

Накопление зарядов в МОП-структурах с поликремниевым затвором при туннельной инжекции

© О.В. Александров, А.Н. Агеев, С.И. Золотарев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,
197376 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Aleksandr_ov@mail.ru

(Получена 27 марта 2018 г. Принята к печати 10 апреля 2018 г.)

Изучено накопление зарядов в МОП-структурах с легированным и нелегированным поликремниевым затвором с Al-контактами и без них при туннельной инжекции электронов из затвора и из кремниевой подложки. Показано, что независимо от полярности инжекции вблизи поликремниевого затвора накапливается отрицательный заряд, а вблизи кремниевой подложки положительный. При больших зарядах инжекции вблизи кремниевой подложки также появляется отрицательный заряд. Результаты описаны с помощью численной модели, в которой учтено образование электронных ловушек при нанесении Al-контактов и генерация электронных ловушек при рекомбинации свободных электронов с захваченными на ловушки дырками.

DOI: 10.21883/FTP.2018.13.46877.8875

1. Введение

При подаче напряжения через МОП-структуру начинает протекать электронный туннельный ток Фаулера–Нортгейма [1,2]. При достаточно высокой напряженности электрического поля ($E > 6–8$ МВ/см) в материале диэлектрика или анода происходит ударная ионизация и появляется дырочный ток [1,2]. Электроны и дырки захватываются на ловушки в объеме диэлектрика и на поверхностные состояния (ПС), приводя к накоплению заряда в МОП-структуре. Этот процесс приводит к перераспределению электрического поля в МОП-структуре, сдвигу порогового напряжения МОП-транзисторов, сдвигу напряжения затвора в режиме постоянного тока (или изменению тока в режиме постоянного напряжения), а также к изменению времени ожидания пробоя и в некоторых случаях к преждевременному пробоя [3]. Накопление заряда зависит от типа и концентрации ловушек в объеме диэлектрика и на межфазных границах (МФГ), распределения их по толщине диэлектрика, а также от напряженности электрического поля, полярности и заряда инжекции электронов [4–6]. В предыдущей работе [7] нами изучалось и моделировалось накопление зарядов в подзатворном диоксиде кремния *n*- и *p*-МОП-транзисторов при туннельной инжекции электронов из поликремниевого затвора (при $V_g < 0$) с зарядом ($Q_{inj} < 0.3$ Кл/см²) и напряженностью электрического поля ($E < 8$ МВ/см) меньше максимально возможных. Сдвиг напряжения затвора в режиме постоянного тока объяснялся захватом инжектируемых электронов на исходные нейтральные ловушки вблизи затвора. Сдвиг порогового напряжения связывался с образованием дырок по механизму анодной дырочной инжекции и их захватом исходными водородосодержащими ловушками вблизи кремниевой подложки. В результате появлялись положительный заряд на безводородных ловушках и поверхностные состояния на МФГ Si–SiO₂.

Генерации новых ловушек в объеме SiO₂ при этом не наблюдалось.

В ряде работ [8–11] при достаточно высоких зарядах туннельной инжекции электронов ($Q_{inj} > 0.1$ Кл/см²) и напряженности электрического поля ($E > 8$ МВ/см) после введения положительного заряда наблюдалось образование отрицательного заряда, который авторы объясняли генерацией новых электронных ловушек. Было предложено несколько механизмов их генерации [8–16]. В работах [10,12] генерация электронных ловушек у катода связывалась с освобождением водорода вблизи анода под действием горячих электронов, его миграцией к катоду и взаимодействием водорода с оборванными связями оксидных ловушек вблизи катода. В работах [8,11] образование электронных ловушек связывалось с ударной ионизацией SiO₂ или ловушек при достаточно высоких полях ($E > 10$ МВ/см). Показано, однако, что генерация электронных ловушек происходит даже при невысоких полях ($E > 4$ МВ/см) при наличии дырок [9,14] и что инжекция дырок является необходимым условием для генерации электронных ловушек [13–15]. В работах [9,13–15] генерация электронных ловушек объяснялась взаимодействием одних только дырок со структурой SiO₂, разрывом напряженных связей Si–O и образованием немостикового кислорода. В работе [16] предложен рекомбинационный механизм генерации электронных ловушек, учитывающий необходимость наличия как электронов, так и дырок. Согласно этому механизму [16], генерация электронных ловушек происходит при рекомбинации свободных электронов с дырками, захваченными на ловушки. При этом за счет выделившейся при рекомбинации энергии происходит структурная перестройка дефекта, разрыв связи и релаксация к другому дефектному состоянию. В настоящей работе изучается и моделируется накопление заряда в МОП-структурах с легированным фосфором и нелегированным поликремниевым затвором, с наличием

