

Связанные с водой ловушки носителей заряда в термических пленках диоксида кремния, полученных в сухом кислороде

© А.М. Емельянов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Emelyanov@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 14 сентября 2009 г.)

Методом лавинной инжекции электронов и дырок из кремния в сочетании с измерениями вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик тока фотоинжекции электронов из контактов исследованы параметры ловушек электронов и дырок в термических пленках SiO_2 , полученных в сухом кислороде. Варьировались условия окисления, отжига и хранения структур. Получены подтверждения предложенных автором модельных представлений о связанных с водой ловушках в таких пленках. Обнаружена зависимость транспортных характеристик ловушек от времени контакта Si-SiO_2 -структур с атмосферным воздухом естественной влажности. Результаты могут быть применены для уменьшения деградационных процессов в приборах на основе Si-SiO_2 -структур, при разработке технологий электролюминесцентных приборов на основе Si-SiO_2 -структур, изучении транспортных характеристик некоторых молекул (например, воды), атомов и ионов в порах (структурных каналах), размеры которых сопоставимы с размерами молекул воды.

Работа частично поддержана НИИ „Электрон“.

1. Введение

Пленки SiO_2 , получаемые термическим окислением монокристаллического кремния, находят широкое применение в микроэлектронике и другой полупроводниковой технике. Захват носителей заряда на ловушки в SiO_2 может происходить как в условиях воздействия ионизирующих излучений, так и в сильных электрических полях, вызывающих инжекцию носителей заряда из контактов. Инжекция иногда является побочным (не обязательным) фактором нормального функционирования полупроводниковых приборов (например, инжекция горячих носителей из Si в подзатворный SiO_2 полевых транзисторов [1–2]), но может быть и обязательным условием работы приборов. Так, в последние годы интенсивно развиваются исследования электролюминесценции (ЭЛ) ионов редкоземельных элементов, введенных в пленки SiO_2 на кремнии, например, ионной имплантацией. В структурах типа металл–окисел–полупроводник (МОП) уже наблюдалась ЭЛ ионов Er^{3+} [3,4], Eu^{3+} [5], Tb^{3+} [6], Gd^{3+} [7], Ce^{3+} [8]. Поскольку при возбуждении ряда ионов редкоземельных элементов в SiO_2 возможно достижение инверсной населенности энергетических уровней этих ионов и имеет место высокая эффективность ЭЛ в различных областях спектра, такого рода структуры перспективны для создания лазеров и других эффективных источников излучения с электрической накачкой.

Захват носителей заряда на ловушки в SiO_2 обычно приводит к деградации приборов: изменению пороговых напряжений и токов, иногда — к генерации поверхностных состояний [9], изменениям электрической прочности и пробоем диэлектрических пленок. В некоторых случаях захват носителей заряда на ловушки в диэлектрике может выполнять полезные функции. Например,

в приборах памяти и дозиметрах ионизирующих излучений [10]. Зарядка ловушечных центров в пленках SiO_2 под зондом атомно-силового микроскопа может быть использована для зарядовой нанолитографии [11].

В связи с изложенным выше исследованием ловушек носителей заряда в пленках SiO_2 и других диэлектрических пленках на кремнии интенсивно развивались в течение ряда десятилетий. Был накоплен большой экспериментальный материал, предложены модели ловушек и зарядовых явлений. Предшествующие работы автора показали, что, если термические пленки SiO_2 выращивают в достаточно чистых условиях, доминирующими ловушками для электронов обычно являются ловушки, связанные с водой [12–14]. В пленках, полученных термическим окислением кремния во влажной атмосфере, это в основном Si–ОН-группы [13]. Согласно результатам работ [12,14], доминирующими ловушками для электронов в пленках SiO_2 , полученных в сухом кислороде, являются области конденсата молекул воды в структурных каналах и порах пленок диоксида кремния. Было сделано предположение, что эти ловушки, вероятно, захватывают электроны по диссоциативному механизму с выделением водорода, поскольку такие представления согласуются с экспериментальными результатами исследований распределения водорода в указанных пленках SiO_2 до и после инжекции в них электронов.

Несмотря на то что предложенные и развитые автором модельные представления о связанных с водой ловушках электронов в термических пленках SiO_2 , полученных в сухом кислороде, за прошедшие более чем два десятилетия никем не были опровергнуты, они не получили пока и всеобщего признания. На это, в частности, указывает то, что в современных публикациях авторы, как правило, не сообщают, каким образом и сколько времени пленки SiO_2 контактировали с газо-

выми средами, содержащими пары воды. Кроме того, в литературе отсутствуют идеи использования указанных структурных каналов в новых технологиях. Поэтому и в настоящее время является актуальной публикация новых экспериментальных данных, развивающих описанные модельные представления и делающих их более убедительными. Этим целям в значительной мере и посвящена настоящая работа. В основу исследований был положен тот факт, что, как известно, молекулы воды и их кластеры способны захватывать не только электроны по диссоциативному механизму, но и дырки. Поэтому наблюдение однотипного влияния одинаковых технологических факторов на параметры ловушек для электронов и дырок в термических пленках SiO_2 , изготовленных в сухом кислороде, может служить дополнительным подтверждением модельных представлений о связанных с водой ловушках в таких пленках.

