

Кузьмина Алла Владимировна, к.т.н., доцент,
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва

Попов Виктор Дмитриевич, д.т.н., профессор,
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ НА ГРАНИЦЕ Si-SiO₂ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ

Аннотация: Представлена методика определения параметров поверхностных дефектов на границе раздела «кремний – оксид кремния» и на границе приповерхностной области кремния с использованием воздействия гамма-излучения с мощностью дозы $P = 0,1$ рад/с в широком диапазоне доз. Исследованы МОП транзисторы, определены параметры процессов в широком диапазоне доз.

Abstract: A method is presented for determining the parameters of surface defects at the silicon-silicon oxide interfaces and at the boundary of the near-surface region of silicon using gamma radiation with a dose rate of $P = 0.1$ rad/s in various doses. MOS transistors were studied that make it possible to control process parameters in medium doses.

Ключевые слова: процессы дефектообразования, гамма-облучение, МОП транзистор, система Si-SiO₂.

Keywords: defect formation processes, gamma irradiation, MOS transistor, Si-SiO₂ system.

Введение

В настоящее время при производстве интегральных микросхем и МОП транзисторов используется выращивание оксидной пленки в атмосфере водорода, что в значительной мере снижает плотность поверхностных дефектов в объеме оксида и на границе раздела Si-SiO₂. В этом случае оборванные валентные связи кремния или кислорода образуют водородные комплексы

$\equiv Si-H$ и $\equiv Si-O-H$, которые пассивируют поверхностные дефекты [1]. Однако, поскольку выращивание пленки оксида кремния происходит при повышенной температуре, то на границе раздела Si-SiO₂ устанавливается равновесное состояние. При переходе к более низким температурам, в которых эксплуатируются МОПТ и микросхемы, появляются механические напряжения из-за различий коэффициентов термического расширения кремния и оксида кремния. Поэтому возникают «напряженные» валентные связи в приповерхностном слое кремния.

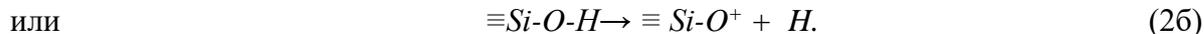
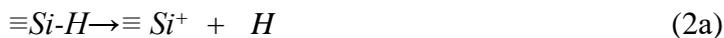
Согласно [2], скорость образования поверхностных дефектов при разрыве напряженных связей равна

$$\beta_I = \pi \cdot d^2 \cdot v_{T0} \cdot K_{rel} \cdot (N_A^2 / N_{V0}) / \exp(E_2 / (kT)) = 0,0034 \text{ 1/ч}, \quad (1)$$

где $d = d_0 + \Delta d = 2,35 + 0,1 = 2,45 \text{ \AA}$ - длина валентной связи Si-Si при нормальных условиях; $v_{T0} = 1,54 \cdot 10^7 \text{ см/с}$ - тепловая скорость дырок при нормальных условиях; K_{rel} - коэффициент связи между количеством разорванных и релаксированных связей; $N_A = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ - концентрация акцепторов; $N_{V0} = 1,02 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ - эффективная плотность состояний в валентной зоне; $E_2 = -1,18 \text{ эВ}$ - энергетический уровень напряженных; k - константа Больцмана; $T = 296 \text{ }^\circ\text{K}$ - температура.



В случае воздействия ионизирующего излучения на МОПТ в приповерхностной области кремния происходит разрыв напряженных валентных связей кремния с одной стороны, а с другой стороны - депассивация дефектов, вызванная уходом водорода из водородных комплексов [1]:



При низкоинтенсивном длительном облучении ионизирующим излучением в МОПТ происходит эмиссия электронов из кремния в оксид, что нейтрализует заряженные дефекты в объеме оксида [3]. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только дефекты на границе раздела $Si-SiO_2$ и в приповерхностном слое кремния. Зонная диаграмма МОП структуры представлена на рисунке 1, где указаны электроактивные центры, участвующие в образовании поверхностных дефектов.

