

УДК 621.382

## СУЩЕСТВЕННАЯ РОЛЬ КОНФИГУРАЦИИ СЛОЯ ЗАТВОРНОГО ИЗОЛЯТОРА СТРУКТУР ПОЛУПРОВОДНИК-ИЗОЛЯТОР-ПОЛУПРОВОДНИК В ПРОЦЕССЕ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ

© 2005 А.Б. Милош<sup>1</sup>, В.Я. Урицкий<sup>1,2</sup>

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет («ЛЭТИ») <sup>1</sup>  
 Акционерное общество «Светлана» <sup>2</sup>

Поступила в редакцию 24.08.05

Выявлено фундаментальное влияние конфигурации затворного оксида структур кремний-диоксид кремния-поликристаллический кремний на процесс генерации электрически активных дефектов под воздействием рентгеновского излучения при различной поляризации поликремниевого затвора с электрическими контактами.

### ВВЕДЕНИЕ

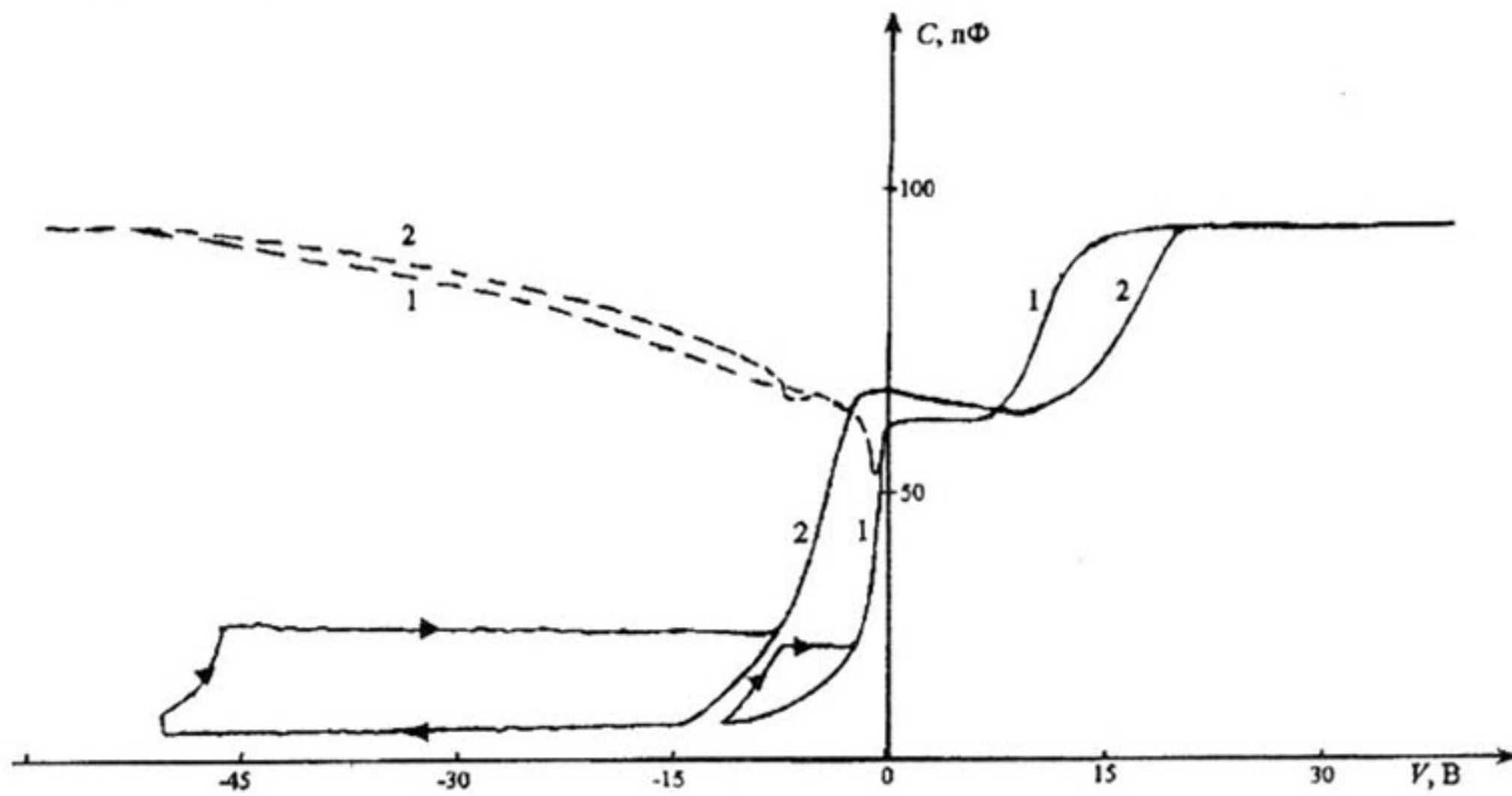
В настоящее время в производстве различных микро- и нанoeлектронных приборов и интегральных схем (в том числе и ультрабольших), широко и многообразно используются структуры монокристаллический кремний - слой диоксида кремния - слой поликристаллического кремния. Параметры микро- и нанoeлектронных приборов и интегральных схем, сформированных на указанных структурах, в значительной степени определяются их (структур) характеристиками, среди которых одну из важных ролей играют величина и центрoид локализации электрически активных дефектов (ЭАД), пространственно распределенных по толщине слоя затворного оксида и действующих как ловушки электронов и дырок. Получение этих характеристик является достаточно прецизионной экспериментальной процедурой, включающей послойное стравливание SiO<sub>2</sub>, которое может привести к искажению пространственного распределения ЭАД за счет генерации дополнительных дефектов.

