

Анализ электрофизических характеристик бистабильных МДП-структур с фторидами самария и церия

М.Б. Шалимова, Н.В. Сачук

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
443086, Россия, г. Самара,
Московское шоссе, 34

Аннотация – Бистабильные МДП-структуры перспективны для использования их в устройствах постоянной памяти и являются удобным объектом для изучения деградиционных явлений при воздействии различных внешних факторов. В настоящей работе изучалась деградиация вольт-амперных и вольт-емкостных характеристик бистабильных германиевых и кремниевых МДП-структур с фторидом самария и церия при воздействии высоких электрических полей и повышенных температур. Установлено, что эмпирическая зависимость плотности тока от напряжения в высокоомном состоянии описывается степенной зависимостью с показателем степени 0,9–1,5. Этот показатель увеличивается как с ростом числа циклов электроформовки, так и с ростом температуры. На германиевых подложках n-типа при комнатной температуре наблюдался положительный заряд для всех исследованных структур. На кремниевых подложках n- и р-типа заряд может быть как положительный, так и отрицательный. Отдельное воздействие температуры приводит к увеличению положительного заряда с ростом числа циклов, как для германиевых, так и для кремниевых структур. Отдельное воздействие высокого электрического поля на МДП-структуры с подложкой n-типа приводит также к увеличению положительного заряда. Однако комплексное воздействие высокого электрического поля и температуры показывает тенденцию роста отрицательного заряда в исследованных МДП-структурах.

Ключевые слова – МДП-структура, фториды РЗЭ, деградиация диэлектрика, бистабильные структуры.

Введение

Надежность устройств на основе структур металл – диэлектрик полупроводник (МДП) сильно зависит от тока через структуры. Таким образом, анализ и точная оценка механизмов проводимости в устройствах МДП очень важна, особенно когда происходит замена достаточно изученных тонких (< 2 нм) изоляторов, таких как SiO_2 и Si_3N_4 , физически более толстыми слоями с высокой диэлектрической проницаемостью (κ), что может решить проблему потенциального тока утечки. Диэлектрические материалы high- κ являются привлекательными с учетом продолжающейся миниатюризации полевых МДП-транзисторов, конденсаторов металл – диэлектрик – металл (МДМ) в ячейках динамической памяти с произвольным доступом.

Однако известно такое явление, как резистивное переключение (RS) [1; 2], т. е. способность некоторых диэлектрических материалов к переключению между двумя состояниями проводимости, а именно, низкоомным состоянием и состоянием с высоким сопротивлением. Устройства, основанные на явлении RS, в последнее время приобрели большое значение для энергонезависимых систем хранения, так как в полученных устройствах сочетается быстроедействие и огромный потенциал масштабирования.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) являются наиболее распространенным способом наблюдения при проявлении RS-феномена устройств, поэтому детальное изучение зависимости $I(U)$ каждого стабильного состояния будет способствовать определению микроскопического происхождения изменения сопротивления. Таким образом, их свойства могут быть улучшены путем оптимизации особого выбора материалов для границы раздела металл/диэлектрик или полупроводник/диэлектрик.

В настоящей работе изучалась деградиация вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик германиевых и кремниевых МДП-структур с фторидом самария и церия. В таких устройствах наблюдается бистабильное переключение, или RS-явление [3].

1. Экспериментальные образцы

Для экспериментальных образцов в качестве подложек использовались монокристаллические пластины германия n-типа ориентации (111) с удельным сопротивлением 2 Ом·см и кремния n- и р-типа проводимости с удельным сопротивлением 5 Ом·см ориентации (111) и 4,5 Ом·см ориентации (100) соответственно. Пленки фторида самария и фторида церия получались методом термического распыления в вакууме порошкообраз-

ного SmF_3 или CeF_3 на подогретые до ~ 300 °С подложки германия и кремния. Толщина слоя фторида редкоземельного элемента (РЗЭ), наносимого на полупроводниковую подложку, варьировалась от $d = 0,1$ мкм до $0,4$ мкм. Оптимальными для изучения процессов деградации в МДП-структуре методом электроформовки являются толщины $0,2$ – $0,3$ мкм. Впоследствии на фторид РЗЭ наносились алюминиевые контакты диаметром $0,5$ – $0,7$ мм.

Бистабильные МДП-структуры интересны не только с точки зрения перспектив использования их в устройствах постоянной памяти, но и в качестве удобного объекта для изучения деградиционных явлений при воздействии различных внешних факторов. Воздействуя на них высокими электрическими полями, повышенными температурами, можно приводить их к переключению в низкоомное состояние, которое по существу является пробоем. Из этого постпробойного состояния можно возвращать структуру обратно в высокоомное состояние и проводить сравнительный анализ изменения параметров структур относительно исходного высокоомного состояния. Таким образом, можно исследовать основные причины и закономерности изменения свойств МДП-структур при различных режимах работы.

Исследовалась деградация электрофизических свойств германиевых и кремниевых МДП-структур с пленками SmF_3 и CeF_3 при электрической перегрузке (электроформовке), в процессе которой на структуры действовали электрические поля порядка 10^8 В/м. В процессе многократных циклов электроформовки происходит изменение свойств МДП-структур. На начальном этапе для устройств с подложкой р-типа требовался положительный процесс электроформовки (плюс на затворе) для достижения состояния переключения в первый раз. Для устройств с подложкой п-типа требовался отрицательный процесс. После формирующего процесса все устройства представляли похожее биполярное RS-поведение. При этом переход в низкоомное состояние происходил при положительном напряжении, а сброс в высокоомное состояние – при отрицательном напряжении для устройств с подложкой р-типа. Для устройств с подложкой п-типа полярность процессов была противоположной.

