

# Изменение параметров МДП-структур с соединениями редкоземельных элементов в условиях повышенной влажности

© М.Б. Шалимова, И.В. Беянина

Самарский национальный исследовательский университет,  
443011 Самара, Россия

E-mail: shamb@ssau.ru

Поступила в Редакцию 14 сентября 2022 г.

В окончательной редакции 1 февраля 2023 г.

Принята к публикации 2 февраля 2023 г.

Исследовались свойства МДП-структур с фторидами иттрия, неодима, самария на германии, фторидами неодима и самария на подложках  $n$  и  $p$  кремния, а также структуры  $\text{Al-Y}_2\text{O}_3\text{-}n\text{Si}$ ,  $\text{Al-Y}_2\text{O}_3\text{-}p\text{Si}$  в условиях повышенной влажности окружающей среды. Дополнительно структуры подвергались действию электрического поля  $\sim 0.5\text{--}4$  МВ/см. Для МДП-структур с пленками фторида иттрия, неодима, самария на германии, а также фторида неодима и самария на подложках  $n$  и  $p$  кремния наблюдается явное увеличение максимальной удельной емкости с ростом относительной влажности среды. Установлено, что вхождение воды в структуру пленочных фторидов редкоземельных элементов, исследованных в данной работе, является сорбционным, и при исследованных температурах не вызывает необратимых изменений в пленке диэлектрика.

**Ключевые слова:** МДП-структура, кремний, германий, плотность поверхностных состояний, влажность.

DOI: 10.21883/FTR.2023.02.55328.4124

## 1. Введение

Надежность устройств на основе структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) сильно зависит от свойств затворного диэлектрика. В последние годы происходит замена уже изученных изоляторов ( $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) слоями с высокой диэлектрической проницаемостью ( $k$ ), так как есть потребность в миниатюризации полевых МДП-транзисторов. Оксиды и фториды редкоземельных элементов (РЗЭ) относятся к группе так называемых *high- $k$*  диэлектриков, интенсивно изучаемых в последние годы. Они термически стабильны, имеют в среднем высокую диэлектрическую проницаемость, большой разрыв зон проводимости с кремнием и германием. Эти материалы являются притягательными кандидатами для использования в качестве альтернативных затворных диэлектриков в полевых транзисторах и других устройствах на основе структур металл-диэлектрик-полупроводник [1,2].

В этой связи представляет интерес исследование свойств оксидов и фторидов РЗЭ для приборов на основе МДП-структур, направленное на поиск оптимального диэлектрика в ряду соединений РЗЭ. Отдельным вопросом является анализ этих материалов с точки зрения влияния на их свойства влажности окружающей среды.

Попадание влаги является общеизвестным фактором, который может привести к выходу из строя интегральных схем (ИС). Эпоксидный формовочный компаунд часто используется для герметизации ИС, поскольку он действует как барьер против воздействий окружающей среды, таких как влага и газы. Несмотря на то что полупроводниковые микросхемы заключены в подобные

изолирующие капсулы, влага проникает вдоль интерфейсов или диффундирует через упаковочные материалы. Лишь небольшое количество воды может сильно изменить свойства диэлектрических материалов [3]. Поскольку влага неизбежно присутствует в текущем стандартном процессе изготовления комплементарного МОП (металл-окисел-полупроводник) элемента ИС, устойчивость к поглощению влаги является важным свойством для затворного диэлектрика с высоким  $k$  [4]. Кроме того, влага превращается в пар высокого давления во время пайки, что может приводить к изменению запланированных параметров электронных устройств [5]. Повышенная влажность способна наносить прямой урон электронике, например, в виде расклеивания печатных плат.

С другой стороны, чувствительность МДП-структур к присутствию влаги потенциально может быть использована для создания на их основе датчиков влажности. Наблюдалось экспериментально влияние влажности воздуха на емкость МОП структур  $\text{Mo-SiO}_2\text{-}n\text{Si}(111)$  с тонким пористым оксидом толщиной  $\sim 5$  нм [6]. Предложен очень чувствительный датчик на основе полевого МОП транзистора, в котором используется изменение проводимости поверхности диоксида кремния при изменении влажности среды [7]. Чувствительность к влажности среды структуры  $\text{Au/CeO}_2\text{/Si}(111)$  объясняется увеличением диэлектрической проницаемости толстого слоя  $\text{CeO}_2$  и наличием в этом слое кислородных вакансий [8]. Потенциометрический датчик тонкопленочного типа на основе структуры  $\text{Pt/LaF}_3\text{/Sn/SiO}_2\text{/Si}$  представлен в работе [9], где показано, что электродвижущая сила датчика меняется в зависимости от относительной влажности. Таким образом, предлагаются различные решения

для разработки датчиков влажности на основе МДП-структур.

