

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор

РТУ МИРЭА

Н.И. Прокопов

» января 2022 г.



ОТЗЫВ

Ведущей организации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» на диссертационную работу Вахрушева Владимира Олеговича на тему «Закономерности изменений теплопроводности и оптических свойств многослойных покрытий Ag/TiAlN и $\text{Ag/Al}_2\text{O}_3$ », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

Представленная на отзыв диссертационная работа состоит из введения, 5 глав и выводов, изложена на 129 страницах машинописного текста, включает 53 иллюстрации, 6 таблиц, библиографический список из 141 наименования.

Актуальность темы диссертационного исследования

Актуальность исследования следует из разработки современных оптических фильтрующих покрытий, обладающих управляемыми оптическими свойствами в сочетании с высокой износостойкостью и низкой теплопроводностью. Перспективная область практического использования таких покрытий достаточно широка и включает в себя антиотражающие покрытия на элементах солнечных батарей, покрытия зеркал мощных лазеров, покрытия для различных электронных устройств, защищающие их от кратковременных импульсных высокоэнергетических воздействий. Такие покрытия являются тонкоплёночными и имеют сложноорганизованную структуру. В своей работе автор на примере многослойных наноразмерных покрытий предлагает изучение связи механизмов свето- и теплопередачи в условиях перехода структур в наноразмерное состояние. Постановка данного исследования является новой и тем самым подтверждая актуальность выбранной темы.

Анализ содержания работы и научных положений, выносимых на защиту

Представленный автором материал, изложенный в пяти главах, в первой из которых осуществлена оценка современного состояния изучаемого вопроса, сформулирована цель и

задачи, решаемые для ее достижения. Во второй и третьей главе описаны лабораторные экспериментальные установки, методики проведения экспериментов и способы получения исследуемых материалов соответственно.

На защиту автор выносит три научных положения, обоснованные, соответственно, в четвертой и пятой главах. В начале каждой из них автор рассказывает о исследуемых образцах и приводит математические модели, по которым будут проводиться как теоретические расчеты, так и лабораторные эксперименты.

Первое научное положение, доказанное в четвертой и пятой главах, состоит в том, что полосы пропускания и отражения диэлектрических покрытий TiAlN/Ag и $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$ могут быть настроены путем выбора толщины отдельных слоёв для металла и диэлектрика, количества бислоёв, а также путем выбора диэлектрика.

Во втором научном положении утверждается, что плазмон-поляритонное взаимодействие является основным механизмом трансграничной теплопередачи в этих покрытиях, а уменьшение толщины слоёв в исследованных многослойных покрытиях затрудняет распространение плазмонов и фононов как в самих слоях, так и на границах раздела. Экспериментальное обоснование и объяснение аномального уменьшения теплопроводности в многослойных покрытиях TiAlN/Ag и $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$ при различных толщинах металлических слоёв серебра приведено также в главах 4 и 5 диссертационной работы.

Третье научное положение касается изменения влияния квантово-размерных эффектов при уменьшении толщины как отдельных, так и би-слоёв в металл-диэлектрических покрытиях TiAlN/Ag и $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$. Также в главах 4 и 5 показано, что плазмонный резонанс распространяется в объёме металла как симметрично, так и антисимметрично в зависимости от энергии возбуждения и толщины слоёв серебра, окруженных различным диэлектриком. Доказано, что пространственное расщепление плазмонов вместе с квантовыми явлениями в нанослоях серебра подавляет глубину плазмон-поляритонных возбуждений вблизи границы раздела металл-диэлектрик и существенно снижает теплопроводность многослойных покрытий.

Следует отметить, что материалы диссертации изложены логично и корректно. Все научные положения обоснованы автором в достаточной степени, их достоверность сомнения не вызывает. Полученные результаты и данные могут служить основанием для разработки новых типов теплозащитных и светофильтрующих наноразмерных многослойных металл – диэлектрических покрытий. Однако для применения их при изменении одного из слоёв, либо серебра, либо диэлектрика, необходимо дополнительно проводить лабораторные эксперименты.

Научная и практическая ценность диссертации

Результаты данной работы открывают принципиально новый класс функциональных покрытий для изделий, применимых в следующих областях:

- 1) Зеркала высокоэнергетических лазеров с теплоотражающими свойствами.
- 2) Термобарьерные покрытия аэрокосмического применения.
- 3) Свето пропускающие фильтры с настраиваемым окном пропускания электромагнитного излучения в видимой области спектра.

Также определена архитектура светофильтрующих покрытий TiAlN/Ag и $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$, влияющих на пропускание и отражение света от ближней ИК до УФ областей

Значимость полученных автором диссертации результатов для развития физики конденсированного состояния

В результате систематического комплексного исследования свойств многослойных покрытий TiAlN/Ag и $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag}$ в широком диапазоне толщин слоёв и их количества были получены следующие оригинальные результаты:

1) Для серебра при переходе в наноструктурное состояние происходит аккумуляция валентных электронов вблизи уровня Ферми, что затрудняет их переход с валентных уровней на уровни зоны проводимости.

