

Методика контроля подзатворного диэлектрика МДП-структур на основе сильнополевой инжекции заряда

Д. В. Андреев

Предложен новый метод исследования зарядовых характеристик и контроля качества тонких диэлектрических плёнок МДП-структур, основанный на модификации метода сильнополевой инжекции заряда в диэлектрик в режиме возрастающего тока. Методика основана на приложении к исследуемой МДП-структуре возрастающей токовой нагрузки, в которой помимо параметров, характеризующих пробой диэлектрика, проводится контроль изменения его зарядового состояния. С этой целью при плотностях инжекционного тока, когда становятся заметными изменения зарядового состояния МДП-структуры, перед переключением тока на ступеньку с большим значением тока, проводится кратковременное переключение на режим инжекции измерительным уровнем тока (J_m). Плотность тока J_m выбирается из условия, что при ней не должно наблюдаться заметного изменения зарядового состояния диэлектрика и переключения в измерительный режим не должны оказывать заметного влияния на процесс испытания. В результате удастся получить зависимость изменения напряжения на МДП-структуре от времени или величины инжектированного заряда при постоянной фиксированной величине измерительного инжекционного тока J_m во всем диапазоне возрастающего стрессового токового воздействия. Из этих зависимостей можно определять основные параметры, характеризующие зарядовые процессы, протекающие в МДП-структуре при сильнополевой инжекции электронов и определяющие деградационные явления, наблюдающиеся в пленке подзатворного диэлектрика.

Ключевые слова: МДП-структура, методика контроля, подзатворный диэлектрик, инжекционный ток, накопление заряда, стрессовое воздействие.

DOI: 10.30791/1028-978X-2021-8-81-88

Введение

В интегральных микросхемах и полупроводниковых приборах со структурой металл – диэлектрик – полупроводник (МДП) основным элементом, определяющим их надежность и способность работать в критических режимах, таких как сильные электрические поля, радиационные воздействия и т.д. является тонкая пленка подзатворного диэлектрика [1 – 8]. Для испытания таких пленок и изучения деградационных процессов, протекающих в них, часто обращаются к методам, основанным на сильнополевой инжекции электронов в диэлектрик [1, 2, 7 – 18]. Эти методы широко применяют как для исследования зарядовых процессов, протекающих в диэлектрической пленке, так и для ускоренной оценки процессов деградации, приводящих к

пробой диэлектрика и выходу прибора из строя. В настоящее время для исследования процессов зарядовой деградации диэлектрических пленок в основном используют метод стрессового воздействия постоянным током (constant current stress — CCS) и метод стрессового воздействия постоянным напряжением (constant voltage stress — CVS) [2, 10, 14]. Поддержание постоянным тока или напряжением в процессе всего стрессового воздействия существенно упрощает физическую интерпретацию полученных результатов. Однако применение этих методов, как правило, требует существенных временных затрат, поэтому в условиях промышленного производства при проведении статистического контроля качества тонких пленок подзатворного диэлектрика в основном используют метод стрессового воздействия возрастающим током (ramped current

stress — RCS или J-Ramp) или метод стрессового воздействия возрастающим напряжением (ramped voltage stress — RVS или V-Ramp) [2, 10 – 18]. В данных методах на каждом последующем шаге испытания плотность тока обычно увеличивается по экспоненциальному закону, а напряжение возрастает линейно [2, 10, 13, 17]. Использование данных методов позволяет существенно уменьшить время испытания, однако постоянно изменяющиеся условия стрессового воздействия существенно затрудняют физическую интерпретацию зарядовых явлений, протекающих в диэлектрической пленке. Следовательно, доработка метода стрессового воздействия возрастающим током с целью расширения его функциональных возможностей за счет количественного контроля изменения зарядового состояния диэлектрика представляет большой практический интерес.

Цель данной работы — рассмотреть усовершенствованный метод стрессового воздействия возрастающим током, в котором введен специальный режим инжекции при постоянной измерительной плотности тока, что наряду с определением параметров, характеризующих пробой диэлектрика, позволяет контролировать изменения его зарядового состояния в процессе всего испытания.