Многочисленные исследования показывают, что низкоомное состояние сначала развивается в форме шнура тока, при этом при переключении с памятью происходит фазовый переход в обла-

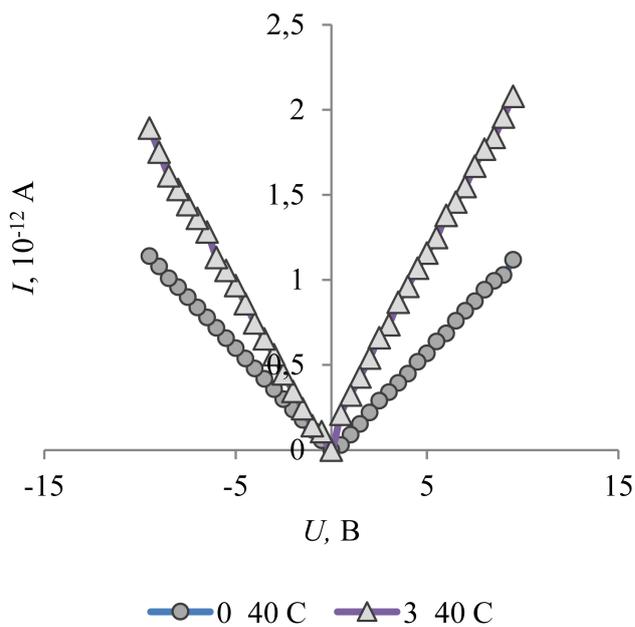


Рис. 1. ВАХ структуры $\text{Al}/\text{SmF}_3/\text{nGe}$ в исходном состоянии и после ряда циклов электроформовки, проведенных при температуре 40 °С. Номер цикла указан

Fig. 1. Current-voltage curve characteristics of the $\text{Al}/\text{SmF}_3/\text{nGe}$ structure in the initial state and after a series of electroforming cycles carried out at a temperature of 40 °С. Cycle number indicated

сти шнура, и в матрице диэлектрика формируется канал (или несколько) с повышенной проводимостью. Исследованные нами МДМ-структуры с фторидами РЗЭ в низкоомном состоянии имели положительный температурный коэффициент сопротивления в широкой области температур 77 – 400 К, а его величина для различных образцов лежала в интервале $(0$ – $4,6) \times 10^{-3}$ 1/град. ВАХ МДМ-структур в низкоомном состоянии линейны и симметричны, а их сопротивление составляет $(3 \cdot 10^{-2} - 10)$ Ом. Это дает основание предположить, что проводящий канал в основном состоит из металлической фазы.

2. Вольт-амперные характеристики

На рис. 1 представлена вольт-амперная характеристика (ВАХ) структуры $\text{Al}/\text{SmF}_3/\text{nGe}$ в исходном состоянии и после ряда циклов электроформовки, проведенных при температуре 40 °С. После нескольких циклов возрастает ток и уменьшается сопротивление, на что указывает изменение наклона I - U кривой. Аналогичное поведение ВАХ наблюдалось при комнатной и повышенной температуре для всех исследованных структур.

На рис. 2 показаны характеристики структуры $\text{Al}/\text{SmF}_3/\text{pSi}$, которые представляют изменение тока МДП-структуры при последовательных циклах электроформовки при различных температу-

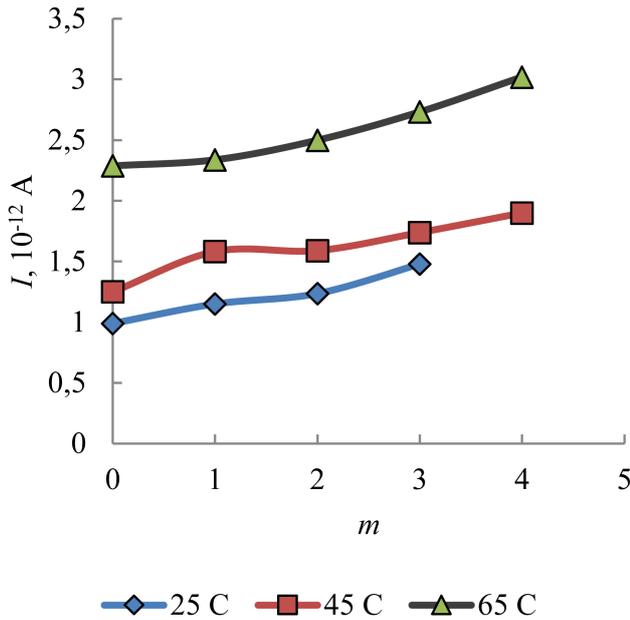


Рис. 2. Изменение тока структуры Al/SmF₃/pSi при последовательных циклах электроформовки при различных температурах (при напряжении 9 В). Номер цикла указан на горизонтальной оси

Fig. 2. Change in the current of the Al/SmF₃/pSi structure during successive cycles of electroforming at various temperatures (at a voltage of 9 V). The cycle number is indicated on the horizontal axis

рах. Здесь m – номер цикла. Из графиков видно, что при последовательном росте числа циклов растет ток через диэлектрик, который измерялся при напряжении 9 В. Возрастание тока в высокоомном состоянии с ростом числа циклов переключения может быть следствием уменьшения количества проводящих каналов, которые разрываются в процессе перехода в высокоомное состояние, или следствием увеличения диаметра оставшихся про-

водящих каналов, т. к. после многократной электроформовки область диэлектрика вокруг проводящих каналов существенно нарушена.