Поэтому изучение изменения электрических параметров МДП-структур на основе диэлектрика с большим значением диэлектрической проницаемости при одновременном воздействии электрической перегрузки и влажной среды, а также оценка надежности методик получения информации о границе раздела полупроводник–диэлектрик являются задачей текущего периода времени [10].

Цель работы — изучение физических особенностей МДП-структур с фторидами иттрия, неодима, самария на германии, фторидами неодима и самария на подложках *n* и *p* кремния, а также структур  $\text{Al-Y}_2\text{O}_3\text{-}n\text{Si}$ ,  $\text{Al-Y}_2\text{O}_3\text{-}p\text{Si}$ , и исследование их свойств в условиях повышенной влажности окружающей среды.

## 2. Экспериментальные образцы

Подложками служили монокристаллические пластины кремния *n*- или *p*-типа марки КЭФ-5 и КДБ-4.5 ориентации (111) или (100) соответственно. Подложками для германиевых МДП-структур служили пластины монокристаллического германия *n*-типа проводимости марки ГЭС-2 (111).

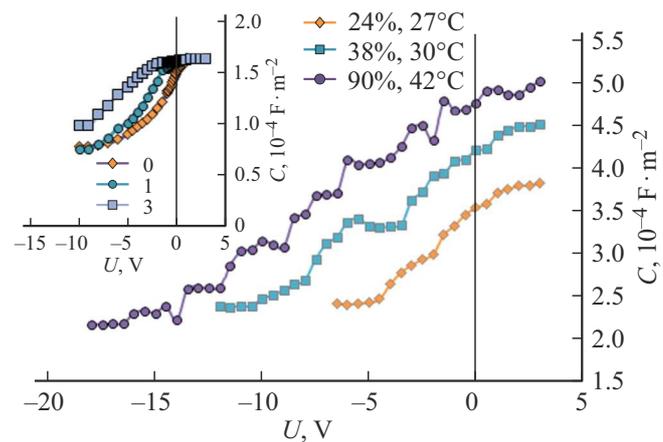
Диэлектрические пленки фторидов РЗЭ изготавливались методом термического распыления порошкообразного фторида РЗЭ в вакууме при давлении  $\sim 10^{-5}$  Торр при температуре подложки  $\sim 300^\circ\text{C}$ . Пленки фторидов РЗЭ проявляют достаточно стабильные и воспроизводимые свойства и обладают поликристаллической структурой.

Термическое испарение металлического иттрия проводилось на установке вакуумного напыления в вакууме порядка  $10^{-5}$  Торр. Окисление металлической пленки проводилось в потоке сухого кислорода или на воздухе в печи лабораторного типа при температурах  $500\text{--}800^\circ\text{C}$  в течение 20–30 мин. Таким методом получают равномерные по толщине поликристаллические пленки оксида иттрия, состав которых близок к стехиометрическому.

Толщина диэлектрика во всех случаях составляла 250–350 нм. Для получения МДП-емкостей на диэлектрик методом термического испарения в вакууме через трафарет наносились алюминиевые электроды диаметром 0.5–0.7 мм.

## 3. Результаты эксперимента

Для исследования изменения электрофизических параметров, вызванных абсорбцией влаги, измерительный зонд с исследуемым образцом МДП-емкости помещался в специальную камеру и экспонировался в воздушной среде повышенной влажности при температуре  $25\text{--}45^\circ\text{C}$ . Параметры структур рассчитывались на основе анализа  $C\text{--}V$ -характеристик МДП-структур, измеренных на частоте 1 МГц.



