

На правах рукописи

Бережной Игорь Геннадьевич

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЕВЫХ
МДП-СТРУКТУР С ОКСИДАМИ ГАДОЛИНИЯ, ИТТЕРБИЯ,
ЛЮТЕЦИЯ И САМАРИЯ В КАЧЕСТВЕ ДИЭЛЕКТРИКА**

01.04.10 - физика полупроводников и диэлектриков

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Самара - 1999

Работа выполнена на кафедре электроники твёрдого тела Самарского государственного университета.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Рожков В.А.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Самохвалов М.К.,
доктор физико-математических наук,
профессор Неганов В.А.

Ведущая организация: Ульяновский государственный университет.

Защита состоится "17" ноября 1999г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета К 063.94.05 при Самарском государственном университете по адресу: 443011, ул. Академика Павлова 1, аудитория 203 химико-биологического корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного университета.

Автореферат разослан "14" октября 1999г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
канд физ.-мат. наук, доцент

Жукова В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) в настоящее время составляют основу бесспорного большинства полупроводниковых приборов и интегральных схем. На их основе создаются полевые транзисторы с изолированным затвором, нелинейные конденсаторы (варикапы и фотоварикапы), приборы с зарядовой связью, элементы постоянной репрограммируемой памяти, логические устройства, электрические и тепловые переключатели и др. Кроме того, эти системы служат базой для изучения фундаментальных характеристик полупроводников и диэлектриков, позволяют исследовать новые материалы и анализировать процессы, происходящие в них на атомарном уровне. По-прежнему главными задачами этой области физики являются выявление механизмов доминирующих физических процессов, протекающих на поверхности и в области пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника, установление природы поверхностных электронных состояний. Без понимания физической природы явлений токопереноса, накопления заряда, пробоя невозможно дальнейшее эффективное развитие полупроводникового приборостроения и микроэлектроники.

Очевидными тенденциями в развитии современной электроники являются увеличение степени интегрированности и уменьшение размеров интегральных схем, повышение степени надёжности, использование материалов, которые бы соответствовали единому технологическому циклу. В связи с этим особое значение приобретает поиск новых, перспективных материалов для микро- и нанотехнологии.

Наиболее часто используемым диэлектриком в структурах МДП является оксид кремния, поскольку он является естественным окислом кремния, полупроводника, который составляет основу большинства интегральных схем. Однако возможности использования оксида кремния существенно ограничены. Причинами этого являются:

- высокая проницаемость по отношению к ряду ионов, в частности щелочных металлов, и как следствие - наличие ионных токов;
- высокая концентрация микропор, локальных напряжений и точечных дефектов на поверхности раздела оксида кремния, полученного термическим выращиванием на кремнии, и подложки. Высокие значения внутреннего поля в таком изоляторе ограничивают толщину SiO_2 до 65-70 нм;
- сравнительно низкое значение диэлектрической проницаемости оксида кремния ($\epsilon_{\text{SiO}_2}=3,9$), и как следствие - низкая крутизна передаточных характеристик МОП-транзисторов.

Есть разные способы решения указанных проблем. Наиболее радикальным и эффективным представляется поиск новых диэлектрических материалов, совместимых с кремниевой технологией, которые бы позволили улучшить характеристики приборов на их основе. В частности, для подавления дрейфа ионов создают дополнительный слой нитрида кремния (МНОП структуры).

К материалам, способным стать хорошей альтернативой оксиду кремния в системах МДП, можно отнести оксиды редкоземельных металлов (ОРЗЭ). Эти диэлектрические материалы характеризуются

- 1) достаточно высокой электрической прочностью (напряжённость поля пробоя - не менее 10^6 В/см);
- 2) низкими токами утечки при рабочих напряжениях;
- 3) низкими значениями диэлектрических потерь;
- 4) большими значениями диэлектрической проницаемости ($\epsilon_f=8-20$);
- 5) технологической совместимостью с существующими процессами в производстве кремниевых полупроводниковых приборов;
- 6) высокой химической и термической стойкостью;
- 7) расширенными функциональными возможностями.

Однако, до настоящего времени эти материалы были изучены крайне недостаточно. Многие ключевые характеристики этих систем остались до сих пор невыясненными. К их числу можно отнести величины энергетических потенциальных барьеров на межфазных границах, особенности прохождения, захвата и накопления заряда в диэлектрике, зависимость характеристик системы от температурных условий и освещённости, а также ряд более практических задач - поиск оптимальных режимов изготовления систем МДП с оксидами редкоземельных элементов (ОРЗЭ), зависимость их свойств от толщины диэлектрической плёнки и т.д.

В связи с этим в данной работе **предметом исследования** стали электрофизические и фотоэлектрические свойства структур металл-диэлектрик-полупроводник с оксидами редкоземельных элементов (ОРЗЭ) в качестве диэлектрика. **Объектом исследования** были кремниевые МДП-системы с оксидами гадолиния, иттербия, лютеция и самария в качестве диэлектрика.

Целью настоящей работы явилось комплексное изучение электрофизических и фотоэлектрических свойств систем МДП на основе Yb_2O_3 , Gd_2O_3 , Sm_2O_3 и Lu_2O_3 в качестве диэлектриков, сравнение полученных характеристик с известными параметрами аналогичных структур с оксидом кремния, выявление механизма электропроводности и характеристик электрического пробоя исследуемых плёнок, построение энергетической зонной диаграммы исследуе-

мых систем, поиск особенностей захвата и распределения заряда в диэлектрике.

Научная новизна работы. В представленной работе впервые проведён комплексный анализ электрофизических и фотоэлектрических свойств структур металл - ОРЗЭ кремний с четырьмя различными оксидами в качестве диэлектрика: оксид самария, иттербия, лютеция и гадолиния. Получены и исследованы структуры с тонким (~ 20 нм) слоем диэлектрика (что на порядок меньше, чем использовались ранее), что позволило резко повысить коэффициент перекрытия ёмкости вольтфарадной характеристики (в 8-10 раз), причём электрическая прочность структуры и стабильность характеристик остались практически неизменными. По ряду параметров такие структуры с тонким диэлектриком превосходят используемые ранее системы. Так, напряжённость поля пробоя в них была в 2-3 раза выше, а скорость поверхностной генерации почти на порядок ниже, что свидетельствует о низкой концентрации генерационно-рекомбинационных центров на границе раздела диэлектрик-полупроводник.

