

## **Повышение зарядовой стабильности пленок подзатворного диэлектрика МДП-структур методом их легирования фосфором**

**Д. В. Андреев, Г. Г. Бондаренко, В. В. Андреев, А. А. Столяров**

Показано, что термическое легирование пленки  $\text{SiO}_2$  фосфором, приводящее к образованию на ее поверхности тонкой пленки фосфорно-силикатного стекла, позволяет повысить зарядовую стабильность подзатворного диэлектрика МДП-структур. Установлено, что наличие пленки фосфорно-силикатного стекла дает возможность существенно уменьшить локальные инжекционные токи, протекающие в дефектных местах за счет захвата электронов на ловушки в пленке фосфорно-силикатного стекла, приводящего к повышению энергетического барьера. В результате существенно уменьшается количество структур, пробивающихся при малых значениях заряда, инжектированного в диэлектрик при сильнополевых воздействиях. Показано, что в пленке фосфорно-силикатного стекла снижаются процессы разогрева инжектированных электронов, что также приводит к увеличению зарядовой стабильности подзатворного диэлектрика при сильнополевых инжекционных воздействиях.

**Ключевые слова:** МДП-структура, диэлектрическая плёнка, сильные электрические поля, инжекционный ток, контроль.

DOI: 10.30791/1028-978X-2020-7-68-74

### **Введение**

Для улучшения характеристик подзатворных диэлектриков МДП-приборов на основе термических пленок  $\text{SiO}_2$  часто используют их легирование элементами V группы, такими как азот и фосфор [1 – 9]. Легирование пленок  $\text{SiO}_2$  фосфором в настоящее время наиболее широко применяют в МДП-приборах, изготавливаемых на основе карбида кремния [4 – 7]. Введение фосфора в подзатворный диэлектрик таких приборов приводит к пассивации поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик-полупроводник, повышению стабильности порогового напряжения и существенному возрастанию подвижности носителей заряда в канале МДП-транзистора. В кремниевой технологии легирование пленок  $\text{SiO}_2$  фосфором в основном используют в малых концентрациях, когда тонкий верхний слой диоксида кремния переходит в фосфорно-силикатное стекло (ФСС).

Образование тонкой пленки ФСС может наблюдаться и при использовании в МДП-приборах поликремневого затвора, легированного фосфором [10]. При определенных условиях наличие пленки ФСС в подзатворных диэлектриках на основе термического диоксида кремния может уменьшать дефектность и повышать стойкость приборов к радиационным и сильнополевым инжекционным воздействиям [11, 12]. Следовательно, исследование подзатворных диэлектриков на основе термической пленки  $\text{SiO}_2$ , легированной фосфором, при сильнополевых инжекционных воздействиях, выявляющих зарядовые дефекты и позволяющих изучать деградиационные процессы, даст возможность разработать методы улучшения характеристик подзатворных диэлектриков МДП-приборов.

Цель данной работы — исследование влияния легирования термической пленки  $\text{SiO}_2$  фосфором на процессы зарядовой деградации МДП-структур при сильнополевой туннельной по Фаулеру –

Нордгейму инъекции электронов в диэлектрик, а также изучение поведения зарядовых дефектов в подзатворном диэлектрике.

### Экспериментальные образцы и методики

Экспериментальные образцы представляли собой две группы тестовых МДП-структур. Первая группа содержала структуры на основе термической пленки  $\text{SiO}_2$ , а вторая — образцы на основе пленки  $\text{SiO}_2$  легированной фосфором. Образцы изготавливали промышленным способом на пластинах *n*-типа с удельным сопротивлением 4,5 Ом·см и кристаллографической ориентацией  $\langle 100 \rangle$ . Пленку  $\text{SiO}_2$  толщиной 90 нм получали термическим окислением кремния в атмосфере сухого кислорода при температуре 1000 °С с добавлением 3 % HCl. Пленку ФСС толщиной 18 нм и концентрацией фосфора около 1 % формировали диффузией фосфора из газовой фазы с использованием  $\text{POCl}_3$  при температуре 900 °С. Затем пластины отжигали в течении 15 мин в атмосфере азота при температуре 1000 °С. Алюминиевую пленку толщиной 1,2 мкм напыляли магнетронным методом, а затем с использованием фотолитографии формировали верхние затворы площадью  $10^{-3}$  и  $10^{-2}$  см<sup>2</sup>. После формирования Al-электродов проводили отжиг пластин в среде азота при температуре 475 °С.