2. Экспериментальные условия

Пленки SiO_2 с толщиной L в диапазоне 60–180 nm получали термическим окислением при 1000°C пластин кремния p - и n -типа, ориентированных в плоскости (100), в сухом кислороде (содержание паров воды $\sim 10^{-5}$ – 10^{-6} объемных долей). Использовались оборудование, газы и химические отмывки пластин, применяемые в промышленном производстве приборов с зарядовой связью. Указанные величины L сопоставимы с толщиной пленок SiO_2 в люминесцентных МОП-структурах. Для обеспечения однородной по площади лавинной инжекции (ЛИ) носителей заряда из кремния в SiO_2 концентрация легирующей примеси в приповерхностных слоях кремния составляла $(1-2) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Отсутствие существенных микронеоднородностей тока ЛИ контролировалось по методике, предложенной в работе [14]. Полевые электроды площадью $s = 3.5 \text{ mm}^2$ формировались термическим испарением алюминия в вакууме через маску на неподогреваемые подложки. Для проведения фотоинжекции электронов в SiO_2 из контактов часть электродов была изготовлена полупрозрачными. Для создания контакта с кремнием слои SiO_2 с тыльных сторон пластин стравливались, и на них напылялись слои алюминия без подогрева пластин.

Для заполнения ловушек в пленках SiO_2 использовалась лавинная инжекция электронов (из кремния p -типа) или дырок (из кремния n -типа). При ЛИ к МОП-структурам прикладывалось импульсное напряжение с частотой 100 kHz, вызывающее неравновесное обеднение и лавинный пробой в приповерхностной области кремния (энергетические диаграммы на рис. 1). Импульсы имели остроконечную форму с линейным передним фронтом и длительностью $0.7 \mu\text{s}$. Средняя величина сквозного тока горячих неосновных носителей заряда, возникающих при лавинном пробое, I_{AV} выделялась RC -фильтром, измерялась и автоматически стабилизировалась путем изменения напряжения смещения на МОП-структуре.

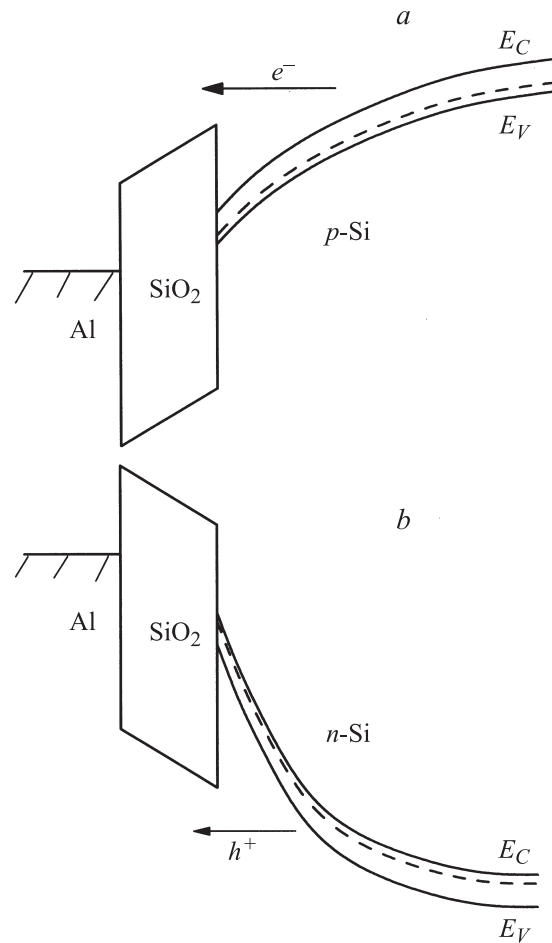


Рис. 1. Энергетические диаграммы структур Al– SiO_2 –Si, поясняющие принцип ЛИ электронов (e^-) и дырок (h^+) из Si в SiO_2 (диаграммы *a* и *b* соответственно). E_C и E_V — уровни дна зоны проводимости и потолка валентной зоны Si соответственно.

