

Температурная селективность радиационного воздействия на кремниевые МОП-транзисторы

© Б.П. Коман[¶]

Львовский национальный университет им. Ивана Франко (факультет электроники),
79005 Львов, Украина,

(Получена 20 июня 2013 г. Принята к печати 19 августа 2013 г.)

С использованием методики подпороговых токов МОП-транзисторов в интервале температур (290–450) К исследовано влияние температурных режимов рентгеновского облучения на кинетику изменения параметров U_{th} и D_{it} кремниевых МОП-транзисторов с длиной канала 2–10 мкм. Установлено, что по исследуемым параметрам при температурах облучения выше 360 К (температура низкотемпературного максимума в спектре ТСД транзистора) наблюдается снижение радиационной чувствительности транзисторов, которая достигает своего максимального значения в области 430 К (соответствует высокотемпературному максимуму). Полученные результаты интерпретируются с позиции модели существования двух типов ловушек для носителей заряда и перераспределения под действием облучения электрически активных ионов Na^+ , K^+ , Li^+ и H^+ между ними, а также эффекта частичной нейтрализации зарядов на межфазной границе.

1. Введение

Многоплановые фундаментальные и прикладные исследования радиационных воздействий на полупроводниковые кристаллы и приборы электронной техники на их основе в настоящее время позволили сформулировать два основных направления современных работ в этом аспекте: 1) исследование радиационной стойкости структур и изделий электронной техники; 2) вопросы радиационной и элионной технологий, как составляющих этапов технологических маршрутов изготовления электронных полупроводниковых устройств [1,2].

Традиционный подход, который использовался многими исследователями для повышения радиационной стойкости, а именно легирование кристаллов и отдельных областей приборов определенными типами примесей, в современной микро- и нанoeлектронике, как правило, не всегда реализуем на практике и зачастую малоэффективен. Температурные исследования в этом аспекте проводились в основном лишь с целью возможного отжига радиационных дефектов для минимизации радиационных воздействий на структуру путем перевода ее в термодинамически стабильное состояние, что в конечном итоге приводит к некоторым положительным результатам по временной стабилизации ее определенных параметров.

Применение данного подхода для современных кремниевых МОП транзисторов, как правило, затруднительно, поскольку исследуемый прибор по своей структуре является сложной гетерогенной системой и регистрируемые изменения электрофизических параметров являются интегральным результатом сложного дефектообразования, происходящего по различным механизмам в полупроводнике, диэлектрике и на их межфазных границах. Кроме того, ситуация усугубляется еще и тем, что в радиационном дефектообразовании активное участие принимают ионы Na^+ , K^+ , H^+ , Li^+ [3–5], лока-

лизованные в различных структурных областях МОП-структуры, обладающие различными энергиями активации и способные принимать активное участие в электропереносе. Последние также, в значительной мере, определяют стабильность МОП приборов в условиях термополевых и радиационных воздействий [6].

Некоторые фрагментарные исследования влияния температуры облучения на свойства структур $Si-SiO_2$ (γ -облучение) и МОП транзисторов (e -облучение) приведены в работах [7,8] соответственно.

Исследования спектров термостимулируемой деполяризации (ТСД) базовых структур $Si-SiO_2$ в интервале температур (290–500) К продемонстрировали наличие в них двух типов ловушек носителей заряда с энергиями $(E_1 \pm \Delta_1)$ и $(E_2 \pm \Delta_2)$, которые отображаются двумя максимумами тока — условно низкотемпературным (НТ) и высокотемпературным (ВТ) при температурах 360 и (430–450) К соответственно [9,10]. Они играют значительную роль в захвате и освобождении носителей заряда при внешних воздействиях. Взаимосвязь этих ловушек при термополевых воздействиях, различная природа носителей ($e, p, Na^+, H^+, Li^+, K^+$) указывают на возможность планомерного изменения состояния дефектнопримесной структуры путем заполнения или перезаполнения существующих ловушек в процессах селективного энергетического воздействия. Поэтому весьма привлекательной является идея использования особенностей энергетического спектра дефектной структуры $Si-SiO_2$ с целью регулирования их радиационной чувствительности с использованием „резонансной“ температуры согласно спектрам ТСД.

Целью данной работы является исследование влияния температурных режимов рентгеновского облучения на электрофизические параметры кремниевых МОП транзисторов для выбора оптимальных температурных режимов облучения, в пределах которых реализуется минимальное радиационное дефектообразование.

