

АНАЛИЗ СДВИГА ПРОХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МДП-ТРАНЗИСТОРА

В.Е. Драч

drach@bmstu-kaluga.ru

drach@kaluga.org

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Российская Федерация

Аннотация

Предложена методика анализа проходных характеристик МДП-транзистора, полученных в результате проведения последовательных измерений. Различия последовательно измеренных проходных характеристик обусловлены внедрением в измерительный цикл фазы стресса (как правило, инжекция по Фаулеру — Нордгейму), а также стадии разрядки. Для количественного описания явления предложено использовать разность значений $\Delta I_{d,TC}$ двух последовательно снятых проходных характеристик. Ненулевое значение $\Delta I_{d,TC}$, т. е. сдвиг характеристик, обусловлен зарядкой и разрядкой медленных ловушек. Для понимания механизма заполнения медленных приграничных ловушек неосновными носителями заряда предложено разбивать развертку на линейную и подпороговую области, чтобы затем исследовать каждую область индивидуально

Ключевые слова

МДП-транзистор, зарядовая деградация, инжекция по Фаулеру — Нордгейму, линейная область, подпороговая область

Поступила в редакцию 25.03.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Введение. Несколько десятилетий внимание исследователей привлекают дефекты в области границы раздела Si-SiO₂ приборов со структурой металл-диэлектрик-полупроводник [1–5]. Предложено классифицировать расположенные вблизи границы раздела Si-SiO₂ приграничные ловушки, используя константу времени: если значение этой константы принадлежит интервалу 10⁻⁶...1,0 с, то такая ловушка называется быстрой, а если значение константы превышает 1 с, то — медленной [1, 2].

Вследствие большого значения времени релаксации заряд и (или) разряд медленных приграничных ловушек влечет за собой долговременные сдвиги таких характеристик, как ток стока [3, 4], ВФХ [5], характеристики накачки заряда [5] и др. Такие нестабильности могут вызвать нежелательные погрешности измерений с низкочастотной разверткой — от аккумуляции до инверсии, т. е. затрагиваются такие методы, как ВЧ ВФХ, накачка заряда, методы, основанные на измерении проходных характеристик и т. д. Описанные нестабильности характеристик уже изучены [5] с помощью проведения последовательных измерений, в результате при снятии ВЧ ВФХ и ВФХ было обнаружено смещение графиков при последовательных измерениях. Было установлено, что неста-

бильности тесно связаны с зарядовым состоянием медленных приграничных ловушек: а именно, обусловлены положительно заряженными медленными приграничными ловушками или отжигом нестабильных медленных состояний. Эта нестабильность может быть использована для изучения различных свойств и отслеживания медленных приграничных ловушек.

Сдвиг проходных характеристик МДП-транзистора, полученных в результате последовательных измерений, обусловлен захватом (рекомбинацией) медленных приграничных ловушек [6–8].

Цель настоящей работы — попытка ответить на вопрос: как медленные приграничные ловушки заряжаются неосновными носителями заряда во время измерений проходных характеристик. Детальное рассмотрение поможет понять причины возникновения максимальных значений для разности проходных характеристик. Для проведения анализа предложено разделить развертку на подпороговую и линейную области.

Измерительное оборудование. Измерительный комплекс аналогичен примененному в работе [7] комплексу и включает в себя комплект измерительного оборудования и герметичную камеру, в которую помещают тестовый образец. Полный комплект измерительного оборудования состоит из персонального компьютера (ПЭВМ), прецизионного анализатора параметров полупроводниковых приборов HP4156A, генератора импульсов HP8110A, контроллера температуры MMR K-20, исследовательской станции производства *MMR Technologies* и вакуумного насоса. Структурная схема измерительного комплекса приведена на рис. 1.

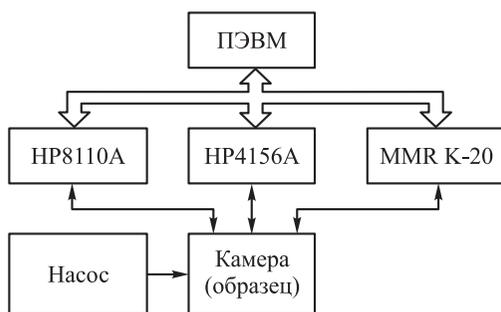


Рис. 1. Структурная схема измерительного комплекса

Все измерения и стрессовые воздействия выполняют с помощью прибора HP4156A. Тестовый образец устанавливают в камеру, температуру которой контролирует контроллер MMR K-20. Для обеспечения низкого значения тока утечки при соединении камеры и прибора HP4156A используют триаксиальные кабели, а вакуумный насос создает давление около $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. в камере для устранения влажности и влияния внешней среды. Автоматическое управление измерительным комплексом осуществляется персональным компьютером. Для соединения всех приборов использована интерфейсная шина общего назначения (General Purpose Interface Bus, GPIB), стандарт IEC-625 (МЭК 625.1).

