

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертационную работу Илларионова
Юрия Юрьевича**

**«ТУННЕЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ НОСИТЕЛЕЙ И СВЯЗАННЫЕ С НИМ
ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В СТРУКТУРАХ ЗОЛОТО– ФТОРИД
КАЛЬЦИЯ– КРЕМНИЙ(111)»,**

**представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.10 (физика
полупроводников)**

В последние десятилетия были достигнуты заметные успехи в совершенствовании технологии структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), что связано, прежде всего, с миниатюризацией полевых транзисторов. В настоящее время ведется активный поиск новых диэлектриков, пригодных для использования в современных устройствах микроэлектроники в качестве альтернативы SiO_2 как материала для барьерных слоев. Особое внимание уделяется материалам с высокой диэлектрической проницаемостью, совместимых с кремниевой технологией. Одним из таких материалов являются тонкие эпитаксиальные слои CaF_2 , изучению которых и посвящена диссертация Илларионова Ю.Ю. Ранее на основе подобных структур уже изготавливались резонансно-туннельные диоды и полевые транзисторы, но без хорошей воспроизводимости характеристик по причине не высокого качества слоев CaF_2 . Другими перспективными применениями тонких пленок CaF_2 являются фототранзисторы, сверхрешетки и элементы памяти. Для улучшения технологии роста кристаллических пленок CaF_2 необходима комплексная диагностика изготавливаемых структур. Это делает тематику диссертационного исследования Илларионова Ю.Ю. весьма актуальной.

Диссертация Илларионова Ю.Ю. состоит из введения, пяти глав, заключения, списка публикаций автора по теме диссертации из 22 наименований и списка цитируемой литературы из 128 наименований. Текст диссертации изложен на 135 страницах и содержит 84 рисунка и 3 таблицы.

Цели работы, выполненной диссертантом, обоснованы во **введении**. В нем также изложены научная и практическая ценность работы, описана структура диссертации и сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации носит обзорный характер и содержит сведения по предмету исследований, известные из литературы. В данной главе рассматриваются три категории информации: физические свойства CaF_2 , принципы работы туннельных МДП-структур и используемые в работе экспериментально-теоретические методы и подходы. Приведенные в первой главе сведения необходимые для последующего решения задач, поставленных в работе диссертантом.

Во **второй главе** описана методика формирования тонких эпитаксиальных слоев CaF_2 и подходов по их комплексной диагностике. Продемонстрирована необходимость использования подложек с предельно малой ($\sim 10^7$) разориентацией и выбора оптимальной ($\sim 250^\circ\text{C}$) температуры эпитаксиального роста. Это позволило снизить по данным атомно-силовой микроскопии (АСМ) пространственные флуктуации толщины CaF_2 до уровня ~ 0.2 нм и менее, что привело к повышению характерных полей пробоя до значений порядка 10^7 В/см. К наиболее важным результатам этой главы диссертации можно отнести радикальное улучшение технологии формирования тонких (1-3 нм) пленок CaF_2 на поверхности кремния-(111) по сравнению с более ранними работами, что **подтверждает первое защищаемое положение**. Можно согласиться с автором работы, что распределение ординат точек тонкой пленки в несколько монослоев, скорее всего, описывается нормальным законом (выражение (2.1), несмотря на низкие температуры роста. Этому есть многочисленные прямые и косвенные экспериментальные подтверждения, в т.ч. представленные в диссертации. **Однако, замечание**, что «флуктуации в рамках каждого монослоя независимы» является весьма спорной. Со времен работы Кардара-Паризи-Жанга [Kardar M., Parisi G., Zhang Y.Ch. // Phys. Rev. Lett. 1986. V. 56. P. 889] известно, что профиль растущей пленки очень сильно меняется в начальный момент роста (и он, во многом, определяется свойствами подложки), когда не только статистика высот шероховатости, но и автокорреляционная функция не является Гауссовой. Тем не менее, в работе вводится без обоснования связь для одинаковых по смыслу статистических параметров σ_d и rms, описывающих границу выросшей пленки различной

толщины: “С целью определения среднеквадратического отклонения σ_d ...” (с. 32) и “Для эпитаксиальных пленок (грубо – и для SiO_2) имеет место $\sigma_d \approx \text{rms}$...” (с. 57). К сожалению, модель, заложенная для определения СКО шероховатости σ_d тонких пленок CaF_2 , в диссертации не подкреплена данными измерений, кроме АСМ, а использование эффективной толщины слоя в расчетах требует подгоночного параметра.