Целью данной работы является исследование радиационной трансформации ЭАД в слое SiO<sub>2</sub> с верхним и нижним слоем кремния или поликристаллического кремния на базе высокочастотной вольт-фарадной (С-V) методики,

модифицированной применительно к структурам Si-SiO<sub>2</sub> с нелегированным поликристаллическим кремнием (Si<sub>pc</sub>) [1]. В качестве образцов использовались многослойные структуры Al - Si<sub>pc</sub> - SiO<sub>2</sub> - Si - Al, расположенные на термически окисленной (до толщины слоя SiO<sub>2</sub> 150 нм) кремниевой пластине, как не подвергавшиеся внешним воздействиям (контрольные структуры), так и подвергнутые воздействию рентгеновского излучения (РИ) от трубки с медным катодом, при рабочем режиме 35 кВ, и токе подаваемом на медный анод 7 мА, в течении 2 часов при одновременной их электрической поляризации с различным напряжением затвора V<sub>г</sub>: 0, -10 В и +10 В относительно базового контакта к кремниевой подложке. Доза поглощенного РИ составляла ~ 10<sup>6</sup> рад. Использовались структуры как с круговой, так и с полосковой конфигурацией затвора. Структуры с полосковой конфигурацией, имели примерно одинаковую площадь и существенно различный периметр затвора, соответственно. Фактическим материалом для исследования служили выше отмеченные экспериментальные вольт-фарадные (С-V) характеристики указанных структур "слой алюминия - монокристаллический кремний - слой оксида кремния - поликристаллический кремний - слой алюминия", представленные на рис. 1-3.



