

22. Parrillo L. C., Pfister J. R., Lin J.-H. et al. Disposable polysilicon LDD-spacer technology // IEEE Trans. Electron. Dev.—1991.—38, N 1.—P. 39.
23. Van Overstraeten R. J., Mertens R. P. Heavy doping effects in silicon // Sol. State Electron.—1987.—30, N 11.—P. 1077.
24. Lewis A. G., Martin R. A., Huang T.-Y. et al. Latchup performance of retrograde and conventional *n*-well CMOS technologies // IEEE Trans. Electron. Dev.—1987.—ED-34, N 10.—P. 2156.
25. Krieger G., Sicora R., Cuevas P. P. et al. Moderately doped NMOS(M-LDD)-hot electron and current drive optimization // IEEE Trans. Electron. Dev.—1991.—38, N 1.—P. 121.
26. Kakumu M., Kinugawa M., Hashimoto K. Choice of power supply voltage for half-micrometer and lower submicrometer CMOS devices // IEEE Trans. Electron. Dev.—1990.—37, N 5.—P. 1334.
27. Yamaguchi T., Morimoto S., Kawamoto G. H. et al. Process and device performance of 1- μ m-channel *n*-well CMOS technology // IEEE Trans. Electron. Dev.—1984.—ED-31, N 2.—P. 205.
28. Van Overstraeten R. J., Declerck G. J., Muls P. A. Theory of the MOS transistor in weak inversion // IEEE Trans. Electron. Dev.—1975.—ED-22, N 5.—P. 282.

Поступила в редакцию 7 мая 1992 г.

УДК 621.382.323 : 53

В. И. Кольдяев, Н. Л. Шварц

(Новосибирск)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАРЯДА ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ И ВСТРОЕННОГО ЗАРЯДА НА СТАЦИОНАРНЫЕ ВАХ *n*-КАНАЛЬНЫХ МДПТ

Дан краткий обзор представлений о причинах деградации короткоканальных МДП-транзисторов, подвергавшихся воздействиям сильных электрических полей (стрессов). Моделируется влияние однородно и неоднородно распределенных по длине канала поверхностных состояний (ПС) и фиксированного заряда Q_{ss} на стационарные ВАХ МДП-транзисторов. Расчеты проводились по усовершенствованной программе двумерного численного моделирования MOS2, использующей диффузионно-дрейфовое приближение и учитывающей заряд на ПС. На основании численного моделирования предложена методика экспериментального исследования определенных ВАХ исходного и деградированного МДПТ, необходимых для идентификации последствий стресса.

Введение. В последние годы вновь усилился интерес к влиянию заряда поверхностных состояний (ПС) на характеристики МДП-транзисторов (МДПТ) в связи с проблемами деградации короткоканальных транзисторов [1—5]. Деградация характеристик МДПТ вызывается горячими носителями и является одним из серьезных препятствий дальнейшего увеличения интеграции элементов СБИС [5]. Деградация проявляется в сдвиге порогового напряжения на величину ΔV_t , уменьшения крутизны g_m в линейной области или в области насыщения подвижности, уменьшении тока стока в режиме насыщения I_{ds} на величину ΔI_{ds} и изменении на ΔS крутизны подпорогового тока, характеризующего наклон ВАХ в режиме подпороговой проводимости $\left(\frac{\partial V_g}{\partial I_d}\right)$ [2, 3]. Экспериментально была установлена почти линейная зависимость между параметрами ΔV_t , $\Delta I_{ds}/I_{ds0}$, $\Delta g_m/g_{m0}$, ΔS , поэтому качественно описать деградацию характеристик МДПТ можно, изучая изменения любого из этих параметров [2].

В результате длительного воздействия на МДПТ сильных электрических

1. Необходимо выделить два принципиально разных процесса образования дефектов: генерацию ловушек в SiO_2 и генерацию поверхностных состояний на границе $\text{Si} - \text{SiO}_2$.

2. Процессы дефектообразования протекают не по всей длине канала, а в некоторых областях в зависимости от соотношений плотности горячих электронов и дырок вдоль канала, участвующих в процессах образования дефектов.

3. В зависимости от соотношений между напряжениями на стоке и на затворе во время стресса в областях под затвором преобладает тот или иной тип разогретых носителей, определяющих, в свою очередь, тип образующихся дефектов — ПС, отрицательный или положительный встроенный заряд.

4. При функционировании МДПТ, неоднородно распределенные вдоль канала ПС, и ловушки в SiO_2 , образованные под действием стресса, изменяют свое зарядовое состояние и влияют на ВАХ МДПТ, т. е. приводят к деградации характеристик транзистора.

5. Неоднородное пространственное распределение дефектов вдоль границы раздела приводит к несимметрии ВАХ, измеренных при нормальном включении, когда полярность приложенного к стоку напряжения V_d при стрессе совпадает с полярностью V_d при измерении ВАХ (при этом область дефектов сосредоточена у стока) и при обратном включении, когда V_d при измерении имеет знак, противоположный V_d при стрессе (сток и исток меняются местами, и область дефектов оказывается расположенной у истока).