Описание метода

Метод стрессового воздействия возрастающим током наиболее часто применяют для контроля качества технологического процесса с использованием тестовых МДП-структур. Напряжение, прикладываемое к МДП-структуре в методе J-Ramp, должно быть достаточно для создания начальной величины

туннельного тока, поэтому данный метод практически не предназначен для выявления пробоев в слабых электрических полях. В тоже время данный метод позволяет выявлять пробой в сильных электрических полях за значительно меньшее время, чем метод стрессового воздействия возрастающим напряжением [10]. В методе J-Ramp испытания начинают с низкого начального уровня тока, а затем плотность инжекционного тока, протекающего через диэлектрик, ступенчато увеличивается (обычно по экспоненциальному закону) вплоть до пробоя образца. Основным параметром, контролируемым в методе J-Ramp, является плотность заряда, инжектированного в подзатворный диэлектрик до его пробоя, Q_{bd} [2, 9, 10]. Анализируя статистические измерения Q_{bd} определяют плотность дефектов подзатворного диэлектрика и проводят оценку времени наработки до отказа МДП-приборов с данным подзатворным диэлектриком.

Изменение зарядового состояния подзатворного диэлектрика в методе J-Ramp можно оценить по временной зависимости напряжения на МДП-структуре в процессе испытания. Однако использование этого метода для исследования процессов зарядовой деградации имеет существенные сложности в связи с постоянно изменяющимися (на каждом шаге возрастания плотности тока) условиями инжекции заряда и, соответственно, анализом изменения временной зависимости напряжения на МДП-структуре. Для устранения указанного недостатка и расширения функциональных возможностей метода стрессового воздействия возрастающим током предложена усовершенствованная методика испытаний, для которой на рис. 1 представлены временные зависимости стрессового

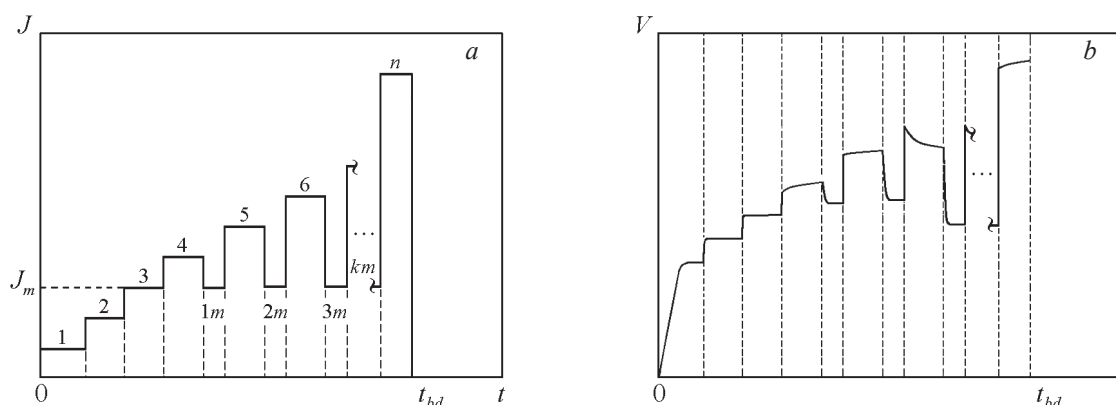


Рис. 1. Временные зависимости подаваемой на образец токовой нагрузки (а) и напряжения, падающего на МДП-структуру (б).

Fig. 1. Time dependencies of current stress applied to sample (a) and voltage across MIS structure (b).