а



б

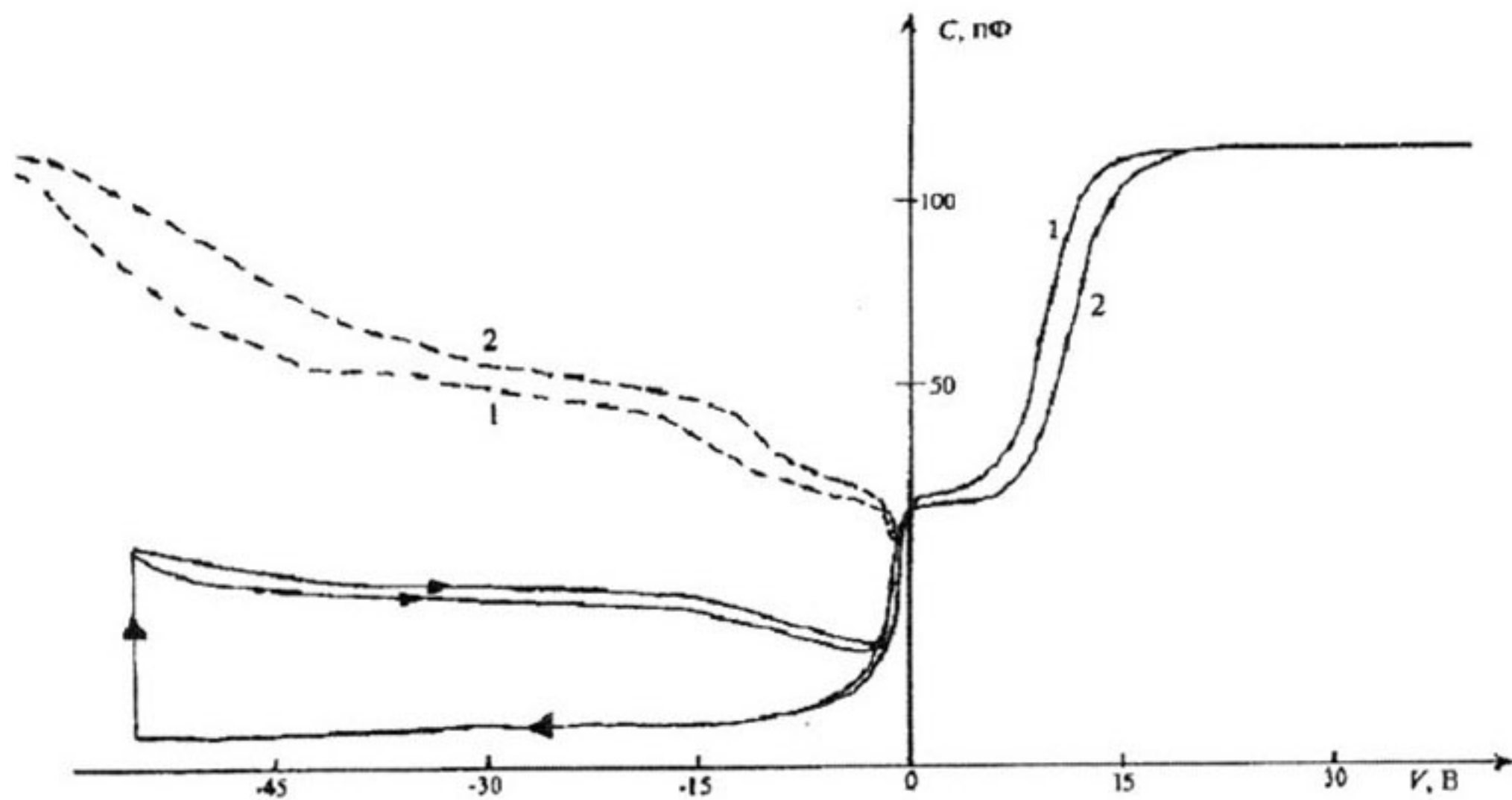


Рис. 1. Экспериментальные CV-характеристики: а - полосковой структуры ( $S=3.96 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ ,  $V_g=0 \text{ В}$ ), б - круговой структуры ( $S=4,30 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ ,  $V_g=0 \text{ В}$ ).

На рис. 1 представлены экспериментальные CV-характеристики, полосковой структуры ( $S=3.96 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ ), и круговой структуры ( $S=4,30 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ ), при напряжении на затворе в момент воздействия  $V_g = 0 \text{ В}$  (здесь и далее, цифрами 1 и 2 показаны характеристики соответственно до воздействия и после воздействия РИ, пунктиром показаны характеристики снятые при освещении образцов).

На рис. 2 представлены экспериментальные CV-характеристики, полосковой структуры ( $S=3,96 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ ), круговой структуры ( $S_g=4,30 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ ), при напряжении на затворе в момент воздействия  $V_g = +10 \text{ В}$ .

На рис. 3 представлены экспериментальные CV-характеристики, круговой структуры ( $S_g=4,30 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ ), полосковой структуры ( $S=3,96 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ ), при напряжении на затворе в момент воздействия  $V_g = -10 \text{ В}$ .

Выбор рентгеновского облучения был обусловлен его существенным влиянием на процесс генерации ЭАД в слое диоксида кремния. Хотя исследованию влияния рентгеновского излучения посвящено много работ, однако в этой, как и в остальных работах [1, 2], вопрос пространственного распределения генерированных ЭАД в слое диоксида кремния остается по существу неизученным. Кроме того, ос-