[¶] E-mail: bogdan_28@mail.ru

Исходными данными для постановки и решения данной задачи послужили результаты исследований влияния рентгеновского облучения на спектры ТСД структур Si–SiO₂ [9,10], а также тестовых транзисторов с длиной канала 10 мкм. Результаты таких исследований отображают интегральный спектр ловушек для носителей заряда и дают возможность проследить вероятные процессы миграции, заполнения и освобождения носителей заряда с ловушек под влиянием термополевых воздействий.

2. Методика экспериментальных исследований

Использовались кремниевые транзисторы с поликремниевым затвором и длиной каналов 2–10 мкм, шириной $W = 50$ мкм, толщиной окисла 0.16 мкм. Методика экспериментальных исследований спектров ТСД — согласно [9,11]. Поляризация транзисторных МОП структур с целью записи токов ТСД осуществлялась в вакуумном криостате путем приложения электрического поля в цепи исток–затвор при небольшом смещении 0.3–0.6 В в цепи исток–сток. Величина поля поляризации составляла 10^4 В/см. Спектры ТСД регистрировали путем линейной развертки температуры в диапазоне 293–450 К со скоростью 0.06–0.1 К/с и синхронной записью токов деполяризации автоматизированным измерительным комплексом на базе ПК.

Для контроля радиационно-индуцированных зарядовых изменений в структуре МОП транзистора использовались также кривые подпороговых токов стокозатворных характеристик $I_d(U_g)$ исходных и облученных транзисторов. Измерения проводились с помощью зондового автомата „Зонд-А5“ с использованием автоматизированного измерительного комплекса. Контролировались изменение порогового напряжения U_{th} , и плотность состояний D_{it} на межфазной границе Si–SiO₂.

Согласно [12], подпороговый ток в режиме насыщения может быть рассчитан, как функция поверхностного изгиба зон согласно уравнению

$$I_d = \sqrt{2} C_m (q N_A L_\beta / \beta) (n_i / N_A)^2 \exp(\beta \Phi_s)^{-1/2},$$

где Φ_s — поверхностный изгиб зон; N_A — уровень легирования канала; n_i — собственная концентрация носителей; L_β — длина Дебая, равная $L_\beta = (\epsilon_s / \beta q N_A)^{1/2}$; $\beta = q/kT$; $C_m = \mu W / 2L$.

Методика [12] позволяет разделить радиационно-индуцированный сдвиг порогового напряжения ΔU_{th} , на его составляющие ΔU_{Nit} — вклад заряда, локализованного на поверхностных ловушках границы Si–SiO₂; ΔU_{Not} — соответственно на объемно-встроенном заряде подзатворного диэлектрика SiO₂ в предположении, что общее изменение U_{th} , равно аддитивной сумме составляющих вкладов напряжений: $\Delta U_{th} = \Delta U_{Nit} + \Delta U_{Not}$.

Для оценки D_{it} использовались кривые подпороговых токов, полученные при разных температурах облучения

транзистора. Плотность состояний оценивали согласно методике [13] за формулой

$$D_{it} = \frac{1}{q} \left(C_{ox} \left[\frac{q}{kT} \frac{\partial \ln I_d}{\partial U_g} - 1 \right] - C_d \right),$$

где C_{ox} — емкость единицы площади подзатворного диэлектрика; C_d — емкость области пространственного заряда, которая определяется:

$$C_d = \sqrt{q \epsilon_s N_\beta / 2 (\Phi_s + kT/q)}.$$

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 1 приведены типичные спектры ТСД кремниевых транзистора исходного (1) и после рентгеновского облучения (2). В качестве источника облучения использовался аппарат РЕИС-И с медным антикатодом при напряжении 30 кВ и токе 10 мкА. Видно, что в исследуемом интервале температур наблюдаются два характерных максимума: в области 360 К и 430 К, аналогичные наблюдаемым в базовых структурах Si–SiO₂ [9,10]. Действие облучения сопровождается уменьшением ВТ-максимума и соответственным ростом НТ-максимума. Аналогичные закономерности наблюдались и в структурах Si–SiO₂ в широком диапазоне доз рентгеновского [9] и α -облучения [10]. Таким образом, наличие неэквивалентных температурных точек в спектре ТСД в предположении, что в транзисторной МОП структуре экспериментально регистрируемый ток $j(T)$ формируется в основном процессами в Si–SiO₂, явилось основанием для выбора особенных температурных точек облучения.