воздействия возрастающим током и напряжения, падающего на исследуемой МДП-структуре. Как видно из рис. 1, в предложенном методе стрессовое воздействие возрастающим током реализуется на участках 1, 2, 3, 4, 5, 6 ... n . На n -участке, также, как и в стандартном J-Ramp методе, происходит пробой диэлектрика и испытания прекращаются. Отличительной особенностью предлагаемого метода является то, что в алгоритме стрессового токового воздействия при плотностях инжекционного тока, когда становятся заметными изменения зарядового состояния МДП-структуры (рис. 1, участок 4), перед переключением тока на ступеньку с большим значением тока проводится кратковременное переключение на режим инжекции измерительным уровнем тока J_m (участки $1m, 2m, 3m \dots km$). Плотность тока J_m выбирается из условия, что при ней не должно наблюдаться заметного изменения зарядового состояния диэлектрика, а переключения в измерительный режим не должны оказывать заметного влияния на процесс испытания. Значение напряжения на участке 3 (рис. 1) берется в качестве исходного, а значения напряжения, измеренные на последующих измерительных участках ($1m, 2m, 3m \dots km$), характеризуют изменение зарядового состояния подзатворного диэлектрика, как в методе стрессового воздействия постоянным током [2, 7, 10, 14]. В результате во всем диапазоне возрастающего стрессового токового воздействия можно получить зависимость изменения напряжения на МДП-структуре от времени или величины инжектированного заряда при постоянной фиксированной величине инжекционного тока J_m . Из этих зависимостей можно определять такие важные параметры, характеризующие зарядовые процессы, протекающие в МДП-структуре при сильнополевой инжекции электронов, как плотность и место локализации зарядов, накапливаемых в диэлектрической пленке, сечения захвата электронных и дырочных ловушек, и т.д. [2, 7, 8, 14, 19, 20]. Анализ изменения зарядового состояния подзатворного диэлектрика в процессе испытаний позволяет определить основные физические процессы, приводящие к деградации и последующему пробоем подзатворного диэлектрика.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Исследования проводили на МДП-конденсаторах, полученных промышленным способом на полупроводниковых пластинах кремния n -типа с удельным сопротивлением 4,5 Ом·см ориентацией $\langle 100 \rangle$ одновременно с изготовлением пар-

тии МДП-приборов. Диоксид кремния толщиной 80 нм получали термическим окислением кремния в сухом кислороде при температуре 1000 °С с добавлением 3 % HCl. Затем пластины отжигали в атмосфере азота при температуре 1000 °С. Алюминиевую пленку толщиной 1,2 мкм напыляли магнетронным методом, после чего, используя фотолиитографию, формировали Al электроды площадью 10^{-2} см² и удаляли оксид с обратной стороны пластины. Последующий отжиг проводили при температуре 475 °С в среде азота.

Апробацию предложенного метода осуществляли с использованием установки, описанной в [21]. Исследования проводили при положительной полярности стрессового воздействия, прикладываемого к затвору, что обеспечивало инжекцию электронов из кремниевой подложки и создание в приповерхностной области полупроводника режима аккумуляции. Для оценки изменения зарядового состояния МДП-структур также использовали высокочастотный C – V метод.

На рис. 2 показаны высоковольтные участки временной зависимости напряжения на МДП-структуре при стрессовом воздействии возрастающим током для стандартного J-Ramp метода (a) и возрастающим током с переключением на измерительный уровень тока для предлагаемого метода (b). Показанные на рис. 2 временные зависимости напряжения соответствуют МДП-структуре со средним значением заряда, инжектированного до пробоя. Алгоритм воздействия возрастающим током выбирали из рекомендаций JEDEC стандарта [17]. Плотность начального тока составляла $J_0 = 1$ мкА/см², а величина тока на i -й ступеньке определяли выражением:

$$J_i = J_0 F^i,$$

где F -фактор был равен 1,585 [10], что позволяло обеспечивать 5 шагов на декаду. Длительность стрессового воздействия на каждой ступеньке составляла 1 с.

Как видно из рис. 2, заметные изменения зарядового состояния подзатворного диэлектрика происходили при плотностях тока больше 10 мкА/см² и, следовательно, именно эта плотность тока была выбрана в качестве измерительной J_m . Длительность измерительных участков составляла 0,2 с, что обеспечивало завершение переходных процессов при переключении и позволяло определять изменение напряжения на МДП-структуре при плотности тока J_m после каждой последующей ступеньки стрессового воздействия. Анализируя временные зависимости, приведенные на рис. 2,