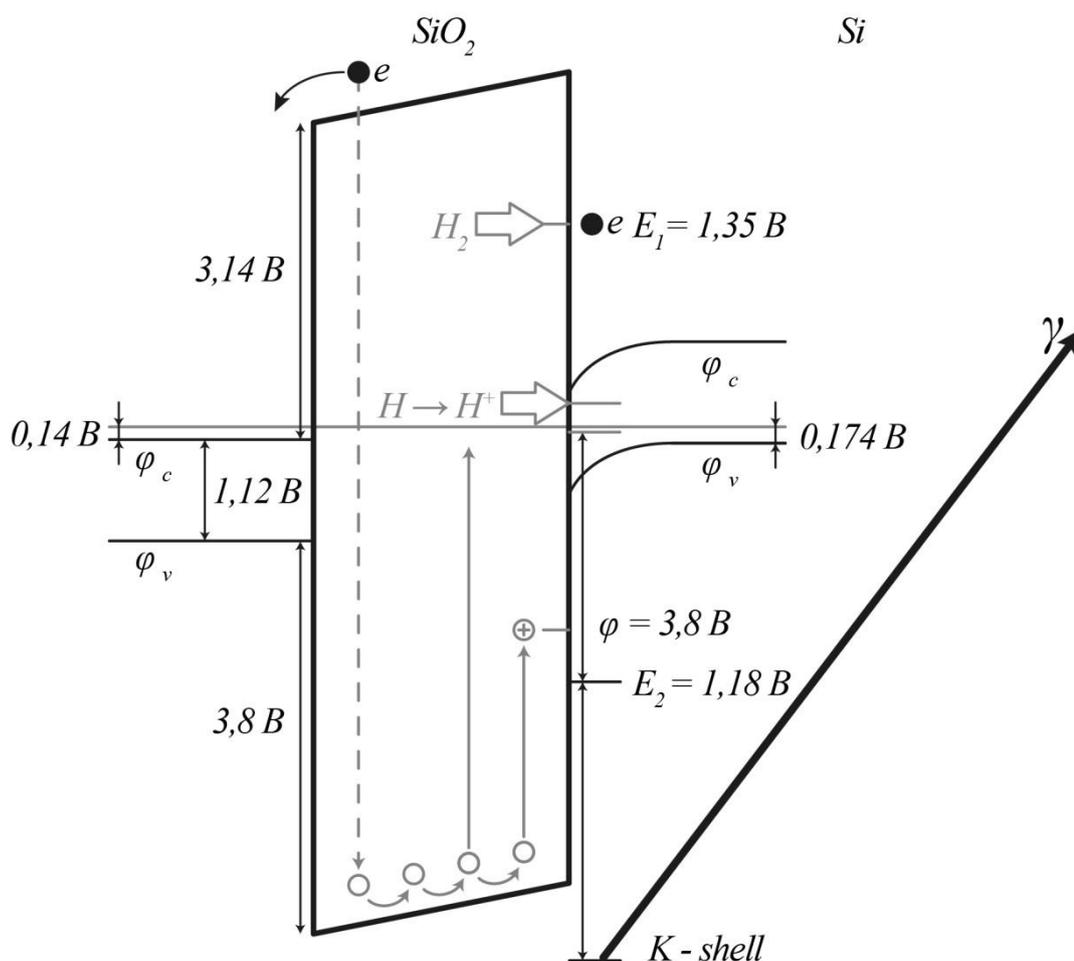


Рис. 1. Зонная диаграмма МОП структуры с поликремниевым затвором

Центр E_1 является водородным комплексом $\equiv Si-O-H$, который находится в пределах 50 \AA от границы $Si-SiO_2$ [4], а центр E_2 является напряженной связью кремния в приповерхностной области кремния [2]. Водородный комплекс $\equiv Si-O-H$ (центр E_1) является стабильным несмотря на присутствия молекул H_2 у границы раздела $Si-SiO_2$. Однако, при воздействии гамма-излучения появляются «горячие» электроны, взаимодействующие с центром E_1 , что вызывает уход протона [5]. В итоге возникает поверхностный дефект $\equiv Si-O-$ (E' -центр).



В области запрещенной зоны кремния на границе $Si-SiO_2$ проявляются два дефекта, представляющие собой оборванные валентные связи кремния. Эти центры P_{b0} и P_{b1} были обнаружены методом электронного спинного резонанса (ЭПР) и исследовались в работе [6]. Эти исследования показали, что центр P_{b1} находится вблизи середины запрещенной зоны кремния, а центр P_{b0} - ближе к границе валентной зоны. Оборванные валентные связи проявляются в запрещенной зоне кремния как электроактивные центры

В работе [7] использовались измерения емкости МОП структуры как функции напряжения на затворе (CU -характеристики). Результаты измерений представлены на рисунке 2.