На рис. 2 приведены экспериментальные кривые подпороговых токов транзисторов, подвергнутых рентгеновскому облучению при различных температурах, согласно характерным температурным точкам рис. 1. Как

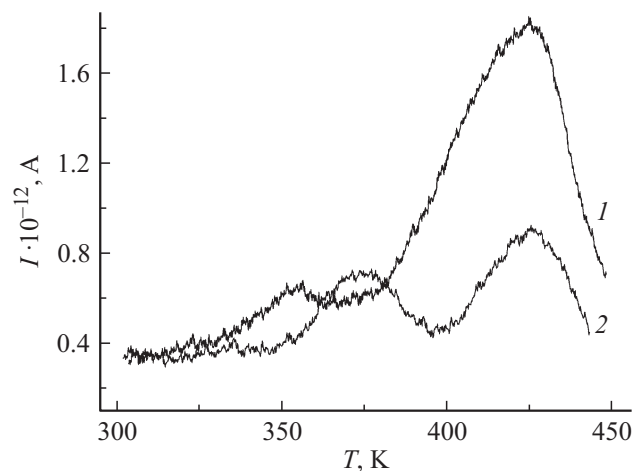


Рис. 1. Кривые токов термостимулированной деполяризации кремниевых МОП транзистора: 1 — исходный, 2 — после рентгеновского облучения 10 мин ($L = 10$ мкм, $W = 50$ мкм).

видно, облучение транзисторов при комнатной температуре приводит к сдвигу кривых подпороговых токов в сторону отрицательных смещений вследствие возрастания, согласно [12,14,15], положительного встроенного заряда в подзатворном диэлектрике SiO_2 , и аналогично действию γ - [12] и α -облучения [16]. Однако, как видно, знак и величина сдвига неэквивалентны для разных температур облучения, что свидетельствует о различной чувствительности радиационно-индуцированных процессов в исследуемых транзисторах к температуре облучения. В частности, повышение температуры облучения до 360 К приводит к небольшому сдвигу кривой $I_d(U_g)$ в сторону увеличения отрицательного смещения относительно аналогичной для 290 К, что свидетельствует об увеличении положительного радиационно-индуцированного заряда. Однако дальнейшее повышение температуры сопровождается противоположным смещением кривых $I_d(U_g)$ при облучении: в частности при температурах 380 и 430 К чувствительность к рентгеноиндуцируемому дефектообразованию уменьшается, причем минимальное ее значение достигается, как видим, в области ВТ-максимума (430 К) спектра ТСД транзистора (рис. 1).

Данный факт обусловлен немонотонной зависимостью изменения радиационно-индуцированной плотности состояний N_{ot} в объеме подзатворного диэлектрика SiO_2 , рассчитанной по сдвигу кривых подпорогового тока согласно [11], от температуры облучения (см. вставку на рис. 2). В частности, как видно, в исследованном интервале температур максимальное значение ΔN_{ot} в объеме SiO_2 индуцируется в области температур 360 К, а минимальное — 430 К. В силу этого факта следует ожидать и различной радиационной чувствительности основных параметров МОП транзисторов от температуры облучения, поскольку их значения, как известно, определяются величиной и пространственным распределением зарядов, локализованных на индуцированные состояния.

Радиационно-индуцированный сдвиг порогового напряжения, рассчитанный из кривых подпорогового тока по методике [12], демонстрирует сложную зависимость от времени облучения при различных температурах (рис. 3). Как видно, поведение кривых $\Delta U_{th}(t)$ при температурах облучения 290 и 380 К аналогично и характеризуется монотонным увеличением сдвига ΔU_{th} со временем облучения. В то же время облучение транзисторов при характерных температурах 360 и 430 К сопровождается многостадийностью поведения ΔU_{th} с ростом времени облучения: резким возрастанием сдвига порогового напряжения на протяжении первых 60 с облучения, его неизменность до 200 с, далее резким увеличением до времен 600 и 900 с (360 и 430 К) и последующим выходом на насыщение (кривые 2 и 4). Наличие описанных аналогичных стадий изменения $\Delta U_{th}(t)$ для температур облучения 360 и 430 К свидетельствует об общности механизмов рентгеноиндуцированного дефектообразования в области этих температур.

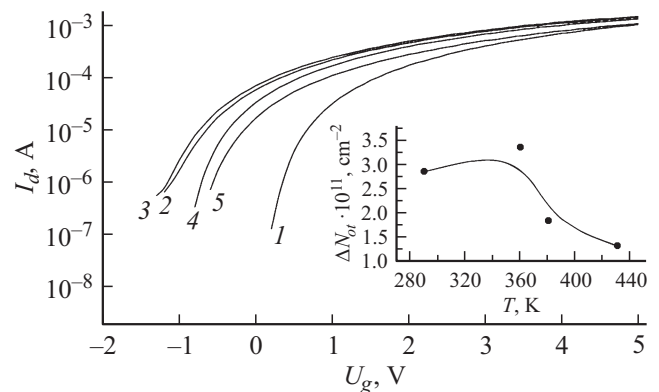


Рис. 2. Кривые подпороговых токов МОП транзисторов: 1 — исходный; после рентгеновского облучения при температурах, К: 2 — 290, 3 — 360, 4 — 380, 5 — 430 ($L = 10$ мкм, $W = 50$ мкм).

