УДК 621.315.5 *Оригинальная статья*

Эффекты переноса заряда в структурах Me-Al_2O_3-SiO_2-Si

Г.А. Мустафаев[1], Н.В. Черкесова[1], А.Г. Мустафаев[2]
[1]ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»
360004, Россия, Нальчик, ул. Чернышевского, 173
[2]ГАОУ ВО «Дагестанский государственный университет народного хозяйства»
367008, Россия, Махачкала, ул. Джамалутдина Атаева, 5
arslan_mustafaev@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.082

Аннотация: Цель работы является экспериментальное исследование эффектов переноса заряда и сдвига напряжения плоских зон в структурах металл-Al_2O_3-SiO_2-*Si* в условиях высокотемпературной обработки и приложения электрического смещения. Установлено, что при отрицательном смещении формируется «мгновенная» поляризационная компонента сдвига, тогда как при положительном смещении дополнительно проявляется термически активируемая «медленная» компонента с временем задержки ~10 минут при 125°C. Зависимость сдвига от приложенного напряжения при 190°C носит линейный характер. Определено, что перенос заряда от границы металл–Al_2O_3 к границе *Si*-SiO_2 обусловлен термическим освобождением носителей из объёмных ловушек с энергией активации 1,2 эВ. Выявлена корреляция между толщиной оксида алюминия и стабильностью параметров структуры, при этом минимальная плотность подвижного заряда фиксируется при толщине слоя 70 нм. Практическая значимость заключается в оптимизации толщины слоя Al_2O_3 до 70 нм, обеспечивающей максимальную стабильность электрических характеристик металл-диэлектрик-полупроводник-структур при комбинированных термических и электрических нагрузках. Полученные закономерности и физическая модель переноса заряда могут быть использованы при технологическом проектировании надёжных изделий микроэлектроники.

Ключевые слова: металл-диэлектрик-полупроводник-структуры, напряжение плоских зон, вольт-фарадные характеристики, высокотемпературная обработка, многослойный диэлектрик, ловушки заряда, стабильность параметров.

Мустафаев Гасан Абакарович – д.т.н., профессор кафедры электроники и цифровых информационных технологий ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет»
Черкесова Наталья Васильевна – к.ф.-м.н., доцент кафедры электроники и цифровых информационных технологий ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет»
Мустафаев Арслан Гасанович – д.т.н., профессор кафедры информационных технологий и информационной безопасности ГАОУ ВО «Дагестанский государственный университет народного хозяйства»

Original paper

Charge transfer effects in Me-Al_2O_3-SiO_2-Si structures

G.A. Mustafayev[1], N.V. Cherkesova[1], A.G. Mustafayev[2]
[1]Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia
[2]Dagestan State University of National Economy, Makhachkala, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.082

Abstract: The aim of the work is to experimentally study the effects of charge transfer and flat-band voltage shift in metal-Al_2O_3-SiO_2-*Si* structures under high-temperature treatment and applied bias. It was found that a negative bias resulted in the formation of an «instantaneous» polarization component of the shift, while a positive bias additionally produced a thermally activated «slow» component with a delay time of ~10 min at 125°C. The dependence of the shift on applied voltage at 190°C is linear. It was determined that charge transfer from the metal-Al_2O_3 interface to the *Si*-SiO_2 interface was caused by the thermal release of carriers from bulk traps with an activation energy of 1,2 eV. A correlation was found between aluminum oxide thickness and the stability of the structure's parameters, with the minimum mobile charge density observed at a layer thickness of 70 nm. Practical significance is as

© Г.А. Мустафаев, Н.В. Черкесова, А.Г. Мустафаев, 2026

follows: optimizing the Al_2O_3 layer thickness to 70 nm ensures maximum stability of the electrical characteristics of metal-insulator-semiconductor structures under combined thermal and electrical loads. The obtained patterns and physical model of charge transport can be used in the technological design of reliable microelectronic devices.
Keywords: metal-insulator-semiconductor-structures, flat-band voltage, capacitance-voltage characteristics, high-temperature processing, multilayer dielectric, charge traps, stability of parameters.

Gasan A. Mustafayev – Dr. Sc., Professor, Department of Electronics and Digital Information Technologies, Kabardino-Balkarian State University
Natalya V. Cherkesova – Ph. D., Associate Professor, Department of Electronics and Digital Information Technologies, Kabardino-Balkarian State University
Arslan G. Mustafayev – Dr. Sc., Professor, Department of Information Technologies and Information Security, Dagestan State University of National Economy, ORCID: 0000-0003-3463-4303

Поступила в редакцию/received: 26.07.2026; после рецензирования/revised: 29.08.2026; принята/accepted: 04.09.2026.