и отсутствием Al-контактов при туннельной инжекции электронов как из затвора, так и из кремниевой подложки при инжектируемом заряде и электрическом поле, достаточными для генерации электронных ловушек.

2. Эксперимент

МОП-структуры изготавливались на пластинах монокристаллического кремния n -типа ориентации (100) с удельным сопротивлением 7.5 Ом·см. Окисление проводилось при температуре 1000°C в сухом кислороде с добавкой 1% HCl в течение 40 мин. Толщина оксида составляла 120 нм. Поверх оксида газофазным методом наносился поликристаллический кремний (поликремний) толщиной 0.5 мкм. Поликремний легировался фосфором путем диффузии из газовой фазы при температуре 900°C. После удаления фосфоросиликатного стекла с помощью фотолитографии формировались поликремниевые электроды (затворы), на которые с помощью следующей фотолитографии наносились Al-контакты. Последние вжигались при температуре 450°C в течение 30 мин в среде азота. Часть пластин оставлялась без легирования поликремния и без Al-контактов.

Измерялся сдвиг напряжения затвора ΔV_g в режиме постоянного тока ($I = 10$ нА, $j = 1 \cdot 10^{-3}$ А/см²) при отрицательной (ΔV_g^-) и при положительной (ΔV_g^+) полярностях после инжекции электронов как из затвора (при $V_g < 0$), так и из подложки (при $V_g > 0$). Начальное напряжение, подаваемое на затвор, составляло 90–110 В. Время инжекции (t) ограничивалось пробоем МОП-структуры, а инжектируемый заряд ($Q_{inj} = j \cdot t$) достигал 1 Кл/см².

Сдвиг напряжения затвора в отрицательной полярности определяется зарядом вблизи затвора:

$$\Delta V_g^- = \frac{1}{C_{ox}d} \int_0^d \rho(x)x dx,$$

а в положительной полярности — зарядом вблизи кремниевой подложки

$$\Delta V_g^+ = -\frac{1}{C_{ox}d} \int_0^d \rho(x)(d-x) dx,$$

где координата x отсчитывается от кремниевой подложки, d — толщина оксида, $\rho(x)$ — плотность объемного заряда, C_{ox} — удельная емкость диэлектрика. Как было показано в [7], и положительный, и отрицательный заряды локализованы вблизи внутренней и внешней МФГ.

Изменение напряжения затвора в отрицательной полярности (ΔV_g^-) на структурах с легированным поликремнием показано на рис. 1 после инжекции электронов из затвора (кривые 1, 2) и из подложки (кривые 3, 4) с Al (кривые 1, 3) и без Al (кривые 2, 4) контактов. Во всех случаях независимо от полярности инжекции