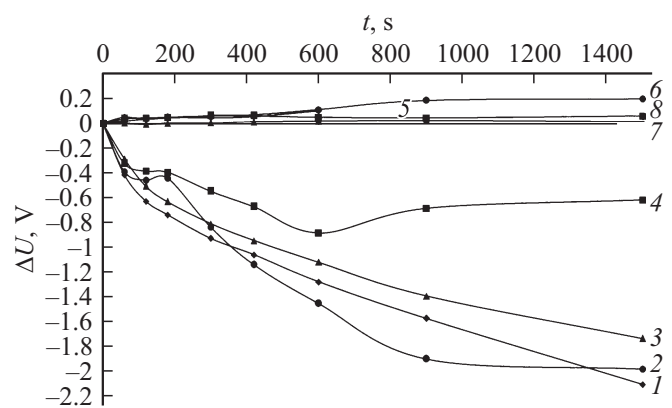


Рис. 3. Кинетика рентгеноиндуцированного сдвига порогового напряжения и его компонент (1–4 — U_{th} , 5–8 — U_{Nit}) в МОП транзисторах при температурах облучения, К: 1 — 290, 2 — 360, 3 — 380, 4 — 430 ($L = 10$ мкм, $W = 50$ мкм).

Наиболее значительным результатом описанных изменений ΔU_{th} является, как видно, снижение чувствительности порогового напряжения транзистора к действию рентгеновского облучения при температурах облучения выше 360 К. В частности, индуцированное уменьшение этого параметра достигает максимального значения при температуре радиационной обработки 430 К (область ВТ-максимума ТСД-спектра), достигая почти 3 раз по сравнению с облучением при комнатной температуре.

Приведенные результаты по селективному влиянию температуры облучения на пороговое напряжение хорошо коррелируют с аналогичными исследованиями влияния облучения на плотность состояний D_{it} на межфазной границе (МФГ) Si-SiO_2 МОП транзисторов.

На рис. 4 приведены зависимости плотности состояний D_{it} от времени облучения при характерных температурах. Примечательно, что в кинетике облучения $D_{it}(t)$ повторяются закономерности, наблюдаемые в зависимостях $U_{th}(t)$. В частности, наличие „зуба“ после первых 60 с облучения, небольшое снижение плотности

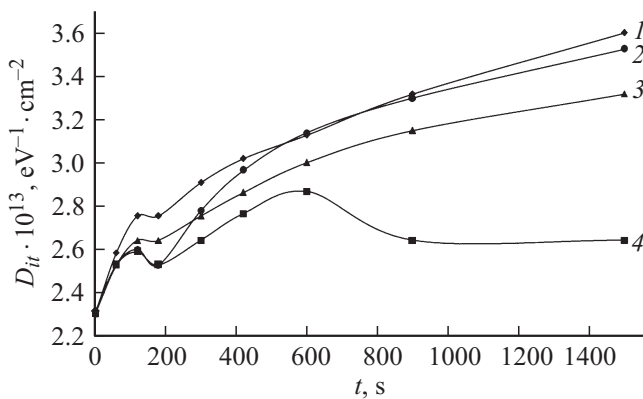


Рис. 4. Кинетика рентгено-индуцированного изменения плотности состояний МОП транзисторов при температурах облучения, К: 1 — 290, 2 — 360, 3 — 380, 4 — 430 ($L = 10$ мкм, $W = 50$ мкм).

состояний, а затем резкое ее увеличение. Однако характер поведения $D_{it}(t)$ для температур облучения 380 и 430 К несколько различный, что отображает особенности зарядовых изменений именно межфазной границы Si-SiO₂ в процессе облучения. В частности, $D_{it}(t)$ при температуре 380 К в исследованном временном интервале не выявляет насыщения, в то же время облучение при 430 К сопровождается насыщением D_{it} после 900 с действия радиации. Обращает на себя внимание сходный характер кинетики изменения D_{it} с облучением при температурах 290 и 380 К. Общим, как и в предыдущем случае, является факт снижения радиационной чувствительности плотности состояний при температурах 380 и 430 К. Некоторые различия в кинетике поведения параметров U_{th} и D_{it} обусловлены тем, что U_{th} является интегральным параметром, изменения которого обусловлены сложными взаимосвязанными процессами в подзатворном диэлектрике SiO₂ и на межфазной границе Si-SiO₂. В то же время изменения D_{it} в большей мере отображают радиационно-индуцированные изменения зарядового состояния МФГ.