Для исследования МДП-структур применяли метод сильнополевой инъекции электронов из кремниевой подложки в диэлектрическую пленку [1, 13]. В основном этот метод использовали в режиме поддержания постоянного инжекционного тока, протекающего через диэлектрик, а изменение зарядового состояния структуры контролировали по временной зависимости напряжения на МДП-структуре по методике, предложенной в [14, 15].

Для контроля зарядовой дефектности электрических плёнок использовали метод возрастающего тока (J-ramp) [16]. В соответствии с JEDEC (Joint Electron Engineering Council) стандартом в J-ramp методе на образец подавали возрастающий стрессовый ток и проводили статистическое измерение заряда, инжектированного в диэлектрик до его пробоя. J-ramp метод был выбран для расширения диапазона инжектированного заряда и обеспечения высокой оперативности проводимого контроля. По результатам статистического контроля дефектности диэлектрических плёнок строили гистограммы распределения МДП-структур на одной пластине по заряду, инжектированному до пробоя. Для получения хорошей достоверности при контроле дефектности для испытания с одной полупроводниковой

пластины использовали 100 экспериментальных образцов.

### Экспериментальные результаты

Экспериментальные результаты, характеризующие изменение зарядового состояния МДП-структур с пленкой  $\text{SiO}_2$  и  $\text{SiO}_2$ -ФСС при трех различных постоянных плотностях инжекционного тока представлены на рис. 1. Характер этих зависимостей хорошо коррелирует с ранее полученными нами результатами и литературными данными [17, 18]. Для МДП-структур с пленками  $\text{SiO}_2$  характерно накопление в диэлектрике положительного заряда, чему соответствует уменьшение напряжения на образце при инъекции электронов постоянным током. Эта зависимость имеет полевой характер и при большей плотности инжекционного тока наблюдается генерация более высокой плотности положительного заряда (рис. 1, кривые 1 – 3). Для МДП-структур с двухслойным диэлектриком  $\text{SiO}_2$ -ФСС при сильнополевой инъекции электронов в диэлектрик доминирующим процессом характеризующим изменение зарядового состояния подзатворного диэлектрика является захват электронов на ловушки в пленке ФСС (рис.1, кривые 4 – 6) [12, 17, 18]. Для изучения влияния легирования пленки  $\text{SiO}_2$  фосфором на генерацию положительного заряда в подзатворном диэлектрике с использованием модели, предложенной нами в [11, 18], было проведено исследование зарядовых процессов, наблюдаемых в МДП-структурах с различными диэлектрическими пленками. Результаты моделирования представлены на рис. 1, кривые 1' – 6'. Как видно из рис. 1, для МДП-структур с термической пленкой  $\text{SiO}_2$  результаты моделирования хорошо совпадают с экспериментальными данными (кривые 1, 1', 2, 2', 3, 3'). Для МДП-структур с подзатворным диэлектриком  $\text{SiO}_2$ -ФСС расчет, выполненный в предположении, что в пленке ФСС генерация положительного заряда протекает аналогично процессу в пленке  $\text{SiO}_2$  для плотности инжекционного тока  $10^{-6}$  А/см<sup>2</sup>, соответствовал кривой 4'', что противоречило экспериментальным данным (кривая 4). Сильное снижение напряжения на МДП-структуре, характерное для кривой 4'', обусловлено значительным возрастанием локального электрического поля в пленке ФСС, связанного с накоплением в ней отрицательного заряда [11]. Кривые 4' – 6' на рис. 1, рассчитанные из предположения полного отсутствия генерации положительного заряда в пленке ФСС, тоже дают завышенные значения положительного заряда, от-