1. Введение

В современной микроэлектронике структуры металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) с двойным или многослойным диэлектрическим затвором находят широкое применение благодаря улучшенным барьерным свойствам, повышенной пробивной прочности и возможности точной настройки пороговых характеристик. Особый интерес представляют системы на основе термического и осаждённого Al_2O_3, которые сочетают высокое качество границы раздела с высокой диэлектрической проницаемостью, химической стойкостью и улучшенной инжекционной барьерной способностью оксида алюминия. Однако надёжность таких структур в значительной степени определяется поведением зарядов в объёме диэлектрика и на межфазных границах в условиях эксплуатации, сопровождающихся термическими и электрическими нагрузками [1].

Согласно данным исследований [2-5], перенос заряда в многослойных диэлектрических плёнках носит сложный характер и обусловлен совокупностью механизмов: электронной и ионной поляризации, дрейфа подвижных ионов (преимущественно Na^+, K^+, OH^-), термически активированной эмиссии носителей из объёмных и поверхностных ловушек, а также туннельных процессов в сильных полях. В структурах с двойным диэлектриком $SiO_2 - Al_2O_3$ наблюдается пространственное разделение зарядов по слоям, что приводит к появлению нескольких кинетических компонент сдвига напряжения плоских зон. «Мгновенная» компонента, как правило, связывается с быстрой поляризацией и захватом носителей на мелких ловушках, тогда как «медленная» компонента отражает процессы термической активации, преодоления потенциальных барьеров и дрейфа заряда к границе раздела $Si - SiO_2$. Энергии активации таких процессов, согласно литературным данным, варьируются в диапазоне 0,1-1,5 эВ в зависимости от технологии

осаждения, плотности дефектов и режимов термообработки [6-9]. Несмотря на накопленный экспериментальный материал, вопросы количественного разделения компонент сдвига V_{FB}, влияния толщины Al_2O_3 на кинетику переноса заряда и оптимизации геометрии затвора для обеспечения долговременной стабильности приборов остаются недостаточно изученными.

Практическая значимость настоящего исследования обусловлена потребностью микроэлектронной промышленности в надёжных затворных структурах, устойчивых к неконтролируемому смещению порогового напряжения при длительной эксплуатации в условиях повышенных температур и электрических полей. Стабильность параметров МДП-транзисторов, элементов энергонезависимой памяти, силовых ключей и датчиков напрямую зависит от способности диэлектрического стека удерживать или контролируемо транспортировать заряд без деградации электрофизических характеристик. Понимание механизмов переноса и захвата заряда в системе $Al_2O_3 - SiO_2 - Si$ позволяет прогнозировать поведение приборов, оптимизировать технологические режимы и выбирать оптимальные толщины слоёв, что в конечном итоге повышает выход годных кристаллов, снижает энергопотребление и увеличивает ресурс микроэлектронных устройств.

Целью данной работы является экспериментальное исследование эффектов переноса заряда в структурах металл-$Al_2O_3 - SiO_2 - Si$ при высокотемпературной обработке и электрическом смещении, а также выявление закономерностей, определяющих стабильность их электрических характеристик. Новизна работы заключается в количественном разделении «мгновенной» и «медленной» компонент сдвига напряжения плоских зон в структурах металл-$Al_2O_3 - SiO_2 - Si$, экспериментальном определении энергии активации медленной компоненты и установлении оптимальной толщины слоя Al_2O_3, обеспечивающей минимальную плотность подвижного заряда при сохранении стабильности параметров МДП-приборов.

2. Методика эксперимента

Исследуемые структуры металл-$Al_2O_3 - SiO_2 - Si$ изготавливались на подложках кремния n-типа проводимости с ориентацией (100) и удельным сопротивлением 4,5 Ом·см. Технологический процесс включал следующие этапы. Слой термического SiO_2 выращивали в потоке осушенного кислорода при температуре 1200°C в течение 14 минут. Контроль толщины оксида осуществлялся эллипсометрически (прибор ЛЭФ-3М) и методом спектральной рефлектометрии [10]. Погрешность определения толщины

составляла ±3 нм для слоя SiO_2 и ±2 нм для слоя Al_2O_3. Слой оксида алюминия осаждали из паровой фазы в результате реакции взаимодействия $AlCl_3 + CO_2 + H_2$ на поверхности кремния, покрытого слоем SiO_2, при температуре 850°C со скоростью роста 12 нм/мин. Толщина слоя Al_2O_3 варьировалась в диапазоне 50-140 нм с шагом 20 нм для исследования влияния геометрии затвора на параметры переноса заряда. Площадь затворных контактов составляла $1{,}0\times10^{-3}$ см^2; отклонение геометрических размеров контролировалось оптической микроскопией с погрешностью не более ±5%.

Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) регистрировались на установке Е7-20 в квазистатическом режиме при частоте 1 МГц. Погрешность измерения ёмкости составляла ±1%, напряжения смещения ±10 мВ. Температурная стабилизация образцов осуществлялась в термокамере с точностью поддержания температуры ±0,5°C в диапазоне 25-260°C [11]. Напряжение смещения на затворе задавалось в интервале ±20 В, что соответствовало максимальной напряжённости электрического поля в SiO_2 около 1,5×106 В/см – ниже порога инжекции носителей из металлического контакта. Для каждого времени обработки строилась зависимость $\Delta V_{FB}(V_B)$. Линейная аппроксимация выполнялась методом наименьших квадратов в диапазоне $V_B = \pm$(2-20) В. Коэффициент наклона k интерпретировался как вклад «мгновенной» компоненты $\Delta V_{FB} = k \cdot V_B$. Свободный член b принимался за вклад медленной компоненты $\Delta V_{FB} = b(t)$.

Для обеспечения воспроизводимости результатов каждая серия измерений проводилась на группе из 10 структур, изготовленных в рамках одной технологической партии. Из каждой партии для детального анализа отбиралось 5-7 образцов, демонстрирующих наиболее близкие исходные параметры (ёмкость накопления, напряжение плоских зон, плотность поверхностных состояний). Все измерения повторялись не менее трёх раз для каждого образца с полным циклом нагрева–охлаждения. Разброс значений сдвига V_{FB} между идентичными образцами не превышал ±8 мВ при температуре 150°C и ±3 мВ при комнатной температуре.

Для исключения влияния дрейфа измерительной аппаратуры перед каждой серией экспериментов проводилась калибровка по эталонным МДП-конденсаторам. Дополнительный контроль осуществлялся путём периодического измерения ВФХ на контрольных образцах [12], не подвергавшихся высокотемпературной обработке: сдвиг V_{FB} на таких структурах не превышал ±2 мВ в течение всего цикла измерений.

Для минимизации влияния посторонних примесей (в частности, ионов натрия) все этапы изготовления структур проводились в чистых

помещениях класса 1000. Перед измерением образцы подвергались очистке в ультрафиолет-озоновой камере в течение 10 минут.

3. Результаты

Наблюдая сдвиг напряжения плоских зон до и после высокотемпературной обработки, методом ВФХ исследовались эффекты переноса заряда в структурах металл- $Al_2O_3 - SiO_2 - Si$. Высокотемпературная обработка состояла в нагреве образцов до некоторой температуры, выдержки его при этой температуре в течение определенного времени и последующего быстрого охлаждения до комнатной температуры при смещении. Температура обработки менялась в интервале от 20°C до 260°C. Температура 260°C была выбрана с целью свести к минимуму эффект захвата носителей ловушками на границе $Si - SiO_2$. Напряжение смещения было меньше, чем величина, соответствующая электрическому полю в SiO_2, около 1,5×106 В/см (20 В для структуры 50 нм Al_2O_3 100 нм SiO_2), чтобы избежать инжекции электронов из металлического контакта. Время обработки менялось в интервале от 20 секунд до 6 часов. Измеренные сдвиги напряжения плоских зон после высокотемпературной обработки были меньше 100 мВ при 150°C и смещении на затворе -10 В. Сдвиг плоских зон при температуре 20°C был меньше 10 мВ. Сдвиги напряжения плоских зон V_{FB} имели знак противоположный по отношению к приложенному напряжению. На рис. 1 приведена зависимость сдвига напряжения плоских зон от времени обработки для различных температур.