При переключении из высокоомного в проводящее состояние в исходно однородной пленке толщиной d_0 создается локальная неомогенная область – канал (каналы) проводимости. При обратном переключении в высокоомное состояние не происходит полной гомогенизации пленки, на месте канала проводимости остаются локальные высокопроводящие включения либо остается канал проводимости определенной длины d_1 . Поэтому участки прохождения тока между электродами будут представлять собой набор проводящих путей, разделенных областями диэлектрика.

Обращает внимание, что температура не оказывает существенного влияния на динамику роста тока при увеличении числа циклов, т. к. наклон кривых практически не изменяется при разных температурах.

Понимание того, зависит состояние сопротивления от микроскопических свойств электрода или объема, является важной задачей для разработки функциональных возможностей таких устройств. В случае устройств с ограничением электродами работа выхода металла, сродство носителей и толщина диэлектрика определяют высоту барьера и вероятность протекания электрического тока, индуцированного электрическим полем через переход. В этом случае механизм проводимости можно описать как Шоттки, Фаулера – Нордгейма или прямой туннельной эмиссией. В случае ограничения границы раздела объемом механизм проводимости определяется электрическими свойствами

Таблица. Примеры некоторых основных процессов проводимости через МДП-структуру и их зависимость $I(U)$. Здесь q – заряд электрона; ϕ_B – высота барьера; ϕ_T – уровень энергии ловушки; $a = \sqrt{q/4\pi\epsilon'd}$, где ϵ' – действительная часть диэлектрической проницаемости изолятора и d – толщина диэлектрика. b , A_{FN} , A_{Sch} , A_{PF} – константы

Table. Examples of some basic processes of conduction through the MIS structure and their dependence $I(U)$.

Here q is the electron charge; ϕ_B is the height of the barrier; ϕ_T is the energy level of the trap; $a = \sqrt{q/4\pi\epsilon'd}$, where ϵ' is the real part of the dielectric constant of the insulator and d is the thickness of the dielectric. b , A_{FN} , A_{Sch} , A_{PF} – constants

Механизм проводимости	Зависимость $I(U)$
Фаулера – Нордгейма	$I = A_{FN} U^2 \exp\left(\frac{-b}{U}\right)$
Шоттки	$I = A_{Sch} T^2 \exp\left[\frac{q}{k_b T} (a\sqrt{U} - \phi_B)\right]$
Пула – Френкеля	$I = A_{PF} U \exp\left[\frac{q}{k_b T} (2a\sqrt{U} - \phi_T)\right]$
Проводимость, ограниченная пространственным зарядом	$I = A_{SCLC} U^2$