Постановка задачи и алгоритм расчета ВАХ с учетом ПС. Локализация зарядов Q_{ss} и Q_{si} в области стока в современных МДПТ, подвергающихся стрессам, затрудняет описание ВАХ аналитическими моделями [8]. Весьма эффективным для понимания и интерпретации ВАХ МДПТ, подвергавшихся стрессам, оказывается двумерное численное моделирование [9, 10].

С учетом особенностей формирования области дефектообразования в МДПТ, подвергавшихся стрессам, ниже сформулирована постановка задачи о влиянии заряда поверхностных состояний Q_{si} и фиксированного заряда Q_{ss} на границе $\text{Si} - \text{SiO}_2$ на стационарные ВАХ транзистора. При рассмотрении заряда Q_{si} учитывалась не только зависимость ПС от координаты, но и энергетический спектр ПС. Все расчеты проводились с использованием программы двумерного численного моделирования MOS2S, представляющей собой доработанный вариант программы MOS2 [11], реализующей решение уравнений Пуассона и переноса для обоих типов носителей в диффузионно-дрейфовом приближении для области $AFGH$ (рис. 1):

$$\text{div}j_n = -q(G - R), \quad (1)$$

$$\text{div}j_p = q(G - R), \quad (2)$$

$$\Delta\varphi = -q/\epsilon\epsilon_0(p - n + D_{op}), \quad D_{op} = N_d - N_a, \quad (3)$$

где j_n и j_p — электронная и дырочная компоненты плотности тока; $(G - R)$ — генерационно-рекомбинационный член:

$$j_n = -q\mu_n n \nabla\varphi + qD_n \nabla n, \quad j_p = -q\mu_p p \nabla\varphi - qD_p \nabla p. \quad (4)$$

Встроенный заряд Q_{ss} и заряд на поверхностных состояниях Q_{si} вводятся в уравнение Пуассона через граничное условие на BE :

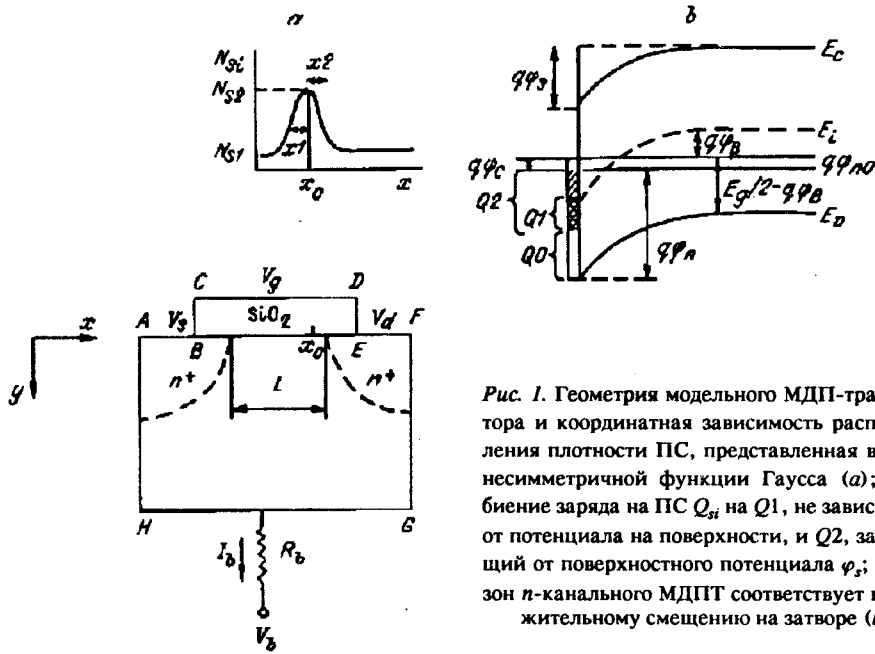


Рис. 1. Геометрия модельного МДП-транзистора и координатная зависимость распределения плотности ПС, представленная в виде несимметричной функции Гаусса (а); разбиение заряда на ПС Q_{si} на $Q1$, не зависящий от потенциала на поверхности, и $Q2$, зависящий от поверхностного потенциала φ_s ; изгиб зон n -канального МДПТ соответствует положительному смещению на затворе (б)

$$\epsilon_{SiO_2} \epsilon_0 E_{\perp}(x) \Big|_{Si} - \epsilon_{Si} \epsilon_0 E_{\perp}(x) \Big|_{SiO_2} = Q_{si}(x) + Q_{si}(x), \quad (5)$$

где $E_{\perp}(x)$ — компонента электрического поля, перпендикулярная границе раздела Si — SiO₂.

Считая энергетический спектр плотности ПС $D_{si}(E)$ заданным и используя статистику Ферми — Дирака, можно записать выражение для определения заряда Q_{si} :

$$Q_{si}(\varphi_s, x) = \mp q \int_0^{E_g} \frac{D_{si}(x, E) dE}{1 + \exp\left(\mp \frac{q \varphi_f(\varphi_s) - E}{kT}\right)}, \quad (6)$$

где «-» соответствует n -канальному, а «+» — p -канальному транзистору.