В описываемых экспериментах при ЛИ электронов I_{AV} составляла $8.0 \cdot 10^{-7} \text{ A}$, а при ЛИ дырок — $2.76 \cdot 10^{-9} \text{ A}$. Периодически (через 50 s) ЛИ прерывалась и проводилось автоматическое определение напряжения плоских зон МОП-структуры V_{FB} с использованием вольт-фарадных измерений. Блок-схема установки опубликована в [15]. В результате таких измерений определялись зависимости изменений напряжения плоских зон структуры ΔV_{FB} от времени ЛИ t . Величина ΔV_{FB} связана с эффективной (приведенной к границе раздела Si– SiO_2) плотностью ловушек, захвативших носители заряда, N_{eff} хорошо известным соотношением (см., например, [16])

$$\Delta V_{FB} = -N_{eff}qL/\epsilon\epsilon_0, \quad (1)$$

где q — элементарный заряд (отрицательный при захвате электронов и положительный при захвате дырок), ϵ — низкочастотная диэлектрическая проницаемость SiO_2 , ϵ_0 — электрическая постоянная. Эффективная плотность ловушек, захвативших носители заряда, свя-

зана с реальной плотностью N соотношением

$$N_{\text{eff}} = NX/L, \quad (2)$$

где X — отсчитываемый от границы раздела Al–SiO₂ центр тяжести (центроид) ловушек, захвативших носители заряда. Видно, что эффективная плотность ловушек может возрасти вследствие увеличения как N , так и X . Отметим, что величины N и N_{eff} определяются как захватившими носители заряда ловушками в объеме пленки, так и зарядами на возникающих при ЛИ поверхностных состояниях [9].

Для определения реальной плотности N_V ловушек, захвативших электроны в объеме пленки SiO₂, и их отсчитываемого от границы Al–SiO₂ центроида X_V использовался метод вольт-амперных характеристик (ВАХ) тока фотоинъекции (ФИ) электронов из контактов [17,18], который ранее применялся и кратко описан, например, в работах [12,14]. Для осуществления ФИ полупрозрачные электроды через монохроматор МДР-2 освещали излучением ксеноновой лампы ДКСШ-1000 с энергией квантов 4.7 eV. Величина тока ФИ (порядка нескольких единиц на 10⁻⁹ А) была недостаточна для заметного изменения зарядового состояния SiO₂ в процессе измерений ВАХ тока ФИ в пленках, не подвергавшихся ЛИ дырок. Смещения ВАХ тока ФИ электронов из кремния ΔV_+ и из Al-электрода ΔV_- на участках, где ВАХ до и после ЛИ электронов параллельны (что наблюдается обычно при достаточно больших напряжениях), позволяют определять N_V и X_V по формулам [14,18]

$$X_V/L = \Delta V_+ / (\Delta V_+ - \Delta V_-), \quad (3)$$

$$N_V = \epsilon \epsilon_0 (\Delta V_- - \Delta V_+) / Lq. \quad (4)$$

Графические пояснения к определению величин ΔV_+ и ΔV_- даны при обсуждении экспериментальных результатов. Различия величин N_V и N , а также X_V и X могут быть обусловлены тем, что метод ВАХ тока ФИ электронов, согласно теоретическим расчетам [17,18], не чувствителен к зарядам, захваченным вблизи межфазных границ раздела (на расстояниях, меньших чем ~ 2 nm). Таким образом, метод ВАХ тока ФИ электронов практически нечувствителен к генерации поверхностных состояний при ЛИ в МОП-структурах в отличие от методов, основанных на емкостных измерениях.

Все эксперименты выполнены при комнатной температуре.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены зависимости ΔV_{FB} от времени ЛИ электронов для образцов, полученных на частях одной окисленной пластины кремния, но находившихся на воздухе до напыления электродов при нормальной влажности и комнатной температуре разное время t_x . Толщина пленки SiO₂ составляла 100 nm.

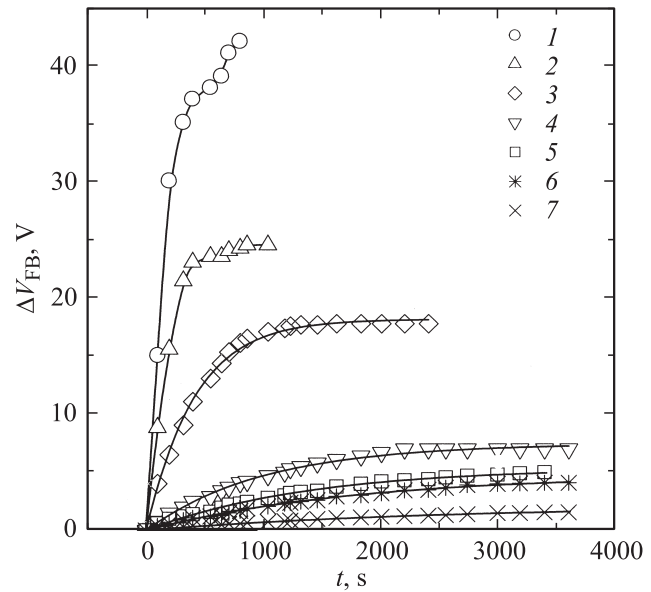


Рис. 2. Зависимости изменений напряжения плоских зон структур Al–SiO₂–Si, полученных на частях одной окисленной пластины кремния, от времени ЛИ электронов. Al напылен через 2 года (1), 3 месяца (2), 1 месяц (3), 7 дней (4), 24 h (5) и 1 h (6, 7) после окисления. Кривая 7 соответствует отжигу Al–SiO₂–Si на воздухе при 480°C в течение 15 min. Хранение на воздухе при нормальных условиях. Измерения в течение 24 h после напыления Al.