Впервые получены значения времени жизни неосновных носителей заряда, достигающие 90 мкс и более (для образцов с тонким, ~ 20 нм диэлектриком). Скорость поверхностной генерации при этом достигала 0,08 см/с. Эти данные существенно превышают аналогичные характеристики для структур с толстым (~ 200 нм) слоем оксида РЗЭ и на порядок превосходят имеющиеся данные о структурах с оксидом кремния в качестве диэлектрика.

Методом внутренней фотоэмиссии носителей заряда в диэлектрик на основании спектральных и вольтаических зависимостей фототока определены высоты энергетических барьеров на межфазных границах МДП-структуры. Причём наблюдалось хорошее соответствие полученных данных между собой. Величины потенциальных барьеров составили: Al-Sm₂O₃ (2,89-2,91 эВ), Si-Sm₂O₃ (2,70-2,72 эВ), Al-Yb₂O₃ (2,90-2,92 эВ), Si-Yb₂O₃ (3,18-3,21 эВ), Al-Gd₂O₃ (3,16-3,17 эВ), Si-Gd₂O₃ (3,29-3,31 эВ), Al-Lu₂O₃ (2,77-2,9 эВ), Si-Lu₂O₃ (3,40-3,45 эВ). Установлено, что при положительном и отрицательном напряжении на металлическом электроде наблюдается фотоэмиссия электронов из кремния и металла соответственно.

Проведён анализ вольтаических зависимостей фотоинжекционного тока после облучения. На основании этих зависимостей выявлены закономерности прохождения заряда через структуру и накопления заряда на ловушках. Установлено, что фотоинжектированные электроны захватываются на глубокие центры диэлектрика, причём “центроид” захваченного заряда располагается вблизи центра диэлектрика. Сечение захвата и поверхностная плотность электронных ловушек в диэлектрической пленке оксида иттербия равны $3,5 \cdot 10^{-19}$ см² и $1,6 \cdot 10^{12}$ см⁻² соответственно.

Методом фотостимулированной деполяризации установлено, что электронные центры захвата располагаются почти в середине запрещенной зоны диэлектриков, в пленке Yb_2O_3 на расстоянии 2,4-2,7 эВ от дна зоны проводимости, в пленке Sm_2O_3 на расстоянии 2,25-2,6 эВ.

Получено пространственное распределение захваченного заряда в диэлектрической пленке вблизи межфазных границ раздела фаз Si-OPЗЭ, Al-OPЗЭ при облучении структур Al-Sm₂O₃-Si и Al-Yb₂O₃-Si монохроматическим светом. Установлено, что объемная плотность захваченного заряда в 4-10 раз больше в объеме диэлектрической пленки, чем вблизи границы раздела Si-OPЗЭ. Данный результат свидетельствует о высоком качестве границы раздела Si-OPЗЭ.

Практическая ценность работы состоит в том, что полученные данные о фундаментальных характеристиках структур МДП с оксидами РЗЭ (самария, гадолиния, лютеция иттербия), такие как значения энергетических потенциальных барьеров на межфазных границах, расположение и энергетическая глубина залегания центроида в диэлектрическом слое, особенности поведения структур в состояниях насыщения и инверсии и т.д., могут использоваться при разработке приборов с использованием плёнок оксидов редкоземельных элементов, в частности МДП-варикапов и фотоварикапов. Показано, что по некоторым параметрам полученные структуры существенно превосходят аналогичные системы с применением плёнок оксида кремния, из-за почти 4-кратного превышения значения диэлектрической проницаемости по сравнению с оксидом кремния, а также сравнительно низкого значения токов утечки.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментального исследования электрического пробоя в МДП-структурах с пленочными оксидами самария, гадолиния и иттербия, а также механизм пробоя, который состоит из 2 фаз. На первой, при $K_V < 5 \cdot 10^4$ происходит накопление критического заряда в приконтактной области диэлектрика, пробой носит кинетический характер, напряжённость пробивного поля прямо пропорциональна логарифму скорости нарастания прикладываемого напряжения. Во время второй фазы, при $K_V > 5 \cdot 10^4$ величина электрического поля пробоя не зависит от скорости нарастания напряжения и пробой носит "критический" характер.
2. Характеристики вольтфарадных зависимостей и кинетических зависимостей ёмкости, которые свидетельствуют о высоком качестве границы раздела диэлектрик-полупроводник, где в качестве диэлектрика используется оксид редкоземельного металла.

3. Параметры энергетических зонных диаграмм и свойства границы раздела кремний-оксид редкоземельного элемента МДП-структур с диэлектрическими пленками из оксидов самария, гадолиния, лютеция и иттербия.
4. Экспериментально установленные параметры активных центров захвата заряда в диэлектрических слоях из оксидов самария, иттербия и гадолиния.
5. Закономерности и физическая модель накопления заряда в кремниевых МДП-структурах с диэлектрическими пленками Sm_2O_3 , Yb_2O_3 и Gd_2O_3 , которая заключается в том, что пленки оксидов самария, гадолиния, лютеция и иттербия накапливают отрицательный электрический заряд при облучении структур монохроматическим видимым и УФ-излучением при одновременном воздействии внешнего электрического поля. Величина захваченного заряда увеличивается с ростом приложенного напряжения и имеет тенденцию к насыщению при больших временах облучения. Фотоинжектированные электроны захватываются на глубокие центры диэлектрика, причем "центроид" захваченного заряда располагается вблизи середины диэлектрика, а энергетическое положение центров находится в середине запрещенной зоны ОРЗЭ.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы были представлены на Российской научно-технической конференции "Новые материалы и технологии" (Москва, 1994), Международной конференции "Центры с глубокими уровнями в полупроводниках и полупроводниковых структурах" (Ульяновск, 1997г.), Международной научно-технической конференции по физике твердых диэлектриков (Санкт-Петербург, 1997г.), The Dielectrics Society 28th Annual Conference Charges in Solid Dielectrics (Darwin College, University of Kent at Canterbury, England, 1997г.), IX Международной школе-семинаре Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ (Самара, 1997г.), Dielectrics and Related Phenomena Conference (DRP'98 Szczyrk, Poland, 24-27 September 1998г.), шестой Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники" (пос. Дивноморское, Россия, 1999г.) и опубликованы в 27 научных работах.