В настоящей работе при проведении каждого эксперимента в качестве стрессового воздействия применялась инжекция по Фаулеру — Нордгейму (нагрузка постоянным током) при плотности тока $J_g = 5,71 \text{ мА/см}^2$ в течение 10 000 с.

Тестовые образцы. При выполнении работы использованы тестовые полупроводниковые образцы, изготовленные в Сингапуре на полупроводниковой фабрике *Chartered Semiconductors Pte*. Использован коммерческий технологический процесс КМОП с технологической нормой 0,25 мкм. Все тестовые приборы представляли собой *n*-канальные полевые транзисторы с двухканальной структурой LDD (слаболегированный сток). Толщина термического оксида составляла 6 нм, ширина канала — 50 мкм, длина канала транзисторов — 0,35 мкм для всех устройств. Электрод затвора был сформирован с использованием поликремниевоего слоя толщиной 100 нм. Отжиг после окисления и металлизации не проводился. Средняя концентрация примеси $1,13 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Для каждого транзистора были сформированы индивидуальные контактные площадки.

Методика измерения. Для измерения смещения проходных характеристик МДП-транзистора необходимо наличие двух фаз [6–8]: 1) фазы разрядки; 2) фазы измерения. В фазе разрядки полевой транзистор смещен в область аккумуляции на определенный промежуток времени приложением необходимого напряжения на затвор, причем все остальные электроды заземлены. Назначение этой фазы — освободить захваченные неосновные носители из ловушек в оксиде, находящихся вблизи границы раздела Si–SiO₂, т. е. из приграничных ловушек. Эта часть разряженных приграничных ловушек электрически активна и может быть детектирована в следующей фазе. Напряжение фазы разрядки тщательно подбирается, чтобы избежать любой дополнительной деградации. В фазе измерения последовательно снимаются линейные характеристики $I_d(V_g)$ при $V_d \leq 0,1 \text{ В}$ для аккумуляции или 0 В для инверсии, каждая из которых обозначается $I_{d,1}(V_g)$ и $I_{d,2}(V_g)$. Смещение наблюдается между двумя последовательно измеренными характеристиками $I_d(V_g)$ в прямом режиме.

Введем понятие «токовое смещение проходных характеристик» (ТСПХ), для чего определим разность тока между последовательно измеренными кривыми $I_d(V_g)$:

$$\Delta I_{d,TC}(V_g) = I_{d,1}(V_g) - I_{d,2}(V_g).$$

Проведем исследование, рассматривая области развертки последовательно, как было предложено в работе [8].

Анализ подпороговой области. Обычно подпороговой областью, или областью слабой инверсии, называют область, в которой выполняются условия $V_g < V_{th}$ или $\psi_f \geq \psi_s \geq 2\psi_f$. В этой области неосновные носители у границы раздела Si–SiO₂ (или в слое слабой инверсии) имеют низкую концентрацию: на несколько порядков ниже, чем для случая сильной инверсии в кремнии [9, 10].

Кроме того, ввиду примерно линейной зависимости напряжения на затворе развертка поверхностного потенциала, которая составляет около 160 мВ/с, проходит довольно быстро так же как, и развертка напряжения на затворе от аккумуляции до инверсии во время обычных измерений $I_d - V_g$. В соответствии со статистикой Шокли — Рида — Холла зарядку ловушек при инверсии описывают следующим выражением [11]:

$$\frac{\partial n_t(E, x, t)}{\partial t} = [N_t(E, x) - n_t(E, x, t)] n_s \sigma(E, x) V_{th}, \quad (1)$$

где $n_t(E, x, t)$ — концентрация ловушек в оксиде при энергии E и расстоянии x от поверхности раздела Si–SiO₂, заполненных неосновными носителями заряда за время t ; $N_t(E, x)$, $\sigma(E, x)$ — концентрация и сечение захвата ловушек; n_s — концентрация неосновных носителей заряда; V_{th} — тепловая скорость неосновных носителей заряда. Согласно уравнению (1), эффективность захвата медленных приграничных ловушек низка, когда поверхностная концентрация неосновных носителей заряда мала, т. е. при слабой инверсии. Учитывая большую константу времени медленных приграничных ловушек [2], логично предположить, что при нормальных условиях измерений $I_d - V_g$ большинство пустых медленных приграничных ловушек (подразумеваются медленные приграничные ловушки, заряженные основными носителями заряда) сохраняют зарядовое состояние неизменным в подпороговой области.