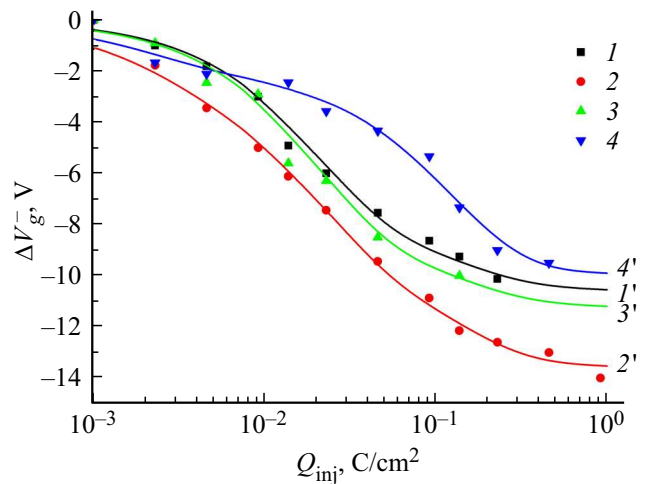


Рис. 1. Сдвиг напряжения затвора ΔV_g^- на структурах с легированным поликристаллическим затвором после инжекции из затвора (1, 2) и из подложки (3, 4) с Al-контактами (кривые 1, 3) и без Al-контактов (кривые 2, 4). 1–4 — эксперимент, 1'–4' — расчет.

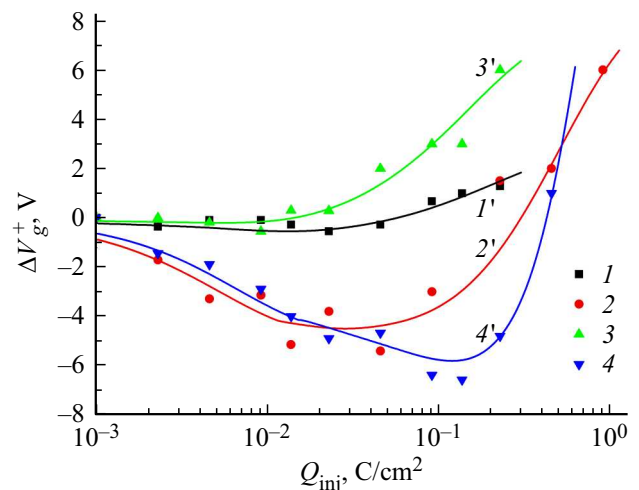


Рис. 2. Сдвиг напряжения затвора ΔV_g^+ на структурах с легированным поликристаллическим затвором после инжекции из затвора (кривые 1, 2) и из подложки (кривые 3, 4) с Al-контактами (кривые 1, 3) и без Al (кривые 2, 4). 1–4 — эксперимент, 1'–4' — расчет.

и наличия Al-контакта сдвиг ΔV_g^- отрицателен и $|\Delta V_g^-|$ растет примерно линейно от $\log(Q_{inj})$. Отрицательный сдвиг ΔV_g^- свидетельствует о накоплении отрицательного заряда в подзатворном оксиде вблизи затвора.

Изменение напряжения затвора в положительной полярности (ΔV_g^+) на структурах с легированным поликремнием показано на рис. 2 после инжекции электронов из затвора (кривые 1, 2) и из подложки (кривые 3, 4) с Al-контактами (кривые 1, 3) и без Al (кривые 2, 4). Как видно из рис. 2, на структурах без Al при малых зарядах инжекции наблюдается отрицательный сдвиг ΔV_g^+ (кривые 2, 4), что свидетельствует о введении

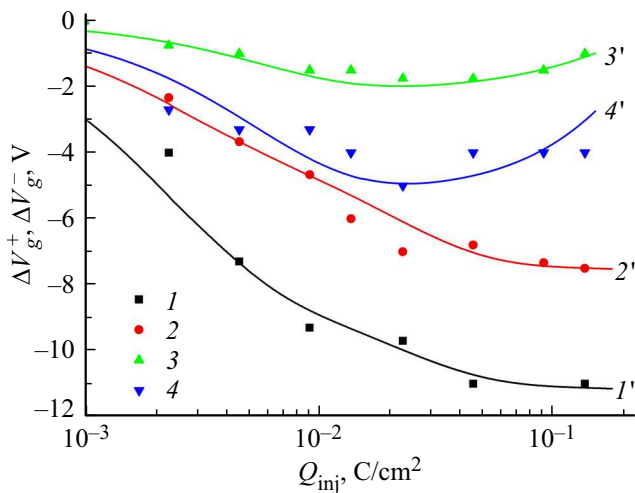


Рис. 3. Сдвиг напряжения затвора ΔV_g^- (кривые 1, 2) и ΔV_g^+ (кривые 3, 4) на структурах с нелегированным поликристаллическим затвором после инъекции из затвора с Al-контактами (кривые 1, 3) и без Al-контактов (кривые 2, 4). 1–4 — эксперимент, 1'–4' — расчет.