Измерения проводились не позднее 24 h после напыления электродов. Исползованная техника не позволяла полностью исключить контакт Si–SiO₂-структур с атмосферным воздухом естественной влажности до напыления Al. Подобные изменения эффективной плотности ловушек электронов при хранении Si–SiO₂-структур на воздухе описывались и ранее (см., например, [12]), но в более узком диапазоне и при меньшем количестве значений t_x . Ранее было доказано [12,14], что наблюдаемые в результате длительного хранения Si–SiO₂-структур на воздухе изменения кинетики $\Delta V_{\text{FB}}(t)$, включая рост эффективной плотности ловушек, обусловлены воздействием на пленки SiO₂ паров воды, поскольку осушка воздуха с использованием фосфорного ангидрида практически предотвращала изменение кинетики при времени хранения свыше $t_x = 1$ h. Детальные исследования параметров ловушек электронов [14] показали, что под воздействием паров воды при комнатной температуре происходит увеличение не только эффективной, но и реальной плотности ловушек, а также центроида и эффективных сечений захвата электронов σ . Доминирующие по плотности связанные с водой ловушки электронов обычно имеют $\sigma \sim 10^{-18} - 10^{-17}$ cm² [14].

Для выяснения причин образования ловушек при временах контакта Si–SiO₂-структур с атмосферным воздухом, не превышающих 1 h, в настоящей работе были выполнены эксперименты по измерению X_V и N_V для пленок SiO₂ различной толщины, но охлаждавшихся

и контактировавших с атмосферным воздухом в практически одинаковых условиях. Образцы охлаждались до комнатной температуры в потоке сухого кислорода вместе с печью и затем находились в контакте с неосушенным воздухом одно и то же время (в течение 1 h). В описанных условиях эксперимента центроид ловушек при максимальном их заполнении практически не зависел от L , и составлял $\sim 11\text{--}12\text{ nm}$ во всем исследованном (указанном выше) диапазоне толщин SiO_2 . Величина N_V в этих эксперимента также практически не зависела от L и составляла $\sim 1 \cdot 10^{13}\text{ cm}^{-2}$. Если окисленные пластины выгружались из печи в нагретом состоянии, а затем также находились на воздухе до напыления алюминия при нормальных условиях в течение 1 h, то величина X_V составляла $\sim 17\text{--}37\text{ nm}$ в зависимости от скорости выгрузки пластин из печи. Плотность ловушек при $t_x = 1\text{ h}$ для образцов, изготовленных в разное время, составляла $(0.4\text{--}1) \cdot 10^{13}\text{ cm}^{-2}$, а для максимальных t_x значение N_V увеличивалось до $\sim 2 \cdot 10^{13}\text{ cm}^{-2}$. Эти результаты в рамках модельных представлений работ [12,14] объясняются тем, что молекулы воды (эффективный радиус 0.132 nm [19]) способны проникать на значительную глубину в исследованные пленки SiO_2 при комнатной температуре из-за наличия пор и структурных каналов, вероятный эффективный радиус которых, согласно [20,21], составляет около 0.4 nm , а плотность $\sim 10^{13}\text{ cm}^{-2}$ [12]. Естественно, что в нагретые пленки молекулы воды могут проникать на большую глубину быстрее. Из этого следует, что для предотвращения