Публикации. Материалы диссертации легли в основу 27 печатных работ, в том числе 8 статей, 11 докладов и 8 тезисов докладов на научно-технических конференциях и семинарах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шестнадцати глав, заключения, списка используемой литературы из 126 наименований, содержит 92 рисунка, 12 таблиц. Общий объем диссертации составляет 164 страницы.

Во введении обозначены насущные задачи современной микроэлектроники, показана необходимость поиска и исследования свойств новых, перспективных диэлектрических материалов для систем МДП, на основании чего раскрывается актуальность проведённого исследования. Определены цели и задачи диссертационной работы, указаны научная новизна и практическая ценность исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава "Методика получения образцов и измерения их характеристик" посвящена описанию способов создания исследуемых структур, описанию измерительных установок, а также методик проведения исследований. В ней перечислены различные методы получения систем МДП, показано преимущество метода термического окисления металлического зеркала РЗЭ, напылённого в вакууме.

МДП-структуры с оксидом редкоземельных элементов (гадолиния, иттербия, лютеция и самария) создавались на кремниевых монокристаллических подложках методом напыления тонкой плёнки редкоземельного элемента в вакууме $(1 \pm 2) \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. с последующим её окислением в воздухе при температуре 500-700 °С. При этом создавались образцы двух типов 1) с диэлектриком средней толщины (200-300 нм), и 2) с тонким (20-70 нм) слоем диэлектрика. Для исследования влияния технологических условий изготовления диэлектрической пленки на электрофизические свойства образцов изготавливались МДП-структуры при различной температуре окисления пленки РЗЭ (300-1000 °С). Контакты к пленке оксида РЗЭ изготавливались вакуумным термическим напылением алюминия или никеля через трафарет. Площадь электрода составляла $0,39 \cdot 10^{-3}$ см². Для исследования характеристик пробоя часть образцов не имела напылённых электродов, а использовались прижимные электроды.

Толщина исследуемой пленки оксида РЗЭ определялась цветовым методом, используя таблицу для интерференционных цветов. Величины толщин плёнок, полученные таким методом, хорошо согласовывались с результатами замеров толщины диэлектрических плёнок при помощи сканирующего зондового микроскопа P7-LS-MDT.

Исследование механизма электропроводности МДП-структур с диэлектриком из ОРЗЭ в условиях сильного электрического поля осуществлялось путем измерения ВАХ МДП-структур на постоянном токе, а также температурной зависимости тока при различных величинах поля в диэлектрике.

Для анализа электрической прочности исследуемых систем проводились измерения времени задержки пробоя t при приложении ступенчатого импульса

напряжения. Кроме того, измерялось пробивное поле в зависимости от скорости прикладываемого линейно нарастающего напряжения.

Качество границы раздела диэлектрик-полупроводник (ДП) исследовалось путем измерения высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВФХ) МДП-структур, а также изучением кинетических зависимостей ёмкости структур при нестационарном истощении поверхности полупроводника. При этом проводился расчет объемного времени жизни τ_g и скорости поверхностной генерации неосновных носителей заряда S по методике, предложенной Цербстом из кинетических зависимостей ёмкости $C(t)$ при нестационарном истощении поверхности полупроводника основными носителями заряда. Зависимости активной составляющей проводимости G и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ от приложенного напряжения V исследовались на частоте 1 МГц.

Определение фундаментальных параметров МДП-структур осуществлялось путем исследования явления внутренней фотоэмиссии электронов в диэлектрик из кремния и металла. Энергетические барьеры на границах раздела металл-диэлектрик и ДП определялись из спектральных и вольт-амперных зависимостей фототока. Изучение параметров ловушек в диэлектрической пленке при облучении структуры видимым и ультрафиолетовым светом проводилось на этой же установке путём измерения вольт-амперных зависимостей фототока до и после облучения с одновременной записью ВФХ исследованных структур. По сдвигу вольт-амперных зависимостей фотоинжекционного тока до и после облучения структуры монохроматическим светом с энергией фотонов большей ширины запрещенной зоны диэлектрика определялись "центроид" и сечение захвата электронных ловушек в диэлектрике. Методом фотостимулированной деполяризации определялась энергетическая глубина залегания электронных ловушек в диэлектрике.

Вторая глава "Анализ вольт-амперных зависимостей и особенностей электрического пробоя структур МДП с оксидами редкоземельных металлов" посвящена исследованию механизма токопереноса, а также электрического пробоя в структурах МДП с оксидами иттербия, гадолиния и самария.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) имели типичный нелинейный вид. Коэффициенты выпрямления для исследуемых структур имели значения $K_0=1,1-2,5$. Величины тока при изменении напряжения от 1 до 15 В лежали в пределах от 10^{-14} до 10^{-11} А.

Величины удельного сопротивления плёнок оксидов РЗЭ, определенные из ВАХ, составляют $10^{14} - 10^{15}$ Ом·см для плёнок Sm_2O_3 и Gd_2O_3 , 10^{15} Ом·см для слоёв Lu_2O_3 и $(0,5 - 3) \cdot 10^{15}$ Ом·см - для плёнок Yb_2O_3 . Температурные зависимости тока спрямляются в координатах $\ln(I) \sim 10^3/T$. Обнаружено, что ВАХ для структур с никелевым электродом являются качественно подобными характе-

ристикам для структур с алюминиевыми электродами. Установлено, что величина тока при комнатной температуре ($T=300$ К) не зависит от толщины диэлектрика, материала контактов и в довольно большом диапазоне изменения напряженности электрического поля подчиняется экспоненциальному закону:

$$I \sim \exp[\alpha \sqrt{E} / (kT)].$$

Линейность вольтамперных зависимостей, перестроенных в координатах $\ln I$ от \sqrt{V} и малые значения коэффициентов выпрямления позволяют сделать вывод о том, что в объеме диэлектрической пленки ОРЗЭ происходит ионизация примесных уровней, облегченная электрическим полем, а электропроводность образцов ограничивается объемом диэлектрика и описывается механизмом Пула-Френкеля.