**Рис. 1.** Зависимость удельной емкости от напряжения МДП-структуры  $\text{Al-YF}_3\text{-}n\text{Ge}$  при различных значениях относительной влажности и температуры окружающей среды. На вставке показана  $C\text{--}V$ -характеристика МДП-структуры с тем же диэлектриком при неизменной влажности окружающей среды (35%) и комнатной температуре (на легенде указаны номера циклов электроформовки).

Дополнительно структуры подвергались электрической перегрузке (электроформовке), когда на них действовали высокие электрические поля  $0.5\text{--}4$  МВ/см. Одновременное воздействие влажной среды и высоких электрических полей приводит к ускорению деградационных процессов в электронных структурах и выявляет их основные закономерности.

Процесс электроформовки состоит в том, что под действием высоких электрических полей  $V_{\text{ст}}$  в диэлектрике создается канал проводимости. Однако это состояние не является необратимым, и при обратной полярности прикладываемого напряжения имелась возможность переключения исследуемой МДП-структуры обратно в диэлектрическое состояние. При этом была использована возможность многократного переключения структур из диэлектрического состояния в проводящее и обратно, так как данные МДП-структуры с пленками фторидов и оксидов РЗЭ обладают свойством бистабильного переключения [11,12]. После каждого цикла электроформовки структура возвращается в диэлектрическое состояние, но с новой плотностью поверхностных состояний и с новым значением эффективного заряда. Таким образом, получается более широкий ряд экспериментальных данных.

На рис. 1 представлена зависимость удельной емкости от напряжения МДП-структуры  $\text{Al-YF}_3\text{-}n\text{Ge}$  при изменении относительной влажности и температуры окружающей среды. На вставочной панели рис. 1 показана  $C\text{--}V$ -характеристика МДП-структуры с тем же диэлектриком при неизменной влажности окружающей среды (35%) и комнатной температуре. В обоих случаях структуры подвергались электроформовке, т.е. цифры на легенде вставочной панели указывают номер цикла

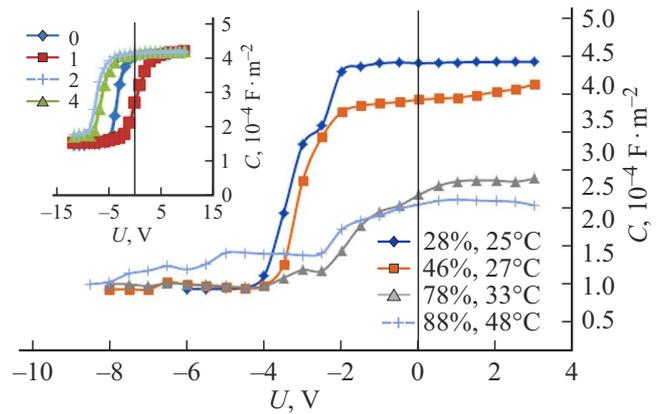
электроформовки. На графиках рис. 1 с измененной влажностью рост циклов электроформовки происходит одновременно с ростом относительной влажности среды.

При неизменной влажности среды (35%) и комнатной температуре увеличение циклов электроформовки приводит к сдвигу  $C-V$ -характеристик влево по оси напряжений, что указывает на рост положительного заряда в структуре. При этом максимальное значение удельной емкости во всех циклах электроформовки остается неизменным. При изменении относительной влажности и температуры окружающей среды на рис. 1 наблюдается явное увеличение максимальной удельной емкости с ростом относительной влажности среды, что связано с увеличением диэлектрической проницаемости структуры. Это указывает на то, что происходит абсорбция (проникновение влаги внутрь диэлектрика), т.е. диффузия молекул воды. Так как диэлектрическая проницаемость пленки  $YF_3 \sim 14$ , а диэлектрическая проницаемость воды  $\sim 81$ , это приводит к росту общей диэлектрической проницаемости композитного материала. Было замечено, что после просушки структур на воздухе их значение максимальной емкости и диэлектрическая проницаемость возвращаются к исходным значениям. Подобные характеристики наблюдались для всех исследованных структур с пленками фторидов РЗЭ.