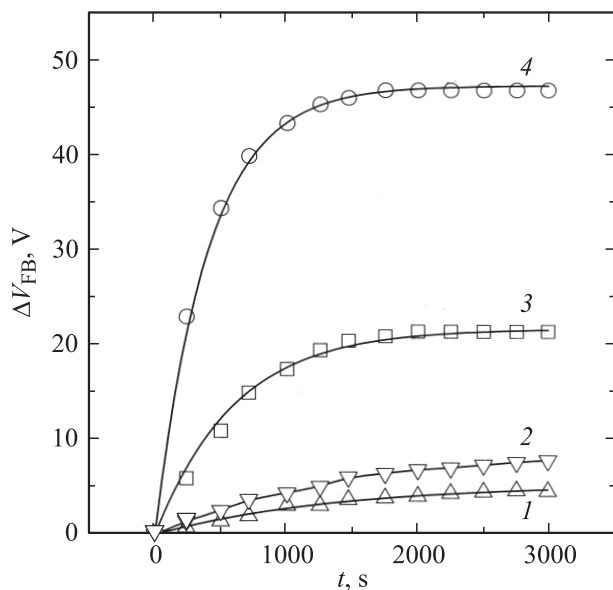


Рис. 3. Зависимости изменений напряжения плоских зон структур $\text{Al-SiO}_2\text{-Si}$, полученных на частях одной и той же окисленной пластины кремния, от времени ЛИ электронов. Al напылен через 1 h (1, 2) и 1 месяц (3, 4) после окисления. Измерения в течение 24 h после напыления Al (1, 3) и через 1 год после напыления Al (2, 4). Хранение на воздухе при нормальных условиях.

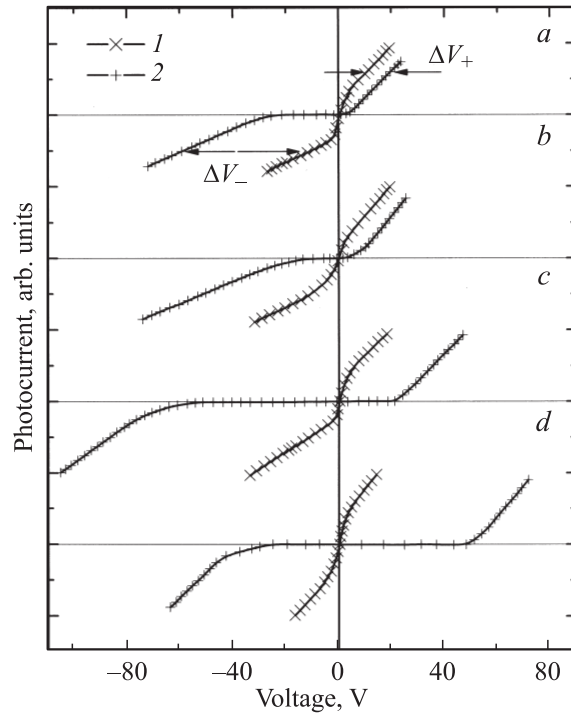


Рис. 4. ВАХ тока ФИ электронов, измеренные до (1) и после (2) ЛИ электронов при максимальном заполнении ловушек для представленных на рис. 3 структур $\text{Al-SiO}_2\text{-Si}$, полученных на частях одной и той же окисленной пластины кремния. Al напылен через 1 h (a, b) и через 1 месяц (c, d) после окисления. Измерения в течение 24 h после напыления Al (a, c) и через 1 год после напыления Al (b, d). Хранение при нормальных условиях.

образования связанных с водой ловушек требуется полностью исключить до нанесения водонепроницаемого покрытия или электродов контакт полученных в сухом кислороде структур с газовыми средами, содержащими достаточно высокую концентрацию паров воды.

В настоящей работе были проведены исследования влияния длительного хранения некоторых структур $\text{Al-SiO}_2\text{-Si}$ на кинетику $\Delta V_{\text{FB}}(t)$, а также на величину центроида и плотность ловушек электронов. Для структур, изготовленных на частях одной и той же окисленной пластины кремния при $L = 130\text{ nm}$, результаты представлены на рис. 3 и 4. На рис. 4 также даны пояснения к определению величин ΔV_+ и ΔV_- в методе ВАХ тока ФИ. В МОП-структурах, находившихся на воздухе до напыления Al в течение 1 h, величина центроида ловушек и их плотность через 24 h после окисления составляли соответственно 12 nm и $1 \cdot 10^{13}\text{ cm}^{-2}$. За год хранения этих МОП-структур величина X_V увеличилась только на 6 nm . Увеличение X_V и обусловило в основном рост N_{eff} (согласно результатам, приведенным на рис. 3). Как следует из экспериментальных ВАХ тока ФИ, представленных на рис. 4, в результате нахождения Si-SiO_2 -структур на воздухе в течение месяца плотность ловушек увеличилась до $1.75 \cdot 10^{13}\text{ cm}^{-2}$, а их центроид —

до 33 nm. Последующее хранение этих МОП-структур в течение года привело к значительному увеличению центроида ловушек (на 35 nm) при практически неизменной плотности ловушек и обусловило значительный рост N_{eff} , согласно результатам, приведенным на рис. 3.