Описанные выше особенности радиационного воздействия на кремниевые МОП транзисторы могут быть интерпретированы, исходя прежде всего из представлений о природе МФГ Si-SiO₂, распределения электрически активных ионов в структуре, а также механизмов формирования радиационно-индуцированных дефектов.

Наиболее приемлемой в настоящее время является модель строения МФГ Si-SiO₂, согласно которой такой границе свойственны дефектно-примесные комплексы, характеризующиеся наличием оборванных связей и владеющие амфотерными свойствами [17,18]. Характерным является также наличие молекул координатно-связанной воды (H₂O)_k [9] и водорода [18–20]. Из собственных структурных дефектов экспериментально идентифицированы центры: P_b , P_{b0} и P_{b1} [21–23]. На МФГ Si-SiO₂ в приграничном слое SiO₂ существует положительный заряд неподвижных ионов Si³⁺, а также локализованный

заряд щелочных ионов Na⁺, K⁺ и H⁺. Обнаружено наличие различных водородосодержащих комплексов как на МФГ, так и в объеме SiO₂ с участием ионов H⁺, атомарного и молекулярного водорода [14,17,18,24]. Атомарный водород создает ловушки на границе раздела (медленные состояния), а также в объеме SiO₂, причем эти дефекты имеют близкие свойства с нарушениями, созданными радиацией или инжектируемыми носителями заряда [18]. Проблема идентификации новых водородных формирований с участием H⁺, генерируемых под воздействием внешних факторов, состоит не столько в их низкой энергии активации (~0.1 эВ), сколько в многообразии структурных связей, которые он может образовывать. Ионы щелочных металлов, по предположению, являются источником положительного заряда в окисле, причем их максимальная концентрация сосредоточена на границах металл-оксид и кремний-оксид [3–6,25]. Установлено, что в отличие от объема SiO₂, где ионы Na⁺, K⁺, Li⁺ создают высокий относительно дна зоны донорный уровень, локализованные возле границы раздела ионы модифицируют спектр поверхностных состояний в интервале энергий запрещенной зоны Si [26].

На рис. 5, а приведена модель классификации зарядов в исходной структуре Si-SiO₂, используемая для интерпретации приведенных экспериментальных результатов и отображающая вышеописанные особенности распределения зарядов.

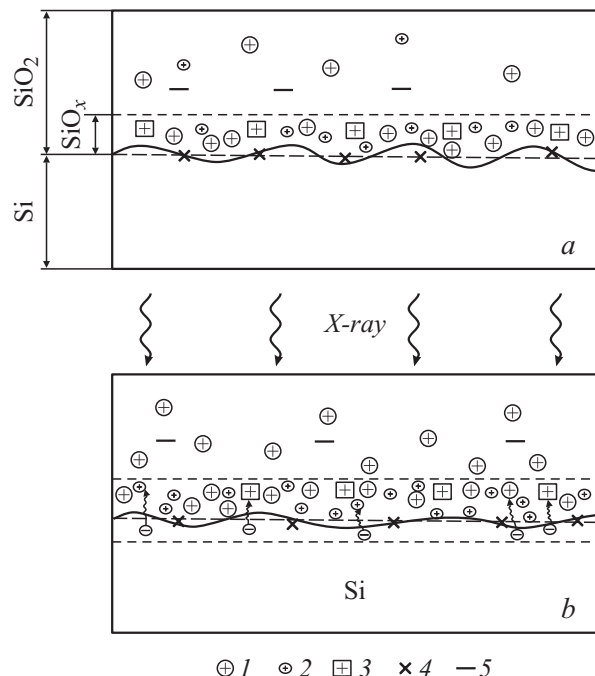


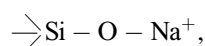
Рис. 5. Модель распределения зарядов в исходной структуре Si-SiO₂ (а) и после рентгеновского облучения (б). Обозначения зарядов: 1 — подвижный заряд ионов Na⁺, K⁺; 2 — подвижный заряд H⁺ на структурных не совершенствах; 3 — положительный (фиксированный) заряд в окисле SiO₂; 4 — локализованный заряд на поверхностных ловушках границы; 5 — отрицательный заряд, захваченный в окисле.

С позиции представленной модели и с учетом природы заряженных центров действие облучения на структуру Si-SiO₂ сводится к изменению их зарядового состояния, структурной перестройки дефектно-примесных комплексов на МФГ, а также перелокализации мобильных носителей заряда в энергетически более выгодные состояния.

