

## Методика мониторинга генерации заряда в наноразмерном диэлектрике МДП-транзистора 77-30569/332405

# 02, февраль 2012

Драч В. Е., Чухраев И. В.

УДК 621.382

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана

[drach@kaluga.org](mailto:drach@kaluga.org)

[igor.chukhraev@mail.ru](mailto:igor.chukhraev@mail.ru)

Зарядовые явления, протекающие в подзатворном диэлектрике, являются одним из основных факторов, обуславливающих изменение характеристик и деградацию полупроводниковых приборов на основе структуры металл-диэлектрик-полупроводник [1-3]. Одно из таких явлений – генерация положительного заряда – оказывает непосредственное влияние на рабочие характеристики МДП-приборов.

В данной работе предлагается использовать последовательное измерение вольтамперных характеристик полевых транзисторов с наноразмерным диэлектриком для анализа генерации положительного заряда.

В качестве образцов были выбраны МДП-транзисторы, сформированные на тестовых фрагментах полупроводниковой пластины, изготовленной в промышленном цикле по коммерческому технологическому процессу. Соотношение «ширина к длине» затвора изменялось от 50/0,2 до 50/1,0. Толщина подзатворного диэлектрика варьировалась в диапазоне от 6 до 16 нанометров. Затвор транзистора был сформированы из поли-кремния. Структура экспериментального транзистора показана на рис. 1.

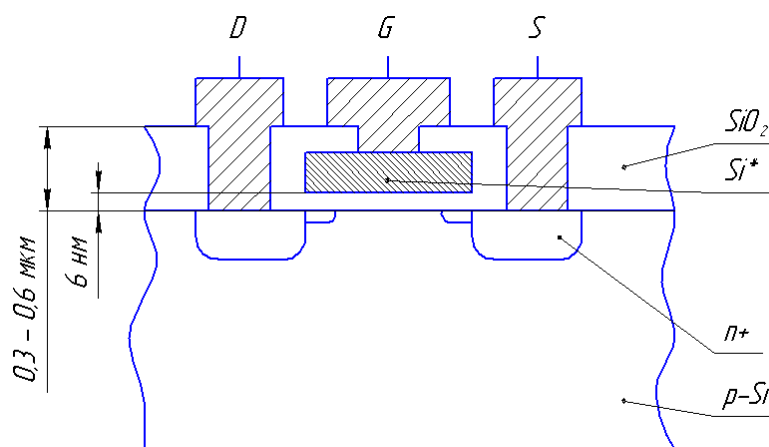


Рис. 1. Структура экспериментального МДП-транзистора с наноразмерным диэлектриком

Для проведения эксперимента использовался анализатор характеристик полупроводниковых приборов повышенной точности HP 4156A фирмы Agilent, управляемый при помощи ПЭВМ. С помощью HP 4156A удалось реализовать стрессовое воздействие в диапазоне от  $10^{-10}$  до  $10^{-3}$  А. Для измерения вольт-фарадных характеристик до и после инжекции был использован измеритель HP 4243A.

Эксперимент заключался в последовательном измерении вольтамперных характеристик полевых транзисторов, после чего был выполнен анализ их изменения. Первое измерение ВАХ проводилось на свежем приборе. Последующие – на том же самом приборе, но через некоторый временной интервал. Каждое измерение включало в себя пару разверток напряжения подряд и, соответственно, получение пары зависимостей «ток стока от напряжения затвора» (далее,  $I_d(V_g)$ ).

Повторное измерение  $I_d(V_g)$  производилось после инжекции по Фаулеру-Нордгейму некоторого заряда в подзатворный диэлектрик транзистора в течение времени порядка  $10^4$  секунд, что позволяло получить еще одну пару кривых.

Затем следовала стадия разрядки, в течение 100 секунд прибор переводился в режим аккумуляции путем приложения постоянного отрицательного смещения к затвору ( $V_g = -4$  В). Сразу после стадии разрядки измерялась еще одна пара кривых  $I_d(V_g)$ .

Измерения  $I_d(V_g)$  могли бы быть повторены несколько раз, из-за чего каждый набор кривых мог бы содержать не пару, а большее число кривых.

В результате было обнаружено ненулевое, вполне измеримое, изменение тока стока при двух последовательных измерениях. Математически это можно выразить следующим образом:

$$\Delta I_d(V_g) = I_{d1}(V_g) - I_{d2}(V_g),$$

где индексы 1 и 2 соответствуют первому и второму измерению в паре последовательных измерений.