Интегрирование по энергии проводится от потолка валентной зоны до дна зоны проводимости. φ_f — значение уровня Ферми электронов (дырок), отсчитанное от потолка валентной зоны, — зависит от изгиба зон на поверхности (см. рис. 1):

$$\varphi_f = \frac{E_g}{2} - \varphi_B - \varphi_c + \varphi_s, \quad (7)$$

где φ_s — значение потенциала на границе раздела Si — SiO₂; φ_B — значение уровня Ферми, отсчитанное от середины запрещенной зоны в объеме полупроводника; φ_c — разность значений неравновесного и равновесного уровней Ферми ($\varphi_c = \varphi_f(V_d \neq 0) - \varphi_f(V_d = 0)$).

Удобно переписать граничное условие на BE , разбив заряд на поверхностных состояниях на две части (см. рис. 1, б): $Q1$ и $Q2$. При этом $Q1$ не зависит от потенциала на поверхности и эквивалентен действию встроенного заряда:

$$Q1_{si}(x) = Q_{si}(x, \varphi_{si}) - Q_{si}(x, \varphi_{s0}), \quad (8)$$

а заряд $Q2$ зависит от потенциала на поверхности φ_s :

$$Q2_{si}(x, \varphi_s) = Q_{si}(x, \varphi_s) - Q_{si}(x, \varphi_{s0}), \quad (9)$$

где φ_{si} — значение поверхностного потенциала, соответствующее такому изгибу зон, когда вблизи поверхности происходит пересечение уровня Ферми с собственным уровнем E_i ; $\varphi_{s0} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_B(x)}{n_i}$ — значение поверхностного потенциала, при котором уровень Ферми на поверхности совпадает с уровнем Ферми в объеме, т. е. зоны становятся плоскими ($Q_{si}(x, \varphi_{s0}) = Q_0$).

Появление заряда $Q1_{si}$ связано с предположением, что ПС, расположенные в верхней половине запрещенной зоны, акцепторные, а в нижней — донорные. Так как для донорных состояний лежащие ниже уровня Ферми ловушки будут нейтральными, а выше — положительно заряженными (для акцепторных состояний нейтральными окажутся ПС, расположенные выше φ_f , и отрицательно заряженными — нижележащие), то для случая n -канального транзистора, изображенного на рис. 1, заряд $Q1$ имеет положительный знак. Для p -канального транзистора $Q1$ будет отрицательным. Как следует из (8), при заданной плотности ПС величина заряда $Q1$ будет зависеть от уровня легирования подложки (через Q_0).

Зависимость плотности ПС от координаты x (вдоль границы раздела) и энергии (по ширине запрещенной зоны) может быть различной и определяется причинами и условиями возникновения ПС. Поэтому при численном моделировании была использована достаточно общая форма представления зависимости плотности ПС от энергии и координаты:

$$D_{si}(x, E) = D1_{si}(x) + D2_{si}(x, E). \quad (10)$$

При этом разделяются части, зависящие ($D2_{si}$) и не зависящие ($D1_{si}$) от энергии, но обе предполагаются зависящими от координаты. Такая форма представления ПС позволяет охватить все возможные варианты в распределении ПС, измеряемые экспериментально [12].

Для координатной зависимости плотности ПС в расчетах использовалась аппроксимация в форме несимметричной функции Гаусса:

$$D_{si}^{(1,2)} = N_{si} + (N_{s2} - N_{s1})e^{-((x-x_0)/\sigma_x)^2}, \quad (11)$$

где $\sigma_x = x1$ при $x < x_0$ и $\sigma_x = x2$ при $x \geq x_0$.

Из (11) легко получить модель МДПТ на основе ступенчатой функции для аппроксимации плотности ПС от x : $x1 \rightarrow 0, x2 \rightarrow \infty$ — повышенная плотность ПС сосредоточена у стока; $x1 \rightarrow \infty, x2 \rightarrow 0$ — повышенная плотность ПС сосредоточена у истока.

Энергетическая зависимость плотности ПС может быть достаточно сложной и, строго говоря, точно не известна. В представленных ниже расчетах использовался упрощенный вариант спектра $D_{si}(E)$, симметричный относительно середины запрещенной зоны:

$$D_{si}(E) = D1_{si}(x) + (D2_{si}(x) - D1_{si}(x)) \frac{\exp\left(\frac{E - 0,5E_g}{E_1} - \frac{E_g}{2E1}\right) - \exp\left(-\frac{E_g}{2E1}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{E_g}{2E1}\right)}. \quad (12)$$

Такое представление спектра плотности ПС, хотя и не позволяет учесть наблюдаемые при некоторых условиях стресса несимметричные пики в энергетической зависимости плотности состояний [12], но может быть легко модифицировано для учета этой несимметрии. В целом эта аппроксимация отражает основные особенности спектра ПС: резкое увеличение плотности при приближении к краям валентной зоны и зоны проводимости. Изменяя параметры $D1, D2$ и $E1$, можно проследить за влиянием формы спектра на характеристики МДПТ.

