

Образование дефектов поверхности КМОП-структуры при облучении гамма-лучами и при повышенной температуре

В.Д. Попов

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г.Москва, Россия*

wdpopov@mail.ru

КМОП ИМС широко используются в бортовых устройствах космических аппаратов, работающих в условиях повышенной температуры и низкоинтенсивного облучения. Поэтому важно знать процессы, приводящие к старению микросхем, т.е. к ухудшению параметров под действием дестабилизирующих факторов.

Рассмотрены процессы старения КМОП ИМС в электрическом режиме при облучении и при повышенной температуре без облучения. Исследованы процессы поверхностного дефектообразования в КМОП ИМС в обоих случаях. Плотность дефектов на границе раздела Si-SiO₂ рассчитана из значений поверхностной подвижности носителей заряда в каналах МОП-транзисторов КМОП ИМС, которые определялись из значений крутизны сток-затворной характеристики.

Полученные результаты показывают, что при воздействии на КМОП ИМС низкоинтенсивного облучения гамма-лучами и в случае их испытания при повышенной температуре без воздействия ионизирующего излучения наблюдается образование поверхностных дефектов в два этапа. Однако при повышенной температуре сначала происходит отжиг поверхностных дефектов, а затем процесс их образования.

Ключевые слова: КМОП интегральная схема; МОП-транзистор; крутизна сток-затворной характеристики; гамма-облучение; испытания при повышенной температуре; поверхностные дефекты.

Для цитирования: Попов В.Д. Образование дефектов поверхности КМОП-структуры при облучении гамма-лучами и при повышенной температуре // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22. – № 5. – С. – 491–494. – DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-5-491-494

Formation of CMOS-Structure Surface Defects under Irradiation by Gamma-Rays and at Higher Temperature

V.D. Popov

National Research Nuclear University, Moscow, Russia

wdpopov@mail.ru

CMOS ICs are widely used in on-board devices in spacecraft operating in conditions of high temperature and radiation low intensity. Therefore, it is important to know the processes leading to aging of circuits, i.e. to worsening of the parameters under the influence of the destabilizing factors. The processes of CMOS IC aging in electric mode under irradiation and at higher temperature have been considered. The processes of the surface defect formation in CMOS IC under irradiation by gamma-rays and at higher

temperature without irradiation have been investigated. The density of defects at the Si–SiO₂ interface has been calculated from the values of the surface mobility of charge carriers in the channel of the MOS transistors of CMOS ICs, which had been determined from the values of the slope of the drain-gate characteristics.

The obtained results show that under the influence of the low intensity irradiation by gamma-rays and in case of tests at higher temperature without exposure to ionizing radiation two stages of the surface defects formation are observed.

Keywords: CMOS integrated circuits; MOS transistor; transconductance drain-gate characteristics; gamma irradiation; tests at elevated temperatures; surface defects.

For citation: Popov V.D. Formation of CMOS-Structure Surface Defects under Irradiation by Gamma-Rays and at Higher Temperature // Proc. of Universities. Electronics. – 2017. – Vol. 22. – № 5. – P. – 491–494. – DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-5-491-494

В настоящее время КМОП ИМС широко используются в космической технике. При воздействии низкоинтенсивного ионизирующего излучения космического пространства возникают процессы поверхностного дефектообразования на границе раздела Si–SiO₂, которые моделируются с помощью воздействия гамма-излучения с низкой мощностью дозы. В работе [1] рассмотрены два этапа поверхностного дефектообразования при облучении в пассивном режиме микросхем отечественного производства, а в [2] – микросхем производства США.

При испытаниях КМОП ИМС в условиях повышенной температуры без воздействия ионизирующего излучения оценивают параметры надежности и получают параметры модели процесса старения [3]. В работе [4] впервые представлено сравнение процессов поверхностного дефектообразования при низкоинтенсивном облучении гамма-лучами и при ускоренных испытаниях в условиях повышенной температуры без облучения. Показано, что первый этап в обоих случаях описывается экспоненциальной зависимостью и может быть подобрана такая мощность дозы гамма-излучения, при которой поверхностное дефектообразование происходит с одинаковой скоростью как при облучении, так и при повышенной температуре.

Постепенное ухудшение параметров ИМС во времени называют процессом старения, обусловленным образованием дефектов. Цель настоящей работы – сравнение процессов старения КМОП ИМС в электрическом режиме при облучении и при повышенной температуре.

