

07

## Аномальное поведение боковой $C-V$ -характеристики МНОП-транзистора со встроенным локальным зарядом в нитридном слое

© З.А. Атамуратова,<sup>1</sup> А. Юсупов,<sup>2</sup> Б.О. Халикбердиев,<sup>1</sup> А.Э. Атамуратов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ургенчский государственный университет,  
220100 Ургенч, Узбекистан

<sup>2</sup> Ташкентский университет информационных технологий им. Мухаммада Аль Хорезми,  
100200 Ташкент, Узбекистан  
e-mail: atabek.atamuratov@yahoo.com

Поступило в Редакцию 16 августа 2018 г.

В окончательной редакции 2 ноября 2018 г.

Принято к публикации 14 декабря 2018 г.

Выполнено моделирование  $C-V$ -зависимости для бокового перехода исток–подложка транзистора металл–нитрид–оксид–полупроводник. Встраивание локального ловушечного заряда в нитридный слой приводит к аномальному скачку или спаду емкости перехода при определенных напряжениях на переходе, зависящих от концентрации легирующей примеси в подложке. Такое изменение емкости связано с перераспределением носителей заряда в приповерхностной области подложки, вызванным встраиванием локального заряда. Данная особенность поведения вольт-фарадной характеристики может быть использована для детектирования локального заряда, встроенного в диэлектрический слой полевого транзистора.

DOI: 10.21883/JTF.2019.07.47801.319-18

В полевых транзисторах субмикрометровых размеров могут иметь место деградационные эффекты — такие, как эффекты горячих носителей, короткоканальные эффекты, протекание токов утечки, — приводящие к изменениям основных параметров транзисторов. Носители тока, достигшие скорости насыщения в канале, имеют энергию достаточную, чтобы преодолеть оксидный барьер и захватываться на ловушках в диэлектрическом слое или на границе раздела канал–оксид, а также для генерации новых дефектов на границе или в оксидном слое. Это может привести к ухудшению характеристик транзистора: к нестабильности, связанной с неравномерным распределением ловушек, деградацией порогового напряжения при обратном смещении затвор–исток/сток, проявляющейся при высоких температурах (НВТИ-эффект) [1,2]. Масштаб эффектов, в частности, связан с латеральным распределением концентрации оксидных и граничных дефектов вдоль границы [3].

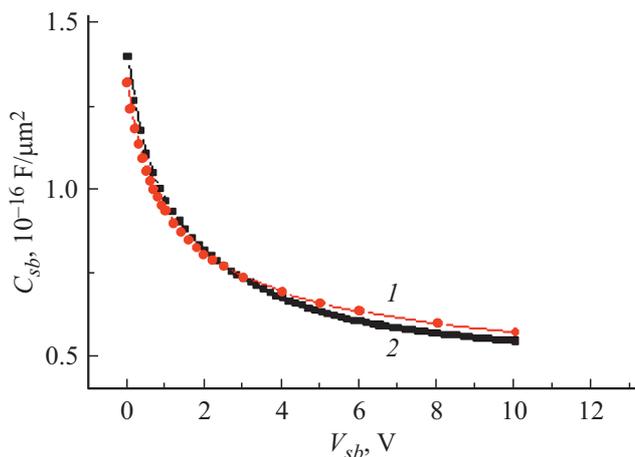
Кроме этого, наличие конкретного латерального распределения встроенного оксидного заряда, в частности его локализация в ограниченной области, является важной деталью при разработке энергонезависимых элементов памяти, функционирование которых основано на встраивании заряда [4,5]. Поэтому задача определения латерального распределения оксидного и/или граничного заряда является одной из важных при изучении характеристик субмикронных полевых транзисторов.

Локальный заряд, встроенный в диэлектрический слой полевого транзистора, в основном идентифицируется с использованием различных видов сканирующей микроскопии [6–8] или метода накачки заряда [5,9]. Сканирующая микроскопия отличается высокой разрешающей

способностью, однако при этом она имеет низкую скорость сканирования. Кроме этого, почти все сканирующие микроскопы содержат очень дорогостоящие электромеханические компоненты, обеспечивающие перемещение иглы или образца, и сложные оптические системы (лазер, фотодетектор) для регистрации.