Самосогласованное решение уравнения переноса, наряду с уравнением Пуассона, содержащим в граничных условиях заряд на ПС, автоматически позволяет учесть изменение подвижного заряда в инверсионном слое канала

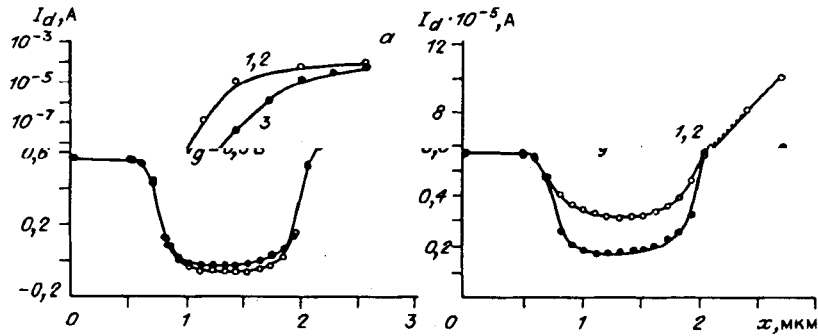


Рис. 2. Параметры рассчитываемого транзистора: $d_{\text{SiO}_2} = 0,025$, $x_j = 0,3$, $L_g = 1,75$ мкм ($L_k = 1,23$ мкм), $W = 20$ мкм, $N_a = 10^{16}$ см $^{-3}$.
 а — зависимость тока стока от напряжения на затворе, рассчитанная при $V_d = 0,1$ В: 1 — исходный МДПТ ($N_{\text{Si}} = 0$) и транзисторы с равномерно распределенной вдоль границы раздела плотностью ПС; 2 — $N_{\text{Si}} = 10^{10}$ см $^{-2}$ · эВ $^{-1}$; 3 — $N_{\text{Si}} = 10^{12}$ см $^{-2}$ · эВ $^{-1}$; б — распределение потенциала вдоль поверхности в МДПТ с различной плотностью ПС, равномерно распределенных вдоль границы раздела при $V_d = 0,1$ В в области обеднения ($V_g = 0,5$ В) и слабой инверсии ($V_g = 1$ В)

за счет перехода части этого заряда на ПС и проследить за изменением ВАХ в широком диапазоне напряжений, не ограничиваясь околороговой областью. Представленная выше постановка задачи позволяет проводить расчеты ВАХ как для n -канального, так и для p -канального транзистора. Ниже будут представлены результаты численного моделирования только n -канальных МДПТ, так как эти транзисторы сильнее подвержены деградации, чем p -МДПТ [3].

Результаты численного моделирования. На рис. 2 представлены результаты расчета зависимостей $I_d(V_g)$ при $V_d = 0,1$ В МДПТ без ПС на границе раздела Si — SiO $_2$ и с равномерно распределенной плотностью ПС вдоль канала. При $V_g = 0,5$ В, соответствующем обеднению поверхности, присутствие ПС приводит к незначительному увеличению тока I_d . Этот эффект связан с наличием ненулевого заряда $Q1$ (8), т. е. проявлением положительного заряда на донорных состояниях при переходе в область обеднения, где практически отсутствует заряд электронов на ПС. На рис. 2 видно понижение потенциального барьера для электронов при $V_g = 0,5$ В при высокой плотности N_{Si} по сравнению со случаем отсутствия ПС. Однако уже при переходе к слабой инверсии ($V_g = 1$ В) заряд $Q2$ становится больше $Q1$ и рост N_{Si} приводит к увеличению потенциального барьера для носителей и соответственно уменьшению тока I_d .

На рис. 3 продемонстрирована несимметрия ВАХ МДПТ, содержащих повышенную плотность ПС, сосредоточенных в области p — n -перехода стока (режим нормального включения) или истока (режим обратного включения). Отрицательный заряд Q_{Si} в режиме обратного включения создает в области истока дополнительный барьер для носителей, уменьшая ток стока. Когда ПС сосредоточены у стока, отрицательный заряд Q_{Si} при больших V_d отсутствует из-за наличия в этом месте области обеднения.

На рис. 4 представлена зависимость порогового напряжения от напряжения на стоке, полученная из рассчитанных кривых $\lg I_d(V_g)$ при различных значениях V_d для исходного МДПТ и для транзистора с ПС, расположенными у стока. Пороговое напряжение в данном случае определялось по уровню тока