В следующем параграфе этой главы приводятся результаты анализа особенностей пробоя в МДП-системах с оксидами самария, гадолиния и иттербия при приложении ступенчатого или линейно нарастающего напряжения. На примере нескольких гистограмм проиллюстрирована статистическая природа пробоя. На кривых зависимостей напряженности пробивного поля от скорости нарастания напряжения отмечено 2 участка — на первом участке, при малых скоростях нарастания напряжения $K_V < 5 \cdot 10^4$ В/с, поле пробоя линейно увеличивается с ростом логарифма K_V . Высказывается предположение, что при таких условиях пробой предшествует стадия накопления критического заряда в приконтактной области диэлектрика. На втором участке, при больших значениях $K_V > 5 \cdot 10^4$ В/с, величина электрического поля пробоя перестает зависеть от K_V и пробой носит “критический” характер. Величина поля пробоя возрастает с уменьшением толщины диэлектрика. Так, для значения $\ln K_V = 4$ напряженность поля пробоя увеличивается от 5,8 до 15 МВ/см при уменьшении толщины диэлектрической пленки от 0,2 до 0,02 мкм. Величина $E_{пр}$ линейно уменьшается с ростом температуры, причем более сильная температурная зависимость соответствует меньшим скоростям роста напряжения на структуре. Значение пробивного поля также уменьшается с увеличением площади верхнего электрода.

Время задержки пробоя: при приложении к структуре прямоугольного ступенчатого напряжения экспоненциально уменьшается с возрастанием величины электрического поля и температуры. Показано, что время задержки пробоя τ и напряженность электрического поля пробоя E_B удовлетворительно описываются соотношениями:

$$\tau = \frac{\exp(AQ_c) - 1}{AJ_0} \exp\left(\frac{E_s - \alpha E}{kT}\right), \quad (1)$$

$$E_B = \frac{kT}{\alpha} \ln \left[\frac{K_E d C_k}{J_0} \right] + \frac{Q_C}{d C_K} + \frac{E_A}{\alpha}, \quad (2)$$

где k - постоянная Больцмана; T - температура окружающей среды; d - толщина диэлектрика; J_0 - плотность тока, слабо зависящая от поля и температуры, E_A - энергия активации проводимости, Q_C - величина критического заряда, $A = \alpha/kTC_K d$, C_K - удельная емкость контактной области, α - постоянная, определяющая влияние поля E на скорость роста тока, $K_E = dE/dt$ - скорость роста напряженности электрического поля в диэлектрике.

Третья глава "Исследование свойств границы раздела кремний ОРЗЭ методом высокочастотных вольтфарадных характеристик и кинетических зависимостей ёмкости" описывает результаты измерения зависимостей ёмкости, активной составляющей проводимости G и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta$ от напряжения, а также кривых релаксации ёмкости после приложения неравновесного обедняющего напряжения. Эти характеристики также рассматривались в зависимости от технологических условий изготовления исследуемых структур, а также изучалось воздействие света на кинетику ёмкости.

На основании анализа вольтфарадных зависимостей сделаны заключения о ёмкости и диэлектрической проницаемости оксидных слоёв, об энергетической плотности поверхностных состояний на границе раздела ДП, о концентрации фиксированного заряда и быстрых поверхностных состояний в диэлектрике. Значения ёмкости структуры в состоянии насыщения лежали в пределах от 333 до 1052 пФ ($=C_D$) в зависимости от толщины диэлектрической плёнки. При этом ёмкость структур в состоянии инверсии была равна 20-35 пФ, что соответствует значениям коэффициента перекрытия по ёмкости 10-35, что во много раз превосходит соответствующие значения для широко используемых в настоящее время структур с оксидом кремния в качестве диэлектрика. Величина управляющего напряжения не превышала 2,5 В. Удельная ёмкость диэлектрика при этом достигала значения 0,8 мкФ/см². По сдвигу экспериментальных кривых относительно теоретической обнаружено, что на поверхности раздела и в самом диэлектрике изначально присутствует встроенный положительный заряд, что характерно для термически выращенных оксидов. Величина удельного заряда на поверхностных состояниях Q_{ss} лежала в пределах $(0,31-2,95) \cdot 10^{-6}$ Кл /см². Плотность поверхностных состояний при потенциале плоских зон N_{ss} для различных структур составляла $(0,06-2) \cdot 10^{11}$ см⁻². Плотность поверхностных состояний на единицу энергии составляла $(0,05-3) 10^{11}$ см⁻² эВ⁻¹.

Исследованные образцы проявляли удовлетворительные фотоваракторные свойства. Освещение структур светом от лампы накаливания приводило к возрастанию величины ёмкости в области напряжений, соответствующих инверсии на поверхности полупроводника. Коэффициенты перекрытия ёмкости

по свету для МДП-структур с диэлектрическими плёнками ОРЗЭ доходили до 4 при освещённости в $3 \cdot 10^4$ лк. ВФХ структур не изменяются после воздействия электрического напряжения 15 В как положительного, так и отрицательного при повышенной температуре (140°C) в течение 20 - 30 минут.

Значения тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ при различных напряжениях лежат в пределах от 0,04 до 0,16. При этом активная составляющая проводимости G изменялась от 0,01 до 0,1 мСм. Для тонких (~ 20 нм) диэлектриков эти значения были несколько больше. Значения тангенса угла диэлектрических потерь и активной составляющей проводимости МДП-структур слабо зависят от освещения.