Исследовалось изменение крутизны МОП-транзисторов (МОПТ) с *n*- и *p*-каналом в КМОП ИМС типа CD 4069 при напряжении питания $U = 12$ В и напряжении на входе инверторов $U = 0$ В. Измерялись зависимости тока I_{dd} в цепи питания от напряжения на входе инвертора U_{in} , исходя из которых определялась приведенная крутизна k [2]. Поскольку параметры структуры МОПТ неизвестны, то использовалось относительное изменение крутизны:

$$\frac{k(0)}{k(t)} = \frac{\mu_s(0)}{\mu_s(t)},$$

где $k(0)$ и $k(t)$ – приведенные значения крутизны; $\mu_s(0)$ и $\mu_s(t)$ – поверхностные подвижности носителей заряда до и после испытаний в течение времени t .

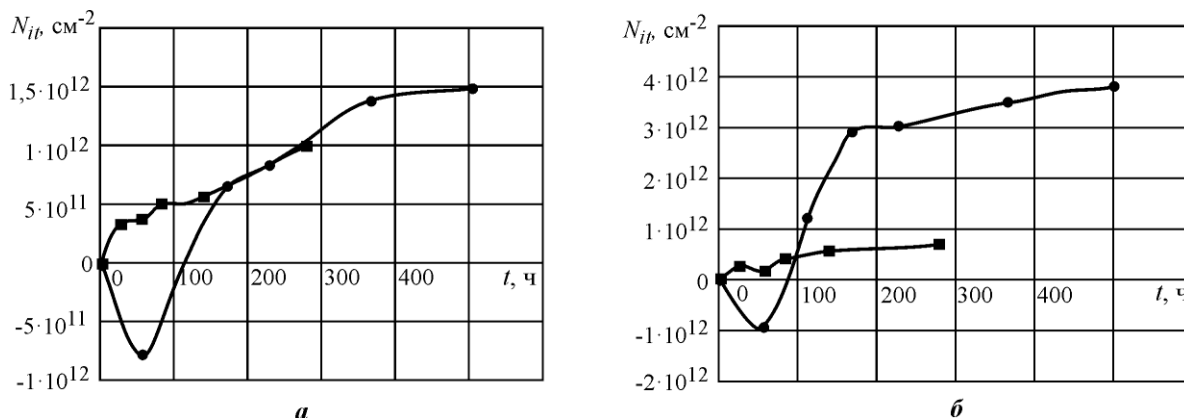
Поверхностная подвижность электронов и дырок связана с изменением плотности поверхностных дефектов (interface traps-*it*) следующим выражением [5]:

$$\mu_s(D) = \frac{\mu_s(0)}{1 + \alpha \Delta N_{it}},$$

где D – доза гамма-излучения; ΔN_{it} – изменение плотности поверхности дефектов; $\alpha = (7,0 \pm 1,3) \cdot 10^{-13}$ см². Поскольку необходимо сравнить процессы во времени, то использовалось выражение $D = Pt$, где P – мощность дозы; t – время облучения.

Первая группа КМОП ИМС облучалась гамма-лучами от источника Cs^{137} при мощности дозы $P = 0,1$ рад/с в электрическом режиме при температуре $T \approx 25$ °С. Вторая группа ИМС подвергалась ускоренным испытаниям в электрическом режиме при температуре $T = 85$ °С без воздействия гамма-излучения. Уменьшение крутизны МОПТ свидетельствует об увеличении плотности поверхностных дефектов на границе раздела Si–SiO₂.

В результате эксперимента получены зависимости $\Delta N_{it}(t)$ при воздействии гамма-лучей и при повышенной температуре без облучения, приведенные на рисунке.



Изменение плотности поверхностных дефектов при облучении гамма-лучами (—■— $P = 0,1$ рад/с) и при повышенной температуре (—●— $T = 85$ °С) для МОПТ с n - (а) и p -каналом (б)

The change in the density of surface defects upon irradiation with gamma rays (—■— $P = 0.1$ rad/s) and at the elevated temperature (—●— $T = 85$ °С) for a MOST with an n - (a) and p -channel (b)

Полученные результаты расчетов показывают наличие двух этапов поверхностного дефектообразования как при облучении гамма-лучами, так и в случае выдержки при повышенной температуре без облучения. Однако при повышенной температуре сначала происходит отжиг поверхностных дефектов, а затем процесс их образования.