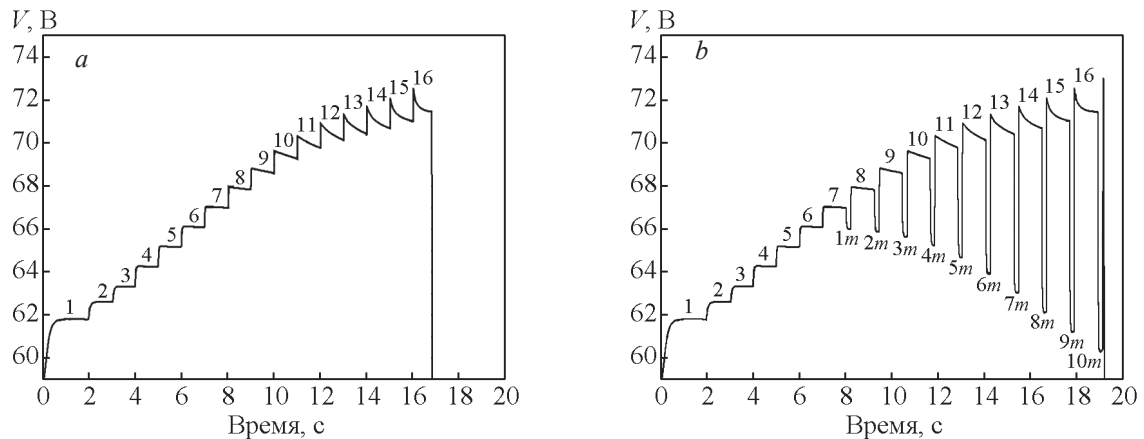


Рис. 2. Высоковольтный участок временной зависимости напряжения на МДП-структуре при стрессовом воздействии возрастающим током (а) и возрастающим током с переключением на измерительный уровень тока (b).

Fig. 2. High-voltage region of time dependence of voltage across MIS structure being under stress by increasing current (a) and increasing current with transitions to measurement current level (b).

можно сделать вывод, что введение измерительных участков данной длительности практически не влияло на зарядовые процессы, наблюдаемые на стрессовых участках.

На основе значений напряжений, полученных на измерительных участках (рис. 2, 1m, 2m ... 10m), было получена зависимость напряжения на МДП-структуре от плотности инжектированного в подзатворный диэлектрик заряда при стрессо-

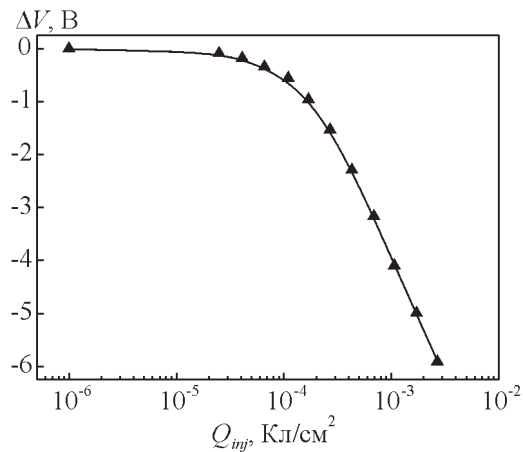


Рис. 3. Изменение напряжения на МДП-структуре в зависимости от плотности инжектированного в подзатворный диэлектрик заряда при стрессовом воздействии возрастающим током, полученное из результатов контроля на измерительном уровне тока.

Fig. 3. Change of voltage across MIS structure, which is extracted from test results at measurement current level, on density of injected into gate dielectric current when the sample is under stress by increasing current.

вом воздействии возрастающим током (рис. 3). Как видно из рис. 3, основным механизмом изменения зарядового состояния исследуемых МДП-структур было накопление в пленке подзатворного диэлектрика положительного заряда, что приводило к уменьшению напряжения, падающего на образце. Смещения напряжения середины запрещенной зоны, полученные из C – V измерений, имели характер, близкий к виду кривой, представленной на рис. 3, что также подтверждает накопление положительного заряда в объеме пленке диэлектрика [7, 14, 22]. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с литературными данными и нашими предыдущими исследованиями для МДП-структур с аналогичным подзатворным диэлектриком [2, 19 – 26]. В соответствии с этими результатами при инжекционных токах, обеспечивающих создание электрических полей более 6,5 МВ/см, существенное влияние на зарядовую деградацию пленок SiO₂ толщиной 80 нм оказывает накопление положительного заряда в подзатворном диэлектрике на расстоянии 3 – 5 нм от катода. Генерация положительного заряда обусловлена в основном накоплением дырок, возникающих в диэлектрике в результате межзонной ударной ионизации и инжекции дырок из анода [2, 8, 14, 19]. Величина накапливаемого положительного заряда увеличивается с возрастанием электрических полей, которые создаются при большей плотности инжекционного тока и, по-видимому, накопление положительного заряда является определяющим процессом, приводящим к пробое диэлектрика. Это предположение также подтверждается существ-

венно бóльшими значениями среднего заряда, инжектированного до пробоя в условиях стрессовых воздействий постоянной плотностью тока (например, $J_{stress} = 100 \text{ мкА/см}^2$).