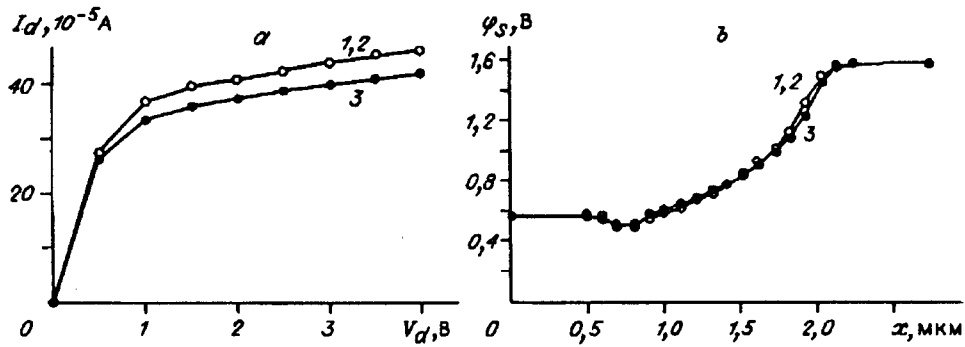


Рис. 3. Характеристики исходного МДПТ ($N_{si} = 0$) (1) и транзистора с равномерно распределенной плотностью ПС $NS1 = 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ и повышенной плотностью ПС $NS2 = 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ в форме ступеньки, локализованной у стока (2) и у истока (3) на расстоянии 0,1 мкм от $p-n$ -переходов в области сильной инверсии $V_g = 2 \text{ В}$.

Параметры транзистора те же, что и на рис. 2: а — $I_d(V_d)$; б — распределение потенциала вдоль поверхности при $V_d = 1 \text{ В}$

10^{-6} А/мкм . При некотором напряжении $V_d = V_{d_{кр}}$ меняется характер зависимости $V_i(V_d)$ ($V_{d_{кр}} \geq 0,15 \text{ В}$). Это связано с тем, что при $V_d < V_{d_{кр}}$ пороговое напряжение определяется участком под затвором, содержащим заряд на ПС, но по мере увеличения V_d ОПЗ расширяется и, когда область у стока перестает контролировать ток в канале, V_i определяется характеристиками бездефектной области. Из этого графика можно определить $V_{d_{кр}}$ и тем самым ширину области обеднения, соответствующую переходу от дефектной области к бездефектной. На рис. 4 представлена также зависимость $V_i(V_d)$ для исходного транзистора. Слабое увеличение V_i при малых напряжениях на стоке связано со способом определения V_i (по уровню тока). Расчеты показали, что если размер области дефектообразования много меньше толщины ОПЗ стока, то влияние заряда $Q_{ss}^-(x)$, расположенного у стока, на подпороговые ВАХ подобно действию Q_{si} .

Если сосредоточенный у стока положительный заряд $Q_{ss}^+(x)$ не проявляется на подпороговых характеристиках, то он заметно влияет на обычные зависимости $I_d(V_d)$. На рис. 5 представлены ВАХ, рассчитанные для исходного транзистора и для транзисторов с положительным и отрицательным встроенными зарядами, сосредоточенными у стока или у истока. Положительный локализованный заряд приводит к увеличению тока за счет эффективного уменьшения длины канала (эффективное расширение n^+ -области у стока или у истока), а отрицательный — к уменьшению тока за счет увеличения порогового напряжения. Различие ВАХ исходного МДПТ и ВАХ транзистора, содержащего заряд Q_{ss} , локализованный у стока, сохраняется и в области насыщения в отличие от дефектов в виде ПС (ср. рис. 5 и рис. 3). На рис. 5 наблюдается пове-

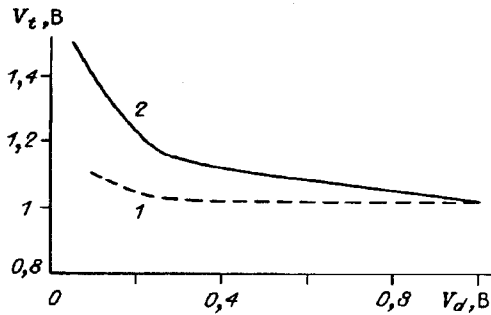


Рис. 4. Зависимость порогового напряжения, определенная по уровню тока 10^{-6} А/мкм , от напряжения на стоке для исходного МДПТ (1) и МДПТ с ПС, локализованными у стока (2), в форме ступеньки с плотностью $10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ на расстоянии 0,15 мкм от $p-n$ -перехода.

Параметры: $d_{\text{SiO}_2} = 0,025$, $W = 10$, $x_j = 0,22$, $L_g = 1,3 \text{ мкм}$
($L_k = 1 \text{ мкм}$), $N_a = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$