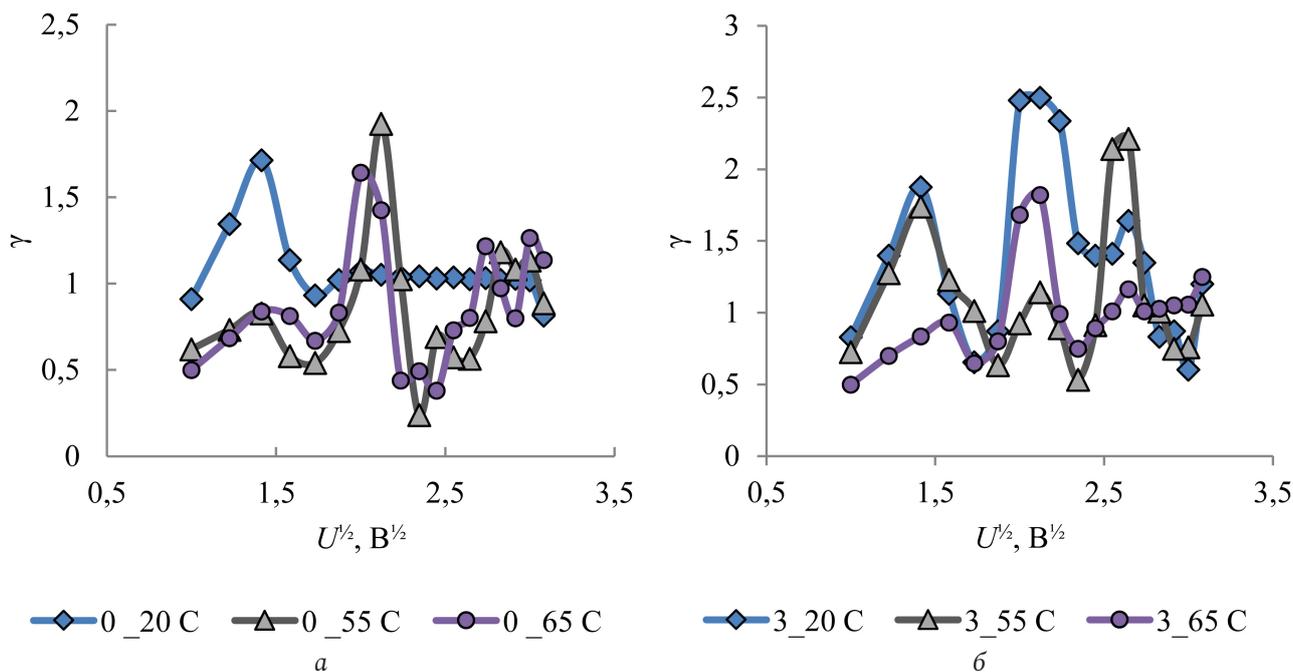


Рис. 3. Зависимость γ от \sqrt{U} для прямой ветви тока структуры $\text{Al}/\text{SmF}_3/\text{nGe}$, измеренная при различных температурах: *а* – в исходном высокоомном состоянии; *б* – в высокоомном состоянии после третьего цикла электроформовки
Fig. 3. The dependence of γ on \sqrt{U} for the direct current branch of the $\text{Al}/\text{SmF}_3/\text{nGe}$, structure, measured at various temperatures: *a* – in the initial high-resistance state; *b* – in a high-resistance state after the third cycle of electroforming

диэлектрика рядом с границей раздела, например, такими, которые связаны с существованием ловушек и их энергетических уровней. Два примера транспортных механизмов, подверженных влиянию энергетического распределения и плотности ловушек – это эмиссия Пула – Френкеля и проводимость, ограниченная пространственным зарядом. Зависимости $I(U)$ основных процессов проводимости через МДП-структуру представлены в таблице.

Основной механизм проводимости устройства можно определить, если построить в зависимости от корня квадратного из напряжения (\sqrt{U}) параметр степенного показателя γ , определяемого как $\gamma = d\ln(I)/d\ln(U)$ [4]. Это связано с тем, что типичные механизмы проводимости имеют простую зависимость γ от \sqrt{U} : чисто омическая, Лэнгмюра – Чайлда или проводимость, ограниченная пространственным зарядом, будет показывать константу γ ($= 1; 1,5$ или 2 соответственно). Поведение Шоттки или Пула – Френкеля представляется прямой линией, только отличающейся пересечением с осью (0 для Шоттки, 1 для Пула – Френкеля). В случае проводимости Фаулера – Нордгейма должна быть получена прямая линия с положительным наклоном, если γ изображается как функция $1/U$.

Построенная таким образом зависимость γ от \sqrt{U} представлена на рис. 3, *а* для прямой ветви

тока структуры $\text{Al}/\text{SmF}_3/\text{nGe}$, измеренной в исходном состоянии при различных температурах. Можно отметить, что при температуре 20°C в исследуемом диапазоне напряжений наблюдается омическая проводимость, за исключением начального участка напряжения, где фиксируется наличие нелинейного участка. При повышенных температурах нелинейность на начальном участке уменьшается, но возникают новые участки нелинейности (например, при $\sqrt{U} \sim 2\sqrt{V}$).

После третьего цикла электроформовки исследуемые зависимости γ от \sqrt{U} также не представляют возможности выявить какой-либо определенный механизм проводимости (рис. 3, *б*). Аналогичные зависимости степенного показателя наблюдались для всех исследованных структур.

Таким образом, комбинация механизмов проводимости, по-видимому, является общей чертой границ раздела биполярных структур. Межфазная зона, состоящая из смеси проводящих и изолирующих областей, вероятно, связана с неупорядоченными фазами. Также процесс разрыва/восстановления проводящих каналов (канала) является достаточно случайным. В данном случае работа устройств, очевидно, не ограничена электродами, т. к. в основном наблюдаются симметричные ВАХ. Следовательно, механизмы Шоттки, Фаулера – Нордгейма или прямая туннельная эмиссия мало-

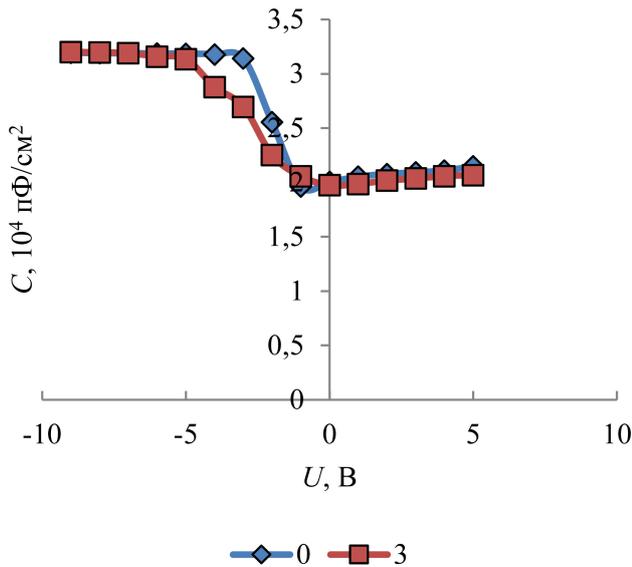


Рис. 4. Изменение вольт-емкостных характеристик структуры Al/SmF₃/pSi в исходном состоянии (0) и после нескольких циклов электроформовки, измеренные при температуре 65 °С
Fig. 4. Changes in the capacitance-voltage characteristics of the Al/SmF₃/pSi structure in the initial state (0) and after several electroforming cycles, measured at a temperature of 65 °C

вероятны. Также можно исключить проводимость, связанную с механизмом Пула – Френкеля, т. к. в этом случае должно выполняться условие $\gamma > 2,5$ [4]. Следовательно, основными механизмами проводимости в исследованных структурах являются проводимость, ограниченная пространственным зарядом, и омическая проводимость. Непостоянство значения γ показывает, что ВАХ исследованных структур описывается комбинацией двух вышеуказанных механизмов проводимости.