При статистическом анализе качества исследуемого подзатворного диэлектрика было установлено, что на начальном этапе воздействия при малых значениях инжекционного тока зарядовая деградация незначительна (рис. 2 и 3) и на этом участке пробивается небольшое количество МДП-структур. При больших значениях инжектированного заряда плотность инжекционного тока достигает сравнительно больших значений, что приводит к увеличению электрических полей, приложенных к подзатворному диэлектрику и, как следствие, к интенсификации процессов зарядовой деградации. В результате на этом участке заметно возрастает количество пробивающихся МДП-структур. Использование предложенного алгоритма испытания позволило наряду с определением стандартного статистического распределения МДП-структур по заряду, инжектированному до пробоя [2, 10, 17, 18], получить зависимость изменения напряжения на МДП-структурах при измерительном уровне тока от плотности инжектированного заряда в течение всего процесса испытания (рис. 3). Таким образом, предложенный метод позволяет получить информацию о процессах зарядовой деградации МДП-структур, аналогичную методу постоянного тока, и более корректно выбрать режимы измерения при использовании метода J-ramp.

Выводы

Предложена усовершенствованная методика ускоренных испытаний тонких диэлектрических пленок МДП-структур, основанная на приложении к образцу возрастающей токовой нагрузки, в которой при плотностях инжекционного тока, когда становятся заметными изменения зарядового состояния МДП-структуры, перед переключением тока на ступеньку с большим значением тока проводится кратковременное переключение на режим инжекции измерительным уровнем тока (J_m). Плотность тока J_m и длительность измерительного режима выбирается из условия, что добавление измерительного режима не должно вносить заметного изменения в зарядовое состояние диэлектрика и, соответственно, не должно оказывать влияние на процесс испытания. Введение измерительных режимов позволяет получить зависимость изменения напряжения на МДП-структуре от времени или величины инжектированного заряда при постоян-

ной фиксированной величине инжекционного тока J_m во всем диапазоне возрастающего стрессового токового воздействия. Предложенный метод позволяет получить информацию о процессах зарядовой деградации МДП-структур, аналогичную методу постоянного тока, и более корректно выбрать режимы измерения при использовании метода J-ramp.

Проведена апробация предложенного метода на МДП-структурах с термической пленкой SiO₂.

Установлено, что для данных диэлектрических пленок основным механизмом зарядовой деградации, приводящим к пробоям диэлектрика при испытаниях J-ramp методом, является накопление в диэлектрической пленке положительного заряда.

Показано, что предложенный метод позволяет определять основные параметры зарядов, накапливаемых в диэлектрической пленке в процессе испытания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта “Фундаментальные исследования методов цифровой трансформации компонентной базы микро- и наносистем” № 0705-2020-0041.

Литература

1. Lombardo S., Stathis J.H., Linder P., Pey K.L., Palumbo F., Tung C.H. Dielectric breakdown mechanisms in gate oxides. *J. Appl. Phys.*, 2005, vol. 98. pp. 121301 (1 – 36).
2. Strong A., Wu E., Vollertsen R., Sune J., Rosa G., Rauch S., Sullivan T. Reliability wearout mechanisms in advanced CMOS technologies. *IEEE Press Series on Microelectronic Systems*. Wiley, 2009, 624 p.
3. Wu E.Y. Facts and myths of dielectric breakdown processes — Part I: Statistics, experimental, and physical acceleration models. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2019, vol. 66, pp. 4523 – 4534.
4. Palumbo F., We C., Lombardo S., Pazos S., Aguirre F., Eizenberg M., Hui F., Lanza M. A review on dielectric breakdown in thin dielectrics: Silicon dioxide, high-k, and layered dielectrics. *Adv. Funct. Mater.*, 2019, vol. 1900657, pp. 1900657 (1 – 26).
5. Гриценко В.А. Горячие электроны в оксиде кремния. *Успехи физических наук*, 2017, № 187, с. 971 – 979.
6. McPherson J.W. Time dependent dielectric breakdown physics – Models revisited. *Microelectronics Reliability*, 2012, vol. 52, pp. 1753–1760.
7. Fischetti M.V. Generation of positive charge in silicon dioxide during avalanche and tunnel electron injection. *J. Appl. Phys.*, 1985, vol. 57, pp. 2860-2879.
8. Arnold D., Cartier E., DiMaria D.J. Theory of high-field electron transport and impact ionization in silicon dioxide. *Phys. Rev. B*, 1994, vol. 49, no. 15, pp. 10278 – 10297.