положительного заряда вблизи подложки. На структурах с Al при малых зарядах инъекции отрицательный сдвиг ΔV_g^+ мал. При больших зарядах инъекции во всех случаях наблюдается рост ΔV_g^+ , что свидетельствует о введении отрицательного заряда в подзатворный оксид вблизи подложки.

На структурах с нелегированным поликристаллическим затвором после инъекции из затвора наблюдается отрицательный сдвиг ΔV_g^- (рис. 3, кривые 1, 2) и отрицательный сдвиг ΔV_g^+ (кривые 3, 4). Таким образом, имеем введение отрицательного заряда вблизи затвора и введение положительного заряда вблизи подложки соответственно. Отметим, что структуры с легированным поликремниевым затвором пробиваются при больших зарядах инъекции при обеих ее полярностях ($Q_{bd} = 0.3 - 1.0 \text{ Кл/см}^2$), чем с нелегированным поликремниевым затвором как при инъекции из затвора ($Q_{bd} = 0.2 - 0.3 \text{ Кл/см}^2$), так и особенно при инъекции из подложки ($Q_{bd} = 0.03 - 0.05 \text{ Кл/см}^2$).

3. Обсуждение экспериментальных результатов

На структурах с легированным поликремниевым затвором наблюдается накопление отрицательного заряда вблизи затвора ($\Delta V_g^- < 0$) при всех зарядах инъекции как из затвора, так и из подложки (рис. 1, кривые 1–4). Отрицательный заряд вводится также и при больших зарядах инъекции вблизи подложки ($\Delta V_g^+ > 0$) (рис. 2, кривые 1–4). При малых зарядах инъекции вблизи подложки образуется положительный заряд ($\Delta V_g^+ < 0$) (рис. 2, кривые 2, 4). При этом полярность инъекции

не оказывает заметного влияния на закономерности накопления заряда.

Причиной появления отрицательного заряда вблизи n^+ -поликремниевых затворов является захват электронов, инжектируемых из затвора, на исходные ловушки в диоксиде кремния. При диффузионном легировании поликристаллического затвора фосфором такими ловушками могут являться атомы фосфора в тонком слое SiO_2 , примыкающем к затвору. Однако отрицательный сдвиг ΔV_g^- наблюдается и на структурах с нелегированным поликремнием (рис. 3, кривые 1, 2), т.е. с атомами фосфора не связан. Введение отрицательного заряда при инъекции электронов связывается обычно с их захватом на электронные ловушки, обусловленные присутствием фрагментов воды и гидроксильных групп OH [1,2,17–19]. Концентрация таких ловушек, как правило, однородная по толщине оксида, имеет накопление на обеих МФГ [17]. В МОП-структурах с поликремниевым затвором наблюдаются также мелкие и глубокие электронные ловушки, обусловленные собственными дефектами SiO_2 , связанными с дефицитом кислорода [20,21]. Эти дефекты образуются при высокотемпературных обработках вследствие взаимодействия SiO_2 с кремнием подложки и затвора.

