

07

Поведение локально инжектированных зарядов в нанотонких диэлектрических слоях LaScO_3 на Si подложке

© П.А. Алексеев, М.С. Дунаевский, Е.В. Гущина,
Е. Дургун Збен (E. Durgun Ozben),
Е. Лахдеранта (E. Lahderanta), А.Н. Титков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург,
Россия
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
„ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия
Peter Grunberg Institute 9 (PGI-9-IT) and JARA-FIT, Research Center Julich,
D-52425 Julich, Germany
Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta FI-53851, Finland
E-mail: прохер@gmail.com

Поступило в Редакцию 9 января 2013 г.

Методом кельвин-зонд-микроскопии исследовалась утечка зарядов в нанотонких слоях LaScO_3 на подложке Si. Обнаружено, что в этой системе имеет место утечка зарядов из слоя LaScO_3 в интерфейсный слой на границе с Si с последующими латеральным разбеганием зарядов уже в плоскости интерфейсного слоя и одновременным уходом в подложку Si. Непосредственно в слое LaScO_3 латерального разбегания зарядов не наблюдалось.

Происходящее последовательно уменьшение размеров полупроводниковых транзисторов и соответственно составляющих их элементов требует применения новых диэлектрических материалов. Известно, что использование в современных полевых транзисторах в качестве подзатворного диэлектрика слоев SiO_2 толщиной меньше 1 nm привело бы к большим токам утечки и фактически неработоспособности приборов на их основе [1]. Поэтому в новейших транзисторах в качестве подзатворного диэлектрика используются материалы с высокой диэлектрической проницаемостью (high-k), что увеличивает „эффективную“ толщину слоя диэлектрика и снижает токи утечки [2].

Одним из перспективных диэлектрических материалов является LaScO_3 , чья диэлектрическая проницаемость может достигать 33 [3],

что значительно превышает значения, соответствующие традиционным диэлектрикам. Кроме того, ширина запрещенной зоны LaScO_3 составляет 5.7 eV, при этом величины разрывов как валентной зоны, так и зоны проводимости относительно зон в кремнии превышают 2 eV. Однако известно, что при нанесении тонких слоев LaScO_3 на кремний образуется интерфейсный слой (IL), свойства которого отличаются от свойств LaScO_3 . Толщина интерфейсного слоя может составлять несколько нанометров [4,5], в зависимости от толщины слоя LaScO_3 . Вопрос влияния интерфейсного слоя на утечку зарядов из слоя LaScO_3 , нанесенного на кремний, является малоизученным. В данной работе изучалось поведение зарядов в слоях LaScO_3 на Si и влияния интерфейсного слоя с привлечением оригинальных возможностей метода кельвинзонд-микроскопии (КЗМ).

Распространенным способом изучения поведения зарядов на границе диэлектрик/полупроводник является изучение емкостных и вольт-амперных характеристик перехода. Такой подход, как правило, имеет низкое латеральное разрешение и предоставляет данные, усредненные по площади интерфейса диэлектрик/полупроводник. Для современных приборных структур с малыми латеральными размерами также важным является изучение латерального перемещения зарядов, для чего требуется высокое латеральное разрешение.

Требуемое высокое латеральное разрешение достигается в оригинальном методе изучения поведения зарядов в диэлектрических слоях, основывающемся на возможностях сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ). В этом методе первоначально осуществляется локальная зарядка слоя диэлектрика из приведенного в контакт с ним СЗМ-зонда с одновременной подачей напряжения (рис. 1). Последующая регистрация инжектированных в слой зарядов производится методом КЗМ [6]. Визуализируемый таким методом заряд отображается как зарядовое пятно (ЗП) на поверхности слоя диэлектрика. В дальнейшем отслеживаются эволюция ЗП во времени и соответственно распространение заряда в слое диэлектрика. Как правило, из-за диффузионного характера разбегания зарядов в плоскости слоя, распределение зарядов в пятне, а также детектируемое распределение поверхностного потенциала в пятне имеют гауссов характер. При этом полуширина ЗП определяет размеры заряженной области, которая превышает размеры начального контакта СЗМ-зонда с поверхностью. Можно проинтегрировать изменение поверхностного потенциала по площади пятна и получить количе-