Приведенное предположение может быть проверено изучением кривых $I_d(V_g)$ в подпороговой области. Результаты экспериментов показывают, что две последовательно снятых зависимости $I_d(V_g)$ практически параллельны друг другу (рис. 2), т. е. результат соответствует ожиданиям. В эксперименте напряжения на стоке и подложке составляли $V_d = 0,1$ В и $V_{sub} = 0,1$ В. Учитывая большую константу времени, которая характерна для этих медленных приграничных ловушек, любые неосновные носители заряда, заполняющие рассматриваемые ловушки во время первого измерения $I_d(V_g)$, наиболее вероятно должны остаться там на долгое время. Если заполнение пустых медленных приграничных ловушек произойдет в подпороговой области, то подпороговый угол наклона будет уменьшаться. Это связано с тем, что захват неосновных носителей заряда поглотит большую часть неосновных носителей заряда в слое слабой инверсии. Однако, когда эти медленные приграничные ловушки заполняются неосновными носителями заряда, с одной стороны, число доступных пустых медленных приграничных ловушек будет уменьшаться, а с другой, захваченные неосновные носители заряда будут прикладывать локальное электрическое поле к поверхности раздела Si–SiO₂, что препятствует дальнейшей инжекции в подзатворный диэлектрик неосновных носителей в канале [12]. Это означает, что гораздо меньшее число неосновных носителей заряда может быть проинжектировано в подзатворный диэлектрик и быть захвачено при последующих измерениях $I_d - V_g$. Изложенное подтверждается

тем, что наиболее существенный сдвиг наблюдается между первым и вторым измерениями $I_d - V_g$ при последовательных измерениях [7, 8]. Следовательно, влиянием захваченных зарядов на подпороговый наклон при последовательных измерениях можно пренебречь. Таким образом, не следует ожидать, что первые две кривые $I_d(V_g)$ будут параллельны друг другу. Однако это не следует явным образом из проведенных экспериментов. Другими словами, кривые, представленные на рис. 2, демонстрируют, что большая часть медленных приграничных ловушек не заряжается неосновными носителями в подпороговой области.

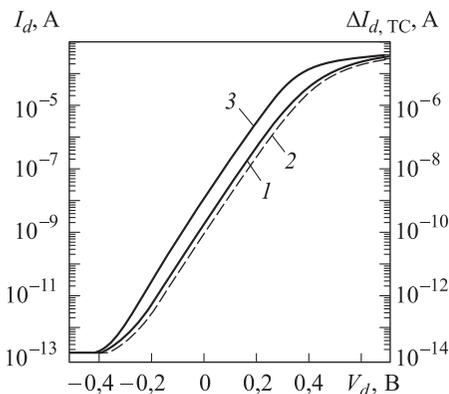


Рис. 2. Кривые проходных характеристик (1, 2) и ТСПХ в подпороговой области в полулогарифмическом масштабе (последовательно измеренные проходные характеристики и кривая ТСПХ примерно параллельны друг другу) при $J_g = 5,71$ мА/см² в течение 10^4 с, $W/L = 50/0,35$ мкм/мкм, $V_d = 0,1$ В, $V_{sub} = 0,1$ В

Учитывая изложенное выше, смещение последовательно измеренных проходных характеристик $I_d(V_g)$ или ТСПХ ($\Delta I_{d,TC}$) обусловлено захватом неосновных носителей заряда на медленные приграничные ловушки в линейной области при первом измерении $I_d - V_g$. Захваченные заряды накладывают дополнительный поверхностный потенциал ($\Delta\Psi_s$) и влияют на смещение тока стока вдоль оси V_g . Для удобства изучения ТСПХ используем поверхностный потенциал Ψ_s для выражения параметров тока стока в подпороговой области. Поскольку поверхностный потенциал линейно зависит от величины V_g в подпороговой области [9]

$$\Psi_s = \left[-\frac{1}{2} \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{si}qN_b}{C_{ox}}} + \sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon_{si}qN_b}{2C_{ox}^2} + V_g - V_{fb}} \right] \propto V_g,$$

выводы, сделанные для поверхностного потенциала, можно применить и к экспериментальным результатам, относящимся к напряжению V_g .

