

## Два этапа поверхностного дефектообразования в МОП структуре при низкоинтенсивном воздействии $\gamma$ -излучения

© В.Д. Попов

Национальный исследовательский ядерный университет „Московский инженерно-физический институт“, 115409 Москва, Россия

E-mail: wdporov@mail.ru

(Получена 11 июня 2015 г. Принята к печати 17 июня 2015 г.)

Приводятся результаты экспериментального исследования образования поверхностных дефектов на границе раздела Si–SiO<sub>2</sub> при мощностях дозы  $\gamma$ -излучения  $P = 0.1$  и  $1.0$  рад/с. Установлено, что имеют место два этапа процесса образования поверхностных дефектов. Проведен анализ механизмов дефектообразования.

### 1. Введение

Для изучения радиационных эффектов при низких значениях мощности дозы ионизирующего излучения наиболее часто используется  $\gamma$ -излучение. При этом основным параметром является накопленная поглощенная доза  $D = Pt$ , где  $P$  — мощность дозы,  $t$  — время облучения. Как известно, при облучении МОП приборов (структур металл–оксид–полупроводник) и интегральных микросхем  $\gamma$ -квантами с низкой мощностью дозы происходит уменьшение вклада заряда в объеме подзатворного оксида  $Q_{ot}$  [1,2] и существенно возрастает плотность поверхностных дефектов  $N_{it}$  на границе раздела Si–SiO<sub>2</sub> [3]. В [3] предлагается рассматривать процесс поверхностного дефектообразования как функцию времени  $t$ . В этом случае мощность дозы ионизирующего излучения  $P$  отражает внешнее условие, при котором происходит процесс образования дефектов на границе раздела Si–SiO<sub>2</sub>. На первом этапе происходит процесс образования поверхностных состояний, который со временем насыщается. На втором этапе имеет место другой процесс поверхностного дефектообразования, причины которого до настоящего времени не ясны.

При исследовании процесса поверхностного дефектообразования в тестовых МОП транзисторах, изготовленных на структуре кремний-на-изоляторе (КНИ), также наблюдалось два этапа роста  $N_{it}$  [4]. Результаты этого эксперимента показаны на рис. 1. Первый этап описывается экспоненциальной зависимостью с параметрами  $N_{it,s} = (4.23 \pm 0.064) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и  $\alpha = (1.71 \pm 0.079) \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$ , в которой  $N_{it,s}$  — плотность поверхностных состояний при насыщении,  $\alpha$  — временной параметр модели. Таким образом, в общем виде изменение плотности поверхностных дефектов  $\Delta N_{it}(P, t)$  можно представить в виде выражения [3]

$$\Delta N_{it}(P, t) = \Delta N_{it,s} [1 - e^{-\alpha Pt}] + \Delta N_{it}^*(P, t),$$

где  $\Delta N_{it,s}$  — изменение плотности поверхностных состояний при насыщении первого процесса,  $\Delta N_{it}^*(P, t)$  — изменение плотности поверхностных дефектов на втором этапе дефектообразования.

Целью данной работы является математическое описание второго этапа поверхностного дефектообразования.

### 2. Описание и результаты эксперимента

В экспериментальном исследовании использовались МОП транзисторы с  $n$ -каналом в КМОП интегральных схемах малой степени интеграции. Толщина подзатворного оксида составляла 60 нм. Вольт-амперные характеристики транзисторов измерялись в широком диапазоне токов стока с использованием анализатора полупроводниковых приборов Agilent Technologies B1500A.

Облучение образцов производилось  $\gamma$ -квантами от источника Cs<sup>137</sup> с мощностью дозы 1.0 и 0.1 рад/с в пассивном режиме (все выводы микросхемы при облучении были закорочены). Для определения плотности поверхностных дефектов применен метод подпороговых токов [5]. Результаты эксперимента представлены на рис. 2. Поскольку на первом этапе эксперимента значения максимальных плотностей поверхностных дефектов при насыщении имели разброс, то сравнение зависимостей производилось по относительным зависимостям  $\Delta N_{it}/\Delta N_{it,s}$ . Как можно видеть, наблюдаются два этапа

