

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Комолова Алексея Сергеевича на диссертацию Прокофьева Владимира Александровича на тему: «Люминесценция многослойных диэлектрических структур на поверхности кремния», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

Актуальность темы работы обусловлена тем, что установление природы дефектов, их энергетических характеристик в поверхностных структурах на основе оксида кремния и оксидов металлов позволяет контролировать свойства полупроводниковых приборных структур как в процессе их изготовления, так и в результате воздействий, сопровождающих последующую эксплуатацию полупроводниковых приборов. Люминесцентные методы исследования диэлектриков, основанные на регистрации спектра излучения в спектральном диапазоне от 250 нм до 800 нм, позволяют получать информацию об активных центрах структуры и устанавливать закономерности электронных процессов в структурах кремний/диэлектрик.

Цель работы сформулирована как разработка метода исследования области межфазовой границы диэлектрик/диэлектрик для структур со слоистым диэлектриком на основе кремния. Это включало разработку методики формирования слоев Ta₂O₅ в твердой фазе на поверхности кремния и оксида кремния с использованием метода молекулярного наслаивания, разработку методики получения спектров электролюминесценции многослойных структур на поверхности кремния, экспериментальное установление спектров люминесценции в структурах Si-SiO₂, структурах Si-Ta₂O₅ и Si-SiO₂-Ta₂O₅, сопоставление спектров люминесценции с электрофизическими свойствами структур.

Диссертационная работа состоит из 4 основных глав. В Главе 1, в обзоре литературы приведен достаточно подробный анализ работ по теме люминесценции в слоях SiO₂. Обсуждается, что в спектрах люминесценции можно выделить четыре основные энергетические полосы: 1. 650-660 нм (1,9 эВ), 2. 539-564 нм (2,2-2,3 эВ), 3. 443-477 нм (2,6-2,8 эВ), 4. 282-288 нм (4,3-4,4 эВ). При этом до настоящей работы непротиворечивое объяснение встречалось только для случая полосы при 1,9 эВ. В Главе 2 приводится вполне подробное описание использованных методик исследования, объектов исследования и методических подходов, разработанных автором в ходе работы. Приводятся результаты диагностики сформированных методом молекулярного наслаивания пленок пентоксида тантала на кремнии. Для диагностики использовали методы электронной микроскопии и исследования атомного состава. В Главе 3 рассмотрены результаты люминесценции структур Si-SiO₂: результаты по

катодолюминесценции (КЛ), электролюминесценции (ЭЛ) и фотолюминесценции (ФЛ). В Главе 4 рассмотрены результаты люминесценции и результаты проведенных электрофизических измерений в структурах Si-Ta₂O₅ и Si-SiO₂-Ta₂O₅.

В ходе работы сформулированы основные выводы и следующие шесть защищаемых положений.

1. Методика (на основе метода молекулярного наслаивания) высокоскоростного (до 200 нм за 10 минут) формирования стабильных и однородных слоев пентоксида тантала из хлорида тантала в твердой фазе на поверхности кремния и двуокси кремния с использованием оптимальных параметров роста пленок: температуры подложки 200 С и температуры реагента 70 С.
2. Методика получения спектров электролюминесценции структур кремний/диэлектрик за экстремально короткое время, позволяющее исключить влияние деградиационных процессов в диэлектриках на примере Ta₂O₅ под действием сильного электрического поля.
3. Совместный анализ спектров катодолюминесценции и электролюминесценции структур Si-SiO₂ с набором толщин окисного слоя позволяет оценить пространственное распределение центров люминесценции, ответственных за полосу излучения с максимумом при энергии 2.2 эВ. Показано, что центры люминесценции, ответственные за полосу 2.2 эВ, характеризуются постоянством концентрации по всему диэлектрику, величина которой не зависит от времени термического окисления.
4. Люминесценция, возбуждаемая электронами в слоях SiO₂ на кремнии в красной области спектра, в значительной степени связана с распадом силанольных групп (SiOH) при захвате электронов, при котором формируются дефекты типа немостикового кислорода ($\equiv\text{SiO}\bullet$) в возбужденном состоянии. Релаксация этих дефектов из возбужденного в основное состояние происходит испусканием квантов света с энергией ~1,9 эВ.
5. Сравнение экспериментального спектра КЛ структуры кремний двухслойный диэлектрик с модельным спектром, полученным суммированием нормированных на энергетические потери возбуждающих электронов спектров КЛ отдельных диэлектрических слоев на кремнии, позволяет сделать заключения о свойствах межфазовой границы диэлектрик диэлектрик и оценить коэффициент поглощения внешнего диэлектрического слоя в высокоэнергетической области спектра.
6. Формирование структур с двухслойным диэлектриком Si-SiO₂-Ta₂O₅ сопровождается значительным уменьшением интенсивности полосы люминесценции в области энергий 1.9 эВ и появлением интенсивной дополнительной полосы КЛ с максимумом при энергии 2,96 эВ. Это указывает на диссоциацию силанольных групп в приповерхностном слое SiO₂

и формирование переходного слоя типа $\text{Si}_x\text{-Ta}_y\text{-O}$, обладающего свойствами, отличными от свойств входящих в структуру диэлектрических слоев.

Все защищаемые положения, основные выводы и результаты, изложенные в диссертации, являются новыми, то есть получены впервые и вносят существенный вклад в физику конденсированного состояния. Защищаемые положения и выводы вполне обоснованы, они базируются на комплексе научных экспериментов, проведенных автором, и теоретическом анализе полученных результатов. Достоверность полученных результатов обеспечена использованием современного научного оборудования, в том числе ионного гелиевого микроскопа Zeiss ORION, находящегося в составе оборудования Научного Парка СПбГУ. Результаты диссертации прошли апробацию на 5 международных научных конференциях. По теме диссертации автором опубликовано 5 научных статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Некоторые частные аспекты обсуждаемой диссертационной работы, как и любой большой научной работы, требуют дополнительного пояснения, вследствие чего возникли следующие вопросы.

1. На Рис. 4.19. Энергетическое строение структур $\text{Si-Ta}_2\text{O}_5$, не изображен слой реального оксида кремния, толщиной в несколько нм, который наверняка присутствует в структуре $\text{Si-Ta}_2\text{O}_5$, так как кремниевая пластина находилась в атмосферных лабораторных условиях непосредственно перед проведением молекулярного наслаивания пентоксида тантала. Можно ли считать, что влияние слоя оксида кремния в структуре $\text{Si-Ta}_2\text{O}_5$ на электрофизические характеристики этой структуры мало, и им можно пренебречь?
2. Если рассматривать зонную энергетическую диаграмму структуры с двухслойным диэлектриком $\text{Si-SiO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$, какие Вы укажете основные отличия от диаграммы структуры $\text{Si-Ta}_2\text{O}_5$, представленной на Рис. 4.19?

Приведенные выше вопросы ни в коей мере не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Диссертация Прокофьева Владимира Александровича на тему: «Люминесценция многослойных диэлектрических структур на поверхности кремния» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 01.09.2016 № 6821/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете»,

соискатель Прокофьев Владимир Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников. Пункты 9 и 11 указанного Порядка диссертантом не нарушены.

Член диссертационного совета

доктор физико-математических наук, ученое звание – доцент,

профессор кафедры электроники твердого тела Санкт-Петербургского государственного университета



Комолов Алексей Сергеевич

20.10.2021