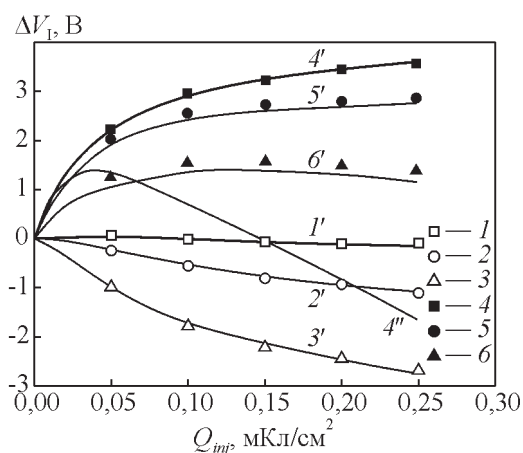


Рис. 1. Экспериментальные (1 – 6) и теоретические (1' – 6') сдвиги напряжения на МДП-структурах с диэлектрическими пленками SiO<sub>2</sub> (1', 2', 3') и SiO<sub>2</sub>-ФСС (4', 4'', 5', 6') от величины заряда, инжектированного в диэлектрик, при различной плотности туннельного тока: 1, 1', 4, 4' —  $j_0 = 10^{-6}$  А/см<sup>2</sup>; 2, 2', 5, 5' —  $j_0 = 10^{-5}$  А/см<sup>2</sup>; 3, 3', 6, 6' —  $j_0 = 10^{-4}$  А/см<sup>2</sup>

Fig. 1. Experimental (1 – 6) and theoretical (1' – 6') voltage shifts across MIS structures with SiO<sub>2</sub> (1', 2', 3') and SiO<sub>2</sub>-PSG (4', 4'', 5', 6') dielectric films on amount of charge injected into the dielectric under different densities of tunnel current: 1, 1', 4, 4' —  $j_0 = 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>; 2, 2', 5, 5' —  $j_0 = 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>; 3, 3', 6, 6' —  $j_0 = 10^{-4}$  A/cm<sup>2</sup>

личаясь от экспериментальных данных (кривые 5 и 6). По-видимому, существенное снижение процесса генерации положительного заряда в двухслойном подзатворном диэлектрике SiO<sub>2</sub>-ФСС связано не только с наличием пленки ФСС, но и с образованием слабо легированного фосфором слоя диоксида кремния. Легирование пленки SiO<sub>2</sub> фосфором приводит к более аморфной структуре подзатворного диэлектрика, а также образованию в нем различных центров [19 – 21], которые могут существенно снижать энергию инжектированных электронов, уменьшая процессы генерации положительного заряда.

Легирование термической пленки SiO<sub>2</sub> фосфором может существенно снижать зарядовую дефектность диэлектрической пленки, особенно на начальных этапах сильнополевой инжекции электронов. На рис. 2 представлены зависимости плотности инжекционного тока от величины инжектированного заряда при постоянном напряжении на затворе, обеспечивающем протекание начального инжекционного тока 10 мкА/см<sup>2</sup> для МДП-структур с различным подзатворным диэлектриком. Для МДП-структур с термической пленки

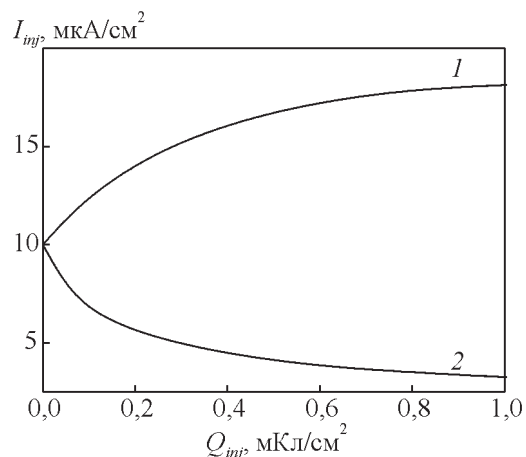


Рис. 2. Зависимости плотности инжекционного тока от величины инжектированного заряда при постоянном напряжении на затворе, обеспечивающем протекание начального инжекционного тока 10 мкА/см<sup>2</sup> для МДП-структур с различным подзатворным диэлектриком: 1 — SiO<sub>2</sub>; 2 — SiO<sub>2</sub>-ФСС.