Аналогичные явления наблюдались в работе [13] при изучении электрофизических свойств структуры  $Al/por-Si/nSi/$ . С ростом относительной влажности увеличивалась эффективная диэлектрическая проницаемость слоя  $por-Si$  и емкость структуры. В работе [14] исследовалась влагочувствительность структур металл-наноразмерный окисел кремния-кремний. Отмечается, что в общем случае увеличение измеряемой емкости структур при увеличении влажности воздуха связано с адсорбцией молекул воды тонким пористым окисным слоем, что, с одной стороны, приводит к увеличению диэлектрической проницаемости этого слоя (при конденсации в микропорах), а с другой — к увеличению плотности поверхностных состояний границы раздела кремний-окисел.

Известно, что влияние влаги на диэлектрик зависит и от того, каким образом вода входит в его структуру. Существует две формы связи воды с твердыми веществами: сорбционная и химическая. В первом случае вода, проникающая в толщу материала в процессе сорбции, не входит в его структуру, не вызывает необратимых явлений и ее присутствие или удаление не приводит к образованию новой структуры вещества. Химическая или кристаллогидратная форма связи воды с диэлектриком приводит к получению новых веществ, различных по физическим свойствам, вызывает структурное изменение и перестройку кристаллической решетки.

Таким образом, очевидно, что вхождение воды в структуру пленочных фторидов РЗЭ, исследованных в данной работе, является сорбционным, и при исследованных температурах не вызывает необратимых изменений в пленке фторида РЗЭ. Исследования показали, что это



**Рис. 2.** Зависимость удельной емкости от напряжения МДП-структуры  $Al-Y_2O_3-nSi$  при различных значениях относительной влажности и температуры окружающей среды. На вставке показана  $C-V$ -характеристика МДП-структуры с тем же диэлектриком при неизменной влажности окружающей среды (35%) и комнатной температуре (номера циклов электроформовки указаны).

справедливо для МДП-структур с фторидами иттрия, неодима, самария на германии, а также фторидами неодима и самария на подложках  $n$  и  $p$  кремния.

На рис. 2 представлены вольт-фарадные характеристики МДП-структуры  $Al-Y_2O_3-nSi$  при изменении относительной влажности и температуры окружающей среды. На вставке показана  $C-V$ -характеристика МДП-структуры с тем же диэлектриком при неизменной влажности окружающей среды (35%) и комнатной температуре. Как и на рис. 1, при неизменной влажности среды (35%) и комнатной температуре увеличение циклов электроформовки приводит к сдвигу  $C-V$ -характеристик влево, что указывает на рост положительного заряда в структуре. Максимальное значение удельной емкости на вставочной панели также не изменяется, но оно изменяется на рис. 2 для случая измененной влажности. Однако в данном случае в эксперименте со структурой  $Al-Y_2O_3-nSi$  наблюдается уменьшение максимальной удельной емкости и общей диэлектрической проницаемости с ростом относительной влажности. Это связано с возможным образованием на границе кремний/оксид иттрия дополнительного слоя  $SiO_2$ , который имеет низкую диэлектрическую проницаемость, из-за чего уменьшается общее значение диэлектрической проницаемости структуры. В данном случае действие влаги может приводить к структурным изменениям на границе раздела диэлектрик-кремний, что обусловлено более сложными процессами, чем в случае с исследованными фторидами РЗЭ. Следует отметить, что для структуры  $Al-Y_2O_3-pSi$  наблюдалось увеличение максимальной удельной емкости и общей диэлектрической проницаемости с ростом относительной влажности, как и для всех остальных исследованных структур. Этот вопрос требует дополнительного изучения, возможно, это обусловлено техно-

логическими особенностями изготовления кремниевых МДП-структур в каждом конкретном случае.

Представленные в работе [10] данные исследований пленки  $\text{La}_2\text{O}_3$ , отожженной в среде  $\text{N}_2$ , показали, что адсорбция влаги приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости после экспозиции на воздухе в течение нескольких часов, вследствие формирования  $\text{La}(\text{OH})_3$  с более низкой проницаемостью. Сделан вывод, что поглощение влаги может быть возможной причиной разброса значений  $k$  пленок  $\text{La}_2\text{O}_3$ . Кроме того, обнаружено, что поглощение влаги также увеличивает шероховатость поверхности пленок  $\text{La}_2\text{O}_3$  на кремнии.