С ростом температуры окисления пленки РЗЭ увеличивается плотность поверхностных состояний на границе раздела ДП. Причём при высоких температурах окисления (более 800°C) на поверхности кремния образуется диэлектрический подслоя из двуоксида кремния. Кроме того, при повышении температуры окисления от 500 до 1000°C происходит увеличение дефектов в объеме и на поверхности полупроводника примерно в 5 раз. Это может быть связано с возникновением напряженных связей, из-за различия коэффициентов термического расширения и кристаллографического несоответствия материалов полупроводника и диэлектрика. Исследования электропроводности пленок, изготовленных при температурах окисления $\leq 300^\circ\text{C}$, показывают также ухудшение изолирующих свойств диэлектрика ($\rho = 10^6 - 10^9$ Ом-см, $E_{\text{пр}} = 10^5$ В/см), что обусловлено неполным окислением плёнки РЗЭ при низких температурах, или избыточным количеством окклюдированного кислорода. Таким образом, установлено, что оптимальным режимом окисления РЗЭ в исследуемых структурах является диапазон $500 - 600^\circ\text{C}$.

Генерационно-рекомбинационные процессы на поверхности полупроводника и качество границы раздела диэлектрик-полупроводник оценивались путём анализа кинетических характеристик ёмкости при нестационарном истощении поверхности кремния основными носителями заряда. Времена переходного процесса, определенные для различных структур с толстым (~ 200 нм) слоем оксида редкоземельного металла лежали в пределах 0,35 - 0,9 с. Для структур с тонким (~ 20 нм) диэлектриком при комнатной температуре в темноте они составили 10-24 с. Впервые получены структуры с аномально низкими значениями скорости поверхностной генерации неосновных носителей заряда $S = 0,08 - 1$ см/с. Время жизни неосновных носителей заряда τ_g , достигало при этом 90 и более мкс. Это существенно превосходит полученные ранее результаты для структур с относительно толстыми (~ 200 нм) слоями ОРЗЭ ($S = 0,3 - 30$ см/с и $\tau_g = 11 - 60$ мкс), и практически на несколько порядков превосходит аналогичные параметры для структур МДП с термически выращенным оксидом кремния в качестве диэлектрика. Величины энергии активации генерационных

центров, определённые по температурным зависимостям времени переходного процесса и генерационного тока, лежали для различных образцов в пределах 0,4-0,43 эВ.

Исследованы зависимости эффективного времени релаксации МДП-структуры от уровня световой подсветки. Установлено, что образцы обладают высокой чувствительностью к свету и являются перспективными для использования их в качестве эффективных фотоприемников.

Исследована зависимость генерационных параметров МДП систем от технологических условий изготовления. Обнаружено, что скорость поверхностной генерации возрастает с 20 см/с до 990 см/с, а время жизни неосновных носителей заряда уменьшается от $2,5 \cdot 10^{-5}$ до $9 \cdot 10^{-7}$ с при увеличении температуры окисления пленки самария от 500 до 1000 °С. Данный результат также показывает, что оптимальная температура окисления плёнки самария соответствует интервалу 500-600 °С.

Четвертая глава "Исследование внутренней фотоэмиссии носителей заряда в МДП-структурах с диэлектриком из оксидов редкоземельных элементов" посвящена определению параметров энергетической зонной диаграммы исследуемых структур методом внутренней фотоинъекции носителей заряда в диэлектрический слой. Высота потенциальных барьеров на границах диэлектрика определялась из результатов измерения спектральных и вольт-амперных зависимостей фототока. Полученные значения совпадали в пределах погрешности эксперимента. Рассмотрена теоретическая модель Фаулера и аналитическое выражение для фотоинжекционного тока. Экспериментально подтверждено, что фотоинжекционный ток, протекающий через МДП-структуру, при электрических полях, больших 10^5 В/см, удовлетворительно описывается моделью Фаулера и подчиняется зависимости:

$$I_{\Phi} = A(h\nu - \mathcal{E}_{b0} + kV_d)^n,$$

где \mathcal{E}_{b0} - высота потенциального барьера при нулевом электрическом поле в диэлектрике, k - коэффициент Шоттки, V_d - падение напряжения в диэлектрике, A - коэффициент, зависящий от $h\nu$.

Таблица 1

Высоты потенциальных барьеров структур Me-OP3Э-Si

Диэлектрик	Высота потенциального барьера \mathcal{E}_{b0} , эВ		
	Al	n-Si	p-Si
Sm ₂ O ₃	2,89 - 2,92	2,70 - 2,72	2,69 - 2,72
Yb ₂ O ₃	2,90 - 2,92	3,19	3,20
Gd ₂ O ₃	3,16 - 3,17	3,30 - 3,31	3,29 - 3,30
Lu ₂ O ₃	2,77 - 2,90	3,40 - 3,45	3,4

Анализ показал, что в изученных структурах преобладает электронная эмиссия из полупроводника или металла в диэлектрик. Рассчитанные значения энергетических барьеров на границах диэлектрического слоя приведены в таблице 1.

В пятой главе "Особенности захвата носителей заряда в кремниевых МДП-системах под действием излучения" рассматривается теоретическая модель процесса накопления заряда в МДП-системах при облучении их светом. Экспериментально установлено, что зависимости сдвига напряжения плоских зон от времени облучения имеют сублинейный вид. При больших временах облучения (~ 100 мин и более) эти характеристики проявляют тенденцию к насыщению. Причем скорости накопления электронов под действием излучения при эмиссии из полупроводника и из диэлектрика сравнимы по величине. Экспериментально показано, что величина сдвига напряжения плоских зон и захваченного заряда пропорциональна приложенному к структуре напряжению. Это обусловлено снижением высоты потенциального барьера на границе диэлектрика, а также возрастанием напряженности электрического поля в диэлектрике при увеличении прикладываемого напряжения, которые вызывают рост числа фотоинжектированных электронов и величины захваченного заряда. Накопленный при облучении заряд сохраняется в диэлектрике при комнатной температуре после выключения освещения и питающего напряжения практически без заметной релаксации более 2-х часов. Однако, захваченный на глубокие ловушки диэлектрика заряд рассасывался при облучении структуры Al- Yb₂O₃-Si светом с энергией $h\nu=2,65$ эВ, которая соответствует энергетической глубине залегания электронных ловушек в диэлектрической пленке Yb₂O₃. Параметры и характеристики исследованных образцов и центров захвата в них хорошо воспроизводимы, стабильны и не деградируют во времени.