В третьей главе описаны теоретические и программные средства, которые использовались в рамках диссертационной работы для расчетов электрических и оптических характеристик МДП-структур с туннельно-тонким слоем CaF_2 на $\text{Si}(111)$. В результате теоретических исследований, проведенных с учетом сохранения большой поперечной компоненты волнового вектора туннелирующего электрона и флуктуаций толщины диэлектрической пленки, впервые удалось поставить и решить несколько сложных физических задач для тонких пленок CaF_2 на $\text{Si}(111)$. К числу **наиболее значимых результатов данной главы** следует отнести систематизацию методик моделирования процессов токопереноса в туннельных структурах МДП с CaF_2 и, особенно, их адаптацию для использования в профессиональных программных пакетах Minimos-NT и ViennaSHE. Однако, остается **непонятным**, чем автор обосновывает возможность применения при решении уравнения Шредингера подхода с одним эффективным квантовым уровнем для учета приповерхностных состояний и простым учетом изгиба зон в Si (формула (3.1) для E_0) в режиме обогащения? К сожалению, в диссертационной работе не представлены, хотя бы для пленки SiO_2 , различия между приближенным подходом из [111], точным подходом [110] на основе самосогласованного решения уравнения Шредингера и Пуассона и подходом автора. Учет этих важных различий и их влияние на расчет зонных диаграмм и последующие вычисления токов в диссертации никак не комментируются, кроме «метод достаточно трудоемок» (с. 48) и «более надежные методы» (с. 49).

В четвертой главе рассматриваются результаты измерений вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадных характеристик структур $\text{Au}/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ в темноте и при наличии внешнего освещения и проводится сравнение с данными моделирования. Показано, что структуры $\text{Au}/\text{CaF}_2/n\text{-(p-)}\text{Si}(111)$ обладают всеми основными электрофизическими свойствами туннельной МДП-

системы. В частности, в них могут быть реализованы режимы обогащения, обеднения и инверсии таким образом, что при прямой полярности напряжения имеют место резкий рост тока и ярко выраженная зависимость его от толщины нанесенного слоя, а при обратной полярности обнаруживается типичная стабилизация тока вследствие нехватки неосновных носителей. Это **подтверждает второе защищаемое положение**. Перенос заряда в исследованных МДП-структурах $\text{Au}/[1\text{-}3\text{нм}]\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ является туннельным и происходит, как это должно быть согласно теории, с сохранением поперечной компоненты волнового вектора электрона. Основанием для данного утверждения является совпадение результатов измерений вольт-амперных кривых и их моделирования, выполненного с учетом такого сохранения, что **доказывает третье защищаемое положение**. Впервые продемонстрировано, что токи обратной ветви ВАХ увеличиваются при внешнем освещении, вызывающем генерацию зона-зона в Si, для всех исследованных структур $\text{Au}/\text{CaF}_2/\text{n-Si}(111)$. Такие туннельные МДП-структуры способны усиливать фототок с коэффициентом усиления до $\sim 10^3$ и могут, в частности, рассматриваться как фототранзисторы, что полностью **обосновывает четвертое защищаемое положение**.

В пятой главе, посвящённой оптической диагностики, **впервые** продемонстрирована возможность изучения электролюминесценции, в том числе видимой, МДП-структур с пленкой CaF_2 номинальной толщины 3-7 монослоев, что связано с инжекцией горячих (до 2-2.5 эВ) электронов из металла в Si(111). На основании анализа спектрального состава излучения в работе сделан вывод об упругом туннельном характере транспорта электронов через слои CaF_2 , что **подтверждает пятое защищаемое положение**. Транспорт без потерь энергии имеет **принципиальное значение** для целого ряда применений слоев CaF_2 , в том числе, в резонансно-туннельных диодах и в качестве эмиттера туннельного транзистора.

Значительный объем и разносторонность проведенных исследований и хорошая воспроизводимость и корреляция всех теоретических и экспериментальных данных, безусловно, говорят о **достоверности** результатов и выводов диссертации Илларионова Ю.Ю. Содержание диссертации и защищаемых положений **отражает результаты опубликованных работ** диссертанта (12 работ в журналах,

рекомендованных ВАК, в том числе иностранных, а также участие во многих конференциях). В ней имеется полное **соответствие поставленных целей и полученных результатов**. Содержание диссертации в целом и смысл ее отдельных глав обладают внутренним единством. Вначале каждой главы очерчивается круг решаемых задач, а в конце – приводятся научные выводы с рекомендациями по их практическому использованию. Автореферат в достаточно полной мере отражает содержание диссертации. Диссертация написана доходчиво, грамотно и аккуратно оформлена. Опечатки и неточности в работе есть, но их не много и они не носят принципиального характера.

Все сделанные оппонентом замечания носят характер пожеланий и не портят общего весьма благоприятного впечатления, которое производит диссертация Илларионова Ю.Ю. в целом. Диссертационное исследование выполнено на высоком научно уровне, а основные результаты и **личный вклад автора**, полно и правильно отражены как в самой диссертации, так и в автореферате. В диссертационной работе Илларионова Ю.Ю. приведены научные результаты, позволяющие квалифицировать их как решение задачи, имеющей существенное значение для физики. Название работы и ее содержание соответствует паспорту научной специальности.

Диссертационная работа отвечает критериям Постановления «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Илларионов Юрий Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 (физика полупроводников).

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник СПб АУ НОЦНТ РАН
goray@spbau.ru


24.12.2014г.

Горай Леонид Иванович

Подпись официального оппонента заверяю:

Проректор по учебной работе СПб АУ НОЦНТ РАН
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН



Жуков Алексей Евгеньевич