Fig. 2. Dependencies of density of injection current on amount of injected charge at constant gate voltage that implies flowing of initial injection current of 10 μA/cm<sup>2</sup> for MIS structures with different gate dielectric: 1 — SiO<sub>2</sub>; 2 — SiO<sub>2</sub>-PSG.

SiO<sub>2</sub> наблюдается повышение инжекционного тока за счет накопления в подзатворном диэлектрике положительного заряда, а в МДП-структурах с диэлектриком SiO<sub>2</sub>-ФСС происходит снижение инжекционного тока в результате доминирующего накопления отрицательного заряда в пленке ФСС. Дефектные места в подзатворном диэлектрике можно представить как локальные области с площадью на несколько порядков меньше общей площади структуры, в которых наблюдается уменьшение эффективной толщины диэлектрика, снижение потенциального барьера на инжектирующей границе раздела, большая плотность ловушек заряда и др. [1,2]. В результате в дефектной области условия сильнополевой инжекции электронов на начальном этапе можно сравнить с условиями, представленными на рис. 2, когда напряжение на МДП-структуре, обусловленное зарядовыми процессами в бездефектной области, меняется незначительно, а локальные токи в дефектных местах определяются кривыми 1 и 2. Следовательно в МДП-структурах с пленкой SiO<sub>2</sub> в местах дефектов наблюдается локальное повышение плотности инжекционного тока, а в МДП-структурах с диэлектриком SiO<sub>2</sub>-ФСС происходит уменьшение локальных токов. В результате захват электронов

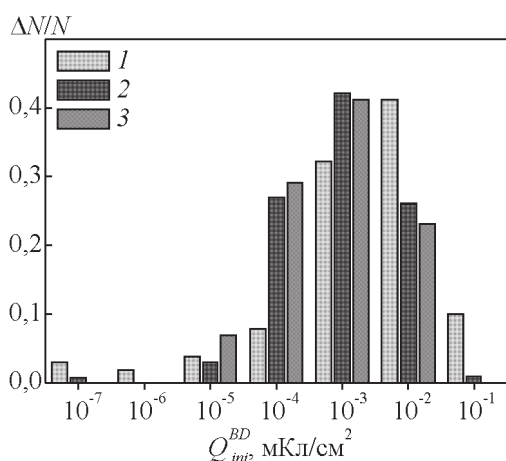


Рис. 3. Гистограммы распределения МДП-структур по заряду, инжектированному в диэлектрик до его пробоя, для образцов с подзатворным диэлектриком  $\text{SiO}_2$  (1) и образцов с двухслойным подзатворным диэлектриком  $\text{SiO}_2$ -ФСС (2, 3), измеренных в режиме возрастания инжекционного тока при различной начальной плотности: 1, 2 —  $10^{-7}$  А/см<sup>2</sup>; 3 —  $10^{-5}$  А/см<sup>2</sup>

Fig. 3. Distribution histograms of MIS structures by charge injected into the dielectric until its breakdown for samples with  $\text{SiO}_2$  gate dielectric (1) and samples with two-layer  $\text{SiO}_2$ -PSG gate dielectric (2, 3); these histograms have been measured under condition of rising of injection current at its different initial density: 1, 2 —  $10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup>; 3 —  $10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>.

в пленке ФСС может залечивать дефекты, уменьшая вероятность пробоя диэлектрика на начальном этапе. Ранее в статье нами было показано, что легирование термической пленки  $\text{SiO}_2$  фосфором может уменьшать плотность положительного заряда, накапливаемого в подзатворном диэлектрике в результате термализации инжектированных электронов, что также снижает локальные инжекционные токи в дефектных местах.