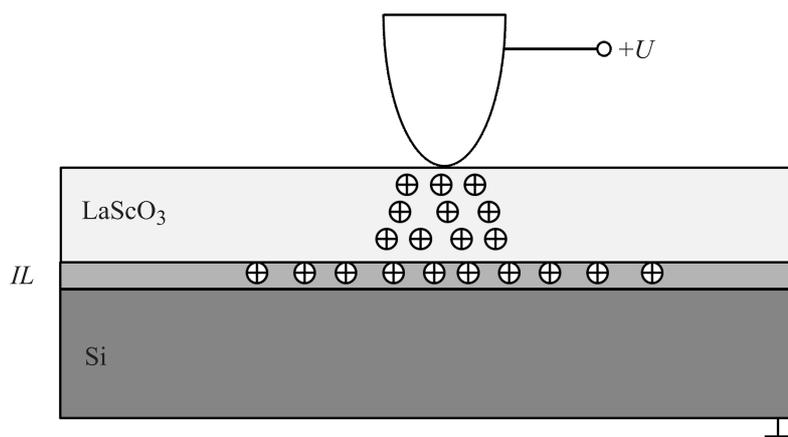


Рис. 1. Схема эксперимента по зарядке слоя LaScO₃ C3M-зондом.

ственную оценку полного числа инжектированных зарядов. Уменьшение ее величины во времени характеризует утечку зарядов из слоя. Таким образом, анализируя профили и форму ЗП, можно изучать поведение зарядов в слое диэлектрика, уровень сохранения и механизмы утечки.

В работе КЗМ-методом исследовалось поведение локально инжектированных зарядов в слоях LaScO₃ толщиной 6, 12 и 20 nm. Слои изготавливались методом молекулярно-пучкового осаждения (MBD) на подложку Si(100), температура подложки составляла 350°C [7]. Исследования выполнялись на зондовой станции Ntegra AURA (NT-MDT Россия, Зеленоград) в условиях форвакуума (10^{-5} bar) с использованием проводящих зондов DCP 11 (NT-MDT). Изучалось влияние внешней температуры на поведение зарядов от комнатной до 110°C. Нагрев приводил к незначительному дрейфу образца, зарядка и последующие измерения производились после прекращения дрейфа.

Уже первые эксперименты по локальной зарядке в изучавшейся системе привели к неожиданным результатам. На рис. 2 представлены профили ЗП, полученные при зарядке слоя LaScO₃ толщиной 12 nm, напряжением 8 V, в течение 10, 30 и 120 s, при температуре 30°C. На рис. 2 можно видеть, что зарядовые пятна имеют сложную, ранее не наблюдавшуюся форму. Ее можно описать суммой двух сцентриро-

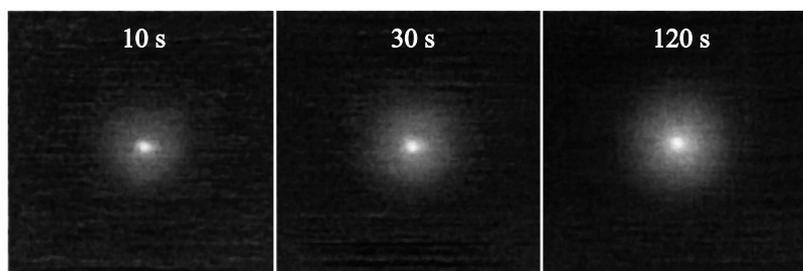
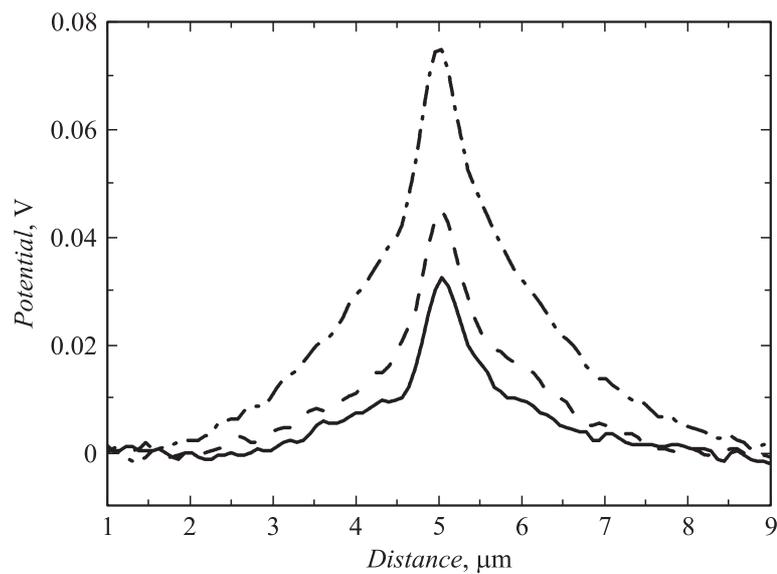