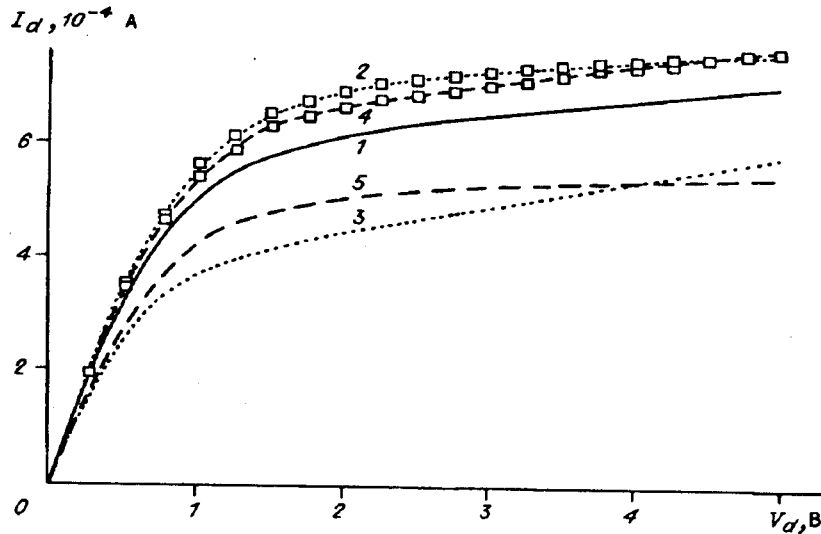


Рис. 5. $I_d(V_d)$ при $V_g = 3$ В исходного МДПТ и транзистора, содержащего дефекты в виде отрицательного Q_{ss}^- или положительного Q_{ss}^+ зарядов, локализованных у стока (N) или у истока (R) в форме симметричной функции Гаусса с $\sigma = 0,1$ мкм с максимумом N_{ox} на расстоянии $0,2$ мкм от $p-n$ -перехода:

1 - $Q_{ss}^- = 0$, 2 - $Q_{ss}^+(N)$, 3 - $Q_{ss}^-(N)$, 4 - $Q_{ss}^+(R)$, 5 - $Q_{ss}^-(R)$. Параметры транзистора те же, что на рис. 4

дение ВАХ, не предсказываемое двухпороговой моделью транзистора [13]: уменьшение тока стока в случае сосредоточения заряда Q_{ss}^- у стока по сравнению со случаем локализации заряда у истока и увеличение этого тока для заряда противоположного знака (Q_{ss}^+).

Наблюдаемый эффект можно объяснить чисто двумерным характером рассматриваемой задачи: изменением толщины канала в зависимости от положения вдоль границы раздела. Соотношения между V_d и V_g для обсуждаемой области изменений напряжений на стоке таковы, что канал существует вдоль всей границы раздела (V_d меньше напряжения отсечки). Очевидно, что влияние одного и того же встроенного заряда на протекание тока в транзисторе существеннее, если он расположен в более узком месте канала (у стока). При достаточно больших V_d , когда область отсечки канала уйдет за пределы локализованного у стока заряда, ВАХ примет вид, предсказываемый двухпороговой моделью: ток стока при нормальном включении станет больше тока стока при обратном включении. Это значение V_d зависит как от положения локализации заряда, так и от V_g . Отмеченная выше особенность исчезает, если помимо отрицательного заряда Q_{ss}^- в области стока в результате действия стресса образуются и ПС, так как пороговое напряжение и соответственно ток стока определяются в этом случае суммой зарядов $Q_{ss}^- + Q_{si}$, а для режима нормального включения заряд Q_{si} оказывается меньшим по сравнению с режимом обратного включения из-за уменьшения плотности электронов в канале при приближении к стоку.

Как показали проведенные нами расчеты, ВАХ МДПТ оказываются чувствительными к форме распределения плотности ПС и $Q_{ss}(x)$ вдоль канала. В качестве иллюстрации на рис. 6 приведена зависимость порогового напряжения транзистора от положения максимума x_0 в плотности распределения двух типов дефектов — поверхностных состояний и фиксированного отрицательного заряда от-носительно $p-n$ -перехода стока.

Необходимо отметить, что измерение ВАХ при различных температурах может оказаться полезным для разделения влияния зарядов Q_{ss}^- и Q_{si} . С уменьшением температуры следует ожидать увеличения влияния заряда на ПС на сдвиг порогового напряжения, так как величина заряда Q_{si} зависит от поло-

жения уровня Ферми в запрещенной зоне, а с уменьшением температуры в n -канальных транзисторах уровень Ферми приближается к потолку валентной зоны, т. е. $|Q_{si}|$ увеличивается. Были проведены расчеты зависимости $\lg I_d(V_g)$ при $V_d = 0,1$ В для исходного МДПТ и для транзистора, содержащего локализованные в области стока дефекты либо в виде отрицательного заряда Q_{ss}^- , либо повышенной плотности ПС при комнатной температуре и температуре 230 К. Для обоих типов дефектов координатная зависимость плотности $N_{si}(x)$ и $N_{ox}(x)$ имела вид функции Гаусса с $\sigma = 0,1$ мкм и с положением максимума плотности ПС на расстоянии 0,15 мкм от p - n -перехода стока с $N_{si,max} = 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ и $N_{ox,max} = 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. При определении порогового напряжения по уровню тока 10^{-6} А/мкм сдвиг V_t за счет Q_{ss}^- при $T = 300$ К $\Delta V_t^{st} \approx 0,075$ В, а за счет ПС $\Delta V_t^{st} \approx 0,13$ В, при понижении температуры на 70° $\Delta V_t^{st} \approx 0,09$ В, а $\Delta V_t^{st} \approx 0,215$ В. При уменьшении температуры ΔV_t^{st} практически не меняется, а ΔV_t^{st} увеличивается.