В работе [10] исследовалась возможность регистрации локального заряда, встроенного в нитридном слое транзистора металл–нитрид–оксид–полупроводник (МНОП), измерением вольтфарадной ( $C-V$ ) характеристики бокового перехода исток–база (сток–база) с использованием пилообразного напряжения, приложенного к этому переходу, без использования зондирующего электрода (иглы). Это позволяет достичь существенной скорости измерения. Но в [10] не были проанализированы особенности („аномалии“) поведения  $C-V$ -характеристики бокового перехода при встраивании локального заряда и не была рассмотрена трансформация этой характеристики при изменении уровня легирования подложки.

В настоящей работе на основе 2D-моделирования изучается аномальное поведение  $C-V$ -характеристики перехода исток–подложка МНОП-транзистора с локальным зарядом, встроенным в нитридный слой, при концентрациях легирующей примеси в подложке  $N_{sub}$  в пределах между  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  и  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Моделирование проводилось с использованием коммерческой программы TCAD Sentaurus. Линейные размеры рабочей области транзистора имеют субмикрометровые масштабы, поэтому применялась диффузионно-дрейфовая модель подвижности, в которой учитывались рекомбинация Шокли–Рида–Холла, насыщение подвижности при высоких полях и влияние нормальной составляющей



**Рис. 1.**  $C$ - $V$ -характеристика для перехода исток–подложка, нормированная к площади перехода: 1 — экспериментальная  $C$ - $V$ -зависимость полевого транзистора, полученная в работе [11], 2 —  $C$ - $V$ -зависимость, полученная моделированием.

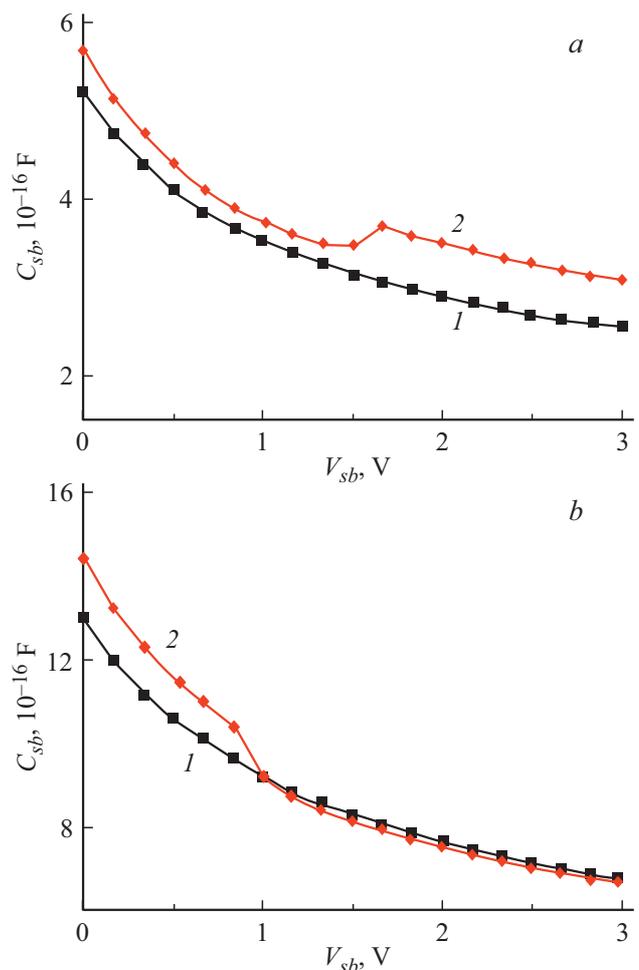
поля. Для определения вольт-фарадной характеристики использовался метод слабого переменного сигнала при частоте 1 МГц. Модель калибровалась по результатам измерения  $C$ - $V$ -характеристики перехода исток–подложка без встроенного заряда, приведенной в работе [11] (рис. 1). Калиброванная модель затем использовалась для моделирования вольт-фарадной характеристики перехода исток–подложка МНОП-транзистора с длиной поликремниевго затвора 800 нм, толщинами слоя  $\text{SiO}_2$  и нитридного слоя  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , равными 3 и 50 нм соответственно. Истоковая и стоковая  $n$ -области были легированы до концентрации  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  (гауссов профиль), а уровень легирования кремниевой  $p$ -подложки составлял  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Локальный заряд моделировался однородно заряженной областью с ограниченными линейными размерами вдоль канала. Рассматривался заряд длиной 80 нм, который может быть локализован инжекцией в нитридный слой с помощью зонда при приложении соответствующего напряжения [12,13]. Плотность встроенного заряда этой области выбиралась равной  $8 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Такая объемная плотность соответствует толщине нитридного слоя в 50 нм при поверхностной плотности  $4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , наблюдаемой для нитрида [12,13].