Рассмотренные эффекты свидетельствуют о возможности использования исследованных систем для создания на их основе приборов с репрограммируемой оптической записью информации и устройств визуализации УФ-изображений.

Шестая глава "Исследование параметров ловушек в диэлектрических слоях ОРЗЭ" содержит анализ вольтаических зависимостей фототока до и после облучения светом при положительном и отрицательном потенциале электрода, на основании которого определялись параметры центроида в исследуемых системах. В таблице 2 приведены параметры электронных центров захвата заряда диэлектрика в структурах Al-Yb₂O₃-Si, Al-Sm₂O₃-Si и Al-Gd₂O₃-Si.

Таблица 2

Параметры электронных центров захвата заряда диэлектрика в структурах Al-Yb₂O₃-Si, Al-Sm₂O₃-Si и Al-Gd₂O₃-Si

Структура	X _с , мкм	Q _з , Кл/см ²	Q _з / Q _{пр}
Al- Yb ₂ O ₃ -p Si	0,13	3,6·10 ⁻¹⁰	0,16
Al- Yb ₂ O ₃ - nSi	0,13	4,5·10 ⁻¹⁰	0,21
Al- Sm ₂ O ₃ -p Si	0,10	1,2·10 ⁻¹⁰	0,13
Al- Sm ₂ O ₃ - nSi	0,11	3,7·10 ⁻¹⁰	0,11
Al- Gd ₂ O ₃ -Si	0,12	0,31·10 ⁻¹⁰	-

Экспериментально установлено, что фотоинжектированные электроны захватываются на глубокие центры диэлектрика, причем “центроид” захваченного заряда располагается вблизи середины диэлектрика (независимо от направления движения инжектированных электронов), а величина захваченного заряда Q_з на порядок меньше величины заряда, прошедшего через структуру Q_{пр}.

Сечение захвата электронных ловушек в диэлектрике равнялось 3,5·10⁻¹⁹ см². Методом фотостимулированной деполяризации установлено, что электронные центры захвата располагаются почти в середине запрещенной зоны Yb₂O₃ и Sm₂O₃ на расстоянии 2,4-2,7 эВ и 2,25- 2,6 эВ соответственно от дна зоны проводимости диэлектрика.

По сдвигу вольт-амперных зависимостей фотоинжекционного тока до и после облучения структур монохроматическим светом получено пространственное распределение захваченного заряда в диэлектрических пленках оксидов самария и иттербия.

Заключение содержит следующие результаты и выводы:

1. Изучен механизм электропроводности кремниевых МДП-структур с диэлектрическими пленками из оксида самария и иттербия. Установлено, что энергия активации проводимости пленки оксида иттербия монотонно уменьшается от 1,1-1,3 эВ до 0,86-0,9 эВ с ростом электрического напряжения от 2 до 5 В, а электропроводность кремниевых МДП-структур с диэлектрическими пленками Sm₂O₃, Gd₂O₃, Lu₂O₃ и Yb₂O₃ удовлетворительно описывается механизмом Пула-Френкеля.
2. Из ВАХ на постоянном токе определены величины высокочастотной диэлектрической проницаемости пленок оксида самария, гадолиния и иттербия, которые соответственно равнялись 8,9 и 7,4. Для Gd₂O₃ она составила 8,2-10.
3. Изучены основные закономерности электрического пробоя пленок оксидов самария и гадолиния. Установлено два участка на кинетической характеристике пробоя. На первом участке, при малых скоростях нарастания напряжения K_V=10-10⁵ В/с, электрическое поле пробоя линейно увеличивается с ростом логарифма K_V и пробой имеет кинетический характер, который связан с

- накоплением критического заряда в приконтактной области диэлектрика. На втором участке, при $K_V > 10^6$ В/с величина электрического поля пробоя не зависит от K_V и пробой носит “критический” характер. Показано, что величина пробивного поля линейно уменьшается с ростом температуры окружающей среды, причем наклон температурной характеристики снижается с увеличением скорости роста приложенного напряжения.
4. Методом вольтфарадных характеристик МДП-структур определены величины фиксированного заряда в диэлектрике и эффективной плотности поверхностных состояний. Плотность поверхностных состояний в МДП-структурах с толщиной диэлектрика порядка 300 нм с оксидом самария не превосходит $(3-3,6) \cdot 10^{10}$ эВ $^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, с оксидом иттербия - $(2,5-4) \cdot 10^{11}$ эВ $^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, с оксидом гадолиния $(0,03-7) \cdot 10^{10}$ эВ $^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. Для структур с тонким диэлектриком эти значения были на порядок выше.
 5. Показано, что удельная емкость диэлектрика и коэффициент перекрытия емкости для исследованных образцов с толстым диэлектриком более чем в 3 раза превосходят такие же параметры широко распространенных аналогичных кремниевых МДП-систем с диэлектриком из двуоксида кремния. Для структур с тонким диэлектриком это преимущество составляет 8-10 раз.
 6. Установлено, что исследованные образцы перспективны для изготовления фотоваракторов с коэффициентом перекрытия емкости по свету для МДП-структур с диэлектрической пленкой из оксида самария равным 2,5 и 4 при уровнях освещенности, составляющих $4,3 \cdot 10^3$ и $3 \cdot 10^4$ лк соответственно. Для структур с оксидом иттербия эти величины равнялись 1,5 и 3. Показано, что значения $\text{tg } \delta$ и активной составляющей проводимости МДП-структур слабо зависят от освещения.
 7. Методом кинетических зависимостей МДП-емкости определены значения скорости поверхностной генерации носителей заряда для различных образцов на границе раздела кремний оксид РЗЭ, которые составили 20-50 см/с для структур с оксидом самария, для структур с оксидом гадолиния - 40-45 см/с, для структур с оксидом лютеция 5,6 см/с, а для структур с оксидом иттербия 11-60 см/с. Значения скорости поверхностной генерации в исследуемых структурах более чем на порядок меньше аналогичного параметра в таких же кремниевых МДП-структурах с термическим оксидом кремния в качестве диэлектрика. Установлено, что наилучшими электрическими характеристиками обладают МДП-структуры, диэлектрические пленки в которых, изготовлены термическим окислением металлических слоев РЗЭ при температуре 500° С. Для образцов с тонким, ~20 нм диэлектриком впервые получены значения времени жизни неосновных носителей заряда, достигающие 90 нс и более. Скорость поверхностной генерации при этом достигала 0,08 см/с. Эти данные существенно превышают аналогичные характеристики для структур с толстым (~200 нм) слоем оксида РЗЭ.
 8. Показано, что процесс установления равновесия в ОПЗ при нестационарном обеднении поверхности полупроводника происходит путем термической генерации электронно-дырочных пар на поверхности и в ОПЗ полупроводни-