Установлена одинаковость процессов при воздействии ионизирующего излучения и при повышенной температуре без облучения. Как предполагается [1], на первом этапе происходит образование поверхностных дефектов со стороны оксида кремния, в этом процессе участвуют дырки и протоны, образованные в пленке оксида кремния. На втором этапе образования поверхностных дефектов в случае МОПТ с n -каналом электроны из кремния вступают в реакцию с водородными комплексами [6], а в случае МОПТ с p -каналом поверхностные дефекты образуются в результате взаимодействия дырок с уровнями напряженных (ослабленных) валентных связей в приповерхностной области кремния [4].

Автор выражает благодарность аспирантам НИЯУ «МИФИ» К.А. Петухову и Н.А. Куликову за представленные результаты экспериментов.

Литература

1. Попов В.Д. Два этапа поверхностного дефектообразования в МОП-структуре при низкоинтенсивном воздействии гамма-излучения // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т. 50. – Вып.3. – С. 354–356.
2. Власов Р.В., Паршакова Е.С., Попов В.Д. Исследование изменения плотности поверхностных дефектов при длительном низкоинтенсивном облучении КМОП ИМС зарубежного производства // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2016. – Вып.1. – С. 19–21.
3. Булушева М.А., Попов В.Д., Протопопов Г.А., Скородумова А.В. Физическая модель процесса старения МОП-структуры // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44. – №4. – С. 527–532.
4. Белова Г.Ф., Попов В.Д., Чжо Ко Вин. Сравнение радиационного и термического старения МОП интегральных микросхем // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2012. – Вып. 2. – С. 29–32.

5. **Sexton W., Schwank J.R.** Correlation of radiation effects in transistors and intergrated circuits // IEEE Trans. on Nuclear Science. – 1985. – Vol. NS-32. – No. 6. – P. 3975–3981.

6. **Saks N.S., Klein R.B., Griscom D.L.** Formation of interface traps in MOS FETs during annealing following low temperature irradiation // IEEE Ttans. on Nuclear Science. – 1988. – Vol. NS-35. – No. 6. – P. 1234 – 1240.

Поступило 19.04.2017 г.; принято к публикации 13.06.2017 г.

Попов Виктор Дмитриевич – доктор технических наук, профессор Института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31), wdpopov@mail.ru

References

1. Popov V.D. Dva ehtapa poverhnostnogo defektoobrazovaniya v MOP strukture pri nizkointensivnom vozdejstvii gamma-izlucheniya [Two Stages of Surface-Defects Formation in a MOS Structure under Low-Dose Rate Gamma Irradiation]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov – Semiconductors*, 2016, vol. 50, no. 3, pp. 354–356. (in Russian).

2. Vlasov R.V., Parshakova E.S., Popov V.D. Issledovanie izmeneniya plotnosti poverhnostnykh defektov pri dlitel'nom nizkointensivnom obluchenii KMOP IMS zarubezhnogo proizvodstva [Research of Changes Surface Trap at Low-Intensity Irradiation]. *Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Ser.: Fizika radiacionnogo vozdejstviya na radioelektronnyy apparaturu – Questions of atomic science and technics. Series: Physics of radiation effects on radio-electronic equipment*, 2016, iss.1, pp. 19–21. (in Russian).

3. Bulusheva M.A., Popov V.D., Protopopov G.A., Skorodumova A.V. Fizicheskaya model' processa stareniya MOP struktury [Physical Model of MOS-Structure Aging Process]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov – Semiconductor*, 2010, vol. 44, no. 4, pp. 527–532. (in Russian).

4. Belova G.F., Popov V.D., Chzho Ko Vin. Sravnenie radiacionnogo i termicheskogo stareniya MOP integral'nykh mikroskhem [Comparing Radiation and Thermal Aging of MOS Integrated Circuits]. *Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Ser.: Fizika radiacionnogo vozdejstviya na radioelektronnyy apparaturu – Questions of atomic science and technics. Series: Physics of radiation effects on radio-electronic equipment*, 2012, iss. 2, pp. 29–32. (in Russian).

5. Sexton W., Schwank J.R. Correlation of Radiation Effects in Transistors and Intergrated Circuits. *IEEE Trans. on Nuclear Science*, 1985, vol. NS-32, no. 6, pp. 3975–3981.

6. Saks N.S., Klein R.B., Griscom D.L. Formation of Interface Traps in MOS FETs during Annealing Following Low Temperature Irradiation. *IEEE Ttans. on Nuclear Science*, 1988, vol. NS-35, no. 6, pp. 1234–1240.

Submitted 19.04.2017; accepted 13.06.2017.

Popov Viktor D. – Doctor of technical sciences, professor of the Micro- and Nanoelectronics Department, National Research Nuclear University (Russia, 115409, Moscow, Kashirskoye shosse, 31), wdpopov@mail.ru