Результаты моделирования показывают, что встраивание локального заряда приводит к аномальному скачкообразному изменению  $C$ - $V$ -характеристики перехода исток–подложка, начиная с определенного напряжения смещения  $V_{sb} = V_{jump}$ . Такое поведение емкости может быть использовано для регистрации локального ловушечного заряда в диэлектрических слоях МДП-транзисторов. Характер скачкообразного изменения зависит от уровня легирования подложки. При концентрациях легирования  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  и меньше наблюдается скачкообразное увеличение (рис. 2, *a*), а при  $N_{sub} > 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  — скачкообразный спад емкости (рис. 2, *b*). Для ясной визуализации скачка емкости и идентификации  $V_{jump}$

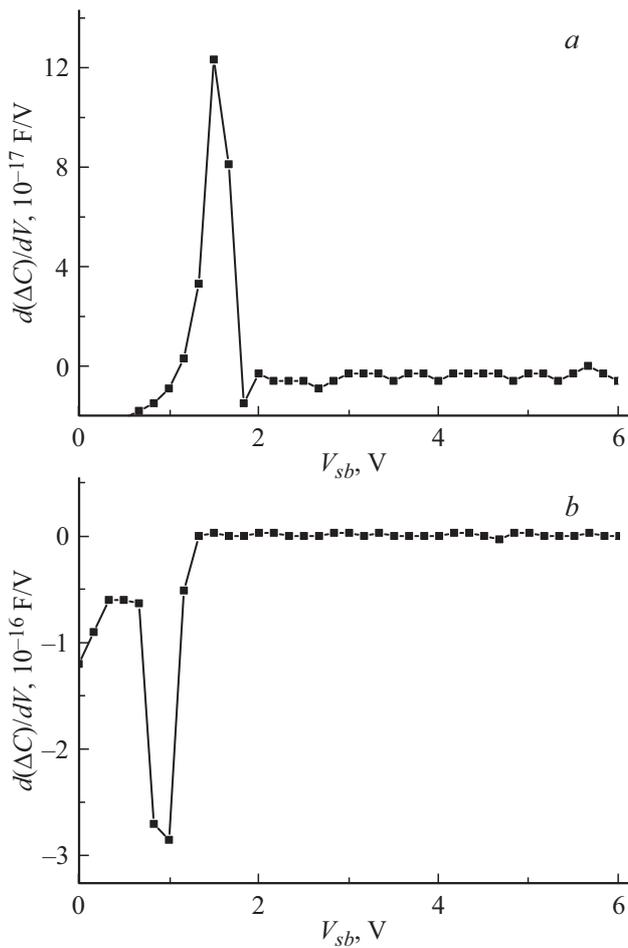
удобным является определение производной от изменения емкости по напряжению  $d(\Delta C)/dV$  из вольт-емкостных характеристик (рис. 3). Очевидно, скачок емкости связан с перераспределением концентрации носителей около поверхности канала, которое вызвано присутствием локального встроенного в нитрид заряда и приводит (при определенных значениях напряжения смещения) к неадекватному изменению величины накапливаемого около перехода заряда при изменении смещения, прилагаемого к переходу исток–подложка.