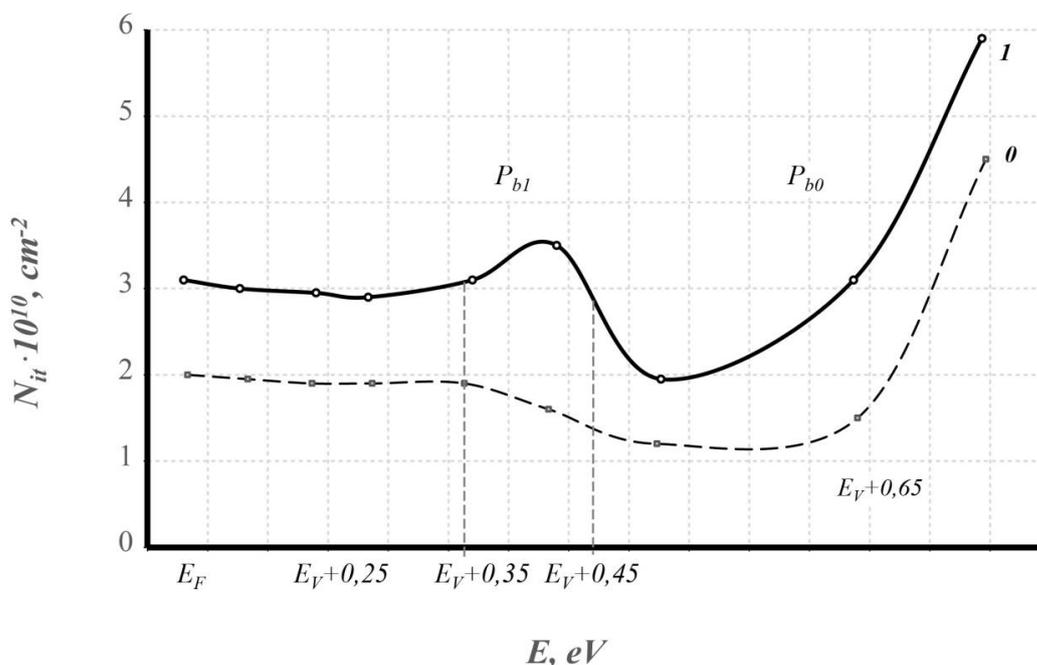


Рис. 2. Измерения распределения плотности поверхностных дефектов в МОП структуре при облучении гамма-лучами: 0 – до облучения, 1 – после облучения дозой $D = 10^4$ рад

Как можно видеть, центры P_{b0} наблюдаются и до облучения, в то время как P_{b1} -центры появляются только после облучения.

Поверхностные дефекты в структуре $Si-SiO_2$ оказывают сильное влияние на характеристики МОП структуры. Особенно это проявляется при воздействии ионизирующего излучения. Целью данной работы является описание процессов образования поверхностных дефектов при длительном низкоинтенсивном воздействии гамма-излучения.

1. Описание эксперимента

Исследование процессов поверхностного дефектообразования проводилось на 3-х образцах МОПТ с n -каналом в КМОП микросхеме. Эксперименты по облучению КМОП микросхемы проводились с использованием изотопного источника Cs^{137} без подачи электрического режима (все выводы микросхемы были соединены между собой). Мощность дозы гамма-излучения контролировалась с помощью прибора ДКС-101. Микросхема облучалась при мощности дозы $P = 0,1$ рад/с и температуре $T = 25$ °С. До и после каждого этапа облучения измерялись стоко-затворные характеристики (СЗХ) n -канальных МОП транзисторов с использованием анализатора полупроводниковых приборов Agilent Technologies B1500A.