2) В наноструктурном состоянии серебра при толщине пленки $D_q(\text{Ag}) \leq 23,5$ нм существенно снижается концентрация электронов проводимости, осуществляющих металлическую связь в решётке.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведённых в диссертации

В работе получен ряд новых результатов, которые представляют интерес для специалистов, деятельность которых связана с электронной спектроскопией и изучением электронных спектров материалов, находящихся в конденсированном состоянии, а также предприятий, производящих солнечные батареи, либо высокоэнергетические импульсные лазеры.

Результаты и выводы диссертации могут быть рекомендованы для их использования в таких организациях, как Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твёрдого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук (ИФТТ РАН) (Черноголовка, Московская область), Институт кристаллографии им. А.В.Шубникова Российской академии наук (ИК РАН) (Москва), Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Санкт-

Петербург), Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (Зеленоград, Москва), Научно промышленное предприятие «Квант» (Москва), Общество с ограниченной ответственностью «Солнечный Ветер» (Краснодар), Общество с ограниченной ответственностью "СОЛЭКС" (Рязань) и других.

Публикации и апробация результатов работы

По теме диссертации опубликованы 4 работы в рецензируемых международных и российских научных изданиях, входящих в список ВАК Минобрнауки России и изданиях, индексируемых в наукометрических базах Web of Science и Scopus, одна из которых в изданиях квартиля Q1 по SJR. Материалы диссертации докладывались на ряде российских и международных конференций.

Замечания по работе

1. В ходе исследований методами электронной микроскопии довольно полно охарактеризованы состав и структура многослойных покрытий. Значительная часть диссертации посвящена тому, что автор называет «плазменная сканирующая электронная микроскопия», хотя в данном случае корректнее ее называть методом спектроскопии потерь энергии электронов высокого разрешения (HREELS).

2. В разделе материалы для исследований не объясняется, какую структуру имеет покрытие- кристаллическую или аморфную. Это же относится к рис. 4.9.

3. При описании математического моделирования нужно было более подробно описать другие математические модели и преимущество, применяемой в данной работе.

4. Уравнение 2.11 приведено с опечаткой: вместо эффективной массы электрона (дырки) должна быть «эффективная масса частицы, кг»

К сожалению, в диссертации присутствуют отдельные грамматические и стилистические ошибки, которые несколько снижают общее положительное впечатление от работы. Отмеченные замечания носят рекомендательный характер и не снижают существенно в целом высокий научный уровень диссертации.

Заключение по диссертационной работе

Диссертационная работа Вахрушева Владимира Олеговича на тему «Закономерности изменений теплопроводности и оптических свойств многослойных покрытий Ag/TiAlN и $\text{Ag/Al}_2\text{O}_3$ », представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной и содержит

решение научной задачи: определение закономерностей изменения теплопроводности и оптических свойств многослойных покрытий Ag/TiAlN и Ag/Al₂O₃ при изменении толщин индивидуальных слоёв, а также при изменении архитектуры металл-диэлектрического покрытия, что представляет большой интерес для гелиоэнергетики.

По совокупности представленных в диссертации результатов, актуальности, научной и практической значимости, обоснованности и достоверности основных результатов, а также объёму личного вклада автора, данная диссертация отвечает критериям, установленным п.2 «Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор Вахрушев Владимир Олегович заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв рассмотрен и обсужден на научном семинаре кафедры нанoeлектроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» 17 января 2022 г. (протокол №1) и одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации.

Профессор кафедры нанoeлектроники
ИПТИП РТУ МИРЭА,
доктор физико-математических наук



А.Н. Юрасов

Доцент кафедры нанoeлектроники ИПТИП
РТУ МИРЭА,
кандидат физико-математических наук



И.В. Гладышев

Сведения о ведущей организации:

Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА)

Адрес: 119454 г. Москва, проспект Вернадского, дом 78

Телефон: +7 (499) 215 - 65 – 65 доб.1140

Эл.почта: mirea@mirea.ru

Адрес официального сайта в сети «Интернет»: <https://www.mirea.ru/>

Список публикаций организации за 2016-2021 гг.

1. Y.Wang,X. Rong,S. Ivanov,V. Jmerik,Zh. Chen,H. Wang,T.Wang,Peng Jin.,V. Kozlovsky,D.Sviridov,M. Zverev,E. Zhdanova,N. Gamov,V.Studenov. Deep Ultraviolet Light

Source from Ultrathin GaN/AlN MQW Structures with Output Power Over 2 Watt// Advanced Optical Materials Volume 7, Issue 10 1801763. doi.org/10.1002/adom.201801763

2. R. Mozhchil, A. Ionov, S. Bozhko, V. Bozhko, V. Rumyantseva, A. Trigub, A. Menushenkov. Electronic, local atomic structure of lutetium tetraphenylporphyrin: XPS and XAFS spectroscopy studies.// Journal of Physics: Conference Series, Volume 1238. doi:10.1088/1742-6596/1238/1/012002

3. D. Pilipstou, A. Rudenkov, A. Rogachev, X. Jiang, P. Lychnikov, V. Emel'yanov. XPS study of the structure of nitrogen doped a-C film// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 168. doi:10.1088/1757-899X/168/1/012103

4. G. Kuz'micheva, E. Domoroshchina, G. Kravchenko. Design of MFI Type Aluminum- and Titanium-Containing Zeolites// Crystals 2021, 11(12), 1451. doi.org/10.3390/cryst11121451

5. L. V. Safyanova, O. I. Timaeva, G. M. Kuzmicheva, N. A. Lobanova, R. G. Chumakov, E. V. Khramov, R. P. Terekhova & N. V. Sadovskaya. Stabilized Titanium Dioxide Nanoparticles: Preparation and Physicochemical, Photocatalytic, and Antimicrobial Properties// Nanotechnologies in Russia, 2019, v. 14, p.204–215. doi.org/10.1134/S199507801903011X

6. Marina V. Lebedeva*, Alexey P. Antropov, Alexander V. Ragutkin, Nicolay A. Yashtulov. The Electrode Materials Based on Carbon Nanotubes and Polymer Matrix Modified With Platinum Catalysts for Chemical Power Sources. International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 V. 13,24,2018 pp. 16774-16777.

7. A. P. Krasnov, A. V. Naumkin, M. O. Panova, A. Yu. Pereyaslavtsev, N. S. Gavryushenko, V. G. Bulgakov, G. A. Yudin & T. A. Kovaleva. Friction of ultrathin Si, F-containing coatings. J. Frict. Wear 38, 259–264, 2017. doi.org/10.3103/S1068366617040079

8. O. Timaeva, V. Nikolaichik, R. Svetogorov, G. Kuz'micheva. Impact of the production method and diagnostics conditions on the compositions and structure of nanodimensional anatase. Crystalline Materials, V. 235 1.4-5. doi.org/10.1515/zkri-2019-0051.

9. G. Kuz'micheva, O. Timaeva, I. Chikhacheva, R. V. Svetogorov, R. Chumakov, N. Sadovskaya, Pavel V. Dorovatovskii, Raisa P. Terekhova. Composite nanoparticles with titania-poly(N-vinylamide) core-shell structure. Mendeleev Communications, V. 31, 1.1, 2021, P. 24-26. doi.org/10.1016/j.mencom.2021.01.006

10. V. I. Kapustin, I. P. Li, A. V. Shumanov, S. O. Moskalenko & V. I. Svitov. Effect of Microimpurities on the Electronic Structure and Emission Properties of Microwave Device Cathode Materials. Inorganic Materials: Applied Research, v. 10, p.1065–1071, 2019, doi.org/10.1134/S2075113319050113

11. V. I. Kapustin, I. P. Li, A. V. Shumanov, S. O. Moskalenko, A. A. Bush & Yu. Yu. Lebedinskii. Physical Operating Principles of Palladium-Barium Cathodes of Microwave Devices. Technical Physics v.64, p.720–729, 2019. doi.org/10.1134/S1063784219050086

12. Sergei A. Aseyev, Evgeny A. Ryabov, Boris N. Mironov, Anatoly A. Ischenko. The Development of Ultrafast Electron Microscopy. Crystals, 2020, 10(6), 452. doi.org/10.3390/cryst10060452

13. Vladimir A. Gritsenko, Kamil' A. Nasyrov, Igor' P. Prosvirin, Jing Zhang, Konstantin A. Vorotilov, Mikhail R. Baklanov. Critical properties and charge transport in ethylene bridged organosilica low- κ dielectrics. Journal of Applied Physics, 127, 195105, 2020. doi.org/10.1063/1.5145239

14. A. A. Ivanov, V. B. Osvenskii, A. I. Sorokin, V. P. Panchenko, L. P. Bulat , R. Kh. Akchurin. Obtaining Material Based on Copper Selenide by the Methods of Powder Metallurgy. Russian Microelectronics, v. 46, p.545–550,2017. doi.org/10.1134/S106373971708008X

15. V. K. Bitukov, V. A. Petrov, I. V. Smirnov. Influence of the melt thermal conductivity on temperature fields in aluminum oxide upon heating by concentrated laser radiation. High Temperature, v. 55, p.233–238, 2017. doi.org/10.1134/S0018151X17010059