Кроме того, было зарегистрировано изменение порогового напряжения для транзистора, которое математически можно выразить следующим образом:

$$\Delta V_{th} = V_{th2} - V_{th1}$$

Если в начале эксперимента  $\Delta I_d(V_g)$  пренебрежимо мало, то после стадии разрядки  $\Delta I_d(V_g)$  выражено явно.

Рис. 2, иллюстрирующий проведение эксперимента и наблюдаемое явление в общем случае, представляет три пары кривых  $I_d(V_g)$ : на свежем приборе, после инжекции и после стадии разрядки. Естественно, кривые для свежего прибора полностью идентичны, так как измерения проводятся на свежем подзатворном диэлектрике транзисторе. Две кривые, полученные после инжекции, немного смещены друг относительно друга. Из рис. 2 очевидно, что кривые, полученные после стадии разрядки, смещены друг относительно друга существенно.

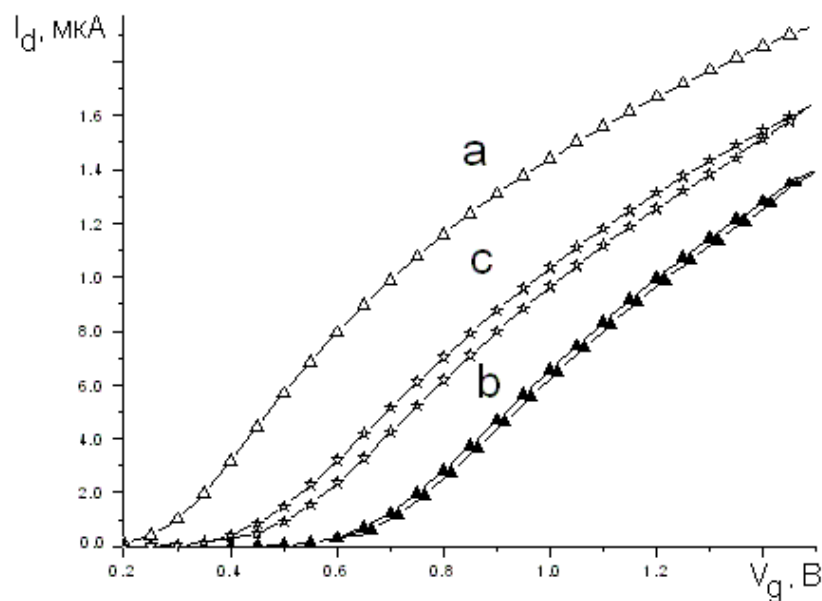


Рис. 2. Проходные характеристики транзистора  $I_d(V_g)$  во время эксперимента:  
а – пара кривых, измеренных на свежем приборе; б – пара кривых сразу после инжекции заряда; в – пара кривых после стадии разрядки

Если проводить измерение характеристик  $I_d(V_g)$  не два раза подряд, а большее число раз, то на графике (рис. 3) будет видна не пара кривых, а некоторое число, соответствующее количеству проведенных измерений; каждый раз разница уменьшается, а после десятого измерения новые кривые начинают почти сливаться со старыми.

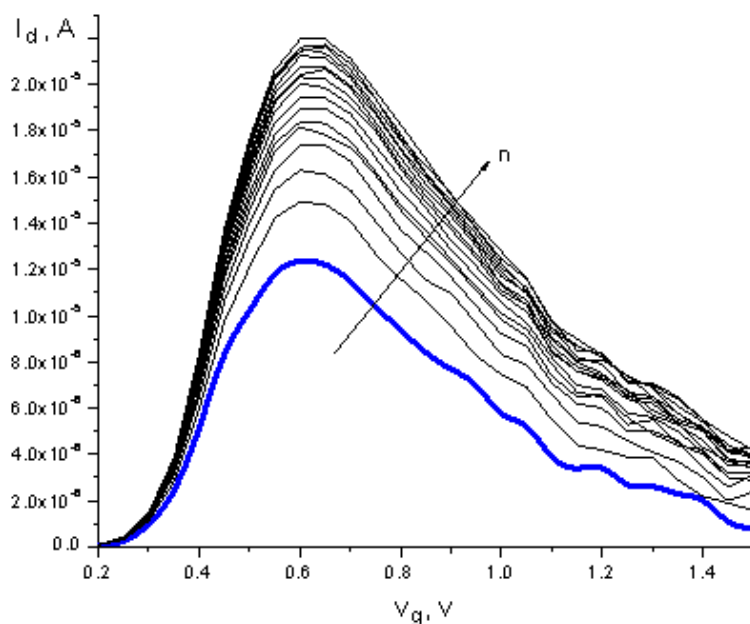


Рис. 3. Динамика изменения тока стока в зависимости от порядкового номера  $n$  последовательно выполненного измерения