Для определения плотности поверхностных дефектов использовалась методика анализа изменения крутизны СЗХ, опубликованная в [8]. В ней изменения поверхностной подвижности $\mu_s(D)$ связаны с изменением плотности поверхностных дефектов при облучении гамма-излучением дозой D . Поскольку все процессы протекают во времени t при соответствующих внешних условиях (мощность дозы P и температура T), то в данной работе перейдем от дозы $D=P/t$ ко времени t . Поэтому в данной работе использовано выражение

$$\mu_s(t) = \frac{\mu_s(0)}{1+\alpha(\Delta N_{it})}, \quad (4)$$

где $\mu_s(0)$ и $\mu_s(t)$ - поверхностная подвижность электронов в канале МОПТ до и после облучения; ΔN_{it} - изменение плотности поверхностных дефектов; $\alpha = (7,0 \pm 1,3) \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$ - параметр модели.

Из измерений СЗХ МОПТ определены зависимости изменения плотности поверхностных дефектов ΔN_{it} от времени облучения t с использованием (4). Результаты статистической обработки результатов расчета изменения плотности поверхностных дефектов при облучении гамма-лучами во времени представлены на рисунке 3.

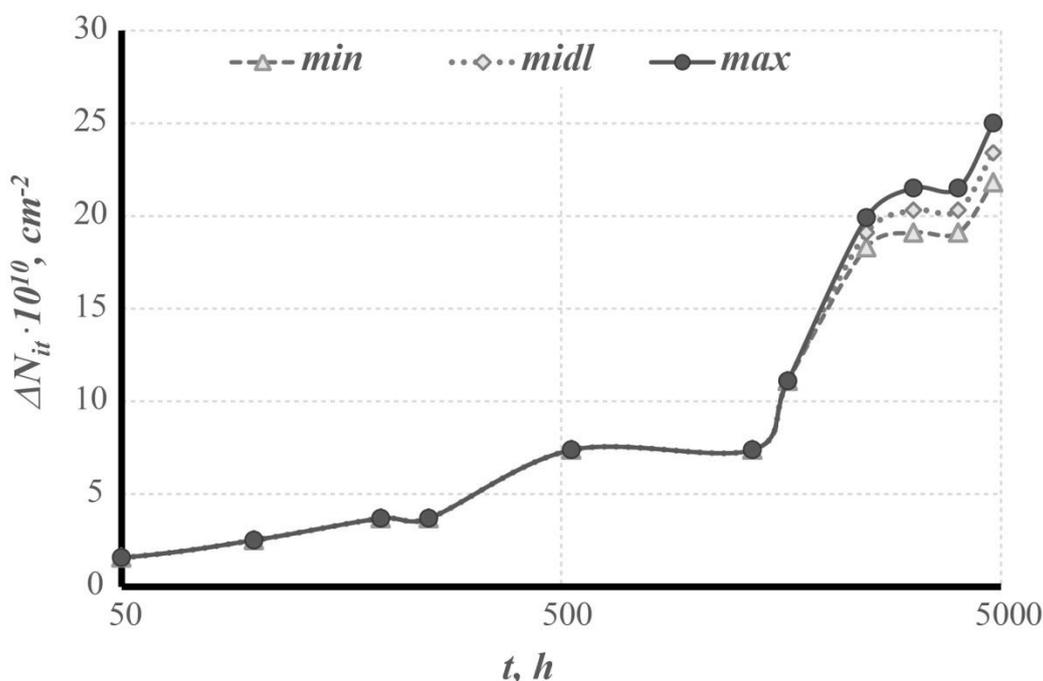


Рис. 3. Изменение плотности поверхностных дефектов при облучении гамма-лучами с мощностью дозы $P = 0,1$ рад/с в пассивном режиме

Как можно видеть, разброс изменений плотности поверхностных дефектов проявляется при длительных облучениях МОПТ.

Эксперимент показал, что наблюдаются различные этапы поверхностного дефектообразования. Все этапы возможно описать экспоненциальными зависимостями вида

$$\Delta N_{it.i}(t) = \Delta N_{it.s.i} \{1 - \exp(-\beta_i(t + t_{0i}))\}, \quad (5)$$

где $\Delta N_{it.s.i}$ - изменение плотности поверхностных дефектов на i -ом этапе поверхностного дефектообразования; β_i - скорость процесса на i -ом этапе; t - время; t_{0i} - начало i -го этапа дефектообразования.

Используя программу OriginLab, были выделены отдельные этапы, результаты аппроксимации которых представлены на рисунке 4.



Для каждого этапа поверхностного дефектообразования полученные параметры зависимостей приведены в таблице 1.

