

Исследование радиационных эффектов в МОП-транзисторе с *p*-каналом

© А.В. Кузьмина, Н.А. Куликов, В.Д. Попов[¶]

Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,
115409 Москва, Россия

[¶] E-mail: wdpopov@mail.ru

Поступила в Редакцию 18 марта 2020 г.

В окончательной редакции 31 марта 2020 г.

Принята к публикации 31 марта 2020 г.

Рассматривается воздействие γ -излучения на образование поверхностных дефектов на границе раздела Si–SiO₂ в МОП-транзисторе с *p*-каналом в пассивном режиме. Наблюдалось несколько процессов поверхностного дефектообразования. Показана роль молекулярного водорода в подзатворном оксиде МОП-транзистора и „горячих“ электронов, образующихся в приповерхностной области кремния.

Ключевые слова: МОП-транзистор, *p*-канал, γ -излучение, молекулярный водород, „горячие“ электроны.

DOI: 10.21883/FTP.2020.08.49643.9397

1. Введение

Полупроводниковые приборы и интегральные схемы с различной степенью интеграции широко применяются в космической технике. Космические лучи, которые в основном состоят из потоков электронов и протонов радиационных поясов Земли и солнечного ветра, воздействуют на бортовую аппаратуру космического аппарата на околоземных орбитах. Воздействие этих космических излучений приводит к ухудшению параметров полупроводниковых изделий и в дальнейшем к их отказу. При длительном низкоинтенсивном воздействии космических лучей эффект деградации параметров изделий значительно отличается от кратковременного высокоинтенсивного облучения. Поэтому большую актуальность приобретает оценка радиационной стойкости при длительном низкоинтенсивном облучении этих изделий при нахождении их в условиях космоса через проведение моделирующих экспериментов. В качестве источника моделирующего ионизирующего излучения в настоящее время используется γ -излучение от изотопов Co⁶⁰ или Cs¹³⁷. Достоинством этих источников является возможность получения низкоинтенсивного воздействия ионизирующего излучения на облучаемые изделия электронной техники. Но при этом на микросхему воздействует целый спектр комптоновских электронов с широким диапазоном энергий от „тепловых“ до „быстрых“, включая и „горячие“ электроны [1].

В настоящее время широко применяются в бортовой аппаратуре космических аппаратов КМОП-интегральные микросхемы, содержащие как *n*-канальные транзисторы, так и транзисторы с *p*-каналом. Большинство публикаций посвящено радиационным эффектам в МОП-транзисторах (МОПТ) с *n*-каналом [2,3], в которых наблюдались два этапа поверхностного дефектообразования.

Экспериментальные исследования *p*-канальных МОПТ проводились в работе [4], в которой использовались КМОП-микросхемы типа CD4069UBCN. Эти микросхемы содержали по 6 элементов „Инвертор“ и облучались при мощности дозы γ -излучения $P = 0.1$ рад/с. Результаты обработки экспериментальных данных представлены на рис. 1. Два этапа поверхностного дефектообразования наблюдались как в МОПТ с *n*-каналом, так и в транзисторах с *p*-каналом. Однако в случае МОПТ с *p*-каналом на первом этапе наблюдалось сначала увеличение плотности поверхностных дефектов в канале, а затем их уменьшение. Поэтому целью данной работы является исследование процессов поверхностного дефектообразования в МОПТ с *p*-каналом при низких мощностях дозы γ -излучения. При этом рассматриваются процессы разрыва напряженных валентных связей в приповерхностной области кремния, депассивации кремниевых связей на границе раздела Si–SiO₂ и внутри водородосодержащих *D*-центров в приграничной области оксида.

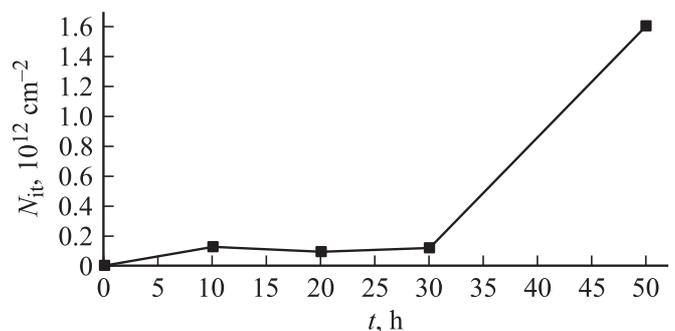


Рис. 1. Изменение плотности поверхностных дефектов в МОПТ с *p*-каналом при облучении γ -лучами в пассивном режиме.