- ка. Величина энергии активации генерационных центров лежит в пределах 0,4-0,43 эВ.
9. Методом внутренней фотоэмиссии носителей заряда в диэлектрик впервые определены высоты энергетических барьеров на межфазных границах Al-Sm₂O₃ (2,89-2,91 эВ), Si-Sm₂O₃ (2,70-2,72 эВ), Ni-Sm₂O₃ (3,29-3,33 эВ), Al-Yb₂O₃ (2,9-2,92 эВ), Si-Yb₂O₃ (3,18-3,21 эВ), Ni-Yb₂O₃ (3,3-3,32 эВ), Al-Gd₂O₃ (3,16-3,17 эВ), Si-Gd₂O₃ (3,29-3,31 эВ), Al-Lu₂O₃ (2,9-3,0 эВ), Si-Lu₂O₃ (3,40-3,45 эВ).
 10. Установлено, что диэлектрические пленки из оксидов самария, гадолиния, лютеция и иттербия в кремниевых МДП-структурах накапливают отрицательный электрический заряд при облучении структур монохроматическим видимым и УФ-излучением при одновременном воздействии внешнего поля. Показано, что величина захваченного заряда увеличивается с ростом приложенного напряжения и имеет тенденцию к насыщению при больших временах облучения. Установлено, что величина эффективного заряда, захваченного в диэлектрике, на порядок меньше заряда, прошедшего через структуру.
 11. Из сдвига вольт-амперных зависимостей фотоинжекционного тока после облучения впервые определены параметры электронных ловушек в диэлектрической пленке. Установлено, что фотоинжектированные электроны захватываются на глубокие центры диэлектрика, причем "центроид" захваченного заряда располагается вблизи середины диэлектрика. Сечение захвата и плотность электронных ловушек в диэлектрической пленке оксида иттербия равны $3,5 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$ и $1,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ соответственно.
 12. Методом фотостимулированной деполяризации установлено, что электронные центры захвата располагаются почти в середине запрещенной зоны диэлектрика Yb₂O₃ и Sm₂O₃, на расстоянии 2,4-2,7 эВ и 2,25-2,6 эВ соответственно от дна зоны проводимости диэлектрика.
 13. На основе проведенных исследований указаны возможности использования пленок оксидов РЗЭ и МДП-структур на их основе в качестве МДП-варикапов и фотоварикапов с высоким коэффициентом перекрытия емкости. Показана перспективность использования исследованных систем для создания на их основе приборов с репрограммируемой оптической записью информации и визуализации УФ-изображений, использования их в качестве высокочувствительных фотоприемников, а также слоев исследованных ОРЗЭ в качестве изолирующих и пассивирующих покрытий.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Рожков В.А., Гончаров В.П., Трусова А.Ю., Бережной И.Г., Македошин Е.Ю. Кремниевые варикапы и фотоварикапы с диэлектриком из оксидов редкоземельных элементов // Тез. докл. Российской научно-технической конф. "Новые материалы и технологии". - М., 1994. - С. 53.

2. Рожков В.А., Трусова А.Ю., Гончаров В.П., Бережной И.Г. МДП- варикапы и фотоварикапы на основе структуры Al-Sm₂O₃-Si. - ЖТФ, 1995. - Т. 65, вып. 8. С. 183-186.
3. Бережной И.Г., Гончаров В.П., Рожков В.А., Трусова А.Ю. Кремниевые МДП-варикапы с диэлектриком из оксида самария, иттрия и лютеция: Межвузовский сборник научных статей "Электродинамика слоисто-неоднородных структур СВЧ" - Самара: СамГУ, 1995. - С. 82-88.
4. Рожков В.А., Трусова А.Ю., Бережной И.Г. Электрофизические свойства МДП-структуры Al-Sm₂O₃-Si при нестационарном истощении поверхности полупроводника основными носителями заряда. Вестник Самарского государственного университета, 1996. № 2.- С. 113-121.
5. Бережной И.Г., Рожков В.А., Трусова А.Ю. Электрофизические свойства кремниевых МДП-систем с оксидом самария в качестве диэлектрика // Тез. докл. Международной научно-технической конференции по физике твердых диэлектриков. 24-27 июня 1997 г. - Санкт-Петербург, 1997.- С. 25-26.
6. Рожков В.А., Трусова А.Ю., Бережной И.Г. Генерационно-рекомбинационные свойства кремния в МДП-системах с диэлектриком из оксидов редкоземельных элементов //Тез. докл. Международной конф. "Центры с глубокими уровнями в полупроводниках и полупроводниковых структурах" 24-27 июня 1997 г. - Ульяновск, 1997.- С. 103-104.
7. Rozhkov V.A., Trusova A. Yu., Berezhnoy I.G. Photoinjection and Charge Trapping in Dielectric in Silicon MIS-Structures with Rare Earth Oxides // The Dielectrics Society 28th Annual Conference Charges in Solid Dielectrics . 7-9 April 1997, Darwin College, University of Kent at Canterbury, England. Paper 3.1.
8. Бережной И.Г., Петров А.И., Рожков В.А., Трусова А.Ю. Функциональные свойства кремниевых МДП-систем с диэлектриком из оксидов редкоземельных элементов. - Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ, 1997.- Т. 5.- Вып. 3(19).- С. 77-78.
9. Рожков В.А., Трусова А.Ю., Бережной И.Г. Энергетические барьеры и центры захвата в кремниевых МДП-структурах с диэлектриком из оксида самария и иттербия // Письма в ЖТФ. 1998. т. 24. Вып. 6, с.24-29.
10. Бережной И.Г., Рожков В.А., Трусова А.Ю. Накопление и релаксация заряда в кремниевой МДП-структуре с диэлектриком из оксида РЗЭ под действием излучения //Матер. Докл. Междунар. Научно-техн. семинара "Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах". М. 1998, с.435-439.
11. Рожков В.А., Трусова А.Ю., Бережной И.Г. Кремниевые варикапы и фотоварикапы с оксидами РЗЭ в качестве диэлектрика // Тезисы докл. V Российской научно-техн. конференции профессорско-преподавательского и инженерно-технического состава. 1998. Самара, с.20.