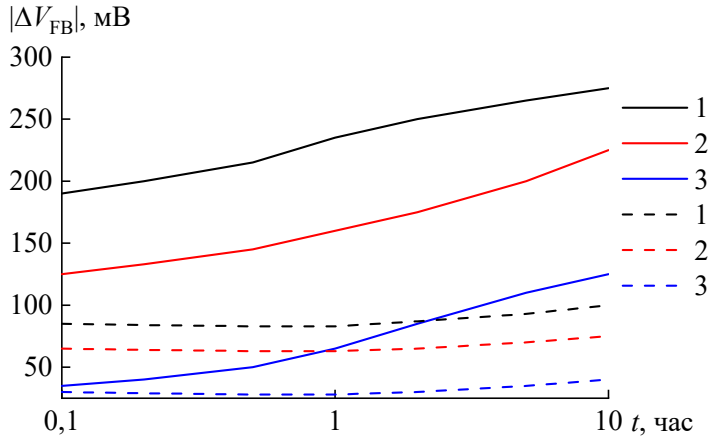

Рис. 1. Зависимость сдвига напряжения плоских зон от времени обработки; параметр температура: 1 – 190°C, 2 – 160°C, 3 – 125°C. Сплошные линии смещение +10 В, штриховые -10 В соответственно.

Из рис. 1 видно, что при смещении наблюдается «мгновенный» сдвиг и она увеличивается с ростом температуры. При положительном смещении, возникает «мгновенный» сдвиг, а далее следует медленный

сдвиг, который увеличивается почти пропорционально логарифму времени. Медленный сдвиг наблюдается и при отрицательном смещении, но при этом он значительно меньше. Медленный сдвиг имеет время задержки около 10 мин при температуре 125°C. При более высокой температуре и положительном смещении наблюдаемые сдвиги возрастают даже для минимального времени обработки. Анализ полученных зависимостей позволяет заключить, что «мгновенная» компонента всегда присутствует при положительном смещении и высоких температурах, причём её величина близка к сдвигу, наблюдаемому при отрицательном смещении. Таким образом, при отрицательном смещении на затворе реализуется одиночная «мгновенная» компонента сдвига напряжения плоских зон, тогда как при положительном смещении проявляются две компоненты – «мгновенная» и медленная, логарифмически увеличивающаяся со временем.

Как видно из рис. 1, четко разделить «мгновенную» и «медленную» компоненты можно на основе зависимостей ΔV_{FB} от приложенного смещения. На рис. 2 приведена зависимость сдвига напряжения плоских зон от приложенного смещения V_B при температуре 190°C с временем обработки в качестве параметра. Сдвиг является линейной функцией приложенного напряжения, наклон зависимости остается почти постоянным. Можно считать, что за наклон зависимостей отвечает «мгновенная» компонента, величина которой пропорциональна приложенному смещению, тогда как точка пересечения с вертикальной осью характеризует «медленную» компоненту, слабо зависящую от напряжения и логарифмически растущую со временем обработки.

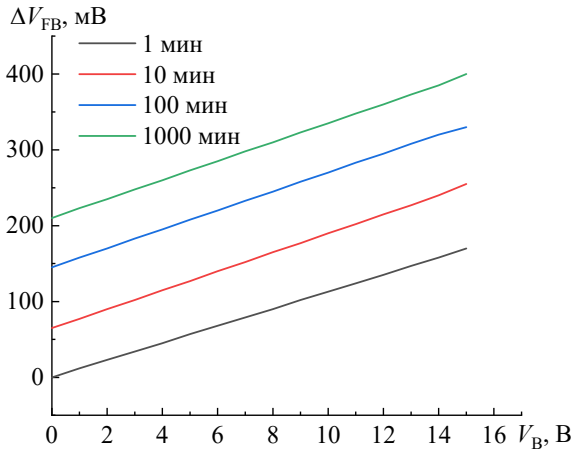

Рис. 2. Зависимость сдвига напряжения плоских зон от приложенного смещения при температуре 190°C при различном времени обработки.

Аналогичные зависимости при отрицательных смещениях содержат только «мгновенную» компоненту. При смене полярности смещения V_B,

ΔV_{FB} линейно снижается до 0,5 В, а затем быстро уменьшается до нуля при снятии смещения V_B.

Из зависимостей ΔV_{FB} от приложенного смещения V_B можно определить энергию активации этих двух компонент. Энергия активации «мгновенной» компоненты равна 0,15 эВ. Так как для положительного и отрицательного смещения, при одинаковой температуре, смещение напряжения плоских зон, вызываемое «мгновенной» компонентой, одинаково, то вычитанием получаем медленную компоненту. На рис. 3 показана зависимость времени задержки от величины, обратной температуре обработки.