Анализ результатов численного моделирования и имеющихся литературных данных позволяет нам предложить следующую последовательность измерений для определения последствий стресса на n -канальных МДПТ:

1. Измерение подпороговых характеристик $\lg I_d(V_g)$ при малых V_d ($V_d \approx 0,05 \div 0,1$ В) до и после стресса. Наличие сдвига порогового напряжения, определенного в области очень малых токов $I_d \approx 10^{-9} \div 10^{-12}$ А/мкм, однозначно свидетельствует о появлении фиксированного заряда Q_{ss} . Сдвиг по V_t , когда V_t определялось по уровню тока $I_d \approx 10^{-6}$ А/мкм, может быть связан как с Q_{si} , так и с Q_{ss} .

2. Из набора кривых $I_d(V_g)$, измеренных при различных V_d , можно оценить ширину области дефектообразования (см. рис. 4).

3. Измерение ВАХ $I_d(V_d)$ в области сильной инверсии для двух схем включения: нормального (повышенная плотность дефектов у стока) и обратного (повышенная плотность дефектов у истока) для идентификации типа дефектов на качественном уровне (см. рис. 5).

4. Отделение влияния заряда ПС и отрицательного заряда с учетом наличия спектра ПС и сложной координатной зависимости вдоль канала возможно только с привлечением независимого способа определения параметров ПС, например метода накачки заряда [7, 10, 13]. Параметры распределения $Q_{ss}(x)$ могут быть затем определены с помощью численного моделирования путем их подбора при одновременном совмещении экспериментальных и расчетных ВАХ $I_d(V_g)$ и $I_d(V_d)$ в инверсии для обратного и нормального включений.

ВЫВОДЫ

В качестве первого этапа моделирования деградиационных эффектов в короткоканальных МДП-транзисторах сформулирована краевая задача учета влияния заряда поверхностных состояний и фиксированного заряда в окисле, возникающих в МДПТ, подвергавшихся стрессам, на ВАХ транзистора. Представленный алгоритм расчета ВАХ на основе программы двумерного числен-

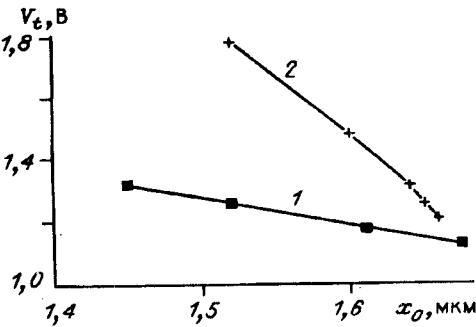


Рис. 6. Зависимость порогового напряжения от положения максимальной плотности дефектов вдоль границы раздела:

$x_0 = 1,645$ мкм соответствует границе p - n -перехода стока, где кривая 1 — ПС, 2 — Q_{ss} локализованы у стока. Плотности N_{ox} и N_{si} имеют форму симметричной функции Гаусса с $\sigma = 0,1$ мкм и $N_{si,max} = 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$, $N_{ox,max} = 10^{12} \text{ см}^{-2}$

ного моделирования, использующей диффузионно-дрейфовое приближение, учитывает координатную зависимость плотности ПС и фиксированного заряда вдоль канала и энергетический спектр ПС.

Проведены расчеты характеристик n -канальных МДПТ с равномерно распределенной вдоль канала плотностью ПС, свидетельствующие об адекватном учете ПС и фиксированного заряда в программе MOS2S: уменьшение наклона ВАХ в околопороговой области с ростом плотности ПС; проявление положительного заряда донорных состояний в характеристиках при малых напряжениях на затворе, соответствующих режиму обеднения. Полученная несимметрия ВАХ транзисторов, содержащих повышенную плотность ПС и/ (или) встроенного отрицательного заряда у стока или у истока, согласуется с известными экспериментальными данными.

Рассчитаны зависимости порогового напряжения от напряжения на стоке для случая положения Q_{si} (или Q_{ss}) у стока, позволяющие оценить размеры области дефектообразования.

Продemonстрировано влияние формы и положения области дефектообразования относительно металлургической границы p - n -перехода стока на ВАХ и значение величины порогового напряжения.

При определенных соотношениях между V_d и V_g и при учете координатной зависимости $Q_{ss}(x)$ возможно поведение ВАХ, не предсказываемое двухпороговой моделью транзистора: уменьшение тока стока для отрицательного заряда, расположенного у стока, по сравнению с Q_{ss}^- , расположенным у истока.