2. Эффект ионизации в МОП-структуре

В современных МОП-микросхемах для выращивания подзатворного оксида МОПТ применяют пирогенное окисление или термообработку в атмосфере водорода. При такой технологии оборванные валентные связи кремния на границе раздела Si–SiO₂ заполняются атомами водорода, создавая водородосодержащие *D*-центры, что существенно уменьшает плотность поверхностных дефектов (interface traps). Простейшим таким центром является SiH-центр [5]. Из-за того что процесс выращивания оксидной пленки происходит при повышенной температуре, а эксплуатация при более низкой температуре, в структуре Si–SiO₂ возникают механические напряжения из-за различия коэффициентов линейного расширения кремния и оксида кремния.

При облучении γ -лучами МОП-структуры происходит взаимодействие излучения с электронами на *K*- или *L*-оболочках атомов кремния, в результате которого электроны получают значительную энергию и переходят в зону проводимости. Образовавшиеся „горячие“ дырки в приповерхностной области кремния захватываются на уровни напряженных валентных связей, которые определены в работе [6] как $E_2 = 1.14$ эВ (рис. 2). Это приводит к разрыву валентной связи и созданию поверхностного дефекта в кремнии около границы раздела Si–SiO₂ с уровнем в середине запрещенной зоны.

Кроме того, при облучении МОП-структуры γ -лучами на границу раздела Si–SiO₂ воздействует целый спектр комптоновских электронов [1]. Общее количество комптоновских электронов по всем углам рассеяния равно γ_{Σ} , из которого могут взаимодействовать с *D*-центром (E_1 на рис. 2). Таким образом, доля комптоновских электронов, которые могут быть квалифицированы как „горячие“, равна

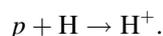
$$K = \gamma_{E_1} / \gamma_{\Sigma} = 2.64 \cdot 10^{-6} / 0.4754 = 5.56 \cdot 10^{-6}.$$

Зонная диаграмма *p*-канального МОПТ с поликремниевым затвором в пассивном режиме представлена на рис. 2, где U_{ox} — падение напряжения в оксиде, ϕ_s — поверхностный потенциал. Уравнение, связывающее падение напряжения в оксиде и поверхностный потенциал, имеет вид

$$U_{MOS} = U_{ox} + \phi_s = 0,$$

а его решение равно $\phi_s = 0.83$ В. В этом случае в подзатворном оксиде создается электрическое поле $E = 1.35 \cdot 10^5$ В/см, которое вызывает дрейф протонов H⁺, образующихся в результате ионизации γ -лучами пленки подзатворного оксида, в сторону затвора.

При облучения ионизирующим излучением происходит процесс образования дырок в объеме подзатворного оксида, которые захватываются атомами водорода H, образуя протоны H⁺:



Эти протоны перемещаются в объеме оксида под действием электрического поля.

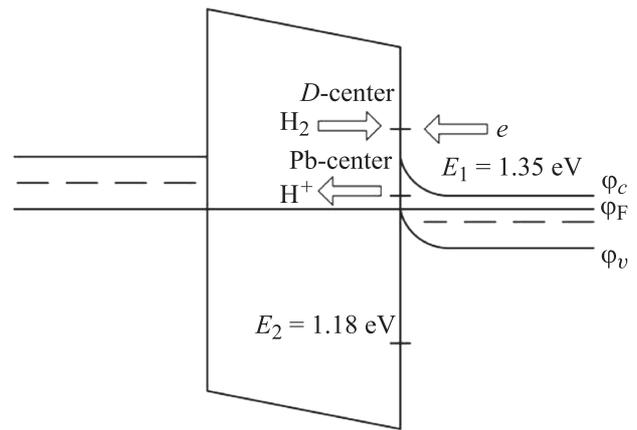


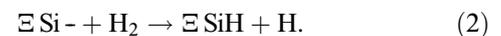
Рис. 2. Зонная диаграмма МОПТ с поликремниевым затвором в пассивном режиме. Таким образом, при воздействии γ -излучения в МОП-структуре протекают несколько процессов поверхностного дефектообразования, как со стороны кремния, так и со стороны оксида.