9. Martin A., Hagen J., Alers G.B. Ramped current stress for fast and reliable wafer level reliability monitoring of thin gate oxide reliability. *Microelectronics Reliability*, 2003, vol. 43, pp. 1215 – 1220.
10. JEDEC Standard, JESD35–A: Procedure for the wafer-level testing of thin dielectrics, 2001.
11. JEDEC Standard JESD92. Procedure for characterizing time depend dielectric breakdown of ultra-thin gate dielectrics, 2003.
12. Kim A., Wu E., Li B., Linder B. Transformation of ramped current stress vbd to constant voltage stress TDDDB TBD. *IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)*, Monterey, CA, USA, 2019, pp. 1 – 5.
13. Martin A., Vollertsen R.-P., Mitchell A., Traving M., Beckmeier D., Nielen H. Fast wafer level reliability monitoring as a tool to achieve automotive quality for a wafer process. *Microelectronics Reliability*, 2016, vol. 64, pp. 2 – 12.
14. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A., Andreev D.V. Control current stress technique for the investigation of gate dielectrics of MIS devices. *Phys. Status Solidi C.*, 2015, vol. 12, no. 3, pp. 299 – 303.
15. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Method of stress and measurement current levels for MIS structures researching and modifying under high-field injection of electrons. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 168, pp. 012057 (1 – 6).
16. Andreev V.V., Maslovsky V.M., Andreev D.V., Stolyarov A.A. Method of stress and measurement modes for research of thin dielectric films of MIS structures. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 10224, pp. 1022429 (1 – 8).
17. Сивченко А.С., Кузнецов Е.В., Сауров А.Н. Определение времени наработки до отказа подзатворного диэлектрика суб-100-нм МОП-транзисторов с помощью ускоренных испытаний. *Изв. вузов. Электроника*, 2019, т. 24, № 5, с. 469 – 478.
18. Солодуха В.А., Пилипенко В.А., Чигирь Г.Г., Филипеня В.А., Горушко В.А. Экспрессный контроль надежности подзатворного диэлектрика полупроводниковых приборов. *Приборы и методы измерений*, 2018, т. 9, № 4, с. 306–313.
19. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Use of high-field electron injection into dielectrics to enhance functional capabilities of radiation MOS sensors. *Sensors*, 2020, вщд. 20, iss. 8, pp. 2382 (1 – 11).
20. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A. Modification of MIS devices by radio-frequency plasma treatment. *Acta Phys. Pol. A*, 2019, vol. 136, no. 2, pp. 263 – 266.
21. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Automated setup for researching of MIS structures under high-field tunnel injection of electrons at stress and measurement conditions. *IEEE*

Proceedings. 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Moscow, Russia, 2018, pp. 1 – 3.

22. Nissan-Cohen Y., Shappir J., Frohman-Bentchkowsky D. High-field and current-induced positive charge in thermal SiO₂ layers. *J. Appl. Phys.*, 1985, vol. 57, no. 8, pp. 2830 – 2839.
23. Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Андреев В.В., Столяров А.А. Повышение зарядовой стабильности пленок подзатворного диэлектрика МДП-структур методом их легирования фосфором. *Перспективные материалы*, 2020, № 7, с. 68 – 74.
24. Ristic G.S. Defect behaviors during high electric field stress of p-channel power MOSFETs. *IEEE Trans. Device Mater. Rel.*, 2012, vol. 12, no. 1, pp. 94 – 100.
25. DiMaria D.J., Cartier E., Buchanan D.A. Anode hole injection and trapping in silicon dioxide. *J. Appl. Phys.*, 1996, vol. 80, no. 1, pp. 304 – 317.
26. Pazos S.M., Baldomá S.B., Aguirre F.L., Krylov I., Eizenberg M., Palumbo F. Impact of bilayered oxide stacks on the breakdown transients of metal-oxide-semiconductor devices: An experimental study. *J. Appl. Phys.*, 2020, vol. 127, pp. 174101 (1 – 10).