Соответствующая эмпирическая зависимость плотности тока j от напряжения U в исследованных МДП-структурах с фторидами РЗЭ описывается формулой

$$j = GU^\gamma, \quad (1)$$

где G – некоторая постоянная, определяемая свойствами диэлектрика; γ – усредненный показатель степени. Экспериментальные данные показывают, что значения γ увеличиваются как с ростом числа циклов электроформовки, так и с ростом температуры и составляют 0,9–1,5.

Повышение температуры должно уменьшать неомогенность пленки, однако эта температура должна быть более высокой, чем в рассматриваемом эксперименте. Обнаружено, что переход структуры из низкоомного в высокоомное состояние может быть произведен термическим способом как при приложении напряжения, так и при прогреве образцов без питающего напряжения. При этом переход при повышенной температуре

происходит при значительно меньших значениях электрического напряжения по сравнению с аналогичным процессом при комнатной температуре и наблюдается при прогреве образца до температуры 50–100 °С. Если внешнее напряжение не подавалось на образец, то сброс в высокоомное состояние происходил при температуре ~ 120–160 °С [4].

Термическое переключение проводимости в отсутствие приложенного напряжения объясняется непосредственным разогревом материала проводящего канала и повышением энергии его кристаллической решетки при увеличении температуры окружающей среды. В конечном итоге это приводит к разрушению проводящего канала посредством радиальной диффузии либо путем обрыва цепи электрод – электрод. При приложении к образцу внешнего напряжения термический нагрев канала усиливается за счет джоулева тепла, выделяемого проходящим током, поэтому переключение в диэлектрическое состояние происходит при меньшей температуре, чем без напряжения.

3. Вольт-емкостные характеристики

Вольт-емкостные характеристики исследуемых структур измерялись на частоте 1 МГц при различных температурах. На рис. 4 показаны C-U характеристики структуры Al/SmF₃/pSi в исходном состоянии (0) и после нескольких циклов электроформовки, измеренные при температуре 65 °С.

После нескольких циклов электроформовки вольт-емкостные характеристики более растянуты по оси напряжений, что указывает на рост плотности поверхностных состояний и изменение напряжения плоских зон.

Напряжение плоских зон U_{FB} – это напряжение, при котором поверхностный потенциал принимает нулевое значение.

$$U_{FB} = \Phi_{ms} - \frac{Q_f}{C_D}, \quad (2)$$

где Φ_{ms} – разность работ выхода металл – полупроводник; C_D – емкость фторида; Q_f – эффективный заряд. Под эффективным зарядом здесь понимается суммарная плотность заряда ловушек на границе раздела фторид – кремний Q_{it} и в объеме фторида Q_f^* .

$$Q_f = Q_f^* + Q_{it}. \quad (3)$$

На рис. 5 показан пример изменения напряжения плоских зон при множественных циклах элек-

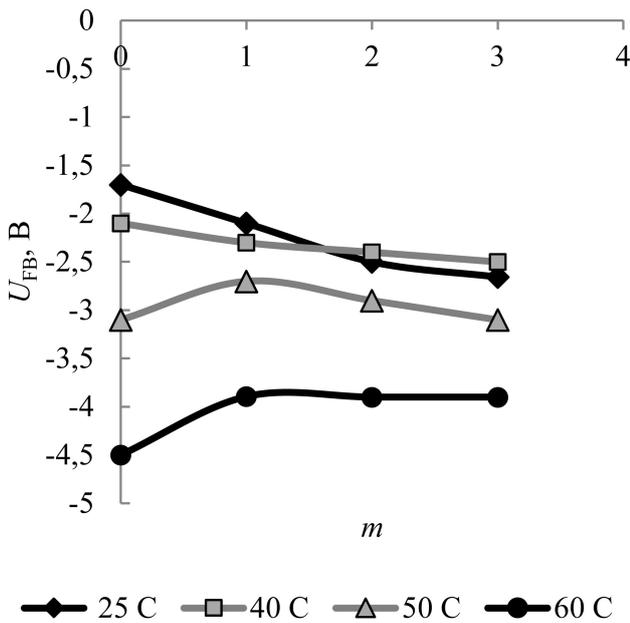


Рис. 5. Изменение напряжения плоских зон при множественных циклах электроформовки и изменении температуры для структуры Al/CeF₃/nGe. Номер цикла указан
Fig. 5. The change in the voltage of flat zones during multiple cycles of electroforming and a change in temperature for the Al/CeF₃/nGe structure. Cycle number indicated

троформовки для структуры Al/CeF₃/nGe, где по горизонтальной оси откладывается номер цикла электроформовки. На представленных зависимостях наблюдается сдвиг напряжения плоских зон в область отрицательных значений при росте числа циклов и температуры, что указывает на рост положительного заряда. При температуре 60 °C при росте числа циклов начинает расти отрицательный заряд.

Распределение энергетической плотности поверхностных состояний D_{it} в запрещенной зоне германия рассчитывалось из зависимости поверхностного потенциала от напряжения U по формуле

$$D_{it} = \frac{C_D}{e^2} \left(\frac{dU}{d\phi_s} - 1 \right) + \frac{C_s}{e^2}, \quad (4)$$

где C_s – емкость области пространственного заряда; ϕ_s – величина поверхностного потенциала; e – элементарный заряд. На рис. 6 представлены данные расчета по формуле (4) для структуры Al/CeF₃/nGe, где E_C и E_F – энергия дна зоны проводимости германия и энергия уровня Ферми на поверхности полупроводника соответственно. Данный метод дает U – образный вид энергетического распределения D_{it} в запрещенной зоне германия для исследованных структур. За значение D_{it} в настоящей работе принималось значение в минимуме распределения.