В начале воздействия γ -излучения на МОП-структуру близки границы раздела Si–SiO₂ происходят реакции освобождения водорода из SiH-центров [7]:



В результате этого увеличивается плотность поверхностных дефектов. Необходимо отметить, если уровни SiH-центров расположены на границе раздела Si–SiO₂ внутри запрещенной зоны кремния, то в этом случае не требуется значительная энергия для освобождения протона. Оставшиеся оборванные связи кремния называют *p_b*-центрами.

Дрейф протонов под действием электрического поля уменьшает концентрацию протонов на границе раздела Si–SiO₂. Поэтому с течением времени наблюдается уменьшение плотности поверхностных дефектов в результате процесса пассивации *p_b*-центров с участием молекул водорода H₂, находящихся в объеме оксида [8]. Этот процесс описывается как



В результате этого практически полностью восстанавливается пассивация *p_b*-центров, и плотность дефектов этого типа значительно снижается.

При продолжении воздействия γ -излучения на МОПТ с *p*-каналом основную роль начинает играть процесс, связанный с диффузией молекул водорода H₂ к границе раздела Si–SiO₂, вблизи которой происходит их распад на H⁺ и H⁻ [8]. Ион водорода H⁺ дрейфует от границы раздела Si–SiO₂, а H⁻ направляется в приповерхностную область кремния, где превращается в H⁺. Этому способствует обогащение приповерхностной области кремния дырками. Таким образом, протон H⁺ приходит со стороны кремния и совместно с „горячим“

электроном из кремния взаимодействует с водородосодержащим *D*-центром $E_1 = 1.35$ эВ, который находится в пределах 50 \AA от границы раздела Si–SiO₂ и определен в работе [9] (см. рис. 2), а также упоминается в статье [10]. Этот процесс участвует в реакции [11]



и тем самым создает новый поверхностный дефект.

3. Описание эксперимента

Экспериментальное исследование проводилось на интегральных микросхемах (ИМС) серии 1526. Облучение производилось γ -лучами от источника Cs¹³⁷ в пассивном режиме (все выводы ИМС соединены между собой). Мощность дозы контролировалась прибором типа ДКС-101 и составляла $P = 0.1$ рад/с. В эксперименте до и после каждого этапа облучения измерялись с помощью анализатора Agilent technologies В 1500А стокозатворные характеристики МОПТ с *p*-каналом. Типичные экспериментальные вольт-амперные характеристики (ВАХ) представлены на рис. 3.

Для определения изменения плотности поверхностных дефектов N_{it} в МОПТ использовался метод подпороговых токов [12]. Результаты исследования изображены на рис. 4 в виде графика функции изменения плотности поверхностных дефектов N_{it} от времени облучения t . Они представляют собой немонотонную зависимость $N_{it}(t)$, которая показывает наличие нескольких процессов, протекающих последовательно один за другим.

4. Процессы поверхностного дефектообразования

При воздействии γ -излучения в приповерхностной области кремния происходит разрыв напряженных валентных связей на границе раздела Si–SiO₂, что приводит к увеличению плотности поверхностных дефектов $N_{it} = N_{ss}$ в МОП-структуре со стороны кремния. Этот процесс описывается экспоненциальной зависимостью [6] и представлен зависимостью на рис. 4 (кривая 0)

$$N_{ss}(t) = N_{ss.sat}(1 - \exp(-\beta_0 t)), \quad (4)$$

где $N_{ss.sat}$ — максимальная (при насыщении) плотность поверхностных дефектов, образовавшихся при разрыве напряженных валентных связей в приповерхностной области кремния, β_0 — скорость процесса дефектообразования.