Экспериментальные значения удельной емкости, полученные для МДП-структур с оксидами и фторидами РЗЭ, использовались для расчета зависимости поверхностного потенциала от напряжения. Из этих данных определялась величина изменения напряжения плоских зон  $\Delta V_{fb}$  как разность напряжений, при которых поверхностный потенциал  $\phi_s$  принимает значение, равное нулю.

Поверхностная плотность захваченного эффективного заряда концентрации  $N_f$  в пленке оксида (фторида) РЗЭ определялась по формуле

$$Q_f = eN_f = \Delta V_{fb} C_d, \quad (1)$$

где  $C_d$  — удельная емкость диэлектрика,  $e$  — элементарный заряд.

Из зависимости поверхностного потенциала от напряжения  $U$  можно рассчитать распределение плотности поверхностных состояний  $D_{it}$  в запрещенной зоне полупроводника по формуле

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

где  $C_s$  — удельная емкость области пространственного заряда кремния или германия.

На рис. 3 представлен график зависимости поверхностной плотности эффективного заряда от относительной влажности среды (RH) для различных исследованных структур. Во всех случаях наблюдается рост плотности положительного заряда с ростом относительной влажности среды (и одновременным ростом числа циклов электроформовки). В структурах с пленками  $\text{YF}_3$  и  $\text{NdF}_3$  на подложках германия достигается максимальное значение поверхностной плотности эффективного заряда с ростом относительной влажности. Гораздо меньший рост плотности положительного заряда наблюдается в германиевых МДП-структурах с пленкой  $\text{SmF}_3$ . В МДП-структурах на подложках кремния плотность эффективного заряда изменяется в меньшем интервале, что указывает на значительное влияние подложки на данный процесс. Поэтому представляет интерес исследование вопроса формирования поверхностных состояний на поверхности полупроводника при абсорбции влаги исследованными МДП-структурами.

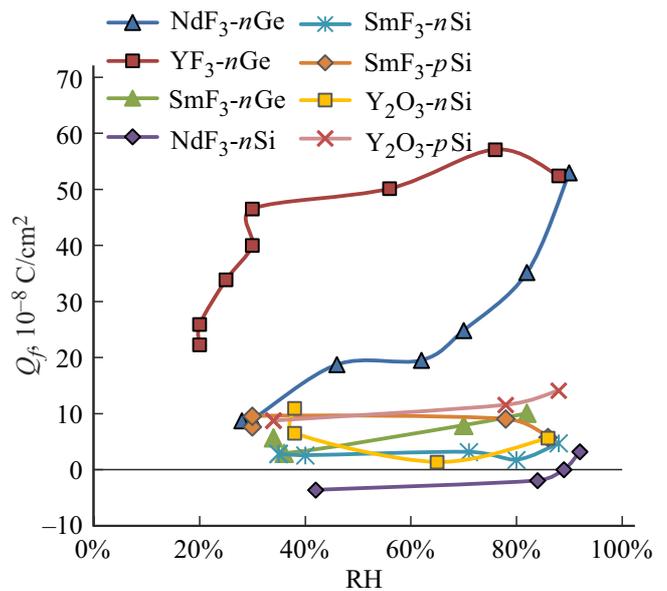


Рис. 3. Зависимость поверхностной плотности эффективного заряда исследованных МДП-структур от относительной влажности среды.

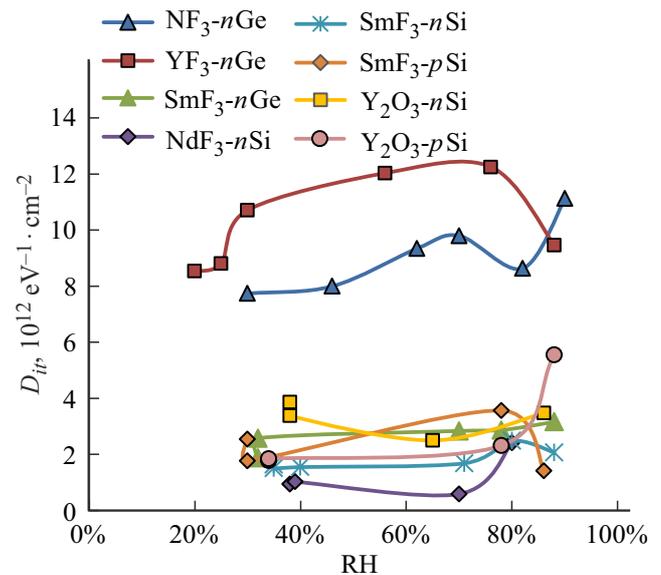


Рис. 4. Зависимость плотности поверхностных состояний на поверхности германия (кремния) исследованных МДП-структур от относительной влажности среды.

На рис. 4 представлены зависимости плотности поверхностных состояний от относительной влажности различных исследованных МДП-структур с оксидами и фторидами РЗЭ. Наблюдается очевидная корреляция между данными, представленными на рис. 3 и 4.

На рис. 5 представлен график изменения плотности поверхностных состояний в зависимости от изменения поверхностной плотности эффективного заряда исследованных МДП-структур при изменении влажности окру-

жающей среды (как упоминалось выше, также на структуры действовали высокие электрические поля). Наблюдается увеличение плотности поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик/полупроводник с ростом плотности положительного эффективного заряда.

Чтобы получить ответ на вопрос — влияет ли влажность среды на формирование этих поверхностных состояний, следует сравнить данный график с аналогичным, полученным для МДП-структур, находящихся в среде с постоянной влажностью 35% при комнатной температуре. Подобный график построен на рис. 6 для германиевых МДП-структур с пленками  $\text{YF}_3$ ,  $\text{NdF}_3$ ,  $\text{SmF}_3$  и кремниевой структуры с пленкой  $\text{NdF}_3$ . При этом различные точки графика получены в серии циклов электроформовки.

Можно заметить, что в целом эти графики совпадают. Так, для германиевых МДП-структур с пленками фторида иттрия и фторида неодима достигается более высокая плотность поверхностных состояний, чем для фторида самария, как и в случае присутствия влаги. Максимальное значение плотности поверхностных состояний в обоих случаях одинаковое,  $\sim 1.3 \cdot 10^{13} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ . Для германиевой структуры с пленкой фторида самария на обоих графиках наблюдается меньшая максимальная плотность поверхностных состояний. Для структуры  $\text{Al-NdF}_3\text{-nSi}$  значение плотности поверхностных состояний на обоих графиках близко к минимальному значению, и также в данном случае наблюдается как положительный, так и отрицательный эффективный заряд. Как показано в работах [11,12], при электрической перегрузке происходит деградация электрических характеристик МДП-структур на подложках германия и кремния. При этом наблюдается рост плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник/фторид (оксид) РЗЭ.

На рис. 5 и 6 представлена совокупность данных, полученных в широком интервале значений плотности эффективного заряда и плотности поверхностных состояний исследованных МДП-структур. Наблюдается близкая к линейной зависимость изменения плотности поверхностных состояний на границе раздела фторид (оксид) РЗЭ–германий (кремний) от поверхностной плотности эффективного заряда. Известно, что с ростом плотности поверхностных состояний происходит „растягивание“  $C-V$ -характеристик вдоль оси напряжений, что одновременно изменяет и напряжение плоских зон, и значение  $dU/d\phi_s$ . Все это отражается на значениях  $D_{it}$ , что отражено в формуле (2).

При более детальном сравнении можно обнаружить некоторые отличия рис. 5 и 6. В присутствии влаги поверхностная плотность эффективного заряда изменяется в более широком интервале значений. Так, при максимальном значении плотности поверхностных состояний  $\sim 1.3 \cdot 10^{13} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$  плотность эффективного заряда во влажной среде достигает значения  $57 \cdot 10^{-8} \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-2}$ , в то время как в среде с постоянной влажностью

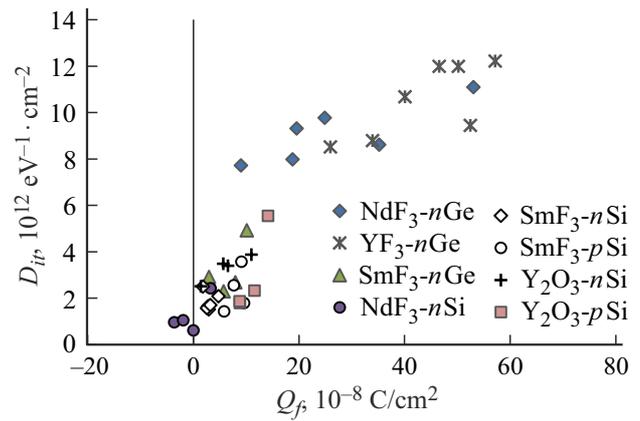


Рис. 5. Зависимость плотности поверхностных состояний на границе раздела фторид (оксид) РЗЭ — германий (кремний) от поверхностной плотности эффективного заряда при различной влажности среды.