На структурах с легированным поликремниевым затвором при положительной полярности инъекции выявляется влияние нанесения Al-контактов (рис. 2). При малых зарядах инъекции на структурах без Al-контактов наблюдается отрицательный сдвиг ΔV_g^+ (кривые 2, 4), что соответствует введению положительного заряда вблизи подложки. Тогда, как и при наличии Al-контактов, отрицательный сдвиг ΔV_g^+ мал (кривые 1, 3), т.е. наличие Al приводит к подавлению положительного заряда вблизи подложки. Положительный заряд в SiO_2 вблизи кремниевой подложки связывают с дырочными ловушками E' - и $E'N$ -центрами в SiO_2 [1,2]. Можно предположить, что отрицательно заряженные группы OH^- , образующиеся вместе с водородом при разложении молекул воды в присутствии Al [22,23], компенсируют положительный заряд E' - и $E'N$ -центров, а при больших зарядах инъекции сами вносят отрицательный заряд. На структурах с нелегированным поликремнием влияние нанесения Al-контактов проявляется слабее (рис. 3, кривые 3, 4). Возможной причиной этого является плохая проницаемость нелегированного поликремния для групп OH и водорода в отличие от легированного поликремния [24].

При больших зарядах инъекции наблюдается быстрый рост ΔV_g^+ (рис. 2, кривые 2, 4), что свидетельствует о введении отрицательного заряда в МОП-структуры вблизи подложки. Введение сначала положительного заряда, а затем отрицательного при увеличении времени или заряда инъекции наблюдалось в ряде работ [8–11]. Такое поведение при малых зарядах инъекции объяснялось генерацией дырок при ударной ионизации оксида или материала анода и их захватом на дырочные ловушки. Введение отрицательного заряда при больших зарядах инъекции объяснялось генерацией

Таблица 1. Полные концентрации исходных ловушек вблизи МФГ Si–SiO₂

Полные концентрации	Кривые рис. 2				Кривые рис. 3	
	1'	2'	3'	4'	3'	4'
$Q_{T0}^0, \text{см}^{-2}$	$3.0 \cdot 10^{11}$	$2.0 \cdot 10^{12}$	$3.0 \cdot 10^{11}$	$1.2 \cdot 10^{12}$	$7 \cdot 10^{11}$	$1.9 \cdot 10^{12}$
$Q_{TH0}^0, \text{см}^{-2}$	—	—	—	$3.9 \cdot 10^{12}$	—	—
$Q_{S0}^0, \text{см}^{-2}$	$4.2 \cdot 10^{11}$	—	$1.5 \cdot 10^{12}$	—	—	—

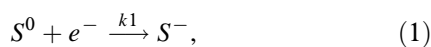
новых электронных ловушек [8–11]. Из всех предложенных механизмов генерации электронных ловушек [8–16] наиболее вероятным представляется рекомбинационный механизм, предложенный в работе [16], который требует наличия и электронов, и дырок. В этом механизме генерация нейтральных электронных ловушек происходит при рекомбинации свободного электрона с дыркой, захваченной на ловушку. За счет выделившейся при этом энергии рекомбинации происходит структурная перестройка дефекта из дырочной ловушки в электронную.

Структуры с нелегированным поликремнием при инжекции из подложки (при $V_g > 0$) пробиваются при меньших временах и зарядах инжекции, чем при инжекции из затвора. Это связано, по-видимому, с накоплением положительного заряда вблизи катода-подложки (см. рис. 3, кривые 3, 4). Как показано в [3], пробой МОП-структур связан с наличием дырочных ловушек вблизи катода и положительной обратной связью по мере их заполнения. Появление отрицательного заряда в МОП-структурах как с легированным, так и с нелегированным поликремнием, наоборот, способствует повышению напряжения пробоя.

4. Расчеты по модели и их обсуждение

К процессам накопления зарядов в МОП-структуре, происходящим в МОП-структуре при инжекции электронов, описанным нами ранее в модели [7], в нашем случае добавляются эффекты, обусловленные влиянием Al-металлизации, а также генерации электронных ловушек при высоких полях и больших зарядах инжекции.

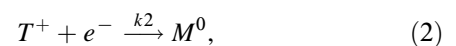
Первый эффект связываем с введением гидроксильных групп OH, образующихся при разложении молекул воды в присутствии Al [22,23]. Эти группы, заряжаясь отрицательно, компенсируют положительный заряд E'- и E'N-центров, а при больших зарядах инжекции сами вносят отрицательный заряд. Учтем его путем введения исходных нейтральных электронных ловушек S^0 вблизи МФГ Si–SiO₂,



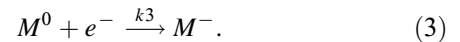
при существенном уменьшении полных концентраций дырочных ловушек Q_{T0}^0 и Q_{TH0}^0 .