На рис. 4 и 5 показаны типичные распределения неосновных носителей, электронов, при различных напряжениях смещения на переходе, на глубине 200 нм от поверхности как при отсутствии, так и после встраивания локального заряда длиной  $d = 80 \text{ nm}$  на расстоянии  $L = 150 \text{ nm}$  от истока.

В случае  $N_{sub} \leq 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  (рис. 4) встраивание локального заряда в нитридном слое приводит к появлению локального максимума распределения концентрации неосновных носителей в подложке (рис. 4, группа



**Рис. 2.** Зависимость емкости на переходе исток–подложка от напряжения для МНОП-транзистора без встроенного заряда (1) и со встроенным в нитридном слое локальным зарядом на расстоянии  $L = 150 \text{ nm}$  от истока (2), при уровнях легирования в подложке  $N_{sub} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  (*a*) и  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  (*b*).



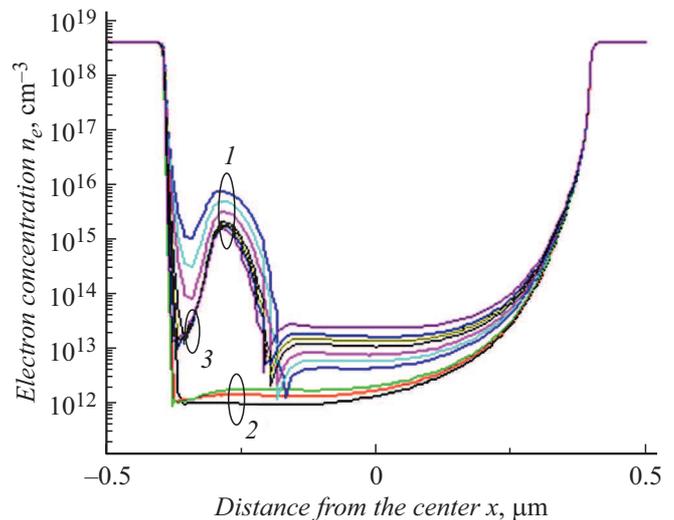
**Рис. 3.** Производная от изменения емкости по напряжению,  $d(\Delta C)/dV$ , определенная из вольт-емкостных характеристик до и после встраивания локального заряда в случае  $N_{sub} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  (a) и  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  (b).

кривых 1), в отличие от случая отсутствия локального встроенного заряда (рис. 4, группа кривых 2). Кривые распределения в каждой группе на рисунке соответствуют различным напряжениям  $V_{sb}$  на переходе исток–подложка. Уровень легирования подложки на рис. 4 соответствует  $N_{sub} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Из рисунка видно, что амплитуда локального максимума зависит от величины напряжения смещения, прилагаемого к переходу исток–подложка (база). С увеличением напряжения смещения амплитуда распределения и полуширина максимума уменьшаются, сама кривая распределения сужается. Однако при рассматриваемой локализации встроенного заряда, начиная с напряжений  $V_{sb} = 1.7 \text{ V}$ , с увеличением напряжения левое крыло локального максимума (группа кривых 3) почти не сдвигается. Это приводит к тому, что амплитуда максимума и полуширина максимума почти не уменьшаются при указанных напряжениях. То есть на расстояниях от центра, начиная от  $x = -0.36 \mu\text{m}$ , с увеличением напряжения смещения концентрация электронов (неосновных носителей) перестает уменьшаться. Такое поведение распределения,