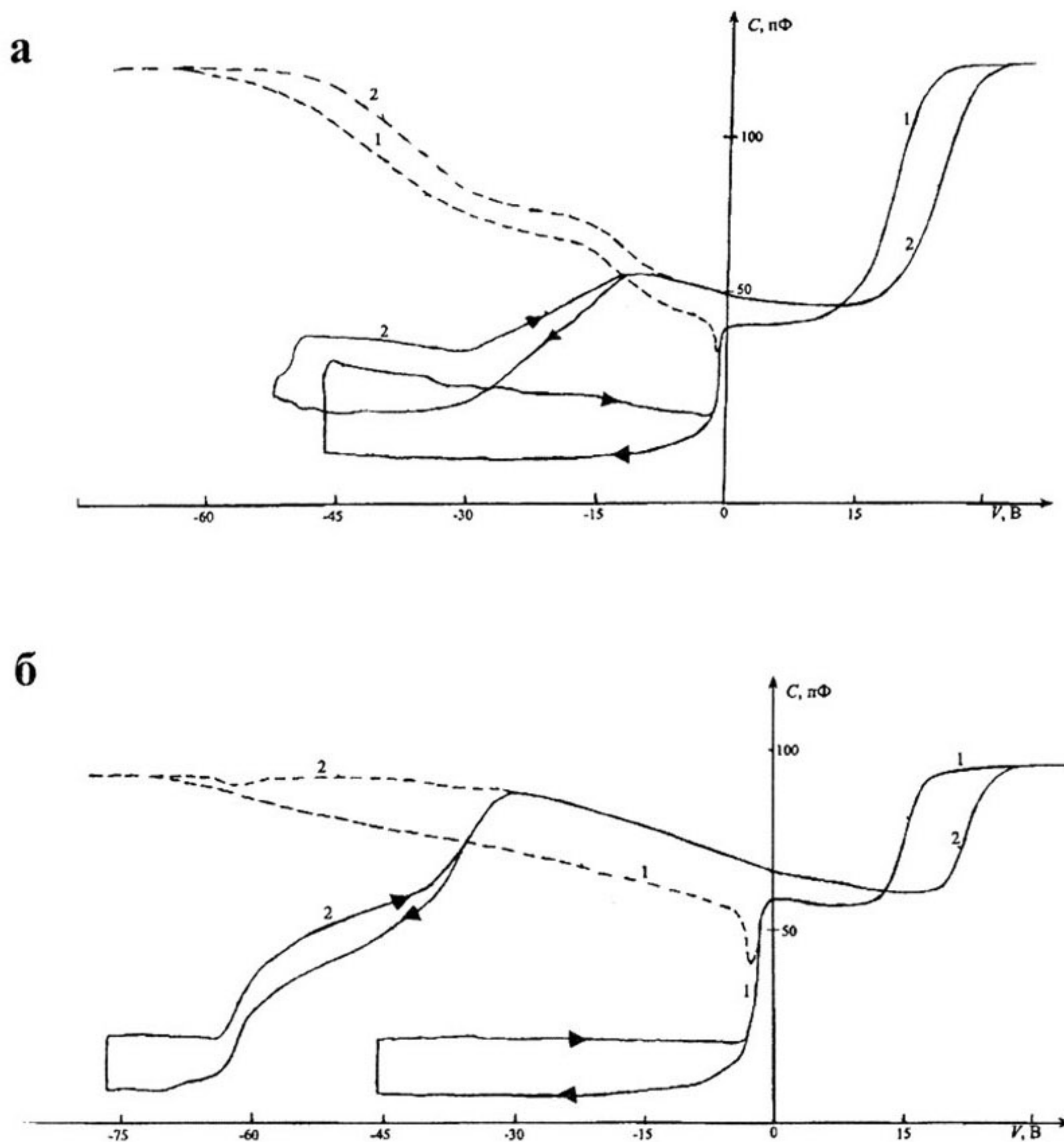


Рис. 2. Экспериментальные CV-характеристики: а - полосковой структуры ( $S=3.96 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ ,  $V_g = +10 \text{ В}$ ), б - круговой структуры ( $S_g=4,30 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ ,  $V_g = +10 \text{ В}$ ).

тавалась в тени роль конфигурации затворного оксида на процесс генерации ЭАД.

Применение разработанной методики позволяет без послойного стравливания определить два основных параметра, полностью определяющие процесс генерации: полный заряд ЭАД  $Q_i$  и центр его локализации  $Z_i$  в слое оксида и, как следствие, эффективные величины заряда ЭАД в области внутренней ( $Q_{is}$ ) и внешней ( $Q_{ig}$ ) межфазных границ (МФГ) слоя оксида. Более того, методика позволяет дополнительно определить интегральную (в определенном энергетическом диапазоне запрещенной

зоны Si или  $Si_{pc}$ ) концентрацию ловушек, локализованных на внутренней ( $N_{ss}$ ) и внешней ( $N'_{ss}$ ) МФГ слоя оксида, а также их энергетические распределения ( $D_{ss}(E)$  и  $D'_{ss}(E)$ ) в приповерхностной области. Как уже отмечалось, полученные результаты позволили выявить особенности радиационно-полевой трансформации пространственного распределения ионизированных центров в слое  $SiO_2$  и энергетического распределения электронных локализованных состояний (ловушек) в областях МФГ слоя оксида и в приповерхностных областях Si-подложки и  $Si_{pc}$  затвора.