Анализ экспериментальных данных с использованием программы OriginRго 8 позволил получить следующие значения:

$$N_{ss.sat} = (2.65 \cdot 10^{10} \pm 2.36 \cdot 10^9) \text{ см}^{-2},$$

$$\beta_0 = (3.616 \cdot 10^{-4} \pm 3.59 \cdot 10^{-5}) 1/\text{ч}.$$

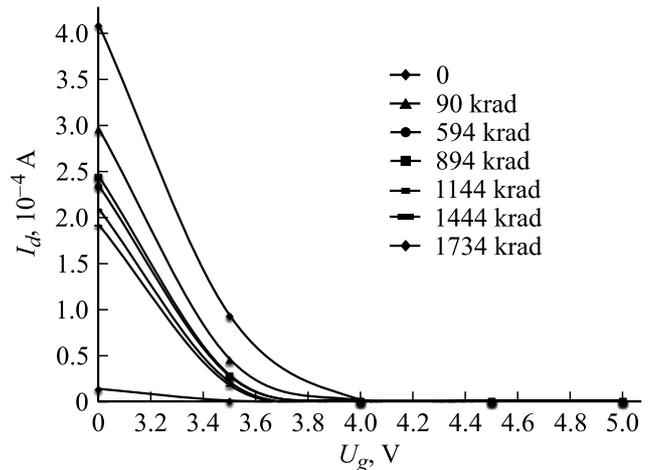


Рис. 3. Результаты измерений ВАХ МОПТ с *p*-каналом.

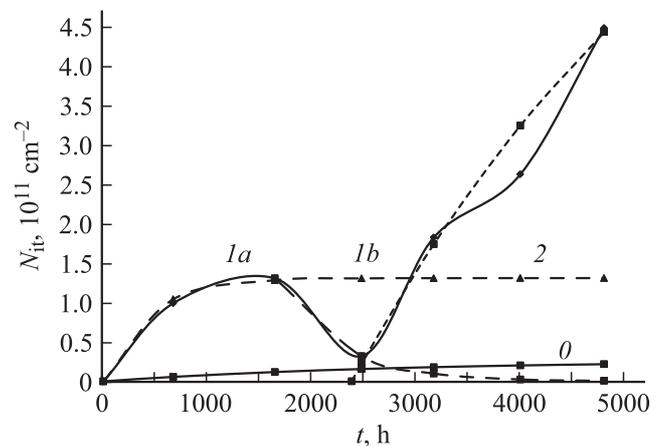


Рис. 4. Результаты экспериментального исследования МОПТ-транзисторов с *p*-каналом при облучении γ -лучами в пассивном режиме.

В подзатворном оксиде МОПТ на первом этапе наблюдаются два процесса: сначала увеличение плотности поверхностных дефектов, когда концентрация протонов у границы раздела Si–SiO₂ N_{H^+} достаточно велика (1а), затем уменьшение плотности поверхностных дефектов (1б), когда концентрация протонов на границе раздела становится меньше некоторой величины (N_{H^+})_{crit}.

Процесс 1а поверхностного дефектообразования происходит аналогично процессу в МОПТ с *n*-каналом [3]. В результате этого процесса образуются поверхностные дефекты типа p_b -центры в пределах запрещенной зоны кремния. Этот процесс описывается уравнением [7]

$$\partial(N_{Pb})/\partial t = (N_{SiH} - N_{Pb}) \sigma_{depass} \cdot f_{H^+} - \frac{N_{Pb}}{\tau_{Pb}}, \quad (5)$$

где N_{SiH} — плотность водородосодержащих центров, N_{Pb} — плотность p_b -центров, σ_{depass} — сечение захвата протона SiH-центром (депассивация), f_{H^+} — поток про-

тонов, τ_{Pb} — время жизни дефекта на границе раздела Si–SiO₂.

Решением уравнения (5) является экспоненциальная зависимость вида

$$N_{\text{Pb}}(t) = N_{\text{Pb},s} (1 - \exp(-\beta_1 t)), \quad (6)$$

показанная на рис. 4 (кривая *Ia*).