References

1. Lombardo S., Stathis J.H., Linder P., Pey K.L., Palumbo F., Tung C.H. Dielectric breakdown mechanisms in gate oxides. *J. Appl. Phys.*, 2005, vol. 98, pp. 121301 (1 – 36).
2. Strong A., Wu E., Vollertsen R., Sune J., Rosa G., Rauch S., Sullivan T. Reliability wearout mechanisms in advanced CMOS technologies. *IEEE Press Series on Micro-electronic Systems*. Wiley, 2009, 624 p.
3. Wu E.Y. Facts and myths of dielectric breakdown processes — Part I: Statistics, experimental, and physical acceleration models. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2019, vol. 66, pp. 4523 – 4534.
4. Palumbo F., We C., Lombardo S., Pazos S., Aguirre F., Eizenberg M., Hui F., Lanza M. A review on dielectric breakdown in thin dielectrics: Silicon dioxide, high-k, and layered dielectrics. *Adv. Funct. Mater.*, 2019, vol. 1900657, pp. 1900657 (1 – 26).
5. Gritsenko V.A. Hot electrons in silicon oxide. *Physics-Uspokhi*, 2017, vol. 60, no. 9, pp. 920 – 910.
6. McPherson J.W. Time dependent dielectric breakdown physics – Models revisited. *Microelectronics Reliability*, 2012, vol. 52, pp. 1753 – 1760.
7. Fischetti M.V. Generation of positive charge in silicon dioxide during avalanche and tunnel electron injection. *J. Appl. Phys.*, 1985, vol. 57, pp. 2860 – 2879.
8. Arnold D., Cartier E., DiMaria D.J. Theory of high-field electron transport and impact ionization in silicon dioxide. *Phys. Rev. B*, 1994, vol. 49, no. 15, pp. 10278 – 10297.
9. Martin A., Hagen J., Alers G.B. Ramped current stress for fast and reliable wafer level reliability monitoring of thin gate oxide reliability. *Microelectronics Reliability*, 2003, vol. 43, pp. 1215 – 1220.