Очевидно, что через значение поверхностного потенциала Ψ_s можно выразить ток стока в подпороговой области [9]

$$I_d = \mu_{eff} \frac{W}{L} \sqrt{\frac{\varepsilon_{si}qN_a}{2\Psi_s}} \left(\frac{kT}{q} \right)^2 \left(\frac{n_i}{N_a} \right)^2 e^{\frac{q\Psi_s}{kT}} \left(1 - e^{-\frac{qV_d}{kT}} \right),$$

причем $I_{d,1} = I_d(\Psi_s)$; $I_{d,2} = I_d(\Psi_s + \Delta\Psi_s)$, где $\Delta\Psi_s$ — разность поверхностных потенциалов для двух измерений $I_d - V_g$, выполненных последовательно, т. е. разность, обусловленная зарядкой медленных приграничных ловушек; μ_{eff} — эффективная подвижность. Исключая из рассмотрения изменения значений μ_{eff} , n_i и Ψ_s под квадратным корнем, ТСПХ ($\Delta I_{d,TC}$) можно примерно представить в виде

$$\Delta I_{d,TC} \approx \mu_{eff} \frac{W}{L} \sqrt{\frac{\epsilon_{si} q N_a}{2 \Psi_s}} \left(\frac{kT}{q} \right)^2 \left(\frac{n_i}{N_a} \right)^2 \left(1 - e^{-\frac{qV_d}{kT}} \right) \left(e^{\frac{q\Delta\Psi_s}{kT}} - 1 \right) e^{\frac{q\Psi_s}{kT}}. \quad (2)$$

Согласно уравнению (2), если величина $\Delta\Psi_s$ остается неизменной, то ТСПХ $\Delta I_{d,TC}$ будет возрастать экспоненциально от поверхностного потенциала Ψ_s (или напряжения V_g), а в полулогарифмической системе координат ТСПХ $\Delta I_{d,TC}$ будет иметь тот же наклон, как и кривые $I_d(V_g)$. Если нормализовать ТСПХ ($\Delta I_{d,TC}$) делением величины $\Delta I_{d,TC}$ на величину $I_{d,1}$, то получим

$$\frac{\Delta I_{d,TC}}{I_{d,1}} \approx e^{-\frac{q\Delta\Psi_s}{kT}} - 1 = \text{const}.$$

Величина ТСПХ после нормализации ($\Delta I_{d,TC}$) в подпороговой области должна оставаться неизменной, если разность поверхностных потенциалов ($\Delta\Psi_s$) при первом и последующем измерениях $I_d - V_g$ является константой. Приведенное утверждение подтверждают кривые, представленные на рис. 3, а: у кривой $\Delta I_{d,TC} / I_{d,1}$ наблюдается плато в подпороговой области (кривая 3). В эксперименте напряжения на стоке и подложке составляли $V_d = 0,1$ В и $V_{sub} = 0,1$ В. В результате еще больше убеждаемся, что разность поверхностных потенциалов ($\Delta\Psi_s$) вследствие зарядки медленных приграничных ловушек явля-

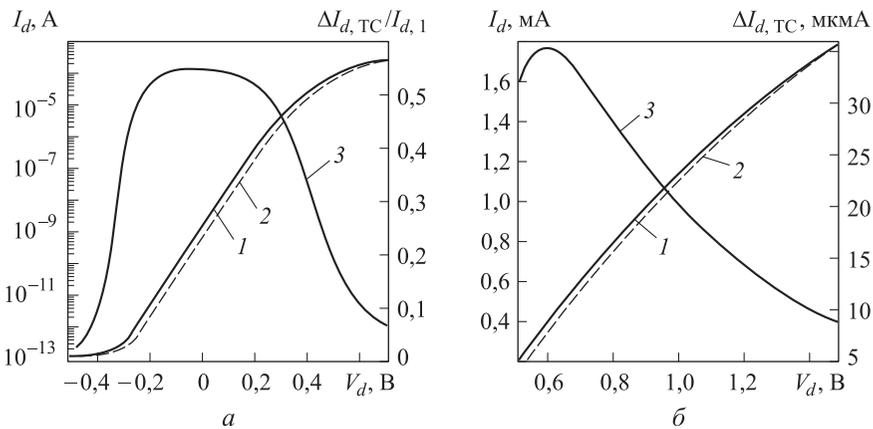


Рис. 3. Сдвиг проходных характеристик (1, 2) и нормализованная ТСПХ (3) в подпороговой (а) и в линейной (б) областях при F-N CCS@ $J_g = 5,71$ мА/см² в течение 10^4 с, $W/L = 50/0,35$ мкм/мкм, $V_d = 0,1$ В, $V_{sub} = 0,1$ В