В результате эксперимента получены следующие параметры зависимости (6) с использованием программы OriginRro 8:

$$N_{\text{Pb},s} = (1.32 \cdot 10^{11} \pm 1.19 \cdot 10^5) \text{ см}^{-2}$$

и

$$\beta_1 = (0.00236 \pm 1.12 \cdot 10^{-8}) \text{ 1/ч},$$

которые хорошо согласуются с результатом измерений ($R^2 = 0.999$).

Процесс *Ib* наблюдается при дальнейшем облучении γ -лучами, когда происходит дрейф протонов от границы раздела Si–SiO₂ в глубь оксидной пленки. В этом случае в результате диффузии молекул водорода H₂ из объема оксидной пленки происходит пассивация оборванных связей кремния и образование SiH-центров. Процесс пассивации (2) начинает доминировать при достижении критического значения плотности протонов (N_{H^+})_{crit} на границе раздела Si–SiO₂.

Образовавшиеся атомы водорода в реакции (2) создают молекулы H + H → H₂, которые продолжают процесс пассивации. В результате пассивации оборванных валентных связей кремния на границе раздела Si–SiO₂ уменьшается плотность поверхностных дефектов (p_b -центров) (см. рис. 4 (кривая *Ib*)). Изменение плотности p_b -центров в процессе пассивации может быть описано уравнением

$$dN_{\text{Pb}}/dt = -\sigma_{\text{pass}} \cdot N_{\text{Pb}} \cdot f_{\text{H}_2}, \quad (7)$$

решением которого является

$$N_{\text{Pb}}(t) = (N_{\text{Pb}})_{\text{crit}} \exp(-\alpha t),$$

где $(N_{\text{Pb}})_{\text{crit}}$ — критическое значение плотности p_b -центров на первом этапе, α — скорость процесса пассивации.

В результате получаем параметры аппроксимации

$$(N_{\text{Pb}})_{\text{crit}} = (2.13 \cdot 10^{12} \pm 6.62 \cdot 10^5) \text{ см}^{-2}$$

и

$$\alpha = (0.00169 \pm 4.20 \cdot 10^{-10}) \text{ 1/ч},$$

которые хорошо согласуются с результатами измерений ($R^2 = 0.999$). Таким образом, в конце первого этапа p_b -центры остаются пассивированными.

Второй этап поверхностного дефектообразования приводит к возрастанию плотности дефектов при разрушении водородосодержащих D -центров около границы

Si–SiO₂. Образование дефектов начинается через некоторый интервал времени t_0 и описывается выражением [8]

$$\frac{dN_D(t^*)}{dt} = \sigma_{\text{depass}} \cdot N_{\text{SiH}} \cdot f_{\text{H}^+} - \sigma_{\text{pass}} \cdot N_D \cdot f_{\text{H}_2}, \quad (8)$$

где σ_{depass} и σ_{pass} — сечения процессов депассивации и пассивации оборванных валентных связей кремния на границе раздела Si–SiO₂, N_{SiH} — плотность SiH-центров, f_{H^+} — поток протонов от кремния к границе раздела, N_D — плотность разрушенных D -центров на границе раздела, f_{H_2} — поток молекул водорода из объема оксидной пленки. Решение уравнения (8) имеет вид:

$$\begin{aligned} N_D(t^*) &= \frac{\sigma_{\text{depass}} \cdot N_{\text{SiH}} \cdot f_{\text{H}^+}}{\sigma_{\text{pass}} \cdot f_{\text{H}_2}} [1 - \sigma_{\text{pass}} \cdot f_{\text{H}_2} \cdot t^*] \\ &= N_{D,\text{sat}} [1 - \exp(-\beta_2 \cdot t^*)], \end{aligned}$$

где $t^* = t - t_0$, $N_{D,\text{sat}}$ — плотность поверхностных дефектов при насыщении процесса дефектообразования, β_2 — скорость образования на втором этапе. Таким образом, с использованием программы OriginRro 8 получено:

$$N_{D,\text{sat}} = (1.005 \cdot 10^{12} \pm 9.475 \cdot 10^{10}) \text{ см}^{-2},$$

$$\beta_2 = (2.411 \cdot 10^{-4} \pm 2.915 \cdot 10^{-5}) \text{ 1/ч} \quad \text{и} \quad t_0 = 2389.8 \text{ ч.}$$