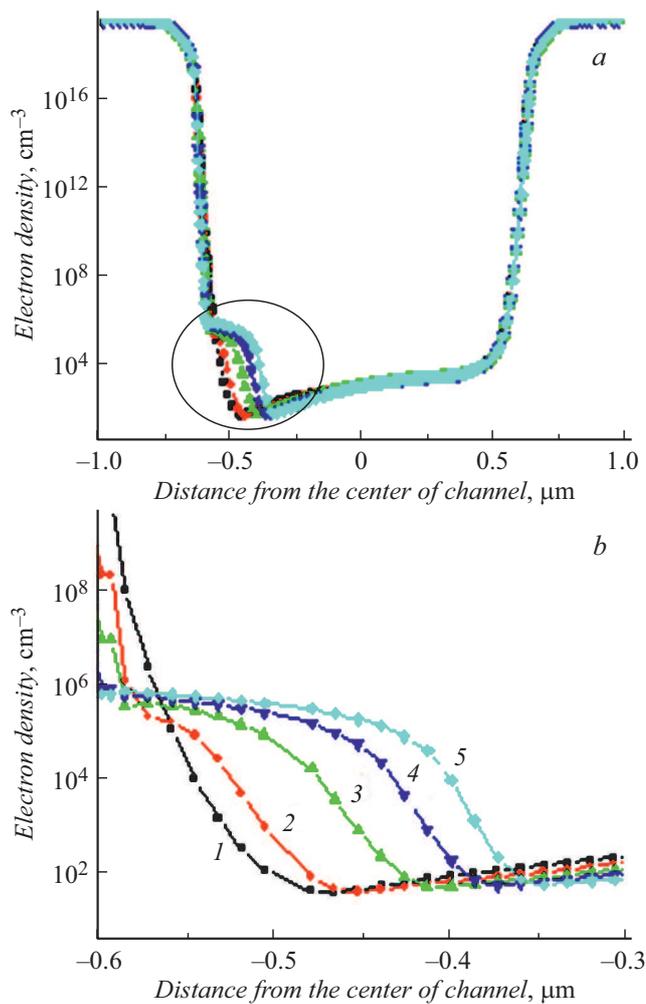
очевидно, и вызывает аномальный скачкообразный рост емкости (рис. 2, a), вместо нормального уменьшения при напряжениях, начиная с  $V_{sb} = 1.7 \text{ V}$  для данной локализации заряда.

При  $N_{sub} > 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  изменение распределения неосновных носителей при встраивании локального заряда имеет другой характер, по сравнению с предыдущим случаем  $N_{sub} \leq 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Для  $N_{sub} = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  на рис. 5 показано типичное распределение неосновных носителей на глубине 200 nm от поверхности подложки при напряжении смещения на переходе исток–подложка меньшем (рис. 5, b, кривые 1, 2), равном (кривая 3) и большем (кривые 4, 5) напряжения резкого спада  $V_{jump}$ , равного 1 V для данного случая. Как видно из рисунка, при равномерном увеличении напряжения смещения с шагом 0.4 V область объемного заряда увеличивается, ее граница неравномерно сдвигается к центру канала. При приближении напряжения смещения к  $V_{jump} = 1 \text{ V}$  (переход от  $V_{sb} = 0.6 \text{ V}$  к  $V_{sb} = 1.0 \text{ V}$ ) сдвиг границы и увеличение ширины области объемного заряда выражены существенно сильнее по сравнению с предыдущим наращиванием (переход от  $V_{sb} = 0.2 \text{ V}$  к  $V_{sb} = 0.6 \text{ V}$ ), что, видимо, и отражается резким спадом емкости около этого напряжения.

Таким образом, результаты моделирования показывают, что при встраивании локального заряда в нитридный слой МНОП-транзистора наблюдается аномальный скачок (резкий рост при  $N_{sub} \leq 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  или резкий спад при  $N_{sub} > 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) емкости бокового перехода исток–подложка, начиная с определенных напряжений



**Рис. 4.** Распределение концентрации электронов вдоль канала на глубине 200 nm от поверхности при уровне легирования подложки  $N_{sub} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  в случае встраивания локального заряда на расстоянии  $L = 150 \text{ nm}$  от истока и при напряжениях  $V_{sb} = 1, 1.2, 1.4, 1.7, 1.9, 2.1$  и  $2.5 \text{ V}$ , где 1 V соответствует кривой с максимальной амплитудой и 2.5 V — кривой с минимальной амплитудой (группа кривых 1). Группа кривых 2 соответствует случаю отсутствия локального заряда и напряжениям  $V_{sb} = 1, 1.4$  и  $1.7 \text{ V}$ . „Слипшаяся“ группа кривых 3 соответствует напряжениям  $V_{sb} = 1.7, 1.9, 2.1$  и  $2.5 \text{ V}$ .