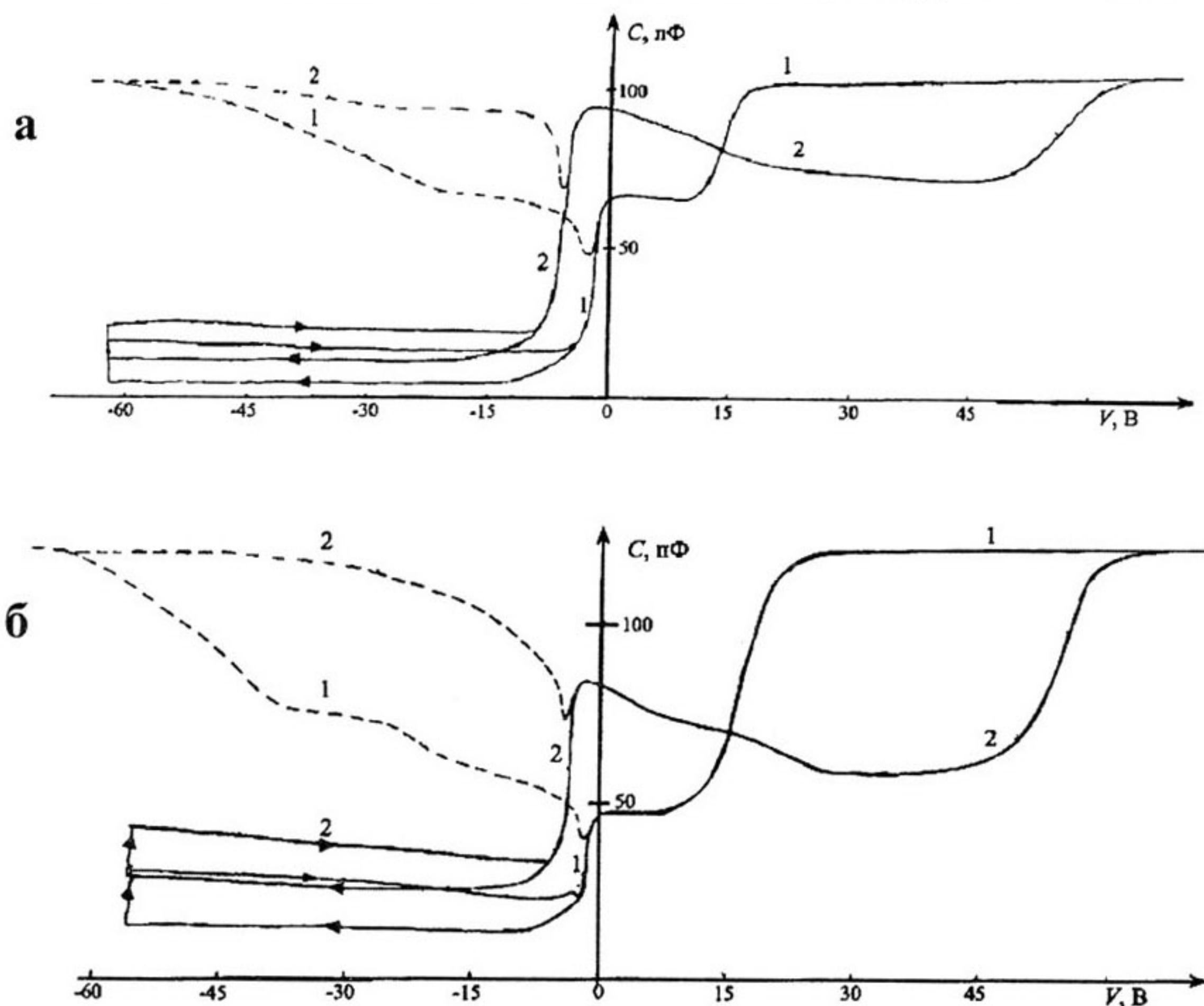


Рис. 3. Экспериментальные CV-характеристики: а - круговой структуры ( $S_G = 4,30 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ ,  $V_g = -10 \text{ В}$ ), б - полосковой структуры ( $S = 3,96 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ ,  $V_g = -10 \text{ В}$ ).

Основная задача заключалась в изучении влияния геометрической конфигурации структур на радиационно-полевую трансформацию ЭАД в слое затворного оксида и его МФГ. Необходимо было рассмотреть электрические характеристики не только межфазной границы Si-SiO<sub>2</sub>, но и межфазной границы SiO<sub>2</sub>-Si<sub>pc</sub>, что и позволило определить величину и центроид полного заряда электрически активных центров в слое затворного оксида при различных поляризациях структур.

#### ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУКЦИЯ ПОЛЕВЫХ МИКРОСТРУКТУР

В эксперименте использовались структуры Al-Si-SiO<sub>2</sub>-Si<sub>pc</sub>-Al сформированные на поверхности пластин монокристаллического кремния КЭФ-7,5. Тип проводимости - электронный, легирующий элемент - фос-

фор, удельное сопротивление 7,5 Ом·см, ориентация поверхности Si в кристаллографической плоскости (100). Перед окислением проводилась стандартная химическая обработка образцов в перекисно-аммиачной среде. Далее проводилось выращивание слоя оксида на поверхности монокристаллического кремния: образцы окислялись при температуре 1150° С в атмосфере сухого кислорода до получения слоя оксида кремния толщиной 150 нм. Затем был химически осажден из газовой фазы слой поликристаллического кремния толщиной 0,4 мкм, при температуре 820° С (время 30 мин.). Последующим этапом было осаждение слоя алюминия толщиной 0,5 мкм.

Заключительными технологическими операциями по формированию структуры является фотолитография по алюминию, травление и вжигание алюминия, которое



проводилось при 450° С в течении 5 минут в атмосфере влажного аргона.

Для создания омического контакта на обратную сторону подложки также был нанесен алюминий сплошным слоем. В итоге были сформированы структуры Si-SiO<sub>2</sub>-полиSi с круговой и полосковой конфигурацией затвора, различных площадей. Диаметр кругового затвора Ø=740 мкм, площадь затвора - S=4,30·10<sup>5</sup>мкм<sup>2</sup>, его периметр - P=2325 мкм, отношение P/S=0,005. Полосковая конфигурация затвора различалась площадью и периметром затвора, соответственно.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Применение затвора из нелегированного Si<sub>pc</sub> в многослойных структурах приводит к появлению дополнительного участка модуляции емкости на их вольт-фарадных (C-V)-характеристиках, что и позволяет оценить пространственное распределение электрически активных центров в слое оксида и на его МФГ. Однако, наличие в слое нелегированного Si<sub>pc</sub> ЭАД, связанных не только с легирующими примесями, но с межзеренными границами [2], вызывает сложности в корректном определении положения уровня Ферми E<sub>F</sub> в этом слое или объемного потенциала φ'<sub>b</sub>, отсчитанного на зонной диаграмме от уровня Ферми собственного полупроводника, и, как следствие, в корректном экспериментальном определении энергетического и пространственного распределений ЭАД.