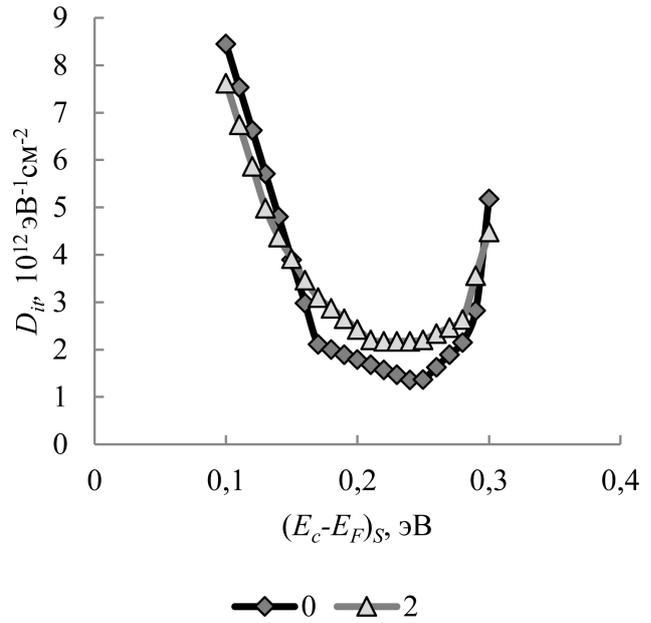


Рис. 6. Распределение плотности поверхностных состояний по энергиям в запрещенной зоне германия для структуры Al/CeF₃/nGe при комнатной температуре в исходном состоянии и после второго цикла электроформовки
Fig. 6. Energy density distribution of surface states in the forbidden zone of germanium for the Al/CeF₃/nGe structure at room temperature in the initial state and after the second electroforming cycle

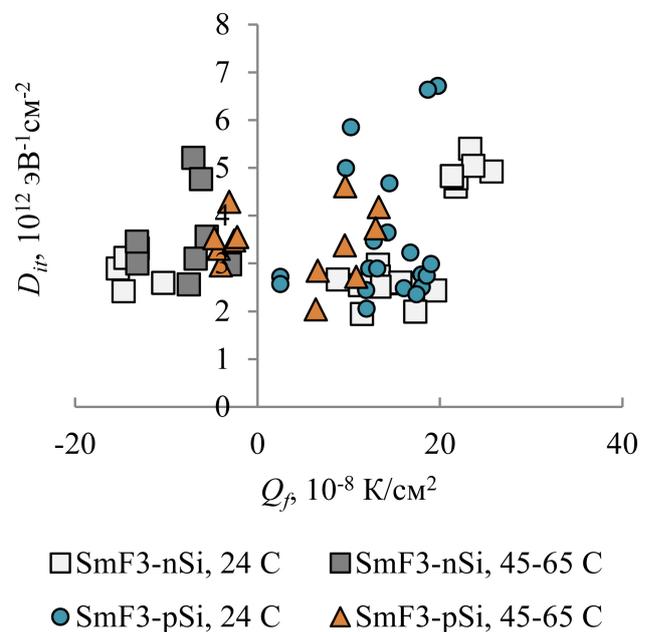
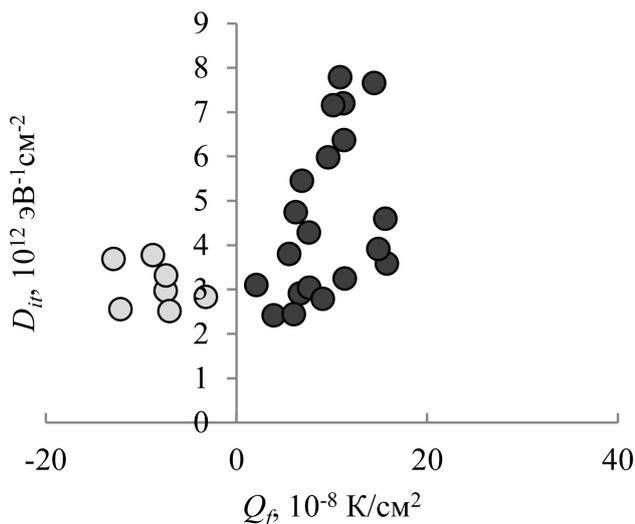


Рис. 7. Зависимость плотности поверхностных состояний от эффективного заряда кремниевых МДП-структур с пленочным фторидом самария
Fig. 7. Dependence of the density of surface states on the effective charge of silicon MIS structures with film-like samarium fluoride

Зависимость эффективного заряда Q_f от плотности поверхностных состояний D_{it} при множественных циклах электроформовки показана на рис. 7–9 для германиевых и кремниевых МДП-структур. Экспериментальные результаты пока-