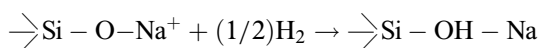
Принято считать, что наблюдаемый ВТ-максимум в спектрах ТСД (рис. 1) идентифицируется с ловушками носителей заряда, локализованными на МФГ Si-SiO₂, а НТ-максимум соответственно в объеме диэлектрика SiO₂ [4,11].

Поэтому объяснение изложенных экспериментальных результатов влияния облучения на параметры МОП-транзисторов в этом контексте следует интерпретировать исходя из представлений о существовании на границе раздела Si-SiO₂ классических ионных ловушек, для которых заполнение ионов не изменяет электронную подсистему полупроводника, а также с учетом объемного транспорта ионов сквозь диэлектрический слой. Механизмы такого транспорта проанализированы в [4].

Из сравнения максимумов ТСД (рис. 1) облученного и необлученного транзисторов следует, что облучение сопровождается уменьшением величины ВТ-максимума и синхронным увеличением НТ-максимума. Данный факт свидетельствует о том, что при облучении в области ВТ-максимума облучение стимулирует освобождение носителей заряда из высокоэнергетических (ВЭ) ловушек и их перелокализацию в область низкоэнергетических (НЭ). В частности, основные процессы будут доминировать прежде всего в пределах МФГ Si-SiO₂ и переходного слоя. Такими носителями могут быть ионы Li⁺, Na⁺, K⁺, а также H⁺, освобожденные облучением (рис. 5, b). Одним из многих вариантов такого процесса является освобождение ионов Na⁺ со связанных комплексов типа



которые мигрируют в область НЭ-ловушек. Кроме того, в области ВТ-максимумов вероятна реакция замещения Na \rightarrow H с участием молекулярного водорода:



и выделением межзельного Na, который легко ионизируется, поскольку его уровень лежит от дна зоны проводимости SiO₂ на расстоянии 1.7 эВ [3].

Вероятным механизмом, ответственным за процессы при облучении в области ВТ-максимума являются эффекты нейтрализации ионов и ионных ловушек на границе Si-SiO₂, которые характерны для этих структур [25]. Особенностью таких ловушек является наличие в них дальнедействующего кулоновского и (или) дипольного потенциалов, что приводит к полевой зависимости темпа эмиссии захваченных на них частиц $\propto \exp(\alpha\epsilon\gamma/kT)$, где ϵ - внешнее поле, $1/2 < \gamma < 2/3$. В [26] показано, что эффективными ловушками для положительных мобиль-

ных ионов могут быть неоднородности границы раздела типа дипольных (заряженных) „пятен“. Нейтрализация положительных ионов щелочных металлов может также осуществляться электронами, туннелирующими из подложки Si в процессе облучения [15,25]. В переходном слое Si-SiO₂ ловушками для электронов могут выступать также ионы Si³⁺ и комплексы Si-OH, Si-H.

Вопрос об источнике протонов в настоящее время является дискуссионным. Однако принято считать, что таковыми являются координатно-связанные молекулы воды (H₂O)_k, локализованные на МФГ [24], а также водородосодержащие комплексы Si-OH, Si-H [14,15]. Не исключается также прямое освобождение с пассивируемых связей МФГ, а также структурной сетки SiO₂ под действием облучения или термических флуктуаций. В электрическом поле генерация протонов может происходить также по механизму полевого освобождения с последующим взаимодействием протонов со связями Si-O. Это сопровождается генерацией электрическиактивных центров согласно реакциям (1) [27].

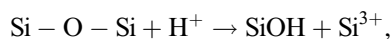
Таким образом, при радиационном воздействии на МОП транзисторы в данном температурном режиме основные процессы трансформации зарядов происходят на МФГ Si-SiO₂, результат которых и формирует поведение D_{it} , U_{th} с облучением. Исходя из выше изложенных механизмов радиационно-индуцированных процессов, результирующие значения параметров транзисторов будут определяться двумя альтернативными процессами: 1) увеличением положительного заряда путем внедрения ионов Na⁺, K⁺ в подзатворном диэлектрике SiO₂ по вышеописанным механизмам и положительного встроенного заряда с участием освобожденных протонов и генерируемых дырок h^+ [14,15,18,28]; 2) туннелированием электронов из подложки Si, освобожденных облучением, и последующая нейтрализация с их участием трехвалентных ионов Si³⁺ и Na⁺, K⁺ (рис. 5, b). К аргументам в пользу действия этого механизма следует отнести также процессы освобождения и миграции ионов H⁺ в объем SiO₂ с последующей пассивацией ими электрическиактивных центров, ответственных за радиационно-индуцированный сдвиг кривых подпороговых токов.