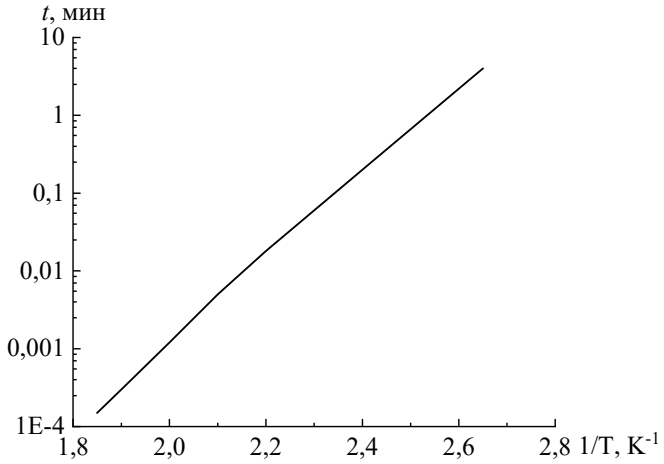

Рис. 3. Зависимость времени задержки от величины, обратной температуре обработки, при смещении +10 В.

Полученная температурная зависимость времени задержки «медленной» компоненты характеризует термически активируемый процесс с энергией 1,2 эВ, что согласуется с типичными значениями энергии активации переноса подвижных ионов через диэлектрик при преобладании процесса освобождения из ловушек [13]. Близкие значения энергии активации для процессов переноса в Al_2O_3 получены в [14] при исследовании температурной зависимости тока в структурах Al / Al_2O_3. Предлагаемая физическая модель заключается в следующем. «Мгновенная» компонента, линейно зависящая от приложенного смещения и проявляющаяся при смещении любой полярности, обусловлена поляризацией и быстрым захватом носителей на мелких ловушках. «Медленная» компонента, наблюдаемая преимущественно при положительном смещении и активируемая при повышенных температурах, связана с освобождением из ловушек ограниченного положительного заряда и его последующим переносом по направлению к границе $Si - SiO_2$ либо с движением отрицательного заряда от этой границы.

Для выяснения вопроса о том, в каком диэлектрике происходит движение заряда, исследовались структуры с различной толщиной Al_2O_3. Исследование зависимости сдвига напряжения плоских зон от толщины слоя SiO_2 при фиксированной толщине Al_2O_3 (50 нм), температуре 225°C и времени обработки 10 мин показало линейный характер роста ΔV_{FB} с увеличением толщины диэлектрика. Для двух образцов из одной технологической партии были получены значения плотности подвижного заряда 1,0×1010 см$^{-2}$ и 3,06×1010 см$^{-2}$, что свидетельствует о воспроизводимости результатов в рамках одной партии. Наблюдаемая линейная зависимость подтверждает, что заряд перемещается через весь слой SiO_2, а не локализуется в приграничных областях.

Такое значительное изменение подвижного заряда в структуре диэлектрика от образца к образцу связано с подвижными ионными дефектами диэлектрика. Для дополнительной проверки предлагаемой модели был проведён эксперимент с циклическим изменением напряжения от положительного к отрицательному на образце, ранее не подвергавшемся высокотемпературной обработке. В первом цикле заряд медленно перемещается от границы металл-Al_2O_3 через слой Al_2O_3, освобождаясь из ловушек с энергией активации порядка 1,2 эВ, а далее, пройдя через оксид алюминия, он быстро дрейфует к границе $Si-SiO_2$. Во втором цикле заряд быстро возвращается к границе $SiO_2-Al_2O_3$, где вновь захватывается ловушками, но уже с меньшей эффективностью, поэтому в последующих циклах перенос происходит существенно быстрее.

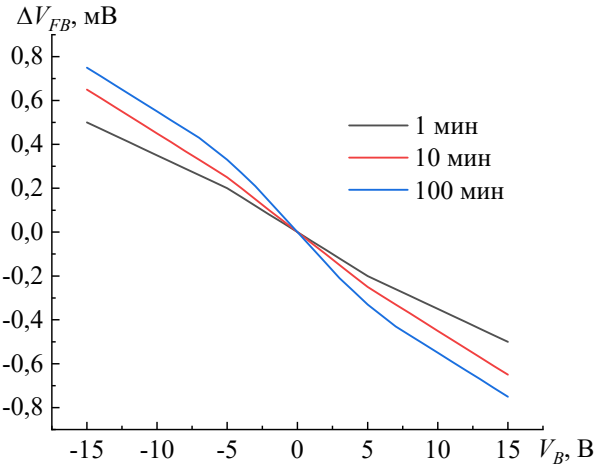

Рис. 4. Зависимости сдвига напряжения плоских зон от приложенного напряжения; параметр – время обработки.