На рис. 3 приведена динамика изменения тока стока в зависимости от порядкового номера последовательно выполненного измерения. Фаза разрядки присутствовала только перед первым измерением, а все последующие измерения проводились подряд без временных задержек. Видно, что приращение амплитуды с каждым разом уменьшается.

Во время эксперимента был охвачен диапазон температур от  $-50$  до  $+100$  °С. В экспериментах на стадии инжекции использовалась инжекция тока  $1$  нА в течение  $15000$  секунд. Плотность тока составляла  $5,71$  мА/см<sup>2</sup> для транзистора с  $W/L = 50/0,35$ . За это время был проинжектирован заряд около  $80$  Кл/см<sup>2</sup>.

Критерий выбора величины инжектированного заряда был обусловлен следующими соображениями. Во-первых, при меньшем заряде расхождение последовательно измеренных кривых выражено слабо. Например, при инжекции в течение  $10000$  секунд (заряд  $57,1$  Кл/см<sup>2</sup>), амплитуда разностей тока уменьшалась более чем в  $2$  раза. Во-вторых, с другой стороны, инжекция большей величины заряда представляет серьезные трудности, так как, во-первых, технически тяжело реализовать инжекцию более  $15000$  секунд, а, кроме того, образцы редко выдерживали больший заряд.

Можно предположить, что изменение тока (рис. 4) в последовательных измерениях является следствием зарядки и/или разрядки граничных ловушек, в основном «медленных» ловушек. Таким образом, наблюдая данное явление, можно изучить «медленные» ловушки и исследовать деградационные процессы.

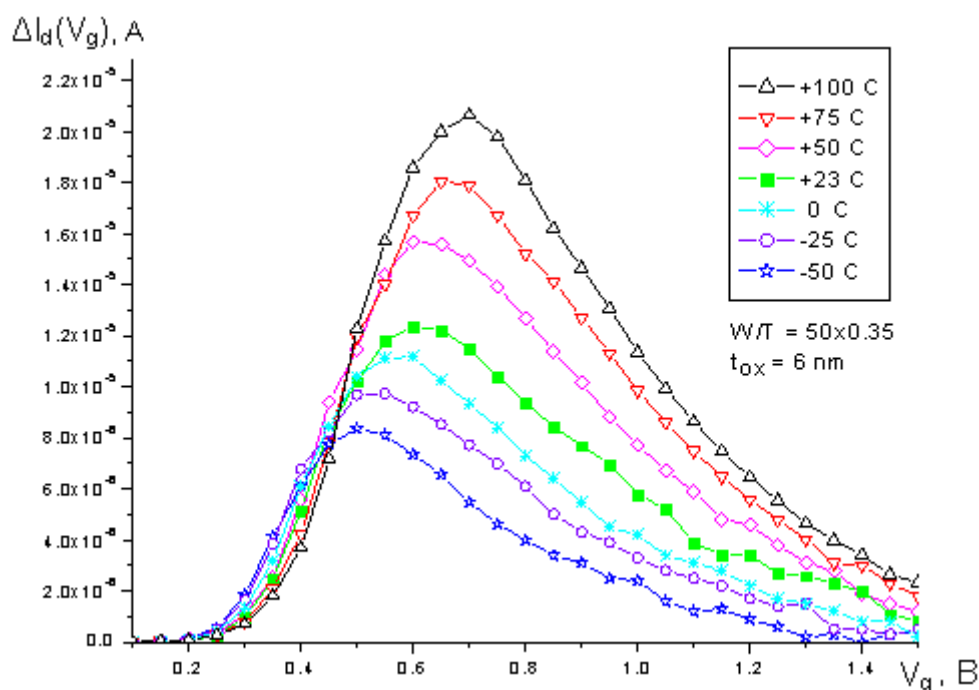


Рис. 4. Изменение тока стока при двух последовательных измерениях ( $\Delta I_d(V_g) = I_{d1}(V_g) - I_{d2}(V_g)$ ), температура в качестве параметра

Средняя плотность «медленных» граничных ловушек может быть рассчитана:

$$N_{bt} = \frac{C_{ox}}{q} \Delta V_{th},$$

где  $\Delta V_{th}$  определяется на основании измерений.