Полученные данные демонстрируют зависимость транспортных характеристик ловушек от времени контакта Si–SiO₂-структур с атмосферным воздухом естественной влажности. Как отмечалось выше, в соответствии с моделью, предложенной в [12,14], ловушками являются области конденсата молекул воды в структурных каналах и порах пленок диоксида кремния, изготовленных в сухом кислороде. Размеры отдельных областей увеличиваются по мере увеличения продолжительности контакта Si–SiO₂-структур с атмосферным воздухом естественной влажности, что приводит к росту их эффективных сечений захвата [14]. Таким образом, полученные в настоящей работе результаты в совокупности с данными работ [12,14] показывают, что параметры коллективного движения молекул воды в порах (структурных каналах), размеры которых сопоставимы с размерами отдельных молекул воды, могут в значительной мере зависеть от размеров областей конденсата молекул воды в этих порах (структурных каналах). На основании описываемых результатов можно также полагать, что система Si–SiO₂ с пленками диоксида кремния, полученными в сухом кислороде, является уникальным, но достаточно легко реализуемым на практике объектом для изучения транспортных свойств некоторых молекул, атомов и ионов в порах (структурных каналах) указанного размера. Отметим, что транспорт (в том числе коллективный) частиц в порах мембран ранее исследовался теоретически (см., например, [19]). Но, как отмечено в [19], многие проблемы, с которыми приходится сталкиваться при трактовке мембранных явлений, есть проблемы „фундаментального незнания“.

Кроме исследований связанных с водой ловушек существование такого рода структурных каналов подтверждают и эксперименты по кинетике роста пленок SiO₂ в процессе термического окисления Si в сухом кислороде. Авторы работы [22] изучили кинетику роста пленок SiO₂ в сухом кислороде в широком диапазоне толщин пленок, температур окисления, давлений сухого кислорода и определили, что часть кислорода диффундирует к границе раздела Si–SiO₂ с очень малой термической энергией активации (~ 0.4 eV). Этот результат, а также зависимость кинетики роста пленок от условий окисления авторы [22] объяснили наличием в пленках структурных каналов, через которые кислород поступает к межфазной границе, почти не взаимодействуя с диоксидом кремния. Другая часть кислорода поступает к границе раздела Si–SiO₂ через ту часть поверхности, на которой отсутствуют структурные каналы и которая характеризуется поэтому значительно большей термической энергией активации массопереноса (2.6 eV). Теоретически вопросы образования структурных каналов в пленках SiO₂ рассматривались, например, в работах [21,23–25].

Авторы этих работ объясняют существование каналов присутствием в стеклообразных пленках SiO₂, изготовленных в сухом кислороде, областей упорядоченного строения с линейными размерами в плоскости поверхности пленки 2–4 nm. Если следовать работе [21], то наиболее вероятными являются каналы, образованные семи- и восьмизвенными петлями тетраэдров SiO_{4/2}. Как отмечено в работе [26], разработка, создание и исследование свойств нанопористых структур является актуальной задачей современной физики твердого тела. Исследованные в настоящей работе структуры имеют определенные преимущества перед другими пористыми матрицами, например нанопористыми стеклами, описанными в [26]. Во-первых, технология их изготовления легко совместима с технологией интегральных схем и других электронных приборов на кремнии. Во-вторых, как следует из описываемых результатов, при изучении адсорбции в порах, например, воды могут быть использованы методы исследований, недоступные для других нанопористых структур.

На рис. 5 представлены измеренные через различное время после окисления зависимости изменений напря-

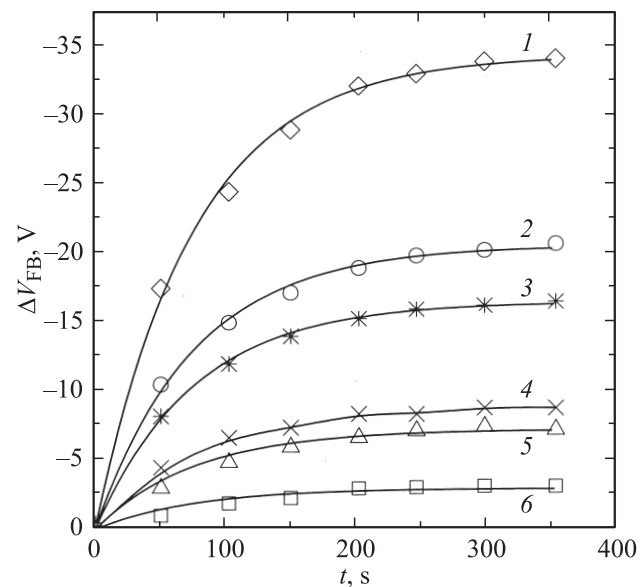


Рис. 5. Зависимости изменений напряжения плоских зон структур Al–SiO₂–Si, полученных на частях одной и той же окисленной пластины кремния, от времени ЛИ дырок. Al напылен через 1 месяц (1, 2) и 1 h (3–6) после окисления и хранения на воздухе при нормальных условиях. Измерения не позднее 24 h после напыления Al (2, 3, 5, 6), через 1 месяц после напыления Al (кривая практически совпадает с 5) и через 1 год после напыления Al (1, 4). Зависимость 5 в пределах погрешности экспериментов соответствует и условиям хранения Si–SiO₂ первоначально в течение 1 h на воздухе естественной влажности, а затем в течение 1 месяца до напыления Al в эксикаторе с воздухом, осушенным фосфорным ангидридом (измерения в течение 24 h после напыления Al). Кривая 3 — отжиг SiO₂–Si в сухом азоте в течение 15 min при 1000°C, 6 — отжиг структур Al–SiO₂–Si на воздухе при 480°C в течение 15 min.