ется константой в подпороговой области. Другими словами, не происходит существенной зарядки медленных приграничных ловушек в указанной области. У кривой ТСПХ после нормализации наблюдается плато (см. рис. 3, а), т. е. большинство медленных приграничных ловушек не заряжается неосновными носителями заряда в подпороговой области.

Анализ линейной области. В линейной области концентрация поверхностных неосновных носителей заряда превосходит концентрацию основных носителей в объеме [9]. Инверсный канал формируется между истоком и стоком неосновными носителями заряда, концентрация которых на несколько порядков превышает концентрацию для кремния, когда речь идет о подпороговой области. Следовательно, согласно статистике Шокли — Рида — Холла, в линейной области достаточное число неосновных носителей заряда гарантирует, что пустые медленные приграничные ловушки будут заряжены.

При сильной инверсии заряд инверсионного слоя имеет выраженную экспоненциальную зависимость от поверхностного потенциала [9]:

$$Q_i \approx \sqrt{2\epsilon_0\epsilon_{si}qN_bV_t} e^{\frac{\psi_t}{2V_t}}.$$

Это означает, что небольшое увеличение поверхностного потенциала влечет значительное увеличение заряда инверсионного слоя, т. е. поверхностных неосновных носителей заряда и, таким образом, тока стока.

Основываясь на изложенном выше, можно детально рассмотреть ТСПХ (кривая 3, рис. 3, б) и две последовательно измеренные проходные характеристики $I_d - V_g$ (кривые 1 и 2, см. рис. 3, б) в линейной области; напряжения на стоке и подложке составляли $V_d = 0,1$ В и $V_{sub} = 0,1$ В. В линейной области ТСПХ ($\Delta I_{d, TC}$) монотонно убывает после достижения пикового значения; это происходит,

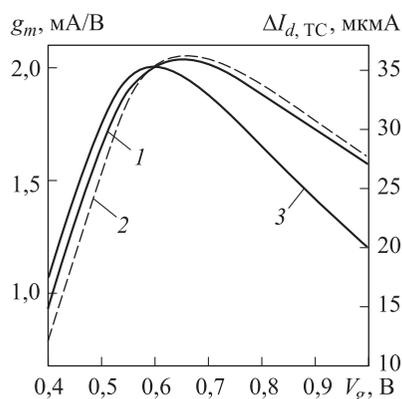


Рис. 4. Сравнение крутизны $g_{m,1}$ (1), $g_{m,2}$ (2) и ТСПХ (3) при F-N CCS@ $J_g = 5,71$ мА/см² в течение 10^4 с, $W/L = 50/0,35$ мкм/мкм, $V_d = 0,1$ В, $V_{sub} = 0,1$ В

когда две последовательно снятых кривые $I_d - V_g$ начинают сходиться. При дальнейшем сравнении ТСПХ с крутизной g_m двух последовательно измеренных характеристик тока стока (рис. 4), для которого напряжение на стоке составляло $V_d = 0,1$ В, подложка была заземлена. Во-первых, крутизна $g_{m,2}$ второй характеристики $I_d - V_g$ превосходит крутизну $g_{m,1}$ первой характеристики $I_d - V_g$ в некоторой точке, лежащей выше порогового напряжения, во-вторых максимальное значение ТСПХ находится строго в точке пересечения кривых крутизны измеренных характеристик.

Ранее уже рассмотрена зарядка медленных приграничных ловушек неосновными носителями заряда в канале и ее вклад в сдвиг про-

ходных характеристик. Очевидно, что большая часть пустых приграничных ловушек заряжается в подпороговой области при первом измерении $I_d - V_g$. Кривые, представленные на рис. 3, б и рис. 4, доказывают это утверждение, а точнее, что большая часть пустых медленных приграничных ловушек заряжается неосновными носителями заряда в течение первого измерения $I_d - V_g$ (в линейной области).