По-видимому, изменение  $I_d(V_g)$  будет наблюдаться также и в случае, если стадию инжекции заменить стрессовым воздействием горячими носителями либо облучением (ионизирующим или плазменным).

Разница между двумя последовательно измеренными  $I_d(V_g)$  после проведения инжекции не имела определенного характера. Температура менялась в качестве параметра, зависимость изменения тока  $I_d(V_g)$  от температуры выявить не удалось.

Ввиду отсутствия достаточного количества ловушек в свежем приборе, два последовательных измерения  $I_d(V_g)$  не дает сколько-нибудь различных кривых на графике. Однако, при инжекции, приводящей к небольшой деградации диэлектрика, создаются ловушки.

После инжекции электронов из подложки разница между кривыми, соответствующими двум последовательным измерениям  $I_d(V_g)$  объясняется большим количеством электронов, захваченных в подзатворном диэлектрике в течение инжекции по Фаулеру-Нордгейму.

Когда во время фазы разрядки, высвобождаются неосновные носители, захваченные на ловушки, находящиеся вблизи поверхности раздела Si-SiO<sub>2</sub>, эта группа разряженных ловушек становится электрически активной. Следующая фаза подтверждает это предположение. При измерениях после стадии разрядки «медленные» ловушки перезаряжаются неосновными носителями в течение первой развертки напряжения от нуля до напряжения инверсии. Во время второй развертки ловушки уже оказываются частично заряженными. Так как имеем дело с «медленными» ловушками, они могут удерживать заряд в течение времени, за которое можно выполнить несколько измерений  $I_d(V_g)$ . Захваченные неосновные носители заряда создают дополнительный поверхностный потенциал и, соответственно, вызывают сдвиг последующих кривых по оси  $V_g$ .

Во время многократных измерений  $I_d(V_g)$  приращение изменения тока стока, по-видимому, можно объяснить тем, что новые ловушки заряжаются носителями, а на их зарядку тратится определенное время.

На рис. 5 приведена зависимость максимальной величины изменения тока стока в зависимости от порядкового номера измерения. График спрямляется при введении логарифмического масштаба по оси абсцисс. Факт спрямления графика хорошо согласуется с литературными данными, так как указывает на наличие экспоненциальной зависимости между зарядкой и разрядкой ловушек в диэлектрике от времени измерения.

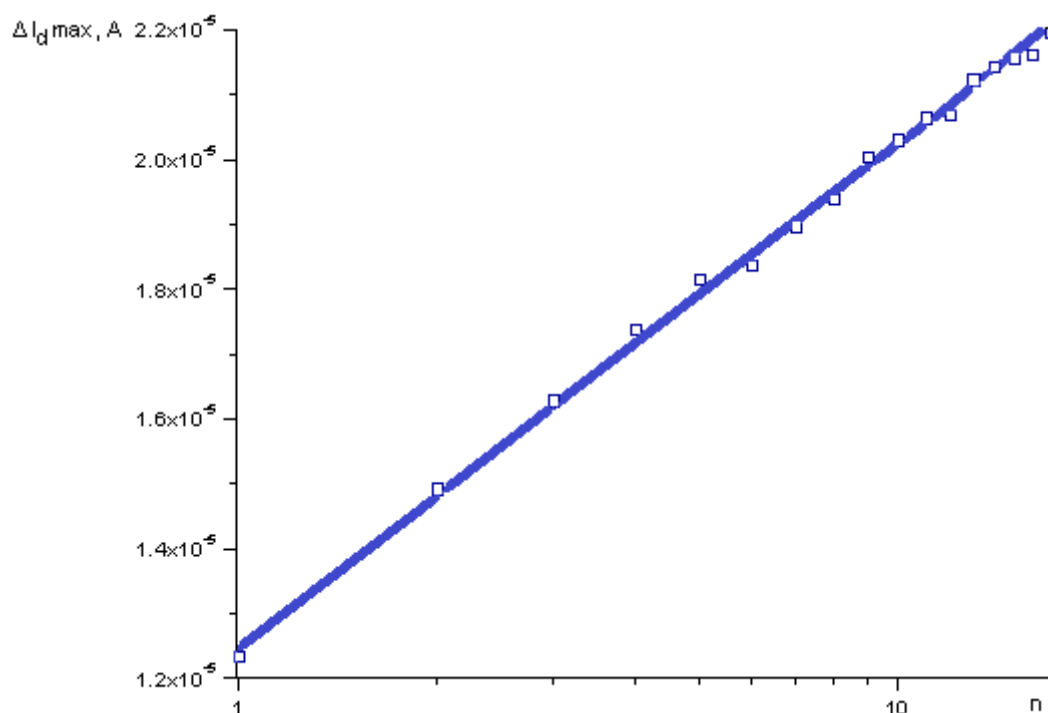


Рис. 5. Максимальная величина изменения тока стока в зависимости от порядкового номера измерения