На рис. 3 представлены гистограммы распределения МДП-структур по заряду, инжектированному в диэлектрик до его пробоя для образцов с подзатворным диэлектриком  $\text{SiO}_2$  и  $\text{SiO}_2$ -ФСС, измеренные в режиме возрастания инжекционного тока при различной начальной плотности инжекционного тока. Как видно из рис. 3, легирование пленки  $\text{SiO}_2$  фосфором приводит к уменьшению МДП-структур, пробивающихся на начальном этапе инжекции. Этот эффект становится более значительным, когда измерения начинают с более низкой плотности тока (гистограммы 2 и 3). По-видимому, при меньшей начальной плотности тока зарядовые процессы в дефектных местах протека-

ют медленнее, что способствует их залечиванию за счет накопления отрицательного заряда в пленке ФСС.

## Выводы

Установлено, что в двухслойном подзатворном диэлектрике  $\text{SiO}_2$ -ФСС при сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик генерируется меньшая плотность положительного заряда по сравнению пленками  $\text{SiO}_2$  той же толщины.

Результаты моделирования показывают, что в пленке ФСС существенно снижается вероятность разогрева инжектированных электронов по сравнению с термической пленкой диоксида кремния, поэтому может повышаться инжекционная и радиационная стойкость МДП-приборов с двухслойным подзатворным диэлектриком  $\text{SiO}_2$ -ФСС.

Показано, что накопление отрицательного заряда в результате захвата электронов на ловушки в пленке ФСС может существенно снижать локальные инжекционные токи в дефектных местах. В результате легирование пленки  $\text{SiO}_2$  фосфором может снижать плотность дефектов зарядовой стабильности повышая среднюю величину заряда, инжектированного в диэлектрик до его пробоя. Этот эффект более значителен при низких значениях плотности инжекционного тока.

*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. 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.
2. Palumbo F., Wen, 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, v. 1900657, pp. 1900657 (1 – 26).
3. Balk P., Eldridge J.M. Phosphosilicate glass stabilization of FET devices. Proceedings of the IEEE, 1969, v. 57, iss. 9, pp. 1558 – 1563.
4. Idris M.I., Weng M.H., Peters A., Siddall R.J., Townsend N.J., Wright N.G., Horsfall A.B. Positive flatband voltage shift in phosphorus doped  $\text{SiO}_2$ /N-type 4H-SiC MOS capacitors under high field electron

- injection. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2019, v. 52, pp. 505102 (1 – 10).
5. Yano H., Kanafuji N., Osawa A., Hatayama T., Fuyuki T. Threshold Voltage Instability in 4H-SiC MOSFETs With Phosphorus-Doped and Nitrided Gate Oxides. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015 v. 62, no. 2, pp. 324 – 332.
  6. Liu G., Tuttle B.R., Dhar S. Silicon carbide: A unique platform for metal-oxide-semiconductor physics. *Applied Physics Reviews*, 2015, v. 2, pp. 021307 (1 – 21).
  7. Fiorenza P., Giannazzo F., Roccaforte F. Characterization of SiO<sub>2</sub>/4H-SiC Interfaces in 4H-SiC MOSFETs: A Review. *Energies*, 2019, v. 12, pp. 2310 (1 – 22).
  8. Гриценко В.А. Горячие электроны в оксиде кремния. *Успехи физических наук*, 2017, т. 187, с. 971 – 979.
  9. Левин М.Н., Гитлин В.Р., Татаринцев А.В., Остроухов С.С., Кадменский С.Г. Рентгеновская коррективировка пороговых напряжений в производстве МДП интегральных схем. *Микроэлектроника*, 2002, т. 31, № 6, с. 408 – 413.
  10. Mikhailovskii I.P., Potapov P.V., Epov A.E. Sign of the charge accumulated in thermal films of silicon MIS structures under high electric field condition. *Phys. Status Solidi A*, 1986, v. 94, pp. 679 – 685.
  11. Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А. Зарядовые характеристики МДП-структур с термическими пленками SiO<sub>2</sub>, легированными фосфором, при сильнополевой инжекции электронов. *Перспективные материалы*, 2015, № 11, с. 19 – 25.
  12. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A. Modification of MIS Devices by Irradiation and High-Field Electron Injection Treatments. *Acta Phys. Pol. A*. 2017. Vol. 132. No. 2. pp. 245-248.
  13. Arnold D., Cartier E., DiMaria D.J. Theory of high-field electron transport and impact ionization in silicon dioxide. *Phys. Rev. B*, 1994, v. 49, no. 15, pp. 10278–10297.
  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, v. 12, no. 3, pp. 299–303.
  15. 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, v. 10224, pp. 1022429(1–8).
  16. JEDEC Standard, JESD35–A: Procedure for the Wafer–Level Testing of Thin Dielectrics. 2001.
  17. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Modification of thin oxide films of MOS structure by high-field injection and irradiation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, v. 110, pp. 012041 (1 – 6).
  18. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A. Influence of temperature on high-field injection modification of MIS structures with thermal SiO<sub>2</sub> films doped with phosphorus. *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*, 2019, v. 23, iss. 4, pp. 303 – 312.
  19. Fanciulli M., Bonera E., Nokhrin S. Phosphorous–oxygen hole centers in phosphosilicate glass films. *Physical Review B*, 2006, v. 74, pp. 134102 (1 – 10).
  20. Pacchioni G., Erbetta D., Ricci D., Fanciulli M. Electronic structure of defect centers P1, P2, and P4 in P-doped SiO<sub>2</sub>. *J. Phys. Chem. B*, 2001, v. 105, pp. 6097 – 6102.
  21. Stesmans A., Clemer K., Afanas'ev V.V. P-associated defects in the high-k insulators HfO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub> revealed by electron spin resonance. *Physical Review B*, 2008, v. 74, pp. 125341 (1 – 9).