жения плоских зон МОП-структур, изготовленных на частях одной и той же окисленной пластины кремния, от времени ЛИ дырок. Время t_x , условия выгрузки окисленных пластин из печи и время хранения структур Al–SiO₂–Si при нормальных условиях выбраны такими же, как для структур, исследованных методом ЛИ электронов, данные для которых представлены на рис. 3. Величина L составляла ~ 100 nm. Поскольку при ЛИ электронов величина I_{AV} более чем на два порядка превышала I_{AV} при ЛИ дырок, сравнение кинетик на рис. 3 и 5 показывает, что захват дырок в термических пленках SiO₂ происходит намного эффективней, чем захват электронов. Возможно, это связано с диссоциативным механизмом захвата электронов ловушками. Расчеты эффективных сечений захвата дырок на основании результатов измерений, представленных на рис. 5, и методики, описанной в [14], дали значения эффективных сечений захвата дырок $\sigma \sim (1.5-4.5) \cdot 10^{-14}$ cm². Как следует из рис. 5, хранение SiO₂–Si-структур на воздухе естественной влажности в течение месяца приводило к значительному увеличению эффективной плотности ловушек дырок по сравнению со структурами, хранившимися на воздухе только 1 h. Осушка воздуха фосфорным ангидридом или напыление электродов устраняли этот эффект. Таким образом, по крайней мере часть ловушек для дырок в исследованных структурах являлась ловушками, образование которых связано с воздействием на SiO₂–Si атмосферной влаги. Длительное (в течение года) хранение структур Al–SiO₂–Si, изготовленных при различных t_x , дало результаты, аналогичные представленным на рис. 3 для ЛИ электронов: при $t_x = 1$ h увеличение эффективной плотности ловушек было незначительным, а при $t_x = 1$ месяц эффективная плотность ловушек значительно увеличивалась. Исследования реальной плотности и центрады ловушек дырок методом ВАХ тока ФИ электронов не проводились. Прежде всего процесс измерений в этом случае может оказывать влияние на результаты из-за рекомбинации электронов с захваченными дырками. Кроме того, из-за образования в SiO₂ потенциальной ямы захваченными на ловушки дырками при одной полярности приложенного напряжения возможна инжекция электронов одновременно из обоих контактов. Как видно из рис. 5, отжиг МОП-структур при 480°C приводил к значительному уменьшению эффективной плотности ловушек дырок. Аналогичное влияние такой отжиг оказывал и на эффективную плотность ловушек для электронов (рис. 2). В рамках развиваемых модельных представлений влияние отжига было объяснено распадом областей конденсата молекул воды на более мелкие образования и их химическими реакциями, например, с Al [14]. Полученные результаты в совокупности с известным фактом, что молекулы воды и их кластеры способны эффективно захватывать дырки (см., например, [19]), указывают на одинаковую физическую природу доминирующих связанных с водой ловушек электронов и дырок в термических пленках SiO₂, изготовленных в сухом кислороде.

Отжиг SiO₂–Si-структур в течение 30 min в сухом азоте при 1000°C или водороде при 400°C не приводил к существенным изменениям кинетики заполнения ловушек при ЛИ электронов. Но указанный отжиг в азоте значительно увеличивал эффективную плотность ловушек дырок (рис. 5). Таким образом, кроме связанных с водой ловушек дырок в исследованных пленках могут присутствовать и другие ловушки дырок, образование по крайней мере, части из которых может быть связано с дефицитом кислорода в пленках SiO₂ при высокотемпературных воздействиях. Такие представления согласуются и с результатами других исследований. Этими ловушками, например, могут быть кислородные вакансии вблизи границы раздела SiO₂–Si (см., например, [27]).

4. Заключение

В работе представлены новые данные о свойствах и параметрах связанных с водой ловушек электронов в термических пленках SiO₂, полученных в сухом кислороде, подтверждающие предложенную в [14] модель ловушек. Полученные результаты показывают, что эти ловушки способны захватывать и дырки, причем со значительно большей эффективностью, чем электроны. Исследованы изменения параметров ловушек при длительном хранении структур Al–SiO₂–Si в нормальных условиях. В рамках развиваемых модельных представлений результаты работы свидетельствуют о том, что параметры коллективного движения молекул воды в порах (структурных каналах), размеры которых сопоставимы с размерами отдельных молекул воды, в значительной мере могут зависеть от размеров областей конденсата молекул воды в этих порах (структурных каналах). Результаты работы могут найти применение при создании МОП-структур и приборов с минимальными деградационными характеристиками, при разработке технологий и физических принципов электролюминесцентных МОП-структур, при исследованиях транспортных свойств некоторых молекул, атомов и ионов в порах (структурных каналах), размеры которых сопоставимы с размерами самих этих объектов. Представленные результаты в более общем смысле показывают, что полученные в сухом кислороде SiO₂–Si-структуры могут являться основой для новых нанотехнологий, поскольку содержат высокую плотность пор (структурных каналов), эффективный диаметр которых по оценкам может быть даже несколько меньше, чем 1 nm.

Автор благодарен С.П. Патракееву за помощь при изготовлении SiO₂–Si-структур.

Список литературы

- [1] J.F. Chen, S.-Y. Chen, K.-M. Wu, C.M. Liu. Appl. Phys. Lett. **93**, 223 504 (2008).
- [2] W. Goes, M. Karner, V. Sverdlov, T. Grasser. IEEE Proc. of 15th IPFA-2008. Singapore (2008). P. 249.

- [3] A. Kanjilal, L. Rebohle, W. Skorupa, M. Helm. *Appl. Phys. Lett.* **94**, 101916 (2009).
- [4] J.M. Sun, W. Skorupa, T. Dekorsy, M. Helm, A.M. Nazarov. *Opt. Mater.* **27**, 1050 (2005).
- [5] L. Rebohle, J. Lehmann, S. Prucnal, A. Kanjilal, A. Nazarov, I. Tyagulskii, W. Skorupa, M. Helm. *Appl. Phys. Lett.* **93**, 071908 (2008).
- [6] J.M. Sun, W. Skorupa, T. Dekorsy, M. Helm, L. Rebohle, T. Gebel. *J. Appl. Phys.* **97**, 123513 (2005).
- [7] J.M. Sun, S. Prucnal, W. Skorupa, T. Dekorsy, A. Mücklich, M. Helm, L. Rebohle, T. Gebel. *J. Appl. Phys.* **99**, 103102 (2006).
- [8] J.M. Sun, S. Prucnal, W. Skorupa, M. Helm, L. Rebohle, T. Gebel. *Appl. Phys. Lett.* **89**, 091908 (2006).
- [9] А.М. Емельянов, В.В. Голубев. *ФТП* **28**, 2086 (1994).
- [10] C. Venson, A. Albadri, M.J. Joyce, R.A. Price. *J. Appl. Phys.* **100**, 044505 (2006).
- [11] М.С. Дунаевский, А.Н. Титков, С.Ю. Ларкин, А.Б. Спешилова, С.Е. Александров. С. Bonafos, A. Claverie, R. Laho. *Письма в ЖТФ* **33**, 20, 80 (2007).
- [12] А.М. Емельянов, В.Г. Коссов, В.В. Голубев, Г.О. Карапетян. *Поверхность. Физика, химия, механика* 2, 77 (1988).
- [13] А.М. Емельянов. *Поверхность. Физика, химия, механика* 6, 153 (1991).
- [14] А.М. Емельянов. *Микроэлектроника* **15**, 434 (1986).
- [15] А.М. Емельянов, С.П. Патракеев, В.Г. Коссов. *Электрон. техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы* 4, 17 (1991).
- [16] В.А. Гуртов. *Основы физики структур металл-диэлектрик-полупроводник*. ПГУ, Петрозаводск (1983). 92 с.
- [17] R.J. Powell. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-17**, 41 (1970).
- [18] R.J. Powell, C.N. Berglund. *J. Appl. Phys.* **42**, 4390 (1971).
- [19] В.Я. Антонченко. *Микроскопическая теория воды в порах мембран*. Наук. думка, Киев (1986). 128 с.
- [20] Н.В. Румак. *Система кремний-диоксид кремния в МОП-структурах*. Наука и техника, Минск (1986). 240 с.
- [21] A.G. Revesz, H.A. Schaeffer. *J. Electrochem. Soc.* **129**, 357 (1982).
- [22] A.G. Revesz, B.J. Mrstik, H.L. Hughes, D. McCarthy. *J. Electrochem. Soc.* **133**, 586 (1986).
- [23] A.G. Revesz. *Phys. Status Solidi A* **57**, 657 (1980).
- [24] A.G. Revesz. *Phys. Status Solidi A* **57**, 235 (1980).
- [25] В.С. Герасименко, А.Ю. Посудиевский. *УФЖ* **26**, 2030 (1981).
- [26] Т.Н. Василевская, Т.В. Антропова. *ФТТ* **51**, 2386 (2009).
- [27] H.S. Withan, P.M. Lenahan. *Appl. Phys. Lett.* **51**, 1007 (1987).