В [4] приводятся данные по изучению нестабильности МДП-приборов, и предлагается в качестве одного из методов повышения стабильности измерений понижение температуры. Полученные в настоящей работе результаты вполне подтверждают это предположение, так как с понижением температуры наблюдается уменьшение изменения тока.

Результаты проведения инжекционных испытаний представлены на рис. 6-9. Характер кривых хорошо согласуется с литературными данными [1], но абсолютные значения изменения напряжения значительно ниже, так как толщина диэлектрика в настоящей работе значительно меньше.

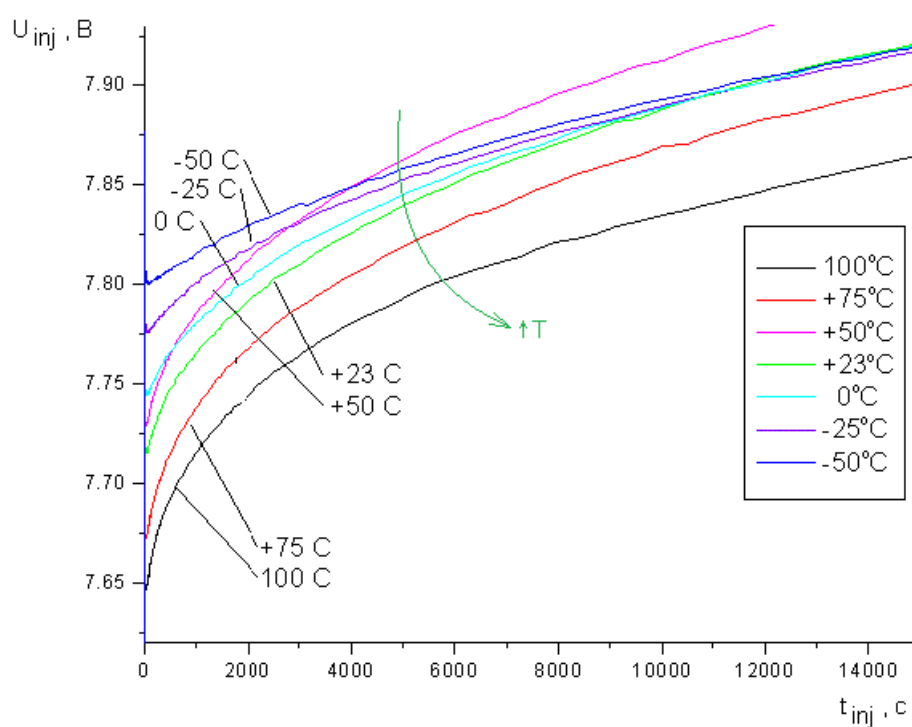


Рис. 6. Зависимости напряжения инжекции от времени при различных температурах

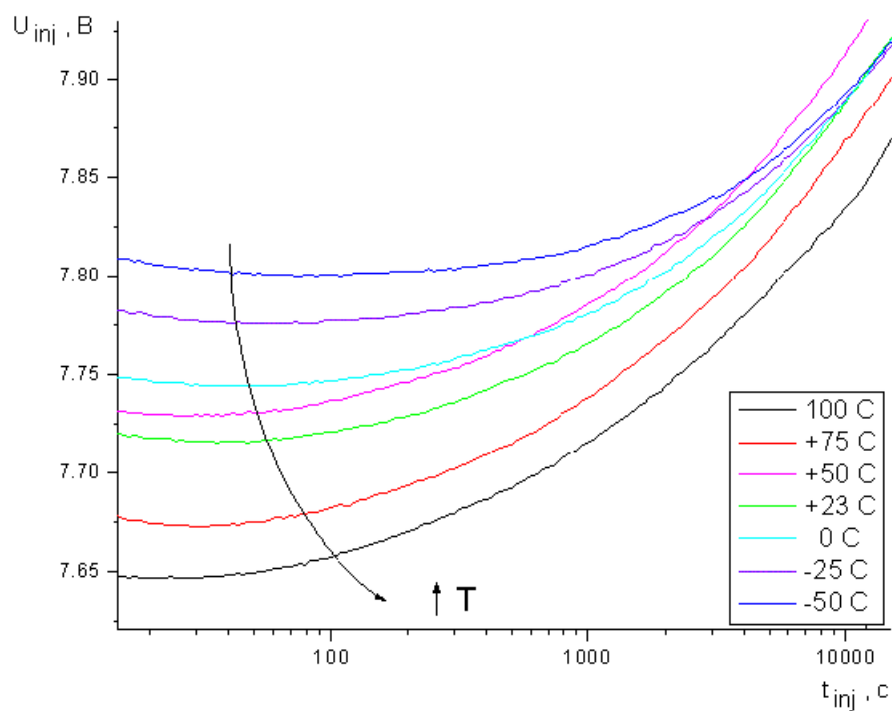


Рис. 7. Представление графика рис. 6 зависимости напряжения инжекции от времени при различных температурах в полулогарифмическом масштабе

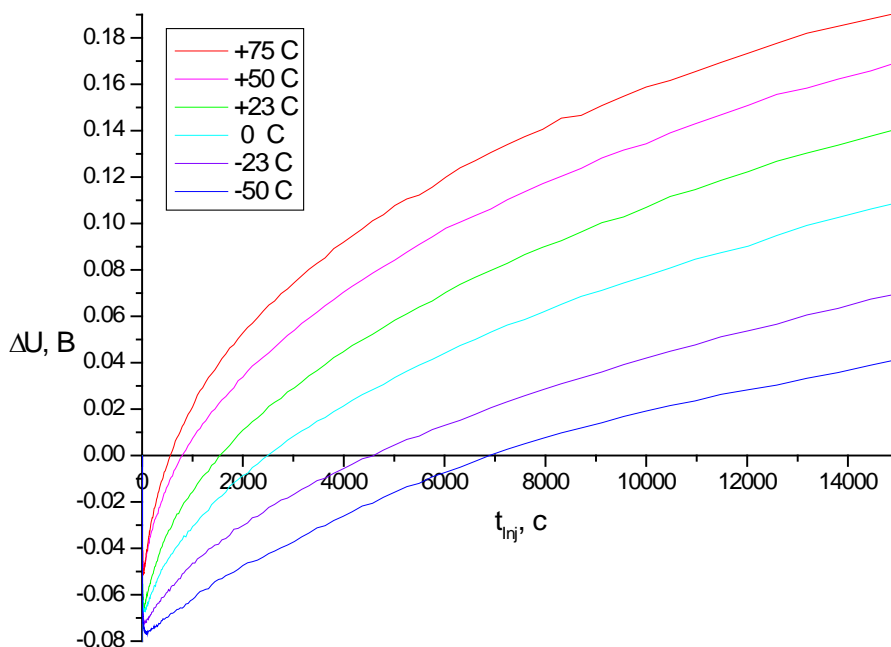


Рис. 8. Сдвиг напряжения  $\Delta U$  на образце в течение инжекции в зависимости от времени инжекции