Рис. 2. Профили зарядовых пятен в слое LaScO_3 12 nm и соответствующие КЗМ-изображения $9 \times 9 \mu\text{m}$ (на вставке), полученные при приложении напряжения 8 V в течение 10 s (сплошная), 30 s (пунктирная), 120 s (штрихпунктирная линии).

ванных по месту зарядки, налагающихся гауссиан. При этом „узкая“ составляющая практически не зависит от времени зарядки как по амплитуде, так и по ширине. В то же время увеличение времени зарядки

приводит к увеличению амплитуды и ширины „широкой“ составляющей зарядового пятна. Сложный профиль и разное поведение составляющих зарядовых пятен заставляют считать, что в нашем случае имеет место одновременная зарядка двух соприкасающихся диэлектрических слоев: LaScO_3 и интерфейсного слоя на границе LaScO_3/Si . Из-за высокой скорости разбегания зарядов в Si локальные пятна зарядки на поверхности Si наблюдать не удается.

Обращает внимание резкое отличие в осуществлении зарядки слоя LaScO_3 и интерфейсного слоя. Количество накапливаемых зарядов в слое LaScO_3 довольно быстро насыщается и при длинных временах зарядки уже заметно не меняется, что раньше наблюдалось и для других диэлектрических слоев, например, SiO_2 и Si_3N_4 [6,8]. Интерфейсный же слой может аккумулировать при зарядке существенно большее количество зарядов при отсутствии заметной тенденции к насыщению.

При исследовании эффектов зарядки не было обнаружено влияния полярности зарядки. Дальнейшие данные относятся к изучению слоев LaScO_3 с толщинами 6 и 20 нм (рис. 3). Для получения ЗП заметной амплитуды эти исследования проводились при зарядке напряжением 6 В в течение одной минуты.

Из рис. 3, а, с видно, что профили зарядовых пятен и для этих исследованных образцов имеют две составляющие: медленную и быструю. Причем с увеличением толщины слоя эффективность накопления и скорость разбегания заряда в интерфейсных слоях вырастают, оставаясь примерно одинаковыми для слоев LaScO_3 . Увеличение скорости диффузии с увеличением толщины LaScO_3 , возможно, связано с утолщением интерфейсного слоя и соответственно уменьшением его сопротивления.

Сопоставление интегральной интенсивности пятен зарядки на рис. 3, а, где еще можно четко наблюдать профили обоих контуров, показывает ее уменьшение со временем, т.е. можно сделать вывод о существовании утечки зарядов в подложку Si. Для этой же температуры удалось проследить и за уширением быстрой составляющей пятна зарядки. Было показано, что уширение L быстрой составляющей со времени t описывается коренной зависимостью $L = (Dt)^{1/2}$, и было найдено значение коэффициента диффузии $D = 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$. После определения зависимости коэффициента диффузии от температуры [8] была найдена оценка значения энергии активации для процесса диффузии 0.71 eV. Для образцов с большими ширинами слоев LaScO_3 12 и 20 нм ана-