Выбор слоя нелегированного (собственно Si<sub>pc</sub>) определяется симметричной зависимостью величины заряда и дифференциальной емкости C'<sub>sc</sub>(V'<sub>s</sub>) приповерхностной области пространственного заряда этого слоя относительно знака его поверхностного изгиба энергетических зон V'<sub>s</sub>, так что рост C'<sub>sc</sub>(V'<sub>s</sub>) будет наблюдаться при обогащении как электронами, так и дырками. Следовательно, минимальная высокочастотная емкость C'<sub>scmin</sub> будет соответствовать V'<sub>s</sub> ≈ 0 (условию плоских зон на поверхности слоя собственного Si<sub>pc</sub>). Это позволяет по значению напряжения на Si<sub>pc</sub>-затворе V<sub>g</sub> = V'<sub>FB</sub> = V, приводящего к минимальной емкости:

$1/C_i + 1/C'_{FB} = C'_{min} = (C_i C'_{scmin}) / (C'_{scmin} + C_i)$  на участке высокочастотной C-V-характери-

стики, вызванном модуляцией емкости C'<sub>sc</sub>(V'<sub>s</sub>), определить эффективный заряд ЭАД, локализованных во внешней области оксида Q<sub>ig</sub>, согласно следующему выражению:

$$Q_{ig} = \int_0^{t_i} \rho(dz) z t_i^{-1} dz = Q_i Z_i t_i^{-1} = (V'_{FB} - V'_s + \phi_{g-sub}) C_i,$$

где  $Q_i = \int_0^{t_i} \rho(z) dz$  и  $Z_i = Q_i^{-1} \int_0^{t_i} \rho(z) dz$  - соответ-

ственно величина и центр тяжести полного заряда электрически активных дефектов, распределенных с плотностью ρ(z) в слое затворного изолятора (координата z в этом слое изолятора отсчитана от его внутренней межфазной границы); (φ<sub>g-sub</sub> - контактная разность потенциалов Si<sub>pc</sub>-затвор - кремниевая подложка n-типа; V'<sub>s</sub>\* - значение поверхностного изгиба зон кремниевой подложки при V = V'<sub>FB</sub>, определяемое по значению емкости C'<sub>sc</sub>\* = C<sub>sc</sub>(V<sub>s</sub> = V'<sub>s</sub>\*); C<sub>i</sub> - удельная емкость затворного изолятора толщиной t<sub>i</sub>. При этом емкость структуры при V = V'<sub>FB</sub> будет равна:

$$C = C'_{FB} = C'_{min} = C'_{sc} C'_{scmin} / (C'_{sc} C_i + C'_{scmin} C_i + C'_{sc} C'_{scmin}), \text{ где } C'_{sc} = C_{sc}(V'_s).$$

В случае относительно толстых слоев оксида величина V'<sub>s</sub>\*, как правило, незначительна по сравнению с падением напряжения в таком слое оксида, так что ей можно пренебречь.

В слое Si<sub>pc</sub>-затвора объемная концентрация ловушек (N'<sub>i</sub>), локализованных на межзеренных границах в этом слое, может быть определена следующим образом:

$$N'_i = \frac{kT}{q} \cdot \frac{C_i^2}{\epsilon_s \epsilon_0 q} \cdot \frac{C_{min}^2}{(C_i - C_{min})^2}.$$

Тогда интегральная поверхностная концентрация ловушек, локализованных на межфазной границе полиSi-оксид и в прилегающей к ней области Si<sub>pc</sub>-затвора и перезаряжающихся в определенном диапазоне напряжений затвора ΔV и, соответственно, в определенном диапазоне поверхностных изгибов зон Si<sub>pc</sub>-затвора ΔV'<sub>s</sub>, приводящих к модуляции емкости структуры за счет изменения C'<sub>sc</sub>(V'<sub>s</sub>), может быть представлена в следующем виде: N'<sub>ss</sub> = C<sub>i</sub>(ΔV - ΔV<sub>th</sub>)/q<sup>-1</sup>, где ΔV<sub>th</sub> - расчетное значение ΔV для идеального случая отсутствия электрически активных



## СУЩЕСТВЕННАЯ РОЛЬ КОНФИГУРАЦИИ СЛОЯ ЗАТВОРНОГО ИЗОЛЯТОРА СТРУКТУР ПОЛУПРОВОДНИК-ИЗОЛЯТОР-ПОЛУПРОВОДНИК В ПРОЦЕССЕ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ

центров в слое затвора. Энергетическое распределение электрически активных центров в запрещенной зоне поли-Si затвора  $D'_{ss}(E')$  можно определить дифференцированием зависимости  $N'_{ss}$  от  $V'_s$  в диапазоне  $\Delta V'_s$ .