Второй эффект, обусловленный генерацией электронных ловушек, учтем в соответствии с рекомбинацион-

ным механизмом [16] с помощью реакции преобразования части заполненных (положительно заряженных) безводородных дырочных ловушек T^+ в нейтральные электронные при захвате свободных электронов:



где M^0 — нейтральные электронные ловушки, которые при последующем захвате электронов образуют отрицательный заряд вблизи подложки,



В работах [25,26] было показано, что процесс генерации электронных ловушек обратим, т.е. может быть неоднократно повторен путем изменения напряжения затвора или последовательной инжекции дырок и электронов. В рамках рекомбинационного механизма этот эффект обратимости может быть объяснен тем, что заполненные электронные ловушки M^- при захвате дырок за счет выделяющейся при рекомбинации энергии превращаются снова в нейтральные дырочные ловушки T^0 , т.е. имеет место реакция



Кинетические уравнения, соответствующие реакциям (1)–(4), добавляются к общей системе диффузионно-кинетических уравнений модели [7]. В дополнительных реакциях (1)–(4) использованы следующие сечения захвата: $\sigma_{nS1}^0 = 2.6 \cdot 10^{-17} \text{см}^2$ [13], $\sigma_{n02}^+ = 2.1 \cdot 10^{-13} \text{см}^2$ (в 7.7 раз меньше, чем в обычной реакции нейтрализации дырочной ловушки в [7]), $\sigma_{n3}^0 = 6.0 \cdot 10^{-18} \text{см}^2$ и $\sigma_{p4}^- = 5.0 \cdot 10^{-18} \text{см}^2$. Полные концентрации исходных нейтральных электронных ловушек Q_{S0}^0 , безводородных Q_{T0}^0 и водородосодержащих Q_{TH0}^0 дырочных ловушек, обеспечивающие соответствие расчетных зависимостей $\Delta V_g^+(Q_{inj})$ (кривые 1'–4' на рис. 2 и кривые 3' и 4' на рис. 3) с экспериментальными данными, приведены в табл. 1.

Как отмечалось в разд. 3, экспериментальные зависимости $|\Delta V_g^-|$ примерно линейны от $\log(Q_{inj})$. Как показали расчеты, совокупность зависимостей такого вида может быть удовлетворительно описана захватом электронов на не менее чем три вида нейтральных центров (R_1, R_2 и R_3) с разными сечениями захвата ($\sigma_{nR1}^0 < \sigma_{nR2}^0 < \sigma_{nR3}^0$) и разными полными концентрациями (Q_{R1}^0, Q_{R2}^0 и Q_{R3}^0). Максимальное и минимальное сечения определяют соответственно начало и конец роста $|\Delta V_g^-|$, а также вместе с σ_{nR2}^0 и полными

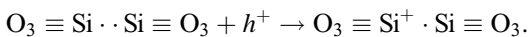
Таблица 2. Полные концентрации электронных ловушек вблизи МФГ SiO₂–поликремний

Полные концентрации	Кривые рис. 1				Кривые рис. 3	
	1'	2'	3'	4'	1'	2'
$Q_{R1}^0, \text{см}^{-2}$	$4.0 \cdot 10^{11}$	$6.6 \cdot 10^{11}$	$4.0 \cdot 10^{11}$	$1.2 \cdot 10^{12}$	—	—
$Q_{R2}^0, \text{см}^{-2}$	$1.2 \cdot 10^{12}$	$1.1 \cdot 10^{12}$	$1.3 \cdot 10^{12}$	—	$5.3 \cdot 10^{11}$	$6.7 \cdot 10^{11}$
$Q_{R3}^0, \text{см}^{-2}$	—	$3.0 \cdot 10^{11}$	—	$3.0 \cdot 10^{11}$	$1.2 \cdot 10^{12}$	$5.0 \cdot 10^{11}$