Можно сделать два вывода. Во-первых, ток стока снижается так же, как и проходная проводимость во время первого измерения $I_d - V_g$. С одной стороны, действуя как ловушки на поверхности раздела, эти медленные приграничные ловушки захватывают часть неосновных носителей заряда в канале, что незначительно уменьшает ток стока, а с другой, создают дополнительное локальное электрическое поле по нормали к каналу после зарядки неосновными носителями заряда. Местное электрическое поле снижает эффективное поле у границы раздела Si-SiO₂ и немного уменьшает поверхностный потенциал, который в свою очередь снижает заряд инверсионного слоя, а также скорость возрастания тока стока от напряжения на затворе. По определению, крутизна выражается как

$$g_m = \left. \frac{\Delta I_d}{\Delta V_g} \right|_{V_d, V_{sub}}$$

Крутизна в линейной области будет уменьшаться аналогично.

Во-вторых, ТСПХ ($\Delta I_{d,TC}(V_g)$) уменьшается с возрастанием напряжения V_g . Вследствие сравнительно большой константы времени (по сравнению с константой времени состояний на поверхности раздела) захваченные медленными приграничными ловушками неосновные носители заряда могут влиять на смещение величин $I_{d,2}(V_g)$ вдоль оси напряжения V_g и на ТСПХ. Однако, когда медленные приграничные ловушки постепенно «заполняются» в линейной области при первом проходе, величина $I_{d,1}(V_g)$ уменьшается и приближается к значению $I_{d,2}(V_g)$, что приводит к уменьшению ТСПХ с увеличением напряжения V_g [7, 8]. Логично предположить, что две кривые $I_d(V_g)$ перекроют друг друга в линейной области, если при втором измерении $I_d - V_g$ не произойдет дальнейшего заполнения медленных приграничных ловушек. При этом небольшое число медленных приграничных ловушек заряжается во время следующих проходов (разверток), что обуславливает дальнейший сдвиг характеристик $I_d(V_g)$ вдоль оси V_g [7].

Следует отметить, что максимальное значение ТСПХ располагается не строго на границе сильной инверсии, как можно было бы ожидать. Оно располагается на несколько сотен милливольт выше порогового напряжения. Максимальное значение ТСПХ находится на пересечении кривых проходной проводимости. Феноменологически, когда значение проходной проводимости при втором измерении (скорость возрастания I_d) превосходит значение проводимости при первом измерении, разность двух последовательно измеренных токов стока ($\Delta I_{d,TC}(V_g)$) уменьшается. С позиции физики кривизна $g_{m,1}(V_g)$ становится меньше кривизны $g_{m,2}(V_g)$,

скорее всего ввиду значительного заряда в медленных приграничных ловушках после первого измерения $I_d - V_g$.

Физический смысл максимального значения ТСПХ можно объяснить следующим образом. Положение максимума ТСПХ по оси V_g показывает начальную точку, с которой неосновные носители активно начинают заполнять пустые медленные приграничные ловушки. Амплитуда максимума ТСПХ соответствует наибольшей разности токов стока до и после зарядки медленных приграничных ловушек неосновными носителями заряда, следовательно, качественно отображает число медленных приграничных ловушек в подзатворном диэлектрике, или ловушек, которые заряжаются неосновными носителями во время проведения измерений $I_d - V_g$. Это справедливо при низкой (средней) плотности состояний на поверхности раздела. Следовательно, ТСПХ можно использовать в качестве средства мониторинга медленных приграничных ловушек или как показатель деградации.

Кроме перечисленных выше причин, снижение эффективной подвижности μ_{eff} в линейной области может уменьшить крутизну кривой $I_d(V_g)$, что повлечет снижение ТСПХ. В первом приближении кривые $I_d(V_g)$ и $(\Delta I_{d,TC})$ в линейной области могут быть представлены в виде [9, 10]:

$$I_d = \frac{W}{L} C_{ox} \mu_{eff} \left[(V_g - V_{th}) - \frac{1}{2} \alpha V_d \right] V_d;$$

$$I_d = \frac{W}{L} C_{ox} \mu_{eff} (V_{th,2} - V_{th,1}) V_d = \frac{W}{L} C_{ox} \mu_{eff} \Delta V_{th,TC} V_d.$$

Приведенные выражения точно описывают влияние величины μ_{eff} на ТСПХ. Однако, пока не ясно, что играет более важную роль в снижении эффективной подвижности, ловушки на поверхности раздела или приграничные ловушки.