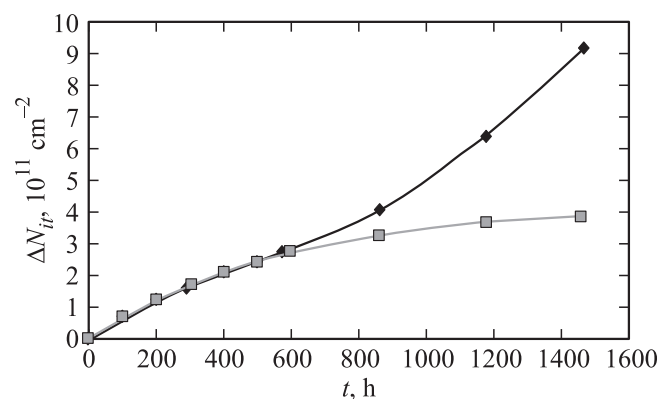
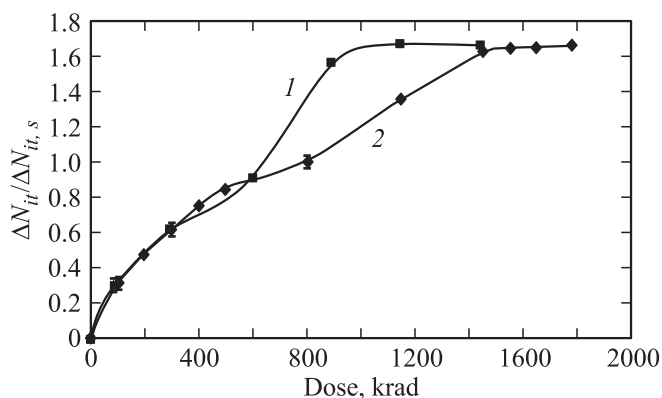
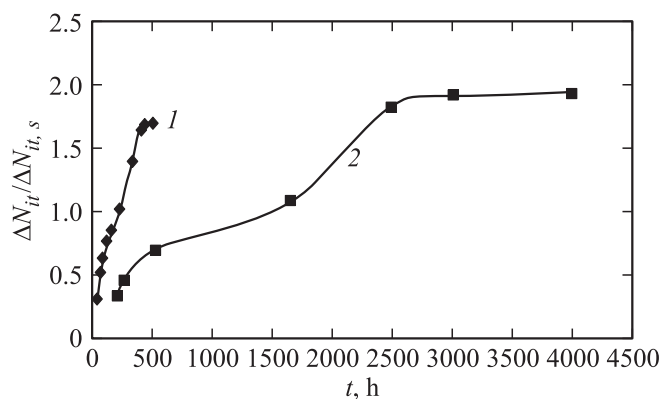


Рис. 1. Изменение плотности поверхностных дефектов в МОП транзисторе с КНИ структурой.



**Рис. 2.** Данные зависимости относительных изменений плотностей поверхностных дефектов при мощностях дозы 0.1 (1) и 1.0 рад/с (2).



**Рис. 3.** Результаты экспериментов при  $P = 1.0$  (1) и  $0.1$  рад/с (2).

поверхностного дефектообразования. На первом этапе происходит образование поверхностных состояний. Согласно [6], происходит образование  $P_b$ -центров на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>. Этот процесс хорошо описывается экспоненциальной зависимостью и определяется поглощенной дозой. На втором этапе происходит образование „дополнительных“ поверхностных дефектов и экспериментальные зависимости значительно расходятся, что говорит о зависимости эффекта от времени  $t$ .

Если рассмотреть зависимость  $\Delta N_{it}(P)$  от времени облучения  $t$  (см. рис. 3), то также видны два этапа поверхностного дефектообразования. Задача состояла в определении функции, описывающей изменение плотности поверхностных дефектов во времени.

### 3. Обработка результатов

Первый этап дефектообразования (этап образования поверхностных состояний), как указано выше, хорошо

**Таблица 1.** Параметры экспоненциальной зависимости на первом этапе

$P$ , рад/с	$\Delta N_{it,s}$ , см <sup>-2</sup>	$\alpha$ , ч <sup>-1</sup>	$R^2$
1.0	$(11.0 \pm 1.46) \cdot 10^{10}$	$0.0129 \pm 0.000965$	0.9977
0.1	$(122 \pm 0.19) \cdot 10^9$	$0.00132 \pm 0.000495$	0.9977

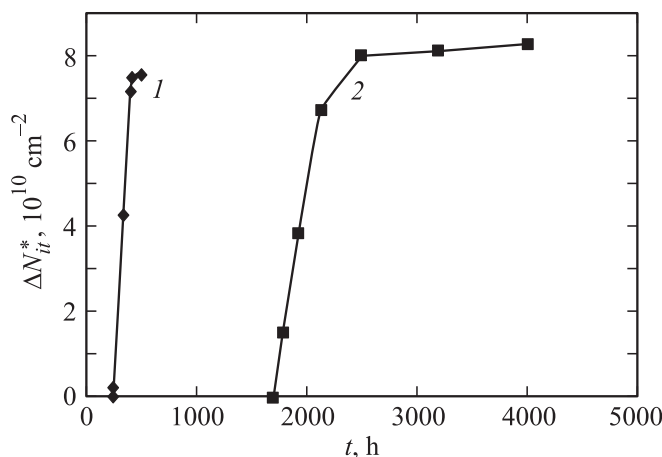
описывается экспоненциальной зависимостью вида

$$\Delta N_{it}(t) = \Delta N_{it,s} [1 - \exp(-\alpha t)], \quad (1)$$

как в случае мощности дозы  $P = 1.0$  рад/с, так и при облучении с мощностью дозы  $P = 0.1$  рад/с. Параметры экспоненты и коэффициент достоверности  $R^2$ , полученные с использованием программы Origin.Pro, приведены в табл. 1.