концентрациями задают наклон зависимости $|\Delta V_g^-|$ от $\log(Q_{inj})$. Суммарная полная концентрация электронных ловушек ($Q_R^0 = Q_{R1}^0 + Q_{R2}^0 + Q_{R3}^0$) определяет величину насыщения ΔV_g^- при больших зарядах инжекции. В качестве сечений захвата использовались значения, полученные в работе [13] при инжекции электронов в МОП-структурах с поликремниевым затвором: $\sigma_{nR1}^0 = \sigma_{nS1}^0 = 2.6 \cdot 10^{-17} \text{см}^2$, $\sigma_{nR2}^0 = 1.6 \cdot 10^{-16} \text{см}^2$, $\sigma_{nR3}^0 = 1.4 \cdot 10^{-15} \text{см}^2$. Полные концентрации электронных ловушек, обеспечивающие соответствие расчетных зависимостей $\Delta V_g^-(Q_{inj})$ (рис. 1, кривые 1'–4' и рис. 3, кривые 1' и 2') с экспериментальными данными, приведены в табл. 2.

Как видно из рис. 1–3, расчетные зависимости удовлетворительно описывают экспериментальные данные. Используемые сечения захвата и найденные полные концентрации дырочных и электронных ловушек лежат в диапазоне литературных данных. Так, для электронных ловушек, связанных с присутствием фрагментов воды гидроксильных групп OH, характерны сечения захвата $10^{-17}–10^{-18} \text{см}^2$ [1,2]. Сечения захвата электронных ловушек, обусловленных дефицитом кислорода, имеют более широкий диапазон значений $10^{-16}–10^{-19} \text{см}^2$ [27]. В работах [20,21,27] показана общая природа электронных и дырочных ловушек, обусловленная дефицитом кислорода в слоях SiO₂, подвергнутых высокотемпературным обработкам.

Отметим, что в рамках рекомбинационного механизма [16] может быть объяснена обратимость генерации нейтральных электронных ловушек при последовательной инжекции дырок и электронов, показанная в [25,26]. Основными дырочными ловушками в SiO₂ являются кислородные вакансии, которые при захвате дырок становятся положительно заряженными, так называемыми E'-центрами [1,2]:



При последующем захвате инжектируемых электронов, происходящем с выделением энергии рекомбинации и структурной перестройкой дефекта, помимо обычной нейтрализации кислородной вакансии могут образоваться фрагменты сетки с тривалентным кремнием $O_3 \equiv Si \cdot$. Последние, как показано в [27], ведут себя как нейтральные электронные ловушки и захватывают на себя электроны. При последующей инжекции дырок снова происходит выделение энергии рекомбинации, структур-

ная перестройка дефекта и восстанавливаются первоначальные нейтральные кислородные вакансии.

5. Заключение

Изучено влияние туннельной инжекции из затвора и подложки на накопление заряда в МОП-структурах с легированным фосфором и нелегированным поликремниевым затвором при наличии и отсутствии Al-контактов. Показано, что независимо от направления инжекции (из затвора или подложки) вблизи поликремниевого затвора накапливается отрицательный заряд, а вблизи подложки — положительный. При больших зарядах инжекции отрицательный заряд появляется также и вблизи подложки. Зависимости сдвига напряжения затвора от заряда инжекции описаны с помощью численной модели, в которой учтены образование электронных ловушек при нанесении Al-контактов и генерация электронных ловушек при рекомбинации свободных электронов с захваченными на ловушки дырками.