Заключение. Специально для изучения сдвига проходных характеристик полевого транзистора была разработана методика, которая включает в себя две фазы: 1) фазу разрядки; 2) фазу измерения $I_d - V_g$. Сдвиг наблюдается при рассмотрении двух последовательно снятых кривых во время прямых измерений $I_d - V_g$. Это явление тесно связано с медленными приграничными ловушками. Зарядка медленных приграничных ловушек вызывает сдвиг тока стока. Исследования показывают, что медленные приграничные ловушки заряжаются неосновными носителями зарядов в линейной области при первой развертке $I_d - V_g$. Это явление ослабляет проходную проводимость первой развертки $I_d - V_g$ и смещает ток стока при второй развертке. Рассмотрен физический смысл максимума ТСПХ. Описанная методика исследования медленных ловушек основана на проведении последовательных измерений проходных характеристик. Такая методика не предъявляет высоких требований к аппаратной реализации, может быть рекомендована как простой и недорогой инструмент для изучения ловушек заряда, расположенных вблизи поверхности раздела Si-SiO₂ МДП-транзистора.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Border traps: Issues for MOS radiation response and long-term reliability* / D.M. Fleetwood, M.R. Shaneyfelt, W.L. Warren, J.R. Schwank, T.L. Meisenheimer, P.S. Winokur // *Microelectronics Reliability*. 1995. Vol. 35. No. 3. P. 403–428.
2. *Fleetwood D.M. Fast and slow border traps in MOS devices* // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 1996. Vol. 43. No. 3. P. 779–786. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/509743> DOI: 10.1109/RADECS.1995.509743
3. *Bauza D. Detection of slow traps in the oxide of MOS transistors by a new current DLTS technique* // *Electronics Letters*. 1994. Vol. 30. No. 6. P. 484–485.
4. *Wang T., Chiang L.P., Zous N.K., Chang T.E., Huang C. Characterization of various stress-induced oxide traps in MOSFET's by using a subthreshold transient current technique* // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1998. Vol. 45. No. 8. P. 1791–1796. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/704380> DOI: 10.1109/16.704380
5. *Scarpa A., Paccagnella A., Ghidini G. Instability of post-Fowler — Nordheim stress measurements of MOS devices* // *Solid-State Electronics*. 1997. Vol. 41. No. 7. P. 935–938.
6. *Драч В.Е., Смирнова О.М., Чухраев И.В. Генерация заряда в транзисторах с наноразмерным диэлектриком* // *Вопросы радиоэлектроники*. 2012. Т. 1. № 3. С. 115–122.
7. *Драч В.Е., Родионов А.В. Метод анализа деградации подзатворного диэлектрика быстродействующего полевого транзистора* // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2014. Т. 19. № 10. С. 79–84.
8. *Драч В.Е., Родионов А.В. Приграничные ловушки в наноразмерном подзатворном диэлектрике полевого транзистора* // *В мире научных открытий*. 2014. Т. 58. № 10. С. 67–79. URL: <http://journal-s.org/index.php/vmno/article/view/3509> DOI: 10.12731/wsd-2014-10-5
9. *Arora N. MOSFET models for VLSI circuit simulation, theory and practice*. New Jersey: World Scientific, 2007.
10. *Taur Y., Ning T.H. Fundamentals of modern VLSI devices*. New York: Cambridge Press, 2009.
11. *Sze S., Ng K.K. Physics of semiconductor devices*. New York: Wiley, 2006.
12. *Khare M., Wang X.W., Ma T.P. Transconductance in nitride-gate or oxynitride-gate transistors* // *IEEE Electron Device Letters*. 1999. Vol. 20. No. 1. P. 57–59. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/737573/> DOI: 10.1109/55.737573

Драч Владимир Евгеньевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Конструирование и производство электронной аппаратуры» Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 248000, Калуга, ул. Баженова, д. 2).

Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Драч В.Е. Анализ сдвига проходных характеристик МДП-транзистора // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2017. № 1. С. 4–15.
DOI: 10.18698/0236-3933-2017-1-4-15

ANALYSIS OF MOSFET TRANSFER CHARACTERISTICS SHEAR

V.E. Drach

drach@bmstu-kaluga.ru

drach@kaluga.org

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, Russian Federation

Abstract

The measurement of a MOSFET $I_d - V_g$ curves can be performed repeatedly, but all the curves will be identical. But if a MOSFET had been stressed (for example, by Fowler — Nordheim injection), and then had a discharge phase, further measurements will field different sets of curves, in other words, there would be a shift of the $I_d - V_g$ curves. Recently, it was shown that the MOSFET $I_d - V_g$ shift was induced by trapping/detrapping of slow border traps. However, further discussion is needed to explain how these slow border traps are filled with minority carriers during $I_d - V_g$ measurements. For the detailed analysis, it is convenient to separate the whole sweep into the subthreshold region and the linear region and discuss each region separately