**Рис. 5.** *a* — распределение неосновных носителей (электронов) на глубине 200 нм от поверхности подложки при различных напряжениях смещения  $V_{sb}$  на переходе исток–подложка при уровне легирования подложки  $N_{sub} = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ; *b* — часть рисунка (*a*), выделенная кругом в увеличенном масштабе; кривые соответствуют различным напряжениям смещения: 1 —  $V_{sb} = 0.2$ , 2 — 0.6, 3 — 1.0, 4 — 1.4, 5 — 1.8 В.

смещения  $V_{sb} = V_{jump}$ . Аномальное поведение емкости наблюдается в виде пиков на зависимости производной от изменения емкости после встраивания локального заряда по напряжению. Это связано с перераспределением концентрации носителей около поверхности канала, которое вызвано локальным встроенным в нитриде зарядом. Наблюдаемое поведение емкости может быть использовано для определения наличия локального заряда, встроенного в диэлектрик полевого транзистора.

### Финансирование работы

Авторы благодарны Министерству инновационного развития республики Узбекистан за финансовую поддержку исследования, посредством выделения гранта ОТ-Ф2-67.

### Список литературы

- [1] Kaczer B., Franco J., Weckx P., Roussel Ph.J., Putcha V., Bury E., Simicic M., Chasin A., Linten D., Parvais B., Cathoor F., Rzepa G., Waltl M., Grassler T. // *Microelectron. Reliab.* 2018. Vol. 81. P. 186–194.
- [2] Fleetwood D.M. // *Microelectron. Reliab.* 2018. Vol. 80. P. 266–277.
- [3] Heesoon C., Somyeong S., Jaehoon C., Sunae S. // *Curr. Appl. Phys.* 2015. Vol. 15. N 11. P. 1412–1416.
- [4] Eitan B., Pavan P., Bloom I., Aloni E., Frommer A., Finzi D. // *IEEE Electr. Device Lett.* 2000. Vol. 21. N 11. P. 543–545.
- [5] Rosmeulen M., Breuil L., Lorenzini M., Haspesslagh L., Van Houdt J., De Meyer K. // *Solid-State Electron.* 2004. Vol. 48. N 9. P. 1525–1530.
- [6] Barrett R.C., Quate C.F. // *J. Appl. Phys.* 1991. Vol. 70. P. 2725–2733.
- [7] Girard P. // *Nanotechnology.* 2001. Vol. 12. P. 485–490.
- [8] Shin H., Hong S., Moon J., Up Jeon J. // *Ultramicroscopy.* 2002. Vol. 91. N 1–4. P. 103–110.
- [9] Groeseneken G., Maes H.E. // *Microelectron. Reliab.* 1998. Vol. 38. P. 1379–1389.
- [10] Atamuratov A.E., Aminov U.A., Atamuratova Z.A., Halil- loev M., Abdikarimov A.A., Matyakubov H. // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics.* 2015. Vol. 6. N 6. P. 837–842.
- [11] Атамуратов А.Е., Матрасулов Д.У., Хабидуллаев П.К. // Докл. РАН. 2007. Вып. 414. № 6. С. 761–764. [Atamuratov A.E., Matrasulov D.U., Khabibullaev P.K. // *Doklady Physics.* 2007. Vol. 52. N 6. P. 322–325.]
- [12] Yatsuda Y., Nabetani S., Uchida K., Minami S.-I., Terasawa M., Hagiwara T., Katto H., Yasni T. // *IEEE Tr. Electron. Dev.* 1985. Vol. 32. P. 224–234.
- [13] Akamine S., Barrett R.C., Quate C.F. // *Appl. Phys. Lett.* 1990. Vol. 57. P. 316–321.