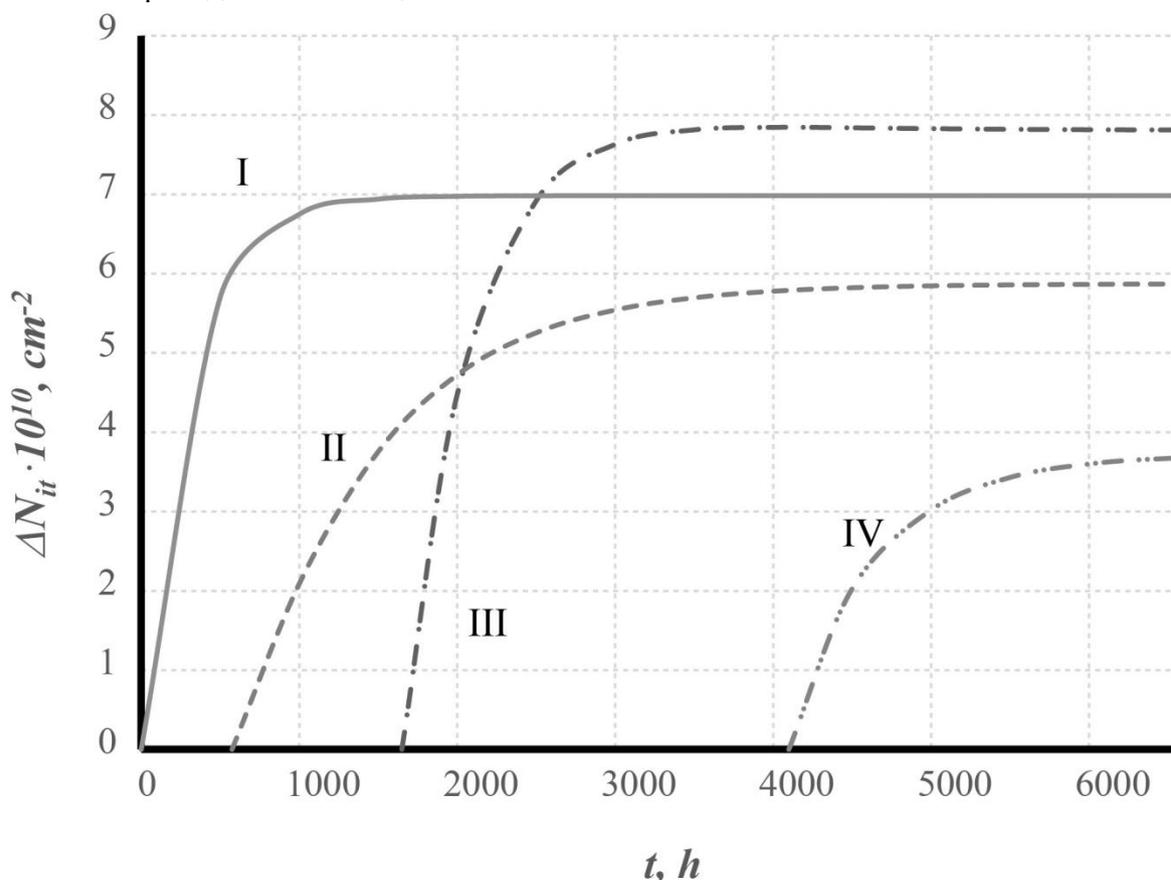


Рис. 4. Изменение плотности поверхностных дефектов на каждом этапе при облучении гамма-излучением с мощностью дозы $P = 0,1$ рад/с

Таблица 1

Параметры экспоненциальных зависимостей каждого этапа

Этапы, i	Время начала этапа t_{0i} , ч	$\Delta N_{it.sat} \cdot 10^8$, cm^{-2}	$\beta_i \cdot 10^{-5}$, 1/ч	R^2
<i>I</i>	0	698 ± 31	340 ± 38	0,9882
<i>II</i>	550	590 ± 2	$110 \pm 1,6$	0,99930
<i>III</i>	1650	$785 \pm 1,5$	246 ± 3	0,99969
<i>IV</i>	4100	$370 \pm 1,5$	193 ± 3	0,9997

2. Анализ результатов эксперимента

На первом этапе поверхностного дефектообразования имеет место взаимодействие излучения гамма-излучения с К- или L-оболочками атома кремния. В результате этого взаимодействия происходит разрыв напряженных связей около границы раздела $Si-SiO_2$ и образуется поверхностный дефект в приповерхностном слое кремния. Этот процесс описан в [2] и представлен на зонной диаграмме, указанной на рисунке 1.