Для структуры с толщиной слоя Al_2O_3 110 нм и SiO_2 100 нм при температуре 225°C были получены значения сдвига напряжения плоских зон (см. рис. 4).

Наблюдается систематическое увеличение сдвига с ростом времени обработки, что согласуется с кинетикой медленной компоненты, обусловленной термически активируемым переносом заряда. Наклон зависимостей $\Delta V_{FB}(V_B)$ остаётся практически неизменным для всех времён обработки, что подтверждает доминирующий вклад «мгновенной» компоненты в поляризационный отклик структуры.

Сравнительный анализ структур с различной толщиной слоя Al_2O_3 выявил качественное различие в механизмах переноса заряда. Для образца с исходной толщиной Al_2O_3 140 нм (после термообработки при 225°C в течение 10 мин) наблюдается преимущественно поляризационный сдвиг, линейно зависящий от приложенного напряжения, что указывает на доминирование «мгновенной» компоненты.

После химического стравливания слоя Al_2O_3 до толщины 50 нм в той же структуре проявляются обе компоненты сдвига: линейная (поляризационная) и логарифмически растущая со временем (обусловленная переносом заряда). Аналогичное поведение характерно для образцов с исходно выращенным слоем Al_2O_3 толщиной 50 нм.

Этот результат свидетельствует о том, что в толстых слоях Al_2O_3 (140 нм) заряд эффективно захватывается глубокими ловушками, что подавляет медленную компоненту переноса. Уменьшение толщины слоя до 50 нм снижает механическое напряжение в диэлектрике, уменьшает плотность глубоких ловушек и облегчает термоактивированное освобождение заряда, что приводит к проявлению обеих кинетических компонент.

Таблица 1. Зависимость параметров МДП-структур от толщины Al_2O_3 (T = 225°C, V_B = +10 В, t = 100 мин).

Толщина Al_2O_3, нм	ΔV_{FB}, мВ	Время задержки τ, мин	Плотность подвижного заряда Q_m, 10^{10} см$^{-2}$
50	18 ± 3	8 ± 2	3,2 ± 0,4
70	24 ± 2	22 ± 3	2,8 ± 0,2
90	31 ± 4	45 ± 5	3,5 ± 0,5
110	39 ± 5	89 ± 8	4,1 ± 0,6
140	52 ± 7	178 ± 15	5,3 ± 0,8

Для определения оптимальной толщины (минимума суммарного вклада нестабильностей) слоя оксида алюминия в структуре металл-$Al_2O_3 - SiO_2 - Si$ был проведён систематический анализ зависимости ключевых параметров стабильности от толщины слоя Al_2O_3. Исследовались образцы с толщиной Al_2O_3 в диапазоне 50-140 нм с шагом 20 нм при фиксированной толщине термического SiO_2 (100 ± 3 нм).

Плотность подвижного заряда Q_m достигает минимума при толщине 70 нм. Учитывая, что данная толщина обеспечивает наименьшее значение Q_m при приемлемом уровне поляризационного сдвига и умеренном времени отклика, она может быть рекомендована как оптимальная для обеспечения стабильности параметров МДП-приборов в исследованном диапазоне температур и напряжений. Результаты представлены в Таблице 1.

4. Заключение

Проведённые экспериментальные исследования позволили установить, что кинетика переноса заряда в структурах металл-$Al_2O_3 - SiO_2 - Si$ определяется балансом между быстрой поляризационной составляющей и термически активируемой эмиссией носителей из объёмных ловушек. Выявленная линейная зависимость «мгновенной» компоненты сдвига от толщины слоя Al_2O_3 в сочетании с экспоненциальным ростом времени задержки «медленной» компоненты демонстрирует возможность технологического управления стабильностью диэлектрического стека за счёт оптимизации его геометрических параметров.

На основе анализа кинетических характеристик и плотности подвижного заряда установлено, что толщина оксида алюминия 70 нм является оптимальной. При данном значении достигается минимальная плотность захваченного заряда при сохранении сбалансированного поляризационного отклика, что обеспечивает идентичную долговременную стабильность пороговых характеристик как для $n-$, так и для $p-$канальных приборов в широком диапазоне рабочих температур и электрических смещений.

Полученные закономерности обладают выраженной практической значимостью для микроэлектронной промышленности. Рекомендованная толщина Al_2O_3 в комбинированном диэлектрическом затворе позволяет существенно повысить надёжность приборов, эксплуатируемых в условиях комбинированных термических и электрических нагрузок. Разработанные физические модели и технологические рекомендации могут быть непосредственно применены при проектировании силовых МДП-структур и элементов энергонезависимой памяти, где критически важны минимизация паразитного переноса заряда, устойчивость порогового напряжения и увеличение ресурса микросхем.