5. Заключение

Как и в случае МОПТ с n -каналом, в транзисторе с p -каналом наблюдаются два этапа поверхностного дефектообразования. Однако из-за воздействия электрического поля в подзатворном оксиде процесс поверхностного дефектообразования на первом этапе прекращается из-за ухода протонов от границы раздела Si–SiO₂, что приводит к восстановлению пассивации оборванных валентных связей кремния.

Второй этап поверхностного дефектообразования происходит с некоторой задержкой по времени и на энергетическом уровне выше границы проводимости кремния. Поэтому он происходит при участии „горячих“ электронов и „подпитывается“ протонами со стороны кремния, так как отрицательно заряженные атомы водорода H[−], образовавшиеся при распаде молекулы водорода H₂ на границе раздела Si–SiO₂, конвертируют свой заряд, взаимодействуя с дырками в приповерхностной области кремния. Этот процесс приводит к образованию более сложных дефектов вблизи границы раздела. Процесс разрыва напряженных связей в приповерхностной области кремния не дает значительного вклада в общую плотность поверхностных дефектов.

Благодарности

Авторы благодарят А.Ф. Кожина за дозиметрию γ -излучения и М.М. Червякову за помощь при проведении экспериментов по облучению микросхем.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Л.В. Курносова. УФН, **52** (4), 603 (1954).
- [2] T.R. Oldham, F.B. Mc Lean. IEEE Trans. Nucl. Sci., **50** (3), 483 (2003).
- [3] N.A. Kulikov, V.D. Popov. Semiconductor, **53** (1), 110 (2019).
- [4] K.A. Petukhov, V.D. Popov. Sensors Systems., **2** (222), 53 (2018) (In Russian).
- [5] S.T. Pandelides, S.N. Rashkeev, R. Buczko, D.M. Fleetwood, R.D. Schrimpf. IEEE Trans. Nucl. Sci., **47**, 2262 (2000).
- [6] M.A. Bulusheva, V.D. Popov, G.A. Protopopov, A.V. Skorodumova. Semiconductors, **44** (4), 508 (2010).
- [7] S.N. Rashkeev, C.R. Cirba, D.M. Fleetwood, R.D. Schrimpf, S.C. Witzak, A. Michez, S.T. Pandelides. IEEE Trans. Nucl. Sci., **49** (6), 2650 (2002).
- [8] S.N. Rashkeev, D.M. Fleetwood, R.D. Schrimpf, S.T. Pandelides. IEEE Trans. Nucl. Sci., **51** (6), 3158 (2004).
- [9] J.R. Schwank, P.S. Winokur, P.J. Mc Whorter, F.W. Sexton, P.V. Dressendorfer, D.C. Turpin. IEEE Trans. Nucl. Sci., **31** (6), 1434 (1984).
- [10] A.J. Lelis, T.R. Oldham, H.E. Boesh, F.B. Mc Lean. IEEE Trans. Nucl. Sci., **31** (6), 1808 (1989).
- [11] N.S. Saks, R.B. Klein, D.L. Griscom. IEEE Trans. Nucl. Sci., **35** (6), 1234 (1988).
- [12] J. Mc Whorter, P.S. Winokur. Appl. Phys. Lett., **48** (2), 133 (1986).

Редактор А.Н. Смирнов

Research of radiation effects in MOS transistor with *p*- channel

A.V. Kuzminova, N.A. Kulikov, V.D. Popov

National Research Nuclear University „MEPhI“,
115409 Moscow, Russia

Abstract The effect of gamma radiation on the formation of surface defects at the Si–SiO₂ interface in a MOS transistor with a *p*-channel in the passive mode is considered. Several surface defect formation processes were observed. The role of molecular hydrogen in the gate oxide of the MOS transistor and „hot“ electrons formed in the near-surface region of silicon is shown.