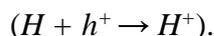
Поскольку выращивание подзатворного оксида производилось в атмосфере водорода при пониженной температуре, то максимальная плотность поверхностных дефектов составляла $N_{it.s} = 4,2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, а скорость процесса поверхностного дефектообразования составляла $\beta_I = 0,0034 \text{ 1/ч}$.

Использование параметров экспоненциальной зависимости (3) позволяет определить параметр K_{rel} модели разрыва напряженных валентных связей

$$K_{rel} = N_{разр}/N_{рел} = 6,58 \cdot 10^{-9}/2,47 \cdot 10^{-8} = 0,265.$$

Этот результат показывает, что при разрыве одной напряженной валентной связи кремния снимается механическое напряжение у четырех.

Второй этап начинается через $t_{02} = 550 \text{ ч}$. На этом этапе процесса поверхностного дефектообразования (описание процесса представлено на рисунке 1) происходит образование протонов H^+ в объеме подзатворного оксида, вызванное захватом дырки h^+ , образованной ионизацией оксида кремния гамма-излучением:



Протоны H^+ двигаются к границе раздела и вызывают процесс депассивации ($\equiv Si-H + H^+ \rightarrow \equiv Si\cdot + H_2$) непосредственно на границе раздела $Si-SiO_2$, что приводит к увеличению плотности поверхностных дефектов, представляющие собой оборванные валентные связи кремния в окружении атомов кремния (P_{b0} -центры). В этом случае $N_{it} = N_{Pb0}$, и этот процесс описывается уравнением [9]:

$$\frac{\partial N_{Pb0}}{\partial t} = (N_{SiH} - N_{Pb0})\sigma_{it}f_H - \frac{N_{Pb0}}{\tau_{Pb}}, \quad (6)$$

где N_{SiH} - плотность водородосодержащих центров; N_{Pb0} - плотность P_{b0} -центров; σ_{depass} - сечение захвата протона SiH -центром (депассивация); f_H - поток протонов; τ_{Pb} - время жизни дефекта на границе раздела $Si-SiO_2$.

Решение уравнения (6) имеет вид:

$$N_{Pb0}(t) = \frac{N_{SiH}}{1 + \frac{1}{\sigma_{depass} \cdot f_{H^+} \cdot \tau_{Pb0}}} [1 - \exp(-\beta_{II}(t - t_{02}))], \quad (7)$$

$$\text{где } \beta_{II} = \frac{1 + \sigma_{depass} \cdot f_{H^+} \cdot \tau_{Pb0}}{\tau_{Pb0}}, \text{ а } N_{Pb0.s} = \frac{N_{SiH}}{1 + \frac{1}{\sigma_{depass} \cdot f_{H^+} \cdot \tau_{Pb0}}} = \frac{N_{SiH} \cdot \sigma_{depass} \cdot f_{H^+}}{\beta_{II}}.$$

Согласно [10] количество оборванных валентных связей на границе раздела $Si-SiO_2$ при ориентации кремния [100] равно $6,8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Однако, не все оборванные валентные кремния пассивированы водородом. Часть водородных комплексов SiH освобождается от водорода. Поэтому в [11] указывается плотность SiH -центров $N_{SiH} = 2,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$.

Для определения изменения плотности поверхностных дефектов (P_{b0} -центров) ΔN_{Pb0} в ИМОПТ была использована экспоненциальная зависимость 2 (на рисунке 4, кривая II), параметры которой представлены в таблице 1. Этот P_{b0} -центр является электроактивным уровнем в запрещенной зоне кремния (подробно рассмотрено на рисунке 1). Он образуется при взаимодействии протона H^+ с SiH -центром. Поток протонов в этом процессе получился равным

$$(f_{H^+})_{Pb0} = 96,02 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}.$$

С ростом времени облучения процесс образования P_{b0} -центров насыщается. В этом случае появляется равновесие процессов депассивации этих дефектов и их пассивации, что характеризуется временем жизни этого дефекта $\tau_{Pb0} = 1,46 \cdot 10^6 \text{ с} = 405,6 \text{ ч}$.