## References

1. 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.
2. Palumbo F., Wen, 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).
3. Balk P., Eldridge J.M. Phosphosilicate glass stabilization of FET devices. *Proceedings of the IEEE*, 1969, vol. 57, iss. 9, pp. 1558 – 1563.
4. Idris M.I., Weng M.H., Peters A., Siddall R.J., Townsend N.J., Wright N.G., Horsfall A.B. Positive flatband voltage shift in phosphorus doped SiO<sub>2</sub>/N-type 4H-SiC MOS capacitors under high field electron injection. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2019, vol. 52, pp. 505102 (1 – 10).
5. Yano H., Kanafuji N., Osawa A., Hatayama T., Fuyuki T. Threshold voltage instability in 4H-SiC MOSFETs with phosphorus-doped and nitrided gate oxides. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, vol. 62, no. 2, pp. 324 – 332.
6. Liu G., Tuttle B.R., Dhar S. Silicon carbide: A unique platform for metal-oxide-semiconductor physics. *Applied Physics Reviews*, 2015, vol. 2, pp. 021307 (1 – 21).
7. Fiorenza P., Giannazzo F., Roccaforte F. Characterization of SiO<sub>2</sub>/4H-SiC Interfaces in 4H-SiC MOSFETs: A Review. *Energies*, 2019, vol. 12, pp. 2310 (1 – 22).
8. Gritsenko V.A. Goryachie elektrony v okside kremniya [Hot electrons in silicon oxide]. *Uspehi Fizicheskikh Nauk — Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 2017, vol. 60, no. 9, pp. 902 – 910.
9. Levin M.N., Gitlin V.R., Tatarintsev A.V., Ostrouhov S.S., Kadmeny S.G. X-ray and UV adjustment of threshold voltage in MOS-circuit manufacture. *Russian Microelectronics*, 2002, vol. 31, no. 6, pp. 346 – 350.
10. Mikhailovskii I.P., Potapov P.V., Epov A.E. Sign of the charge accumulated in thermal films of silicon MIS structures under high electric field condition. *Phys. Status Solidi A*, 1986, vol. 94, pp. 679 – 685.

11. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Stolyarov A.A. Charge characteristics of MOS structure with thermal SiO<sub>2</sub> films doped with phosphorus under high-field electron injection. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2016, vol. 7, no. 2, pp. 187 – 191.
12. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A. Modification of MIS devices by irradiation and high-field electron injection treatments. *Acta Phys. Pol. A*, 2017, vol. 132, no. 2, pp. 245 – 248.
13. 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.
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 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).
16. JEDEC Standard, JESD35–A: Procedure for the wafer-level testing of thin dielectrics. 2001.
17. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Modification of thin oxide films of MOS structure by high-field injection and irradiation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 110, pp. 012041 (1 – 6).
18. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A. Influence of temperature on high-field injection modification of MIS structures with thermal SiO<sub>2</sub> films doped with phosphorus. *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*, 2019, vol. 23, issue 4, pp. 303 – 312.
19. Fanciulli M., Bonera E., Nokhrin S. Phosphorous-oxygen hole centers in phosphosilicate glass films. *Physical Review B*, 2006, vol. 74, pp. 134102 (1 – 10).
20. Pacchioni G., Erbetta D., Ricci D., Fanciulli M. Electronic structure of defect centers P1, P2, and P4 in P-doped SiO<sub>2</sub>. *J. Phys. Chem. B*, 2001, vol. 105, pp. 6097 – 6102.
21. Stesmans A., Clemer K., Afanas'ev V.V. P-associated defects in the high-k insulators HfO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub> revealed by electron spin resonance. *Physical Review B*, 2008, vol. 74, pp. 125341 (1 – 9).

*Статья поступила в редакцию — 3.02.2020 г.*

*после доработки — 18.02.2020 г.*

*принята к публикации — 19.02.2020 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@bmsu.ru](mailto:dmitrii_andreev@bmsu.ru).

**Бондаренко Геннадий Германович** — Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики” (НИУ ВШЭ) (123458, Москва, Таллинская ул., 34), доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, специалист в области физики конденсированного состояния, радиационной физики твердого тела. E-mail: [gbondarenko@hse.ru](mailto:gbondarenko@hse.ru).

**Андреев Владимир Викторович** — Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана (248000, Калуга, ул. Баженова, 2), доктор технических наук, профессор, специалист в области физики полупроводниковых и диэлектрических материалов. E-mail: [vladimir\\_andreev@bmsu.ru](mailto:vladimir_andreev@bmsu.ru).

**Столяров Александр Алексеевич** — Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана (248000, Калуга, ул. Баженова, 2), доктор технических наук, профессор, специалист в области физики полупроводниковых и диэлектрических материалов. E-mail: [a.a.stolyarov@bmsu.ru](mailto:a.a.stolyarov@bmsu.ru).

## **Rising of charge stability of gate dielectric of MIS structure by phosphorus doping**

**D. V. Andreev, G. G. Bondarenko, V. V. Andreev, A. A. Stolyarov**

In the paper we demonstrate that the thermal doping of SiO<sub>2</sub> film by phosphorus, causing formation of thin film of phospho-silicate glass on its surface, allows to rise charge stability of gate dielectric of MIS structure. We have ascertained that a presence of the film of phospho-silicate glass has given a possibility to significantly lower local injection currents flowing within defects because of electron capturing by traps located in the film of phospho-silicate glass what results in the rising of energy barrier. As a result, amount of the structures that comes to a state of breakdown at low values of charge injected into the dielectric under high fields noticeably reduces. We show that heating processes of injected electrons lowers in the films of phospho-silicate glass and this results in increasing of charge stability of the gate dielectric under high-field injection.

**Keywords:** MIS-structure, dielectric film, high fields, injection current, test.

---

***Andreev Dmitrii** — 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.*

***Bondarenko Gennady** — National Research University Higher School of Economics (Moscow, 123458, Tallinskaya Ulitsa, 34), Dr Sci (Phys-Math), professor, head of laboratory, specialist in condensed matter physics and radiation solid-state physics. E-mail: gbondarenko@hse.ru.*

***Andreev Vladimir** — Kaluga branch of Bauman Moscow State Technical University (Kaluga, 248000, Bazhenov str., 2), Dr Sci (Eng), professor, specialist in physics of semiconductors and dielectrics. E-mail: vladimir\_andreev@bmstu.ru.*

***Stolyarov Alexander** — Kaluga branch of Bauman Moscow State Technical University (Kaluga, 248000, Bazhenov str., 2), Dr Sci (Eng), professor, specialist in physics of semiconductors and dielectrics. E-mail: a.a.stolyarov@bmstu.ru.*