Библиографический список:

1. **Khosla, R.** Charge Trapping analysis of metal/Al_2O_3/SiO_2/Si gate stack for emerging embedded memories / R. Khosla, E. G. Rolseth, P. Kumar et al. // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. – 2017. – V. 17. – I. 1. – P. 80-89. DOI: 10.1109/TDMR.2017.2659760.

2. **Гриценко, В.А.** Физика диэлектрических пленок. Механизмы транспорта заряда и физические основы приборов памяти / В.А. Гриценко, Д.Р. Исламов. – Новосибирск: ИПФ СО РАН, 2017. – 351 с.
3. **Fitting, H.-J.** Selfconsistent electrical charging in insulators / H.-J. Fitting, X. Meyza, C. Guerret-Piécourt et al. // Journal of the European Ceramic Society. – 2005. – V. 25. – I. 12. – P. 2799-2803. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2005.03.143.
4. **Kim, A.S.** Application of Al_2O_3 film for stabilization of the charge properties of the SiO_2/p–Si interface / A.S. Kim, N.A. Serko, P.E. Khakuashev et al. // Russian Microelectronics. – 2023. – V. 52. – I. 8. – P. 835-841. DOI: 10.1134/S1063739723080012.
5. **Glavatskikh, A.** Self-consistent electrical charging of insulating layers and metal-insulator-semiconductor structures / A. Glavatskikh, V. S. Kortov, H.–J. Fitting // Journal of Applied Physics. – 2001. – V. 89. – I. 1. – P. 440-448. DOI: 10.1063/1.1330242.
6. **Новиков, Ю.Н.** Многофононный механизм ионизации ловушек в Al_2O_3: эксперимент и численное моделирование / Ю.Н. Новиков, В.А. Гриценко, К.А. Насыров // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2009. – Т. 89. – Вып. 10. – С. 599-602.
7. **Novikov, Y.N.** Bipolar charge transport and contact phenomena in Al_2O_3 / Y.N. Novikov, A.A. Gismatulin, B. Hallac, Y. Roizin, V. A. Gritsenko // Thin Solid Films. – 2023. – V. 781. – Art. № 140004. – 7 p. DOI: 10.1016/j.tsf.2023.140004.
8. **Patel, H.** Effective charge dynamics in Al_2O_3/SiO_2 multilayer stacks and their influence on silicon surface passivation / H. Patel, C. Reichel, A. Richter et al. // Applied Surface Science. – 2022. – V. 579. – Art. № 152175. – 8 p. DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.152175.
9. **Pantisano, L.** Impact of band structure on charge trapping in thin SiO_2/Al_2O_3/poly–Si gate stacks / L. Pantisano, L. Lucci, E. Cartier et al. // IEEE Electron Device Letters. – 2004. – V. 25. – I. 5. – P. 320-322. DOI: 10.1109/LED.2004.826534.
10. **Цепулин, В.Г.** Измерение распределения толщин многослойных пленочных структур методами спектральной рефлектометрии / В.Г. Цепухин, В.Л. Толстогузов, В.Е. Карасик и др. // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. – 2016. – № 3 (108). – С. 3-12.
11. **Гольдман, Е.И.** Определение параметров структур металл−диэлектрик−полупроводник со сверхтонким изолирующим слоем из высокочастотных вольт-фарадных характеристик / Е.И. Гольдман, Н.Ф. Кухарская, С.А. Левашов, Г.В. Чучева // Физика и техника полупроводников. – 2019. – Т. 53. – Вып. 1. – С. 46-49.
12. **Андреев, В.В.** Контроль качества диэлектрических слоёв интегральных микросхем и изделий микросистемной техники / В.В. Андреев, А.А. Столяров, Д.С. Васютин, А.М. Михальков // Наукоемкие технологии. – 2010. – № 7. – С. 44-52.
13. **Tsujide, T.** C-V shift characteristics of metal-Al_2O_3-Si and metal-Al_2O_3-SiO_2-Si structures // Japanese Journal of Applied Physics. – 1972. – V. 11. – I. 1. – P. 62-69. DOI: 10.1143/JJAP.11.62.
14. **Liu, Y**. Temperature dependence of current transport in Al/Al_2O_3 nanocomposite thin films / Y. Liu, T. P. Chen, L. Ding, et al. // Journal of Applied Physics. – 2011. – V. 110. – I. 9. – P. 096108-1-096108-3. DOI: 10.1063/1.3663313.