На основании анализа результатов численного моделирования даны рекомендации по проведению измерения ВАХ исходного и деградированного МДПТ совместно с применением методики накачки заряда с целью определения типа дефектов (Q_{ss}^+ , Q_{ss}^- , Q_{si}) и параметров их распределения вдоль границы раздела.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shabde S., Bhattacherye A., Kao R. S., Muller R. S. Analysis of MOSFET degradation due to hot electron stress in terms of interface-state and fixed charge generation // *Solid State Electron.*—1988.—31, N 11.—P. 1603.
2. Hu C., Tam S. C., Hsu F.-C. et al. Hot-electron induced MOSFET degradation-model, monitor and improvement // *IEEE Trans. Electron. Dev.*—1985.—ED-32, N 2.—P. 375.
3. Schwerin A., Hänsh W., Weber W. The relationship between oxide charge and device degradation: a comparative study of n -channel and p -channel MOSFET's // *IEEE Trans. Electron. Dev.*—1987.—ED-34, N 12.—P. 2493.
4. Гергель В. А., Зацепин Ю. В., Орешкин Г. Н. Физические процессы при деградации в короткоканальных МОП-транзисторах // *Электрон. техника. Сер. 3. Микроэлектроника.*—1992.—Вып. 5.
5. Takeda E. A cross section of hot-carrier phenomena in MOS ULSI's // *Appl. Surf. Sci.*—1989.—39, N 2—4.—P. 535.
6. Lyon S. A. Interface state generated by the injection of electrons and holes into SiO_2 // *Appl. Surf. Sci.*—1989.—39, N 1/4.—P. 552.
7. Heremans P., Bosch G. V., Bellens R. et al. Temperature dependence of the channel hot-carrier degradation of n -channel MOSFET's // *IEEE Trans. Electron. Dev.*—1990.—ED-37, N 4.—P. 980.
8. Overstraeten R. J., Declerck G. J., Muls P. A. Theory of the MOS transistor in weak inversion. New method to determine the number of surface states // *IEEE Trans. Electron. Dev.*—1975.—ED-22, N 5.—P. 282.
9. Roblin P., Samman A., Bibyk S. Simulation of hot-electron trapping and aging of n -MOSFET's // *IEEE Trans. Electron. Dev.*—1988.—ED-35, N 12.—P. 2226.
10. Ancona M. G., Saks N. S. Simulation of hot-carrier degraded MOSFET's // *NASECODE 6: Proc. 6th Intern. Conf. on the Numerical Analysis of Semiconductor Device and Integrated Circuits, Dublin, 1989.*—Dublin, 1989.—P. 415.
11. Гадияк Г. В., Сеница С. П., Шварц Н. Л. Расчет стационарных характеристик короткоканальных МДП-транзисторов с учетом эффекта лавинного умножения // *Автоматрия.*—1988.—№ 3.
12. Вавилов В. С., Киселев В. Ф., Мукашев Б. Н. Дефекты в кремнии и на его поверхности.—М.: Наука, 1990.

Поступила в редакцию 6 мая 1992 г.

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ХИМИЧЕСКИ ОСАЖДЕННЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

По спектрам фотопроводимости рассчитано произведение коэффициента поглощения на квантовый выход химически осажденных поликристаллических пленок PbS. Определена ширина и температурный коэффициент расширения запрещенной зоны. Показано, что за фоточувствительность пленок PbS ответственны кристаллиты с параметрами, близкими к монокристаллу. Отжиг образцов при низких температурах изменяет фоточувствительность более чем на порядок, однако спектр поглощения пленок PbS при этом не изменяется.

В настоящее время фоторезисторы на основе халькогенидов свинца являются одними из самых перспективных приемников излучения в диапазоне спектра 2—7 мкм. При этом основные практически важные параметры, такие как вольт-ваттная чувствительность, удельная обнаружительная способность, оказываются прямо зависимыми от физических параметров тонких поликристаллических слоев: оптического поглощения, времени жизни неосновных носителей, концентрации основных носителей и т. д.

В ряде работ отмечалось, что спектральная зависимость фотопроводимости пленок PbS сдвинута в более коротковолновую область спектра по сравнению с монокристаллами [1]. Это может быть обусловлено, в частности, малой толщиной пленок $d < 1$ мкм. Однако в [1] высказано предположение, что сдвиг спектра фоточувствительности связан с изменением стехиометрии пленок по кислороду. Рентгеновский и электронно-графический анализ показал [2] наличие окислов PbO, PbO₂ и ланаркита PbO · PbSO₄, расположенных в основном вблизи поверхности пленок. Важным в связи с этим является вопрос об оптическом спектре поглощения полупроводниковой фазы, непосредственно определяющей фоточувствительность того сложного химического образования, которое обычно коротко называется химически осажденной пленкой PbS.

Важным и до конца неисследованным является вопрос о роли кислорода. Исследования профиля распределения компонентов и фаз по толщине пленки показали [3], что измененный слой, содержащий PbO · PbSO₄, PbO, лежит не более чем на 0,3 мкм от поверхности PbS. Количество PbO уже начиная с глубины ~0,1 мкм составляет 5—10 % от PbS даже для сильноотожженных образцов. Поэтому предполагается, что кислород или PbO сосредоточены в основном в прослойках, а в самих кристаллитах кислород создает акцепторную примесь. В связи с этим возникает вопрос о том, как будет влиять на оптические свойства пленок отжиг их в кислороде и вакууме. При этом технологически важен отжиг при низких температурах < 100 °С. Так же как и высокотемпературный, отжиг при низких температурах оказывает сильное влияние на величину фоточувствительности пленок PbS.

Измерения проводились на поликристаллических слоях PbS, полученных методом химического осаждения из раствора на кремниевые подложки с подслоем SiO₂. Золотые электроды наносились на подложку до осаждения пленки. Толщина пленки ~0,8 мкм, размеры фоточувствительной площадки 50×50 мкм. Образцы имели p -тип проводимости, концентрация носителей,