12. Rozhkov V.A., Trusova A.Yu., Berezhnoy I.G. MIS-structures with Ytterbium Oxide films. // *Phys. Low-Dim. Struct.* 7/8 (1998), pp. 7-16.
13. Rozhkov V.A., Trusova A.Yu., Berezhnoy I.G. Silicon MIS-structures using Samarium oxide films // *This Solid Films.* 325 (1998), p. 151-155.
14. Rozhkov V.A., Trusova A.Yu., Berezhnoy I.G. Silicon MIS-structures with Rare-Earth Oxide Films as Insulator. Dielectric and Related Phenomena DRP'98. Abstracts. Szczyrk, Poland, 24-27 September, 1998, pp. 206-207.
15. Rozhkov V.A., Trusova A.Yu., Berezhnoy I.G. Energy barriers and trapping centers in MIS-structures with Yb_2O_3 . 3^d International Conference on Electric Charge in Solid Insulators. Tours (France), 29 June - 3 July 1998, pp.684-687.
16. Бережной И.Г., Трусова А.Ю., Шаварина Е.А. Электрофизические свойства кремниевых МДП-структур с диэлектрической плёнкой из оксида гадолиния. // Труды 5-ой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием "Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники". 6-11 сентября 1998г., Таганрог, с.86-89.
17. Бережной И.Г., Рожков В.А., Трусова А.Ю., Шаварина Е.А. Генерационные параметры границы раздела кремний-оксид гадолиния в МДП-системах. // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции "Микро- и нано- электроника - 98". т.2. Звенигород. 1998. P2-8.
18. Рожков В.А., Трусова А.Ю., Бережной И.Г. Фотоэлектрические свойства кремниевых МДП-структур с диэлектрической плёнкой из оксида редкоземельного элемента. // Труды Междунар. Конференции "Оптика полупроводников". 1998. Ульяновск. УлГУ, с.98-99.
19. Рожков В.А., Трусова А.Ю., Бережной И.Г. Фотоэлектрические методы исследования параметров МДП-структур. // Труды Междунар. Конференции "Оптика полупроводников". 1998. Ульяновск, УлГУ, с.100-101.
20. Трусова А.Ю., Рожков В.А., Бережной И.Г. Электрофизические свойства кремниевых МДП-структур с оксидом иттербия в качестве диэлектрика. Известия ВУЗов. Электроника. 1998. №4, с.25-30.
21. Рожков В.А., Трусова А.Ю., Бережной И.Г. Параметры активных центров захвата заряда в диэлектрических слоях из оксидов РЗЭ. // Материалы докладов Международного научно-технич. Семинара "Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах". М. 1999, с.373-377.
22. Рожков В.А., Трусова А.Ю., Петров А.И., Бережной И.Г. Плёнки оксидов редкоземельных элементов в кремниевых МДП-системах и элементах микроэлектроники// Тезисы докл. Второй Всеросс. конф. С междунар. Участием "Электроника и информатика 97". Часть 1.-1997. М. (Зеленоград, 25-26 ноября 1997г.).- С. 120-121.
23. Рожков В.А., Бережной И.Г., Васильева Н.В., Трусова А.Ю. Варикапы и фотоварикапы на основе кремниевых МДП-систем с диэлектриком из оксидов редкоземельных элементов// Труды пятой Всеросс. научно-техн. конф. с меж-

дународным участием "Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники", 6-11 сентября 1998г.- Таганрог.- С. 83-85.

24. Рожков В.А., Бережной И.Г., Васильева Н.В. и др. Электрофизические и функциональные свойства кремниевых МДП-систем с диэлектриком из оксидов редкоземельных элементов// Тез. докл. Всеросс. научно-техн. конф. "Микро- и наноэлектроника - 98".- Т.2.- Звенигород, 1998.- P2-7.

25. Рожков В.А., Трусова А.Ю., Бережной И.Г. Фотоэлектрические свойства кремниевых МДП-структур с диэлектрической плёнкой из оксида редкоземельного элемента// Материалы докл. Международного научно-техн. семинара "Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах".- М.- 1999.- С. 383-387.

26. Рожков В.А., Петров А.И., Бережной И.Г. Генерационные и рекомбинационные свойства границ раздела кремний оксид РЗЭ// Труды Международной конф. "Физические процессы в неупорядоченных полупроводниковых структурах".- Ульяновск, 1999.- С.37.

27. Петров А.И., Рожков В.А., Бережной И.Г. Рекомбинационные характеристики кремния, пассивированного оксидом диспрозия// Труды 6-ой Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники".- 6-11 сентября 1999г.- пос. Дивноморское, Россия.- С.63.

№ 0203316 от 4 декабря 1996 г. Подписано в печать 14.10.99.

Форм. лист. 60×84 /16. Бумага офсетная. Печать оперативная.

Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 246

Изд-во «Самарский университет».

УОП СамГУ ПЛД № 67-43 от 19 февраля 1998 г.