В том случае, когда области модуляции емкости многослойных структур, определяемые изменением  $C_{ss}(V_s)$  и  $C'_{sc}(V_i)$ , отделены друг от друга на  $C-V$  характеристике по оси напряжений из-за действия  $\phi_{g-sub}$  и  $Q_i$ , возникает возможность четко определить у структур со слаболегированной подложкой напряжение затвора  $V = V_{int}$ , при котором  $V_s = -\phi_b$ , что позволяет вычислить эффективный заряд электрически активных центров в области оксида, примыкающей к межфазной границе Si-оксид:

$$Q_{is} = Q_i(t_i - Z_i) d_i^{-1} = -(V_{int} + V_s^* + \phi_{g-sub} - V_s) C_i - Q_{sc}(V_s = -\phi_b),$$

где  $V_s^*$  - значение поверхностного изгиба зон при  $V = V_{int}$ , определяемое по значению емкости  $C_{sc}^* = C'_{sc}(V_s = V_s^*)$ ;  $Q_{sc}(V_s = -\phi_b)$ , - заряд приповерхностной области подложки при  $V_s = -\phi_b$ . С учетом того, что при использовании нелегированного поликремния  $\phi_{g-sub} = \phi'_b - \phi_b = -\phi_b$ , а  $V_s = -\phi_b$ , получим:

$$Q_{is} = Q_i(t_i - Z_i) t_i^{-1} = -(V_{int} - V_s^*) C_i - Q_{sc}(V_s = -\phi_b).$$

Выбор именно такого поверхностного изгиба зон кремниевой подложки, определяется низкой поверхностной концентрацией как электронов, так и дырок (при  $V_s = -\phi_b$ ), и, соответственно, минимальным вкладом заряда ловушек, локализованных непосредственно на внутренней межфазной границе оксида, в величину эффективного заряда ионизированных центров  $Q_{is}$ . Емкость многослойной структуры при  $V = V_{int}$  определяется как

$$C = C_{int} = C_{sc}^* C_i C_{scint} / (C_{sc}^* C_i + C_{scint} C_i + C_{sc}^* C_{scint}^*),$$

где  $C_{scint} = C_{sc}(V_s = -\phi_b)$ .

Определение интегральной поверхностной концентрации ( $N_{ss}$ ) электрически активных центров, локализованных на межфазной границе кремниевая подложка-оксид, и энергетического распределения  $D_{ss}(E)$  осуществлялось аналогично подходу для межфазной границы поли-Si - слой оксида.

В том случае, когда диапазоны напряжений затвора, соответствующие модуляции емкости многослойных структур, вызванной модуляцией емкостей  $C_{sc}$  и  $C'_{sc}$ , существенно перекрывались, то для определения пространственного и энергетического распределения электрически активных центров в слое оксида использовались также структуры с сильнолегированной подложкой или создавался источник неосновных носителей заряда в периферийных областях подложки, за счет фотоактивного поглощения светового излучения. Это приводило к высоким значениям  $C_{sc}$  и, как следствие, к появлению участка модуляции емкости структуры, связанного с  $C'_{sc}(V'_s)$ , что и позволяло определить  $V'_{FB}$ ,  $Q_{ig}$ ,  $Q_{is}$ ,  $N'_t$  и  $N'_{ss}$ .

Выражения для определения полной величины и центроида заряда электрически активных центров в слое затворного изолятора:

$$Q_i = Q_{is} + Q_{ig} = [(V'_{FB} - V_{int}) - (\phi_b - V_s^* + V_s^*)] C_i - Q_{sc}(V_s = -\phi_b),$$

$$Z_i = t_i (V'_{FB} + \phi_{g-sub} - V_s^*) / \{[(V'_{FB} - V_{int}) - (V_s^* + V_s^* + \phi_b)] - C_i^{-1} Q_{sc}(V_s = -\phi_b)\},$$

полученные при анализе CV-характеристик данные сведены в таблицу 1.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наибольшая генерация донорных ионизированных дефектов в слое затворного оксида (которая определяет величину заряда  $Q_i$ ) и соответственно рост концентрации поверхностных состояний, наблюдается в области внутренней МФГ Si-SiO<sub>2</sub> при положительном потенциале на затворе в процессе воздействия РИ, а менее заметный рост в области внешней МФГ Si<sub>pc</sub>-SiO<sub>2</sub> происходит при отрицательном потенциале на затворе структуры в процессе воздействия. Причем этот заряд  $Q_i$  имеет положительную полярность, как без воздействия, так и с воздействием РИ и по величине слабо зависит от потенциала на затворе в момент воздействия.