Очевидно, что при температуре облучения 430 К процессы нейтрализации электрическиактивных центров происходят более интенсивно, по сравнению с другими температурами облучения, чем в конечном итоге и объясняется снижение радиационной чувствительности исследованных МОП-транзисторов по параметрам D_{it} и U_{th} .

Действие облучения в температурном диапазоне НТ-максимума сопровождается также снижением радиационного влияния на МОП транзисторы (рис. 3 и 4), однако по абсолютной величине эффект изменения параметров D_{it} и U_{th} значительно меньше, чем при облучении в области 430 К. Радиационно-индуцированный сдвиг кривых подпорогового тока (рис. 2) свидетельствует также о введении в подзатворный диэлектрик SiO₂ в процессе облучения положительного заряда.

Такое поведение указанных параметров при облучении может найти объяснение лишь исходя из природы ловушек, свойственных НТ-максимуму, а также особенностей радиационно-индуцированных процессов. Следует отметить, что в настоящее время отсутствует однозначная информация о природе ловушек для носителей, обуславливающих НТ-максимум в спектрах ТСД. Однако по установившимся мнениям наличие обсуждаемого максимума связывается с различными водородными комплексами, а также дефектами структурного происхождения сетки SiO₂ с участием протонов [3,4,11,18].

Поэтому облучение в области 360 К будет сопровождаться двумя альтернативными процессами: 1) депассивацией связей типа P_bH, P_{b0}H, P_{b1}H структурной сетки SiO₂ и разрушением водородосодержащих комплексов; 2) образованием в переходном слое и в объеме SiO₂ положительных центров с участием ионов H⁺, согласно реакции [14,18]



а также диффузией водорода, генерируемого в процессе радиолитического распада, в объеме SiO₂ и осуществление обратного (к п. 1) процесса — пассивации структурных нарушений в объеме SiO₂. Оценки показывают, что время такой диффузии на характерную глубину повышенной концентрации положительного заряда 3 нм составляет приблизительно 0,05 с, что является реальной величиной. Встроенный положительный заряд может быть генерирован также E'-центром, который представляет собой дефект O₃-Si. вблизи границы раздела Si-SiO₂ [28]. Вероятным механизмом генерации радиационно-индуцированного заряда является разрыв под действием облучения слабых связей в водородосодержащих комплексах Si-H, Si-OH [29–32].

Предложенные механизмы наблюдаемых особенностей поведения параметров D_{it}, U_{th} кремниевых МОП транзисторов вследствие облучения являются в некоторой мере приближенными в силу отсутствия в настоящее время однозначной модели МФГ Si-SiO₂, а также конкретных сведений о природе объемных (в SiO₂) ловушек. Изучение закономерностей поведения зарядов при радиационных воздействиях открывает перспективы создания радиационно-стойких кремниевых МОП структур, а также новых типов элионных приборов на их основе.

4. Заключение

На основе приведенных результатов показана возможность планомерного изменения радиационной чувствительности кремниевых МОП транзисторов в интервале 290–450 К. Используется изменение зарядового состояния дефектно-примесной системы структуры Si-SiO₂ под действием рентгеновского облучения при „резонансных“ температурах, которые определяются спектрами

ТСД. Показано, что при облучении транзистора в области температур VT-максимума согласно спектру ТСД (430 К), исследуемые кремниевые МОП транзисторы по параметрам D_{it} и U_{th} демонстрируют наивысшую радиационную стойкость по сравнению с аналогичными транзисторами, облученными в исследованном интервале температур.

Полученные результаты могут быть объяснены с позиций модели делокализации электрически активных мобильных ионов Na⁺, K⁺, Li⁺ и H⁺ из высокоэнергетических ловушек (при облучении в области высокотемпературного максимума согласно спектру ТСД) с их последующей локализацией в низкоэнергетических ловушки, а также частичной нейтрализацией электрически активных комплексов на межфазной границе Si-SiO₂ электронами, туннелирующими из подложки. При облучении в области низкотемпературного максимума предполагается водородная депассивация центров в объеме подзатворного диэлектрика SiO₂.