Третий этап начинается при $t_{03} = 1560 \text{ ч}$. На этом этапе поверхностного дефектообразования на границе раздела $Si-SiO_2$ также происходит процесс депассивации структуры $\equiv Si-H$ на границе раздела $Si-SiO_2$, в котором протон H^+ выходит из этой водородосодержащей структуры и образует P_{b1} -центр в запрещенной зоне кремния (показано



на рисунке 1). В этом случае $N_{it} = N_{Pb1}$ и процесс поверхностного дефектообразования описывается уравнением, аналогичным (6), и решение имеет вид

$$N_{Pb1}(t) = \frac{N_{SiH}}{1 + \frac{1}{\sigma_{depass} \cdot f_{H^+} \cdot \tau_{Pb1}}} [1 - \exp(-\beta_{III}(t - t_{03}))],$$

$$\text{где } \beta_{III} = \frac{1 + \sigma_{depass} \cdot f_{H^+} \cdot \tau_{Pb1}}{\tau_{Pb1}}, \text{ а } N_{Pb1.s} = \frac{N_{SiH}}{1 + \frac{1}{\sigma_{depass} \cdot f_{H^+} \cdot \tau_{Pb1}}} = \frac{N_{SiH} \cdot \sigma_{depass} \cdot f_{H^+}}{\beta_{III}}$$

Поток протонов в этом процессе получился равным $f_{H^+} = 389,4 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Этот процесс также хорошо описывается экспоненциальной зависимостью (6) и со временем также насыщается. Параметры, описывающие этот процесс, представлены в таблице 1. Он характеризуется временем начала этого процесса а $t_{03} = 1300 \text{ ч}$ и временем жизни этого дефекта

$$\tau_{Pb1} = 3,27 \cdot 10^6 \text{ с} = 908,3 \text{ час.}$$

На **четвертом этапе**, который начинается при $t_{04} = 3300 \text{ ч}$, наблюдается процесс ухода водорода из структуры $\equiv Si-O-H$ на границе раздела $Si-SiO_2$. В этом случае образуется дефект E' -центр [4]. При этом показано в [12], что этот процесс связан с разложением молекулы водорода H_2 на границе $Si-SiO_2$. Особенностью процесса образования этого дефекта является то, что необходимо участие «горячих» электронов, порожденных гамма-излучением (рисунок 1) [5]. Время начала этого процесса обусловлено диффузией молекул водорода H_2 к границе раздела $Si-SiO_2$.

Образование дефектов начинается через некоторый интервал времени t_{04} и описывается выражением [12]

$$\frac{dN_D(t)}{dt} = \sigma_{depass} \cdot N_{SiOH} \cdot f_{H^+} - \sigma_{pass} \cdot N_D \cdot f_{H_2}, \quad (8)$$

где σ_{depass} и σ_{pass} - сечения процессов депассивации и пассивации оборванных валентных связей кремния на границе раздела $Si-SiO_2$; N_{SiOH} - плотность $SiOH$ -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:

$$N_D(t^*) = \frac{\sigma_{depass} \cdot N_{SiOH} \cdot f_{H^+}}{\sigma_{pass} \cdot f_{H_2}} [1 - \exp[-\sigma_{pass} \cdot f_{H_2}(t - t_{04})]] = N_{D,sat} [1 - \exp(-\beta_{IV}(t - t_{04}))], \quad (9)$$

где $N_{it,sat}$ - плотность поверхностных дефектов при насыщении процесса дефектообразования; β_{IV} - скорость образования на 4 этапе.

Из (9) получаем соотношение $N_{D,sat} = \frac{\sigma_{depass} \cdot N_{SiOH} \cdot f_{H^+}}{\sigma_{pass} \cdot f_{H_2}}$, в котором

$$\frac{\sigma_{depass}}{\sigma_{pass}} = 1,898 [12], \text{ а } \frac{f_{H^+}}{f_{H_2}} \cong 0,5.$$

Откуда получаем исходную концентрацию структур $N_{SiOH} \approx 3,9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Обсуждение результатов