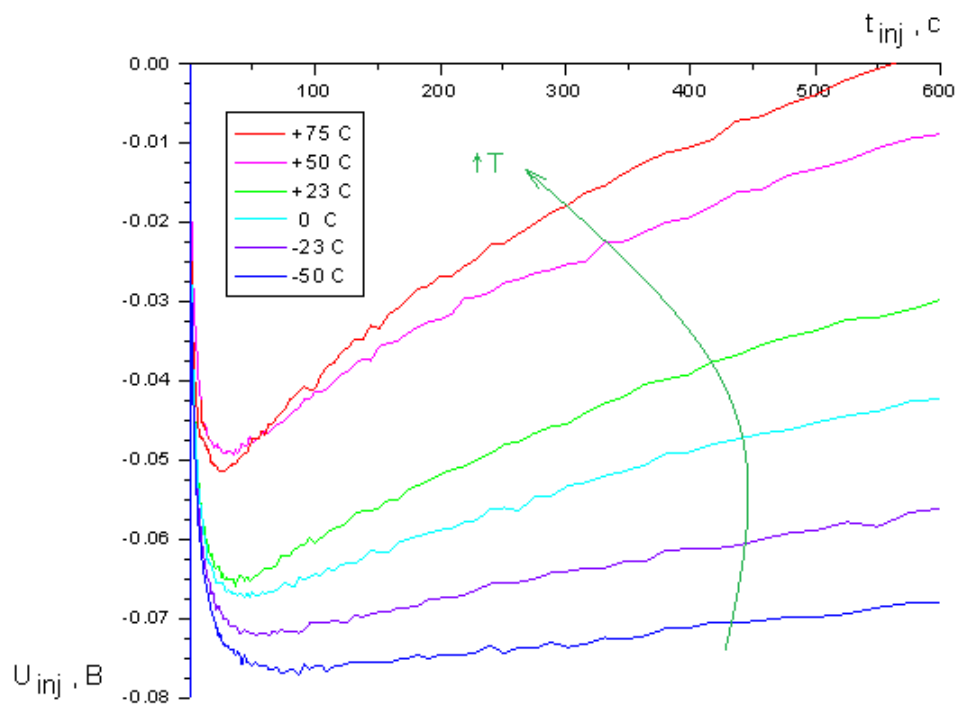


Рис. 9. Сдвиг напряжения  $\Delta V$  на образце в течение инъекции в зависимости от времени инъекции с увеличением начального участка (первая минута для графиков рис. 8).

Обработка данных, полученных в результате инъекционных испытаний и представленных на рис. 6-9, позволила вычислить разницы в напряжениях инъекции (рис. 10).

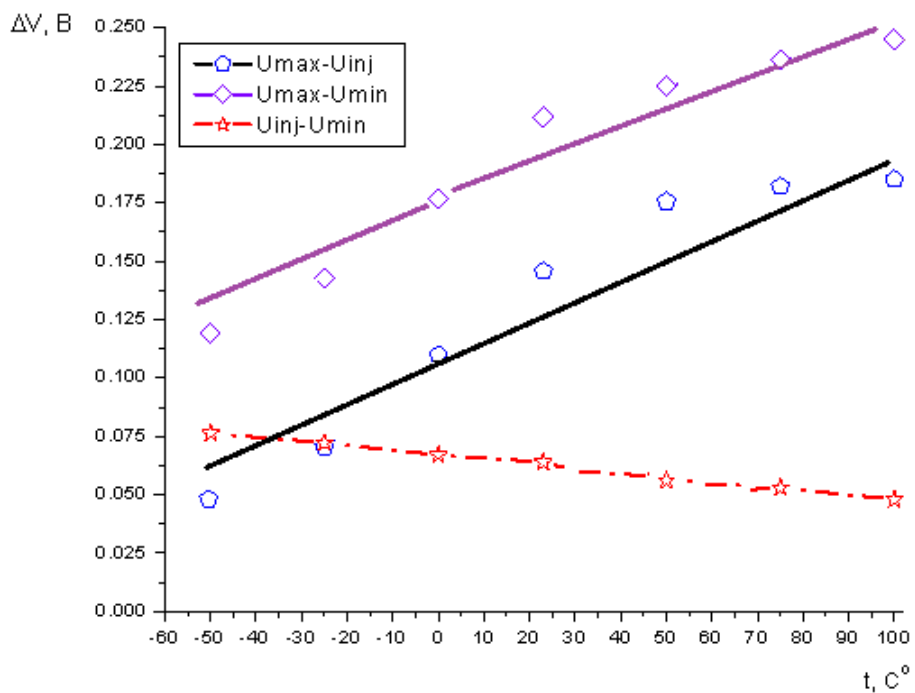


Рис. 10. Зависимость изменения напряжения  $\Delta U_1 = U_{max} - U_{inj}$ ,  $\Delta U_2 = U_{max} - U_{min}$  и  $\Delta U_3 = U_{inj} - U_{min}$  от температуры

Фактически, графики на рис. 10 иллюстрируют характер изменения плотности положительного заряда под влиянием температуры. Как известно [5, 6], захват заряда при сильнополевой туннельной инжекции состоит из двух компонент: генерация дырок в пленке SiO<sub>2</sub> с последующим их захватом в объеме у границы Si-SiO<sub>2</sub> и накопления отрицательного заряда в объеме диэлектрика. Однако, на начальном участке инжекции доминирующим (до 90% от общего вклада) является захват положительного заряда.

Как видно из графиков на рис. 10, положительный заряд убывает с ростом температуры, что можно объяснить снижением вероятности термического выброса из ловушек, которая увеличивается с ростом температуры.