Впервые неразрушающим методом установлено, что центр оид локализации этого заряда  $Z/t_i$  изначально расположен ближе к внешней МФГ Si<sub>pc</sub>-SiO<sub>2</sub>. При воздействии РИ с отрицательным потенциалом на зат-



воре ( $V_g$ ) происходит значительное увеличение заряда окисла  $Q_i$ , при этом его центроид сдвигается ближе к МФГ полиSi-SiO<sub>2</sub>. При воздействии РИ с нулевым потенциалом  $V_g$  величина заряда  $Q_i$  увеличивается, а центроид локализации смещается к внутренней МФГ Si-SiO<sub>2</sub>, и располагается приблизительно в середине толщины подзатворного оксида SiO<sub>2</sub>. При наличии воздействия РИ с положительным потенциалом на затворе, также происходит увеличение величины заряда  $Q_i$ , а его центроид смещается к внутренней МФГ Si-SiO<sub>2</sub>.

Слабая зависимость изменения полного заряда ЭАД  $Q_i$  от полярности напряжения  $V_g$  указывает на схожую природу процессов генерации ЭАД в слое оксида у его внутренней и внешней МФГ.

Четко установлено существенное влияние геометрии затвора на дефектообразование. Из расчетной таблицы видно, что наибольшая величина встроенного заряда  $Q_i$  наблюдается у круговой конфигурации

затвора. Данное наблюдение относится к рассчитанным значениям, как без воздействия, так и при облучении РИ независимо от напряжения смещения при воздействии. Одновременно выявлена зависимость интенсивности генерации донорных дефектов от соотношения периметр/площадь (P/S) структуры. Из расчетов видно, что при наибольшем значении P/S наблюдается наименьшее значение  $Q_i$ . Это явление можно связать с процессами генерации и аннигиляции активных дефектов в слое затворного изолятора и на его межфазных границах с верхним и нижним кремниевыми затворами. На эти процессы влияет водород, находящийся в слое оксида. Несвязанный водород в процессе радиационного облучения освобождается и латеральной диффузией уходит на периферийные области и особенно на угловые. Таким образом, у структур с более высоким значением P/S генерация дефектов протекает слабее, чем у структур с наименьшим значением P/S.

Таблица 1

Результаты анализа C-V-характеристик

Конфигурация затвора	$S \cdot 10^{-3}$ , см <sup>2</sup>	P/S, мкм <sup>-1</sup>	$V_g$ при РИ, В	$V'_{FB} = V_i(V_s=0)$ , В	$V_{FB}$ , В	$Q_i \cdot 10^{-6}$ , Кл/см <sup>2</sup>	Zi/di, отн. ед.
Круговая	4,30	0,005	-	3,21	-1,93	0,11	0,63
Круговая	4,30	0,005	0	9,21	-7,93	0,37	0,54
Круговая	4,30	0,005	+10	7,29	-18,21	1,27	0,29
Круговая	4,30	0,005	-10	27,08	-4,79	1,19	0,85
Полосковая	3,96	0,180	+10	12,00	-35,14	0,65	0,25
Полосковая	3,96	0,180	-10	23,54	-5,63	0,61	0,81
Полосковая	3,96	0,065	-	2,14	-1,50	0,10	0,59
Полосковая	3,96	0,065	0	3,00	-2,14	0,14	0,58
Полосковая	3,96	0,065	+10	10,29	-13,07	0,74	0,44
Полосковая	3,96	0,065	-10	17,71	-3,96	0,78	0,82
Полосковая	3,96	0,020	+10	11,57	-33,00	1,13	0,26
Полосковая	3,96	0,020	-10	40,00	-6,04	0,94	0,87

**СУЩЕСТВЕННАЯ РОЛЬ КОНФИГУРАЦИИ СЛОЯ ЗАТВОРНОГО ИЗОЛЯТОРА СТРУКТУР ПОЛУПРОВОДНИК-ИЗОЛЯТОР-ПОЛУПРОВОДНИК В ПРОЦЕССЕ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ**

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир. 1984.

2. Попов В.П., Антонова А.И., Французов А.А., Сафронов Л.Н., Феофанов Г.Н., Наумова О.В., Киланов Д.В. Свойства структур и приборов на кремний-на-изоляторе // ФТП. 2001. Т. 35. Вып. 9. С. 1075-1083.

3. Урицкий В.Я. Тестовая МДП-структура. Авторское свидетельство 884509 (1980).

4. Colinge J.P. Trends in silicon on insulator

technology // Microelectronic Engineering.

5. Johnston A.H. Radiation effects in advanced microelectronics technologies// IEEE transactions on nuclear science. 1998. V.45. № 3. P. 1339.

6. Uritsky V.Ya., Krylov A.P. Influence of interfaces on electrical characteristics formation in monocrystalline silicon-noncrystalline ultrathin oxide – polycrystalline silicon structures // Microelectronics Reliability. 2000. V. 40. P. 605-608.