References:

1. Khosla R., Rolseth E.G., Kumar P. et al. Charge trapping analysis of metal/Al_2O_3/SiO_2/Si gate stack for emerging embedded memories, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2017, vol. 17, issue 1, pp. 80-89. DOI: 10.1109/TDMR.2017.2659760.
2. Gritsenko V.A., Islamov D.R. *Fizika dielectricheskikh plenok. Mekhanizmy transporta zaryada i fizicheskie osnovy priborov pamyati* [Physics of dielectric films. Charge transport mechanisms and physical basis of memory devices]. Novosibirsk, IPF SB RAS Publ., 2017, 351 p. (In Russian).
3. Fitting H.-J., Meyza X., Guerret-Piécourt C. et al. Selfconsistent electrical charging in insulators, *Journal of the European Ceramic Society*, 2005, vol. 25, issue 12, pp. 2799-2803. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2005.03.143.
4. Kim A.S., Serko N.A., Khakuashev P.E., et al. Application of Al_2O_3 film for stabilization of the charge properties of the SiO_2/p–Si interface, *Russian Microelectronics*, 2023, vol. 52, issue 8, pp. 835-841. DOI: 10.1134/S1063739723080012.
5. Glavatskikh A., Kortov V.S., Fitting H.–J. Self-consistent electrical charging of insulating layers and metal-insulator-semiconductor structures, *Journal of Applied Physics*, 2001, vol. 89, issue 1, pp. 440-448. DOI: 10.1063/1.1330242.
6. Novikov Y.N., Gritsenko V.A., Nasyrov K.A. Multiphonon mechanism of the ionization of traps in Al_2O_3:

experiment and numerical simulation, *JETP Letters*, 2009, vol. 89, issue 10, pp. 506-509. DOI: 10.1134/S0021364009100075.
7. Novikov Y.N., Gismatulin A.A., Hallac B., et al. Bipolar charge transport and contact phenomena in Al_2O_3, *Thin Solid Films*, 2023, vol. 781, art. no. 140004, 7 p. DOI: 10.1016/j.tsf.2023.140004.
8. Patel H., Reichel C., Richter A. et al. Effective charge dynamics in Al_2O_3/SiO_2 multilayer stacks and their influence on silicon surface passivation, *Applied Surface Science*, 2022, vol. 579, art. no. 152175, 8 p. DOI: 10.1016/j.apsusc.2021.152175.
9. Pantisano L., Lucci L., Cartier E. et al. Impact of band structure on charge trapping in thin SiO_2/Al_2O_3/poly–Si gate stacks, *IEEE Electron Device Letters*, 2004, vol. 25, issue 5, pp. 320-322. DOI: 10.1109/LED.2004.826534.
10. Tsepulin V.G., Tolstoguzov V.L., Karasik V.E. et al. Izmerenie raspredeleniya tolshchin mnogoslojnykh plenochnykh struktur metodami spektral'noj reflektometrii [Thickness distribution measurement of multilayer film structures by spectral reflectometry methods], *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya Priborostroenie [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering]*, 2016, no. 3 (108), pp. 3-12. (In Russian).
11. Goldman E.I., Kuharskaya N.F., Levashov S.A. et al. Determination of the parameters of metal–insulator–semiconductor structures with ultrathin insulating layer from high-frequency capacitance–voltage measurements, *Semiconductors*, 2019б vol. 53, issue 1, pp. 42-45. DOI: 10.1134/S1063782619010081.
12. Andreev V.V., Stolyarov A.A., Vasyutin D.S., Mikhal'kov A.M. Kontrol' kachestva dielektricheskikh sloyov integral'nykh mikroskhem i izdelij mikrosistemnoj tekhniki [Quality control of dielectric layers of integrated circuits and microsystem technology products], *Naukoemkie tekhnologii [Science-intensive Technologies]*, 2010, no. 7, pp. 44-52. (In Russian).
13. Tsujide T. C-V shift characteristics of metal-Al_2O_3-Si and metal-Al_2O_3-SiO_2-Si structures, *Japanese Journal of Applied Physics*, 1972, vol. 11, issue 1, pp. 62-69. DOI: 10.1143/JJAP.11.62.
14. Liu Y., Chen T.P., Ding L., et al. Temperature dependence of current transport in Al/Al_2O_3 nanocomposite thin films, *Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 110, issue 9, pp. 096108-1-096108-3. DOI: 10.1063/1.3663313.