### **Выводы**

1. Исследовано явление изменения тока стока проходной характеристики  $I_d(V_g)$  полевого транзистора с наноразмерным диэлектриком.

2. Предположительно, изменение тока стока обусловлено зарядкой и/или разрядкой граничных ловушек, в основном «медленных» ловушек.

3. Предложенный метод подтверждает наличие экспоненциальной зависимости между зарядкой/разрядкой ловушек в диэлектрике и временем измерений, что оказалось справедливо как для образцов с наноразмерным диэлектриком, так и для образцов, выполненных по традиционной КМОП-технологии [1].

4. Для изучения «медленных» ловушек и исследования деградиационных процессов в наноразмерном диэлектрике можно рекомендовать применение описанного метода.

5. Понижение температуры образца при измерении можно рекомендовать в качестве одного из методов повышения стабильности измерений.

### **Список литературы**

1. Андреев В.В., Барышев В.Г., Столяров А.А. Инжекционные методы исследования и контроля структур металл-диэлектрик-полупроводник. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 256 с.

2. Исследование процессов сильнополевой инжекционной модификации и деградации МДП-структур / В.В. Андреев [и др.] // Перспективные материалы. 2004. № 2. С. 20-27.

3. Андреев В.В., Драч В.Е., Орехов С.Ю. Контроль качества КМДП-ИС с учетом температурной зависимости генерации положительного заряда методом управляемой токовой нагрузки // Труды МГТУ. 2005. №5. С.19-24.

4. Scarpa A., Paccagnella A., Ghidini G. Instability of post-Fowler-Nordheim stress measurements of MOS devices // *Solid-State Electron*. 1997. V. 41, № 7. P. 935-938.

5. Investigation of temperature dependence of positive charge generation in MOS structures under high-field electron injection / Andreev V.V. [et al] // *FIEM-05: Proc. of the Intern. conf. Kaluga, 2005*. P. 92.

6. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Drach V.E. Study of temperature dependence of positive charge generation in thin dielectric film of MOS structure under high-fields // *Proc. of the 13th Intern. Congress on Thin Films & 8th Intern. Conf. on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces & Nanostructures. Stockholm, 2005*. P. 86.

## Monitoring procedure of a nano-sized dielectric charge of MOSFET 77-30569/332405

# 02, February 2012

Drach V.E., Chuhraev I.V.

Bauman Moscow Technical University, Kaluga Branch

[drach@kaluga.org](mailto:drach@kaluga.org)

[igor.chukhraev@mail.ru](mailto:igor.chukhraev@mail.ru)

A dielectric charge degradation monitoring procedure of nano-sized short-channel MOSFETs under high-field tunnel injection at different temperatures was proposed. The consequent  $I_d(V_g)$  measurement in addition to injection stress was proposed. The proposed technique shows exponential dependence between charging/discharging of traps in dielectric versus time of measurement.

---

Publications with keywords: [insulator](#), [MOSFET](#), [injection](#), [charge generation](#)

Publications with words: [insulator](#), [MOSFET](#), [injection](#), [charge generation](#)

---

### Reference

1. Andreev V.V., Baryshev V.G., Stoliarov A.A., Injection methods of research and control structures of metal-dielectric-semiconductor, Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana – BMSTU Press, 2004, 256 p.
2. Andreev V.V., et al., Study of the processes of strongly field-injection modification and degradation of metal-insulator-semiconductor structures, Perspektivnye materialy 2 (2004) 20-27.
3. Andreev V.V., Drach V.E., Orekhov S.Iu., Quality control of Complementary Metal-insulator-conductor integrated circuits, taking into account the temperature dependence of the generation of positive charge is controlled by the the method of controlled load current, Trudy MGTU - Proceedings of the BMSTU 5 (2005) 19-24.
4. Scarpa A., Paccagnella A., Ghidini G., Instability of post-Fowler-Nordheim stress measurements of MOS devices, Solid-State Electron. 41 (7) (1997) 935-938.
5. Andreev V.V., et al., Investigation of temperature dependence of positive charge generation in MOS structures under high-field electron injection, in: Proc. of the Intern. Conf. FIEM-05, Kaluga, 2005, 92 p.
6. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Drach V.E., Study of temperature dependence of positive charge generation in thin dielectric film of MOS structure under high-fields, in: Proc. of the 13th Intern. Congress on Thin Films & 8th Intern. Conf. on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces & Nanostructures, Stockholm, 2005, 86 p.