Список литературы

- [1] И.В. Васильева, Г.А. Ефремов, В.В. Козловский, В.Н. Ломасов, В.С. Иванов. *Радиационные процессы в технологиях материалов и изделий электронной техники* (М., Энергоатомиздат, 1997).
- [2] В.С. Вавилов, Б.М. Горин, Н.С. Данилин, А.Е. Кив, Н.Л. Куров, В.И. Шаховцов. *Радиационные методы в твердотельной электронике* (М., Радио и связь, 1990).
- [3] В.Н. Вертопрахов, Б.М. Кучумов, В.Г. Сальман. *Строение и свойства структур Si-SiO₂* (Новосибирск, Наука, 1981).
- [4] В.Н. Вертопрахов, В.Г. Сальман. *Термостимулированные токи в неорганических веществах* (Новосибирск, Наука, 1981).
- [5] А.П. Барабан, В.В. Балавинов, П.П. Коноров. *Электроника слоев SiO₂ на кремнии* (Л. ЛГУ, 1988).
- [6] В.М. Гонгарь, М.Г. Султанов. *Электрон. техн.*, 5, 48 (1991).
- [7] H. Ohyama, K. Hayama, K. Takakura, T. Jono, C. Simoen, C. Claeys. *Microelectron. Engin.*, 66, 530 (2003).
- [8] Ю.В. Баринов, В.Н. Безбородов, В.В. Емельянов, В.С. Першенков. *ФТП*, 29, 323 (1995).
- [9] Б.П. Коман. *Фізика і хімія твердого тіла*, 13, 1281 (2012).
- [10] В.Р. Коман, О.В. Galchynskyu, R.O. Kovalyuk. *NIM B*, 116, 389 (1996).
- [11] Ю.А. Гороховатский, Г.А. Бордовский. *Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков* (М., Наука, 1991).
- [12] F.G. McWhorter, P.S. Winokur. *Appl. Phys. Lett.*, 48, 133 (1986).
- [13] M. Gaitan, T.J. Russell. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 31, 1256 (1984).
- [14] В.С. Першенков, В.Д. Попов, А.В. Шальнов. *Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем* (М., Энергоатомиздат, 1988).
- [15] Б.П. Коман. *Укр. фіз. журн.*, 45, 1440 (2000).
- [16] Б.П. Коман. *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*, 39, 88 (2012).

- [17] В.С. Вавилов, В.Ф. Киселев, Б.Н. Мукашев. *Дефекты в кремнии и на его поверхности* (М., Наука, 2010).
- [18] Е.Ф. Венгер, В.Е. Примаченко, С.И. Кирилова, В.А. Чернобай. *Оптоэлектрон. и полупроводн. техн.*, **38**, 134 (2003).
- [19] D. Vuillaume. *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 3118 (1991).
- [20] D. Vuillaume. *J. Appl. Phys.*, **70**, 6902 (1991).
- [21] N.M. Johnson, D.K. Biegelsen, M.D. Moyer. *Appl. Phys. Lett.*, **43**, 563 (1983).
- [22] E.N. Poindexter. *Semicond. Sci. Technol.*, **4**, 961, (1989).
- [23] G.J. Gerardi, E.N. Poindexter, P.J. Caplan, N.M. Johnson. *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 348 (1986).
- [24] В.Г. Литовченко, А.П. Горбань. *Основы физики микроэлектронных систем металл-диэлектрик-полупроводник* (Киев, Наук. думка, 1978).
- [25] Е.И. Гольдман, А.Г. Ждан, Н.Ф. Кухарская. *ФТП*, **33**, 306 (1999).
- [26] С.Г. Дмитриев, Ю.В. Маркин. *ФТП*, **30**, 1231 (1996).
- [27] И.П. Лисовский, В.Г. Литовченко, Г.Ф. Романова. *Укр. физ. журн.*, **38**, 1532 (1993).
- [28] В.А. Гриценко, Ю.Н. Новиков, А.В. Шапошников, Ю.Н. Мороков. *ФТП*, **35**, 1041 (2001).
- [29] C.T. Sah. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-23**, 1563 (1976).
- [30] C.T. Sah, J.Y. Sun, J.J. Tzou. *J. Appl. Phys.* **54**, 2547 (1983).
- [31] A.G. Revesz. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-24**, 2102 (1977).
- [32] А.Б. Симаков, А.Ю. Башин. *Микроэлектроника*, **36**, 62 (2007).

Редактор Т.А. Полянская

Temperature selectivity effects of radiation on MOS silicon transistors

B.P. Koman

Lviv National Ivan Franko University,
Department of Electronics,
79005 Lviv, Ukraine

Abstract Using the technique of subthreshold current curves in the temperature range (290–450 K) the effect of temperature modes X-rays on the kinetics of parameters (U_{th} and D_{it}) MOS silicon transistors with channel length 2–10 μm is investigated. It is established that the investigated parameters at irradiation temperatures above 360 K decrease radiation sensitivity of transistors, reaching its peak at the 430 K (corresponding HT-maximum in the TSD-transistor). The results are interpreted from the perspective of the model, that there are two types of traps for carriers and redistribution under irradiation electroactive ions Na^+ , K^+ , Li^+ and H^+ and also the effect of partial neutralization of charges at the interface.