Keywords

MOSFET, charge degradation,
Fowler — Nordheim injection,
linear region, subthreshold region

REFERENCES

- [1] Fleetwood D.M., Shaneyfelt M.R., Warren W.L., Schwank J.R., Meisenheimer T.L., Winokur P.S. Border traps: Issues for MOS radiation response and long-term reliability. *Microelectronics Reliability*, 1995, vol. 35, no. 3, pp. 403–428.
- [2] Fleetwood D.M. Fast and slow border traps in MOS devices. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1996, vol. 43, no. 3, pp. 779–786.
Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/509743>
DOI: 10.1109/RADECS.1995.509743
- [3] Bauza D. Detection of slow traps in the oxide of MOS transistors by a new current DLTS technique. *Electronics Letters*, 1994, vol. 30, no. 6, pp. 484–485.
- [4] Wang T., Chiang L.P., Zous N.K., Chang T.E., Huang C. Characterization of various stress-induced oxide traps in MOSFET's by using a subthreshold transient current technique. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1998, vol. 45, no. 8, pp. 1791–1796.
Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/704380> DOI: 10.1109/16.704380
- [5] Scarpa A., Paccagnella A., Ghidini G. Instability of post-Fowler — Nordheim stress measurements of MOS devices. *Solid-State Electronics*, 1997, vol. 41, no. 7, pp. 935–938.
- [6] Drach V.E., Smirnova O.M., Chukhraev I.V. Charge generation in nano-size dielectric transistors. *Voprosy radioelektroniki* [Questions of Radio-Electronics], 2012, vol. 1, no. 3, pp. 115–122 (in Russ.).
- [7] Drach V.E., Rodionov A.V. A new method of gate dielectric degradation analysis in high-speed field-effect transistor. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic Waves and Electronic Systems], 2014, vol. 19, no. 10, pp. 79–84 (in Russ.).
- [8] Drach V.E., Rodionov A.V. Border traps in nanoscale MOSFET gate dielectric. *V mire nauchnykh otkrytiy* [In the World of Scientific Discoveries], 2014, vol. 58, no. 10, pp. 67–79 (in Russ.).
Available at: <http://journal-s.org/index.php/vmno/article/view/3509>
DOI: 10.12731/wsd-2014-10-5

- [9] Arora N. MOSFET models for VLSI circuit simulation, theory and practice. Ed. by S. Selberherr. New Jersey, World Scientific, 2007.
- [10] Taur Y., Ning T.H. Fundamentals of modern VLSI devices. New York, Cambridge Press, 2009.
- [11] Sze S., Ng K.K. Physics of semiconductor devices. New York, Wiley, 2006.
- [12] Khare M., Wang X.W., Ma T.P. Transconductance in nitride-gate or oxynitride-gate transistors. *IEEE Electron Device Letters*, 1999, vol. 20, no. 1, pp. 57–59.
Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/737573> DOI: 10.1109/55.737573

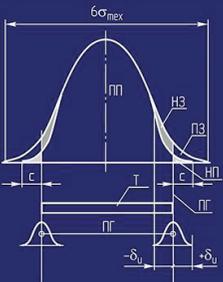
Drach V.E. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of Electronic Equipment Design and Manufacturing Department, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch (Bazhenova ul. 2, Kaluga, 248000 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Drach V.E. Analysis of MOSFET Transfer Characteristics Shear. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2017, no. 1, pp. 4–15. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-1-4-15

Ю.А. Кокорев, Ф.В. Звягин

**Способы расчета
точных характеристик
деталей и узлов приборов**



ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана

В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие авторов
Ю.А. Кокорева, Ф.Н. Звягина

**«Способы расчета точных характеристик
деталей и узлов приборов»**

Изложены вопросы обоснования выбора точных характеристик, рассмотрены возможные методы расчета на точность сложных и взаимосвязанных деталей и узлов. Приведены справочные материалы, необходимые для расчета на точность деталей и узлов приборных устройств с учетом их назначения, условий эксплуатации, требований к разработке, а также примеры расчетов приборных устройств различного назначения и рационального оформления конструкторской документации. Материалы подготовлены с учетом новых ГОСТов.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru