

## ОТЗЫВ

председателя диссертационного совета Вывенко Олега Федоровича 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.

Разработка новых полупроводниковых приборов нанометровых масштабов создает в настоящее время огромный спрос на изучение диэлектрических материалов с высокими значениями диэлектрической постоянной,  $k$ , поскольку они стали основными составляющими для замены обычного слоя  $\text{SiO}_2$  в практически всех устройствах на основе кремния. Среди диэлектриков с высоким  $k$  пентаоксид тантала ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ) является одним из наиболее подходящих материалов, который также обладает достаточно высоким напряжением пробоя, достаточно низкими токами утечки, а также термической и химической стабильностью при высоких температурах. Благодаря этим свойствам  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  нашел применение не только в качестве подзатворного диэлектрика, но и в элементах резистивной памяти, мемристорах, конденсаторах высокой емкости, электрохромных устройствах, катализаторах и сенсорах, оптических покрытиях и многих других. Об **актуальности** проведения исследований этого материала свидетельствует и огромное количество последних публикаций по его получению и свойствам, число которых только за последние два года уже перевалило за тысячу.

Согласно литературным данным пленки указанного материала можно получать весьма разнообразными методами. При этом их свойства довольно сильно варьируются в зависимости как от метода, так и конкретных условий их получения. В заслугу диссертанта следует поставить как собственно выбор метода молекулярного наслаивания как метода получения образцов, который позволяет с наиболее высокой точностью задавать толщины слоев и соотношение компонентов, так и проведенную работу по отработке параметров технологического процесса, завершленную успешным получением стабильных и однородных тонких пленок пентаоксида тантала, пригодных для достижения целей исследований.

Для исследований свойств столь востребованного материала различными авторами применялись все возможные структурно- и элементно-чувствительные, электрофизические, оптические и другие методы. Вместе с тем, его спектральные люминесцентные свойства изучены относительно мало, что обусловлено спецификой большей части его приложений. **Новизна** работы состоит в том, что в исследованиях люминесцентных свойства автором было использовано три различных вида возбуждения, причем один из них – электролюминесценция – впервые.

Следует отметить, что спектральные исследования электролюминесценции, возникающей при протекании тока через диэлектрик, является сложной экспериментальной задачей ввиду наличия быстро протекающих деградационных процессов. Для ее решения на базе имевшегося оптического оборудования советских времен диссертант разработал по сути **новый** программно-аппаратный комплекс, который позволил, благодаря использованию автоматизированного режима, сократить время измерений настолько, что деградации образца не происходило.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Ее русский вариант содержит 117 страниц машинописного текста, 72 рисунка, 3 таблицы и библиографию из 120 наименований. В первых двух главах содержится обзор литературы по исследованным диэлектрикам и физические основы примененных методов исследований.

Результаты оригинальных исследований люминесцентных свойств диоксида кремния и пентаоксида изложены в третьей и четвертой главах. Прослежено изменение спектров люминесценции при различных способах ее возбуждения от толщины слоев диоксида кремния, получены многочисленные данные по структурам Si-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и Si-SiO<sub>2</sub>-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Установлено сходство спектральных компонент при возбуждении протекающим током и электронным лучом, но существенное качественное их отличие при оптическом возбуждении. Получены новые данные по распределению характерных полос люминесценции по глубине исследованных слоев и высказаны аргументированные предположения об их происхождении.

**Достоверность результатов и выводов** диссертации, подтверждается как использованием хорошо апробированных методов и методик, согласием экспериментальных данных, полученных различными методами между собой, а также с имеющимися литературными данными. Интерпретация экспериментальных результатов диссертации базируются на фундаментальных физических законах и признанных результатах теоретических и экспериментальных работ других авторов. Полученные в диссертации результаты существенно расширили фундаментальные представления об оптических свойствах дефектов в исследованных диэлектриках и протекающих электронных процессах, что определяют высокую их как **научную**, так и **практическую значимость**.

При чтении диссертации возникли следующие **замечания**:

1. Во второй главе диссертации описывается установка и методик для нанесения пентаоксида тантала. В ней получен важный результат работы - нахождение условий роста, обеспечивающие получение стабильных и однородных слоев этого материала - температура подложки 200 °С, температура испарителя 70 °С, скорость 4 об/сек.
  - 1.1. Было бы интересно и важно знать в каких пределах варьировались эти параметры и чем отличались пленки, полученные при других значениях указанных параметров.
  - 1.2. В этом же разделе указывается, что получаемый слой Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> может быть аморфным, поликристаллическим или кристаллическим, в зависимости от режимов синтеза и структуры подложки. Однако сведений о структуре пленок, исследованных в работе, не приводится.
  - 1.3. Прекурсоры для получения пентаоксида тантала содержали хлор, который мог входить в состав получаемых слоев в виде примеси. Однако возможность его участия в формировании люминесцентных полос не обсуждается.
2. Интересным результатом работы является существенное отличие спектров фотолюминесценции от полученных при других видах возбуждения. Причина этого различия детально не обсуждается и ее объяснение не включено в выводы диссертации.
3. В тексте диссертации имеется некоторое количество неудачных фраз (например, «Тетраэдр SiO<sub>4</sub> и их взаимное расположение», «спектры КЛ слоев SiO<sub>2</sub> на кремнии с толщиной диэлектрического слоя»). Также ошибочно указано, что элементный анализ полученных пленок был проведен с помощью ионного гелиевого микроскопа Zeiss ORION, а не электронного микроскопа Zeiss Merlin.

Сделанные замечания не затрагивают основных положений и выводов диссертации. Ее результаты опубликованы в признанных научных журналах, докладывались на нескольких научных конференциях и получили высокую оценку у специалистов.

Подводя итог можно сделать вывод, что 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.

Председатель диссертационного совета  
Доктор физ.-мат. наук,  
профессор по специальности физика твердого тела,  
профессор СПбГУ

Вывенко Олег Федорович

26.10.2021