Список литературы

- [1] Г.Я. Красников, Н.А. Зайцев. Система кремний-диоксид кремния субмикронных СБИС (М., Техносфера, 2003).
- [2] А.П. Барабан, В.В. Булавинов, П.П. Коноров. Электроника слоев SiO₂ на кремнии (Л., ЛГУ, 1988).
- [3] О.В. Александров. ФТП, **51** (8), 1105 (2017).
- [4] Y. Nissan-Cohen, J. Shappir, D. Frohman-Bentchkowsky. J. Appl. Phys., **57** (8), 2830 (1985).
- [5] В.В. Андреев, В.Г. Барышев, Г.Г. Бондаренко, А.А. Столяров, В.А. Шахнов. Микроэлектроника, **26** (6), 440 (1997).
- [6] Y.-B. Park, D.K. Schroeder. IEEE Trans. Electron. Dev., **45**, 1361 (1998).
- [7] О.В. Александров, С.А. Мокрушина. ФТП, **52** (6), 637 (2018).
- [8] P. Fazan, M. Dutoit, C. Martin, M. Ilegems. Solid-State Electron., **30**, 829 (1987).
- [9] J.F. Zhang, S. Taylor, W. Eccleston. J. Appl. Phys., **71** (2), 725 (1992).
- [10] D.J. DiMaria, E. Cartier, D. Arnold. J. Appl. Phys., **73**, 3367 (1993).
- [11] C. Chen, W.L. Wilson, M.Smayling. J. Appl. Phys., **83** (7), 3898 (1998).
- [12] C.C. Hsu, S.C.S. Pan, C.-T. Sah. J. Appl. Phys., **58** (3), 1326 (1985).
- [13] H. Uchida, T. Ajioka. Appl. Phys. Lett., **51** (6), 433 (1987).

- [14] M.M. Heyns, D.K. Rao, R.F. Keersmaecker. Appl. Surf. Sci., **39**, 327 (1989).
- [15] S. Ogawa, N. Shiono, M. Shimaya. Appl. Phys. Lett., **56** (14), 1329 (1990).
- [16] I.C. Chen, S. Holland, C. Hu. J. Appl. Phys., **61** (9), 4544 (1987).
- [17] V.J. Kapoor, F.G. Feigl, S.R. Butler. J. Appl. Phys., **48**, 739 (1977).
- [18] F.J. Feigl, D.R. Young, D.J. DiMaria, S. Lai, J. Calise. J. Appl. Phys., **52**, 5665 (1981).
- [19] А.М. Емельянов. ФТП, **52**, 1060 (2010).
- [20] M. Aslam, R. Singh, P. Balk. Phys. Status Solidi A, **84**, 659 (1984).
- [21] P. Balk, M. Aslam, D.R. Young. Solid-State Electron., **27**, 709 (1984).
- [22] B.E. Deal, E.L. Mac Kenna, P.L. Castro. J. Electrochem. Soc., **116**, 997 (1969).
- [23] Ю.В. Федорович, Л.К. Думиш. ФТП, **6**, 2321 (1972).
- [24] P.J. Chen, R.M. Wallance. J. Appl. Phys., **86**, 2237 (1999).
- [25] Y. Nissan-Cohen, J. Shappir, D. Frohman-Bentchkowsky. J. Appl. Phys., **60** (6), 2024 (1986).
- [26] W.D. Zhang, J.F. Zhang, M.J. Lalor, D.R. Burton, G. Groeseneken, R. Degraeve. Semicond. Sci. Technol., **18**, 174 (2003).
- [27] M. Aslam. IEEE Trans. Electron. Dev., **34**, 2535 (1987).

Редактор Г.А. Оганесян

Accumulation of charges in MOS-structures with polysilicon gate at tunnel injection

O.V. Aleksandrov, A.N. Ageev, S.I. Zolotarev

St. Petersburg State Electrotechnical University „LETI“,
197376 St. Petersburg, Russia

Abstract Accumulation of charges in MOS-structures with doped and undoped polysilicon gates with Al and without Al contacts at tunnel injection of electrons from a gate and from a silicon substrate is studied. It is shown that independent of injection polarity the negative charge near a polysilicon gate, and the positive charge near a silicon substrate are collected. At large charges of injection near a silicon substrate also a negative charge is appeared. Results are described by means of numerical model in which formation of electronic traps at drawing Al contacts and generation of electronic traps at a recombination of free electrons with the trapped holes is considered.