10. JEDEC Standard, JESD35–A: Procedure for the wafer-level testing of thin dielectrics, 2001.
11. JEDEC Standard JESD92. Procedure for characterizing time depend dielectric breakdown of ultra-thin gate dielectrics, 2003.
12. Kim A., Wu E., Li B., Linder B. Transformation of ramped current stress v_{bd} to con-stant voltage stress TDDDB T_{BD} . IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), Monterey, CA, USA, 2019, pp. 1 – 5.
13. Martin A., Vollertsen R.-P., Mitchell A., Traving M., Beckmeier D., Nielen H. Fast wafer level reliability monitoring as a tool to achieve automotive quality for a wafer process. Microelectronics Reliability, 2016, vol. 64. pp. 2 – 12.
14. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A., Andreev D.V. Control current stress technique for the investigation of gate dielectrics of MIS devices. Phys. Status Solidi C., 2015, vol. 12, no. 3, pp. 299 – 303.
15. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Method of stress and measurement current levels for MIS structures researching and modifying under high-field injection of electrons. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, vol. 168, pp. 012057 (1 – 6).
16. Andreev V.V., Maslovsky V.M., Andreev D.V., Stolyarov A.A. Method of stress and measurement modes for research of thin dielectric films of MIS structures. Proc. SPIE, 2016, vol. 10224, pp. 1022429 (1 – 8).
17. Sivchenko A.S., Kuznetsov E.V., Saurov A.N. Opredelenie vremeni narabotki do otказа podzатворного диэлектрика sub-100-nm MOP-транзисторов s pomoshh'ju uskorenykh ispytaniy [Time to failure determination for sub-100 nm MOS transistors gate dielectric by means of accelerated tests]. *Izvestija VUZov. Elektronika — Proceedings of Universities. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 5, pp. 469 – 478.
18. Solodukha V.A., Chigir G.G., Pilipenko V.A., Filipenya V.A., Gorushko V.A. Jekspressnyj kontrol' nadezhnosti podzатворного диэлектрика poluprovodnikovyh priborov [Reliability express control of the gate dielectric of semiconductor devices]. *Pribory i metody izmerenij — Devices and Methods of Measurements*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 306 – 313.
19. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Use of high-field electron injection into dielectrics to enhance functional capabilities of radiation MOS sensors. Sensors, 2020, vol. 20, iss. 8, pp. 2382 (1 – 11).
20. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A. Modification of MIS devices by radio-frequency plasma treatment. Acta Phys. Pol. A, 2019, vol. 136, no. 2, pp. 263 – 266.
21. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Automatized setup for researching of MIS structures under high-field tunnel injection of electrons at stress and measurement conditions. IEEE Proceedings Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Moscow, Russia, 2018, pp. 1 – 3.
22. Nissan-Cohen Y., Shappir J., Frohman-Bentchkowsky D. High-field and current-induced positive charge in thermal SiO₂ layers. J. Appl. Phys., 1985, vol. 57, no. 8, pp. 2830 – 2839.
23. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Increasing the charge stability of gate dielectric films of MIS structures by doping them with phosphorus. Inorganic Materials: Applied Research, 2021, vol. 12, no. 2, pp. 517 – 520.
24. Ristic G.S. Defect behaviors during high electric field stress of p-channel power MOSFETs. IEEE Trans. Device Mater. Rel., 2012, vol. 12, no. 1, pp. 94 – 100.
25. DiMaria D.J., Cartier E., Buchanan D.A. Anode hole injection and trapping in silicon dioxide. J. Appl. Phys., 1996, vol. 80, no. 1. pp. 304 – 317.
26. Pazos S.M., Baldomá S.B., Aguirre F.L., Krylov I., Eizenberg M., Palumbo F. Impact of bilayered oxide stacks on the breakdown transients of metal-oxide-semiconductor devices: An experimental study. J. Appl. Phys., 2020, vol. 127, pp. 174101 (1 – 10).

Статья поступила в редакцию — 10.08.2020 г.
 после доработки — 12.09.2020 г.
 принята к публикации — 13.09.2020 г.

Андреев Дмитрий Владимирович — Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана (248000, Калуга, ул. Баженова, 2), кандидат технических наук, доцент, специалист в области физики полупроводниковых и диэлектрических материалов. E-mail: dmitrii_andreev@bmstu.ru.

Technique to monitor gate dielectric of MIS structure based on high-field charge injection

D. V. Andreev

The paper suggests a novel technique to study charge characteristics and monitor quality of thin dielectric films of MIS structures. The technique is based on a modification of the method of high-field charge injection into dielectric under increasing current. The proposed technique consists in applying of the increasing current stress to MIS structure studied. The technique, besides monitoring parameters characterizing dielectric breakdown, makes possible to monitor change in charge state of the dielectric. In order to implement this, at levels of injection current density when changes in charge state of MIS structure become higher than a threshold levels, a transition to injection with measurement current level (J_m) for a short period of time being made. We choose a value of J_m on the basis of that this level must not significantly influence on the dielectric charge state and transitions to the level must not highly influence on the test procedure. As a result, it is possible to obtain dependencies of voltage across MIS structure on time or value of injected charge at a constant value of the measurement injection current (J_m) for all the range of increasing current stress. From these dependencies we can acquire key parameters characterizing charge effects taking place in MIS structure being under high-field injection of electrons and specifying degradation effects observing in the gate dielectric film.

Keywords: MIS structure, test technique, gate dielectric, injection current, charge accumulation, stress.

Andreev Dmitrii — The Kaluga branch of Bauman Moscow State Technical University (Kaluga, 248000, Bazhenov str., 2), PhD (Eng), associate professor, specialist in physics of semiconductors and dielectrics. E-mail: dmitrii_andreev@bmstu.ru.