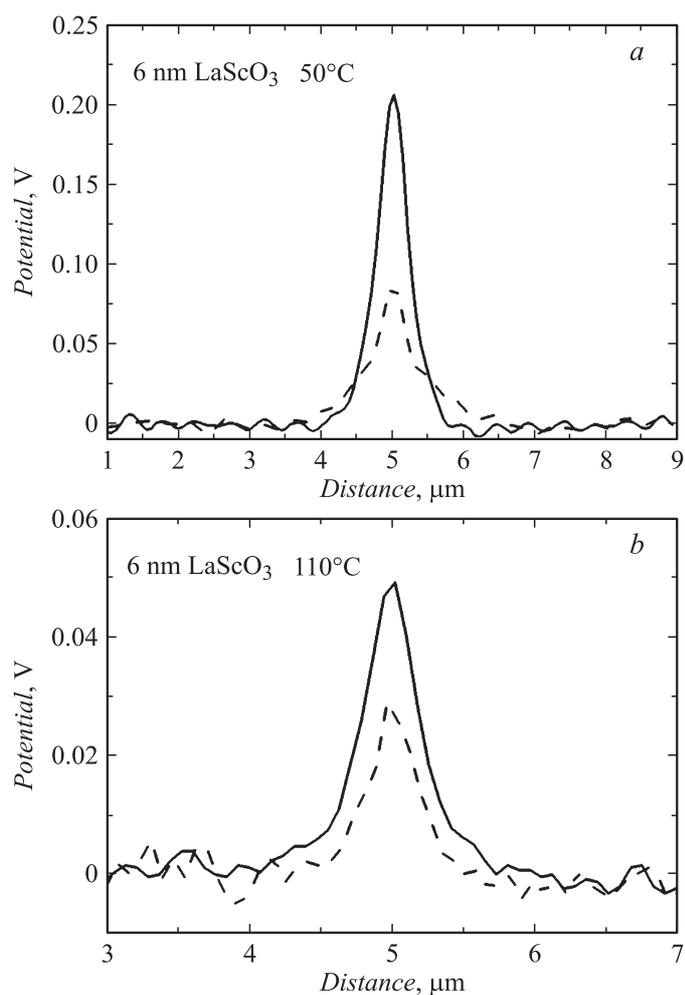


Рис. 3. Профили зарядовых пятен в слоях LaScO₃ толщиной 6 nm (*a*, *b*) и 20 nm (*c*, *d*), полученные при температурах 50 и 110°C соответственно. Сплошная линия на графиках соответствует состоянию зарядового пятна спустя 2 min после зарядки, пунктирная — 10 min. Температура 50°C была выбрана в связи с тем, что при меньших температурах, даже в условиях форвакуума, на поверхности диэлектрика присутствует пленка адсорбированной воды, ускоряющая латеральное движение зарядов и экранирующая заряд [8].

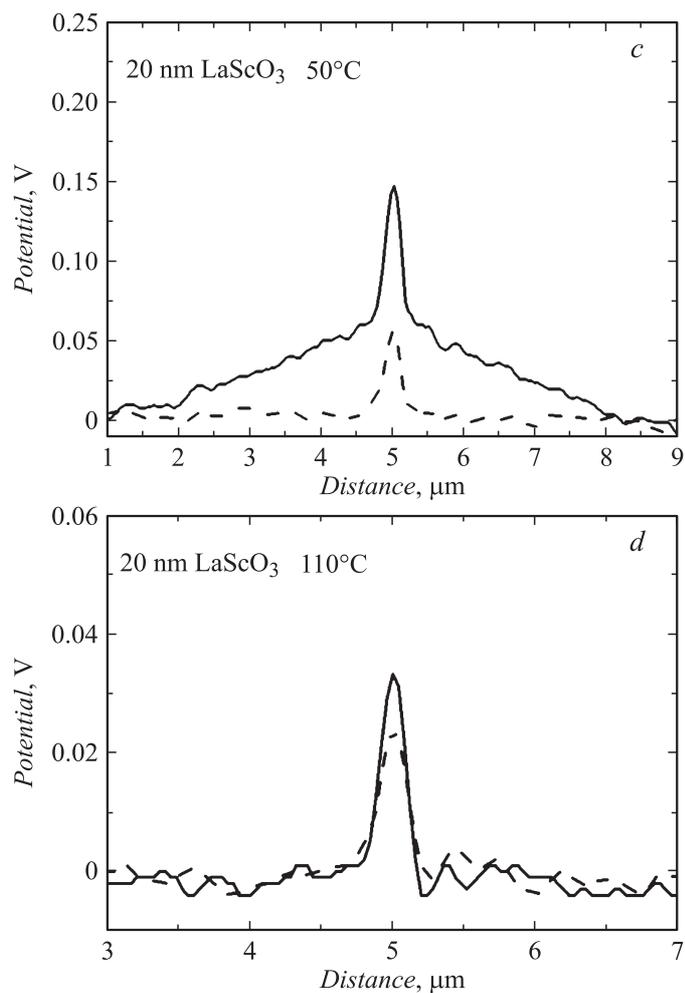


Рис. 3 (продолжение).

логичные оценки не удалось провести из-за более быстрого разбегания зарядов в интерфейсных слоях. Интересно, что при температуре 110°C (рис. 3, *b, d*) уширение и исчезновение широкой составляющей ЗП резко ускоряется.

Важно обратить внимание на то, что узкие компоненты ЗП, обусловленные распределением инжектированных зарядов непосредственно в слое LaScO_3 , практически не уширяются со временем. Наблюдается лишь незначительное уширение при нагреве образцов до 110°C . По этому параметру исследовавшиеся слои LaScO_3 значительно превосходят традиционные диэлектрики SiO_2 и Si_3N_4 , где латеральное разбегание зарядов происходит много быстрее [6,8].

Наблюдение уменьшения амплитуд узких компонент ЗП во времени, однако, показывает, что во всех исследовавшихся случаях имеет место уход зарядов из слоя LaScO_3 сначала, скорее всего, в интерфейсный слой, а затем и в подложку. С ростом температуры амплитуда узких компонент ЗП также падает. Причина такого поведения зарядов, на самом деле, не совсем ясна. В сложившейся системе двух контактирующих диэлектрических слоев возможно влияние зарядового состояния интерфейсного слоя: насыщение его зарядами может тормозить утечку зарядов из слоя LaScO_3 и, наоборот, истощение, например, при повышении температуры может ускорять приток зарядов из слоя LaScO_3 , обедняя последний уже на стадии локальной зарядки.

В заключение, в работе исследовалось поведение локально инжектированных зарядов в нано тонких слоях high-k диэлектрика LaScO_3 на подложке кремния. Было продемонстрировано эффективное подавление латеральной диффузии зарядов в таких слоях. Однако был обнаружен необычный двухслойный характер пространственного распространения зарядов, связанный, в нашем понимании, с уходом носителей в интерфейсный слой на границе с подложкой, существующий в изучавшейся системе. В этом слое ускоряется латеральная диффузия носителей и имеется заметная вероятность ухода носителей в подложку. Выявленное влияние подслоя на удержание носителей в слое high-k диэлектрика LaScO_3 является сильным и в дальнейшем планируется его подробное исследование.

Работа была поддержана грантом РФФИ (12-02-01042-а), грантом президента для научных школ (НШ-3008.2012.2).

Список литературы

- [1] Muller D.A., Sorsch T., Moccio S. et al. // Nature. 1999. V. 399. P. 758.
- [2] Wilk G.D., Wallace R.M., Anthony J.M. // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. P. 5243.

- [3] *Lopes J.M.J., Littmark U., Roeckerath M.* et al. // J. Appl. Phys. 2007. V. 01. P. 104 109 (5 p.).
- [4] *Edge L.F., Schlom D.G., Rivillon S.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 062 902.
- [5] *Liu F., Duscher G.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. P. 152 901.
- [6] *Buh G., Chung H.J., Kuk Y.* // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. P. 2010.
- [7] *Özben E.D., Schnee M., Nichau A.* et al. // Microelectronic Engineering. 2011. V. 88. P. 1323–1325.
- [8] *Dunaevskiy M.S., Alekseev P.A., Girard P.* et al. // J. Appl. Phys. 2011. V. 110. P. 084 304 (9 p.).