● SmF₃-nGe, 22 °C ○ SmF₃-nGe, 45-65 °C

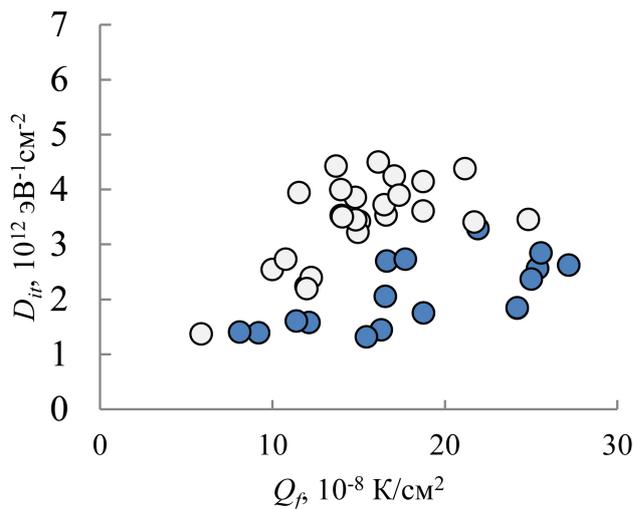
Рис. 8. Зависимость плотности поверхностных состояний от эффективного заряда германиевых МДП-структур с пленочным фторидом самария

Fig. 8. Dependence of the density of surface states on the effective charge of germanium MIS structures with film samarium fluoride

зывают различие зарядового состояния структур на кремниевых и германиевых подложках. На германиевых подложках n-типа при комнатной температуре наблюдался положительный заряд для всех исследованных структур. На кремниевых подложках n- и p-типа заряд может быть как положительный, так и отрицательный. На рис. 7 показана зависимость плотности поверхностных состояний от эффективного заряда для структур Al/SmF₃/nSi, Al/SmF₃/pSi, полученная при комнатной температуре и температуре 45–65 °C. В основном в отрицательную часть зарядовой шкалы попадают измерения, проведенные при повышенных температурах. На рис. 8 зависимость $D_{it} - Q_f$ показана для германиевой структуры Al/SmF₃/nGe, где при повышенной температуре наблюдаются отрицательные значения эффективного заряда, что никогда не фиксировалось для германиевых структур при комнатной температуре.

На рис. 9 показана зависимость $D_{it} - Q_f$ для германиевых МДП-структур с пленкой фторида церия. В данном случае увеличение температуры от комнатной до 50–60 °C не приводит к изменению знака заряда, он остается положительным. Можно заметить, что для заданной величины эффективного заряда фиксируется большая плотность поверхностных состояний при повышенной температуре.

Таким образом, отдельное воздействие температуры приводит к увеличению положительного



● CeF₃-nGe, 25 °C ○ CeF₃-nGe, 50-60 °C

Рис. 9. Зависимость плотности поверхностных состояний от эффективного заряда германиевых МДП-структур с пленочным фторидом церия

Fig. 9. Dependence of the density of surface states on the effective charge of germanium MIS structures with cerium film fluoride

заряда с ростом числа циклов как для германиевых, так и для кремниевых структур. Отдельное воздействие высокого электрического поля на МДП-структуры с подложкой n-типа приводит также к увеличению положительного заряда. Однако комплексное воздействие высокого электрического поля и температуры имеет тенденцию роста отрицательного заряда, что представлено на рис. 7 и 8.

Заключение

В настоящей работе исследовались бистабильные структуры Al/SmF₃/nGe, Al/CeF₃/nGe, Al/SmF₃/nSi, Al/SmF₃/pSi. Эмпирическая зависимость плотности тока от напряжения в высокоомном состоянии описывается степенной зависимостью с показателем степени 0,9–1,5. Этот показатель увеличивается как с ростом числа циклов электроформовки, так и с ростом температуры. Распределение энергетической плотности поверхностных состояний в запрещенной зоне германия рассчитывалось из зависимости поверхностного потенциала от напряжения. Экспериментальные результаты показывают различие зарядового состояния структур на кремниевых и германиевых подложках. На германиевых подложках n-типа при комнатной температуре наблюдался положительный заряд для всех исследованных структур. На кремниевых подложках n- и p-типа заряд может быть как положительный, так и отри-

цательный. Отдельное воздействие температуры приводит к увеличению положительного заряда с ростом числа циклов как для германиевых, так и для кремниевых структур. Отдельное воздействие высокого электрического поля на МДП-структуры с подложкой n-типа приводит также к увеличению положительного заряда. Однако комплексное воздействие высокого электрического поля и температуры имеет тенденцию роста отрицательного заряда в исследованных МДП-структурах.

Список литературы

1. Resistive switching-like behavior of the dielectric breakdown in ultra-thin Hf based gate stacks in MOSFETs / A. Crespo-Yepes [et al.] // *Solid-State Electronics*. 2011. Vol. 65-66. P. 157–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sse.2011.06.033>.
2. Resistive switching behavior of a CeO₂ based ReRAM cell incorporated with Si buffer layer / C. Dou [et al.] // *Microelectronics Reliability*. 2012. Vol. 52. № 4. P. 688–691. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2011.10.019>.
3. Шалимова М.Б., Сачук Н.В. Особенности МДП-структур с фторидом самария на кремниевых и германиевых подложках // *Физика и техника полупроводников*. 2019. Т. 53. № 2. С. 241–245. DOI: <https://doi.org/10.21883/FTP.2019.02.47106.8873>.
4. Acha C. Graphical analysis of current-voltage characteristics in memristive interfaces // *Journal of Applied Physics*. 2017. Vol. 121. № 13. P. 134502. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4979723>.

References

1. Crespo-Yepes A. et al. Resistive switching-like behavior of the dielectric breakdown in ultra-thin Hf based gate stacks in MOSFETs. *Solid-State Electronics*, 2011, vol. 65, pp. 157–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sse.2011.06.033>.
2. Dou C. et al. Resistive switching behavior of a CeO₂ based ReRAM cell incorporated with Si buffer layer. *Microelectronics Reliability*, 2012, vol. 52, pp. 688–691. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2011.10.019>.
3. Shalimova M.B., Sachuk N.V. Features of MOS structure with samarium fluoride on silicon and germanium substrates. *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 2019, vol. 53, no. 2, pp. 241–245. DOI: <https://doi.org/10.21883/FTP.2019.02.47106.8873>. (In Russ.)
4. Acha C. Graphical analysis of current-voltage characteristics in memristive interfaces. *Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 121, no. 13, pp. 134502. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4979723>.

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2020, vol. 23, no. 1, pp. 58–66

DOI 10.18469/1810-3189.2020.23.1.58-66

Received 11 March 2020
Accepted 25 March 2020

Analysis of electrophysical characteristics of bistable MIS structures with samarium and cerium fluorides

M.B. Shalimova, N.V. Sachuk

Samara National Research University
34, Moskovskoye shosse,
Samara, 443086, Russia

Abstract – Bistable MIS structures are promising for use in permanent memory devices, and are a convenient object for studying degradation phenomena under the influence of various external factors. This paper has studied the degradation of I-V and C-V characteristics of bistable germanium and silicon MIS structures with samarium and cerium fluoride under the influence of high electric fields and elevated temperatures. It has been found that empirical dependence of current density on voltage in high-ohmic state is described by degree dependence with index of degree 0.9–1.5. This indicator increases both with the increase in the number of electroforming cycles and with the increase in temperature. On n-type germanium substrates, a positive charge was observed at room temperature for all structures studied. On n- and p-type silicon substrates, the charge can be both positive and negative. Separate exposure to temperature results in an increase in positive charge with an increase in the number of cycles, for both germanium and silicon structures. The separate effect of the high electric field on the MIS structure with the n-type substrate also leads to an increase in the positive charge. However, the complex effects of high electric field and temperature lead to a trend of negative charge growth in the studied MIS structures.

Keywords – MIS-structure, REE fluorides, dielectric degradation, bistable structures.

Информация об авторах

Шалимова Маргарита Борисовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела и неравновесных систем Самарского национального исследовательского университета им. академика С.П. Королева.

Область научных интересов: МДП-структуры, бистабильные структуры, деградация диэлектриков в экстремальных условиях, диэлектрические материалы на основе редкоземельных элементов, просветление и пассивация поверхности полупроводников.

E-mail: shamb1347@gmail.com

Сачук Наталья Васильевна, аспирант кафедры физики твердого тела и неравновесных систем Самарского национального исследовательского университета им. академика С.П. Королева.

Область научных интересов: диэлектрические материалы на основе редкоземельных элементов, деградация электрофизических характеристик бистабильных МДП-структур.

E-mail: serebroxx@yandex.ru

Information about the Authors

Margarita B. Shalimova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Solid State Physics and Non-Equilibrium Systems, Samara National Research University, Samara, Russia.

Scientific interests: MIS structures, bistable structures, dielectric degradation in extreme conditions, dielectric materials based on rare earth elements, enlightenment and passivation of the surface of semiconductors.

E-mail: shamb1347@gmail.com

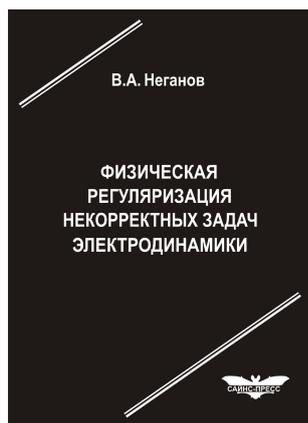
Natalia V. Sachuk, postgraduate student of the Department of Solid State Physics and Non-Equilibrium Systems, Samara National Research University, Samara, Russia.

Scientific interests: dielectric materials based on rare earth elements, the degradation of electrophysical characteristics of bistable silicon MIS structures.

E-mail: serebroxx@yandex.ru

Неганов, В.А.

Физическая регуляризация некорректных задач электродинамики: линии передачи, антенны, дифракция электромагнитных волн / В.А. Неганов. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2008. – 432 с., 122 ил.



ISBN 978-5-88070-161-2

УДК 537.87

ББК 32.84

Н 41

Изложены основы физической регуляризации некорректных задач электродинамики, связанной с особенностями физических и математических моделей задач (физические допущения, некорректные математические выкладки, отсутствие предельного перехода). Подход, по мнению автора, обладает большими возможностями, чем метод регуляризации Тихонова А.Н. интегральных уравнений Фредгольма первого рода, названный в книге методом математической регуляризации. Метод физической регуляризации (МФР) применен к анализу волноведущих и излучающих структур, а также задачам дифракции электромагнитных волн на некоторых телах. МФР позволил впервые корректно осуществить анализ полей в ближних зонах некоторых антенн, устранить несамосогласованное приближение Кирхгофа в задачах дифракции, установить связь поверхностной плотности тока проводимости с напряженностями электрического и магнитного полей для диполя Герца и т. п.

Для специалистов в области радиотехники и радиофизики СВЧ, электромагнитной совместимости РТС, математической теории дифракции и математического моделирования электродинамических структур самого широкого назначения. Может быть полезна преподавателям вузов, докторантам, аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.