Вычитая из зависимости  $\Delta N_{it}(t)$ , полученной в эксперименте, экспоненциальную зависимость, рассчитанную по параметрам, приведенным в табл. 1, можно получить изменение плотности „дополнительных“ поверхностных дефектов  $\Delta N_{it}^*(P, t)$ , которые проявляются во втором этапе. Полученные зависимости  $\Delta N_{it}^*(P, t)$  для случаев  $P = 1.0$  и  $0.1$  рад/с представлены на рис. 4. Как можно видеть, плотность „дополнительных“ поверхностных дефектов насыщается при  $\Delta N_{it}^*(P, t) \approx 8 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>.

Необходимо отметить, что обычно радиационные испытания проводятся при мощностях дозы  $> 1.0$  рад/с. Поэтому оба этапа дефектообразования почти „сливаются“ в одну кривую, как это можно видеть на рис. 3 при мощности дозы  $P = 1.0$  рад/с. При мощностях дозы  $P = 0.1$  рад/с и менее расхождение зависимости становится существенным. Кроме того, наблюдается пороговое значение времени  $t_{th}$ , после которого начинается второй этап поверхностного дефектообразования, характеризующийся до насыщения линейной зависимостью вида  $\Delta N_{it}^*(P, t) = A + Kt$ . Полученные параметры линейной зависимости приведены в табл. 2.



**Рис. 4.** Образование „дополнительных“ поверхностных дефектов при  $P = 1.0$  и  $0.1$  рад/с.

**Таблица 2.** Параметры, описывающие второй этап дефектообразования

$P$ , рад/с	$A$ , см <sup>-2</sup>	$K$ , см <sup>-2</sup> · ч <sup>-1</sup>	$R^2$
1.0	$(-82.33 \pm 7.296) \cdot 10^9$	$(38.49 \pm 2.258) \cdot 10^7$	0.9931
0.1	$(-2.502 \pm 4.839) \cdot 10^8$	$(1.52 \pm 2.73) \cdot 10^5$	0.9999

**Таблица 3.** Параметры гиперболической зависимости

$P$ , рад/с	$t_{th}$ , ч	$n$	$B$ , рад/с · ч <sup>-n</sup>
1.0	213	1.127	$4.21.8 \pm 2.0$
0.1	1650		

„Пороговое“ время  $t_{th}$  связано с мощностью дозы  $\gamma$ -облучения  $P$  гиперболической зависимостью вида  $P = B/t_{th}^n$ . Полученные параметры этой зависимости представлены в табл. 3.

#### 4. Обсуждение результата и заключение

Полученные экспериментальные данные показывают, что имеют место два этапа поверхностного дефектообразования. Первый этап образования поверхностных состояний описывается экспоненциальной функцией. Второй этап поверхностного дефектообразования описывается линейной зависимостью и имеет пороговое значение времени. Зависимость этого порогового времени от мощности дозы описывается гиперболической функцией. Линейная зависимость  $\Delta N_{it}^*(t)$  свидетельствует о дефектообразовании в полупроводнике, которое определяется потоком комптоновских электронов, а задержка  $t_{th}$  объясняется диффузией дефектов кремния к границе Si–SiO<sub>2</sub>.

Сравнение зависимостей плотности поверхностных дефектов от времени при разных мощностях дозы  $\gamma$ -излучения на рис. 3 показывает, что с увеличением мощности дозы два этапа поверхностного дефектообразования становятся трудно различимыми в линейной шкале времени. При уменьшении мощности дозы  $P$  два этапа поверхностного дефектообразования четко проявляются.

Автор выражает благодарность доценту М.Ю. Никифоровой и аспиранту Р.В. Власову за помощь в подготовке данных для статьи.

#### Список литературы

- [1] Чжо Ко Вин. ЭТ (Полупроводниковые приборы), **1** (228), 54 (2012).  
 [2] О.В. Александров. ФТП, **48**, 523 (2014).

- [3] И.И. Катеринич, В.Д. Попов, Чжо Ко Вин. В сб.: *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру* (Лыткарино, ФГУП НИИП, 2012) вып. 1, с. 43.  
 [4] В.Д. Попов, Чжо Ко Вин. *Матер. XIII Междунар. конф. „Физика диэлектриков“* (СПб., Россия, 2014) т. 2, с. 234.  
 [5] P.J. McWhorter, P.S. Winokur. *J. Appl. Phys. Lett.*, **48**, 133 (1986).  
 [6] S.N. Rashkeev, C.R. Cirba, D.M. Fleetwood, R.D. Schrimpf, S.C. Witzak, A. Mishez, S.T. Pantelides. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **49**, 2650 (2002).

Редактор Л.В. Шаронова

#### Two stages of surface defects formation in a MIS structure under $\gamma$ -irradiation of low intensity

V.D. Popov

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

**Abstract** The results of experimental researches of surface defects formation on Si–SiO<sub>2</sub> at dose rates  $P = 0.1$  and  $1.0$  rad/s are presented. It is obtained that two stages of process of surface defect formation take place. The short analysis of mechanisms is included.