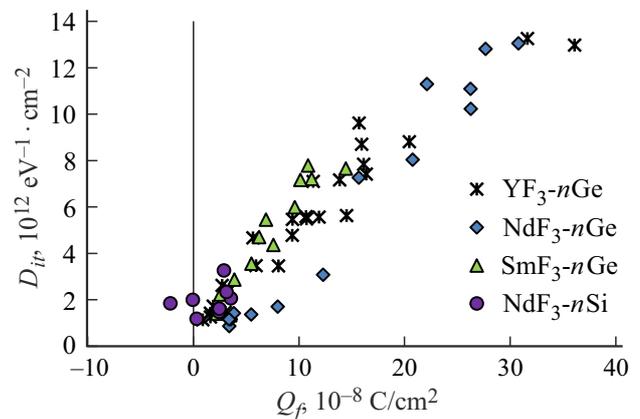


Рис. 6. Зависимость плотности поверхностных состояний на границе раздела фторид (оксид) РЗЭ — германий (кремний) от поверхностной плотности эффективного заряда при влажности среды 35% и комнатной температуре.

максимальное значение плотности эффективного заряда  $36 \cdot 10^{-8} \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-2}$ . Следовательно, присутствие влаги приводит к увеличению измеряемой поверхностной плотности эффективного заряда, что обнаруживается с помощью высокочастотных  $C-V$ -измерений.

Увеличение поверхностной плотности эффективного заряда при изменении влажности окружающей среды по сравнению с аналогичными измерениями при постоянной влажности среды может свидетельствовать как о формировании новых поверхностных состояний, так и о создании зарядовых центров в объеме диэлектрика и в приграничной с полупроводником области. Достоверно экспериментально разделить, какой вклад в рост плотности поверхностных состояний вносит электрическая перегрузка, а какой — нахождение структуры во влажной среде — не представляется возможным. В научной литературе присутствуют данные об увеличении плотности поверхностных состояний при росте влажности

окружающей среды. Так, в работе [11] исследовалось воздействие влажности на структуру  $\text{Mo-SiO}_2\text{-}n\text{Si}(111)$  с толщиной окисла  $\sim 5$  нм. В данном случае наблюдался линейный рост плотности поверхностных состояний при увеличении относительной влажности.

Таким образом, изменение плотности поверхностных состояний, которое происходит в процессе электроформовки под действием высокого поля, вероятно, усиливается в присутствии влаги, что приводит к образованию дополнительных поверхностных состояний на границе раздела фторид (оксид) РЗЭ/полупроводник и вносит вклад в рост поверхностной плотности эффективного заряда.

#### 4. Заключение

В работе изучались МДП-структуры с фторидами иттрия, неодима, самария на германии, фторидами неодима и самария на подложках  $n$  и  $p$  кремния, а также структуры  $\text{Al-Y}_2\text{O}_3\text{-}n\text{Si}$ ,  $\text{Al-Y}_2\text{O}_3\text{-}p\text{Si}$ , исследовались их свойства в условиях повышенной влажности окружающей среды. Дополнительно структуры подвергались электрической перегрузке (электроформовке), когда на них действовали высокие электрические поля 0.5–4 МВ/см. Одновременное воздействие влажной среды и высоких электрических полей приводит к ускорению деградационных процессов в электронных структурах и выявляет их основные закономерности.

Для МДП-структур с пленками фторида иттрия, неодима, самария на германии, а также фторида неодима и самария на подложках  $n$  и  $p$  кремния наблюдается явное увеличение максимальной удельной емкости с ростом относительной влажности среды. Это связано с увеличением диэлектрической проницаемости структуры и указывает на то, что происходит абсорбция влаги. Установлено, что вхождение воды в структуру пленочных фторидов РЗЭ, исследованных в данной работе, является сорбционным, и при исследованных температурах не вызывает необратимых изменений в пленке диэлектрика.

