29.
8. Shiryaev A.A., Vorotyntsev V.M., Shobolov E.L. Effekt Pula-Frenkelya i vozmozhnost' yego primeneniya dlya prognozirovaniya radiatsionnogo nakopleniya zaryada v termicheskom dioksidge kremniya [Poole-Frenkel effect and the opportunity of its application for the prediction of radiation charge accumulation in thermal silicon dioxide]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2018, no. 52(9), pp. 990-994.
9. Knoll M., Braunig D., Fahrner W.R. Comparative studies of tunnel injection and irradiation on metal oxide semiconductor structures. *Journal of Applied Physics*, 1982, no. 53(10), pp. 6946-6952.
10. Chiu F.C. A review on conduction mechanisms in dielectric films. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, no. 2014-578168, pp. 1-18.
11. Zebrev G.I. Radiatsionnyye efekty v kremniyevykh integral'nykh skhemakh vysokoy stepeni integratsii [Radiation Effects in High-Integration Silicon Integrated Circuits]. Moscow, National Research Nuclear University MEPhI, 2010.
12. Sevik C., Bulutay C. Theoretical study of the insulating oxides and nitrides. *Journal of Materials Science*, 2007, no. 42(16), 6555 p.