Метод низкоинтенсивного облучения гамма-лучами позволил разделить во время облучения различные поверхностные дефекты. Экспериментальное исследование этим методом позволило наблюдать различные этапы поверхностного дефектообразования в структуре $Si-SiO_2$ и выявить постепенное проявление дефектов во время облучения. Если первый этап начинается с началом облучения гамма-лучами, то последующие этапы начинаются с некоторой задержкой во времени. Тщательное исследование этих процессов позволило получить спектр процессов образования поверхностных дефектов. Поверхностные дефекты, обусловленные оборванными валентными связями кремния, создают уровни в



пределах запрещенной зоны кремния. К ним относятся как P_{b0} -центры и P_{b1} -центры на границе раздела $Si-SiO_2$, а также и оборванные связи кремния в приповерхностной области кремния.

Выводы

Дефекты, которые связаны с E' -центром, создаются за пределами запрещенной зоны кремния и являются источником положительного заряда в оксиде кремния. При облучении МОП структур высокоинтенсивным ионизирующим облучением все этапы проходят практически одновременно и их трудно различить.

Авторы благодарят Кожина А.Ф. за дозиметрию гамма-излучения.

Финансирование работы: Работы выполнены без спонсорского участия.

Конфликт интересов: Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы:

1. P.E. Bunson, H.D. Ventra, S.T. Pandelides, D.M. Fleetwood, R.D. Schrimpf. Hydrogen-related defects in irradiated SiO_2 . *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, **47** (6), pp. 2289-2296 (2000). DOI: 10.1109/23.903767.
2. M.A. Bulusheva, V.D. Popov, G.A. Protopopov, A.V. Skorodumova. Physical model of MOS-structure aging. Published in *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*, **44** (4), P. 527–532. (2010). <http://dx.doi.org/10.1134/S1063782610040172>.
3. П.Н. Орешков, В.Д. Попов. Модель влияния ионизирующего излучения и температуры на характеристики МОП-транзистора. *Датчики и системы*. №1. С. 57-60 (2015).
4. J.R. Schwank, P.S. Winokur, P. J. McWhorter, F. W. Sexton, P.V. Dressendorfer, D.C. Turpin. Physical mechanisms contributing to device "rebound". *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, **31** (6), P. 1434-1438. (1984). DOI: 10.1109/TNS.1984.4333525.
5. N.A. Kulikov, V.D. Popov. Effect of the electric mode and γ irradiation on surface-defect formation at the Si-SiO₂ Interface in a MOS transistor. *Semiconductors*. 53 (1), P. 110-113 (2019). DOI: 10.1134/S1063782619010123.
6. T.D. Mishima, P.M. Lenahan. A spin-dependent recombination study of radiation-induced P_{b1} centers at the [001] Si/SiO₂ interface. *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, **47** (6), P. 2249-2255 (2000). DOI: 10.1109/23.903761.
7. В.С. Першенков, В.Д. Попов, А.В. Шальнов. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем. - М.: Энергоатомиздат. 256 с. (1988).
8. F.W. Sexton, J.R. Schwank. Correlation of radiation effects in transistors and integrated circuits. - *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, **32** (6), P. 3975-3981 (1985). DOI: 10.1109/TNS.1985.4334053.
9. S.N. Rashkeev, C.R. Cirba, D.M. Fleetwood, R.D. Schrimpf, S.C. Witczak, A. Mitchez, S.T. Pantelides. Physical model for enhanced interface-trap formation at low dose rates. - *Trans. on Nucl. Sci.*, **49**(6), P. 2650-2655 (2002). DOI: 10.1109/TNS.2002.805387.
10. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1. - М.: Мир. (1984). 456 с.
11. R.L. Pease, Ph.C. Adell, B.G. Rax, X.Y. Chen, H.J. Barnaby, K.E. Holbert, H.P. Hjalmarson. The Effects of Hydrogen on the Enhanced Low Dose Rate Sensitivity (ELDRS) of Bipolar Linear Circuits. - *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* Vol. 55. No 6. (2008). P. 3169-3173. DOI: 10.1109/TNS.2008.2006478.
12. S.N. Rashkeev, D.M. Fleetwood, R.D. Schrimpf, S.T. Pantelides. Effects of hydrogen motion on interface trap formation and annealing. - *Trans. on Nucl. Sci.*, **51** (6), P. 3158-3165 (2004). DOI: 10.1109/TNS.2004.839202.