В эксперименте со структурой  $\text{Al-Y}_2\text{O}_3\text{-}n\text{Si}$  наблюдается уменьшение максимальной удельной емкости и общей диэлектрической проницаемости с ростом относительной влажности, что, возможно, связано с образованием на границе кремний/оксид иттрия дополнительного слоя  $\text{SiO}_2$ , который имеет низкую диэлектрическую проницаемость, из-за чего уменьшается общее значение диэлектрической проницаемости структуры. В данном случае действие влаги может приводить к структурным изменениям на границе раздела диэлектрик–кремний, что обусловлено более сложными процессами, чем в случае с исследованными фторидами РЗЭ.

Анализ данных эксперимента показывает, что присутствие влаги приводит к увеличению измеряемой поверхностной плотности эффективного заряда, что

обнаруживается с помощью высокочастотных  $C-V$ -измерений. Изменение плотности поверхностных состояний, которое происходит в процессе электроформовки под действием высокого поля, вероятно, усиливается в присутствии влаги, что приводит к образованию дополнительных поверхностных состояний на границе раздела фторид (оксид) РЗЭ/полупроводник и вносит вклад в рост поверхностной плотности эффективного заряда.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] P. Gribisch, A. Fissel. *J. Appl. Phys.*, **128**, 055108 (2020).
- [2] C. X. Li, P.T. Lai. *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 022910 (2009).
- [3] V. Cartailier, G. Imbert, N. Rochat, C. Chaton, Du Vo-Thanh, D. Benoit, G. Duchamp, H. Frémont. *Thin Sol. Films*, **698**, 137874 (2020).
- [4] H. Wang, M. Liserre, F. Blaabjerg, P. de Place Rimmen. *IEEE J. Emerging Select. Topics Power Electron.*, **2** (1), 97 (2014).
- [5] S.V.K. Anicode, E. Madenci. *Microelectron. Reliab.*, **123**, 114167 (2021).
- [6] P. Fastyskovsky. *Sensors Actuators: B. Chemical*, **304**, 127318 (2020).
- [7] Seok-Ho Song, Hyun-Ho Yang, Chang-Hoon Han, Seung-Deok Ko, Seok-Hee Lee, Jun-Bo Yoon. *Appl. Phys. Lett.*, **100**, 101603 (2012).
- [8] T. Toloshniak, Y. Guhel, A. Besq, B. Boudart. *Microelectron. Engin.*, **207**, 7 (2019).
- [9] Guoliang Sun, Hairong Wang, Zhuangde Jiang. *Rev. Sci. Instrum.*, **82**, 083901 (2011).
- [10] Y. Zhao, M. Toyama, K. Kita, K. Kyuno, A. Toriumi. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 072904 (2006).
- [11] М.Б. Шалимова. *ФТП*, **52**, 939 (2018).
- [12] Н.В. Сачук, М.Б. Шалимова. *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*, **24**, 68 (2021).
- [13] Е.А. Тутов, А.Ю. Андрюков, С.В. Рябцев. *Письма ЖТФ*, **26**, 53 (2000).
- [14] П.П. Фастыковский, М.А. Глауберман. *ФТП*, **48**, 1070 (2014).

Редактор Г.А. Оганесян

## Changing the Parameters of MIS Structures with Compounds Containing rare earth elements under Conditions of High Humidity

*M.B. Shalimova, I.V. Belyanina*

Samara National Research University,  
443011 Samara, Russia

**Abstract** The properties of MIS structures with yttrium, neodymium, samarium fluorides on germanium, neodymium and samarium fluorides on *n* and *p* silicon substrates, as well as Al-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-*n*Si, Al-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-*p*Si structures under conditions of high ambient humidity were studied. Additionally, the structures were exposed to an electric field of  $\sim 0.5\text{--}4$  MV/cm. For MIS structures with films of yttrium, neodymium, and samarium fluoride on germanium, as well as neodymium and samarium fluoride on *n* and *p* silicon substrates, a clear increase in the maximum specific capacitance with increasing relative humidity of the medium is observed. It has been found that the incorporation of water into the structure of the rare-earth elements film fluorides studied in this work is sorption and does not cause irreversible changes in the dielectric film at the studied temperatures.